

Системи за биологично отглеждане: баланс въздействия върху околната среда и селскостопанско производство

Hans-Martin Krause^{1,2}, Paul Mäder^{1,2}, Andreas Fliessbach¹, Klaus A. Jarosch³, Astrid Oberson⁴ & Jochen Mayer³

Селското стопанство осигурява храна на все още растящото население, но е и основна движеща сила за ускоряването на глобалните хранителни потоци, изменението на климата и загубата на биологично разнообразие. Политики като стратегията на Европейската Farm2Fork имат за цел смекчаване на въздействието на земеползването върху околната среда чрез насърчаване на биологичното земеделие. За да оценим дългосрочното въздействие върху околната среда на биологичното производство на храни, синтезирахме повече от четири десетилетия изследвания върху агрономичните и екологичните показатели на най-стария системен експеримент за сравнение на органичните и конвенционалните системи за отглеждане на култури (експеримент DOK). Две органични системи (биоорганични и биодинамични) се сравняват с две конвенционални (торене с оборска тор и торене с минерални торове) системи, всички с едно и също сеитбопроизводство на обработваема култура, включително трева и сено, и оборски тор от животни, включени във всички, с изключение на минералната система. Органичните системи използват 92% по-малко пестициди и 76% по-малко минерален азот от конвенционалните системи. Ефективността на използването на азот, като се отчита също и биологично фиксирания азот, е над 85% за всички системи. Биологичното плодородие с използване на оборски тор поддържа или увеличава запасите от въглерод и азот в почвата в дългосрочен план, особено в биодинамичната система, където се тори с компост. Конвенционалните минерално-наторявани култури намаляват запасите от органичен въглерод и азот в почвата. По-високите запаси от органичен въглерод в органичните култури не са довели до увеличаване емисиите на N₂O, които са били основна причина за 56% по-слабо въздействие върху местния климат въз основа на почвата, в сравнение с включената конвенционална система с оборски тор. Системите с органични култури, особено на основата на биодинамичен компост, показва повишаване на здравето на почвата, богатство на микро- и макрофауната и разнообразие на тревите. Най-високи добиви са постигнати в конвенционалната система с оборски тор, с най-високи общи количества внесен отвън азот и подобро здраве на почвата в сравнение с чистото минерално торене. Въпреки това тези ползи идват с цената на по-ниска ефективност на използването на азот и по-високи емисии на N₂O. Въпреки строгите ограничения за използване на препарати добива на суровини от органичните системи достига 85% от добива конвенционалните системи. Ние демонстрираме на полево ниво, че системите за биологично отглеждане с намалени, внесени отвън, хранителни добавки имат по-малко въздействие върху климата и по-голямо биологично разнообразие, като същевременно осигуряват плодородна почва за бъдещото развитие на устойчивите селскостопански производствени системи.

Ключови думи системи с органично отглеждане, хранителен цикъл, добиви, парникови почвени газове, почвено биоразнообразие

1 Department of Soil Sciences, Research Institute of Organic Agriculture FiBL, Ackerstrasse 113, Frick 5070, Switzerland.

2 Hans-Martin Krause and Paul Mäder contributed equally. email: hans-martin.krause@fibl.org; paul.maeder@fibl.org

3 Department Agroecology and Environment, Agroscope, Reckenholzstrasse 191, Zurich 8046, Switzerland.

4 Institute of Agricultural Sciences, ETH Zurich, Eschikon 33, Lindau 8315, Switzerland.

Човешките дейности все повече се превръщат в заплаха за стабилността на земната система¹. Регулаторните способности на Земята, разглеждани от концепцията за планетарни граници, вече са преминати за критични категории въздействия като азотния и фосфорния цикъл, емисии на парникови газове, биологично разнообразие и промяна в земеползването². Земеделските практики, разработени през периода на зелената революция, засилиха производството на храни и направиха възможен растежа на населението в световен мащаб, но са основна причина за влошаване на екосистемите и оказват силен натиск върху тези критични категории въздействия чрез преобразуване на естествени местообитания^{3,4}, ускоряване на хранителните потоци⁵ и емисиите на парникови газове⁶.

В селскостопанските системи азотът и фосфорът често ограничават растежа на културите, като правят регулирането на хранителните цикли в почвите предпоставка за дългосрочна производителност. Въпреки че чисто промишлено, минералните и фосфорните суровини до голяма степен увеличават производството на храни, тяхната свръхупотреба и регионалното концентрирано прилагане на животински тор надвишават регулаторния капацитет на почвите⁷. През 2010 г. азотът навлезе глобално в обработваемите площи чрез минерални торове (98 Tg N), оборски тор (22 Tg N), биологично фиксиране на азота (32 Tg N) и отлагане (17 Tg N)⁸. Глобалната средна ефективност на използването на азот (NUE) е 46% и нарастващите излишъци на азота⁸ ускоряват загубата на азот чрез изпаряване и газообразни емисии, причиняващи еутрофикация на естествените екосистеми и емисии на парникови газове⁹⁻¹¹. Производството на минерални азотни торове изисква големи количества енергия и представлява ~ 2.1% от световните емисии на парникови газове¹². По този начин фокусът върху алтернативните суровини за азот чрез биологично фиксиране на азота, за да се гарантира снабдяването на културите с азот, се счита за ключов елемент за устойчивите селскостопански системи.

Подобреният фосфорен цикъл в обработваемата система е от решаващо значение за дългосрочното поддържане на плодородието и производството на култури. Износът на фосфор от системата почва-растение може да бъде неутрализиран само чрез бавния процес на минерално атмосферни условия или изисква заместване чрез външно добавяне чрез животински (или човешки) тор или минерални скали¹³. Постоянният поток на фосфор в минерално торени системи от скални отлагания в почви, в сладководни тела и в океани създава постоянна заплаха за недостиг на фосфор¹³. Също така, регионалната концентрация на повечето отлагания на минерален фосфор^{14,15} прави земеделието, ползващо минерални торове, зависимо от световните пазари на минерални торове¹⁶. По този начин повишаването на ефективността на хранителните вещества с помощта на азота и фосфорния цикъл е най-голямото предизвикателство за устойчивите селскостопански системи и трябва да се наблюдава за азотните и фосфорните промени в почвените запаси.

Тъй като почвите действат като регулатори на хранителните вещества, те също имат важна функция в освобождаването и улавянето на почвените парникови газове, въглероден диоксид (CO_2), азотен оксид (N_2O) и метан (CH_4)^{17,18}. Загубата на почвена органична материя причинява емисии на CO_2 и е една от най-големите заплахи за здравето на почвите, тъй като намалява капацитета им да съхраняват хранителни вещества, да осигуряват местообитание за почвения живот и да стабилизират почвите срещу ерозията¹⁹. N_2O и CH_4 са газове с много ниска концентрация, но с оценъчен потенциал за глобално затопляне 273, 28 пъти по-голям от този на CO_2 ⁶. Емисиите на N_2O от селското стопанство произтичат главно от наторени почви и се случват в краткотрайни пикови събития при азотно торене или почвена обработка (оран), предизвикваща азотна минерализация. Наличието на азот е най-важният фактор, предизвикващ емисиите на N_2O , но също така и почвената концентрация на органичен въглерод, състоянието на кислорода в почвата и рН на почвата могат да повлияят на образуването на N_2O и усвояването му²⁰. Емисиите на земеделски CH_4 произхождат главно от отглеждане на преживни животни и от пасищни почви, докато добре отцедените обработваеми почви обикновено действат като утаител за CH_4 ²¹.

Изменението на климата ускорява промяната на биологичното разнообразие, която може да доведе до изчезването на видове, а системите с ниско биологично разнообразие имат по-малък потенциал да се адаптират към екстремните климатични условия³. Чрез засилване на селскостопанското производство и загуба на естествени местообитания поради промени в земеползването, селското стопанство е основният причинител за загубата на биологично разнообразие²². Опазването на биологичното разнообразие и реставрацията се разглеждат като мерки за поддържане и повишаване на устойчивостта и функционалността на земите²³. Тъй като повече от половината от земната обитаема повърхност е трансформирана в земеделска земя, съществуват нарастващи опасения поради въздействието върху околната среда на селскостопанските практики, свързани със спешността на препроектираните и устойчиви селскостопански практики^{24,25}. Ключовото предизвикателство за бъдещите селскостопански системи е да се произвежда достатъчно храна за все още растящото население, като същевременно се минимизира въздействието на селскостопанското производство върху околната среда, особено върху хранителните цикли, загубата на биологично разнообразие и емисиите на парникови газове.

Поради акцента си върху дългосрочното плодородие на почвата и избягването на минералните торове и химическата растителна защита биологичното земеделие се възприема като екологична алтернатива на конвенционалните системи за отглеждане на култури. От земеделската земя 1,6% в световен мащаб (74,9 милиона ха) и 3,4% (16,5 милиона ха) в рамките на Европейския съюз понастоящем се управляват органично²⁶. Световният пазар на биологично произведени продукти расте²⁶ и има допълнителни политически усилия за увеличаване дела на органичните системи. Например стратегията на ЕС Farm2Fork цели 25% от земеделските земи да бъдат биологично управлявани до 2030 г.²⁷ Органичните системи разчитат на симбиотична фиксация на азота, органични изменения, ефективни цикли на хранителни вещества и саморегулиращи се процеси за хранене и растителна защита на културите²⁸. Чрез избягване на синтетични суровини под формата на торове и пестициди, органичните системи за отглеждане произвеждат по-ниски добиви в сравнение с конвенционалните системи^{29,30}. Въпреки това органичните системи показват благоприятен ефект върху околната среда, върху плодородието на почвата и органичните вещества в нея^{31,33}, рентабилност, хранителна стойност, биологично разнообразие и качество на водата³⁴. В съответствие с това едно неотдавнашно проучване показва повишена мултифункционалност и осигуряване на регулиране на екосистемните услуги в органичните системи и щадяща обработка на почвата, въз основа на кратък полев експеримент³⁵. Последният метаанализ на екологичните и агрономическите показатели на органичните и конвенционалните системи за отглеждане на култури все още показва висока несигурност, особено за цикъла на хранителните вещества, емисиите на парникови газове и дългосрочното въздействие върху стабилността на добива и нуждите на земята³⁴.

Настоящото проучване осигурява количествена база за дългосрочния ефект на органичните и конвенционалните системи за отглеждане на култури върху критичните екосистемни услуги чрез обобщаване на повече от четири десетилетия изследвания чрез най-стария в света опит за сравнение на системите за отглеждане на култури - експеримента DOK³¹. Този експеримент сравнява две органични (био-динамични: BIODYN; био-органични: BIOORG) с две конвенционални системи за отглеждане на култури (една от тях с оборски тор и минерални торове: CONFYM, наричана също интегрирана система; една само с минерални торове: CONMIN) от 1978 г. (Таблица 1, Фиг S1). Системите за отглеждане се различават основно по отношение на стратегията за растителна защита и торене, включително степента на интензивност при преработката на оборски тор.

Нашите научни цели бяха да определим i) количествено промените в запасите от азот и фосфор в почвата по отношение на балансите на хранителните вещества, за да определим въздействието на системите за отглеждане на хранителни вещества върху хранителните потоци, ii) да оценим въздействието върху почвения климат на системите за отглеждане на култури чрез сумиране на промените в запасите от въглерод в почвата с резултатите от

кампанията за измерване на емисиите на парникови газове, iii) да определим въздействието на системите за отглеждане върху биологичното разнообразие на почвата чрез свързване на измерените биологични показатели за здравето на почвите с ключови резултати от изследванията за биологичното разнообразие на почвата, iv) да определи количествено селскостопанската производителност в органичните и конвенционалните системи за отглеждане на култури, и v) да групираме показателите в критичните категории въздействия на селскостопанските системи, като например биологичното разнообразие, здравето на почвата, климата, хранителните баланси и добивите, за да се обсъдят компромисите и полезните взаимодействия, както и относителната ефективност в системите за биологично и конвенционално отглежданите култури.

Резултати

Въздействие на системата за отглеждане на култури върху хранителните баланси

За да се оценят специфичните хранителни потоци в системата за отглеждане на култури, балансите на хранителни вещества бяха сравнени чрез промените в запасите от азот и фосфор в почвата за 42 години (Фиг. 1). Средните, получени от торене, количества на общо азот, минерален азот, фосфор и калий в органичните системи, BIODYN и BIOORG, бяха съответно 36%, 76%, 36% и 27% по-ниски в сравнение с конвенционалните системи, CONMIN и CONFYM (Tab 1). Поради по-високите загуби по време на съхранението на оборски тор и компостирането, количеството органични вещества е средно 19% по-ниско в органичните системи в сравнение с CONFYM (Tab 1). Средната годишна фиксация на азот е основен принос във всички системи за отглеждане на култури (99 до 122 kg ha⁻¹ a⁻¹) и надвишава всички други източници азот в BIODYN и BIOORG (Tab 1). Въпреки високата загуба на азот при прибиране на продукцията (> 210 kg ha⁻¹ a⁻¹), входящите количества, надвишават загубите, така че азотните баланси, бяха положителни за всички системи (Фиг. 1, Tab 1). Системите за отглеждане на култури, които получаваха органични суровини чрез течен и твърд оборски тор запазваха (BIOORG, CONFYM) или увеличаваха (BIODYN) запасите от азот в горния слой на почвата (Fig. 1C). Въпреки добрия азотен баланс (+ 2 kg N ha⁻¹ a⁻¹), CONMIN почвите губят 10 kg N ha⁻¹ a⁻¹. В системата BIODYN се наблюдава повишаване на запасите от азот в почвата, въпреки че системата е получила по-малко общи количества азот в сравнение с CONFYM и CONMIN. Неочаквано висока ефективност при усвояването на азот се наблюдава съответно 99% в CONMIN, 85% в CONFYM и ~ 90% в органичните системи (Tab 1). Влагането на фосфор е с 36% по-нисък в сравнение с конвенционалните системи, но износът на фосфор от полето от събраните продукти се различава само леко и варира от 33 kg ha⁻¹ a⁻¹ (BIODYN) до 39 kg ha⁻¹ a⁻¹ (CONFYM) (Tab 1). Фосфорните баланси са леко положителни в CONMIN, дори, в рамките на допустимото ниво на грешка, и в CONFYM и леко отрицателни в BIODYN и BIOORG (Tab 1). Фосфорните запаси в горния слой на почвата непрекъснато намаляват във всички системи, докато наличният в растенията фосфор намалява главно в началото на полевия експеримента в периода на ротация на културите 1 (CRP1) и CRP2, дори до по-голяма степен при BIODYN и BIOORG (Fig. 1D и E).

Видове тор	Органична маса Kg OM/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Общо N от тор Kg N/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Минерален N от тор Kg N/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Симб. N фиксация Kg N/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Общо P от тор Kg P/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Общо K от тор Kg K/ ha ⁻¹ a ⁻¹		Растителна защита Kg ai/ ha ⁻¹ a ⁻¹	
	mean	se	mean	se	mean	se	mean	se	mean	se	mean	se	mean	se
BIODYN оборски, компост	1882	± 72	94	±3	26	±1	122	±7	24	±3	177	± 17	0.1	< 0.1
BIOORG оборски	2032	± 123	96	±8	30	±4	119	±7	25	±1	184	± 20	0.3	± 0.1
CONFYM минерален, оборски	2314	± 78	171	±6	113	±6	117	±7	38	±2	248	±7	2.8	± 0.5
CONMIN минерален	–	–	121	±6	121	±6	99	±8	38	±2	246	±9	2.6	± 0.5

Table 1. Видовете торове и средногодишните количества "mean" и стандартната грешка "se" на органична маса, азот (N), фосфор (P), калий (K) и растителна защита през периоди на ротация на културите 2 - 6 (1985-2019) за двете конвенционални (базираната само на минерални торове CONMIN и използващата оборски тор CONFYM) и двете органични (биоорганична BIOORG и биодинамична BIODYN) агросистеми. "OM" се отнася за органичната маса; "ai" се отнася за еквивалента на активната съставка; "Мин. тор N" се отнася за дела на минералните азотни форми в синтетичните и оборските торове включени в "общо N от тор". "Симбиотична N фиксация" бе оценена като използвахме ¹⁵N изотопните проучвания в детелина⁸⁶ и соя^{52,53}.

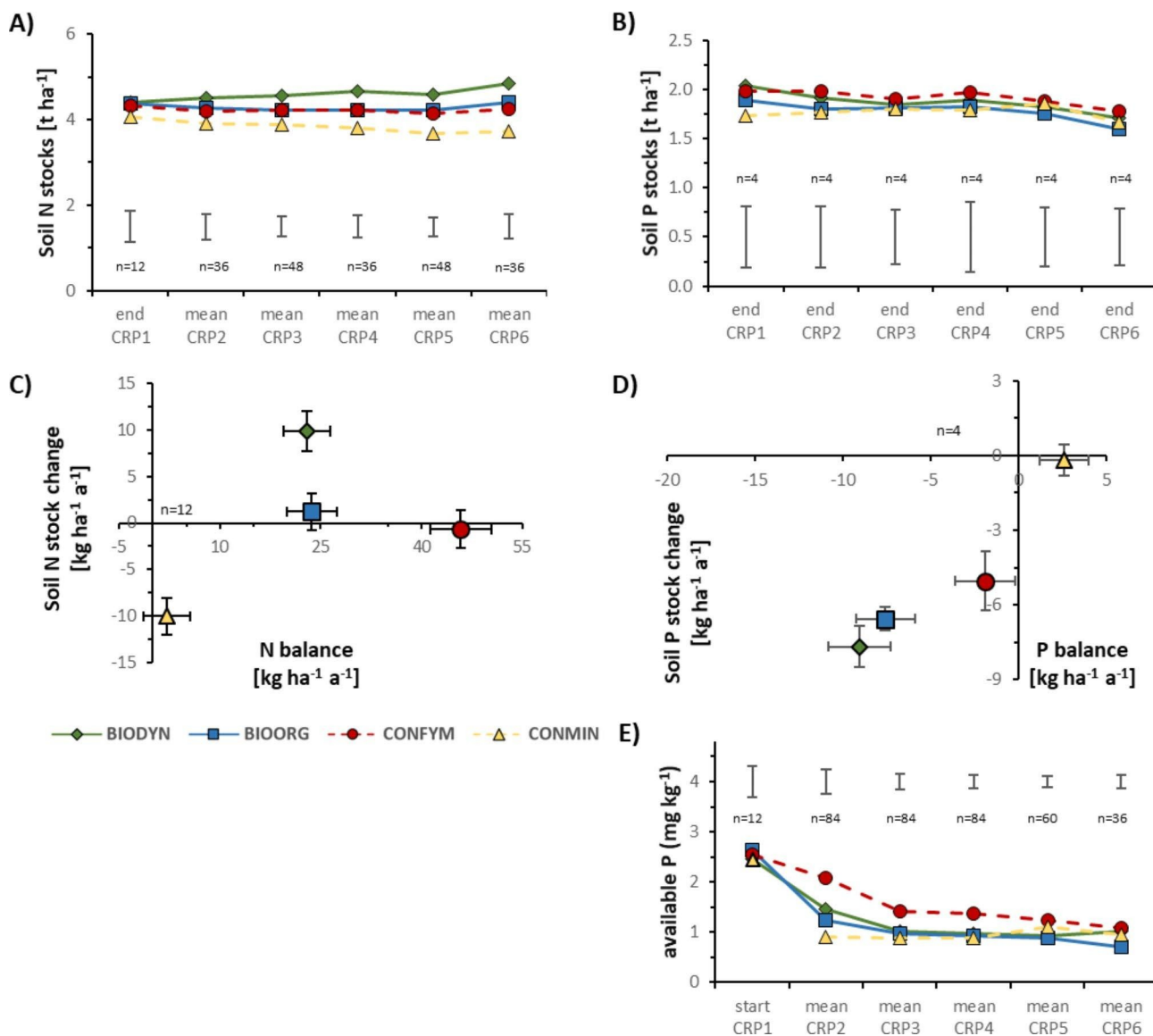


Fig. 1. Връзка между баланса на азота и фосфора и промените в запасите от азот и фосфор в почвата и разтворимия (бионаличен) фосфор, повлиян от системите за отглеждане. Панелите (A), (B) и (E) показват времевото развитие на запасите от азот и фосфор в почвата, както и наличното съдържание на фосфор в обработваемия слой (0 - 0.2 m дълбочина на почвата) за периода на ротация на културите (CRP). Баровете за грешки представят най-малката съществена разлика в системата за даден CRP. Префиксите “start” и “end” се отнасят за данни от една конкретна година, докато представката “mean” се отнася до множество измервания в съответния CRP. Панел (C) показва средната стойност и стандартното отклонение на промяната на запасите от азот в почвата и баланса на азота от 2-ра до 6-та CRP (1984 – 2019). Балансът на азота включва всички отделения чрез прибиране на реколтата и добавяния чрез торене, атмосферно отлагане, семена и фиксиране на азота. Панелът (D) показва средна стойност и стандартно отклонение на промените във фосфорните запаси и фосфорния баланс от 2-ра до 6-та CRP (1984 -2019). Панел (B) и (D) представят данни само за итерация.

Почвени парникови газове

Запасите от почвен въглерод се увеличават в системата BIODYN, остават стабилни в BIOORG и CONFYM и намаляват в CONMIN (Фиг. 2A). Следователно средните годишни промени на органичния въглерод в почвата, изразени като еквивалент на CO₂, са отрицателни за BIODYN и положителни за CONMIN (Фиг. 2B). В края на CRP6 разликите в почвените органични въглеродни запаси са най-видими в горния слой почва (0 - 20 см), но също така почвения слой от 20 - 30 см показва повишени въглеродни запаси в BIODYN в сравнение с всички останали системи (Fig 3). N₂O емисиите управляват въздействието върху локалния климат в района на културите, с най-високи емисии в CONFYM, последвано от CONMIN,

BIOORG и след това BIODYN (Фиг. 2C). Най-ниски N_2O емисии се получиха в BIODYN въпреки нарастващите почвени запаси от органичен въглерод.

Големината на емисиите на N_2O до голяма степен отразява общите количества внесен азот, които са по-големи от средните количества торове по време на производството на царевица, особено в CONFYM. Емисиите на CH_4 от почвата са незначителни за всички системи (фиг. 2C). Изразени на годишна база, въздействието върху климата за всички почвени парникови газове е 56% по-ниско в органичните (BIODYN и BIOORG) в сравнение с конвенционалните (CONFYM и CONMIN) системи.

Почвеното биоразнообразие и почвеното здраве

Като се има предвид мащабът от 100 m^2 на възпроизводим дългосрочен полеви експеримент, оценката на биологичното разнообразие беше ограничена до разглеждане на биологични обекти в почвата и богатството на видовете като мярка за разнообразие на общността. За плевелите, почвените бактериални генотипове и гилдията на почвената фауна, като например карабиди, паяци и земни червеи, в органичните системи намираме много по-голямо разнообразие (Фиг. 3). Малки разлики са установени за гъбични генотипове и нематоди, докато богатството на енхитриди и микробни фенотипи е по-голямо в системите, получаващи органични торове в сравнение с минералното торене в CONMIN. Биологичните показатели бяха оценени така, че да характеризират въздействието на системите за отглеждане върху здравето на почвата³⁶. Почвената микробна биомаса от въглерод и азот се увеличават съответно $CONMIN < CONFYM < BIOORG < BIODYN$. Същият модел е открит и при дехидрогениращата активност, която показва микробен цикъл на въглерода. Алкалната фосфатаза, която е основната причина за биологично отделяне на биологично свързания фосфор, е подобна в BIOORG и CONFYM, а най-ниските и най-високите стойности се получиха съответно за CONMIN и BIODYN (Фиг. 3).

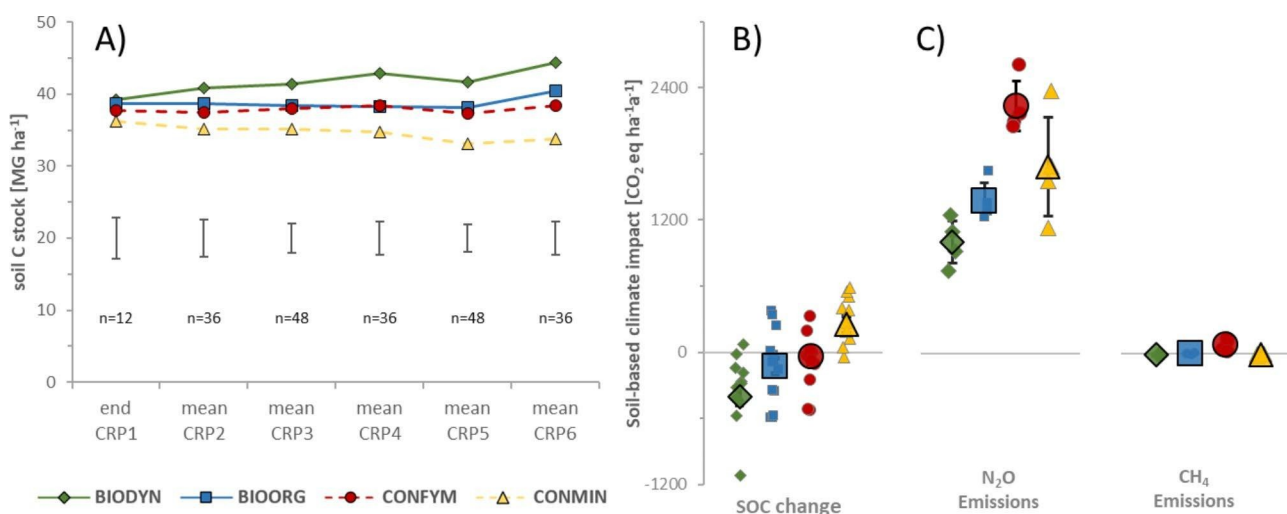


Fig. 2. Почвени емисии на парникови газове, както са повлияни от системите за отглеждане на култури. Панел (A) показва промяната на органичните въглеродни запаси в почвата от 2-ри до 6-и период на ротация на културите (CRP, 1984 - 2019). Баровете за грешки представляват минималната значителна разлика в системата в даден CRP. В панел (B) най-малките средно квадратични стойности за годишните запаси на въглерод в почвата (SOC) се променят от 2-ри до 6-и CRP, изразени като еквиваленти на CO_2 ($n = 12 + SE$). (C) Най-малките средно квадратични стойности за годишното количество емисии от N_2O и CH_4 по отношение на люцерната, царевицата и зеления тор в рамките на 6 CRP⁵⁷, изразени като еквиваленти на CO_2 ($n = 4 + SE$). Малките символи в панел (B) и (C) представляват индивидуални наблюдения от експериментални парцели. Границата на системите за емисии на парникови газове е полевият обект.

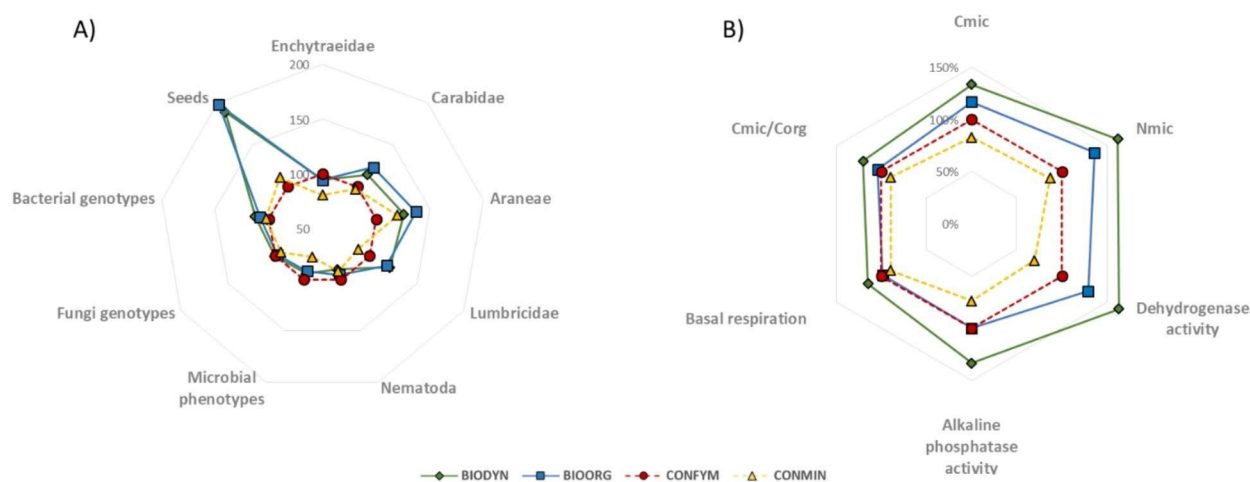


Fig. 3. Почвата като местообитание. (А) Богатство на биологичните общности: почвената фауна по отношение на CONFYM (100%), както е докладвано в проучвания, изследващи разнообразието на микробите, мезо- и макрофауна и почвените банки от семена, в експеримента DOK. (В) Показатели за биологично качество на почвата по отношение на CONFYM (100%): микробна биомаса въглерод (Cmic), микробна биомаса азот (Nmic), дехидрогеназа активност, алкална фосфатаза активност, базално дишане и отношението Cmic/Corg. Източници на проучванията^{63,76,87-90}.

Въздействие на системите за отглеждане върху добивите

Производството на храни е основната цел на селскостопанския сектор и постигането на високи и стабилни добиви е показател за икономическата жизнеспособност на селскостопанските системи. През целия експериментален период средните добиви на царевица за силаж (*Zea mays* L.), зимна пшеница (*Triticum aestivum* L.) и картофи (*Solanum tuberosum* L.) са били 12%, 20% и 32% по-ниски в биологичните в сравнение с конвенционалните системи (Фиг. 4). Добивите на люцерна в органичните системи са с 9% по-ниски, докато добивите на соя (*Glycine max* L.) са сходни (Фиг. 4). Тенденциите на добива с течение на времето са сходни във всички системи за отглеждане на култури и показват увеличаване при добива на пшеница. Въпреки по-ниските количества тор и липсата на минерални торове и синтетични пестициди, намаляването на добива при органични системи (BIODYN и BIOORG срещу CONFYM и CONMIN) усреднено за тези пет култури за 7-годишния период на ротация е 15% (Фиг. 4)³⁷.

Относителни показатели за агрономично и екологично качество

Относителни показатели за ефективност бяха определени на критични категории въздействия като добиви, здраве на почвата, климат, биологично разнообразие и баланси на хранителните вещества (Фиг. 5). Въпреки че показателите, свързани с добива, очевидно бяха по-високи в конвенционалните системи, показателите за биологичното разнообразие, здравето на почвата и климата бяха положително повлияни в системите за биологично отглеждане. Въпреки това трябва да се отбележи, че положителното въздействие на органичните системи върху здравето на почвите и свързаните с климата показатели се дължи главно на биодинамичната система. Показателите, свързани с хранителните баланси, показаха смесени резултати. Показатели, свързани с азота, като например N баланса или ефективността на използването на азот, се различават главно между двете конвенционални системи CONFYM и CONMIN, докато BIOORG и BIODYN са междинни. Въпреки това повечето отрицателни фосфорни баланси в органичните системи са основен фактор за цялостната по-ниска ефективност на органичните системи за тази категория въздействие (Фиг. 5).

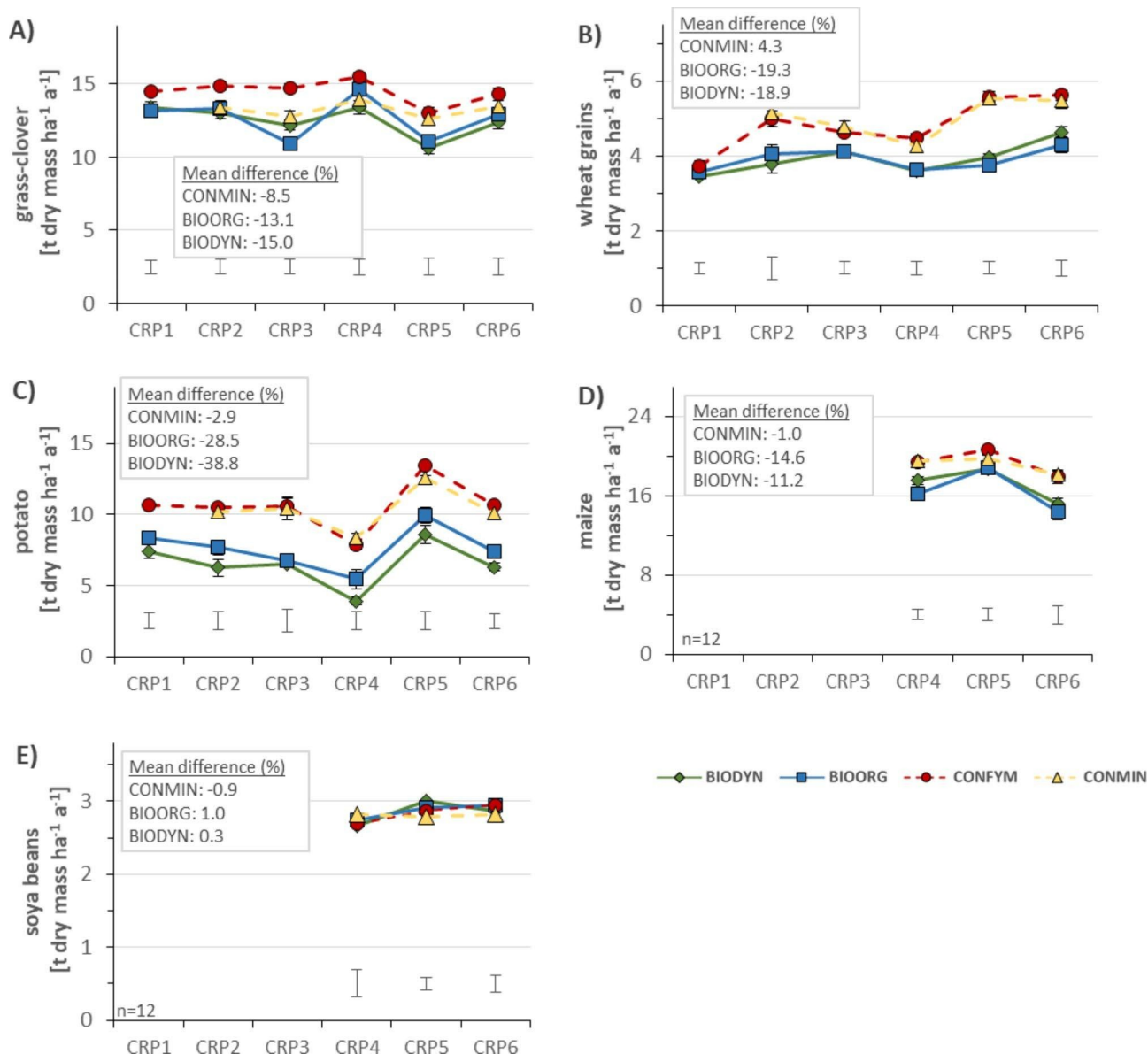


Fig. 4. Mean differences in percentages refer to relative yield differences to CONFYM.

Разработване на култури в продължение на шест периода на ротация (CRP) на петте основни култури (A) люцерна (B) зима-пшеница, (C) картофи, (D) царевица и (E) соя. Соята и царевицата са отглеждани за първи път в 4-ти CRP. Данните показват средната доходност за CRP, а баровете за грешки представляват минималната значителна разлика в системата за даден CRP. Данните за системата CONMIN започват от втория CRP, понеже беше оставена неторена преди това. Средните разлики в проценти показва относителната разлика в добивите спрямо CONFYM.

Дискусия

Бъдещите селскостопански системи трябва да осигурят достатъчно устойчиво производство в променяща се околна среда и ще бъдат изправени пред допълнителни предизвикателства като намаляване на качеството на почвата, замърсяване на околната среда, загуба на биологично разнообразие и адаптиране към изменението на климата. Небалансираните хранителни потоци критично надвишават саморегулирания капацитет на земната система, с глобално увеличаване на фосфора и използването на азот^{2,38} и повишаване на излишъка на азот, по-специално в региони с прекомерно добавен азот^{39,40}. В това проучване измерихме положителните азотни баланси за конвенционалните и дори органичните системи, където азотът се получава изключително от фермите с вътрешно рециклиран оборски тор и биологично фиксиране на азота и не се прилагат изкуствени азотни торове. По-високите количества азот от биологично фиксиране на азота в сравнение с влагането на торове в органичните системи се определят от основната роля на бобовите култури за осигуряване на

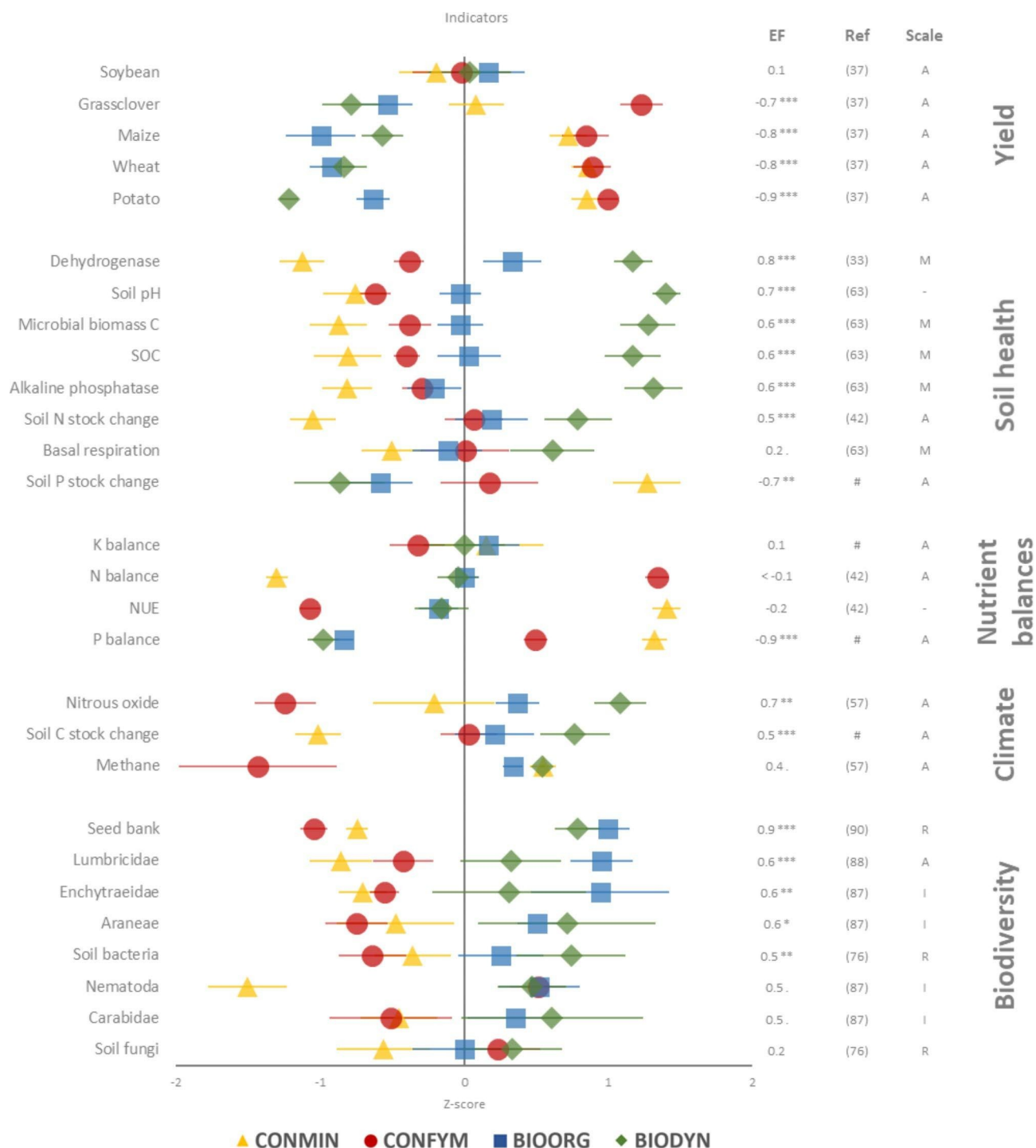


Fig. 5. Относителни показатели на системата въз основа на z-трансформация и стандартни грешки на 28 показателя, определени за критични категории въздействие и класирани според размера на въздействието (EF) между органични (BIOORG и BIODYN) и конвенционални (CONFYM и CONMIN) системи. Въздействието на селскостопанската система е оценено от еднопосочна Anova със * $p < 0, 05$, ** $p < 0, 01$ и *** $p < 0, 001$. Емисиите на азотен оксид и метан бяха инверсно изчислени, което води до положителни z-оценки за ниските емисии. Мащабът на индикаторите варира между по територия (A) и по маса (M), докато богатството (R) и броят на индивидите (I) беше използвано за оценка на биологичното разнообразие. За pH на почвата и ефективността на използването на азот (NUE) нито един от тези мащаби не е приложим. Допълнителни подробности за всеки показател могат да бъдат извлечени от цитираните публикации. # се отнася до непубликувани данни и подробности са дадени като допълнителна информация.

положителен азотен баланс и по този начин на храненето на растенията в органичната система за култивиране, дори когато се осигурява от 1.4 единици добитък на хектар тор. Като цяло са необходими положителни азотни баланси, за да се поддържа растежа на културите,

тъй като възникват неизбежни загуби чрез летливост и изветряне. Въпреки това сравнението на специфичните за системата промени в азотните запаси и балансите на азота показва фундаментално взаимоотношение между ефективността и дългосрочното здраве на почвата. Високата ефективност на използването на хранителни вещества (NUE) в системите с органично управление показва, че по-голямата част от азота от течния и твърдия оборски тор и фиксирания азот са станали достъпни за растенията в дългосрочен план и по този начин показват огромен потенциал за оптимално управление на наторяването за ефективно използване на азотните ресурси. Изключително висока NUE, както се наблюдава в CONMIN, противодейства на задържането на азот в почвата, ограничава натрупването на органични вещества в почвата в дългосрочен план и показва загуба на азот от почвата ⁴¹. В действителност, загуба на азот от почвата се наблюдава само в минерално торени почви в CONMIN, които загубиха $10 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ въпреки изравнения азотен баланс ($2 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), докато стабилни или нарастващи запаси от азот в почвата са наблюдавани за всички органично наторявани системи. Като цяло, висока NUE в експеримента DOK може да бъде свързан с благоприятните педоклиматични условия на дълбоката лъсоча почва с добър капацитет за задържане на вода и достатъчното валежи ⁴². Освен това, висок износ на азот в реколтата може да добави към наблюдаваните NUE, с най-голям износ от люцерна ($393 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), последвано от царевица ($224 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), соя ($193 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$), зимна пшеница, включително слама ($161 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) и картофи ($117 \text{ kg N ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$) ⁴². Излишъкът от азот от $47 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ в CONFYM не води до увеличаване на запасите от азот в почвата, което означава висок потенциал от загуби на азот и последващи въздействия върху околната среда ⁹. Наистина, най-високите емисии N_2O произтичат от системата CONFYM, получаваща органични и минерални азотни торове. Нарастащите запаси от почвен азот в BIODYN, които получават по-малко азот в сравнение с CONFYM и CONMIN, разкриват положителния ефект от компостирането на оборски тор за дългосрочното натрупване на почвен азот. По този начин нашето проучване показва, че заместването на минералния азот с култури фиксиращи азота и под формата на оборски тор може да бъде постигнато в органичната система за отглеждане на култури, осигурявайки стабилни добиви в продължение на няколко десетилетия. Въпреки това силната зависимост от биологичното фиксиране на азота в биологичните ферми често се придружава от загуба на фосфор, тъй като органични торове, способни да балансират нуждите на културите от азот и фосфор, все още са оскъдни ⁴³. Наличието на азот и де-факто прехвърлянето на хранителни вещества от конвенционалните към органичните стопанства ⁴⁴ могат да ограничат широкото преминаване към системи за биологично отглеждане. Въпреки това, с 1.6% от глобалната органична площ на културите ²⁶ и излишъците от азот в националните и глобалните баланси на култивираните площи ⁸, тази граница все още не е достигната ⁴⁵. Ефективността на фосфора е основен въпрос за селскостопанското производство, тъй като 30% от световните култури страдат от дефицит на фосфор с намаляване на запасите от фосфор в почвата ⁴⁶. Тук можем да покажем, че намаляващите фосфорни запаси в орния слой не се ограничават до органичните системи, но се случват и в конвенционалните системи. Намаляването на запасите от фосфор не може да се обясни само със загуба чрез културите, тъй като фосфорните баланси (напр. CONFYM) са само леко отрицателни. Потъването на фосфор в по-дълбоки почвени слоеве ⁴⁷ и извличането на разтворен фосфор може да са допринесли за намаляващите запаси от фосфор в почвата ⁴⁸ и също така биха обяснили рязкото намаляване на наличния фосфор в началната фаза на полевия експеримент. Дори в системата CONMIN с положителен фосфорен балансв началото на полевия експеримент не можа да се наблюдава засилено усвояване на фосфор и износ чрез култури ⁴⁷. Въздействието на по-ниските фосфорни суровини върху храненето на растенията в органичните системи може отчасти да бъде компенсирано от повишената активност на фосфатазата, освобождавайки органично свързания фосфор и евентуално предоставйки го за ползване от растенията. Действително бе установено, че биологично управляваните почви имат по-висока степен на брутна органична минерализация, отколкото почвите под CONMIN ⁴⁹, но

органичният фосфор, добавен чрез торене, като цяло се минерализира бързо, тъй като не са открити разлики в органичните фосфорни запаси и състав⁵⁰. Също така, по-голямата честота на mycorrhiza в органичните системи може да допринесе за производството на фосфор от културите⁵¹. В органичните системи запасите от фосфор в почвата намаляват в по-голяма степен, отколкото в конвенционалните системи, което подчертава необходимостта от допълнителни фосфорни торове за биологичното земеделие. Въпреки това, растителните тъканни анализи, досега не показват симптоми на недостиг на фосфор във всяка система на DOK експеримента^{52,53}. Въпреки това намаляването на запасите от фосфор в орния слой в конвенционалните и органичните системи за отглеждане подчертава фундаменталната необходимост да се използват все още неизползвани фосфорни ресурси, за да се избегне обедняването на фосфора в дългосрочен план. Особено рециклирането на фосфор в регионален мащаб, който има за цел да свърже селските и градските фосфорни потоци, се обсъжда като най-обещаващ подход за намаляване на загубите на фосфор в хранителната система⁵⁴.

Земеделският сектор има основен принос за общите емисии на парникови газове⁶ и селскостопанските системи трябва да се адаптират към променящия се климат. Секторът може да допринесе за намаляване на емисиите на парникови газове чрез стабилизиране на почвените органични въглеродни запаси и намаляване на емисиите на N_2O и CH_4 ¹⁸. Наблюдението, че емисиите на парникови газове от почвата са били главно резултат от емисиите на N_2O във всички системи за отглеждане на култури, подчертава необходимостта от оптимизирано управление на азота за устойчиво селскостопанско производство. Нарастващите почвени органични въглеродни запаси, наблюдавани при органично торени системи, се обсъждат като технология за отрицателни емисии на въглероден диоксид и по този начин ефективно компенсиране на отделяния въглероден диоксид^{55,56}. Въпреки факта, че емисиите на N_2O се дължат главно на хетеротрофична активност на почвени микроби²⁰, наблюдават се по-ниски емисии на N_2O в органични системи едновременно с повишени запаси от органичен въглерод в почвата и увеличена микробна биомаса и активност. По-ниските емисии на N_2O най-вероятно са свързани със стабилното рН на почвата и количеството и вида на азотните торове⁵⁷. Не можахме да потвърдим хипотезата, че повишения почвен органичен въглерод се компенсира чрез повишаване на емисиите на N_2O ⁵⁸. Вместо това нашите данни сочат, че емисиите на N_2O , а не промените в почвеното съдържание на органичен въглерод, са увеличили въздействието върху локалния климат и че намаляването на емисиите на N_2O може да върви заедно с подобрените запаси от органичен въглерод в почвата, за да се намали общото въздействие върху климата в областта на биологично управляваните почви. По същия начин, Autret et al. (2019)⁵⁹ установи по-слабо въздействие върху климата на биологичното земеделие сравнено с конвенционалното земеделие в продължение на 19-години на територия с органична система, която дори действа като отток за емисии на парникови газове от почвата. Въпреки това, нивата на азотно торене са драстично по-ниски в органичната система със средно годишно внесен азот от тор от $9 \text{ kg ha}^{-1} \text{ a}^{-1}$ и много по-голямо намаление на добивите⁵⁹. В съответствие с нашето проучване, глобалния мета-анализ показва по-ниски, мащабирани по площ, N_2O емисии в органичните в сравнение с конвенционалните системи⁶⁰. Не бяха установени значителни разлики в емисиите, мащабирани по добив, в експеримента DOK⁵⁷ и би било необходимо увеличение на добива с 9% в органичните системи, за да се урівновесят емисиите, с мащаб по добив, като глобална база, за да се намали допълнителното търсене на земя в биологичното земеделие⁶⁰. Докато въздействието на хранителните системи върху климата се определя от множество фактори като плътност на запасите, потребителските хранителни режими и хранителните отпадъци⁶¹, нашето проучване показва, че приемането на органична селскостопанска практика намалява емисиите на парникови газове и въздействието на производството на храни в района.

Нарастващите почвени органични запаси от въглерод в органично торените системи предлагат също и ползи за здравето на почвата и биологията на почвата^{62,63}. Въпреки това,

концентрацията на почвения органичен въглерод се развива бавно и отне 22 години, докато се наблюдаваха значителни разлики между BIODYN и CONFYM⁶³. По-специално, компостирането на оборски тор в BIODYN доведе до по-високи загуби по време на подготовката на органични торове и 19% по-малко евложена органична маса в сравнение с общо внесеният оборски тор в CONFYM, което подчертава дългосрочната стойност на компостирането за управление на въглерода в почвата. Освен това резултатите показваха, че подобрените показатели за здравето на почвата са значително по-високи в BIODYN в сравнение с BIOORG. Следвайки подхода за сравнение на системите не можем напълно да разграничим факторите, водещи до тези различия, но компостирането и използването на оборски тор в BIODYN и използването на мед (метал) в BIOORG може да допринесе за наблюдаваните разлики. От друга страна, намаляването на запасите от органичен въглерод в почвата в CONMIN може да е свързано с липсващия внос на органични вещества в сравнение с органично торените системи. Подобреното съдържание на органичен въглерод в почвата в органично управляваната система също е демонстрирано в глобален мета-анализ³² и други казуси³⁵. Докато засиленото съдържание на органичен въглерод в почвата осигурява множество ползи за здравето на почвата, биологичното торене не се превръща непременно в нетно отстраняване на CO₂ поради възможни ефекти на изтичане⁶⁴. Освен това плътността и размерът на фракционирането показват, че стабилните фракции на органични вещества в почвата, свързани с минералите (MOAM), са останали непроменени през експерименталния период на експеримента DOK, а само фракциите на органични частици (POM) са били увеличени в BIODYN⁶⁵. Тъй като POM фракциите се считат за доста лабилни и склонни към загуби при промени в обработката на почвата⁶⁶, органичните системи изискват постоянни усилия за поддържане на запасите от въглерод в почвата. Освен оборски тор, остатъците от растения над и под земята и остатъците от корените са основен принос на нова органична материя към почвите⁶⁷. Едновременно с по-високи добиви в конвенционалните системи, може да се очаква по-висок въглероден добив от корени и коренни остатъци. Въпреки това, наскоро ¹³C пулс-етикет проучване в пшеница и царевица в експеримента DOK показва rhizodeposition и добив на въглерод от корени разградени от надземна биомаса. В царевицата, дори по-голямо разпределение на въглерода чрез rhizodeposition и корени е установено за BIOORG в сравнение с CONFYM⁶⁸. По този начин развитието на запасите от почвен органичен въглерод не може да се обясни само с въглеродните баланси, но също така трябва да се вземат предвид процесите на биологично преобразуване и стабилизиране^{69,70}. Обобщавайки, открихме че системите за биологично отглеждане, допринасят за смекчаване на изменението на климата и адаптиране чрез стабилизиране на почвените органични въглеродни запаси, а стратегията за биологично азото-торене води до по-малко емисии на N₂O.

Подобрените почвено-органични въглеродни запаси в органичните системи за отглеждане на култури идват заедно с подобрени показатели за качество на почвите и местообитанията, както и по-голямо богатство на някои почвени фауна и микробни гилдии. Интересното е, че почвената хетеротрофична активност и нарастващите запаси от органичен въглерод в почвата са тясно свързани, което предполага, че биологичната активност е основен двигател за повишаване на запасите от органичен въглерод в почвата⁶³. Въпреки че има все по-големи доказателства, че агрохимикалите и торовете оказват силно въздействие върху биологичното разнообразие на почвите⁷¹⁻⁷⁴, намалените хранителни вещества и пестициди за органичните системи за отглеждане помагат да се сведе до минимум загубата на биологично разнообразие на почвата под земята и над земята и по този начин да се запази многофункционалността на селскостопанските обработваеми почви. Особено микоризалните гъби, които са от решаващо значение за предлагането на фосфор за културите, са подобрени в органичните системи на експеримента DOK⁵¹ и в културите и пасищата в Европа с ниско ниво на пестицидите⁷³. Също така в селскостопанските обекти биологично обработваните почви показват по-ниско натоварване с пестициди в сравнение с конвенционалните, но силния ефект на наследяване изисква необходимостта от дългосрочни мерки за поддържане на биологичното разнообразие

на почвите ⁷⁵. Като цяло, почвите в експеримента DOK показват различна общностна структура на почвени гъби и бактерии ⁷⁶. В подкрепа на теорията за повишената почвена многофункционалност и устойчивост, в органичните системи за отглеждане на култури се наблюдава подобрена ефективност на използването на водата от културите ⁷⁷, потискане на патогените ⁷⁸ и по-голям капацитет за минерализиране на органичния азот при условия на суша ⁷⁹. Специфичния за системата за отглеждане капацитет за минерализация на азота при условия на суша може допълнително да бъде свързан с специфични бактериални общности, активни в протеолизата в експеримента DOK ⁷⁹.

Като всеки полеви експеримент резултатите от проучването DOK са строго ограничени до условията на обекта, с плодородието на почвата и специфични практики на обработка, прилагани във всяка система и не могат да включват ефекти на релефа. Докато резултатите ни подчертават тясната връзка между здравето на почвата и биологичното разнообразие на почвата, ние признаваме, че основната заплаха за биологичното разнообразие и загубата на естествени местообитания до голяма степен се дължи на нуждите на земята ^{3,80}. Освен това фактът, че засиленото биологично разнообразие над земята може да доведе до подтискане на плевелите и конкуренция за източници на светлина и хранителни вещества, подчертава необходимостта от сложно управление за поддържане на висок и стабилен добив в системите за биологично отглеждане.

Основното предизвикателство за системите с биологично отглеждане са по-ниските добиви, дължащи се на намаленото използване на хранителни вещества и пестициди ³⁰. Средното намаление на добива между органични (BIODYN и BIOORG) и конвенционални (CONFYM и CONMIN) системи след CRP3 е 20% ³¹. Въпреки това, в това проучване намалението на добива бе сведено до 15% след включването на царевица и соя от CRP 4 нататък (Фиг. 4, Фиг. 5-9). Тази разлика в добива е по-ниска в сравнение с обхвата на публикуваните мета-анализи в глобален мащаб ³⁰, което може да се обясни с ограниченията при употребата на пестициди и торове в швейцарските интегрирани производствени системи, което намалява нивото на интензифициране на конвенционалните системи за отглеждане ⁸¹. Освен това общият добавен азот (т.е. плътността на запасите) в органичните системи е в горния край на докладите от европейските стопанства и/или полеви експерименти ⁴². Стабилните добиви във всички системи в експеримента DOK показват, че също смесените системи за биологично отглеждане, рециклирането на животински тор в размер на 1.4 животински единици на хектар, могат да поддържат добиви в продължение на повече от четири десетилетия. Трябва обаче да се отбележи, че поради по-ниските нива на добив в органичните системи относителната стабилност на добива е била по-ниска в сравнение с конвенционалните системи ³⁷. От културите, които са били култивирани през всичките шест сеитбообороти, добивите са нараснали във всички системи за пшеница, но са замразени или намалени за люцерна ³⁷. Силажната царевицата и соята са били отглеждани само за три периода на ротация на културите и са показали леко намаляване и увеличаване на добива във всички системи съответно. Подробен статистически анализ на стабилността на добива в системата за отглеждане на култури от експеримента DOK могат да бъдат разгледани в Кпарр et al. (2023) ³⁷. Подобните добиви на соя и малките разлики в добивите на люцерна могат да бъдат обяснени с относително високия дял на азото-фиксиращата детелина в сместа, както и липсата на тежки вредители и заболявания в соята. Зимна пшеница и царевица за силаж, двете гъсто вкоренени и с дълъг период на растеж, показват 12% и 20% по-ниски добиви в органични системи. В органичните системи пшеницата имаше по-висок афинитет към симбиоза с *mycorrhiza*, което вероятно е допринесло за доставката на фосфор на културите и може да има известно намаление на органичния добив ⁸². Културата с най-голям спад в добива при органично отглеждане са картофите, които имат голяма нужда от хранителни вещества в кратък период на растеж и са податливи на вредители и болести. Ефектът от употребата на медни препарати в BIOORG се отразява в малко по-високите добиви в сравнение с BIODYN. Забележителното увеличение на добива на пшеница в CRP5 и CRP6 в системата BIODYN може да се дължи на нов сорт пшеница, отгледан при органични условия

(var. Wiwa). Важно е да се отбележи, че от петте основни култури, засадени в експеримента DOK, силажната царевицата и люцерната бяха използвани като фураж за животните, за да имитират система за смесено отглеждане на културите с 1.4 животински единици на хектар. От своя страна пшеницата, картофите и соята се отглеждаха като храна за консумация от човека. Все още повишаването на добива в системите за биологично отглеждане е от решаващо значение за избягване на допълнително търсене на земя и по този начин отрицателни въздействия върху климата и биологичното разнообразие^{80,83}. Тези усилия включват технически и биологични възможности като отглеждане заради ефективност при използване на хранителните вещества и устойчивост срещу вредители и болести, кръгова икономика с използване на рециклирани торове и адаптиране към смесени, растения и животни, системи за отглеждане на култури. И накрая, но не на последно място, тези промени трябва да бъдат придружени с промяна на потребителското поведение и здравословна диета с повече растения и по-малко месо^{61,84}. В обобщение открийме, че с драстично намаляване на синтетичните торове и пестицидите в органичните системи намаляват натиска върху здравето на почвата, биологичното разнообразие и свързаните с климата показатели при умерени загуби на добив (Фиг. 5). Липсата на минерален азот и фосфор в органичните системи значително допринася за опазването на запасите от фосфор и намалява зависимостта от външни доставяне с високо енергийно производство на азотни торове и по този начин прави органичните системи по-устойчиви към кризите по веригата на доставки. За дългосрочната устойчивост на биологичните и конвенционалните системи за отглеждане на култури интеграцията на добитък и ротацията на културите, включително бобови растения, са благоприятни фактори. Бавно намаляващите запаси от фосфор в почвата, също и в системи с положителен баланс, подтикващи към алтернативни източници на фосфор, които свързват градските и селските хранителни потоци и балансират регионите с недостиг или излишък на хранителни вещества, особено в системите за биологично отглеждане. Въпреки че повишаването на запасите от органичен въглерод в почвата е от значение с оглед на здравето на почвата, резултатите ни сочат важността на N₂O като основен парников газ в системите за културиране на обработваемата земя. Биологичното азотно торене и компостирането на оборски тор може да повиши запасите от органичен въглерод в почвата, без да се увеличават почвените емисии на N₂O. Подобрено здраве на почвата заедно с по-голямото богатство на микробиотата и макрофауната в органичните системи също се превръща в по-висока микробна азотна минерализация при стрес от суша. Въпреки по-ниските добиви в биологичните системи, намалението на добива е намаляло от 20% след три сеитбооборота на култури до 15% в рамките на шест завъртания, подчертавайки потенциала на системите за биологично отглеждане да осигурят стабилен добив с ниски външни нужди в дългосрочен план.

В заключение можем да кажем, че намаляването на синтетичните торове и пестицидите в системите за биологично отглеждане е намалило натиска върху критичните категории въздействия като здравето на почвата, биологичното разнообразие и емисиите на парникови газове в почвата. Тези ползи са придружени от умерена загуба на доходност. Въпреки че има равновесие между добивите и биологичното разнообразие, широкото прилагане на системите за биологично земеделие изисква системни промени, които са насочени към устойчиво укрепване и интегриране на животновъдството и многогодишните култури. Това е необходимо, за да се използват пълноценно предимствата от климата и биологичното разнообразие и да се осигури плодородна почва за развитието на устойчиви агроecosистеми.

Материали и методи

Описание на полевия обект и експериментална настройка

Експериментът DOK е създаден през 1978 г. в околностите на Базел(Therwil (BL), Швейцария; 47° 30.158'N, 7° 32.347'E), 308 m над морското равнище. DOK означава био-Динамичен, био-Органичен и Konventionell (немски, за Конвенционален). Средните годишни валежи бяха 840 mm, а средната температура 10,5 °C (климатична норма 1991.2010).

Почвеният тип е хапличен лувизол върху дълбоки залежи на алувиален лъос. Средно във всички полеви парцели, той съдържа 12% пясък, 72% тиня и 16% глина, с първоначално рН (H₂O) от 6.3 и съдържание на органичен въглерод в почвата от 15 g kg⁻¹. Сравняват се четири системи за отглеждане, различаващи се главно по отношение на стратегията за торене и растителна защита (Tab 3). Експериментът DOK може да бъде описан като split-strip-plot дизайн (Фиг. 1). Всяка система за отглеждане бе възпроизведена в четири блока и три итерации (А, В и С), което доведе до общо 12 наблюдения за всяка система за отглеждане (n = 12). В итерация А, В и С бяха засадени идентични сеитбообращения на култури, но бяха итерирани по време, за да се отчете сезонната променливост. Един период на ротация на културите (CRP) продължава седем години. Индивидуалният размер на парцела е 5 m x 20 m. Биодинамичните (BIODYN) и биоорганичните (BIOORG) органични системи бяха торени с оборски тор, съответстващи на 1.2 (CRP1 и CRP2) и 1.4 (CRP3-CRP6) животински единици на хектар (Tab 3). Интензитетът на торене при органичните системи се основаваше на фуража, произведен при съответната ротация на културите, и отразява интензитета, който обикновено се намира в смесените швейцарски ферми. Едната конвенционална система (CONFYM) бе торена със същото количество оборски тор, както органичните системи и, допълнително, с минерални торове до нивото на специфичната за растенията препоръка според швейцарския стандарт⁸¹. Другата конвенционална система (CONMIN) бе оставена единствено с минерален тор в CRP2 и бе оставена без торене по време на CRP1. Както органичните системи, така и системата CONFYM представляват типични смесени системи за отглеждане на култури с обработваема площ и добитък, докато системата CONMIN бе изцяло базирана на минерални хранителни суровини. От 1985 г. насам конвенционалните системи се отглеждат съгласно швейцарските национални разпоредби за интегрирано производство на растения, представляващи един вид добра селскостопанска практика. Входящите количества азот, фосфор и калий в четирите системи са показани в таблица 1. Проведената растителна защита в органичните системи бе съгласно биодинамичните и биоорганичните стандарти за земеделие. Тъй като управлението в експеримента DOK има за цел да имитира сертифицирани системи за отглеждане на култури, стратегията за растителна защита в конвенционалните системи беше коригирана през 1989, когато бяха наложени правилата за швейцарското интегрирано производство, което намали годишната употреба на пестициди от CRP3 нататък (Fig 2). Въпреки това, в CRP2-6 употребата на пестициди, изразена в еквиваленти на активни компоненти, бе с 97% по-ниско при BIODYN и 86% по-ниско при BIOORG в сравнение с CONFYM и CONMIN (Fig. 2). В органичните системи плевелите са били контролирани механично, а биоконтролът (*Bacillus thuringiensis* var *tenebrionis*) бе прилаган за контрол на колорадските бръмбари (*Leptinotarsa decemlineata*). Медни препарати се прилагаха само в BIOORG при картофите като фунгицид. Седемгодишната ротация на културите беше идентична във всички системи, включително коренови култури, зърнени култури и люцерна (Tab 4). Едни и същи ротации бяха засадени на три итерации А, В и С в лентата (под-площи), но изместени във времето. Зелен тор и зимни фуражни култури бяха засадени във всички системи. За да е в съответствие с общата селскостопанска практика в Швейцария, ротацията на културите, както и управленските дейности, бяха коригирани след всеки CRP⁸⁵. През последните три CRP-и културите остават постоянни, но се променят по ред. Вариациите на различните култури също се промениха по време на експеримента, за да бъдат в съгласие с общата практика и да се избегнат възможните прекъсвания поради съпротива. Почвените обработки са сходни при всички системи. Почвите бяха оорани до дълбочина от 15 до 20 cm преди засаждането на картофи, зимна пшеница, зеле, цвекло, соя или царевица. Люцерновата смес бе засявана с редосеялка след дисково брануване на житните полета и бе смес от *Dactylis glomerata*, *Festuca pratensis*, *Phleum pratense*, *Lolium perenne*, *Trifolium pratense*, и *Trifolium repens*.

Количествено определяне на органичните торове

Съдържанието на хранителни вещества, което зависи от сухото вещество, в специфични за третирането органични торове, като например сухите и мокрите оборски торове, бяха количествено определяни всяка година. Накратко, съдържанието на азот в торовете бе определено по метода Келдал чрез химично окисление и последваща парна дестилация. Съдържанието на органични вещества бе определяно чрез изгаряне и фотометричен анализ на екстракта от пепел и бе използван за количествено определяне на съдържанието на калий и фосфор. Относителните хранителни суровини бяха изчислени въз основа на средните годишни количества суровини сравнени с CONFYM.

Промени в запасите от почвен въглерод, азот и фосфор

Почвените проби са взети от дълбочина на почвата 0,20 cm. С цел да се оценят промените в почвените въглеродни и азотни запаси, концентрациите на въглерод и азот в архивирани проби от почвата са били анализирани повторно с използване на сухо горене при 900°C (Elementar, Vario Max Cube). Неорганичното съдържание на въглерод в почвата, макар и незначително в повечето проби, бе анализирано в отделна проба при температура на горене 500°C и използвано за изчисляване на концентрацията на органичен въглерод в почвата. Анализите са извършени в аналитични дубликати с използване на 1 g хомогенизирани подпроби. Поради ограничената наличност на проби от първите години на полевия експеримент пробите от 1984 г. служат като базова мярка за CRP1. От 2-рата до 6-тата ротация (1985-2019) архивирани проби от всяка втора година бяха преанализирани с $n = 12$ за система на година. В края на всеки CRP чрез проби от изсушена и смляна почва (дълбочина на вземане на проби от 0,20 cm) по метод на изгаряне се определя общото съдържание на фосфор в почвата. За това 1 g почва е била изгаряна за 5h при 550°C, извлечена с 1 M сярна киселина за 16 часа и филтратът (Whatman⁴⁰) бе анализиран за концентрацията на ортофосфат. Само почвата от итерация C бе анализирана за общ P. Променлив почвен фосфор се наблюдаваше всяка година или два пъти годишно (2006 г. нататък), чрез фосфорна екстракция с обогатена с CO₂ вода и последващо колориметрично определяне на фосфора. The effect of cropping systems on soil carbon stock changes was determined by ANOVA and subsequent Tukey posthoc test with clay contents as co-variable.

Почвените въглеродни, азотни и фосфорни запаси са изчислени чрез използване на специфични за парцела маси за почвения слой 0 по 20 cm въз основа на средни плътности на пробите, оценени три пъти по време на CRP1. За количествено определяне на почвения органичен въглерод в по-дълбоките почвени слоеве (20-30 cm и 30-50 cm) през пролетта на 2019 г. в края на CRP6 (Фиг 3)⁸⁶ се извърши допълнително вземане на проби за плътността на насипната почва. Минималното средно квадратично за годишните промени в запасите от органичен въглерод и азот в почвата на хектар бяха изчислени чрез линейна регресия. Тъй като CONMIN бе практически пуснат след CRP1, данните от CRP2 до CRP6 бяха използвани за регресионен анализ за всички дейности. Въздействието на системите за отглеждане върху промените в запасите от въглерод в почвата бяха определени чрез ANOVA и последващ Tukey posthoc тест със съдържание на глина като допълнителна променлива.

Азотен баланс

За всеки експериментален парцел ($n = 12$) азотният баланс бе изчислен като разликата между специфичните за третирането приходи и загуби, както е описано в⁴². Приходите включват атмосферни отлагания, семена, торове и симбиотичен N₂. Подробности за вида и количеството на приходите от азот са показани в Tab 1 и Tab 2. Симбиотичната N₂ фиксация от соеви зърна и детелина, отглеждани в експеримента DOK, е оценена по методите ¹⁵N^{52,53}, включително оценките за подземни приходи на азот от бобови култури чрез корени и rhizodeposition⁸⁶, и прехвърляне на фиксиран азот от детелина към свързани треви⁵³. За азотни приходи чот атмосферно отлагане бяха приети 20 kg N ha⁻¹ a⁻¹ въз основа на регионалните модели. Според изчисленията азотът, съдържащ се в семената, бе оценен според наличните данни за количествата семена, прилагани на парцел (kg ha⁻¹) и

концентрациите на азот в семената от доставчиците или от референтни данни ⁸¹ (Tab 2). Загубите на азот включват всички събрани количества продукти от 1984 до 2019 г. (CRP2-CRP6). В случай на зърнени култури това означава от зърно и слама, тъй като сламата е била извадена от парцелите. Концентрациите на азот в събраните продукти бяха оценени чрез сухо горене след смилане и хомогенизиране на събраните продукти и свързания с тях растителен материал поотделно. Азотният баланс не отчита загубите на азот чрез изпарения на амоняк, изпарения на нитрати и загуби на газов азот поради денитрификация, а използва полевия процес като граница на системата. Ефективността на използването на азот се изчислява чрез разделяне загубите на приходите.

Фосфорен баланс

Специфичният за третирането фосфорен баланс е изчислен подобно на азотния баланс, включително фосфорните торове и семената като фосфорни приходи и събраните продукти като фосфорни загуби от 1984 г. до 2019 г. Фосфорният баланс не отчита атмосферното отлагане на фосфора и загубата на фосфор, например чрез изтичане и ерозия. Балансът на фосфора е изчислен за целия експеримент и за итерация С поотделно, тъй като стойностите на общия фосфор в почвата са налични само за итерация С. Разликите във фосфорния баланс между итерация А, В и С са незначителни. Ефективността на използването на фосфор е изчислена чрез разделяне загубите на приходите.

Въздействие на почвата върху климата

Въздействието върху климата в района бе оценено чрез емисиите на N_2O и CH_4 по време на 571 дневна кампания за измерване в последователността от култури люцерна, царевица и зелен тор в рамките на CRP6 ⁵⁷ и промените в почвените въглеродни запаси през целия експериментален период. За да се сравнят парниковите газове, емисиите от почвата бяха изразени като CO_2 еквиваленти. Системната област е ограничена до експерименталния парцел и не отчита емисиите по време на производството на минерални торове, отглеждането на животни и/или обработка на оборски тор. Годишните промени в запасите от органичен въглерод в почвата бяха преобразувани в еквиваленти на CO_2 , за да се сравни относителното въздействие на парниковите газове. Емисиите на N_2O-N и CH_4-C бяха количествено определени в полеви кампании от 2012 до 2014 г., използвайки статични камери с аналитични дубликати ⁵⁷. Кампанията обхваща 256 дни детелина, 140 дни царевица, последвани от 175 дни зелен тор (*Brassica chinensis* и *Brassica rapa*) отглеждани в рамките на полева итерация С ($n = 4$). Общите емисии на N_2O и CH_4 бяха нормализирани до годишни емисии и преобразувани в еквиваленти на CO_2 , като се приема потенциал за глобално затопляне от 273 и 27.9 за 100-годишен период ⁶. Годишните емисии на парникови газове от почвата за всяка система за отглеждане на култури бяха изчислени чрез сумиране на средните промени в запасите от органичния въглерод в почвата, емисиите на N_2O и емисиите на CH_4 въз основа на техните CO_2 еквиваленти.

Биоразнообразие

Въздействието на системите за отглеждане на култури върху биологичното разнообразие беше синтезирано от публикувани проучвания. Тъй като по своята същност е предизвикателство да се оцени въздействието на системите за отглеждане на култури върху биологичното разнообразие на ландшафта при повтарящ се полеви експеримент, ние ограничихме анализа си до свързаната с почвата видове от микро- до макрофауна и анализите на банките от семена на плевели. Накратко, броят на индивидите и богатството на видовете на Carabidae и agapeae бе оценено в проби от капани за насекоми, които са били оставени отворени за 14 дни от 3 до 17 май през 2005 г. по време на отглеждането на пшеница ⁸⁷. Броят индивиди и видовото богатство на нематоди и енхитреи бяха оценени от хомогенизирани проби от почвени ядра, взети на 9 май 2005 г. с помощта на Oostenbrink elutriators и комбинация от студена и гореща екстракция ⁸⁷. Богатството на lumbricidae е оценявано четири

пъти между 1990 и 1992 г. чрез ръчна обработка на почвен блок от 40 cm x 40 cm x 40 cm, след пшеница, картофи и цвекло⁸⁸. Микробиални фенотипи бяха оценени чрез анализ на фосфолипидни производни от мастни киселини в почвени проби, взети през март 2003 г. от зимна пшеница⁸⁹. Богатството на почвените бактериални и гъбични генотипове бе анализирано в почвени проби, взети от зимна пшеница и люцерна през март 2000 г. и март 2007 г., и анализирано чрез ДНК секвениране и групиране на оперативни таксономични единици при 97% идентичност на последователността⁷⁶. Богатството на разнообразието на семена бе оценено през пролетта на 2009 г. в пшеница и царевица, като се вземат необработени почвени ядра от всеки експериментален парцел и последваща инкубация за подобряване на покълването⁹⁰.

Добиви

Оценки за добивите са описани подробно в³⁷. Накратко, от 16 парцела бяха събрани добиви (4 системи x 4 полеви повторения) за култура, година и итерация. За сеитбооборота имаше 6 жътва люцерна, 3 царевица за силаж, 3 соя, 6 зимна пшеница и 3 картофи във всички три итерации. В CRP3 е имало 9 реколтата на люцерна поради 3-та година на отглеждане на люцерната. Добивите бяха изразени като сухо вещество на хектар. Въздействието на системите за отглеждане на култури средно за всеки CRP беше оценено чрез анализ на промяната и последващите Tukey post hoc тестове (Tab 5-9). Влиянието на сезонната променливост бе оценено чрез включване на експериментални блокове и итерации като допълнителни фактори.

Относителни показатели на системите

Показатели за агрономични и екологични резултати на системите за отглеждане на култури бяха извлечени от партньорски проучвания, изследващи четирите основни системи за отглеждане на култури (CONMIN, CONFYM, BIOORG и BIODYN) на експеримента DOK. За всички показатели е използвана z-трансформация на специфичните стойности на парцелите и еднопосочна ANOVA за изчисляване на въздействието на органичните (BIOORG и BIODYN) срещу конвенционалните (CONMIN и CONFYM) системи за отглеждане на култури, като са използвани статистическият пакет v4.2.2 в R. Подучастъци бяха използвани като зависими променливи с изключение на оценката на биологичното разнообразие, промяната на почвените запаси от фосфор, азотния оксид и метановите емисии, когато не всички подучастъци бяха изследвани^{57,87,88,90}. За количествено определяне на силата на въздействието на всеки показател, размерът на ефекта между органични (BIOORG и BIODYN) и конвенционалните (CONFYM и CONMIN) системи за отглеждане на култури са изчислени с подхода Cohens D. С оглед на критичните предизвикателства, свързани с агроecosистемите, бяха допълнително определени показатели за категориите въздействия, които бяха определени като агрономически добиви, почвено здраве, хранителен оборот, биологично разнообразие и въздействие върху климата (Фиг. 5).

Достъпност до данните

Използваните и/или анализирани набори от данни по време на настоящото проучване са достъпни от съответния автор при разумна заявка.

Received: 27 June 2024; Accepted: 16 October 2024

References

1. Crutzen, P. J. Geology of mankind - Crutzen - Nature. Nature. 415, 2002 (2002).
2. Steffen, W. et al. Planetary boundaries: Guiding human development on a changing planet. Science () 347, (2015). (1979).
3. Brondízio, E. S., Settele, J., Díaz, S. & Ngo, H. T. (eds). IPBES (2019), Global Assessment Report of the Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services. Debating Nature's Value (2019).

4. Winkler, K., Fuchs, R., Rounsevell, M. & Herold, M. Global land use changes are four times greater than previously estimated. *Nat. Commun.* 12, 1–10 (2021).
5. Gruber, N. & Galloway, J. N. An Earth-system perspective of the global nitrogen cycle. *Nature*. 451, 293–296 (2008).
6. IPCC. Climate Change 2022 - Mitigation of Climate Change - Full Report (Cambridge University Press, 2022).
7. Erisman, J. W., Sutton, M. A., Galloway, J., Klimont, Z. & Winiwarter, W. How a century of ammonia synthesis changed the world. *Nat. Geosci.* 1, 636–639 (2008).
8. Zhang, X. et al. Quantification of global and national nitrogen budgets for crop production. *Nat. Food*. 2, 529–540 (2021).
9. Galloway, J. N., Bleeker, A. & Erisman, J. W. The human creation and use of reactive Nitrogen: A Global and Regional Perspective. *Annu. Rev. Environ. Resour.* 46, 255–288 (2021).
10. Conley, D. J. et al. Controlling eutrophication: phosphorus and nitrogen. *Sci.* (1979). 323, 1014–1015 (2009).
11. Peñuelas, J. & Sardans, J. The global nitrogen-phosphorus imbalance. *Sci.* (1979). 375, 266–267 (2022).
12. Menegat, S., Ledo, A. & Tirado, R. Greenhouse gas emissions from global production and use of nitrogen synthetic fertilisers in agriculture. *Sci. Rep.* 12, 1–13 (2022).
13. Bouwman, A. F., Beusen, A. H. W. & Billen, G. Human alteration of the global nitrogen and phosphorus soil balances for the period 1970–2050. *Global Biogeochem. Cycles* 23, (2009).
14. Edixhoven, J. D., Gupta, J. & Savenije, H. H. G. recent revisions of phosphate rock reserves and resources: a critique. *Earth Sys. Dyn.* 5, 491–507 (2014).
15. *Better Crops* 97, 18–20 (2013).
16. Ulrich, A. E. & Frossard, E. On the history of a reoccurring concept: Phosphorus scarcity. *Sci. Total Environ.* 490, 694–707 (2014).
17. Oertel, C., Matschullat, J., Zurba, K., Zimmermann, F. & Erasmi, S. Greenhouse gas emissions from soils—A review. *Chem. Erde*. 76, 327–352 (2016).
18. Paustian, K. et al. Climate-smart soils. *Nature*. 532, 49–57 (2016).
19. Bünemann, E. K. et al. Soil quality – A critical review. *Soil. Biol. Biochem.* 120, 105–125 (2018).
20. Butterbach-Bahl, K., Baggs, E. M., Dannenmann, M., Kiese, R. & Zechmeister-Boltenstern, S. Nitrous oxide emissions from soils: how well do we understand the processes and their controls? *Philosophical Trans. Royal Soc. B: Biol. Sci.* 368, (2013).
21. Smith, P., Reay, D. & Smith, J. Agricultural methane emissions and the potential for mitigation. *Philosophical Trans. Royal Soc. A: Math. Phys. Eng. Sci.* 38, 253–262 (2021).
22. Dudley, N. & Alexander, S. Agriculture and biodiversity: a review. *Biodiversity*. 18, 45–49 (2017).
23. Cardinale, B. J. et al. Biodiversity loss and its impact on humanity. *Nature*. 486, 59–67 (2012).
24. Pretty, J. Intensification for redesigned and sustainable agricultural systems. *Sci.* (1979) 362, (2018).
25. Ellis, E. C., Goldewijk, K. K., Siebert, S. & Lightman, D. Ramankutty, N. Anthropogenic transformation of the biomes, 1700 to 2000. *Glob. Ecol. Biogeogr.* 19, 589–606 (2010).
26. Willer, H. & Trávníček, J. C. M. and B. S. The World of Organic Agriculture. Statistics and Emerging Trends 2021 (Research Institute of Organic Agriculture FiBL, Frick, and IFOAM – Organics International, 2021). v20210301.
27. Fetting, C. The European Green Deal. Preprint at (2020).
28. Reganold, J. P. & Wachter, J. M. Organic agriculture in the twenty-first century. *Nat. Plants*. 2, 1–8 (2016).
29. Knapp, S. & van der Heijden, M. G. A. A global meta-analysis of yield stability in organic and conservation agriculture. *Nat. Commun.* 9, 1–9 (2018).
30. Seufert, V., Ramankutty, N. & Foley, J. A. Comparing the yields of organic and conventional agriculture. *Nature*. 485, 229–232 (2012).
31. Mäder, P. et al. Soil fertility and biodiversity in organic farming. *Sci.* (1979). 296, 1694–1697 (2002).
32. Gättinger, A. et al. Enhanced top soil carbon stocks under organic farming. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A*. 109, 18226–18231 (2012).
33. Fließbach, A., Oberholzer, H. R., Gunst, L. & Mäder, P. Soil organic matter and biological soil quality indicators after 21 years of organic and conventional farming. *Agric. Ecosyst. Environ.* 118, 273–284 (2007).
34. Seufert, V. & Ramankutty, N. Many shades of gray—the context-dependent performance of organic agriculture. *Sci. Adv.* 3, (2017).
35. Wittwer, R. A. et al. Organic and conservation agriculture promote ecosystem multifunctionality. *Sci. Adv.* 7, eabg6995 (2022).

36. Lehmann, J., Bossio, D. A., Kögel-Knabner, I. & Rillig, M. C. The concept and future prospects of soil health. *Nat. Rev. Earth Environ.* 1, 544–553 (2020).
37. Knapp, S., Gunst, L., Mäder, P., Ghiasi, S. & Mayer, J. Organic cropping systems maintain yields but have lower yield levels and yield stability than conventional systems – results from the DOK trial in Switzerland. *Field Crops Res.* 302, (2023).
38. Lu, C. & Tian, H. Global nitrogen and phosphorus fertilizer use for agriculture production in the past half century: shifted hot spots and nutrient imbalance. *Earth Syst. Sci. Data.* 9, 181–192 (2017).
39. Lassaletta, L. et al. Nitrogen use in the global food system: past trends and future trajectories of agronomic performance, pollution, trade, and dietary demand. *Environ. Res. Lett.* 11, (2016).
40. Rütting, T., Aronsson, H. & Delin, S. Efficient use of nitrogen in agriculture. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 110, 1–5 (2018).
41. Congreves, K. A. et al. Nitrogen Use Efficiency definitions of today and tomorrow. *Front. Plant. Sci.* 12, 1–10 (2021).
42. Oberson, A. et al. Higher than expected: Nitrogen flows, budgets, and use efficiencies over 35 years of organic and conventional cropping. *Agric. Ecosyst. Environ.* 362, 108802 (2024).
43. Reimer, M. et al. Reliance on Biological Nitrogen fixation depletes Soil Phosphorus and Potassium reserves. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 118, 273–291 (2020).
44. Reimer, M. et al. Sustainable growth of organic farming in the EU requires a rethink of nutrient supply. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* <https://doi.org/10.1007/s10705-023-10297-7> (2023).
45. Barbieri, P. et al. Global option space for organic agriculture is delimited by nitrogen availability. *Nat. Food.* 2, 363–372 (2021).
46. MacDonald, G. K., Bennett, E. M., Potter, P. A. & Ramankutty, N. Agronomic phosphorus imbalances across the world's croplands. *Proc. Natl. Acad. Sci. U S A.* 108, 3086–3091 (2011).
47. Oehl, F. et al. Phosphorus budget and phosphorus availability in soils under organic and conventional farming. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.* 62, 25–35 (2002).
48. McDowell, R. W., Worth, W. & Carrick, S. Evidence for the leaching of dissolved organic phosphorus to depth. *Sci. Total Environ.* 755, 142392 (2021).
49. Oehl, F., Frossard, E., Fliessbach, A., Dubois, D. & Oberson, A. Basal organic phosphorus mineralization in soils under different farming systems. *Soil. Biol. Biochem.* 36, 667–675 (2004).
50. Keller, M. et al. Phosphorus forms and enzymatic hydrolyzability of organic phosphorus in soils after 30 years of organic and conventional farming. *J. Plant Nutr. Soil Sci.* 175, 385–393 (2012).
51. Oehl, F. et al. Impact of land use intensity on the species diversity of arbuscular mycorrhizal fungi in agroecosystems of Central Europe. *Appl. Environ. Microbiol.* 69, 2816–2824 (2003).
52. Oberson, A. et al. Symbiotic N₂ fixation by soybean in organic and conventional cropping systems estimated by 15 N dilution and 15 N natural abundance. *Plant. Soil.* 290, 69–83 (2007).
53. Oberson, A. et al. Nitrogen fixation and transfer in grass-clover leys under organic and conventional cropping systems. *Plant. Soil.* 371, 237–255 (2013).
54. Wu, J., Hartmann, T. E. & Chen, W. S. Toward sustainable management of phosphorus flows in a changing rural–urban environment: recent advances, challenges, and opportunities. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 40, 81–87 (2019).
55. Minasny, B. et al. Soil carbon 4 per mille. *Geoderma.* 292, 59–86 (2017).
56. de Vries, W. et al. Soil carbon 4 per mille: a good initiative but let's manage not only the soil but also the expectations: Comment on Minasny. *Geoderma* 292: 59–86. *Geoderma* 309, 111–112 (2018). (2017).
57. Skinner, C. et al. The impact of long-term organic farming on soil-derived greenhouse gas emissions. *Sci. Rep.* 9, (2019).
58. Guenet, B. et al. Can N₂O Emissions Offset the Benefits from Soil Organic Carbon Storage? *Global Change Biology* vol. 27 (2021).
59. Autret, B. et al. Can alternative cropping systems mitigate nitrogen losses and improve GHG balance? Results from a 19-yr experiment in Northern France. *Geoderma.* 342, 20–33 (2019).
60. Skinner, C. et al. Greenhouse gas fluxes from agricultural soils under organic and non-organic management - A global meta-analysis. *Sci. Total Environ.* 468–469, 553–563 (2014).
61. Muller, A. et al. Strategies for feeding the world more sustainably with organic agriculture. *Nat. Commun.* 8, 1–13 (2017).
62. Bünemann, E. K., Schwenke, G. D. & Van Zwieten, L. Impact of agricultural inputs on soil organisms - a review. *Aust. J. Soil Res.* 44, 379–406 (2006).

63. Krause, H. M. et al. Biological soil quality and soil organic carbon change in biodynamic, organic, and conventional farming systems after 42 years. *Agron. Sustain. Dev.* 42, (2022).
64. Don, A. et al. Carbon sequestration in soils and climate change mitigation—definitions and pitfalls. *Glob Chang. Biol.* 30, (2024).
65. Mayer, M., Krause, H. M., Fliessbach, A., Mäder, P. & Steffens, M. Fertilizer quality and labile soil organic matter fractions are vital for organic carbon sequestration in temperate arable soils within a long-term trial in Switzerland. *Geoderma* 426, (2022).
66. Lavalley, J. M., Soong, J. L. & Cotrufo, M. F. Conceptualizing soil organic matter into particulate and mineral-associated forms to address global change in the 21st century. *Glob Chang. Biol.* 26, 261–273 (2020).
67. Kätterer, T., Bolinder, M. A., Andrén, O., Kirchmann, H. & Menichetti, L. Roots contribute more to refractory soil organic matter than above-ground crop residues, as revealed by a long-term field experiment. *Agric. Ecosyst. Environ.* 141, 184–192 (2011).
68. Hirte, J., Leifeld, J., Abiven, S., Oberholzer, H. R. & Mayer, J. Below ground carbon inputs to soil via root biomass and rhizodeposition of field-grown maize and wheat at harvest are independent of net primary productivity. *Agric. Ecosyst. Environ.* 265, 556–566 (2018).
69. Lehmann, J. & Kleber, M. The contentious nature of soil organic matter. *Nature*. 528, 60–68 (2015).
70. Lehmann, J. et al. Persistence of soil organic carbon caused by functional complexity. *Nat. Geosci.* 13, 529–534 (2020).
71. Bengtsson, J., Ahnström, J. & Weibull, A. C. The effects of organic agriculture on biodiversity and abundance: a meta-analysis. *J. Appl. Ecol.* 42, 261–269 (2005).
72. Thiele-Bruhn, S., Bloem, J., de Vries, F. T., Kalbitz, K. & Wagg, C. Linking soil biodiversity and agricultural soil management. *Curr. Opin. Environ. Sustain.* 4, 523–528 (2012).
73. Edlinger, A., Garland, G., Hartman, K., Banerjee, S. & Degrunne, F. Europe PMC Funders Group Agricultural management and pesticide use reduce the functioning of beneficial plant symbionts. 1145–1154 (2022). (2022).
74. Gomiero, T., Pimentel, D. & Paoletti, M. G. Environmental impact of different agricultural management practices: Conventional vs. Organic agriculture. *CRC Crit. Rev. Plant. Sci.* 30, 95–124 (2011).
75. Riedo, J. et al. Widespread occurrence of pesticides in organically managed agricultural soils-the ghost of a conventional agricultural past? *Environ. Sci. Technol.* 55, 2919–2928 (2021).
76. Hartmann, M., Frey, B., Mayer, J., Mäder, P. & Widmer, F. Distinct soil microbial diversity under long-term organic and conventional farming. *ISME J.* 9, 1177–1194 (2015).
77. Schärer, M. L., Dietrich, L., Kundel, D., Mäder, P. & Kahmen, A. Reduced plant water use can explain higher soil moisture in organic compared to conventional farming systems. *Agric. Ecosyst. Environ.* 332, (2022).
78. Bongiorno, G. et al. Soil suppressiveness to *Pythium ultimum* in ten European long-term field experiments and its relation with soil parameters. *Soil. Biol. Biochem.* 133, 174–187 (2019).
79. Lori, M. et al. Distinct nitrogen provisioning from organic amendments in soil as influenced by farming system and water regime. *Front. Environ. Sci.* 6, 1–14 (2018).
80. Tuomisto, H. L., Hodge, I. D., Riordan, P. & Macdonald, D. W. Does organic farming reduce environmental impacts? - a meta-analysis of European research. *J. Environ. Manage.* 112, 309–320 (2012).
81. Richner, W. S. S. Grundlagen Für Die Düngung Landwirtschaftlicher Kulturen in Der Schweiz, *Agrarforschung Schweiz* 8 (6), Spezialpublikation, 276S. (2017).
82. Hildermann, I. et al. Nutrient use efficiency and arbuscular mycorrhizal root colonisation of winter wheat cultivars in different farming systems of the DOK long-term trial. *J. Sci. Food Agric.* 90, 2027–2038 (2010).
83. Lorenz, K. & Lal, R. Environmental Impact of Organic Agriculture vol. 139 (Elsevier Inc., 2016). *Advances in Agronomy*.
84. Willett, W. et al. Food in the Anthropocene: the EAT–Lancet Commission on healthy diets from sustainable food systems. *Lancet.* 393, 447–492 (2019).
85. Krause, H. M., Fliessbach, A. & Mayer, J. P. M. Chapter 2 - Implementation and management of the DOK long-term system comparison trial. in *Long-Term Farming Systems Research*, [G. S. Bhullar, A. Riar, (Eds)]. Academic Press 37–51 (2020).
86. Hammelehle, A., Oberson, A., Lüscher, A., Mäder, P. & Mayer, J. Above- and belowground nitrogen distribution of a red clover-perennial ryegrass sward along a soil nutrient availability gradient established by organic and conventional cropping systems. *Plant. Soil.* 425, 507–525 (2018).

87. Birkhofer, K. et al. Long-term organic farming fosters below and aboveground Biota: implications for soil quality, biological control and productivity. *Soil. Biol. Biochem.* 40, 2297–2308 (2008).
88. Pfiffner, L. & Mäder, P. Effects of Biodynamic, Organic and Conventional Production systems on Earthworm populations. *Biol. Agric. Hortic.* 15, 2–10 (1997).
89. Esperschütz, J., Gattinger, A., Mäder, P., Schloter, M. & Fließbach, A. Response of soil microbial biomass and community structures to conventional and organic farming systems under identical crop rotations. *FEMS Microbiol. Ecol.* 61, 26–37 (2007).
90. Rotchés-Ribalta, R., Armengot, L., Mäder, P., Mayer, J. & Sans, F. X. Long-term management affects the community composition of Arable Soil Seedbanks. *Weed Sci.* 65, 73–82 (2017).

Acknowledgements

We greatly acknowledge the farmer advisory groups and technicians acting in the field and lab over 42 years. The DOK experiment was continuously funded by the Swiss Federal Office for Agriculture FOAG. Coop Sustainability Funds supported the current synthesis of the DOK experiment. We thank Lukas Pfiffner, Martin Hartmann, Klaus Birkhofer and Roser Rotchés-Ribalta for their work in the DOK experiment and for providing original raw data of published work.

Author contributions

Author Contributions: Conceptualization: PM, HMK, AF, KAJ, AO, JM, Funding acquisition: PM, Project administration: PM, JM, Supervision: PM, AO, JM, Writing – original draft: HMK, PM, Writing – review & editing: HMK, PM, AF, KAJ, AO, JM.

Competing interests

The authors declare no competing interests.

Additional information

Допълнителна информация Онлайн версията съдържа допълнителен материал на разположение: <https://doi.org/10.1038/s41598-024-76776-1>.

Кореспонденцията и заявки за материали трябва да се адресира до Н.-М.К. or P.M.

Reprints and permissions information is available at www.nature.com/reprints.

Publisher's note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

Отворен достъп Тази статия е публикувана под Creative Commons Attribution-NonCommercial-NoDerivatives 4.0 International License, което позволява всякаква употреба с нетърговска цел, споделяне, разпространение и възпроизвеждане във всяка среда или формат, стига да признавате оригиналния автор(и) и източника, да предоставите връзка към лиценза Creative Commons и да посочите дали сте променили лицензирания материал. Вие нямате разрешение съгласно настоящия лиценз да споделяте адаптиран материал, получен от тази статия или части от нея. Изображенията или други материали от трети страни в тази статия са включени в Creative Commons лиценза на тази статия освен ако не е посочено друго в кредитна линия към материала. Ако материалът не е включен в лиценза на Creative Commons и предназначението ви не е разрешено от закона или надхвърля разрешеното използване, ще трябва да получите разрешение директно от притежателя на авторското право. За да видите копие от това свидетелство, посетете <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>.