

农田长期生态过程的长期试验研究进展与展望^①

孙 波¹, 朱兆良¹, 牛 栋²

(1 中国科学院南京土壤研究所, 南京 210008; 2 中国科学院资源环境科学与技术局, 北京 100864)

摘 要: 长期试验是研究农田长期生态过程及其环境效应和调控措施的重要手段。本文综述了国际上重要农业长期试验的研究发展趋势, 分析了农业长期试验的重要作用, 然后分析了国内农业长期试验网的发展现状, 提出了未来发展的建议。农业长期试验的发展主要表现在长期农业生态和环境过程的研究领域不断扩展、长期试验成为多学科交叉研究平台和应用研究平台。国内建立了两个主要的农业长期试验网络, 重点开展了水分和养分的长期试验。目前农业长期试验网络需要在区域尺度上加强农业、环境和生物科学的交叉研究; 扩展试验地面积, 完善试验设计; 完善分析测试方法和样品、数据的保存系统。国家需要制定和实施稳定农业长期试验研究的管理和经费支持政策。

关键词: 农业长期试验; 长期生态过程; 作物生产; 生态环境效应

中图分类号: S-3

农业生态系统是一种人为控制的生态系统, 人为管理(施肥、灌溉、施用农药、土地利用方式改变等)和气候环境因素共同影响了农田生态系统组成及其功能和过程的变化, 这些变化过程和相互作用存在时间和空间的效应^[1-2]。短期的实验室模拟试验和野外试验揭示的是生态和环境过程的短期波动, 而长期试验及其保存的样品记录了长时间尺度(几十年至百年)的生态系统和环境变化信息, 可以用来研究生态系统的长期变化过程以及生态过程对人为干扰和环境变化响应和反馈的长期效应(如生态系统退化、全球气候变化、酸雨和污染等)。同时, 借助于国家、区域和全球尺度的长期监测和研究网络, 从大空间尺度对生态和环境过程及其影响因素进行研究, 提出相关的管理对策。

自 20 世纪 80 年代以来, 我国的农业耕作和管理方式出现了许多变化, 这些变化在促进农业生产的同时也带来了一些问题, 例如, 农业面源污染趋于严重, 一些农产品的品质或健康质量下降, 化肥的增产效果降低, 作物的病虫害多发等。产生这些问题的原因是多方面的。其中显而易见的有: 化肥使用量的大量增加和使用技术不合理, 有机肥料使用量的大量减少, 农药的大量不合理使用, 耕作趋于简化, 灌溉用水受到污染等。这些变化对农业生产和环境的影响, 有的可以在短期内显现出来, 有的却要经过较长时间才能为人们所察觉, 例如, 耕地土壤质量和养分状况的变化, 土壤中重金属的积累和迁移转化, 环境中农药的积累, 地下水中硝酸盐的积累等。因此需要进行长期

的试验和观测。同样, 为了解决这些问题所应采取的对策和措施及其效果也需要较长时间的定位试验和研究才能明确, 例如, 不同的种植制度下化肥特别是 N 肥以及有机肥料的适宜使用量(指既可获得高产和稳产, 又能保持和提高农田土壤肥力并避免引起面源污染的用量)是多少? 推行保护性耕作对减轻水土流失、保持和提高土壤生产力的长期效果如何? 低产土壤改良和中产土壤培肥措施的长期效果如何? 等等。不仅如此, 由于农业生产具有很强的区域性, 需要在大的空间尺度上对农田生态环境的演变过程进行比较研究, 以便为制定农业的区域发展战略提供科学依据, 这就需要建立国家和区域性的试验研究网络。

目前我国的农业田间长期试验与国际发展水平相比还存在不小的差距, 我们需要结合我国国情, 吸收国外经验, 加强农业长期试验网的建设, 为不同区域农业的可持续发展提供科技支撑。

1 农业长期试验研究的发展趋势

英国洛桑试验站经典试验(Rothamsted Classical Experiments)最早从 1843 开始^[3], 设置了 7 个百年尺度的经典试验, 包括 Broadbalk 和 Barnfield 长期试验(1843)、大麦试验(1852)、小麦-休闲轮作试验(1856)等。在 1933—1993 年间又补充设置了 10 个长期试验, 如 Woburn 牧草-旱作试验(1938)、高地和森林牧草-旱作试验(1949)、Woburn 有机肥试验(1964)、秸秆试验(1983)、Woburn 污泥试验(1993)等。

^①基金项目: 中国科学院知识创新工程项目(KZCX2-YW-407-2)和国家重点基础研究发展规划项目(2005CB121108)资助。

作者简介: 孙波(1968—), 男, 江苏南京人, 博士, 研究员, 主要从事土壤质量时空演变与养分循环研究。 E-mail: bsun@issas.ac.cn

英国洛桑试验站的长期试验是目前世界上历史最长和试验最多的试验体系。但其研究也不断发展,初期由农场主 Lawer JB 和科学家 Gilbert JH 设计的 Broadwalk 试验主要是试验不同农业措施的可持续性,前期的研究结果显示了现代农业科学在消除真菌、病虫害和杂草方面以及施肥方面的技术进步,后期的研究不断地引进新的环境健康(如多环芳烃、铅、镉污染)和生态科学(如杂草和牧草的生物多样性、全球变化)问题,并不断地为英国乃至世界的生态与环境管理提供政策和建议^[1-3]。

另一个著名的长期试验是美国阿拉巴马州大学的阿拉巴马农业试验站在 1896 年开始了一个棉花长期轮作试验(Alabama's Old Rotation),主要研究通过棉花与其他作物的轮作和冬季绿肥进行棉田的 N 素管理^[4-5]。1929 年开始两年轮作试验,1954 年开始 N、P、K 养分用量试验。在长期试验的基础上发展了很多棉田 N 素管理技术^①,同时从 20 世纪五六十年代起利用长期试验结果为阿拉巴马州制定了棉花的 N 肥推荐用量标准,近期通过对土壤肥力、棉花品质(特别是转基因棉花品种)的研究进一步完善了推荐标准。

在英国洛桑试验站长期试验的引领下,世界各国农业研究中陆续建立了一些长期试验和样品保藏系统。1989 年美国凯洛格生物研究站建立了代表美国中北部玉米种植带地区的长期试验。主要研究农作物(玉米-大豆-小麦)轮作和牧草(紫花苜蓿)连作系统中养分和耕作管理^[6]。1992 年在 42 hm² 的主试验区建立了草地土壤微生物基因变化试验,研究不同水平农药(2,4-D)的影响,同时建立了欧洲玉米钻孔虫治理试验;1993 年增加了 3 个生态系统类型,研究相同土壤上不同生态参数(植物种类、凋落物、小气候)对生产力的影响;2000 年建立了生物多样性试验和玉米连作的 N 肥用量试验^[7];2003 年建立了灌溉试验。近期,凯洛格生物研究站开始利用长期试验就全球变化的温室气体排放和调控对策问题开展了系列研究。

在发展中国家,菲律宾国际水稻研究所 1979 年建立了热带地区水稻长期试验(long-term continuous cropping experiment),主要研究连续水稻种植系统中的水肥管理。印度旁遮普农业大学 1984 年建立了代表南亚半干旱亚热带地区的水稻-小麦轮作长期试验,研究不同施肥措施的产量效应。后期这些试验都扩展到研究农作系统产量的可持续性及其对全球气候变化的响应^[8-9]。

总体上,国际上长期试验研究数量很少,其主要

原因是:①国际学术界通常认为长期观测不是创新性的科学研究,获得连续资助十分困难;②长期研究和观测的地点发生变化,使得长期结果无法解释甚至失去科学价值;③长期试验对长期统一观测的设计不明确,没有对一些复杂过程进行单个控制过程的辅助观测研究;④对从事长期研究的科研人员和管理者缺乏资源和激励机制;⑤分析仪器科学的发展导致分析方法不断变化,缺少对新旧分析技术之间的校准研究;⑥科学的迅猛发展导致长期试验研究的问题或者因其假设已失去意义,或者已经得出了确定的答案,因而不需要继续进行长期的连续观测。

从近几十年来国际长期试验研究进展看,长期试验的发展表现出两个趋势:一个是长期试验的研究领域不断扩展,成为资源、环境和生态多学科交叉研究的平台;另一个是长期试验成为应用研究的平台,为解决国家和区域农业和环境问题提供政策和措施。

同时,国际上日益关注长期生态和环境观测的联网研究。在国家尺度上,美国 1980 年建立了长期生态学研究网络(LTER)^[1],1992 年英国、德国、加拿大分别建立了环境变化监测网络(ECN)、陆地生态系统研究网络(TERN)和生态监测分析网络(EMAN)。这些研究和监测网络针对不同区域的生态系统和环境进行全面的观测和实验^[10],为区域资源利用和社会经济的可持续发展提供了数据、管理方法和政策。

2 农业长期研究的重要作用

2.1 评价农业技术对产量和土壤的长期效应

英国洛桑试验站 Broadbalk 长期试验(1843 年开始)初期目标是用于比较不同植物养分(N、P、K、Na、Mg)对冬小麦产量的影响,近 40 年来的试验表明,引进新的小麦品种、配合施用有机肥和化肥、小麦-非禾本科作物轮作系统、施用农药(除草剂和杀真菌剂)可以显著增加产量,小麦产量从不施肥的 1~2 t/hm² 提高到 6~7 t/hm²(2002 年最高为 11 t/hm²)^[11]。长期合理地施用 N、P、K 化肥(其中 N 为 144 kg/hm²)可以获取与 35 t/hm² 厩肥相同的小麦产量,且并不破坏土壤质量。这些管理措施为提高英国农业生产能力作出了重要贡献。

Jenkinson 等^[12]利用长期试验研究发现,温带地区土壤有机 C 随土地利用和耕作管理的变化缓慢,20 年才能观测出明显的变化,一些施肥处理中土壤有机质经过 75 年后才增加 1 倍;Hoosfield 试验中每年施用 35 t/hm² 厩肥,120 年后土壤有机质仍然在增加。而

①Holli PL. Soil fertility research helps today's cotton grower. Farm Press, USA, 2001, Dec 5. http://southeastfarmpress.com/mag/farming_soil_fertility_esearch_2/

Broadbalk 的荒地长期试验表明^[13], 不施肥的小麦连作系统中土壤全 N 含量在 1843 年以来保持不变, 连续施用 23 t/hm² 厩肥的土壤全 N 含量不断增加, 1970 年达到平衡; 而林地砍伐转为荒地后 (1886 年), 土壤全 N 积累速度更快, 74 年中的增量与持续施用厩肥处理的在 127 年的增量相同。

长期试验表明^[14], 土壤酸化过程受到酸沉降的影响, 同时土地利用变化和施肥也有影响。降雨的石灰位 (pH-1/2p(Ca+Mg)) 对土壤 pH 平衡点影响很大, 而对土壤质地影响很小。落叶林地系统可以比草地捕获更多的干湿沉降, 土壤酸化过程更快, 土壤 pH 平衡点更低。前者在 100 年中土壤 pH 下降了 2.9 个单位, 达到 3.6; 后者在 125 年中下降了 0.7 个单位, 达到 5.1。在不施肥的连作小麦系统中土壤 pH 在 51 年中下降了 1 个单位, 随后的 27 年中保持不变。草地施肥可以促进土壤酸化, 施用 N 144 kg/(hm²·年) 的 (NH₄)₂SO₄ 导致土壤在 67 年后达到预测的酸化平衡点 (3.6)。

一些地区的长期试验表明, 土壤肥力和气候因素的变化同时影响到施肥的增产作用。菲律宾的水稻长期试验表明, 合理施肥下干旱季节的水稻产量最高达到 9.03~9.58 t/hm², 接近气候生产潜力, 但近年来, 即使在合理施肥的条件下, 全球变暖导致的夜间温度提高也引起水稻产量的持续下降^[9]。印度的水稻-小麦轮作长期试验 (1984 年开始) 也发现, 施用有机肥和秸秆后产量持续下降, 其原因可能是农田 K 素不平衡和气候条件的变化^[10]。

2.2 研究长期施肥措施对环境的影响, 提出治理对策

Powlson 等^[15]利用长期试验研究了施用有机肥对土壤 NO₃⁻-N 淋失的影响, 发现在相同的 N 肥用量下 (96 kg/hm²), 长期施入厩肥的 NO₃⁻-N 淋失量 (124 kg/hm²) 大约是化肥处理的 (25 kg/hm²) 5 倍。基于最近 30 多年的系统研究, 洛桑站建立了农场肥料管理模式, 为英国提出了管理环境硝酸盐的政策, 成为国家“农业和园艺施肥推荐”标准 (RB209)^[16]。通过实施这些标准, 目前英国小麦的平均施肥量大约是 20 年前 (75 kg/hm²) 的 1/3, 英国硝酸盐敏感区和危险区的硝酸盐淋失总量减少了 20%。

Heckrath 等^[17]利用 Broadbalk 经典试验研究了土壤 P 素的迁移过程, 发现耕层土壤 Olsen-P (0.5 mol/L NaHCO₃ 提取) 达到 60 mg/kg 时, 土壤 P 素淋失达到影响水环境质量的浓度, 土壤 P 素开始淋失的阈值与土壤交换 Al³⁺ 和有机 C 含量之和呈显著的正相关, 目前正在深入研究土壤 P 素的迁移机制。

2.3 研究环境的长期变化

长期试验保持的土样是环境的记录载体。Zhao 等^[18]利用 S 稳定性同位素分析技术对洛桑试验站长期谷物和土壤样品的分析表明, 20 世纪 70 年代中期大气来源的 S 对谷物的供应达到高峰, 随后下降; 90 年代后主要依靠土壤 S 供应, 部分土壤中油菜开始出现缺 S 现象, 因此开始推广施用 S 肥, 促进了英国小麦和油菜的品质。

Jones 等^[19-20]利用洛桑试验站长期试验样品分析了大气沉降导致的土壤多环芳烃 (PAHs) 含量的变化。发现 19 世纪后半叶土壤 PAHs 总量基本不变 (350 mg/kg 左右), 从 20 世纪初到 80 年代末期, 土壤 PAHs 总量增加了大约 5 倍。土壤中不同 PAHs 含量的平均增幅与大气沉降速率相近, 说明燃烧有机物质导致的大气沉降是土壤 PAHs 主要来源; 土壤中 PHAs 的损失过程弱, 土壤微生物分解结构简单的 PAHs; 大麦不吸收 PAHs; 表层 PAHs 可以通过颗粒态向下层迁移。

最近, 英国南安普敦海洋学研究中心的 Ian Croudace 利用洛桑试验站保存的 160 年 Broadbalk 经典试验土壤样品, 分析了国际上的核爆和核事故导致对土壤核素 (钚) 污染过程, 他们在土壤样品中连续检测到美国 1952—1953 年的内华达州核试验、1954 年的南太平洋核爆和 1986 年切尔诺贝利核电站事故导致的土壤污染^①, 发现全球核素污染的扩散过程十分迅速。

2.4 研究人为管理措施对生态系统生物多样性的长期影响

英国洛桑试验站 Broadbalk 的长期试验表明, 施用化肥改变了杂草的种群结构^[21]。1991—2002 年对 15 种杂草的调查数据分析表明, 随 N 肥施用量的增加 (N 0~288 kg/hm²), 其中有一种杂草出现频率增加 (普通繁缕), 大多数杂草出现频率降低 (如黑苜蓿和田间马尾草), 一些杂草略微降低 (如普通野豌豆和欧芹), 但一些杂草没有影响 (如黑草和玉米罂粟)。Park 草地试验 (1856 年开始) 表明, 施用化肥导致牧草地土壤酸化, 牧草的种群数量减少, 生物多样性降低, 但牧草的产量增加^[22]。

2.5 建立生态系统养分循环的模型, 模拟生态过程对全球的响应

在分析了洛桑站长期试验土壤有机质转化规律的基础上^[12], 建立了 Roth-C 模型, 模拟了长期土壤有机 C 的变化^[23], 近期 Jenkinson 等^[24]利用模型模拟了土壤 CO₂ 释放对全球变暖的长期响应过程。同样, 基于 ¹⁴C

① <http://www. Rothamsted. bbsrc. ac. uk/corporate/PressReleases/Classical Nuclear. Html>

标记植物物质长期分解试验^[25], Parton 等^[26]发展了模拟美国大草原和农田生态系统中土壤有机质变化的 Century 模型。目前这两个模型开始进行区域扩展,建立国家尺度的预测模型,同时进行模型的对比研究,提高模型的预测精度^[27],并通过土壤有机质网络(SOMNET),研究不同区域土地利用变化对土壤有机 C、N 库和温室气体排放的影响,提出了针对全球气候变化调控土壤 C 库的对策^[28]。

3 国内长期试验研究的发展

国内在建立农业长期试验方面起步较晚,但目前由中国农业科学院和中国科学院建立了 2 个长期试验网络。

中国农业科学院自 1980 年以来建立的全国化肥试验网,研究不同种植制下长期施用化肥或有机肥或两者配合施用条件下作物的产量和土壤肥力的变化。由分布在 22 个省(区)的 70 个长期肥料试验组成,覆盖了黑土、黄土、潮土、褐土、红壤、灌漠土、栗钙土、黄绵土、潮褐土、紫色土和水稻土等土壤类型,包括 8 个施肥处理(CK、N、P、K、NP、NK、PK、NPK),部分为 10 个处理(增加了有机肥和 NPK+有机肥处理)。研究明确了 N、P、K 化肥合理配施可以获得高产和稳产,化肥和有机肥配合施用可以进一步提高产量^[29]。

中国农业科学院主持于 1990 年建立了国家土壤肥力和肥料效益长期监测基地网^[30],长期监测不同农区的轮作系统中施用化肥和有机肥对作物产量和土壤肥力的长期影响。包括 9 个基地,代表了黑土、灰漠土、黄土、褐潮土、潮土、红壤、紫色土、赤红壤,代表东北、甘新、黄土高原、黄淮海、长江中下游、华南和西南 7 个农区,设置了统一的施肥处理(与化肥试验网处理相似)。前期的主要成果是在明确 N、P 以及有机肥增产效益的基础上,明确了 K 肥在南方施用 3~5 年的增产效果;证明了长期偏施 N 肥的 N 素利用率低(10 年后利用率低于 5%),而合理施用 N、P、K 化肥以及增施有机肥提高了 N 素利用率(前者平均 30% 左右,后者可超过 40%);每季投入 N 150 kg/hm² 和 P₂O₅ 45 kg/hm² 可以保证农田 N、P 的平衡,而投入 K₂O 50~70 kg/hm² 的农田 K 素仍然亏缺^[30-31]。近期利用长期试验,研究了不同土壤中长期施肥对土壤有机质和 N、P、K 养分、微量元素和土壤酶活性以及作物品质的影响^[32]。

中国科学院从 1980 年起陆续建立了农田 N、P、K 养分长期试验,在我国东部和西部农田生态系统中开展了养分循环和生产力研究^[33]。其中位于陕西长武

农业生态试验站的旱地轮作和施肥试验始于 1984 年,系统开展了轮作和施肥对作物产量和土壤肥力及水分利用率的影响,研究表明,黄土旱塬区 N、P 配施有明显的增产作用,在 N、P 配施基础上施用 K 肥的增产率则很小^[34]。近期,基于封丘生态试验站的长期施肥试验,研究者拓展了研究内容,研究了长期施肥的植物营养诊断^[35]、温室气体排放^[36]和农田杂草多样性^[37],特别是利用微生物分子生态学方法开展了长期施肥对土壤氨氧化细菌群落演变影响的研究^[38]。1988 年中国科学院建立了中国生态系统研究网络(CERN),开展生态系统水分和养分循环的联网研究。近期对我国农田生态系统施肥效应的地理分异研究表明,热量对化肥和有机养分再循环的增产率有促进作用^[39],降雨也影响了施肥的产量效应^[40]。

国内的农业长期试验主要研究农田尺度的水分和养分循环,缺乏区域和国家尺度上的联网研究,缺乏对农田多个生态过程的综合研究,特别是缺乏对污染过程和生物过程的长期综合研究。

在试验设计方面存在的不足之处包括:①目前的农田养分试验主要研究农田生产中的中短期问题,其长期试验地的面积不足以支撑百年尺度的长期研究和观测;②施肥处理的设计是根据 20 世纪 80 年代的养分管理水平制定的,沿海地区的设计施肥水平远远低于目前生产中的投入水平;③长期试验中对水分-养分的耦合作用考虑较少,对定量模型研究的支撑能力不足;④长期试验中没有设置农药处理,缺乏对农药、重金属残留以及杂草、土壤微生物的监测和记录。此外,野外试验站缺乏相应的监测设备(如干湿沉降仪等),没有对污染物质循环全过程的监测,因此对于农业环境和生物过程研究的支撑功能薄弱。

在长期试验的管理方面,国家和相关部门缺乏对长期试验网络的管理政策,缺乏稳定的经费支持机制,因而缺乏稳定的技术支撑队伍对长期试验进行连续管理和观测。同时,缺乏对长期试验平台及其保存样品的共享机制,难以进行多学科的综合交叉研究。

在长期试验的配套仪器和设施方面,因不同时期采购的观测和分析仪器的不同导致分析和观测方法的改变,但是又没有相应地开展数据的校准工作,使得不同时期所测得的结果难以比较。在长期试验样品保存方面存在的主要问题是,土壤样品保存不全,缺乏专用的样本库,同时也缺乏专门的长期试验数据库和信息系统。

4 展望

农业长期试验成为研究农田重要生态过程长期变

化的不可替代的方法。需要加强长期试验的建设和区域联网研究, 针对农业生产发展中不断出现的区域生态和环境问题进行长期的大尺度的研究, 在揭示农田长期生态过程变化及其对环境和健康影响的基础上, 提出解决区域生态环境问题的策略和方法。

我国农田生态系统分布广、类型多样, 单一的长期试验无法满足国家对粮食生产和环境功能的需求, 因此特别需要建立农业长期试验网。针对上述状况, 需要加强农业长期试验网的建设: ①重点在区域和国家尺度上, 提升农田养分和水分循环领域的长期研究能力, 增强在农业环境和生物科学的交叉研究能力; ②扩展试验地面积, 增强对百年尺度长期研究和观测的支撑能力; ③完善试验处理的设计, 根据农业生产水平的发展和新的生态环境问题, 特别是针对农田有机和无机污染、以及农田生物多样性和稳定性问题, 补充和完善试验设计和监测仪器; ④完善分析测试方法, 提高数据的可比性; ⑤完善样品长期保存和数据保存系统。国家和相关主管部门需要针对农业长期研究的发展, 制定农业长期研究的管理政策, 建立农业长期试验经费和管理人员的稳定资助机制, 制定和实施长期试验平台和数据样品的共享政策。

参考文献:

- [1] Risser PG. Long-term ecological research: An international perspective. New York, United States: John Wiley Sons, 1991, 1-310
- [2] Moss SR, Storkey J, Cussans JW, Perryman SAM, Hewitt MV, Rasmussen PE, Goulding KWT, Brown JR, Grace PR, Janzen HH, Krschens M. Long-term agroecosystem experiments: Assessing agricultural sustainability and global change. *Science*, 1998, 82: 893-896
- [3] Leigh RA, Johnston AE. Long-term Experiments in Agricultural and Ecological Sciences. Oxford University Press, 1994: 1-448
- [4] Mitchell CC, Reeves W, Hubbs MD. The Old Rotation, 1996-1999. *Agronomy and Soils Dep. Ser. No. 228*. Alabama Agriculture Experiment Station, Auburn University, AL, 2000
- [5] Mitchell CC, Arriaga FJ, Entry JA, Novak JL, Goodman WR, Reeves DW, Runge MW, Traxler GJ. The Old Rotation, 1896-1996. Special publication of the Alabama Agriculture Experiment Station, Auburn University, AL, 1996
- [6] Sanchez JE, Willson TC, Kizilkaya K, Parker E, Harwood RR. Enhancing the mineralizable nitrogen pool through substrate diversity in long-term cropping systems. *Soil Science Society of America Journal*, 2001, 65: 1442-1447
- [7] Symstad AJ, Chapin FS, Wall DH, Gross KL, Huenneke LF, Mittelbach GG, Peters DPC, Tilman DG. Long-term and large-scale perspectives on biodiversity-ecosystem functioning relationships. *BioScience*, 2003, 53: 89-98
- [8] Peng S, Huang J, Sheehy JE, Laza R C, Visperas RM, Zhong X, Centeno GS, Khush GS, Cassman KG. Rice yields decline with higher nighttime temperature from global warming. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2004, 101(27): 9971-9975
- [9] Yadvinder-Singh, Bijay-Singh, Ladha JK, Khind CS, Gupta RK, Meelu OP, Pasuquin E. Long-Term effects of organic inputs on yield and soil fertility in the rice-wheat rotation. *Soil Science Society of America Journal*, 2004, 68(3): 845-853
- [10] 牛栋, 李正泉, 于贵瑞. 陆地生态系统机与全球变化的联网研究进展. *地球科学进展*, 2006, 21(11): 1199-1205
- [11] Powlson DS, Poutton PR. Long-term experiments in the 21st century-continuity or change // *Proceedings of Nordic Association of Agricultural Scientists 22nd Congress*, Turku, Finland. 2003
- [12] Jenkinson DS, Rayner JH. The turnover of soil organic matter in some of the Rothamsted classical experiments. *Soil Science*, 1977, 123: 298-305
- [13] Jenkinson DS. The accumulation of organic matter in soil left uncultivated. Rothamsted Experimental Station Report for 1970, Part 2, 1971: 113-137
- [14] Johnston AE, Goulding KWT, Poulton PR. Soil acidification during more than 100 years under permanent grassland and woodland at Rothamsted. *Soil Use and Management*, 1986, 2: 3-10
- [15] Powlson DS, Poulton PR, Addiscott TM, McCann DS. Leaching of nitrogen from soils receiving organic or inorganic fertilizers continuously for 135 years // Hansen JA, Henriksen K. *Nitrogen in Organic Wastes Applied to Soils*. London: Academic Press, 1989: 334-345
- [16] Ministry of Agriculture, Fisheries and Food (MAFF). Fertilizer Recommendations for Agricultural and Horticultural Crops (Reference Book 209). 61h Edn. HMSO, London. 1994
- [17] Heckrath G, Brookes PC, Poulton PR, Goulding KWT. Phosphorus leaching from soils containing different phosphorus concentrations in the Broadbalk experiment. *Journal of Environmental Quality*, 1995, 24:904-910
- [18] Zhao FJ, Knights JS, Hu ZY, McGrath SP. Stable sulfur isotope ratio indicates long-term changes in sulfur deposition in the Broadbalk experiment since 1845. *Journal of Environmental Quality*, 2003, 32: 33-39
- [19] Jones KC, Stratford JA, Waterhouse KS, Furlong ET, Giger W, Hites RA, Schaffner C, Johnston AE. Increases in the polynuclear aromatic hydrocarbon (PAH) content of an agricultural soil over the last century. *Environmental Science and Technology*, 1989, 23: 95-101

- [20] Jones C, Sanders G, Wild SR, Burnett V, Johnston AE. Evidence for a decline of PCBs and PAHs in rural vegetation and air in the United Kingdom. *Nature*, 1992, 356: 137-140
- [21] Moss SR, Storkey J, Cussans JW, Perryman SAM, Hewitt MV. The Broadbalk long-term experiment at Rothamsted: What has it told us about weeds?. *Weed Science*, 2004, 52 (5): 864-873
- [22] Pickrell J. Where the grass never stops growing. *Science*, 2001, 293: 625
- [23] Coleman K, Jenkinson DS. RothC-26.3. A model for the turnover of carbon in soil // Powlson DS, Smith P, Smith JU. Evaluation of Soil Organic Matter Models Using Existing, Long-term Datasets. NATO ASI Series I, vol 38. Berlin Heidelberg: Springer, 1996: 237-246
- [24] Jenkinson S, Adams DE, Wild A. Model estimates of CO₂ emissions from soil in response to global warming. *Nature*, 1991, 351: 304-306
- [25] Ladd JH, Oades JM, Amato M. Microbial biomass formed from ¹⁴C and ¹⁵N-labeled plant material decomposition in soils in the field. *Soil Biology and Biochemistry*, 1981, 13: 119-126
- [26] Parton WJ, Schimel DS, Cole CV, Ojima DS. Analysis of factors controlling soil organic matter levels in Great Plains Grasslands. *Soil Science Society of America Journal*, 1987, 51: 1173-1179
- [27] 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 (2): 101-111
- [28] Smith P, Goulding KW, Smith KA, Powlson DS, Smith JU, Falloon P, Coleman K. Enhancing the carbon sink in European agricultural soils: Including trace gas fluxes in estimates of carbon mitigation potential. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2001, 60: 237-252
- [29] 林葆, 林继雄, 李家康. 长期施肥的作物产量和土壤肥力变化. 北京: 中国农业科技出版社, 1996: 1-179
- [30] 赵秉强, 张夫道. 我国长期肥料定位试验研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 3-8
- [31] 张夫道, 张淑香, 赵秉强, 李小平. 不同土壤不同种植制度下土壤肥力与肥料效益演变研究. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8(增刊): 9-15
- [32] 徐明岗, 梁国庆, 张夫道. 中国土壤肥力演变. 北京: 中国农业出版社, 2006: 384
- [33] 沈善敏. 中国土壤肥力. 北京: 中国农业出版社, 1998: 1-484
- [34] 郝明德, 王旭刚, 党廷辉, 李丽霞, 高长青. 黄土高原旱地小麦多年定位施用化肥的产量效应分析. *作物学报*, 2004, 30(11): 1108-1112
- [35] 蔡祖聪, 钦绳武. 作物 N、P、K 含量对于平衡施肥的诊断意义. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(4): 473-478
- [36] 孟磊, 丁维新, 蔡祖聪, 钦绳武. 长期定量施肥对土壤有机碳储量和土壤呼吸影响. *地球科学进展*, 2005, 20(6): 687-692
- [37] 尹力初, 蔡祖聪. 长期不同施肥对玉米田间杂草种群组成的影响. *土壤*, 2005, 37 (1): 56-60
- [38] Chu HY, Fujii T, Morimoto S, Lin ZG, Yagi K, Hu JL, Zhang JB. Community structure of ammonia-oxidizing bacteria under long-term application of mineral fertilizer and organic manure in a sandy loam soil. *Applied and Environmental Microbiology*, 2007, 73 (2): 485-491
- [39] 宇万太, 张璐, 殷秀岩, 马强, 沈善敏. 农业生态系统养分循环再利用作物产量增益的地理分异. *农业工程学报*, 2003, 19(6): 28-31
- [40] 张璐, 沈善敏, 宇万太, 廉鸿志. 辽西褐土施肥及养分循环再利用中长期试验 V. 不同降水年景作物产量对施肥的反应和水肥交互作用. *应用生态学报*, 2003, 14(12): 2205-2207

Long-Term Experimental Research on Long-Term Ecological Processes in Agro-Ecosystems : A Review

SUN Bo, ZHU Zhao-liang, NIU Dong

(1 *Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China;*

2 *Bureau of Science and Technology for Resources and Environment, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100864, China*)

Abstract: Agriculture long-term experiment is an important tool to research the long-term ecological processes, its environmental impact and regulation methods. The research progress and key functions of the international important agriculture long-term experiments were reviewed firstly, then the research status in China was analyzed of the two national network of agriculture long-term experiments, finally the suggestions to strengthen the long-term research capacity were putted forward. The progress showed that the long-term experiments enlarged their research fields on ecology and environment, which became the base for multi-discipline research and application research. Two domestic agriculture research networks mainly studied the water and nutrient cycling in agro-ecosystems. It is need to reinforce the multi-discipline research on agriculture, ecology and environment science; enlarge the experiment plot area and supplement treatments; perfect the analysis methods, and build the date and sample storage system. Finally the national policy to manage and financially support the agriculture long-term research should be designed and conducted.

Key words: Agriculture long-term experiment, Long-term ecological process, Crop production, Ecological and environmental impact