



我国土壤肥料长期定位试验与 农业可持续发展*

文 / 徐明岗 周世伟 张文菊 卢昌艾

中国农业科学院农业资源与农业区划研究所 北京 100081

【摘要】 土壤肥料长期定位试验能揭示农业生态系统长期的变化趋势,对探索农业可持续性有重要的指导意义。文章在简述我国农田土壤肥料长期试验网络基础上,从土壤有机质演变、作物产量变化、土壤酸化机制、土壤生态功能演变以及施肥的环境效应等方面,详细阐述了30余年长期试验所取得的成果,并对存在的问题进行剖析和展望未来发展,以期推动我国土壤质量特别是土壤肥力演变研究,提升国家耕地质量和农业生产可持续性。

【关键词】 长期定位试验,土壤肥力,粮食安全,可持续发展

DOI 10.16418/j.issn.1000-3045.2015.Z1.013

联合国粮农组织预测2050年世界人口达峰值92亿,未来40年保持年增4 400万吨粮食,方能养活人类^[1]。在全球环境日益恶化下,这个挑战和压力巨大,中国甚尤,因为其人口更多、环境污染更严重、耕地被侵占或退化更突出。为了粮食生产立足自给的国家战略、为了保护和农业可持续发展,我国在2015年初制定了两项重要的工作目标:(1)力争2020年耕地基础地力提高0.5个等级、土壤有机质含量提高0.5个百分点;(2)力争2020年主要农作物化肥利用率达到40%以上、农作物化肥使用总量实现零增长(农办农[2015]1号)。要完成既定目

标,务必了解我国耕地土壤质量现状、演变规律和趋势,以及施肥在土壤质量演变中的作用,从而筛选出好的施肥技术模式,推动农田地力的提升和粮食生产可持续增长。

土壤肥料长期定位试验能够揭示农业生态系统长期的变化趋势,诸如作物产量、土壤养分、营养和污染物循环、生物多样性、温室气体排放等,是短期实验无法获得或替代的,对探索农业可持续性有重要的指导意义。英国、美国、德国等发达国家都建有长期定位施肥试验站,最著名的是英国洛桑试验站,田间实验始于1843年,至今已170多年。不仅清楚展示一个多世纪以来肥料、轮

* 基金项目:农业公益性科研项目(201203030),国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB100501)

修改稿收到日期:2015年5月29日



中国科学院

作、品种、植保对作物产量的重要贡献,而且保存下来的近200年、约30万份土壤、植物、肥料样品,也为后人深入研究元素循环、环境变化提供了极为宝贵的材料^[2]。总之,土壤肥料长期定位试验为农学、土壤学、植物营养学、生态学、环境科学等学科发展做出了十分重要的贡献,在未来仍将发挥重要的作用,尤其是通过数据的深入挖掘和多学科的交叉合作,来反演和预测气候变化对农业生态系统的影响,这是其他任何实验都无法替代的。

我国地域广阔、气候类型多样、土壤类型复杂,先后建立了数十个长期定位试验,涵盖黑土、棕壤、褐土、潮土、黑垆土、灌漠土、灰漠土、红壤、黄壤、水稻土等十几个主要农田土壤,包括旱地、水田、水旱轮作3种利用方式和一年一熟、一年二熟两种主要轮作制,力求客观反映我国农田土壤肥力的演变特征。通过近30年的持续监测,已取得了许多重要成果,有些已经成为国家或部委决策依据,在农业生产和耕地保护方面发挥了重要作用。当然,还有许多地方值得完善、许多数据值得挖掘和总结。基于此,本文对我国土壤肥料长期定位试验的概况、取得的成果、存在的问题和未来的发展做详细评述,旨在推动我国土壤肥力演变和土壤培肥研究,提升国家耕地质量和农业可持续性。

1 我国农田土壤肥料长期试验网络

20世纪70年代末,中国农业科学院土壤肥料所(现“农业资源与农业区划所”)主持“全国化肥网”在22个省(区、市)12种类型农田土壤上布置一批长期肥料试验(约80个)。试验采用两种设计方法:(1)以化肥为主,设置对照不施肥(CK)、氮肥(N)、磷肥(P)、钾肥(K)、氮磷肥(NP)、氮钾肥(NK)、磷钾肥(PK)、氮磷钾肥(NPK)8个处理,有的试验增加有机肥(M)和氮磷钾与有机肥配合(NPKM)2个处理;(2)有机肥与化肥配合试验,采用裂区设计,主处理为不施有机肥和施用有机肥2个处理,副处理为N、P、K化肥配合,设CK、N、NP、NPK 4个处理。约有1/3的试验延续至今,成为不

可或缺的财富,如吉林公主岭黑土有机肥试验以及山东莱阳潮土、辽宁沈阳棕壤、湖南望城水稻土等不同肥料试验。

20世纪80年代末,中国农业科学院土壤肥料所又连同一些省(区、市)的农业科学院土壤肥料所及农业大学,在国家计委立项建立“国家土壤肥力与肥料效益长期监测基地网”,涉及吉林公主岭黑土、新疆乌鲁木齐灰漠土、陕西杨凌塬土、北京昌平潮土、河南郑州潮土、重庆北碚紫色土、湖南祁阳红壤、浙江杭州水稻土和广东广州赤红壤9个主要土壤类型,涵盖了我国主要农业生产区。试验统一设置如下处理:不耕作、不施肥、不种作物(CK₀)、CK、N、NP、NK、PK、NPK、NPKM、氮磷钾(增量)+有机肥(增量)(1.5NPKM)、NPK+秸秆还田(NPKS)、M、NPK+有机肥+轮作方式(NPKM₂)。除了广东广州赤红壤试验因城市发展而变迁外,其他都延续至今已25年。

同期,中科院也在全国不同生态区布置了“土壤养分循环和平衡的长期定位试验”,涉及农田生态系统的共16个试验站,包括黑龙江海伦、辽宁沈阳、山东禹城、河南封丘、河北栾城、江苏常熟、湖南桃源、江西千烟州和鹰潭、西川盐亭、陕西安塞和长武、甘肃临泽、西藏拉萨、新疆阿克苏、广西环江等。另外,有关高等院校和地方科研院所,也布置了一些长期肥料定位试验,持续时间长的如淮北师范大学的淮北砂姜黑土(1981年起)、福建农业科学院土壤肥料所的闽侯黄泥田(1983年起)、黑龙江八一农垦大学的密山白浆土(1987年起)等,都已30余年。

尽管我国还没有持续50年以上的农田土壤肥料长期实验,但大于20年的有将近100个(40个超过30年),分布于25个省(区、市),基本涵盖我国主要的粮食生产区,能反映农田土壤质量的实际演变状况。然而,各试验点的运行机制和管理水平参差不齐、并长期处于分散状态和各自为战的局面,缺乏国家层面上的统一化、规范化和科学化组织调控。随着我国农田集约化程度的进一步提高以及种植结构的调整,迫切需要完善和构建我

国农田土壤肥料长期监测体系,开展农田土壤肥料的时空演变规律、驱动因素及其与生产力耦合关系的研究,探求土壤培肥指标,构建不同区域的农田土壤培肥技术体系,全面提升我国农田肥力及粮食生产能力。因此,以2012年启动的公益性行业(农业)科研专项“粮食主产区土壤肥力演变与培肥技术研究”为契机,中国农业科学院牵头,联合了省级农业科学院、中科院以及高校等全国数十家相关单位,构建了全国农田土壤肥力长期试验网络^[3]。

2 农田土壤肥料长期试验的重要成果

我国农田土壤肥料长期试验历经30余年,一大批科研工作者投身其中,付出了巨大的劳动,迄今,已取得了许多凝聚数代科研人员心血的显著性成果^[3],在国家农业生产和粮食安全中发挥了重要作用。现就部

分重要成果简述如下。

2.1 中国农田土壤有机质演变

土壤有机质是耕地质量的核心,因此,其长期演变和提升机制是关注的热点。研究表明施肥增加土壤有机质,特别是有机无机肥配施NPKM,农田土壤有机质显著提升。进一步发现,土壤有机质增加与有机物料(秸秆或有机肥)碳投入存在极显著的正相关关系(旱地为线性、水田为指数)^[4,5],据此,可获得维持当前土壤有机质的最小碳投入及有机物料转化为土壤有机质的效率(利用率)(全国平均16.3%,随水热增加而降低)。证实在现有施肥耕作下,我国大部分地区仅靠根茬归田即可维持当前土壤有机质水平,但某些地方,比如山西寿阳、江西进贤旱地,需要补充较高量的有机肥/秸秆,才能维持当前的肥力水平(表1)。

当前,对长期施肥下农田土壤有机质的

表1 维持当前土壤有机质所需的碳投入

试验点	起始土壤有机质 (g/kg)	维持投入 (t C/hm ² ·a)	当前残茬 (t C/hm ² ·a)	需投入有机肥 ^a (t C/hm ² ·a)
公主岭	13.05	2.14	2.45	0.00
沈阳	9.23	1.74	2.01	0.00
寿阳	13.81	4.55	1.62	20.9
郑州	6.67	1.89	3.72	0.00
徐州	6.26	2.32	2.89	0.00
乌鲁木齐	8.80	1.69	1.60	0.60
张掖	11.50	2.70	2.18	3.70
平凉	6.24	0.47	1.31	0.00
杨凌	6.41	0.47	2.88	0.00
祁阳	8.58	2.08	3.07	0.00
进贤(旱地)	8.93	3.54	1.93	11.5
重庆	13.92	1.53	2.51	0.00
遂宁	9.22	0.80	2.61	0.00
武昌	15.91	1.48	2.17	0.00
望城	19.72	1.48	2.49	0.00
南昌	14.85	2.74	2.68	0.40
进贤(水田)	16.22	0.79	2.25	0.00

^a 干基,含碳量14%



中国科学院

演变过程及趋势预测,人们已发展和运用了多个模型,诸如 RothC、CENTURY、DNDC 等^[6,7],并在我国长期施肥试验中得到应用^[8-10]。结合 GIS 软件,可体现区域尺度有机质的动态变化特征。进一步和全球尺度的气候变化模型耦合,可反演全球气候变化-土壤有机质间的响应和反馈。但是,这些模型主要来自欧洲旱地,它们不适用于水田及水旱轮作模式。国内学者正以 RothC 为主,矫正模型参数,使其成功用于水田及水旱轮作(精度达 86%),从而真正成为在我国普遍适用的有机质预测模型。

长期施肥不仅改变土壤有机质数量,而且改变其组成和质量。张坚超^[11]研究显示长期施用有机肥显著提高土壤活性有机碳含量,并降低土壤有机质的烷基 C 和芳香 C 相对含量、增加烷氧基 C 相对含量,也就是说,降低了土壤有机碳的分解程度、芳香度和疏水性。

2.2 长期施肥的作物产量变化

长时间耕作,农田基础地力下降,所以,必须靠合理施肥来维持作物的高产和稳产。在玉米、小麦、水稻三大作物中,玉米产量最易受施肥影响,而水稻的稳产性最好。多个试验点多年产量数据分析显示有机无机肥配施是提高作物产量的最好施肥方式,而且对水稻而言,肥料应优先分配在早稻上^[12]。

通常,在土壤肥力较低情况下,化肥单施或配施能快速提供作物生长所需的养分,而有机肥中养分释放速率较慢,导致试验初期有机肥及有机无机肥配施处理作物产量不如化肥处理;但长期施肥后,有机肥或有机无机肥配施处理对土壤性质的改善更强,使其产量会达到或超过化肥水平。这已在我国长期施肥试验得到验证,比如吉林公主岭、甘肃平凉等^[13,14]。Dawe 等人^[15]在总结亚洲 25 个稻田长期定位实验结果时,也发现 NPKM 与 NPK 处理对产量的影响无显著差异。

综合上述结果,我们认为一方面化学氮肥可以被有机肥适当替代(长期试验处理中,70%化肥

氮被替代),特别在肥力较高的土壤上,这种替代十分必要,对我国全面控制化学氮肥投入具有重要意义。但是,另一方面也证实化学氮肥不能被替代,即完全靠有机肥,这对我国高度集约化种植管理尤其重要。Dawe 等人^[15]也认同这一点,强调在养分供应上,有机肥只能是化肥的补充。总之,在我国农作物生产中,有机无机肥配合是值得推荐的最佳施肥模式。不过,具体到有机肥和无机肥配合,到底多大的比例是最为合适的,目前还没有定论,是需要深入探讨的一个课题。

2.3 施肥与土壤酸化机制

土壤酸化是一个普遍发生的现象,其原因是作物对离子不平衡吸收以及土壤淋溶等,但显然施肥强烈影响了这个过程。氮肥大量施用加剧土壤酸化^[16],在湖南祁阳红壤的长期定位施肥试验,证实连续施氮肥(N、NP、NK、NPK),土壤 pH 值急剧下降,约 10 年就达到 4.5 以下(降低 1.2 个单位),酸化速率高达 $3.5 \text{ kmol H}^+/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$;而自然状态(如 CK)在 23 年持续耕作下都未发现酸化^[17]。数据分析显示,有机肥施用不仅能抑制酸性土壤的酸化,而且还一定程度提高酸性土壤的 pH 值^[17],暗示酸性土壤施用有机肥具有更多的意义,除了提供养分、改良土壤结构外,还能阻止/逆转土壤酸化。因此,有机肥施用,特别在酸性土壤上,应该被大力推广。

氮肥(如尿素)硝化是土壤酸化的主要原因: $\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 4\text{O}_2 = 2\text{H}^+ + 2\text{NO}_3^- + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$ 。祁阳长期施肥试验施 N 量为 $300 \text{ kg}/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$ (化肥处理是尿素,NPKM 处理 30%为尿素,M 处理皆有机氮),如果不考虑其他因素,假设尿素全部硝化,则化肥处理产生 $21.7 \text{ kmol H}^+/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$,NPKM 处理产生 $6.51 \text{ kmol H}^+/\text{hm}^2 \cdot \text{a}$,远低于纯化肥处理,可大大延缓土壤酸化。而且所用有机肥(猪粪)pH 值 8.75,包含 82.7 cmol/kg 碱,折合每年分别向土壤添加 $9.6 \text{ kmol OH}^-/\text{hm}^2$ (NPKM)和 $13.8 \text{ kmol OH}^-/\text{hm}^2$ (M)^[17]。可见,有机肥处理(NPKM 和 M)能完全抵消尿素硝化产生的质子,导致土壤 pH 值维持



稳定或持续缓慢升高。孟红旗^[18]考虑施肥、作物收获移除、土壤淋溶及有机碳分解等因素,估算祁阳红壤化肥处理(N、NP、NPK)的质子负荷为 17.91、18.40、19.84 kmol H⁺/hm²·a,净质子添加速率(NAAR)为 18.23、18.87、20.44 kmol H⁺/hm²·a;而有机肥处理(NPKM、M),质子负荷分别为 1.80、-3.58 kmol H⁺/hm²·a,NAAR 分别为 -2.20、-10.45 kmol H⁺/hm²·a。同样也解释了 NPKM 处理基本保持土壤 pH 值稳定,M 处理将持续增加土壤 pH 值。总之,施用有机肥,红壤的酸化被阻止/逆转。

张坚超^[11]发现祁阳红壤长期施用有机肥后,非晶型 Fe/Al 氧化物含量显著增加,而且有机质对 Al³⁺的络合能力也显著高于化肥处理,这可能是有机肥提升土壤 pH 值、减缓酸化及铝毒的主要机制。

2.4 长期施肥的土壤生态功能演变

土壤经长期施肥耕作后,其物理、化学、生物学性质会发生明显变化,这将影响到生态功能。Li 等人^[19]发现连续 17 年施用化肥后,西北黄土的土壤-质量指数(SQI)明显增加,并且化肥配施比单一施用能维持更高的 SQI;他们也发现化学指标比物理指标变化更显著、表层(0—15 cm)SQI 对施肥的响应更敏感;进一步地,对施肥响应敏感的指标可分为三类:土壤肥力指标(土壤有机质、总磷、有效态氮)、土壤质地指标(粘粒、粉粒)和土壤结构指标(容重、平均重量直径 MWD)。将各土壤参数通过回归方程和主成分分析(PCA)后,结合转化成一个单一指数 SQI,从而定量评价土壤质量及土壤管理(施肥)的可持续性,这是 Li 等人^[19]的工作亮点,但他们的研究未包括微生物学质量指标,这是未来应该在 SQI 评价中考虑的,以便科学全面地评估施肥对土壤质量的影响。

长期施用有机肥能增加土壤持水性,从

而提高水分利用效率,这对干旱的西北黄土区农业生产尤其有利^[14]。长期平衡施肥(NPK 或 M),对土壤结构的改善是十分明显的,进而将增进土壤保肥、保水、通气性,提高作物稳产性。在德国 Bad Lauchstädt 进行的 106 年施肥试验已证实了这点,不仅如此,该试验还证实有机无机肥配施比单独施用有机肥更有利于土壤团聚结构的形成^[20]。

如上所述,有机肥施用前期,作物产量较低,长期(8—10 年)施用后,产量接近或超过化肥配施。发生的最大变化是微生物群落,从而导致有机肥料分解、养分供给发生根本性变革。Feng 等人^[21]利用封丘长期定位试验历年土样与当前土壤,进行指纹图谱和克隆文库分析,揭示一种类 *Bacillus asahii* 细菌对长期施用有机肥的响应最为显著,且是潮土中的土著微生物,它需要 2—4 年方成为优势微生物,能够加速和促进其他微生物对潮土有机质累积和磷素循环的过程,因此,在作物生长和土壤地力中起到领军性的作用。另外,He 等人^[22]也揭示氨氧化细菌和氨氧化古菌对不同的长期施肥有显著不同的响应:NPKM 处理中有最高的数量,而 N 处理数量最少;二者与土壤 pH 值及硝化作用显著正相关,暗示它们在土壤铵态氮的氧化方面扮演重要角色。总之,长期施肥下微生物群落与功能的动态变化,揭示了农业生态系统养分循环的驱动机制,已成为当前研究的热点。

2.5 长期施肥的环境效应

通过长期施肥试验,还可评估农田不同施肥措施对土壤、大气等的环境影响,比如土壤重金属积累与农田温室气体排放等。30 余年化肥施用,未造成土壤重金属显著积累,但是化肥长期施用,引起土壤酸化,从而导致土壤重金属活性增加,进而可能引起作物可食部分超标,这是应该关注的,尤其

在南方酸性土壤,需特别小心。有机肥施用,土壤重金属普遍积累,特别是Cd,在多个试验点都出现超出国家土壤环境质量二级标准,即发生污染;而且,土壤重金属的积累主要来源于有机肥带入。因此,有机肥料包括饲料中重金属(特别是Cd)含量需严格控制。根据历年土壤Cd含量-有机肥带量之间的相关性,建立合适数学方程,就可计算Cd超标时有机肥最小带量;若保证土壤使用50年不超标,从而可计算当前有机肥施入量下Cd的最大允许含量。比如,根据前期研究^[23],我们计算出祁阳红壤猪粪(干粪)Cd含量不能超过0.03 mg/kg,才能保证当地土壤(初始Cd 0.09 mg/kg)在施入干猪粪14 220 kg/hm²·a下,50年内不会因有机肥引起土壤Cd超标(> 0.3 mg/kg)。

长期施肥显著提高了稻田土壤CH₄和CO₂排放,且净温室效应表现为有机化肥配施(粪肥、秸秆)大于化肥单施;但净温室气体排放强度在施肥处理间并没有显著差异,暗示有机无机配施仍是值得推荐的农业生产施肥技术,可保证减轻区域气候变化^[24]。Wei等人^[25]发现在西北黄土区,相比氮肥,有机肥能减轻N₂O排放,因而在冬小麦生长时,也应该推荐有机肥而避免单施氮肥,以获得高产和低温室气体排放。不过,Wang等人^[26]却在哈尔滨黑土长期试验证实,有机肥施用较化肥显著增加CO₂排放,在农业实践中需考虑其环境影响。可见,不同的长期试验、不同的试验处理,靠实验室培养而不是长期的田间监测,可能得到不一致的结果,今后应加强田间长期温室气体排放原位动态监测与模拟研究。

3 问题与展望

我国农田土壤肥料长期试验虽然取得了上述一系列成果,但也出现了许多问题,需要认真思考、加以改进。

3.1 国家的重视和管理

土壤肥料长期试验有的隶属农业部,有的属于中科院,有的则属于教育部(高校),行政管理不统一,导致各自为政、发展水平参差不齐。而且国

家及地方领导重视不够,导致城市化进程中,一些长期试验田被侵占而废弃,这是巨大的损失。

因此,从国家层面上,应该重视加强对长期试验的支持。(1)将长期试验作为公益性投资,从财政上长期重点支持,在我国建立一批百年长期试验,并列入国家财政投资规划。(2)纳入国家发展规划的长期施肥试验,国家应该立法确保试验地被永久保留,而不是被任意占用。(3)国家应该将隶属不同部门的长期施肥试验纳入一个管理体系,形成专门管理机构(领导小组、科学委员会及秘书处等),协调各试验点的运行、构建共享的数据库、组织重大科学研究计划、为国家粮食安全和农业可持续发展等提供决策依据。

3.2 样品管理规范及完善配套设施

土壤、植物、肥料等样品的保留,为验证新的科学假设提供了宝贵的材料,而且时间愈久,愈显珍贵。因此,各长期试验的样品需妥善保管。20—30年前,电脑不够普及,造成早期的样品信息只能记录在纸上,随着人员的变动和更替,一些记录信息易丢失,且历史信息的查找也十分繁琐和浪费时间。亟需将样品信息输入电脑、进行规范化管理。建议对保存的各个样品按年分类、建立电子信息档案,生成各自的二维码,通过二维码扫描,会十分方便地找到所需样品及其信息。

目前部分长期试验没有气象观测站,而现今大数据时代各种模型都需要气象资料,这样只能选择就近市县的气象站资料,但同一县区不同地貌、不同海拔,气候变化有一定的差异。另外,长期试验由于区域面积小,不能频繁采集样品,一些土壤、植物指标的测定最好在原位无损进行,因此,应配备一些原位测试设备,如近红外光谱仪、多参数土壤分析仪、X射线荧光仪等。

3.3 与时俱进、建立灵活的长期试验运行机制

长期施肥试验,首先,应该坚持,不能轻易更改实验方案。但是,也不能一味坚持、不做任何改进,毕竟30年前的有些设计已经与当前严重脱节。需要及时做出调整、更改或补充。我们认为

区域面积大的试验,可以进行裂区,增补新的实验内容,比如酸化土壤的添加石灰实验、没有秸秆处理的添加秸秆还田实验等;区域面积小的试验点,应该新建一些试验,设计一些与当前较吻合的试验处理,比如复合肥施用、秸秆全部还田等。

另外,由于种种原因,在广东、海南等砖红壤、赤红壤农田上还没有土壤肥料长期试验,需要国家和地方支持,尽快建立相关的试验,并纳入到国家长期规划战略中。

参考文献

- 1 Tester M, Langridge P. Breeding technologies to increase crop production in a changing world. *Science*, 2010, 327: 818-822.
- 2 赵方杰. 洛桑试验站的长期定位试验: 简介及体会. *南京农业大学学报*, 2012, 35(5): 147-153.
- 3 徐明岗, 张文菊, 黄绍敏, 等. 中国土壤肥力演变(第二版). 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.
- 4 Zhang W J, Wang X J, Xu M G, et al. Soil organic carbon dynamics under long-term fertilizations in arable land of northern China. *Biogeosciences*, 2010, 7: 409-425.
- 5 Zhang W J, Xu M G, Wang X J, et al. Effects of organic amendments on soil carbon sequestration in paddy fields of subtropical China. *Journal of Soils and Sediments*, 2012, 12: 457-470.
- 6 Falloon P, Smith P. Simulating SOC changes in long-term experiments with RothC and CENTURY: model evaluation for a regional scale application. *Soil Use and Management*, 2002, 18: 101-111.
- 7 Sleutel S, De Neve S, Beheydt D, et al. Regional simulation of long-term organic carbon stock changes in cropland soils using the DNDC model: 1. Large-scale model validation against a spatially explicit data set. *Soil Use and Management*, 2006, 22: 342-351.
- 8 Jiang G Y, Xu M G, He X H, et al. Soil organic carbon sequestration in upland soils of northern China under variable fertilizer management and climate change scenarios. *Global Biogeochemical Cycles*, 2014, 28: 319-333.
- 9 Cong R H, Wang X J, Xu M G, et al. Evaluation of the CENTURY model using long-term fertilization trials under corn-wheat cropping systems in the typical croplands of China. *Plos One*, 2014, 9: e95142.
- 10 Wang L G, Qiu J J, Tang H J, et al. Modelling soil organic carbon dynamics in the major agricultural regions of China. *Geoderma*, 2008, 147: 47-55.
- 11 张坚超. 长期不同施肥措施下旱地红壤有机碳保持及土壤酸化减缓的机理研究. 博士学位论文. 南京: 南京农业大学, 2014.
- 12 李忠芳. 长期施肥下我国典型农田作物产量变化特征及其机制. 博士学位论文. 北京: 中国农业科学院, 2009.
- 13 彭畅, 高洪军, 牛红红, 等. 长期施肥和气候因素对东北黑土区玉米产量的影响. *玉米科学*, 2008, 16: 179-183.
- 14 Fan T L, Wang S Y, Tang X M, et al. Grain yield and water use in a long-term fertilization trial in Northwest China. *Agricultural Water Management*, 2005, 76: 36-52.
- 15 Dawe D, Dobermann A, Ladha J K, et al. Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? *Field Crops Research*, 2003, 83: 191-213.
- 16 Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands. *Science*, 2010, 327: 1008-1010.
- 17 Cai Z J, Wang B R, Xu M G, et al. Intensified soil acidification from chemical N fertilization and prevention by manure in an 18-year field experiment in the red soil of southern China. *Journal of Soils and Sediments*, 2015, 15: 260-270.
- 18 孟红旗. 长期施肥农田的土壤酸化特征与机制研究. 博士学位论文. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- 19 Li Q, Xu M X, Liu G B, et al. Cumulative effects of a 17-year chemical fertilization on the soil quality of cropping system in the Loess Hilly Region, China. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2013, 176: 249-259.
- 20 Naveed M, Moldrup P, Vogel H J, et al. Impact of long-term fertilization practice on soil structure evolution. *Geoderma*, 2014, 217: 181-189.



中国科学院

- 21 Feng Y Z, Chen R R, Hu J L, et al. *Bacillus asahii* comes to the fore in organic manure fertilized alkaline soils. *Soil Biology and Biochemistry*, 2015, 81: 186-194.
- 22 He J Z, Shen J P, Zhang L M, et al. Quantitative analyses of the abundance and composition of ammonia-oxidizing bacteria and ammonia-oxidizing archaea of a Chinese upland red soil under long-term fertilization practices. *Environmental Microbiology*, 2007, 9: 2364-2374.
- 23 Zhou S W, Liu J, Xu M G, et al. Accumulation, availability and uptake of heavy metals in a red soil after 22-year fertilization and cropping. *Environmental Science and Pollution Research*, DOI10.1007/S11356-015-4745-7.
- 24 刘晓雨, 李志鹏, 潘根兴, 等. 长期不同施肥下太湖地区稻田净温室效应和温室气体排放强度的变化. *农业环境科学学报*, 2011, 30: 1783-1790.
- 25 Wei X R, Hao M D, Xue X H, et al. Nitrous oxide emission from highland winter wheat field after long-term fertilization. *Biogeosciences*, 2010, 7: 3301-3310.
- 26 Wang L F, Qiao Y J, Zhang X L. Effects of mineral fertilizers and organic manure long-term application on carbon dioxide emissions from black soils in Harbin, China. *Advanced Materials Research*, 2011, 255-260: 2925-2929.

Long-term Soil Fertilizer Experiments and Sustainable Agriculture in China

Xu Minggang Zhou Shiwei Zhang Wenju Lu Chang'ai

(Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences,
Beijing 100081, China)

Abstract Long-term soil fertilizer experiments (LSFEs) provided information revealing long term changes of crop yields, soil nutrients, necessary and toxic element biogeochemistry, species diversity, greenhouse gas emissions, etc. in agricultural systems, and thus promoting the sustainable development of agriculture, that cannot be easily obtained from some short-term experiments. In China, several tens of LSFEs have been performed, located in the national main grain producing areas. They have lasted for about 30 years and played important roles in China's food production and cropland protection. Hence, this paper reviewed the achievements obtained and the existing problems and future development of LSFEs in China, in order to promote the national study on soil fertility, and to enhance its soil quality and agricultural sustainability. Firstly, in 1979 China Fertilizer Network was constructed, where about 80 LSFEs were arranged in 22 provinces, autonomous regions, and municipalities. In 1990, National Soil Fertility and Fertilizer Effects Long-term Monitoring Network was constructed, where 9 LSFEs were arranged in main grain producing areas. Additionally, Chinese Ecosystem Research Network constructed by Chinese Academy of Sciences in 1990 also contained 16 LSFEs. Universities and institutes also arranged some LSFEs. Now there are about 100 LSFEs, lasting for over 30 years, in China. Secondly, the marked achievements from LSFEs were illustrated as follows: (1) Evolution of soil organic matter (SOM). Long-term application of fertilizers especially manure promoted SOM, and there was significant relationship between SOM and input of organic materials, where the conversion efficiency of organic materials into SOM can be estimated to be about 16.3% for whole China. (2) Crop yield. Combining application of organic and chemical fertilizers was commended as the best fertilization pattern attributed to the highest crop yield and stability. A certain proportion of chemical nitrogen could be replaced by organic fertilizers in China's croplands, which helps to reducing the application rate of chemical fertilizers and thus decreasing its environmental risk. (3) Soil acidification. Long-term fertilization influenced soil acidification strongly, where nitrogen fertilizers accelerated the process whereas organic fertilizers inhibited it, and the probable cause is the neutralization of alkali ions input by manure and the aluminum complexation by organic materials. (4) Soil ecology.



ical functions. Long-term manure fertilization increased obviously soil quality index (SQI), soil water holding capacity, and soil aggregate stability, in particular, soil microbial community. For example, higher population of ammonia-oxidizing archaea and ammonia-oxidizing bacteria and indigenous *Bacillus asahii* was observed in red soil and fluvo-aquic soil, respectively. (5) Soil environmental effects. Although it did not cause the accumulation of heavy metals in soils, application of chemical fertilizers maybe increase metal availability due to soil acidification. On the contrary, long-term manure fertilization resulted in heavy metal accumulation especially Cd. In addition, long-term fertilization strongly affected greenhouse gas (CH_4 , CO_2 , and N_2O) emissions; no clear conclusion has yet been reached. Thirdly, some management measures and suggestions on China's LSFs were given as follows: (1) China's government should strengthen the support to LSFs with more fund and more resources. Especially, they needs to be included in the National Development Plan, and thus be protected by laws; they also needs to be managed by a specialized agency or organization so as to play a greater role. (2) A series of standardized management systems needs to be implemented in LSFs, e.g. it is necessary to develop the entirety of an electronic document's information for every experimental station and sample. Additionally, supporting facilities such as automatic meteorological equipment and in-situ-analysis instruments should be equipped in every experimental station in order to effectively monitor the long-term processes of soil and plant and to simulate the processes. (3) LSFs should be flexible and change with times. In order to adapt to the new situation, or in order to resolve new scientific issues, we must continually adjust, modify or supplement to these LSFs. For example, split-plot can be designed on the large area of plot, so that some new experiments such as lime-amendment addition would be performed; or new experiments adjacent to LSFs, such as application of compound fertilizers and straw returning, may be arranged. Of course, in those areas without LSFs such as Guangdong and Hainan provinces, national and local governments need to support the construction of LSFs and ensure their functions. In conclusion, LSFs are invaluable wealth inherited from the senior scientists, and many important findings could be obtained based on these research platforms, so we need to fully use them, and promote their healthy and sustainable development in the future.

Keywords long-term soil fertilizer experiments (LSFs), soil fertility, food security, sustainable agriculture

徐明岗 中国农业科学院农业资源与农业区划所研究员, 博士生导师。中国土壤学会副理事长, 中国农业科学院现代土壤学一级岗位杰出人才, 农业部有突出贡献的中青年专家。长期从事土壤肥力演变与土壤环境修复方面的研究。近10年来, 共取得8项成果, 其中国家科技进步奖二等奖2项。以第一作者或通讯作者出版专著5部, 在国内外核心刊物上发表论文80余篇(其中SCI论文26篇)。是农业行业专项“粮食主产区土壤肥力演变与培肥技术”的首席科学家。E-mail: xuminggang@caas.cn

Xu Minggang, Prof. of soil science, gained his Ph.D. in Agricultural Sciences mainly in soil chemistry and plant nutrition science in 1994 at the Northwestern Agricultural University of China. Since then, he has been working on soil fertility and got total 36 million RMB (~USD 6 million) from a range of funding bodies both nationally and internationally, achieved 8 awards from Chinese Governments. He has edited five books and published more than 80 research papers in peer-reviewed journals. He is one of the outstanding leaders in soil science in China. E-mail: xuminggang@caas.cn