

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

王凯荣¹, 刘鑫¹, 周卫军¹, 谢小立¹, R. J. Buresh²

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 湖南长沙 410125; 2. International Rice Research Institute, DAPO 7777, Metro Manila, the Philippines)

摘要:基于 12 a 田间定位试验结果,研究了在不同化肥配施条件下,有机养分循环利用对亚热带红壤稻田生产力和土壤肥力的影响。结果表明:①施用化肥是实现水稻高产的必要条件。在连续不施肥情况下,水稻产量维持在 $5.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 的水平,投入化肥 $\text{N}(229 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 、 $\text{N-P}(39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 和 $\text{N-P-K}(162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2})$ 之后,产量分别提高到了 6.6、7.9 和 $9.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。农田系统有机养分循环利用能进一步提高水稻产量,但产量增益随 NPK 配施程度提高而降低。②在不施肥或只施 N 肥的情况下,有机物循环利用能显著降低水稻产量的年际变异系数,而在 NP 或 NPK 配施基础上的有机物循环利用则不能显著提高水稻的稳产性能,说明适量和平衡地提供水稻所需的营养元素是水稻稳产的物质基础,至于这些养分是来自化肥或有机肥源并不重要。红壤稻田早稻的稳产性受施肥模式的影响较大,施磷肥是降低早稻产量波动、提高稳产性能的最重要条件。③连续 12 a 不施肥对土壤有机质含量没有显著影响,施化肥 NPK 处理的土壤有机质含量呈现出不稳定的上升趋势,而有机物循环利用能显著提高土壤有机质含量和土壤养分的生物有效性。通过有机物养分资源的循环利用,可有效降低当前稻田化肥的高投入水平,减轻环境污染压力,实现农田生态系统生产力的高效可持续发展。

关键词:稻田生态系统; 养分循环; 可持续生产力; 土壤肥力

中图分类号:S131.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2004)06-1041-05

Effects of Nutrient Recycling on Soil Fertility and Sustainable Rice Production

WANG Kai-rong¹, LIU Xin¹, ZHOU Wei-jun¹, XIE Xiao-li¹, R. J. Buresh²

(1. Institute of Subtropical Agriculture, the Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 2. International Rice Research Institute, DAPO 7777, Metro Manila, the Philippines)

Abstract: Based on a twelve-year field experiment, the effects of organic nutrient recycling use on soil fertility and sustainable rice production under various formulas of chemical fertilizer NPK application were studied in the double-rice cropping region of Subtropical China. The main results were as follows: (1) It was essential to apply chemical fertilizer for high yield of rice production, and the rice yield kept around $5.6 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ under no fertilizer application, while with applying fertilizer N ($229 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), N-P ($39 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), and N-P-K ($162 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$), the yield raised by 6.6, 7.9 and $9.0 \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$, respectively. Organic nutrient recycling use could increase rice yield further, but the yielding benefit reduced with the increase of NPK combinative application; (2) Under no fertilizer application or applying N alone, the coefficients of annual variation of grain yield significantly reduced with the recycling of organic nutrient, which showed no further reduces under the application of NP or NPK, i. e., the stability of rice yield did not significantly improve with the application of NP or NPK. These implied that it was essential to use fertilizers with optimum application rate and balanced nutrients of NPK for a high and stable rice yield, no matter whether the nutrients came from organic manure or inorganic fertilizer resources. The fertilization systems affected the yield stability of early rice stronger than that of later rice in the experiment and application of fertilizer P was most important for the early rice to gain a high-and-stable grain yield; (3) Little declining of soil organic matter (SOM) content was found with no fertilizer application for continually 12 years, while SOM content increased unstably with chemical N, NP, and NPK application. The recycling use of organic nutrients significantly increased SOM content and further improved the bio-availability of soil NPK nutrients. Moreover, through recycling use of the organic nutrients in the field system, the high input rate of chemical fertilizers could be effectively reduced without reducing grain yield, and, therefore, the environmental pollution stresses alleviated and the high efficient and sustainable rice production were realized.

Keywords: rice ecosystem; nutrient recycling; soil fertility; sustainable productivity

中国农业的发展,从养分利用角度来看,大致可以分为2个阶段。第一阶段是20世纪50年代以前以自然肥料为主的有机农业阶段^[1];第二阶段始于20世纪50年代中期,以化学氮肥大面积推广应用为标志,随后是60年代磷肥在我国南方各地的应用和70年代后期钾肥的推广。这种NPK化肥在传统有机农业施肥模式基础上的相继迭加便形成了不同时期的有机-无机相结合的农业施肥模式^[2,3]。从20世纪80年代开始,随着中国经济的高速发展,农业劳动力向城镇大批转移,农村积肥和施用有机肥的传统逐渐被放弃,化肥用量(特别是N肥)的大量增长与传统农家肥用量的不断减少,使一些地区相继出现了土壤肥力退化和化肥生产效率降低的现象^[2,4],特别是90年代以来,作物秸秆被大量废弃或野外焚烧带来的环境问题更引起了政府的关注。能否实施秸秆还田利用,既关系到解决中国秸秆的环境污染问题,也关系到农村养分资源的循环利用和农业可持续发展的技术途径问题^[5]。

1 试验地点与设计方

试验自1990年开始,在中国科学院桃源农业生态试验站进行。试验田土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,土壤的基础肥力性状为:有机质 $26.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全N $1.88\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效P $16.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,速效K $74.3\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,CEC $9.1\text{ cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.41。试验共设9个处理:①不施肥,收获物移出系统(CK);②不施化

肥,收获物中养分循环利用(CK-M);③施化肥N,收获物移出系统(N);④在施化肥N基础上,收获物中养分循环利用(N-M);⑤施化肥NP,收获物移出系统(NP);⑥在施化肥NP基础上,收获物中养分循环利用(NP-M);⑦施化肥NPK,收获物移出系统(NPK);⑧在施化肥NPK基础上,收获物中养分循环利用(NPK-M);⑨ $2/3\text{NP}+1/3\text{K}+1/2$ 秸秆(NPK-M2)。

供试化肥品种分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。化肥年施用量1990-1996年为N $262.5\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,P $39.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,K $137.0\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$;从1997年开始调整为N $182.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,P $39.3\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$,K: $197.2\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。无“M”的处理(处理①、③、⑤和⑦)在1993年前冬季种植紫云英,春季耕田前将紫云英平地割除并移出小区。1994年冬开始不再种植紫云英,板田过冬。有“M”的处理(处理②、④、⑥和⑧)冬季种植紫云英,春季耕田时将紫云英翻压入泥作早稻基肥;早、晚稻秸秆全部直接还田;生产稻谷的80%(1994年以后改为50%)以及全部空瘪谷粉碎后作饲料喂猪,猪粪尿作来年早稻的基肥。设置处理⑨的意图是为了探讨在没有粪肥的情况下,通过种植固氮绿肥和部分秸秆还田、节省化肥投入并维持稻田生产力的可能性。选用半量秸秆还田是因为它不会严重妨碍翻耕和水稻栽插,农民易于接受。各处理1990—2001年间年均养分投入情况见表1。

表1 1990—2001年间各处理年均化肥投入和有机肥还田养分量($\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

Table 1 Annual nutrient input rates on average from different sources (1990—2001, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$)

处理	紫云英*			猪粪肥			稻草*			化肥			合计		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
CK-M	66.6	5.7	43.7	9.3	5.9	3.3	47.4	9.6	134.5	—	—	—	123.3	21.2	181.5
N	—	—	—	—	—	—	—	—	—	229.1	—	—	229.1	—	—
N-M	75.4	6.2	51.1	11.6	7.8	4.7	72.4	11.4	168.4	229.1	—	—	388.5	25.4	224.2
NP	—	—	—	—	—	—	—	—	—	229.1	39.3	—	229.1	39.3	—
NP-M	95.6	8.6	60.7	11.8	7.8	4.7	79.2	14.4	178.6	229.1	39.3	—	415.7	70.1	244.0
NPK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	229.1	39.3	162.1	229.1	39.3	162.1
NPK-M	93.6	9.4	74.0	13.2	9.1	5.3	84.8	17.2	226.7	229.1	39.3	162.1	420.7	75.0	468.1
NPK-M2	84.6	7.4	51.6	—	—	—	34.1	6.1	83.8	153.2	26.2	54.0	271.9	39.7	189.4

注:* 根茬养分未计算在内。

试验小区面积为 $4.1\text{ m}\times 8.1\text{ m}$,重复3次,随机区组排列。供试水稻品种选用当地大面积推广品种,早稻为常规稻,种植密度为 $13.3\text{ cm}\times 20.0\text{ cm}$;晚稻为杂交稻,密度为 $16.7\text{ cm}\times 23.3\text{ cm}$ 。为避免水稻品种在连续多年种植后发生种性退化而影响生产性能,试验每3年更新一次品种。稻谷产量按14%的水分

含量计算,生物量和秸秆产量按烘干重($85\text{ }^{\circ}\text{C}$)计算。土壤肥力指标测定方法参见《土壤农化常规分析》^[6]。

2 结果与讨论

2.1 不同施肥模式对水稻产量及其稳产性的影响

2.1.1 稻谷产量

9 种施肥模式的年均稻谷产量可分为 6 个水平档, NPK - M 施肥模式的产量最高; NP - M 和 N - M 模式次之; 无肥 (CK) 处理产量最低; NPK - M2 和 NPK 模式的产量介于二、三档之间, 与 NP - M 和 N - M 模式无显著差异, 见表 2。早稻对施肥处理的反应比晚稻敏感, 早稻处理间的产量变异在更大程度上影响着全年产量的走向。这是因为粪肥和紫云英都是作为早稻的基肥, 使得早稻期间各处理间的养分供给差异明显大于晚稻。值得注意的是, 在双季稻 - 绿肥耕作制度中, 由于紫云英提供了水稻额外的 N 素营养, 半量稻草还田又使部分 K 和 P 素得到循环利用, 因此, 即使处理 9(NPK - M2) 与处理 7(NPK) 比减少了 1/3 化学 NP 肥和 2/3 化学 K 肥的施用, 水稻的生产性能并没有受到任何影响。

表 2 1990—2001 年稻谷产量统计 (kg · hm⁻²)

Table 2 Rice yields under different fertilization models (1990—2001)

处理	早稻		晚稻		全年
CK	2 342	f	3 208	d	5 550 f
CK - M	4 301	bc	4 386	b	8 687 c
N	2 684	e	3 887	c	6 571 e
N - M	4 414	bc	4 935	a	9 348 b
NP	3 737	d	4 180	b	7 917 d
NP - M	4 545	b	4 916	a	9 461 b
NPK	4 195	c	4 808	a	9 004 bc
NPK - M	4 907	a	5 072	a	9 979 a
NPK - M2	4 283	bc	4 900	a	9183 bc

根据国际水稻研究所 (IRRI) 的肥料试验网结果, 在热带和亚热带亚洲国家, 在最佳施肥条件下, 每生产 1 t 稻谷, 植株地上部分吸收的 N 为 15 ~ 24 kg, P 为 2 ~ 11 kg, K 为 16 ~ 50 kg^[7]。本试验中, 每生产 1t

稻谷, 植株地上部分吸收的 N 为 16.6 ~ 23.4 kg, 平均 20.2 kg; 吸收的 P 为 3.6 ~ 5.4 kg, 平均 4.3 kg; 吸收的 K 为 15.7 ~ 26.2 kg, 平均 19.7 kg。其中养分循环利用模式处理每生产 1 t 稻谷所吸收的 NPK 量明显高于无循环的施肥处理。如在 NPK 平衡施肥 (处理 7) 条件下, 生产 1 t 稻谷吸收的 NPK 量分别为 19.3、4.5 和 20.5 kg; NPK + 循环 (处理 8) 分别为 23.2、5.4 和 26.2 kg; 而 NPK 减量 + 半量稻草还田 (处理 9) 分别为 19.9、4.3 和 18.3 kg, 与 NPK 平衡施肥处理非常相近。

虽然在本试验中不同化肥基础上的有机养分循环利用均表现出了产量增益效应, 但是随着 NPK 配合程度的提高, 有机养分循环利用的增产效益呈明显下降趋势。在无化肥投入情况下, 有机养分循环的年产量增益为 3 137 kg · hm⁻²; 投入化肥 N 之后, 有机养分循环的产量增益降为 2 777 kg · hm⁻²; 施 NP 化肥基础上的有机养分循环的产量增益进一步降低到了 1 544 kg · hm⁻²; 而施 NPK 化肥之后的有机养分循环产量增益只有 975 kg · hm⁻²。ANOVA 分析结果表明, 在不施化肥或只施 N 肥基础上的养分循环产量增益极显著地大于施化肥 NP 或 NPK 基础上的养分循环产量增益, 而施化肥 N 与不施化肥之间、施化肥 NPK 与施化肥 NP 之间的有机养分循环的产量增益均未达到统计学上的显著差异水平。

2. 1. 2 产量的稳定性

产量的稳产性是评价农田生态系统功能的指标之一。从图 1 可知, 在 12 a 试验期间, 无论化肥施用和养分循环利用与否, 水稻产量年际之间的波动都比较明显, 这无疑主要与各年度的气候环境变异有关。此外, 供试品种的属性也会影响产量的波动, 如 1993—

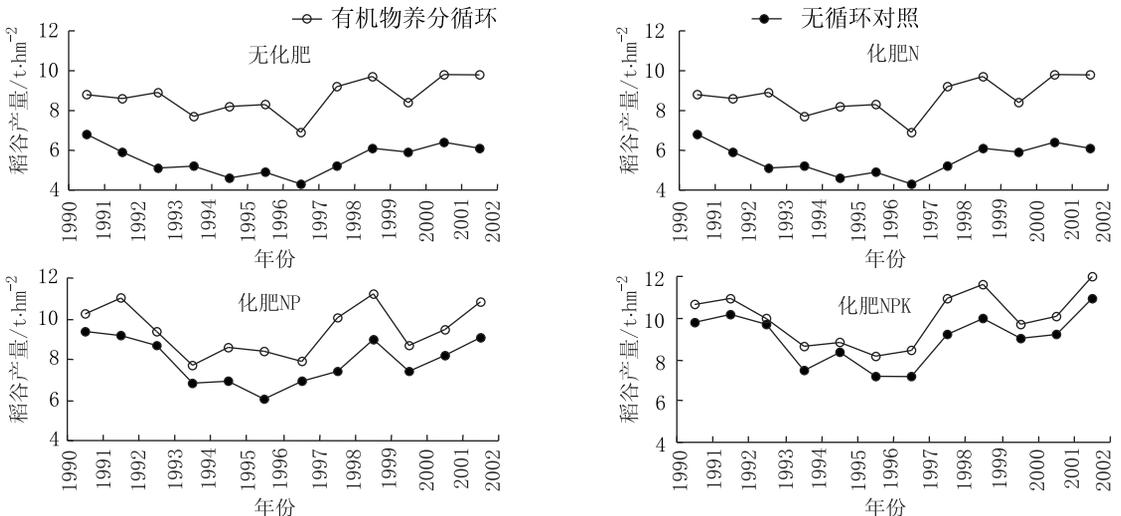


图 1 有机物养分循环与非循环利用情况下的水稻产量变化趋势 (1990—2001)

Figure 1 Changes of rice yield with or without organic nutrients recycling use under different treatments of fertilizer application (1999 - 2001)

1996年的产量降低就可能与试验选用了米质优良但产量水平较低、抗纹枯病能力较弱的水稻品种有关。试验从1997年开始调减了化肥N用量,增加K肥施用,同时采用高产抗病型水稻品种之后,产量水平又明显得到回升。

施肥模式对水稻稳产性影响的实质主要表现在养分的均衡供应方面。表3为各处理12a稻谷产量的年际变异系数,可以从整体上评价不同施肥模式的稳产效应。不难发现,当养分缺乏(CK)或施肥不均衡(如只施N肥)的情况下,有机物循环利用能够显著地降低产量的年际变异系数,即提高水稻的稳产性能;而在化肥配施(如NP和NPK配施)情况下,有机物循环利用就不会进一步提高水稻的稳产性,充分说明全面适量地提供水稻所需要的营养物质是水稻稳产的物质基础,单一养分过高或缺乏都会影响水稻的稳产性^[8,9]。从表3结果还可以看出,在亚热带红壤稻田上,早稻的稳产性受施肥,特别是磷肥施用的影响较大,即使在土壤Olsen-P含量较高的情况下,施用磷肥仍是降低早稻产量波动、提高稳产性能的重要条件。早稻对肥料P依赖性较大的原因可能与禾苗生长前期泥温相对较低而Eh较高、土壤P释放速率较慢有关。

2.2 不同施肥模式对土壤有机质和矿质养分积累的影响

2.2.1 有机质含量

虽然淹水环境是有利于有机物的分解还是积累在学术界仍存在争议^[10],但稻田土壤有机质含量从整体上讲要高于旱地则是不争的事实。在本试验中,

表4 12a不同施肥处理后的土壤有机质与NPK养分含量状况(2002年4月)

Table 4 Contents of SOM and NPK in soils (0~20 cm) adopted different fertilization models for 12 years (Covariance analysis) (April, 2002)

处理	有机质/g·kg ⁻¹		全N/g·kg ⁻¹		速效P/mg·kg ⁻¹		速效K/mg·kg ⁻¹	
CK	26.3	d	1.77	c	6.6	e	55.6	d
CK-M	31.8	bc	2.34	a	8.6	e	91.1	bc
N	27.1	d	1.80	c	6.1	e	51.2	d
N-M	34.4	ab	2.36	a	9.9	de	78.9	cd
NP	29.1	cd	1.99	bc	21.9	b	63.9	cd
NP-M	36.4	a	2.46	a	33.2	a	75.8	cd
NPK	29.6	cd	1.87	c	18.0	bc	136.0	a
NPK-M	37.3	a	2.41	a	33.5	a	138.1	ab
NPK-M2	33.4	abc	2.28	ab	13.8	cd	71.1	cd

经过12a不同施肥处理之后,土壤NPK养分含量发生了显著性分异。连续12a不施肥处理,土壤全N降低了0.11g·kg⁻¹,年下降速率0.49%;速效P降低9.6mg·kg⁻¹,年下降速率达4.9%;速效K含量降低18.7mg·kg⁻¹,年下降速率2.1%。土壤NPK

表3 1990—2001年稻谷产量变异系数差异显著性分析
Table 3 Effects of fertilization model on the stability (CV % value) of rice yield (1990—2001)

处理	早稻		晚稻		全年	
CK	21.7	b	25.3	bc	14.6	b
CK-M	16.2	cd	21.3	d	10.7	c
N	34.2	a	25.6	ab	21.7	a
N-M	16.6	bcd	22.5	cd	11.5	c
NP	13.1	d	26.5	ab	14.5	b
NP-M	17.1	bed	22.2	cd	13.1	bc
NPK	14.5	cd	26.3	ab	14.7	b
NPK-M	18.6	bc	28.6	a	13.4	bc
NPK-M2	12.9	d	23.5	bed	12.4	bc

注:变异系数=标准误差÷平均产量×100

即使12年不施任何肥料并将稻草移走(CK处理),土壤有机质的含量与试验之前相比也只有轻微的下降(0.3g·kg⁻¹),年下降速率仅为0.09%。国际水稻研究所(IRRI)的长期试验结果也证明,在淹水植稻环境下,土壤有机质相对易于积累^[11]。排除厌氧环境有机质矿化速率降低这一具有争议的论点不提,水稻收割时留在土壤中的根茬无疑对维持稻田有机质含量水平发挥了重要作用。据本试验田间测定,在不施肥情况下,水稻根茬年均还田量(干物重)为1340kg·hm⁻²以上。随着化肥的施用,特别是有机物循环利用,水稻产量水平逐步提高,根茬还田量也明显增加,在化肥配施与有机物循环利用情况下,根茬还田量可达2060kg·hm⁻²以上。这样就使得施化肥的各处理都能够保持土壤有机质含量的稳定和提高,而有机物循环利用更使土壤有机质含量得到了显著增加,见表4。

2.2.2 矿质养分含量

养分含量下降的速率要明显大于土壤有机质的降低速率。值得注意的是,无论单施N肥或N与P、K肥配施,对土壤全N含量均没有产生明显影响,说明化肥N在土壤中的保存率较低。有机物循环利用各处理的土壤全N含量则明显提高,部分达到了显著性差异

水平。土壤速效 P 和速效 K 含量也都随有机物的循环利用而显著提高,除了 NPK - M2 处理,由于化肥 P 和 K 的施用量比正常分别减少了 33.3% 和 66.7%,而且只有 50% 稻草还田,土壤速效 PK 均有不同程度的降低。有机物循环利用对土壤矿质养分积累的贡献,除了向土壤中直接补充养分物质之外,也可能与秸秆、猪粪和绿肥等有机物料还田之后降低了土壤对矿质养分,特别是 K 和 P 的吸附,增加其解吸率,进而提高土壤 P 和 K 的有效性有关^[12]。

3 结论

适宜的施肥模式对保持土壤肥力和水稻持续生产力具有重要作用。施用化肥是实现水稻高产的必要条件,NPK 配合施用既能保障水稻的高产和稳产,也能促进土壤有机质含量和土壤供肥能力的提高。然而,稻田种植绿肥,化肥与有机物养分循环利用相结合,不仅能够进一步提高水稻产量水平,而且能显著改善土壤肥力性状。通过有机物养分资源的循环利用,可有效降低当前化肥养分的高投入水平,减轻环境污染压力,实现农田生态系统生产力的高效可持续发展^[13]。

参考文献:

- [1] 顾荣申,文启孝. 中国稻田绿肥种植与利用[A]. 见:水稻土学术研讨会论文集[C]. 北京:科学出版社,1980. 207 - 209.
- [2] 林葆,李家康. 我国化肥的肥效及其提高的途径[J]. 土壤学

报,1989,26(3): 273 - 279.

- [3] 沈善敏,刘鸿翔,王凯荣,等. 农业生态系统养分循环再利用作物产量增益的地理分异[J]. 应用生态学报,1998,9(4): 379 - 385.
- [4] 张士贤. 中国土地资源保护与平衡施肥对策[A]. 见:施肥与环境学术讨论会论文集[C]. 北京:中国农业科技出版社,1994. 1 - 10.
- [5] 刘巽浩,高旺盛,朱文栅(编). 秸秆还田的机理与技术模式[M]. 北京:中国农业出版社,2001.
- [6] 中国土壤学会农业化学专业委员会(编). 土壤农化常规分析[M]. 北京:科学出版社,1984.
- [7] Witt C, Dobermann A, Abdulrachman S, et al. Internal nutrient efficiencies of irrigated lowland rice in tropical and subtropical Asia[J]. *Field Crops Research*, 1999, 63: 113 - 138.
- [8] 刘杏兰,高宗,刘存寿,司立征. 有机 - 无机肥配施的增产效应及对土壤肥力影响的定位研究[J]. 土壤学报,1996,33(2): 138 - 147.
- [9] Sharma A R and Mittra B N. Effect of combination of organic materials and nitrogen fertilizer on growth, yield and nitrogen uptake of rice[J]. *Journal Agricultural Science, Cambridge*, 1988, 111: 495 - 501.
- [10] 黄东迈,朱培立,王志明. 旱地和水田有机碳分解速率的探讨与质疑[J]. 土壤学报,1998,35: 482 - 492.
- [11] Cassman KG, De Datta SK, Olk DC, et al. Yield decline and the nitrogen economy of long - term experiments on continuous, irrigation rice systems in the tropics[A]. In: Lal R and Stewart BA (eds). *Soil Management: Experimental Basis for Sustainability and Environmental Quality*[C], Lewis/CRC Publishers, Boca Raton, FL. 1995. 181 - 222.
- [12] 李学垣,王启发,徐凤琳. 稻草还田对土壤钾磷锌的吸附 - 解吸及其有效性的影响[J]. 华中农业大学学报,2000,19: 227 - 232.
- [13] 李峰,王凯荣. 红壤丘陵区稻田不同施肥模式对水环境影响的监测评价[J]. 农业环境科学学报,2004,23: 67 - 71.