

现代农业发展过程中土壤肥力资源合理利用的思考与对策

翁伯琦¹, 郑祥洲²

(1.福建省农业科学院农业生态研究所, 福建 福州 350013; 2.福建省农业科学院土壤肥料研究所, 福建 福州 350013)

摘要:土壤是农业生产的重要基础,也是人类赖以生存的保障,其不仅关系食物安全供应,而且直接影响生态环境。土壤肥力是发展现代农业的重要支撑,其有效的培育涉及多学科与多专业,需要系统创新与联合攻关,如今人们对土壤肥力的认识已经从农业生产向环境安全、资源利用、生态健康及全球变化等方向转变与提升。本文从土肥长期定位研究、土壤肥力培育技术、现代农业发展等方面阐述内在关系及其特点,同时分析了现代土壤学研究领域所面临的重要挑战与发展趋势,并提出若干建议与对策。

关键词:土壤肥力;培育;长期定位研究;现代农业

中图分类号:S158 文献标志码:A 文章编号:2095-6819(2014)01-0001-07 doi: 10.13254/j.jare.2013.0207

Thinking and Countermeasures for Rational Utilization of Soil Fertility in Modern Agriculture Developping

WENG Bo-qi¹, ZHENG Xiang-zhou²

(1. Institute of Agricultural Ecology, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China ; 2. Institute of Soil and Fertilizer, Fujian Academy of Agricultural Sciences, Fuzhou 350013, China)

Abstract: Soil is not only an important foundation for agricultural production, but also is the safeguard of human survival. Soil quality is closely related with food safety and argo-ecological environment. Soil fertility is the support of modern agricultural development. Multiple disciplines and specialties are involved in researches of soil cultivating process. Nowadays, the understanding of soil fertility has changed from agricultural production to environmental security and resource exploitation, even larger scales to ecological health and global soil change. In this review, the characteristics and inherent link between soil and agriculture were comprehensive expounded from the aspects of long-term fertilization trials, soil cultivation techniques, and modern agriculture development. The challenge and prospect faced in soil science research field were also analyzed. Finally, several suggestions and countermeasures were proposed to the researches of soil science in future.

Keywords: soil fertility; cultivation; long-term location experiment; modern agriculture

土壤是植物生长的重要基础,是农业生产的基本资料。土壤肥力作为土壤的本质特性,土壤的概念是和它的肥力分不开的。由于土壤具有肥力,并能不断地提供植物(包括农作物)生长所需的各种营养因素,

才能保持农产品产量与质量的稳定与提高,才能维护良好的植被与多样性生态环境。因此,土壤肥力是农业持续发展的重要基础^[1]。深入探讨土壤肥力变化规律,系统研究培肥地力配套技术,有效实现种地养地有机统一,这无疑是现代农业的重要组成部分与必不可少的环节。

1 土壤肥料长期定位研究及其意义

一般认为肥力的特质是土壤区别于成土母质和其他自然体的最本质的特征,也是土壤作为自然资源和农业生产资料的物质基础。土壤肥力是土壤在自然

收稿日期:2013-11-19

基金项目:福建科技重大专项“水土流失初步治理区生态循环与产业提升技术研发与示范”(2012NZ0002);“十二五”国家科技支撑计划项目课题“东南地区农牧废弃物多级循环利用技术集成与示范”(2012BAD14B15)

作者简介:翁伯琦(1957—),男,福建福州人,博士,研究员,主要从事区域生态经济与生态农业技术研究。

E-mail:wengboqi@163.com

环境和人为活动共同作用下不断发展形成的,它一直在不断的发展和变化过程中,有着较长期的发生和演变特征。就此,要研究土壤肥力的形成与演变规律、养分变化动态以及长期施肥对作物产量品质影响等一系列问题,就必须要建立土壤肥料长期定位试验,监测土壤肥力的时空变化规律以及人类活动对土壤肥力变化的生态过程及其动态影响与反馈,其理论与实际意义是显而易见的。

上溯至19世纪中叶,西方发达国家就已开始开展土壤肥料长期定位试验研究。其中世界上历史最悠久的长期定位试验站当属J.B. Lawes和J.H. Gilbert于1843年在英国洛桑建立的土壤肥力长期定位试验站(Rothamsted Experimental Station),至今为止已有170年的历史,该站先后设置了20个长期定位试验,对土壤肥力保育和合理施肥展开了长期、系统的定位研究,这些“洛桑经典试验”为农学、土壤学、植物营养学、生态学以及环境科学的发展做出了重要贡献^[2]。其后,特别是在化肥工业兴起之后,欧美许多国家也都先后布置了包括土壤养分平衡、施肥对土壤肥力动态变化的影响、农作物对肥料投入的响应等在内的长期土壤肥力定位试验,但由于种种原因大多数试验都没能坚持下来。至今仍然保留下来时间在50年以上的“经典试验”包括美国伊利诺斯州立大学的Morrow轮作-肥料试验(1875年)、Morrow磷矿石粉肥料试验(1900年);德国哥廷根农业研究所的E-Field轮作下的肥料试验(1873年)和多年生黑麦草肥料试验(1873年),林布尔格罗夫农业研究站的化肥对作物产量及产品质量影响试验(1938年);法国贵格纳国立农业研究所的Deherain小麦、甜菜肥料试验(1876年),小麦连作肥料试验(1876年)以及芬兰、荷兰、丹麦、加拿大和澳大利亚等国家的相似试验等^[3]。而亚洲最早开展且持续至今的土壤肥料长期定位试验是日本鸿巣县中央农业试验站的水稻连作肥料试验(1926年)^[4]。

但我们同时还要看到,目前绝大多数的土壤肥力长期定位点多集中在发达国家,而在热带地区以及发展中国家的定位研究还比较少。以我国来说,现存的长期定位试验主要建立于20世纪70年代后期,而始建于1987年的“国家土壤肥力与肥料效益监测站网”当属目前国内最为完整、覆盖面最大、具有网络试验特征的大型长期土壤肥料试验群。我国长期土壤肥力监测研究目前面临的最大问题是经费不足和队伍不稳定,不少试验正在被迫关闭或处于失管状态。国家

应对保护完整的、有代表性的大型长期定位监测研究平台给予重点支持和保护,使之像英国洛桑试验站和美国的Morrow长期试验基地一样,受到国家的高度重视,成为国家科技创新体系重要的基础条件平台^[5]。

就方法论而言,土壤肥料长期定位试验是一种采用既“长期”又“定位”的方法的试验^[6]。农业生态系统中很多过程进展缓慢,外部环境条件也在不断发生改变,短期试验往往不能揭示这种长期的变化趋势。长期定位试验具有时间的长期性和气候的重复性(即能克服气候的年际变化对肥效的影响)等特点,信息量丰富,准确可靠,能系统地揭示土壤肥力的演变过程^[7]。

不同气候条件和土壤类型下的土壤肥力长期定位试验得到了一些共性的结论:(1)有机和无机肥料的配合施用能够最大程度地达到高产的目的,但单施化肥或有机肥一样具有持续增产的效果,连续合理施用化肥并不影响作物产量^[8];(2)尽管在相同施肥条件下,作物轮作较连作可获得较高产量,但这些经典试验告诉我们在合理施肥的情况下,单一种植也一样能够维持一定的高产^[9];(3)从提高土壤有机质含量和提高地力的角度而言,有机肥明显优于化肥,但合理施用化肥对提高土壤有机碳、有机氮库仍有微弱作用^[10-12]。依靠从这些土壤肥料长期定位试验中获得的共性结论,欧洲、美国以及其他发达国家在近数十年内迅速形成了依靠单一种植、合理施肥、机械耕作和科学用药为四大支柱的现代农业方式,其中前2项的实用性和可靠性便来自长期肥料试验的研究结果^[2]。

同时,土壤肥力长期定位试验以长久固定的土壤管理模式使土壤性质按不同的方向不断地改变,从而形成具有不同肥力性状和生物活性的各种土壤类型^[13]。这些永久保存下来的不同时期的土壤样品,为后来者研究不同农业耕作模式下土壤的发展变化过程以及了解人类活动对这些演变过程的影响提供了珍贵的研究对象。此外,土壤肥力试验长期以来不间断的试验结果存档也为验证土壤肥力变化模型的可靠性提供了宝贵的数据,将有助于研究和预测现代农业耕作措施对未来土壤质量乃至农业生产的影响。

2 农田土壤肥力培育研究及其进展

张福锁等^[14]研究指出,土壤肥力是土壤质量的重要特征,是作物高产稳产的保证,土壤的基础地力越高,作物的产量也就越高。而就我国现有耕地而言,中低产田面积比例高达71.3%^[15],因此如何提升土壤地力已经成为我国农业科技工作者关注的焦点。全球诸

多不同气候条件以及土壤类型上的长期土壤肥料定位实验总结并阐明了在不同耕作措施下的土壤肥力的长期演变规律,为土壤地力提升提供了有效的理论依据及其技术支撑,为农业的可持续发展提供决策依据。

2.1 优化化肥施用

化肥持续大量施用造成近年来土壤肥力下降很快、生态环境恶化。究其原因除了忽视有机肥的投入以外,化肥投入比例不当亦是重要的一个方面。据有关资料统计^[16],目前我国施用化肥比例 $N:P_2O_5:K_2O$ 为 $1:0.34:0.25$,磷钾不足,严重失调。平衡施肥是目前普遍提倡的科学施肥方法^[17],传统的平衡施肥主要目的是提高作物产量,为我国的粮食增产、农民增收作出了重大贡献。推广平衡施肥,除了作物产量与品质之外,还要关注施肥对土壤生态系统其他因素产生影响。陈建国等^[18]在南方缺磷水稻田上的试验表明,平衡施肥能够提高土壤肥力,与不施磷肥和过量施磷处理相比明显增加土壤有机质含量,显著提高土壤微生物生物量。而王伯仁等^[19]和林新坚等^[20]的研究也都指出,平衡施肥在提高作物产量及其施肥效益的同时,还有利于保持和提高红壤旱地的土壤肥力。因此,在增施有机肥的基础上,科学施用化学肥料,可以改善耕地养分失调,同时有利于优化土壤理化性状。

2.2 合理增施有机肥

全球不同区域的土壤肥料长期定位试验的结果均指出,长期施用有机肥能够明显增加土壤中有机质的含量^[21-22],而土壤有机质含量正是反映土壤肥力的重要指标之一,对于土壤中养分的积蓄、良好结构的形成以及土壤中有害物质毒性的消除等均具有重大的意义。其次,孙福来^[23]、劳秀荣^[24]等的研究表明有机肥培肥措施还能够有效明显增加土壤中有效氮、磷、钾养分的含量,而且对于表层土壤(0~20 cm)有效养分的增加尤为显著^[25]。再次,有机肥的施用还能增强土壤的保水性和固氮能力,有利于水肥的耦合;增加土壤有机C、非水稳性团聚体、水稳性团聚体的含量,有效地提高土壤团聚体的稳定性^[26-27];还有研究认为,施用有机肥后土壤容重降低,致使有效水分、导热率和气体比例得到改善,促进作物生长发育^[28-29]。最后,有机肥的施用还有效地提高了土壤酶活性以及微生物碳、氮的含量^[30-31]。

但随着近年来以农户家庭为单元的家畜养殖存栏量的逐渐减少,导致农民的有机肥积造量急剧下降。如何充分挖掘和利用农业生态系统中的有机肥

源,合理循环使用有机物质已成为了实现有机-无机肥配合施用的物质基础和前提。其中农作物秸秆还田和绿肥种植重新引起了人们的关注。

农作物的秸秆含有相当数量的碳、氮、磷、钾等营养元素,秸秆还田必然增加土壤中相应养分的储量^[32]。作物秸秆还田还提高了土壤耕层有机质含量,Graham等^[33]认为,随着作物秸秆还田量的增加,0~10 cm土层中有机质含量也随之增加。关连珠等^[34]的研究进一步指出,在配施化肥的基础上,施用有机肥可提高有机质含量7%~15%,其中尤以施用未腐熟秸秆处理效果最好,可提高有机质含量9%~15%。此外,秸秆还田还能够提升土壤有机质的品质,孙星等^[32]的研究结果表明,秸秆与化肥配施能够改变土壤腐植酸的组分,其中胡敏酸与富里酸的比例比单施化肥土壤明显提高。

我国南方农作区冬闲田面积大、空闲时间长。因此利用冬季空闲茬口种植一季绿肥作物,既能增加当季地面覆盖,保持水土,又能增加生物固氮量^[35],活化富集土壤磷、钾等养分,翻压还田后能提高土壤有机质含量,为后季作物提供速效养分^[36-37]。李继明等^[38]通过26年的长期定位试验发现,红壤稻田区绿肥与化肥长期配合施用不仅有利于水稻稳产增产,减少了化学肥料的使用量,而且土壤中有机质、全N和全P均明显高于单施化肥处理。王劲松等^[39]的研究还发现,绿肥种植不仅增加了土壤中速效养分和有机质含量,还能够改良土壤结构,降低土壤容重。因此,绿肥与化肥长期配合施用可以减少化肥的使用量,提高化肥氮、磷、钾养分的农学效率,增加土壤有机质,改善土壤物理结构,提高土壤肥力,是作物增产和培肥地力的有效途径。

2.3 优化耕作制度

近十几年在生产实践中总结出的保护性耕作法是一个成功范例。大量的研究表明,保护性耕作减少了土壤的翻动,加上秸秆覆盖作用,可以有效地控制土壤侵蚀,减少水土流失^[40]。该技术的应用还对土壤理化性质改善,进而提升土壤肥力起到积极的作用。朱文珊等^[41]的研究表明,免耕土壤的孔隙分布较合理,有利于土壤上下层的水流运动和气体交换。免耕还可以显著改善土壤化学性状,土壤有机碳显著提高^[42-43],同时可提高土壤表层的N、P和K含量^[44]。此外,免耕还可增加土壤生物和微生物数量和活性^[45]。由此可见,实施保护性耕作措施改良了土壤物理结构,提高了土壤养分水平,使得土壤团粒稳定,增加了

水分入渗量,从而减少了径流和土壤流失,有效提高了土壤肥力。

3 提升土壤肥力与发展现代农业思考

所谓现代农业,相对于传统农业而言,是广泛应用现代科学技术、现代工业提供的生产资料和科学管理方法进行的社会化农业,是以农业生产过程中生产技术手段应用的水平、程度和范围来确定的。凡是大量应用现代先进的科学技术,使劳动生产率大幅度提高,并有较发达的社会经济环境和其他高技术配套产业的密切配合,这就是现代农业。

目前我国正处于传统农业向现代农业的过渡阶段。农业发展主要依赖提高土地产出率为重点的劳动实用型的生物化学技术创新。所通行的仍然是以农户为单位的小规模生产,也没有跳出传统农业方式的范畴。由此可见,中国农业出现的增长,从总体上来看,主要还是传统农业方式下的增长行为。那么,伴随农业家庭联产承包责任制的推行,在传统农业向现代农业转变的过程中,土壤肥力究竟发生了什么样的变化?不少学者认为,由于农业生产水平与复种指数的提高,耕地质量出现了令人担忧的征兆,综合表现为土壤基础肥力下降、土壤物理性状变差(如耕层变浅、容重增加)、土壤缓冲能力下降、各种污染加剧等,已明显地制约着农业可持续发展^[46]。特别是1980年以后高产品种、高产栽培技术的应用以及化学物质(化肥、农药)投入量激增,作物产量水平也随之迅速提高;但由于小规模生产的限制,农家肥投入不断降低,绿肥种植几乎绝迹,农民对土壤养分的投入远远低于土壤的产出,导致了土壤肥力退化严重。以张炳宁等^[46]在扬州的研究为例,20世纪八九十年代,随着作物产量的激增,该地农田土壤大都出现了耕作层变浅、土壤物理结构变差、耕层养分含量下降等一系列土壤肥力退化症状。这一现象在当时的中国极具代表性。

土壤不仅是人类生存的基本资源,也是农业可持续发展的重要基础。现代农业的发展是以持续农业为战略体系。发展持续农业的目的,是获得高产优质的农业产量,保持清洁的环境和生物多样性,其内涵主要是在保持和提高代传土地质量,增强抗风险的缓冲能力,使土地在保护环境的基础上永续利用,并不断提高其农业生产力和经济价值。因此,人们通过了解土壤肥力的演化规律,采用不同的耕作措施调节土壤肥力的发育过程,使其朝着高产、优质、高效、安全和生态方向发展,已经成为了现代持续农业的根本措施^[47-48]。

在此意义上,根据现代持续农业发展的需求,我国土壤学中长期发展优先研究内容可集中以土壤质量提升与调控为核心,具体有以下5个方面:

(1)交互作用。从研究土壤本身转向研究土壤与人口、资源、生态、环境、社会经济发展相协调,从单一学科走向与其他相关学科相互综合、相互渗透和相互交叉,不断丰富和发展土壤肥料领域的研究内容。包括不同生态区域土壤肥力的演变规律与主要驱动因子及机制,土壤肥力演变与生态环境之间相互关系的研究等。

(2)土壤管理。研究土壤肥力及其影响因素,土壤养分含量与肥力的相互关系,土壤肥力与土壤生产力、作物产量与品质等的相互关系,施肥与耕作等措施对土壤肥力的影响,探讨提高土壤肥力的方法与对策,建立土壤肥力评价指标体系,从而为现代化农业大生产中的土壤管理提供理论支持。

(3)过程变化。土壤研究从静态走向动态的监测、预控和长期定位观测。土壤作为一个独立的历史自然体无论在时间上还是空间上都处于变化之中。同时土壤本身的发生发展过程是缓慢的,有其自身的发生发展规律。因此,要研究土壤的形成演变规律、养分变化动态等一系列问题,必需从静态的研究走向动态的监测、预控和长期定位观测。

(4)时空尺度。土壤学的全球变化研究已从全球、区域、流域到土链、田块、颗粒,从结构、表面、内层到分子、原子、电子,从静态到动态,从短时到长久。人类活动在地球各圈层中发挥着重要影响,从根本上改变了各环节或各圈层的物源、能源和信息流,从而影响生态环境与生物健康。

(5)注重应用。在土壤资源方面要强化土壤发生、分布分类、区划制图和利用对策研究。在土壤肥力方面,要关注水肥耦合,有机质、调理剂研究,在改良技术方面,要注重信息、根际、指示、修复、模式的研究,同时要深化物质循环、污染修复、全球变化、退化恢复、废物管理、地理医学等多学科的联合探索,还要注重配位诱导植物吸收、植物交互作用与转化、植物刺激与根际生物降解的交叉专业研究,以求加强对新技术、新手段的开发与应用。

参考文献:

- [1] 赵其国. 现代土壤学与农业持续发展[J]. 土壤学报, 1996, 33(1): 1-12.
- ZHAO Qi-guo. Modern soil science and sustainable development of agri-

- culture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(1): 1–12. (in Chinese)
- [2] 赵方杰. 洛桑试验站的长期定位试验: 简介及体会[J]. 南京农业大学学报, 2012, 35(5): 147–153.
- ZHAO Fang-jie. Long-term experiments at Rothamsted Experiment Station: Introduction and experience [J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2012, 35(5): 147–153. (in Chinese)
- [3] Rasmussen P E, Goulding K W T, Brown J R, et al. Long-term agroecosystem experiments: assessing agricultural sustainability and global change[J]. *Science*, 1998, 282(5390): 893–896.
- [4] 徐明岗, 曾希柏, 黄鸿翔. 现代土壤学的发展趋势与研究重点[J]. 中国土壤与肥料, 2006(6): 1–7.
- XU Ming-gang, ZENG Xi-bai, HUANG Hong-xiang. Development trend and priority research area of current soil science [J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(6): 1–7. (in Chinese)
- [5] Galantini J, Rosell R. Long-term fertilization effects on soil organic matter quality and dynamics under different production systems in semiarid pampean soils [J]. *Soil and Tillage Research*, 2006, 87: 72–79.
- [6] 赵秉强, 张夫道. 我国的长期肥料定位试验研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 3–8.
- ZHAO Bing-qiang, ZHANG Fu-dao. Long-term fertilizer experiments in China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl): 3–8. (in Chinese)
- [7] Yang S, Li F, Suo D, et al. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu oasis[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2006(5): 57–67.
- [8] Poulton P R. Rothamsted research: guide to the classical and other long-term experiments, datasets and sample archive[R]. Harpenden: UK Lawes Agric Trust Co, 2006.
- [9] Jenkinson D S. The Rothamsted long-term experiments: are they still of use?[J]. *Agronomy Journal*, 1991, 83(1): 2–10.
- [10] 沈善敏. 国外长期肥料试验(一)[J]. 土壤通报, 1984(2): 85–91.
- SHEN Shan-min. Long-term fertilizer experiments of overseas (I) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984(2): 85–91. (in Chinese)
- [11] 沈善敏. 国外长期肥料试验(二)[J]. 土壤通报, 1984(3): 134–138.
- SHEN Shan-min. Long-term fertilizer experiments of overseas (II) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984(3): 134–138. (in Chinese)
- [12] 沈善敏. 国外长期肥料试验三[J]. 土壤通报, 1984(4): 184–185.
- SHEN Shan-min. Long-term fertilizer experiments of overseas (III) [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1984(4): 184–185. (in Chinese)
- [13] 沈善敏. 长期土壤肥力试验的科学价值[J]. 植物营养与肥料学报, 1995, 1(1): 1–9.
- SHEN Shan-min. The scientific value of long-term soil fertility experiment[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 1995, 1(1): 1–9. (in Chinese)
- [14] 张福锁. 提高土壤质量实现高产、高效与环保[N]. 中国农资, 2013–02–22(23).
- ZHANG Fu-suo. Improve soil quality to achieve high yield, efficient and environmental protection[N]. *China Agricultural Means of Production*, 2013–02–22(23). (in Chinese)
- [15] 全国土壤普查办公室. 中国土壤普查数据[M]. 北京: 中国农业出版社, 1997.
- National Soil Survey Office. China's soil census data[M]. Beijing: China Agriculture Press, 1997. (in Chinese)
- [16] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2012.
- National Bureau of Statistics of China. China statistics yearbook [M]. Beijing: China Statistics Press, 2012. (in Chinese)
- [17] 王圣瑞, 陈新平, 高祥照, 等. “3414”肥料试验模型拟合的探讨[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(4): 409–413.
- WANG Sheng-rui, CHEN Xin-ping, GAO Xiang-zhao, et al. Study on simulation of ‘3414’ fertilizer experiments[J]. *Plant Nutrition and Fertilizing Science*, 2002, 8(4): 409–413. (in Chinese)
- [18] 陈建国, 张杨珠, 曾希柏, 等. 平衡施肥对缺磷红壤性水稻土的生态效应[J]. 生态学报, 2011, 31(7): 1877–1887.
- CHEN Jian-guo, ZHANG Yang-zhu, ZENG Xi-bai, et al. Ecological effects of balanced fertilization on red earth paddy soil with P-deficiency[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(7): 1877–1887. (in Chinese)
- [19] 王伯仁, 徐明岗, 黄佳良, 等. 红壤旱地长期施肥下土壤肥力及肥料效益变化研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2002, 8(增刊): 21–28.
- WANG Bo-ren, XU Ming-gang, HUANG Jia-liang, et al. Study on change of soil fertility and fertilizer efficiency under long-term fertilization in upland of red soil[J]. *Plant Nutrient and Fertilizer Science*, 2002, 8(Suppl): 21–28. (in Chinese)
- [20] 林新坚, 章明清, 林 琼, 等. 不同施肥模式对赤红壤旱地作物产量和土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2011(5): 27–31.
- LIN Xin-jian, ZHANG Ming-qing, LIN Qiong, et al. Effect of different fertilization patterns on plant yield and soil fertility in lateritic red soil upland [J]. *Soils and Fertilizers Sciences in China*, 2011(5): 27–31. (in Chinese)
- [21] Gerzabek M H, Pichlmayer F, Kirchmann H, et al. The response of soil organic matter to manure amendments in a long term experiment at Ultuna, Sweden [J]. *European Journal of Soil Science*, 1997, 48(2): 273–282.
- [22] Kapkiyai J J, Karanja N K, Qureshi J N, et al. Soil organic matter and nutrient dynamics in a Kenyan nitisol under long-term fertilizer and organic input management[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1999, 31

- (13):1773–1782.
- [23] 孙福来, 张延霞, 庞祥锋, 等. 长期定位施肥对土壤有机质和碱解氮及冬小麦产量的影响[J]. 土壤通报, 2007, 38(5): 1016–1018.
- SUN Fu-lai, ZHANG Yan-xia, PANG Xiang-feng, et al. Effects of long-term fertilization on soil organic matter, available nitrogen and wheat yield[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2007, 38(5): 1016–1018. (in Chinese)
- [24] 劳秀荣, 孙伟红, 王真, 等. 秸秆还田与化肥配合施用对土壤肥力的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(4): 618–623.
- LAO Xiu-rong, SUN Wei-hong, WANG Zhen, et al. Effect of matching use of straw and chemical fertilizer on soil fertility[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2003, 40(4): 618–623. (in Chinese)
- [25] 卫婷, 韩丽娜, 韩清芳, 等. 有机培肥对旱地土壤养分有效性和酶活性的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(3): 611–620.
- WEI Ting, HAN Li-na, HAN Qing-fang, et al. Effects of organic fertilization on soil nutrient availability and enzyme activity in arid areas[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2012, 18(3): 611–620. (in Chinese)
- [26] 陈茜, 梁成华, 杜立宇, 等. 不同施肥处理对设施土壤团聚体内颗粒有机碳含量的影响[J]. 土壤, 2009, 4(2): 258–263.
- CHEN Qian, LIANG Cheng-hua, DU Li-yu, et al. Effects of different fertilization treatments on organic carbon contents of inter-aggregate particulate in greenhouse soil[J]. *Soils*, 2009, 4(2): 258–263. (in Chinese)
- [27] 廖敏, 彭英, 陈义, 等. 长期不同施肥管理对稻田土壤有机碳库特征的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 129–133.
- LIAO Min, PENG Ying, CHEN Yi, et al. Effect of long-term different fertilizer management on soil carbon stock characteristics in paddy soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, 25(6): 129–133. (in Chinese)
- [28] 孙建, 刘苗, 李立军, 等. 不同施肥处理对土壤理化性质的影响[J]. 华北农学报, 2010, 25(4): 221–225.
- SUN Jian, LIU Miao, LI Li-jun, et al. The effect of different fertilization treatments on soil physical and chemical property[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2010, 25(4): 221–225. (in Chinese)
- [29] Haynes R J, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manure applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 1998, 51(2): 123–137.
- [30] Böhme L, Langer U, Böhme F. Microbial biomass, enzyme activities and microbial community structure in two European long-term field experiments[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(1): 141–152.
- [31] Gong W, Yan X, Wang J, et al. Long-term manure and fertilizer effects on soil organic matter fractions and microbes under a wheat-maize cropping system in northern China[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3): 318–324.
- [32] 孙星, 刘勤, 王德建. 长期秸秆还田对土壤肥力质量的影响[J]. 土壤, 2007, 39(5): 782–786.
- SUN Xing, LIU Qin, WANG De-jian. Effect of long-term straw application on soil fertility[J]. *Soils*, 2007, 39(5): 782–786. (in Chinese)
- [33] Graham M H, Haynes R J, Meyer J H. Soil organic matter content and quality: effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2002, 34(1): 93–102.
- [34] 关连珠, 张伯泉, 颜丽. 有机肥料配施化肥对土壤有机质组分及生物活性影响的研究[J]. 土壤通报, 1990, 21(4): 180–184.
- GUAN Lian-zhu, ZHANG Bo-quan, YAN Li. Research on effects of biological activity and organic matter for fertilizer combined with organic matter in soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 1990, 21(4): 180–184. (in Chinese)
- [35] 杨玉爱. 我国有机肥料研究及展望[J]. 土壤学报, 1996, 33(4): 414–421.
- YANG Yu-ai. Prospectives of organic fertilizer research in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(4): 414–421. (in Chinese)
- [36] 焦彬, 顾荣申, 张学上, 等. 中国绿肥[M]. 北京: 农业出版社, 1986: 67–97.
- JIAO Bin, GU Rong-shen, ZHANG Xue-shang, et al. China green manure[M]. Beijing: Agricultural Press, 1986: 67–97. (in Chinese)
- [37] 黄鸿翔. 我国土壤资源现状、问题及对策[J]. 中国土壤与肥料, 2005(1): 3–6.
- HUANG Hong-xiang. Status, problem and measures of Chinese soil resources[J]. *China Soils Fertilizer*, 2005(1): 3–6. (in Chinese)
- [38] 李继明, 黄庆海, 袁天佑. 长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 563–570.
- LI Ji-ming, HUANG Qing-hai, YUAN Tian-you. Effects of long-term green manure application on rice yield and soil nutrients in paddy soil[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17(3): 563–570. (in Chinese)
- [39] 王劲松, 戴茨华, 徐红, 等. 红壤连续施用绿肥和有机肥对玉米产量及土壤肥力的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2012(5): 27–30.
- WANG Jin-song, DAI Ci-hua, XU Hong, et al. The influence of red soil of continuous green manure and organic fertilizer on corn yield and soil fertility[J]. *China Soil and Fertilizer*, 2012(5): 27–30. (in Chinese)
- [40] 吴发启, 赵西宁, 崔卫芳. 坡耕地耕作管理措施对降雨入渗的影响[J]. 水土保持学报, 2003, 17(3): 115–117.

- WU Fa-qi, ZHAO Xi-ning, CUI Wei-fang. Effect of tillage management measure on rainfall infiltration [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(3): 115-117. (in Chinese)
- [41] 朱文珊,王 坚. 地表覆盖种植与节水增产[J]. 水土保持研究, 1996(3): 141-145.
- ZHU Wen-shan, WANG Jian. Surface mulching and conservation of soil water[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996(3): 141-145. (in Chinese)
- [42] Staley T E, Edwards W M, Owens L B, et al. Soil microbial biomass and organic component alteration in a no-tillage chronosequence[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1988, 52(4): 998-1005.
- [43] 翟瑞常,张之一. 耕作对土壤生物 C 动态变化的影响[J]. 土壤学报, 1996, 33(2): 201-210.
- ZHAI Rui-chang, ZHANG Zhi-yi. Effects of tillage on dynamics of soil biomass carbon[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1996, 33(2): 201-210. (in Chinese)
- [44] Balesdent J. Effects of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ^{13}C abundance in maize fields[J]. *Journal Soil Science*, 1990, 41(4): 587-598.
- [45] Edwards W M. Role of lumbricid earthworms on quality of infiltration water[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 1992, 24(2): 1555-1561.
- [46] 张炳宁,张月平,张秀美. 土壤肥力退化对农业可持续发展的影响[J]. 资源科学, 1999, 21(4): 26-30.
- ZHANG Bing-ning, ZHANG Yue-ping, ZHANG Xiu-mei. The effects of soil fertility degradation on sustainable agricultural development[J]. *Resources Science*, 1999, 21(4): 26-30. (in Chinese)
- [47] 赵其国,万红友. 中国土壤科学发展的理论与实践[J]. 生态与环境, 2004, 13(1): 1-5.
- ZHAO Qi-guo, WAN Hong-you. Theory and practice of soil science development in China[J]. *Ecology and Environment*, 2004, 13(1): 1-5. (in Chinese)
- [48] 沈其荣. 土壤肥科学通论[M]. 北京:高等教育出版社, 2008.
- SHEN Qi-rong. An introduction to soil and fertilizer science[M]. Beijing: Higher Education Press, 2008. (in Chinese)