

长期不同养分投入对土壤养分和 水稻生产持续性的影响

尹春梅^{1,2}, 谢小立^{1,2}, 钟石仑³

(1. 中国科学院亚热带农业生态研究所, 长沙 410125; 2. CERN 桃源农田生态系统国家科学观测研究站, 桃源 415700;
3. 湖南省桃江县农业局, 桃江 413400)

摘要:以中国科学院桃源农业生态试验站 15a 长期田间定位试验为研究对象, 分析了不同养分投入对稻田土壤养分和水稻产量可持续性的影响。结果表明, 化肥与系统内循环的有机物料循环的肥力效力和产量效应基本一致, 有机物料循环更有利于土壤有机质和氮素的积累; 在不同养分投入下, 土壤耕层有机质和全氮均呈上升趋势, 年均增长率分别为 1.5% ~ 5.8% 和 2.5% ~ 9.4%; 与试验前相比, 不同养分投入耕层磷素变动幅度在 -18.3% 到 30% 之间, 钾素养分有所亏缺, 下降幅度在 8.1% ~ 22.6% 之间; 通过可持续性指数的分析得出, 土壤 N 素养分的可持续性对化肥的依赖性较大, 而 P、K 养分的可持续性则对有机肥的依赖性更高。稻田生态系统具有良好的自维持能力, 系统内有机物循环有利于提高稻谷产量的稳定性和可持续性。

关键词:养分投入; 土壤肥力; 产量; 可持续性指数

文章编号: 1000-0933(2009)06-3059-07 中图分类号: Q142, S314 文献标识码: A

Effect of different fertilizer applications on sustainable soil fertility and rice production in red soil paddy ecosystem

YIN Chun-Mei^{1,2}, XIE Xiao-Li^{1,2}, ZHONG Shi-Lun³

1 Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China

2 Taoyuan Experimental Station of Agriculture Ecosystem, CERN, Taoyuan 415700, China

3 Agricultural Bureau of Taojiang County, Taojiang 413400, China

Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(6): 3059 ~ 3065.

Abstract: Based on a long-term field experiment started in 1990 in Taoyuan Experimental Station of Agriculture Ecosystem-CERN, the effects of fertilization on the fertility and productivity of paddy soil were analyzed, so as to discuss the sustainability of ecosystem of double-cropped paddy field in subtropical red earth region. Results showed that: chemical fertilizer input and recycling of organic matter in the ecosystem had the similar effects on soil fertility and system productivity. Organic matter recycling was better for the accumulation of soil organic matter (SOM) and total nitrogen (N). SOM and total N under different nutrient inputs presented an assurgent direction in cultivated soil layer (0–20cm) and annual amplitude varied from 1.5%–5.8% and 2.5%–9.4%, respectively. Contrast to previous experiment, nutrient phosphorus (P) content in soil cultivated layer under fertilization regime varied from -18.3% to 30%, potassium (K) was exhausting which decreased from 8.1% to 22.6%. The sustainability index indicated that, the sustainability of soil N was much more dependent on chemical fertilizer input, while P and K were relied on organic fertilizer. Paddy ecosystem has a strong ability of self-maintenance and the recycling of organic matter within the ecosystem could be benefit to the stability and sustainability of the system.

基金项目:中国科学院知识创新工程重要方向资助项目(KZCX2-YW-423); 国家重点基础研究发展计划资助项目(2005CB121106)

收稿日期: 2008-03-25; 修订日期: 2008-05-13

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: cmyin@isa.ac.cn

Key Words: nutrients input; soil fertility; grain yield; sustainability index

我国是世界上水稻的主产区,水稻产量居世界第一,2001年我国稻谷产量占全球总产的31.0%,水稻播种面积为 $28.59 \times 10^6 \text{ hm}^2$,占全球水稻播种总面积的18.9%,仅次于印度(29.4%)^[1]。稻田生态系统作为中国主要的农田生态系统,其生产力的高低及稳定性直接影响我国的粮食安全。在过去20多年间,由于高产水稻品种的采用和化肥的使用与方法革新,水稻产量大幅度提升^[2],但不合理施肥引起的高产稻田土壤退化问题也多有报道^[3,4]。大量研究证实^[5,6],化肥具有有效养分含量高、易施用、见效快等特点,有机肥具有肥效长、能够提高土壤肥力和作物抗逆性等特点,它们各有优缺点,不可替代,而二者配合施用是一条很好的途径,也是今后农田养分投入的主要发展趋势。作物秸秆利用是现代集约持续农业的一项重要技术措施^[7]。前人对于特定农业生态系统养分投入影响的研究,往往限于其对土壤肥力引起的具体变化或增产效果,而较少将之与农业的可持续生产联系起来。

双季水稻是湘南红壤丘陵区农业结构的主体,红壤稻田的养分问题一直备受关注^[8-10]。本文通过长期定位试验不仅分析了不同养分投入下红壤稻田生态系统的土壤肥力和系统生产力的变化趋势,而且探讨了红壤稻田生态系统土壤养分与产量持续性对养分投入的响应,从而为稻田生态系统持续高效利用提供科学依据。

1 试验设计与方法

1.1 试验设计

试验在中国科学院桃源农业生态站生态系统综合观测试验场(东经 $111^{\circ}33'$,北纬 $28^{\circ}55'$)进行,海拔高度89m,年均气温 16.5°C ,降水量 1447.9mm ,日照 1531.4h ,太阳辐射 $322.6\text{kJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ 。供试土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土,土壤类型为青隔黄泥,土地利用方式从1990年至今每年都是早稻-晚稻和早稻-晚稻-绿肥的种植制度。试验田基础肥力性状为:有机质 $23.2\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全N $1.39\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全P $0.60\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全K $14.9\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效N $53.4\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效P $14.7\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,有效K $67.7\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,pH 5.74 ,土壤容重 $1.25\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$ 。试验处理分别为:

①无肥,收获产品全部移除系统(CK);②无肥,收获产品中的养分循环利用,简称“循环”(CK+C);③施化学氮、磷、钾肥(NPK);④化学氮、磷、钾肥+循环(NPK+C)。①与②、③与④分别为有机物料循环的配对处理。

供试化肥为尿素($\text{N } 450.0\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)、过磷酸钙($\text{P } 52.4\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)和氯化钾($\text{K } 498.1\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)。施用量为 $\text{N } 219.7\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{P } 39.3\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, $\text{K } 169.1\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。有机物循环是将收获稻谷的80%(1994年后减为50%)及全部空瘪谷喂猪,猪粪尿还田,稻草和秋收后种植的绿肥收获后直接还田。折算的肥料循环量分别为,处理C: $\text{N } 137.0\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P } 28.6\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $\text{K } 181.5\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ (K);处理NPK+C: $\text{N } 208.6\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 、 $\text{P } 45.3\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 和 $\text{K } 309.3\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

每处理重复3次,小区面积 $4.1\text{m} \times 8.1\text{m}$,随机区组排列。小区间用水泥埂隔开,地下埋深0.5m,高出地表0.2m。农事耕作和水分管理按当地常规实施。水稻成熟期分小区单打、单晒,稻谷产量按14%的水分含量计算。每年4月水稻栽插前取耕层(0~20cm)土样测定土壤肥力,各土壤肥力指标测定方法参见《土壤理化分析与剖面描述》^[11]。

1.2 数据处理方法

采用统计软件SPSS11.5进行数据的分析处理,Duncan's新复极差法作差异显著性分析。

2 结果与分析

2.1 不同养分投入处理下土壤肥力变化

2.1.1 土壤有机质变化

土壤有机质作为衡量土壤肥力的一个重要指标,其研究一直十分活跃。而且,从大多数研究结果来看,土

壤有机质的消长,对土壤肥力的高低是具有一定的决定作用的^[12]。

以时间为尺度分析,各处理土壤有机质(SOM)含量呈增长趋势(图1)。这可能与稻田 pH 值的变化情况有关。据本试验测定,随着水稻连续种植年限的增长,稻田 pH 值呈逐年下降趋势,各处理 pH 年均下降率分别为:CK 5.57%、CK + C 4.50%、NPK 5.93% 和 NPK + C 5.10%,处理之间 pH 值无显著差异。S. Nardi^[13]等的研究表明,土壤 pH 值能够加快土壤有机质库的周转过程,随着 pH 值降低,土壤酸性的增强,能够加快土壤中有机体的分解,充实土壤有机养分库,同时,也能够加快土壤有机质的矿化,释放铵态氮等营养成分。国际水稻研究所的长期试验结果则表示,在淹水植稻环境下,土壤有机质相对易于积累^[14]。综合本试验的研究结果,可以看出,pH 值降低对稻田有机质的积累作用大于矿化。

由于测定时间为 4 月份,前季稻草和绿肥已经还田,1990 年循环和无循环处理间有机质含量已经略有差异。处理 15a 后,CK 处理和 NPK 处理 SOM 含量分别较试验前增长了 $5.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $7.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均增长率分别为 1.5%、2.2%;而有机物循环的 CK + C 和 NPK + C 处理分别增长了 $18.4 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $19.0 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均增长率分别 5.7%、5.8%。从处理间差异来看,SOM 含量可分为两个水平档。不施任何肥料与仅施化学 NPK 肥的处理为一档,单独使用有机物料循环与化学 NPK 肥配合有机物料循环处理为一档,两对配对处理间 SOM 的差异呈逐渐增大趋势(图 1),第 3 个 4a 两个水平档差异达统计显著水平。差异结果表明,有机物循环可以显著提高土壤有机质含量,而是否施用化肥则与土壤有机质含量的变化无显著相关。

2.1.2 土壤矿质养分含量变化(NPK)

经过 15a 的试验处理,土壤全量 NPK 养分产生了一定的分异(表 1)。土壤全氮和有效氮总体变化趋势与土壤有机质一致,均有不同程度的提高。土壤全 N 含量增加最多的是 CK + C,增加量为 $1.82 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均增长率 9.4%,其含量显著高于两个无有机物循环的处理(CK 和 NPK)。即使不施任何肥料并将稻草移走的 CK 处理土壤全 N 含量与试验前相比也有一定的增长,增长量为 $0.48 \text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,年均增长率 2.5%。

表 1 不同处理 15a 后土壤 NPK 养分状况(2004 年 4 月)

处理 Treatments	N		P		K	
	全氮 Total N ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效氮 Effective N ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全磷 Total P ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效磷 Effective P ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	全钾 Total K ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	有效钾 Effective K ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)
CK	1.87c	44.95a	0.42c	4.6d	12.42b	41.17c
CK + C	3.21a	45.02a	0.50c	6.48c	12.38b	73.49b
NPK	1.97bc	46.87a	0.61b	13.98b	11.53b	62.28bc
NPK + C	2.69ab	53.54a	0.71a	24.56a	13.70a	125.61a

表中不同小写字母表示同一列数据在 0.05 水平上的显著差异 Different lowercases in table represent significant differences by 0.05 levels

与试验前相比,CK 和 CK + C 处理的土壤全 P 分别下降了 30.0% 和 16.7%;而 NPK 处理与 NPK + C 处理则分别提高了 1.7% 和 18.3%。由于 1993~1996 年间的品种原因,水稻低产这期间,由于收获而从系统中带走的 P 素减少,使土壤耕层全 P 呈现增长态势,而更换水稻品种,产量提升以后,各处理土壤全 P 均呈递减趋势。尽管如此,磷素投入水平相对较高的 NPK 与 NPK + C 处理较试验前土壤全 P 仍有一定增加。土壤有效 P 与全 P 的变化趋势相似,但差异更明显。经过 15a 的试验处理后,不同的养分投入之间土壤有效 P 差异均达

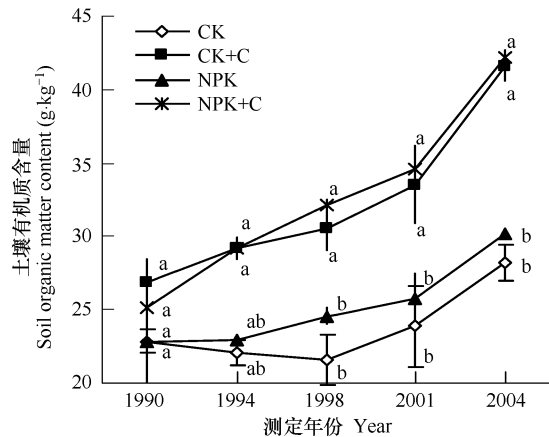


图 1 各处理土壤有机质含量变化情况

Fig. 1 Changes of soil organic matter under different treatment of fertilizer application

到统计显著水平。

土壤全 K 与处理前相比,4 处理均有不同程度的下降,下降最多的是 NPK 处理,降幅达到 22.6%,其它 3 个处理的土壤全 K 降幅分别为 CK 16.6%、CK + C 16.91% 和 NPK + C 8.1%。这与吴建富等人的研究结果相似^[15],一是由于我国南方水稻土上是常见的施钾量事实上并未达到足以补充钾素输出的程度导致土壤 K 素含量呈下降趋势;另一方面是由于各处理作物产量的差异,处理 NPK + C > NPK、CK + C > CK,所以携出的钾量不同,产生下降幅度上的差异;另外化学钾肥更易于淋失。土壤中有效 K 素养分的多少与钾素投入量成正比,钾素投入水平最高的 NPK + C 处理分别为 NPK、CK + C、CK 处理有效钾含量的 1.71、2.02、3.05 倍。

2.2 不同养分投入与稻谷产量

15a 的试验结果表明,4 处理年均稻谷产量水平排序为 NPK + C > NPK > CK + C > CK。供试处理水稻产量波动的总体趋势是由气候环境变化、技术水平、供试品种属性等方面决定的。由图 2 可看出,除 1993 ~ 1996 年间的品种原因,从时间上来看,4 种处理水稻生产力水平基本维持在一定水平波动,没有明显的上升或下降趋势,且 4 种试验处理的产量变化趋势一致,这一点与国外的长期试验结果略有不同^[16-18]。

在同等变化趋势下,处理间的产量差异则可以说明不同处理方式对稻田生态系统生产力的影响。经过统计分析,CK 处理 15a 的平均年产量为 $(5.6 \pm 0.7) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,显著低于另外 3 个处理,试验 15a 间的稻谷产量年际变异系数与施 NPK 肥的处理相同,均为 13.8%,NPK + C 处理最低,为 10.1%。

在无肥的基础上,增加系统有机物料循环可提高稻谷产量 $(3.1 \pm 0.5) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,化肥投入的增产量为 $(3.5 \pm 0.8) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$,化肥与有机物料投入系统后增产效果相近,有机物料循环有助于提高稻谷产量的稳定性。在施用化肥的基础上,增加系统有机物料循环的增产效果则为 $(0.89 \pm 0.26) \text{ t} \cdot \text{hm}^{-2}$ 。

2.3 养分投产比分析

CK 处理没有肥料投入,平均每年产出稻谷和秸秆均移出系统,仍然能长期维持一定的产量水平,这是由土壤自身缓慢的养分释放、土壤中的生物固氮以及大气干湿沉降中养分所能维持的近乎最低限的产量,国外一些长期肥力试验的结果也表明,连续百年以上不施肥的农田也可维持 $1 \sim 3 \text{ t} \cdot \text{km}^{-2}$ 谷物产量^[9]。NPK 处理的肥料投入量略高于 CK + C 处理的循环量,但二者产量无显著差异,而 CK + C 处理养分 N、P、K 的投产比分别为 NPK 处理的 1.57、1.33 倍和 0.88 倍。尽管 NPK + C 处理产量显著高于其它 3 处理,但从养分的投产比方面来看,NPK + C 处理每千克 N 肥的稻谷产量仅为 CK + C 处理的 36.2%,P 肥为 38.5%,K 肥为 43.3%。也就是说,在不施肥的基础上,有机肥的投产比较无机肥更高。

2.4 不同养分投入下土壤养分及稻谷产量的可持续性分析

袁志清认为^[19],发挥农业系统内自然再生产过程的自养性和自控性的基础上,再从农业系统外部增加生物工业物质技术的投放是现代持续农业体系的一个重要特征。现代农业可持续发展的重要基础就是维持和不断提高土壤养分和有机质的水平,即土壤养分可持续性^[20]。土壤养分可持续性与作物营养和土壤管理关系密切。

土壤养分可持续性指数(SIN),是衡量土壤养分的收支平衡及其可持续性的一个重要数量指标,能够对土壤肥力的变化进行动态监测和及时评价^[20-22]。根据本文研究结果(表 3),各处理间养分可持续指数排序,N 素:NPK + C > CK + C > NPK;P 素:NPK + C > NPK > CK + C;K 素:NPK + C > CK + C > NPK。可以看出,有机氮的投入可以提高土壤氮素的可持续性。同时表明向土壤中投入足量的养分是养分可持续发展的保障,而

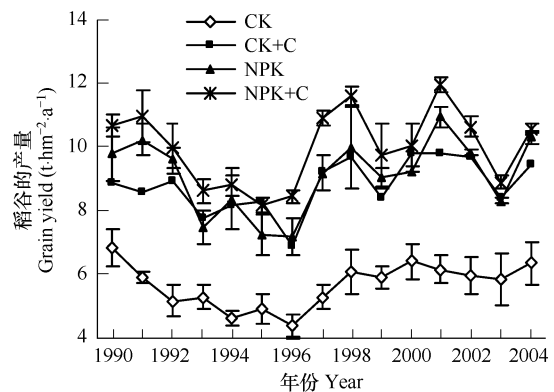


图2 稻谷年际产量动态

Fig. 2 Annual dynamic of grain yield under different treatment of fertilizer application after 15 years

有机肥与化肥适当比例配施,更有利于养分的可持续发展。

表 2 各处理 NPK 养分投入产出比
Table 2 Nutrient input vs. Grain yield

处理 Treatments	养分投入 Nutrient input (kg·hm ⁻²)			投产比(稻谷:养分投入)(%) Ratio(Grain yield; nutrient input) (%)		
	N	P	K	N	P	K
CK	-	-	-	-	-	-
CK + C	137	28.6	181.5	64.1	307	48.4
NPK	222.4	39.3	167.1	40.9	231.4	54.4
NPK + C	431	84.6	476.4	23.2	118.1	21

表 3 不同处理 15a 后土壤 NPK 养分及产量可持续性指数分析
Table 3 Sustainability index of nutrients under different treatment of fertilizer application after 15 years

处理 Treatments	土壤养分可持续性指数 Sustainability index of nutrient			产量可持续性指数 Sustainability index of grain yield
	N	P	K	
CK	-	-	-	0.73
CK + C	0.59	0.21	0.57	0.81
NPK	0.12	0.71	0.52	0.72
NPK + C	0.61	1.41	0.89	0.74

产量可持续性指数(SYI)是测定系统是否能持续生产的一个可靠参数,SYI 越大系统的可持续性越好,其计算公式为^[23,24]:

$$SYI = (\bar{Y} - \sigma_{n-1}) / Y_{\max}$$

式中, \bar{Y} 为平均产量, σ_{n-1} 为标准差, Y_{\max} 为最高产量。年度之间产量标准方差和变异系数表示年度之间产量变异程度和稳定状况,在耕作管理、施肥和作物品种相同的情况下,年度产量变异主要来自气候因子和土壤肥力变化^[25]。本试验各处理产量可持续指数(表 3)排序为:NPK < CK < NPK + C < CK + C;产量年际变异系数排列顺序为:CK < NPK + C < CK + C = NPK。结果表明,红壤稻田无肥处理的稻谷产量多年稳定,与其它处理相比年际变异系数最小,可持续性甚至高于 NPK 处理;仅使用有机物料循环的 CK + C 产量可持续性居于各处理之首,有机物料循环对稻谷产量的可持续性具有明显的积极作用。而 NPK 处理变异系数最大,产量可持续性指数最小,也就是说单纯施用化肥不利于稻谷产量的稳定性与持续性。从追求高产、优质、高效、低耗的目标出发,有机物料循环与化肥的配合使用无疑是现代农业的最佳选择。

3 结论

15a 的长期定位试验发现,无论从对土壤养分还是系统生产力方面的影响来看,有机物料循环与化学 NPK 肥的效力都基本一致,二者的投入均能提高稻田生态系统的产量水平,维持水稻的持续高产,但从养分投入方式来看,有机物料投入比化学肥料投入方式的氮、磷元素投产比更高,且有机物料循环能够提高稻谷产量的稳定性和可持续性,是实现现代集约持续农业的有效措施。

根据本试验的结果,连年种稻土壤 pH 值呈下降趋势,并可促进有机质的积累;亚热带红壤区域稻田土壤有机质与全氮含量均呈增长趋势,肥料来源以及施肥量的不同仅表现在增长速度的不同,即使不施肥也不改变这一趋势;土壤磷、钾素的含量对外源肥料投入的依赖性较大,目前土壤耕层全量磷、钾养分库呈缩小态势。从土壤肥力的可持续方面来讲,化肥氮的投入可以提高土壤氮素的可持续性,而有机肥的投入则更利于土壤磷、钾养分可持续性的提高。

稻田生态系统具有良好的自维持能力。在目前的基础肥力条件下,收获产品移出系统并且无人为养分投入,稻田生态系统仍能够多年维持系统的稳定产出在一定水平;如果通过系统内部分产品的循环利用则能够维持较高的产量水平。值得注意的是,种植绿肥紫云英的生物固氮效果和土壤养分库其它方面的效应尚待

进一步探讨和研究。

Reference:

- [1] Chen H Z, Zhu D F. The rice production and ecosystem in the world. *Hybrid Rice*, 2003, 18(5):1—4.
- [2] Li J T, Zhang B. Paddy soil stability and mechanical properties as affected by long-term application of chemical fertilizer and animal manure in subtropical China. *Pedosphere*, 2007, 17(5): 568—579.
- [3] Yang Z P, Zhang Y Z, Zeng X B, *et al.* Degradation process of paddy soils with high yield caused by irrational fertilization. *Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences)*, 2007, 33(2): 226—232.
- [4] Zeng X B. The soil degradation and its solutions. *Science & Technology Review*, 1998(11): 34—35, 13.
- [5] Suo D R. Combined fertilization of chemical and organic fertilizers in a long-term position experiment. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2005, 23(2): 71—75.
- [6] Tang J W, Lin Z A, Xu J X, *et al.* Effect of organic manure and chemical fertilizer Oil soil nutrient. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2006(3): 44—47.
- [7] Liu C J. Sustainable agriculture of China in 21 century. *System sciences and comprehensive studies in agriculture*, 2004, 20(3): 202—204.
- [8] Zhou W J, Wang K R, Zhang G Y, *et al.* Some effects of inorganic fertilizer and recycled crop nutrients on soil nitrogen supply and paddy rice production in the red earth region of China. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(5): 914—921.
- [9] Zhou W J, Wang K R, Zhang G Y, *et al.* Effect of inorganic-organic fertilizer incorporation on productivity and soil fertility of rice cropping system in red soil area of China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2002, 35(9): 1109—1113.
- [10] Li Z P, Lin X X. Characteristics of organic materials decomposition in infertile red soils. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1224—1230.
- [11] Liu G S. ed. *Soil property analysis and profile description*. Beijing: Standard Press of China, 1996.
- [12] Zeng X B, Guan G F. The change of organic, nitrogen, phosphorus and potassium nutrients in the different cropping system. *Acta Ecologica Sinica*, 1999, 19(1): 90—95.
- [13] Nardi S, Morari F, Berti A, *et al.* Soil organic matter properties after 40 years of different use of organic and mineral fertilizer. *Europe Journal of Agronomy*, 2004 (21): 357—367.
- [14] Cassman K G, De Datta S K, Olk D C, *et al.* Yield decline and the nitrogen economy of long-term experiments on continuous, irrigation rice systems in the tropics. In: Lal R and Stewart B A eds. *Soil management: experimental basis for sustainability and environmental quality*, Lewis/RRX Publishers, Boca Raton, FL, 1995. 181—222.
- [15] Wu J F, Wang H H, Liu J R, *et al.* The characters of the profile distribution of nutrients in rice fields after long-term application of different Fertilizers. *Acta Agriculture Universitatis Jiangxiensis*, 2001, 23(1): 54—56.
- [16] Dawe D, Dobermann A, Ladha J K, *et al.* Do organic amendments improve yield trends and profitability in intensive rice systems? *Field Crops Research*, 2003, (83): 191—213.
- [17] Saleque M A, Abedin M J, Bhuiyan N I, *et al.* Long-term effects of inorganic and organic fertilizer sources on yield and nutrient accumulation of lowland rice. *Field Crops Research*, 2004, (86): 53—65.
- [18] Dobermann A, Dawe D, Roetter R P, *et al.* Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment. *Agronomy Journal*, 2000, (92): 633—643.
- [19] Yuan Z Q. Discussion on modern sustainable agriculture. *Development of Small Cities & Towns*, 2007, (4): 18—21.
- [20] Blair G J, Lefroy R D B. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Journal of Agriculture Research*, 1995, 46: 1459—1466.
- [21] Liang Y J, Xu G B, Wei T Z. Effect of mixed application of organic and inorganic fertilizers on sustainable index of nutrient in paddy soil. *Journal of Beijing University (Natural Science)*, 2001, 2(3): 252—257.
- [22] Shen H, Cao Z H. Study on sustainability indexes of soil nutrients under different agro-ecosystems. *Rural Eco-environment*, 1998, 14(3): 35—39.
- [23] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice-wheat cropping systems: issues and challenges. *Crops Research*, 2001, 69: 93—132.
- [24] Timsina J, Sinsh U, Badaruddin M, *et al.* Cultivar, nitrogen and water effects on productivity and nitrogen-use efficiency and balance for rice-wheat sequences of Bangladesh. *Field Crops Research*, 2001, 72: 143—161.
- [25] Yadav R L, Dwivedi B S, Prasad K, *et al.* Yield trends and changes in soil organic-C and available NPK in a long-term rice-wheat system under integrated use of manures and fertilizers. *Field Crops Research*, 2000, 68: 219—246.

参考文献:

- [1] 陈惠哲,朱德峰. 全球水稻生产与稻作生态系统概况. 杂交水稻, 2003, 18(5):1~4.
- [5] 索东让. 长期定位试验中化肥与有机肥结合效应研究. 干旱地区农业研究, 2005, 23(2): 71~75.
- [6] 唐继伟,林治安,许建新,等. 有机肥与无机肥在提高土壤肥力中的作用. 中国土壤与肥料, 2006(3):44~47.
- [7] 刘长江. 面向 21 世纪的中国可持续农业. 农业系统科学与综合研究, 2004, 20(3): 202~204.
- [8] 周卫军,王凯荣,张光远. 有机无机结合施肥对红壤稻田土壤氮素供应和水稻生产的影响. 生态学报, 2003, 23(5): 914~921.
- [9] 周卫军,王凯荣,张光远,等. 有机与无机配合对红壤稻田系统生产力及其土壤肥力的影响. 中国农业科学,2002, 35(9): 1109~1113.
- [10] 李忠佩,瘠薄红壤中有机物质的分解特征. 生态学报, 2002,22(8): 1224~1230.
- [11] 刘光崧主编. 土壤理化分析与剖面描述. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [12] 曾希柏,关光复. 稻田不同耕作制下有机质和氮磷钾的变化研究. 生态学报, 1999,19(1): 90~95.
- [15] 吴建富,王海辉,刘经荣,等. 长期施用不同肥料稻田土壤养分的剖面分布特征. 江西农业大学学报,2001,23(1): 54~56.
- [19] 袁志清. 现代持续农业探析. 小城镇建设, 2007(4): 18~21.
- [21] 梁运江,许广波,魏铁铮,等. 有机肥与化肥配施对水稻土养分可持续性的影响. 北京大学学报(自然科学版), 2001, 2(3): 252~257.
- [22] 沈宏,曹志宏. 不同农田土壤养分可持续性指数的研究. 农村生态环境,1998,14(3):35~39.