

DOI: 10.13930/j.cnki.cjea.171058

曾昭海. 豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(1): 57-61

ZENG Z H. Progress and perspective of legume-gramineae rotations[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2018, 26(1): 57-61

# 豆科作物与禾本科作物轮作研究进展及前景\*

曾昭海

(中国农业大学农学院 北京 100193)

**摘要:** 豆科作物与禾本科作物轮作是可持续农业的重要种植技术,也是我国传统农业的精华。利用豆科作物与禾本科作物轮作对于减少农业生产对化学氮肥与农药的依赖、保护农田生物多样性、提高资源利用效率有重要的意义。本文针对当前农业发展现状与存在的问题,提出推行豆科作物与禾本科作物轮作的重要性。从豆科作物与禾本科作物轮作的增产效应、作物增产的氮效应、对农田病虫害的控制及增加农田的生物多样性等方面论述了国内外豆科作物与禾本科作物轮作的研究进展,明确围绕豆科作物与禾本科作物应当研究的重点。提出了豆科作物与禾本科作物轮作所面临的主要挑战及未来可取得突破的主要领域,如协调作物茬口,开发推广豆-禾轮作田间综合管理技术,提高轮作综合效应;利用长期定位试验,研究轮作响应的农业生态前沿问题;评价轮作生态环境效应,建立轮作生态补偿机制等。本文重新审视豆科作物与禾本科作物轮作体系的作用及前景,对于保障农业可持续发展具有重要意义。

**关键词:** 轮作; 豆科作物; 禾本科作物; 可持续发展

**中图分类号:** S344.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2018)01-0057-05

## Progress and perspective of legume-gramineae rotations\*

ZENG Zhaohai

(College of Agronomy and Biotechnology, China Agricultural University, Beijing 100193, China)

**Abstract:** Legume-gramineae rotation is an important technology for sustainable agriculture, as well as an essence of traditional agriculture in China. The rotation of leguminous and gramineous crops is of great significance in reducing the use of synthetic N-fertilizer and pesticides in agricultural production system, maintaining soil biodiversity, and improving the utilization efficiency of nutrient resources. In this paper, we reviewed the importance of legume-gramineae rotation in the view of the current agricultural situation and issues. Progress on legume-gramineae rotation effects on yield effect, nitrogen effect on crop yield, pest and disease control, and biodiversity increase of farmland were discussed. The major challenges and breakthroughs on legume-gramineae rotation were proposed. Work could be done in the following fields: 1) coordinating the rotation crop stubble, developing and promoting the integrated management techniques of legume-gramineae rotation, and improving the comprehensive effects of crop rotation system; 2) designing long-term experiments to investigate the frontier issues of agricultural ecology in response to rotation; and 3) evaluating the ecological effects of crop rotation and establishing a mechanism for ecological subsidies of crop rotation. The role and prospect of legume-gramineae rotation was reviewed in this paper and it is of great importance to the sustainable development of agriculture.

**Keywords:** Crop rotation; Leguminous crop; Gramineous crop; Sustainable development

\* 国家自然科学基金项目(3167164)和公益性行业(农业)科研专项(20150321)资助

曾昭海, 研究方向为现代农作制。E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn

收稿日期: 2017-11-16 接受日期: 2017-11-21

\* This study was supported by the National Natural Sciences Foundation of China (3167164) and the Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest of China (20150321).

Corresponding author, ZENG Zhaohai, E-mail: zengzhaohai@cau.edu.cn

Received Nov. 16, 2017; accepted Nov. 21, 2017

进入 20 世纪,特别是第二次世界大战以后,化肥工业在世界范围内迅猛发展。据统计,20 世纪 50 年代以来,世界范围内,化学氮肥用量增加了 7 倍<sup>[1]</sup>。为保障粮食安全,预计 2050 年氮肥用量将达到 1.3 亿~1.5 亿  $t \cdot a^{-1}$ ,是 20 世纪 70 年代的 4~5 倍<sup>[2]</sup>。与此同时,世界农业主要发展方向是农业生产专业化、农场经营规模化、作物布局单一化、生产过程机械化及收获产品经济高效化<sup>[3]</sup>,有机肥及豆科作物固氮作用逐渐被边缘化,豆科作物与禾本科作物轮作及间套作的种植模式在生产中种植面积逐渐萎缩<sup>[4]</sup>。进入 21 世纪,过量施用氮肥带来了一系列生态环境问题已引起广泛的关注,特别是温室气体排放增加<sup>[5]</sup>、农田生物多样性丧失<sup>[6]</sup>、土壤酸化及水体富营养化等<sup>[7-8]</sup>。如何构建既不依赖过量的外源化肥投入,减少农业生产对环境的负面影响,又能保障粮食安全的新颖种植模式成为世界范围内农业科学家、环境保护者、社会大众及农政管理者关注的焦点。因此,重新审视豆科作物与禾本科作物轮作体系的作用及前景,对于保障农业可持续发展具有重要意义。

## 1 豆科作物与禾本科作物轮作的重要作用

豆科作物生物固氮是节约化石能源、降低农业生产成本的重要措施,是免费的氮肥资源。化学氮肥生产是高耗能的产业,需要消耗大量化石能源。据测算,每生产 1 kg 氮肥需要消耗 38 000 kJ 化石能源<sup>[9]</sup>。全球豆科作物年固氮量高达 1.3 亿  $t^{[10]}$ ,仅此一项节约的化石能源相当于 1.69 亿 t 的标准煤。近年来,世界各国都希望通过发展豆科作物的生物固氮作用来解决氮肥不足、环境污染及能源紧缺等问题。美国中西部地区通过豆科作物苜蓿(*Medicago sativa*)与玉米(*Zea mays*)轮作,每年节省的氮肥成本可以达到 5 000 万~9 000 万美元<sup>[11]</sup>。巴西通过种植大豆(*Glycine max*),每年生物固氮量可以达到 460 万 t,节约成本约为 1.3 亿美元<sup>[11]</sup>。因此,挖掘豆科作物的生物固氮作用,建立合理的豆科作物与非豆科作物轮作体系是减少氮肥投入、缓解能源压力、降低生产成本、实现农业可持续发展的重要途径。

豆科作物与非豆科作物轮作在世界范围内广泛分布,是实现农业可持续发展的重要技术。目前,世界上已知的豆科植物约 750 个属,近 2 万个种,我国已记载的有 172 属 1 485 种,还有许多豆科植物正在不断被发现和记载<sup>[12]</sup>。目前在生产上大面积种植的豆科作物有大豆、豌豆(*Pisum sativum*)、花生(*Arachis*

*hypogaea*)、芸豆(*Phaseolus vulgaris*)、绿豆(*Vigna radiata*)、红豆(*V. angularis*)、鹰嘴豆(*Cicer arietinum*)、扁豆(*Lablab purpureus*)以及各种豆科牧草等。围绕豆科作物地力培肥作用,已形成很多豆科作物与非豆科作物的轮作模式,如古希腊与古罗马的三圃制、英国 1730 年的诺福克(Norfolk)4 年轮作模式以及美国 1794 年提及的 6 年轮作模式,都是豆科作物与非豆科作物轮作的典范<sup>[13]</sup>。Vance<sup>[14]</sup>研究表明,豆科绿肥可为与之轮作的作物提供氮大约  $100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,相当于节约肥料成本  $60 \sim 90 \text{ 美元} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。Gan 等<sup>[15]</sup>在加拿大萨斯卡切温研究表明,利用豆科作物代替休闲与小麦(*Triticum aestivum*)轮作,在 3 年的轮作周期内,籽实产量增加 35.5%,蛋白质产量增加 50.9%,肥料利用率提高 33%。此外,Jensen 等<sup>[16]</sup>利用多点试验研究表明,种植豆科作物可以减少  $\text{N}_2\text{O}$  的排放,与依赖化肥进行作物生产系统相比, $\text{N}_2\text{O}$  的排放量减少 59.9%。Drury 等<sup>[17]</sup>研究表明,当玉米连作时, $\text{N}_2\text{O}$  排放量折合 N 为  $2.62 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,玉米与小麦轮作时, $\text{N}_2\text{O}$  排放量折合 N 为  $1.64 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,玉米与大豆轮作时, $\text{N}_2\text{O}$  排放量折合 N 为  $1.34 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ , $\text{N}_2\text{O}$  排放量显著降低。

豆科作物与禾本科作物轮作兼具生态与集约的特征,是生态集约农业的重要内容,已引起广泛关注。豆科作物与禾本科作物轮作除了可以增加生物固氮外,还可以增加农田作物多样性、控制农田病虫害、减少温室气体排放。2016 年中央一号文件明确提出了“探索实行耕地轮作休耕制度试点”,农业部也联合多部门印发了“探索实行耕地轮作休耕制度试点方案”。这些都表明我国已经将豆科作物与禾本科作物轮作上升到国家战略的高度。欧盟也非常重视豆科作物与非豆科作物轮作模式,Brisson 等<sup>[18]</sup>研究表明,1994—2008 年期间,由于减少豆科作物种植面积,增加油菜种植面积,法国小麦单产年平均降低  $0.035 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。因此,很多专家也呼吁恢复豆科作物的种植面积,为与之轮作的非豆科作物提供更多的氮素、更好地控制病虫害、更显著地增加农田作物多样性与土壤生物多样性。

## 2 豆科作物与禾本科作物轮作的国内外研究进展

### 2.1 豆科作物与禾本科作物轮作对产量的影响

在现代化肥工业建立之前,种植豆科作物是提升地力、提高粮食作物产量的主要途径之一。美国密苏里大学从 1888 年开始设计玉米、燕麦(*Avena*

*sativa*)、小麦、三叶草(*Trifolium repens*)、猫尾草(*Uraria crinita*)、猫尾草 6 年轮作试验以及玉米、小麦和三叶草的 3 年轮作试验。30 年以后的结果表明,在 6 年轮作试验中,玉米增产 60.4%,燕麦增产 3.0%,小麦增产 32.0%;而 3 年轮作试验中,玉米和小麦分别增产 30.8%和 40.8%<sup>[13]</sup>。在俄亥俄和特拉华的长期试验同样表明轮作可以显著增加作物产量;很多研究还表明,玉米-大豆 2 年轮作体系中,玉米的产量通常比连作提高 5%~20%,如果种植 1 年玉米再种植 5 年大豆后,玉米的产量可以提高 15%<sup>[11]</sup>。国内的大量研究也表明,豆科与禾本科作物轮作同样可以增加产量。高菊生等<sup>[19]</sup>在湖南祁阳连续 28 年的长期定位试验表明,实行紫云英(*Astragalus sinicus*)-双季稻(*Oryza sativa*)轮作后,28 年稻谷平均产量比油菜(*Brassica campestris*)-双季稻、黑麦草(*Lolium perenne*)-双季稻及冬闲双季稻增产 6.2%、8.5%和 28.8%。

## 2.2 豆科作物与禾本科作物轮作增产的氮效应

对于豆科作物与禾本科作物轮作增产的机制,国内外学者开展了较多的研究。Yusuf 等<sup>[20]</sup>在非洲尼日利亚研究玉米与大豆和豇豆轮作时发现,利用氮平衡法测定的豆科作物与禾本科作物轮作的氮效应为 124~279 kg·hm<sup>-2</sup>。近年来,随着根际沉积 N 研究方法上突破,利用根际沉积氮来探讨豆科作物与禾本科作物轮作的氮效应亦取得重要进展。Wichern 等<sup>[21]</sup>研究发现,豆科作物与禾本科作物根际沉积氮占地下部分生物量总氮的比例不同,豆科作物平均为 73%,而禾本科作物平均为 57%。本研究组前期研究表明,燕麦的根际沉积氮为 44.7 kg·hm<sup>-2</sup>,而绿豆的根际沉积氮为 94.2 kg·hm<sup>-2</sup>,豆科作物根际沉积氮是禾本科作物的 2.1 倍<sup>[22]</sup>。还有报道表明豆科与禾本科作物轮作体系中,禾本科作物氮吸收量的 5%~34%来自于前茬豆科作物根际沉积氮<sup>[23-24]</sup>。Peoples 等<sup>[25]</sup>的田间试验也表明,大豆后茬的禾本科作物地上部超过 30%的氮素来源于大豆根际沉积氮。其他学者的研究还表明,豆科作物在固氮过程中释放大量的氢气,这些氢气被土壤中相关微生物所氧化产生能量促进固氮菌固氮,进而促进轮作作物的生长<sup>[26-27]</sup>。还有研究结果显示,豆科作物与禾本科作物轮作增产的主要原因是氮素等养分的利用效率得以提高<sup>[28-29]</sup>。

## 2.3 豆科作物与禾本科作物轮作有利于控制农田病虫害

作物轮作是病虫害防治的重要技术措施

之一,在除草剂 2,4-D 没有开发以前,轮作、覆盖作物及机械灭草是控制杂草的主要措施。Forcella 等<sup>[30]</sup>发现,土壤经过 7~8 年的连续种植玉米后,尽管使用了化学除草剂与机械灭草,土壤中杂草的种子数仍然高达 1 500~3 000 个·m<sup>-2</sup>,而玉米与大豆轮作土壤中的杂草种子数仅为 200~700 个·m<sup>-2</sup>。Liebman 等<sup>[31]</sup>比较了 26 个轮作和连作对杂草种群密度和生物量影响,结果发现,除了 1 个试验结果高于对照,5 个试验结果与对照持平外,其余的 20 个试验结果都明显低于对照。在虫害方面,Ware<sup>[32]</sup>研究发现,在美国中部地区,连作玉米的根部害虫数量高于经济防治阈值的 30%,而玉米与大豆轮作土壤中,根部害虫数量则低于经济防治阈值的 1%。在防治线虫方面,轮作无疑也是最好的措施之一。

## 2.4 豆科作物与禾本科作物轮作可以增加农田的生物多样性

与连作相比,轮作无疑从时间和空间方面增加了农田的生物多样性。在时间层面上,通过不同作物轮作,增加了同一地块的生物多样性,同时由于不同作物根系分泌物的种类与数量不同,也引起地下土壤生物多样性的增加;在空间层面上,由于在区域内实现作物轮作,使得同一时间区域内种植作物的种类增多。Orr 等<sup>[33]</sup>应用 DGGE(变性梯度凝胶电泳技术)和 q-PCR(荧光定量 PCR)技术研究有机与常规管理措施对联合固氮菌多样性与活性影响时发现,豆科作物与禾本科作物轮作,土壤微生物多样性明显增加,功能固氮 *nifH* 基因的表达量也得以增加。此外,很多野生生物主要是以农田作为重要生境,美国中西部的研究表明,实行作物轮作,有利于保持当地一种土著野鸡种群的生存与繁衍。

## 3 展望

### 3.1 协调作物茬口,开发推广豆禾轮作田间综合管理技术,提高轮作综合效应

从作物种类、品种筛选及前后茬作物对养分需求的差异互补性等方面筛选不同的作物,构建豆科作物与禾本科作物轮作模式。以作物产量、地力培肥效应、温室气体排放、生物多样性、养分资源消耗、病虫害防控、硝酸盐淋溶等多个指标对轮作茬口进行综合评价<sup>[34]</sup>。由于不同作物养分需求的差别,尤其是专业化、规模化的生产后,上下茬不同作物管理方面的差异会对下茬作物造成影响,如我国东北地区由于施用长残留除草剂,通常会对下茬作物造成药害,生产中可以适当考虑筛选合适的除草

剂及杂草防除方式,避免相互间轮作时造成药害,从而达到合理轮作的目标。

### 3.2 设置长期定位试验,研究轮作响应农业生态前沿问题

全球气候变化、农田土壤退化、土壤地力下降及农田生物多样性丧失等是当前我国农业可持续发展面临的重大课题。针对我国不同生态类型区生产中出现的主要问题,设置豆科作物与禾本科作物长期轮作定位试验,研究豆科作物与禾本科作物长期轮作对当前农业前沿生态问题的响应机制,为宏观层面的轮作政策制定和微观层面的技术集成示范及机理机制研究提供参考。

### 3.3 评价轮作生态环境效应,建立轮作生态补偿机制

围绕豆科作物与禾本科作物轮作,目前所有的研究主要集中在产量、经济效益与农产品品质方面,缺乏环境效应评价。今后在开展全方位调查研究基础上,进一步挖掘豆科作物与禾本科作物轮作效应的潜在价值,通过农业环境支付、绿色支付以及碳汇市场温室气体减排支付等措施将非市场产品货币化,制定豆科作物与禾本科作物轮作的农业生态补偿政策,建立生态补偿长效机制。

### 3.4 创新研究方法,进一步明确轮作高效机制机理

尽管轮作是一个传统的农艺技术,围绕其增产机制方面也做了大量的工作,但受到研究方法与研究手段的制约,以往豆科作物与禾本科作物轮作效应只能评价轮作的综合效果。如何综合运用模型模拟方法、分子生物学方法及<sup>15</sup>N同位素示踪法评价豆科作物与禾本科作物轮作的氮效应、病虫害防控效应、地力培肥效应及生态环境效应将是未来发展的重要方向。

## 4 结语

豆科作物与禾本科作物轮作是世界上古老的一种农作技术,有非常悠久的历史。我国最早的农学名著《齐民要术》中记载有“每岁一易,必莫频种”和“凡美田之法,绿豆为上”<sup>[35]</sup>。另外,我国很多民间谚语,如“倒茬如上粪”、“豆茬种谷子,准备闲屋子”和“豆茬种谷,必有后福”等,阐述的主要思想就是利用豆科作物轮作进行地力培肥。豆科作物的生物固氮是我国传统农业生产重要的氮素来源,许倬云<sup>[36]</sup>在《汉代农业》中提及,春秋时期我国40%的耕地种植的是豆科作物,可见我们的先辈在很早就开始重视豆科作物的肥田养地作用,这也是维持我国农业文明持续发展和农田地力5000年不衰退的重要原因<sup>[3]</sup>。作为20世纪60年代绿色革命的主要驱动因素,化肥与

农药在改造传统农业,发展现代农业方面发挥了无可替代的作用,但截至目前,化学肥料与农药都不能完全弥补轮作效应。

豆科作物与禾本科作物轮作的种植制度在培肥地力、提高作物产量、保持农田生物多样性、控制农田病虫害、降低生态成本等方面发挥了重要作用,非常契合当前农业可持续发展的需求。应对未来农业发展面临的重大挑战,挖掘豆科作物与禾本科作物轮作的潜在价值,构建适合我国不同区域农业绿色发展的豆科作物与禾本科作物轮作体系对于推进农业供给侧结构性改革具有重要的现实意义。

## 参考文献 References

- [1] FOX J E, GULLEDGE J, ENGELHAUPT E, et al. Pesticides reduce symbiotic efficiency of nitrogen-fixing rhizobia and host plants[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(24): 10282–10287
- [2] MATSON P A, NAYLOR R, ORTIZ-MONASTERIO I. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management[J]. *Science*, 1998, 280(5360): 112–115
- [3] ZANDER P, AMJATH-BABU T S, PREISSEL S, et al. Grain legume decline and potential recovery in European agriculture: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2016, 36(2): 26
- [4] VOISIN A S, GUÉGUEN J, HUYGHE C, et al. Legumes for feed, food, biomaterials and bioenergy in Europe: A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2014, 34(2): 361–380
- [5] VERMEULEN S J, CAMPBELL B M, INGRAM J I. Climate change and food systems[J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2012, 37: 195–222
- [6] HOOPER D U, ADAIR E C, CARDINALE B J, et al. A global synthesis reveals biodiversity loss as a major driver of ecosystem change[J]. *Nature*, 2012, 486(7401): 105–108
- [7] GUO J H, LIU X J, ZHANG Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010
- [8] ZHANG F S, CHEN X P, VITOUSEK P. Chinese agriculture: An experiment for the world[J]. *Nature*, 2013, 497(7447): 33–35
- [9] REFSGAARD K, HALBERG N, KRISTENSEN E S. Energy utilization in crop and dairy production in organic and conventional livestock production systems[J]. *Agricultural Systems*, 1998, 57(4): 599–630
- [10] HERRIDGE D F, PEOPLES M B, BODDEY R M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems[J]. *Plant and Soil*, 2008, 311(1/2): 1–18
- [11] PETERSON T A, RUSSELLE M P. Alfalfa and the nitrogen cycle in the corn belt[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 1991, 46(3): 229–235

- [12] 曾昭海, 胡跃高, 陈文新, 等. 共生固氮在农牧业上的作用及影响因素研究进展[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 21–24  
ZENG Z H, HU Y G, CHEN W X, et al. Review on studies on the important role of symbiotic nitrogen fixation in agriculture and livestock production and the factors affecting its efficiency[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2006, 14(4): 21–24
- [13] OLSEN R J, HENSLER R F, ATTOE O J, et al. Fertilizer nitrogen and crop rotation in relation to movement of nitrate nitrogen through soil profiles[J]. Soil Science Society of America Journal, 1970, 34(3): 448–452
- [14] VANCE C P. Symbiotic nitrogen fixation and phosphorus acquisition. Plant nutrition in a world of declining renewable resources[J]. Plant Physiology, 2001, 127(2): 390–397
- [15] GAN Y T, HAMEL C, O'DONOVAN J T, et al. Diversifying crop rotations with pulses enhances system productivity[J]. Scientific Reports, 2015, 5: 14625
- [16] JENSEN E S, PEOPLES M B, BODDEY R M, et al. Legumes for mitigation of climate change and the provision of feedstock for biofuels and biorefineries. A review[J]. Agronomy for Sustainable Development, 2012, 32(2): 329–364
- [17] DRURY C F, REYNOLDS W D, TAN C S, et al. Impacts of 49–51 years of fertilization and crop rotation on growing season nitrous oxide emissions, nitrogen uptake and corn yields[J]. Canadian Journal of Soil Science, 2014, 94(3): 421–433
- [18] BRISSON N, GATE P, GOUACHE D, et al. Why are wheat yields stagnating in Europe? A comprehensive data analysis for France[J]. Field Crops Research, 2010, 119(1): 201–212
- [19] 高菊生, 徐明岗, 董春华, 等. 长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量及土壤肥力的影响[J]. 作物学报, 2013, 39(2): 343–349  
GAO J S, XU M G, DONG C H, et al. Effects of long-term rice-rice-green manure cropping rotation on rice yield and soil fertility[J]. Acta Agronomica Sinica, 2013, 39(2): 343–349
- [20] YUSUF A A, IWUAFOR E N O, ABAIDOO R C, et al. Grain legume rotation benefits to maize in the northern Guinea savanna of Nigeria: Fixed-nitrogen versus other rotation effects[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2009, 84(2): 129–139
- [21] WICHERN F, EBERHARDT E, MAYER J, et al. Nitrogen rhizodeposition in agricultural crops: Methods, estimates and future prospects[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2008, 40(1): 30–48
- [22] 陈恭. 燕麦与绿豆、箭筈豌豆间作生产模式及根际沉积效应[D]. 北京: 中国农业大学, 2011  
CHEN G. Production and rhizodeposition of oats intercropped with mung bean and common vetch[D]. Beijing: China Agricultural University, 2011
- [23] LABERGE G, HAUSSMANN B I G, AMBUS P, et al. Cowpea N rhizodeposition and its below-ground transfer to a co-existing and to a subsequent millet crop on a sandy soil of the Sudano-Sahelian eco-zone[J]. Plant and Soil, 2011, 340(1/2): 369–382
- [24] VESTERAGER J M, NIELSEN N E, JENSEN H H. Nitrogen budgets in crop sequences with or without phosphorus-fertilised cowpea in the maize-based cropping systems of semi-arid eastern Africa[J]. African Journal of Agricultural Research, 2007, 2(6): 261–268
- [25] PEOPLES M B, HERRIDGE D F. Nitrogen fixation by legumes in tropical and subtropical agriculture[J]. Advances in Agronomy, 1990, 44: 155–223
- [26] PEOPLES M B, MCLENNAN P D, BROCKWELL J. Hydrogen emission from nodulated soybeans [*Glycine max* (L.) Merr.] and consequences for the productivity of a subsequent maize (*Zea mays* L.) crop[J]. Plant and Soil, 2008, 307(1/2): 67–82
- [27] DONG Z, WU L, KETTLEWELL B, et al. Hydrogen fertilization of soils — Is this a benefit of legumes in rotation?[J]. Plant, Cell & Environment, 2003, 26(11): 1875–1879
- [28] COPELAND P J, CROOKSTON R K. Crop sequence affects nutrient composition of corn and soybean grown under high fertility[J]. Agronomy Journal, 1992, 84(3): 503–509
- [29] ZHU B, YI L X, HU Y G, et al. Nitrogen release from incorporated <sup>15</sup>N-labelled Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.) residue and its dynamics in a double rice cropping system[J]. Plant and Soil, 2014, 374(1/2): 331–344
- [30] FORCELLA F, LINDSTROM M J. Weed seed populations in ridge and conventional tillage[J]. Weed Science, 1988, 36(4): 500–503
- [31] LIEBMAN M, DYCK E. Crop rotation and intercropping strategies for weed management[J]. Ecological Applications, 1993, 3(1): 92–122
- [32] WARE G W. Complete Guide to Pest Control with and Without Chemicals[M]. Fresno, California: Thomson, 1980
- [33] ORR C H, JAMES A, LEIFERT C, et al. Diversity and activity of free-living nitrogen-fixing bacteria and total bacteria in organic and conventionally managed soils[J]. Applied and Environmental Microbiology, 2011, 77(3): 911–919
- [34] RECKLING M, HECKER J M, BERGKVIST G, et al. A cropping system assessment framework — Evaluating effects of introducing legumes into crop rotations[J]. European Journal of Agronomy, 2016, 76: 186–197
- [35] 缪启愉, 缪桂龙. 齐民要术译注[M]. 上海: 上海古籍出版社, 2006  
MIAO Q Y, MIAO G L. Translation and Annotation of Qimin yaoshu or Important Arts for the Common People's Needs[M]. Shanghai: Shanghai Classics Publishing House, 2006
- [36] 许倬云. 汉代农业——中国农业经济的起源及特性[M]. 桂林: 广西师范大学出版社, 2005  
XU Z Y. Agriculture in Han Dynasty: Origin and Characteristics of Agricultural Economy in China[M]. Guilin: Guangxi Normal University Press, 2005