

稻田系统生产力及其稳定性对施肥制度的响应*

陈春兰^{1,2} 陈安磊^{1,2} 魏文学^{1,2} 彭 忠^{1,2} 尹春梅^{1,2} 谢小立^{1,2**}

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所 亚热带农业生态过程重点实验室 长沙 410125;

2. 中国科学院桃源农业生态试验站 桃源 415700)

摘 要 为探讨长期不同施肥制度对稻田系统生产力及其稳定性的影响,以国家生态系统研究网络中国科学院桃源农业生态试验站稻田施肥试验(2004—2010 年)监测数据为基础,分析不同施肥制度下红壤性稻田系统生产力及其稳定性。结果表明,施肥是维持和提升稻田系统生产力的物质基础,稻田系统生产力稳定性对不同施肥制度响应不同:(1)各施肥处理总生物量生产力显著高于不施肥处理,是不施肥处理的 1.33~2.23 倍,从高至低依次为:优化施肥处理>常规施肥处理>化肥处理>不施肥处理,且优化施肥能显著提高总生物量生产力的稳定性($P<0.05$);(2)各施肥处理的水稻产量均显著高于不施肥处理,是不施肥处理的 1.35~2.02 倍,年际变异系数分别为:不施肥处理 22.4%、化肥处理 15.8%、优化施肥处理 10.3%、常规施肥处理 15.7%,优化施肥处理产量稳定性最高;(3)地下部分生产力施肥处理显著高于不施肥处理,施肥年限较长的处理地下部分生物量生产力的稳定性显著高于年限较短的施肥处理($P<0.05$)。总的来说,优化施肥处理水稻生产力及其稳定性较好,不施肥处理水稻生产力及其稳定性最差;地上部分生产力及其稳定性和地下部分生产力受施肥制度的影响较大,而地下部分生产力的稳定性则受施肥年限影响较大。

关键词 稻田系统 施肥制度 优化施肥 生产力 产量稳定性

中图分类号: S143.5; S143.7 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-3990(2012)10-1263-05

Response of rice-rice ecosystem productivity and yield stability to long-term fertilization

CHEN Chun-Lan^{1,2}, CHEN An-Lei^{1,2}, WEI Wen-Xue^{1,2}, PENG Zhong^{1,2}, YIN Chun-Mei^{1,2}, XIE Xiao-Li^{1,2}

(1. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical Region, Chinese Academy of Sciences; Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. Taoyuan Station of Agro-ecology Research, Chinese Academy of Sciences, Taoyuan 415700, China)

Abstract The productivity and yield stability of rice-rice ecosystem in Huazhong with different fertilizers were investigated using experimental data from the Chinese Ecosystem Research Network at Taoyuan Station of Agro-ecology Research, Chinese Academy of Sciences. The field trials included no fertilizer (CK), chemical fertilizer (NPK), rice straw with low N, K and high P (optimal fertilization, OF) and rice straw with some amount of NPK (general fertilization, GF). The results showed that fertilization was the basic mode of maintaining or increasing productivity of rice in paddy ecosystem. Productivity and stability were different in paddy ecosystems with different fertilizers. The total rice biomass was significantly higher in fertilizer treatments than in no fertilizer treatments; 0.33~1.23 times higher for the period of 2005 to 2010. The order of stability from high to low was OF > GF > NPK > CK. OF treatment improved total biomass stability in the study area. Yield under fertilizer treatments was 0.35~1.02 times higher than under no fertilizer treatment for the period of 2005 to 2010. It was 0.35 times higher in GF than CK in 2005, 0.82 times higher in NPK than CK in 2007 and 1.02 times higher in OF than CK in 2010. The stability of rice yield was high in OF treatment and significantly low in CK treatment. Yearly variation coefficient under CK, NPK, OF and GF treatments was 22.4%, 15.8%, 10.3% and 15.7%, respectively. Productivity of underground biomass was significantly higher in fertilizer treatments than in no fertilizer treatment. Also ecological stability was significantly higher under GF treatment than the other treatments. In conclusion, rice

* 国家自然科学基金项目(41071181)、公益性行业(农业)科研专项经费项目(201203030)和 CERN 野外台站研究基金项目资助

** 通讯作者: 谢小立(1958—), 男, 研究员, 主要从事农业生态学研究。E-mail: xlx@isa.ac.cn

陈春兰(1981—), 女, 助理工程师, 主要从事土壤微生物生态学研究。E-mail: ccl@isa.ac.cn

收稿日期: 2012-01-16 接受日期: 2012-05-29

productivity and production stability were highest under OF treatment and lowest under CK treatment. While fertilizers influenced rice yield stability and total or over-ground rice biomass, they little affected the stability of below-ground biomass productivity.

Key words Paddy ecosystem, Fertilization, Optimal fertilization, Yield productivity, Production stability

(Received Jan. 16, 2012; accepted May 29, 2012)

水稻是全球近 50%人口的主要粮食作物, 其中 90%的水稻产于亚洲, 并在亚洲等发展中国家消费^[1]。近年来随着水稻复种指数的增高及品种改良, 总产量有所增加, 但人均产量降低, 单产不稳定, 造成了国际社会对粮食安全的严重担忧^[2], 水稻高产稳产逐渐成为人们关注的焦点。

大量施用化肥是高产的重要途径, 当前我国南方稻作区单位面积的平均氮、磷施用量已达 375 kg·hm⁻², 超过国际安全施肥标准上限的 70%。虽然化肥大量施用是水稻高产的保障条件, 但随之而来的化肥过量施用产生的环境污染, 化肥利用效率的普遍降低, 产量的稳定性偏低, 加大了粮食安全的风险^[3-4]。对于如何提高作物产量及其稳定性, 前人做了较多研究。研究发现, 稻田土壤生态系统稳定性较高, 作物秸秆与肥料配施处理的作物产量稳定性随着耕作时间延长而逐渐升高^[5-6], 化肥和有机肥的配合使用能显著提高稻谷产量的稳定性^[7-8]。

目前, 较多的研究结果是基于长期定位试验获得的, 长期定位试验的试验背景(背景养分含量低)和目前的高养分肥力环境背景已有很大差异, 并且施肥处理(施肥量)长期相对稳定, 而现实水稻生产施肥量较高、背景养分高(干湿沉降、灌溉水), 在此背景下研究短期内施肥调整对水稻高产及稳定性影响更具有现实意义。因此, 本研究基于目前区域过量施肥等问题, 设置高量施肥和优化施肥等施肥模式的短期试验, 研究短期内调整施肥对稻谷产量及稳定性的影响, 为缓解因过量施肥而造成的环境问题提供优化施肥模式。

1 材料与方法

1.1 试验设计

本研究选用的两个试验田均位于中国科学院桃源农业生态试验站(28°55'49.8"N, 111°26'25.7"E)内, 试验土壤均为第四纪红色黏土发育的水稻土, 种植制度为双季稻和冬闲模式。按照国家生态系统研究

网络(CERN)对红壤区稻田土壤肥力、生产力演变特征的长期监测要求, 设置了代表本区域常规施肥模式的定位试验(以下简称为常规施肥试验), 同时为研究区域优化施肥模式设置了辅助定期试验(以下简称为优化施肥试验)。常规施肥试验始于 1998 年, 2003 年改扩建, 施肥方式为化肥配合有机肥施用, 早稻稻草移出, 晚稻稻草全部还田, 模拟本区域农民的习惯施肥方式(GF), 施肥量见表 1。优化施肥试验始于 2004 年, 设有 3 个处理: ①不施肥(CK), 且收获物移出稻田系统, 作为研究对照; ②大量施用化肥(NPK), 收获物移出稻田系统, 代表本区域高产高投入施肥模式; ③优化施肥(OF), 即稻草还田配合减氮增磷少钾优化施肥模式以达到区域高产、稳产目的, 代表区域优化施肥模式。常规施肥试验田面积 45.0 m×30.5 m, 优化施肥试验小区面积为 7.0 m×14.3 m, 两个试验均未设重复, 施肥情况见表 1。

1.2 试验方法

按照 CERN 要求于 2004 年、2007 年和 2010 年晚稻收获后取土壤样品, 常规施肥试验田按 CERN 布设的网格取样法取 6 个重复样品, 优化施肥试验每个处理分别取 3 次重复样品。2005—2010 年每年于早、晚稻收获期取水稻生物量样, 生物样品重复数同土样样品重复数, 每个样品为 3 苑混合样, 其中水稻根样品为 0~20 cm 的根系, 植物样品在 85 ℃烘干记生物量和产量。土壤有机质、全氮测定分析方法为常规测定方法^[9]。

1.3 数据分析

采用 Excel 2003 和 SPSS 16.0 软件进行数据统计分析。

2 结果与分析

2.1 不同施肥处理土壤有机碳和全氮含量

从图 1 可以看出, 施化肥及有机肥处理土壤有机碳含量随着年际变化有上升趋势, 全氮含量在有机肥施入的处理中基本持平, 化肥处理全氮呈略微

表 1 试验田不同施肥处理年均化肥及秸秆投入量

Table 1 Annual application amount of fertilizer and rice straw of different fertilization treatments kg·hm⁻²

施肥处理 Fertilization treatment	氮肥 N fertilizer	磷肥 P fertilizer	钾肥 K fertilizer	有机肥 Rice straw
CK	/	/	/	/
NPK	348.9	108.8	305.1	/
OF	221.4	70.3	99.2	6 437.8
GF	229.9	40.0	200.8	5 131.9

下降趋势; 不施肥(CK)处理中这两个指标含量均存在下降趋势, 并且全氮的下降幅度更大。数据分析显示, 2004 年至 2010 年 6 年间不施肥处理的有机碳含量年均降幅为 $0.17 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降低 6.1%, 优化施肥 (OF) 处理有机碳年增长速率略大于施用化肥(NPK) 处理, 分别为 $0.46 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 、 $0.32 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 常规施肥(GF) 处理有机碳年增长速率最大, 为 $0.51 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 6 年间增长 25.6%。不施肥处理全氮含量年降幅为 $0.09 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 6 年间降低 31.2%, 只施化肥的 NPK 处理 6 年间全氮含量在施肥处理中降幅最大, 为 15.0%, GF 处理降低 9.6%, OF 处理几乎不变(降幅为 0.1%)。

2.2 不同施肥处理水稻生物学生产力和产量

图 2a 显示各施肥处理总生物量生产力明显高于不施肥处理, 并且统计分析结果显示均达到极显著水平($P < 0.01$), 是不施肥处理的 1.33~2.23 倍。GF 处理水稻总生物量生产力与 OF 及 NPK 处理均无显著差异; 而与 OF 处理相比, 施用化肥 NPK 能显著提高水稻总生物量生产力($P < 0.05$)。从图 2a 曲线变化趋势来看, 在调查的初始几年, 水稻总生物量生产

力呈下降趋势, 并且背景肥力相同(优化施肥试验)的 3 个处理的变化趋势相同, 可能原因是不同施肥处理导致总生物量生产力存在差异, 而年际间的升高或降低趋势的原因可能与水分、气温、光照等其他气候因素有关^[10]。

从图 2b 可以看出, 土壤背景值相同(优化施肥试验)的 3 个处理中, 水稻地下部分生产力在调查的前 3 年存在明显下降趋势, 之后趋于平稳; 而 GF 处理水稻地下部分生产力在调查的几年间变化不大, 可能原因是前 3 个处理试验田 2004 年建立, 施肥处理的变化使地下部分生产力有一个变动过程, 而常规施肥田建立于 1998 年, 2003 年改扩建, 经过几年的不变施肥地下部分生产力趋于稳定变化。但总的趋势是不管土壤背景养分含量是否相同, 施肥处理间地下部生产力不存在显著性差异, 而均显著高于不施肥处理($P < 0.05$)。

统计分析显示各施肥处理水稻产量极显著高于不施肥处理($P < 0.01$), 是不施肥处理的 1.35~2.02 倍(表 2); OF 处理水稻产量略低于 NPK 处理, 略高于 GF 处理, 但在统计学上均不存在显著差异($P < 0.05$)。

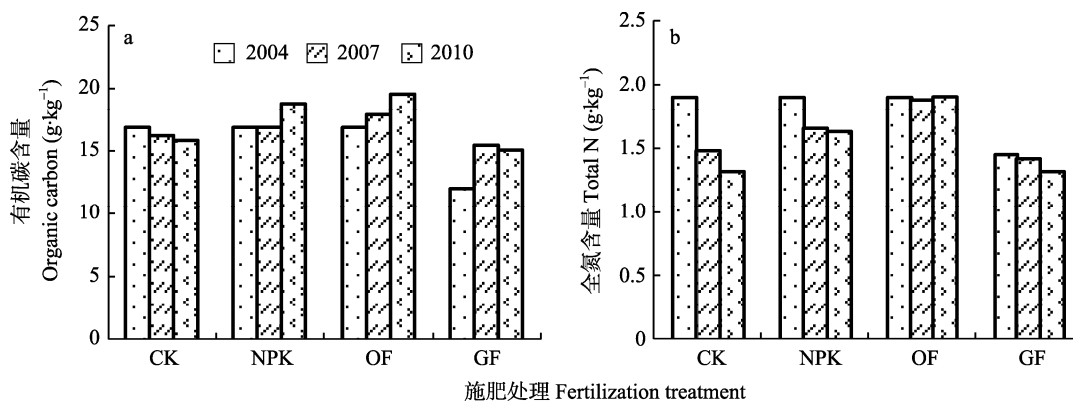


图 1 2004 年、2007 年和 2010 年不同施肥处理土壤表层(0~20 cm)有机碳和全氮含量的年际变化

Fig. 1 Inter-annual changes of soil organic carbon (a) and total nitrogen (b) in cultivation layer (0~20 cm) under different fertilization treatments in 2004, 2007 and 2010

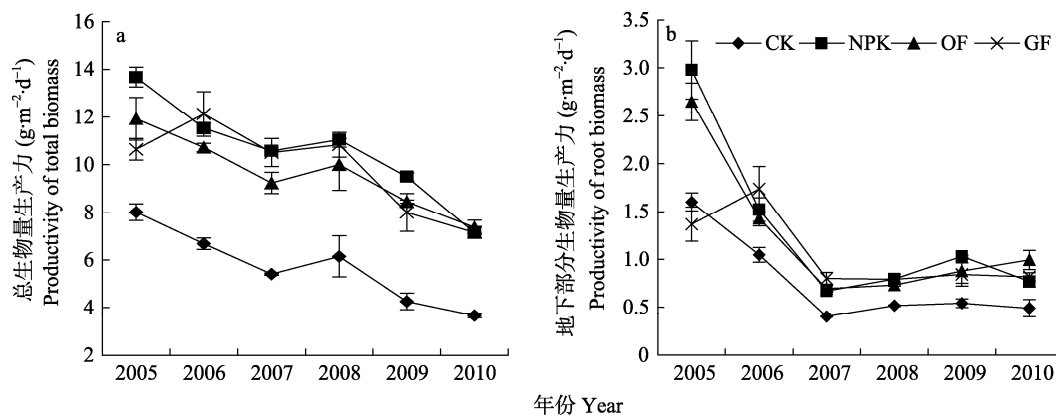


图 2 不同施肥处理下水稻总生物量生产力(a)和地下部分生产力(b)的年际变化

Fig. 2 Inter-annual changes of rice total biomass productivity (a) and underground part biomass (b) under different fertilization treatments during six years from 2005 to 2010

6年产量数据显示,不施肥处理随年限的延长,单位面积产量有下降趋势,这与土壤肥力的逐年下降有关,而其他施肥处理产量也存在下降趋势,产生的原因可能与孕穗期水分、光照、有效积温等气候因素有关。

2.3 不同施肥处理水稻生物量生产力和产量的稳定性

施肥制度不仅影响水稻生物量,而且影响水稻生物量的稳定性,本文选取常用的稳定性评价指标变异系数来反映水稻生物量生产力和产量的稳定性。各施肥处理生物量生产力及产量年际间的变异系数见表 3。比较不同施肥制度总生物量生产力、地上部分生产力以及产量的稳定性系数可以看出,不施肥处理变异系数均高于其他 3 个施肥处理,且均达到显著性差异($P<0.05$),说明不施肥处理的稳定性较低;OF 处理变异系数显著低于 NPK 处理,说明 OF 能维持较高的生产力,而且降低了产量及生物量的年际变异性,稳产性高于高量施化肥的 NPK 处理;与常规施肥(GF)相比,OF 处理中这 3 个指标变异性都较低,并且在地上部分生产力及产量的稳定性显著高于 GF 处理。比较地下部分生产力的变异系数发现,建立年限较短的各施肥处理间(优化施肥试验)变异系数不存在显著差异,说明施肥制度可能对地下部分生产力稳定性的影响不明显,而均显著高于使用年限较长的 GF 处理(常规施肥试验)的年际变异系数($P<0.05$),说明建立年限较短处理的地下部分生物量生产力稳定性显著低于年限较长处理。

3 讨论与结论

稻田土壤养分持续性是评价稻田系统生产力稳

定性能的指标之一。土壤有机碳是土壤的重要组成部分,在土壤肥力、环境保护、农业可持续发展等方面起着极其重要的作用,被认为是土壤质量和功能的核心^[11-13]。本研究结果表明,经过 6 年 12 茬水稻种植后,不管土壤背景肥力是否相同,施肥处理的稻田土壤有机碳含量均处于积累状态,Liu 等^[7]的结果亦显示施用化肥 NPK 及 NPK 与有机物配施均增加土壤有机碳含量。不施肥处理有机碳含量总体上略有下降趋势,但降幅不大。本研究 6 年的结果显示,平均每年带入的水稻根茬约为 $144.90 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ (干物重),这可能是不施肥处理有机碳含量下降幅度较慢的主要原因。王凯荣等^[14]利用长期定位试验也得出了类似的结论,即长期不施肥处理有机质含量下降缓慢。研究表明,中国水稻田具有可观的固碳速率,而淹水植稻是稻田土壤有机质易于积累的有利环境^[15]。

土壤全氮在仅施肥的情况下都有所降低,而 OF 处理土壤全氮基本稳定。主要原因是化学肥料氮在土壤中残留率较低,而主要以有机态的形态保存在土壤中,本研究中 OF 处理减少了氮肥施用量,但稻草的还田能保持土壤全氮含量的持平状态。Bi 等^[10]报道不管是无机还是有机营养元素特别是氮素供应不足,将会引起水稻产量逐渐降低。本研究中产量在不同处理中存在不同的降低速率与各处理土壤中氮素含量的速度变化趋势基本一致,如 OF 及 GF 处理中全氮含量降幅较小。可见在施肥调整的方案中有必要考虑稻草等有机物的投入。

与 OF 处理相比,施用化肥 NPK 能显著提高水稻总生物量生产力($P<0.05$),而这 2 个处理的水稻产

表 2 不同施肥制度下水稻产量随年际的变化
Table 2 Yield of rice under different fertilization treatments from 2005 to 2010 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$

年份 Year	不施肥 CK	化肥 NPK	优化施肥 OF	常规施肥 GF
2005	790±9a	1 244±9b	1 096±20c	1 070±47c
2006	681±43a	1 141±25b	1 068±9c	1 065±30c
2007	647±46a	1 181±3b	1 135±20b	1 062±33c
2008	556±37a	1 087±164b	1 018±31b	1 002±47b
2009	487±20a	919±17b	906±5b	746±36c
2010	431±12a	829±46bc	869±11b	788±29c

同行不同小写字母表示差异性显著($P<0.05$),下同。Different small letters in the same line show significant difference at $P<0.05$. The same below.

表 3 不同施肥处理水稻生物量生产力及产量年际间的变异系数
Table 3 Average variation coefficients of biomass productivity and yield under different fertilization treatments during 6 years from 2005 to 2010

变异系数 Variation coefficient	不施肥 CK	化肥 NPK	优化施肥 OF	常规施肥 GF
总生物量生产力 Productivity of total biomass	28.5a	20.8b	17.0c	18.9bc
地上部生产力 Productivity of overground biomass	25.5a	17.4b	14.2c	19.2d
地下部生产力 Productivity of root biomass	61.5a	67.8a	60.5a	39.6b
产量 Rice yield	22.4a	15.8b	10.3c	15.7b

量无显著差异,说明 OF 处理中水稻营养体对营养元素的利用更高;NPK 处理总生物量生产力稳定性低于 GF,显著低于 OF 处理,可能原因是优化施肥与常规施肥中都加入了秸秆还田,化肥的时效性结合有机质肥缓效性可能是维持生产力稳定性的主要因素;不施肥处理总生物量生产力及其稳定性显著低于 3 个施肥处理,可能是土壤肥力降低所致。地下部分生产力的大小与施肥制度相关,而在不同施肥制度间具有相似的变化趋势,但随着年限的延长而趋于平稳,使稳定性增高。

产量的稳定性是保障粮食安全的重要指标。本研究中稻草还田配合减氮增磷少钾的优化施肥模式处理(OF)与 NPK 及 GF 处理的产量不存在显著差异,但水稻产量的年际变异系数显著低于其他 3 个处理,说明 OF 处理稳产性优于其他施肥措施。不施肥处理稻谷产量变异性最高,由于每年水稻植株带走营养元素,使土壤肥力降低,特别是氮素含量的降低可能是该处理产量变异性较大的主要原因^[10]。有研究表明,化肥 NPK 配施有机肥处理的水稻产量及其稳定性都高于只施化肥的处理^[7-8],本研究结果显示稻田系统水稻产量在适量施用化肥(减氮增磷少钾)配以有机肥的处理比只施化肥、常规的化肥配施有机肥以及不施肥处理均表现出稳产趋势,产量比化肥处理略低,比常规的化肥配施有机肥略高,但均不存在显著差异,说明在保证稻谷产量无显著变化的条件下,稻草还田配以减氮增磷少钾措施可以减少化肥的投入量,在短期内可提高肥料的利用效率和减少肥料施用总量的污染潜力。

参考文献

- [1] Maclean J L, Dawe D C, Hardy B, et al. Rice almanac[M]. Philippines: International Rice Research Institute, 2002
- [2] 朱德峰,程式华,张玉屏,等. 全球水稻生产现状与制约因素分析[J]. 中国农业科学, 2010, 43(3): 474-479
- [3] 肖军,秦志伟,赵景波. 农田土壤化肥污染及对策[J]. 环境保护科学, 2005, 31(5): 32-34
- [4] 陈防,鲁剑巍,万开元. 有机无机肥料对农业环境影响述评[J]. 长江流域资源与环境, 2004, 13(3): 258-261
- [5] Yamoah C F, Bationo A, Shapiro B, et al. Trend and stability analyses of millet yields treated with fertilizer and crop residues in the Sahel[J]. Field Crops Research, 2002, 75(1): 53-62
- [6] 马力,杨林章,沈明星,等. 基于长期定位试验的典型稻麦轮作区作物产量稳定性研究[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 117-124
- [7] Liu M, Li Z P, Zhang T L, et al. Discrepancy in response of rice yield and soil fertility to long-term chemical fertilization and organic amendments in paddy soils cultivated from infertile upland in subtropical China[J]. Agricultural Sciences in China, 2011, 10(2): 259-266
- [8] Xu M G, Li D C, Li J M, et al. Effects of organic manure application with chemical fertilizers on nutrient absorption and yield of rice in Hunan of southern China[J]. Agricultural Sciences in China, 2008, 7(10): 1245-1252
- [9] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999: 30-34, 46-49
- [10] Bi L D, Zhang B, Liu G R, et al. Long-term effects of organic amendments on the rice yields for double rice cropping systems in subtropical China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2009, 129(4): 534-541
- [11] 李长生. 土壤碳储量减少: 中国农业之隐患——中美农业生态系统碳循环对比研究[J]. 第四纪研究, 2000, 20(4): 345-350
- [12] 苏永中,赵哈林. 土壤有机碳储量、影响因素及其环境效应的研究进展[J]. 中国沙漠, 2002, 22(3): 220-228
- [13] 王卫,李秀彬. 中国耕地有机质含量变化对土地生产力影响的定量研究[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 24-28
- [14] 王凯荣,刘鑫,周卫军,等. 稻田系统养分循环利用对土壤肥力和可持续生产力的影响[J]. 农业环境科学学报, 2004, 23(6): 1041-1045
- [15] 邱建军,王立刚,李虎,等. 农田土壤有机碳含量对作物产量影响的模拟研究[J]. 中国农业科学, 2009, 42(1): 154-161