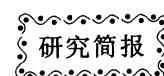


DOI: 10.3724/SP.J.1006.2018.00454



机收稻草全量还田减施化肥对双季晚稻养分吸收利用及产量的影响

曾研华 吴建富* 曾勇军 范呈根 谭雪明 潘晓华* 石庆华

江西农业大学双季稻现代化生产协同创新中心 / 作物生理生态与遗传育种教育部重点实验室, 江西南昌 330045

摘要: 稻草还田替代部分化肥对推进化肥零增长行动具有重要的意义。研究等量氮磷钾养分条件下连续稻草还田减施化肥对双季晚稻产量及养分吸收利用的影响, 可为南方稻区稻草资源的合理利用和水稻高产、养分高效管理提供参考。本试验基于江西温圳国家级耕地质量监测点双季稻稻草还田定位试验, 以超级杂交晚稻五丰优 T025 为试材, 设稻草还田减施化肥(SI+NPK)、稻草烧灰还田减施化肥(SB+NPK)和单施化肥(NPK)等处理, 以稻草不还田不施化肥(CK)为对照, 施肥处理中氮磷钾养分用量相等。研究了不同处理对双季晚稻产量、氮磷钾素养分吸收利用的影响。结果表明, 在等量氮磷钾养分施用条件下, 连续 6 年早稻稻草还田处理有利于协调双季晚稻穗粒结构, 协同维持晚稻产量稳定, 保持与其余施肥处理产量基本持平。与 NPK 相比, SI+NPK 处理植株各器官中 N、P、K 含量及总吸收量在生育前期均较低, 生育后期较高, 且 P、K 养分吸收量差异显著; SI+NPK 可显著提高水稻 N、P、K 养分收获指数、农学效率、回收率和养分偏生产力, 而 SB+NPK 只比 NPK 显著提高了 K 养分收获指数、农学效率、回收率和养分偏生产力。此外, SI+NPK 也比 SB+NPK 提高了氮、磷、钾养分收获指数、农学效率、回收率及偏生产力。总之, 早稻稻草还田替代部分化肥可稳定晚稻产量水平及提高养分利用效率, 实现南方稻区土壤养分资源的高效利用。

关键词: 定位试验; 等量养分投入; 稻草还田减施化肥; 产量; 养分利用效率

Effects of Straw Incorporation with Reducing Chemical Fertilizers on Nutrient Absorption and Utilization and Grain Yield of Double-cropping Late Rice under Mechanical Harvest

ZENG Yan-Hua, WU Jian-Fu*, ZENG Yong-Jun, FAN Cheng-Gen, TAN Xue-Ming, PAN Xiao-Hua*, and SHI Qing-Hua

Collaborative Innovation Center for the Modernization Production of Double Cropping Rice, Jiangxi Agricultural University / Key Laboratory of Crop Physiology, Ecology and Genetic Breeding, Ministry of Education, Nanchang 330045, Jiangxi, China

Abstract: Replacing chemical fertilizer with straw incorporation is an important way to reduce fertilizer application and improve fertilizer efficiency. The objective of six year field location experiments under the same N, P, and K inputs, was to systematically explore the effects of straw incorporation and reducing chemical fertilizers on plant nutrient absorption and utilization under mechanical harvest, so as to provide a basic support for the reasonable utilization of straw resource, rice high yield and its nutrient management measure in the southern rice zone. The experiments were conducted being in the cultivated land quality monitoring station of Wenzhen town, Jiangxi province, Wufengyou T025, super hybrid late rice cultivar. Four treatments were included: total straw incorporation and reducing chemical fertilizers (SI+NPK), straw burning and reducing chemical fertilizers (SB+NPK), chemical fertilizers (NPK), and no chemical fertilizers (CK). The three fertilization treatments were with equal quantity of fertilizers ($N 195 \text{ kg ha}^{-1}$, $P_2O_5 87.8 \text{ kg ha}^{-1}$, and $K_2O 175.5 \text{ kg ha}^{-1}$) whatever chemical and organic ones. The variation of rice yield

本研究由国家科技支撑计划项目(2013BAD07B12), 国家重点研发计划项目(2016YFD0300501, 2017YFD0301601), 江西省科技支撑计划项目(2009BNA03800, 20171BBF60030)和中国博士后科学基金面上项目(2016M600512)资助。

This study was supported by the National Science & Technology Support Plan (2013BAD07B12), the National Key R&D Program (2016YFD0300501, 2017YFD0301601), the Jiangxi Science & Technology Support Plan (2009BNA03800, 20171BBF60030) and China Postdoctoral Science Foundation Program (2016M600512).

* 通信作者(Corresponding authors): 吴建富, E-mail: wjf6711@126.com; 潘晓华, E-mail: xhuapan@163.com

第一作者联系方式: E-mail: zyh74049501@163.com

Received(收稿日期): 2017-05-28; Accepted(接受日期): 2017-11-21; Published online(网络出版日期): 2017-12-18.

URL: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20171218.0925.012.html>

and nitrogen, phosphorus, potassium uptake and their utilization efficiency were determined. SI+NPK of early rice in continuous six years was available to balance the panicle and spikelet, and hold steady grain yield of late rice, with the same level compared with SB+NPK and NPK. Compared with NPK treatment, SI+NPK treatment had lower N, P, K contents and accumulation at the vegetative growth stage including tillering stage and panicle initiation, but higher those at the reproductive stage such as heading stage and maturity stage. Moreover, the P, K accumulation was significantly increased in SI+NPK treatment. Compared with NPK treatment, SI+NPK treatment enhanced N, P, K fertilizer harvest index, agronomy efficiency (AE), recovery efficiency (RE) and partial factor productivity (PFP) significantly, but SB+NPK treatment only enhanced K fertilizer harvest index, AE, RE, and PFP significantly. Meanwhile, compared with SB+NPK treatment, SI+NPK treatment increased N, P, K fertilizer harvest index, AE, RE and PFP. Overall, straw incorporation replacing partial chemical fertilizer of early rice, in contrast to straw burning and chemical fertilizers application, is proved to be a feasible way to stabilize grain yield of late rice, enhance nutrient utilization efficiency, and realize the efficient utilization of soil nutrient resource in the southern rice zone.

Keywords: field location experiments; equal N, P, K inputs; straw incorporation and reducing chemical fertilizers; grain yield; nutrient utilization efficiency

稻草是一种重要的有机肥源,富含大量氮、磷、钾、硅等矿质营养元素^[1-2]。推行稻草还田对于提高土壤肥力、降低施肥成本和维持农业的可持续发展等方面均具有重要作用^[3-4]。近年来,由于水稻机械化收获进程的加剧,稻草原位还田现象较为普遍,但同时也存在稻草就地焚烧的现象,有大量的秸秆被丢弃和露天焚烧,造成资源浪费,污染环境^[5]。目前化肥的大量使用,导致土壤养分流失和环境污染加重。因此,在确保产量稳定的前提下,化肥如何做到减量施用已成为当前水稻生产中养分高效管理的重要研究方向^[6-7]。关于稻草还田配施化肥下作物产量和土壤肥力等方面的研究报道较多^[8-10]。宓文海等^[8]研究认为连续3年有机肥料与化肥配施比单施化肥可提高水稻产量、改善土壤肥力状况。丁文金等^[9]研究表明秸秆还田下优化施肥不减量或一定程度减氮、减磷、减钾或减氮磷钾都会对早稻产量和双季稻总产产生降低作用,而对晚稻产量无显著降低或提高作用。对于秸秆还田下植株养分吸收利用,已有的报道大都是在养分用量不等的条件下开展研究的^[10-13]。但在氮、磷、钾养分总施用量相等条件下,系统探讨机收稻草全量还田减施化肥、稻草烧灰还田减施化肥与单施化肥三者对双季晚稻养分吸收利用影响的研究报道较少^[13]。目前稻草直接焚烧还田方式在水稻生产中一直存在^[5],尤其是南方双季稻区随处可见。从水稻高产、养分高效利用角度比较稻草还田与稻草烧灰还田的优劣性,明确稻草还田的可行性,显得尤为必要。本定位试验有关早稻的研究结果已另文报道^[14],本文主要系统观测稻草还田减施化肥对双季晚稻产量、养分吸收累积及利用的影响,为南方稻区稻草资源的合理利用和水稻高产、养分高效管理提供理论依据和技术指导。

1 材料与方法

1.1 试验地点概况

试验在江西省进贤县温圳镇杨溪村国家级耕地质量监测点基地进行(28°20'7.14"N, 116°5'29.73"E)。试验田地处赣抚冲积平原,属亚热带季风湿润气候,年平均气温17.5°C,年降雨量1600~1800 mm,平均相对湿度77%,年

平均日照时间1900.5 h,无霜期291 d。供试土壤为第四纪红色黏土发育水稻土,土壤含有机质34.16 g kg⁻¹、全氮2.271 g kg⁻¹、碱解氮126.0 mg kg⁻¹、有效磷(P₂O₅)31.34 mg kg⁻¹、速效钾(K₂O)97.9 mg kg⁻¹,pH 5.48。

1.2 试验设计

于2010年开始稻草还田定位试验,每季早、晚稻收获后将稻草分别以原位全量还田和烧灰还田作下季水稻基肥,且早、晚稻季种植期间各施肥处理养分用量保持一致,即氮、磷、钾用量相等。采用田间随机区组设计,小区面积为120 m²,3次重复,小区间用水泥埂隔离防渗,并设单独灌排设施。设4个处理:(1)稻草烧灰还田减施化肥(SB+NPK),即以全喂入式收割机收获早稻后人工撒匀稻草,将其晒干后燃烧成灰全部还田,灌适量水后用手扶拖拉机旋耕,水稻种植季减施部分化肥;(2)单施化肥(NPK),稻草全部移出田间,只留稻桩;(3)稻草全量还田减施化肥(SI+NPK),早稻机收后将稻草切碎成约5~8 cm小段,人工撒匀全量还田,灌水后用拖拉机将稻草旋耕入土,水稻种植季减施部分化肥;(4)稻草不还田不施肥(CK)。供试晚稻品种为五丰优T025。每季晚稻氮、磷、钾养分施用量分别为195.00、87.80和175.50 kg hm⁻²,稻草(草木灰)有机肥输入的氮磷钾养分含量不足时用化学肥料补足。其中氮肥为尿素,磷肥为钙镁磷肥,钾肥为氯化钾。尿素按基肥:分蘖肥=5:2:3施用,氯化钾按分蘖肥:穗肥=7:3施用,钙镁磷肥一次性做基肥施用。每季还田稻草养分平均含量为N 0.658%、P₂O₅ 0.118%、K₂O 1.492%,稻草灰中N、P₂O₅、K₂O质量分数分别为0.185%、0.440%、8.360%。各施肥处理养分用量见表1,稻草还田输入养分量可替代化肥氮肥(N)26.7%、磷肥(P₂O₅)10.3%和钾肥(K₂O)64.1%。栽插密度为13.3 cm×26.4 cm,水稻生育期为6月下旬至10月下旬。其他管理措施同一般高产栽培。

1.3 测定指标与计算方法

水稻产量于每季晚稻收获时,对小区植株实割脱粒、去杂、晒干后称重计产。于2015—2016年取样分析植株N、P和K养分,在水稻分蘖期(8月11日)、幼穗分化期

表 1 各施肥处理养分用量
Table 1 Chemical fertilizer and organic manure application in different treatments (kg hm^{-2})

处理 Treatment	氮 N		磷 P_2O_5		钾 K_2O	
	化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Organic manure	化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Organic manure	化肥 Chemical fertilizer	有机肥 Organic manure
SI+NPK	143.00	52.00	78.80	9.00	63.00	112.50
SB+NPK	193.06	1.94	81.00	6.80	60.00	115.50
NPK	195.00	0	87.80	0	175.50	0

有机肥形式包括秸秆与草灰。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥。

Organic manure includes straw and straw ash. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application.

(8月31日)、抽穗期(9月15日)和成熟期(10月27日)按平均茎蘖数取每处理代表性植株5蔸, 分茎鞘、叶片和稻穗3部分装入样品袋, 于烘箱105°C杀青30 min, 80°C烘干至恒重、称重、粉碎、过0.5 mm筛, 植株采用浓H₂SO₄-H₂O₂消化测定各部位N、P和K, 用FOSS-2400测定N, 用钒钼黄比色法测定P, 用火焰光度法测定K^[15]。计算方法^[16-18]如下:

$$\text{养分偏生产力(PFP, kg kg}^{-1}\text{)} = \text{施肥处理产量 / 施肥量};$$

$$\text{养分收获指数(HI, \%)} = \text{籽粒中养分累积量 / 收获时植株该元素累积量} \times 100;$$

$$\text{回收率(\%)} = (\text{施肥区地上部吸肥量} - \text{无肥区地上部吸肥量}) / \text{施肥量} \times 100;$$

$$\text{农学利用率(kg kg}^{-1}\text{)} = (\text{施肥区子粒产量} - \text{无肥区子粒产量}) / \text{施肥量}.$$

作物产量的稳定性用变异系数(coefficient of variation, CV)^[19]评价, CV值越小说明产量稳定性越高。

$$CV = \sigma/Y, \text{ 式中, } \sigma \text{ 为产量标准差(t hm}^{-2}\text{), } Y \text{ 为历年产量平均数(t hm}^{-2}\text{).}$$

1.4 数据处理与分析

两年植株养分结果变化趋势基本一致, 本文主要取2015年数据, 运用Microsoft Excel 2007和SPSS 16.0软件处理和统计分析试验数据, 利用Duncan's新复极差法(LSR)进行显著性检验, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 稻草还田减施化肥对双季晚稻产量及其构成因素的影响

由表2可知, 随着稻草还田年限的延长, SI+NPK晚稻产量逐步呈现高于SB+NPK、NPK的变化趋势, 2015年产量差异达显著水平。与NPK相比, 连续6年SI+NPK和SB+NPK略提高了水稻平均产量, 两者增幅分别为2.80%、2.92%, 其中2011年, 与NPK差异达显著水平, 而SB+NPK与SI+NPK的水稻产量年份间互有高低, 但平均值差异不显著。与CK相比, 施肥处理均显著提高水稻产量($P < 0.05$), SI+NPK、SB+NPK、NPK增幅分别为67.64%、67.83%和63.07%。各施肥处理年度间水稻产量变异系数基本持平, 说明连续稻草还田替代部分化肥有利于双季晚稻产量保持稳定。

从产量构成因素来看(表3), 与NPK相比, SI+NPK、SB+NPK提高了每穗粒数, 差异达显著水平, 而有效穗数、结实率与千粒重差异均未达显著水平, 两年趋势基本一致。说明稻草还田减施化肥有利于双季晚稻穗粒结构协调, 协同稳定提高水稻产量。而SI+NPK与SB+NPK产量构成因素差异均不明显。

2.2 稻草还田减施化肥对双季晚稻各器官养分含量的影响

2.2.1 植株氮含量 由表4可知, 与CK相比, 各施肥处理均提高晚稻不同生育期各器官氮素含量, 差异均达

表 2 稻草还田减施化肥下双季晚稻产量

处理 Treatment	产量 Yield (t hm^{-2})						平均值 Average	变异系数 CV (%)	相比 CK 增产率 RYI to CK (%)	相比 NPK 增产率 RYI to NPK (%)
	2010	2011	2012	2013	2014	2015				
SI+NPK	8.12 b	8.72 a	9.00 a	9.58 a	9.17 a	8.60 a	8.86 a	5.66	67.64	2.80
SB+NPK	8.92 a	8.97 a	8.87 a	9.45 a	9.02 a	8.02 b	8.87 a	5.28	67.83	2.92
NPK	8.14 b	8.21 b	8.87 a	9.25 a	9.04 a	8.23 b	8.62 a	5.65	63.07	—
CK	5.95 c	5.11 c	6.17 b	5.10 b	4.80 b	4.60 c	5.29 b	11.92	—	—

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达5%水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer; RYI: rate of yield increase; CV: coefficient of variation.

显著水平($P < 0.05$)。在分蘖期和穗分化期, 营养器官(茎鞘、叶片)氮含量 SI+NPK、SB+NPK 均低于 NPK, 且前者在分蘖期均显著低于后者, SI+NPK、SB+NPK 茎鞘降低 1.70~1.80 mg g⁻¹, 叶片降低 1.60~2.70 mg g⁻¹。抽穗期, 营养器官氮素 SI+NPK 高于 NPK, 稻穗籽粒 SI+NPK 低于 NPK, 而成熟期趋势与之相反。

2.2.2 植株磷含量 由表 5 可知, 与 CK 相比, 各

施肥处理主要提高晚稻生育后期(抽穗期、成熟期)各器官磷含量, 而生育前期(分蘖期、穗分化期)茎鞘磷含量略降低; 与 NPK 相比, 生育前期 SI+NPK 水稻茎鞘和叶片中磷含量略偏低, 而生育后期各器官磷含量则较高, 但 SB+NPK 各器官磷含量在成熟期低于 NPK。说明早稻稻草还田减施化肥有利于提高晚稻生育后期磷含量。

表 3 稻草还田减施化肥对双季晚稻产量构成因素的影响
Table 3 Effect of SIRCF on yield components of double-cropping late rice

年份 Year	处理 Treatment	有效穗数 Effective panicle ($\times 10^4$ hm ⁻²)	每穗粒数 Spikelets per panicle	结实率 Seed setting rate (%)	千粒重 1000-grain weight (g)
2014	SI+NPK	276.2 a	160.2 a	93.14 ab	24.90 a
	SB+NPK	270.6 a	155.5 ab	93.39 ab	24.76 a
	NPK	284.7 a	151.5 b	91.47 b	24.84 a
	CK	171.9 b	126.5 c	96.23 a	24.66 a
	SI+NPK	268.5 a	154.3 a	89.43 ab	25.01 a
	SB+NPK	255.3 a	150.7 ab	88.05 b	24.66 a
	NPK	280.6 a	140.4 b	89.34 ab	24.52 a
	CK	193.1 b	115.5 c	93.15 a	24.27 a

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 5% 水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer.

表 4 稻草还田减施化肥对双季晚稻各器官氮含量的影响
Table 4 Effect of SIRCF on N content in organs of double-cropping late rice (mg g⁻¹)

处理 Treatment	分蘖期 TS				穗分化期 PI				抽穗期 HS				成熟期 MS								
	茎鞘 SS		叶 Leaf		茎鞘 SS		叶 Leaf		茎鞘 SS		叶 Leaf		穗 Panicle		茎鞘 SS		叶 Leaf		穗 Panicle		
	SI+NPK	17.30 b	35.90 b	6.07 b	19.97 b	10.33 a	27.97 a	14.37 ab	6.60 a	12.14 a	11.97 a	SB+NPK	17.40 b	34.80 b	7.37 ab	26.50 a	10.16 a	26.10 a	13.80 b	6.37 a	13.97 a
NPK	19.10 a	37.50 a	8.72 a	26.80 a	9.97 a	27.33 a	15.70 a	7.02 a	13.90 a	11.13 a	CK	11.50 c	27.10 c	5.02 c	17.97 b	5.15 b	14.87 b	8.31 c	3.10 b	6.55 b	7.91 b

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 5% 水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer.

表 5 稻草还田减施化肥对双季晚稻各器官磷含量的影响
Table 5 Effect of SIRCF on P content in organs of double-cropping late rice (mg g⁻¹)

处理 Treatment	分蘖期 TS				穗分化期 PI				抽穗期 HS				成熟期 MS								
	茎鞘 SS		叶 Leaf		茎鞘 SS		叶 Leaf		茎鞘 SS		叶 Leaf		穗 Panicle		茎鞘 SS		叶 Leaf		穗 Panicle		
	SI+NPK	2.38 a	2.19 a	2.44 a	1.86 ab	3.44 a	2.65 a	2.43 a	1.70 a	1.43 a	2.80 a	SB+NPK	2.69 a	1.56 b	2.81 a	2.19 a	3.04 ab	2.18 ab	2.02 a	1.35 ab	1.21 a
NPK	2.46 a	2.25 a	2.77 a	2.30 a	2.76 b	2.40 a	2.20 a	1.47 a	1.30 a	2.32 a	CK	2.81 a	2.07 ab	2.87 a	1.67 b	2.11 c	1.61 b	1.31 b	0.94 b	0.97 a	1.64 b

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 5% 水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer; TS: tillering stage; PI: panicle initiation; HS: heading stage; MS: maturity stage; SS: stems and sheaths.

2.2.3 植株钾含量 由表 6 可知, 各处理晚稻主要生育时期钾素含量依次为茎鞘>叶片>穗, 各施肥处理营养器官钾含量在分蘖期高于 CK, 而抽穗期、成熟期则偏低, 可能与干物质积累速度远远超过了钾素积累的速度有关。

此外, SI+NPK 营养器官中钾含量在生育前期比 NPK 有所偏低, 而生育后期各器官钾含量则增加, SB+NPK 与 NPK 相比, 也有类似的趋势。由此说明, 早稻稻草还田减施化肥增强土壤供钾持久力。

表 6 稻草还田减施化肥对双季晚稻各器官钾含量的影响
Table 6 Effect of SIRCF on K content in organs of double-cropping late rice (mg g^{-1})

处理 Treatment	分蘖期 TS		穗分化期 PI		抽穗期 HS			成熟期 MS		
	茎鞘 SS	叶 Leaf	茎鞘 SS	叶 Leaf	茎鞘 SS	叶 Leaf	穗 Panicle	茎鞘 SS	叶 Leaf	穗 Panicle
SI+NPK	43.24 a	18.40 a	35.38 a	16.39 a	23.32 ab	13.15 a	6.95 a	29.64 b	9.09 b	5.52 a
SB+NPK	44.05 a	16.41 ab	35.80 a	17.30 a	22.24 b	12.61 a	5.91 a	28.05 b	8.57 b	5.25 a
NPK	47.43 a	18.45 a	37.02 a	17.19 a	21.85 b	13.14 a	5.65 a	27.66 b	7.70 b	5.18 a
CK	35.38 b	15.59 b	37.93 a	13.76 b	27.39 a	15.00 a	5.72 a	36.31 a	14.66 a	6.50 a

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 5% 水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer; TS: tillering stage; PI: panicle initiation; HS: heading stage; MS: maturity stage; SS: stems and sheaths.

2.3 稻草还田减施化肥对双季晚稻养分吸收积累的影响

由图 1 可知, 不同施肥处理间氮、磷、钾养分积累量变化存在生育时期的差异。生育前期, SI+NPK 氮、磷、钾养分积累量均不同程度地低于 SB+NPK、NPK, 在分蘖期, 氮、磷、钾养分积累量降幅分别为 10.29%~10.67%、8.86%~8.12%、15.22%~11.89% ($P<0.05$), 而在穗分化期降幅分别为 26.26%~36.48% ($P<0.05$)、20.93%~22.18% ($P<0.05$)、10.91%~12.29% ($P<0.05$); 生育后期, SI+NPK 氮、磷、钾养分积累量则不同程度地高于 SB+NPK、NPK, 在抽穗期增幅分别为 0.06%~4.08%、14.45%~18.34% ($P<0.05$)、4.61%~4.74% ($P<0.05$), 而在成熟期增幅分别为 1.59%~4.61%、20.89%~29.03% ($P<0.05$)、5.06%~6.81% ($P<0.05$)。说明早稻稻草还田减施化肥有利于促进晚稻生育后期养分的积累, 增强土壤供肥能力的持续性。此外, 从图 1 还可知, SB+NPK 氮素各生育期积累量在穗分化

期、抽穗期显著低于 NPK ($P<0.05$), 其余时期差异不明显, 而磷、钾养分积累量在各生育时期与 NPK 差异不显著。

2.4 稻草还田减施化肥对双季晚稻养分利用效率的影响

由表 7 可见, 等量养分处理下, SI+NPK 晚稻氮、磷、钾肥的农学效率、回收率和偏生产力均高于 SB+NPK 和 NPK, 其中 N、P 差异达显著水平 ($P<0.05$), K 素以偏生产力差异显著。与 NPK 相比, SB+NPK 氮素农学效率、回收率和偏生产力均偏低, 但差异不显著, 磷素以偏生产力显著较高, 而钾素农学效率、回收率和偏生产力均显著提高。与 CK 相比, NPK 水稻 N、P、K 收获指数显著降低, SI+NPK、SB+NPK 以 N 收获指数下降显著, P、K 收获指数差异不显著。施肥处理间, N、P、K 收获指数呈 SI+NPK >SB+NPK >NPK 趋势, 其中 SI+NPK 与 NPK 差异显著。由此说明, 稻草还田既能减少化肥氮、磷、钾的投入, 又能提高晚稻氮、磷、钾素养分利用效率。

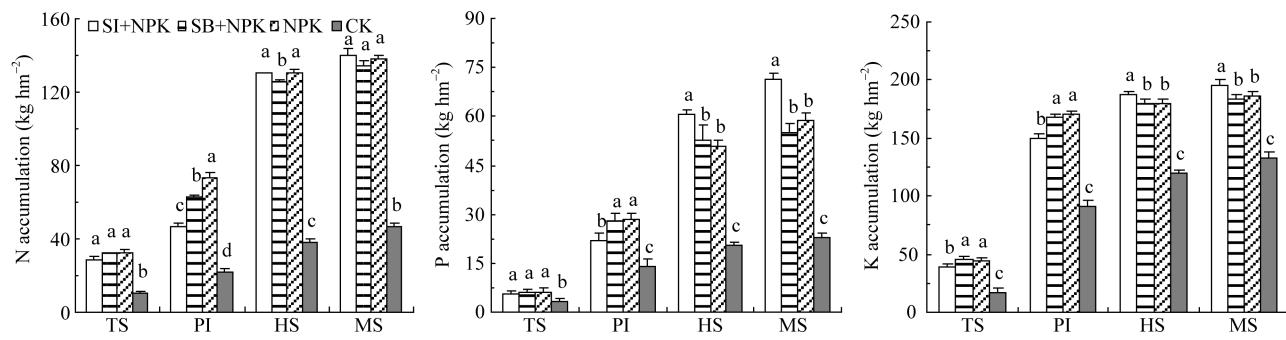


图 1 稻草还田减施化肥下植株氮、磷、钾素累积量
Fig. 1 Periodical N, P, K accumulations under SIRCF of double-cropping late rice

柱形图上不同字母表示同一取样期处理间差异达 5% 显著水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Bar demonstrated ley different lowercase letters at the sampling date are significantly different at $P \leq 5\%$. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer; TS: tillering stage; PI: panicle initiation; HS: heading stage; MS: maturity stage; SS: stems and sheaths.

表 7 稻草还田减施化肥下植株养分利用效率的变化
Table 7 N, P, K use efficiency of double-cropping late rice under SIRCF

处理 Treatment	收获指数 HI (%)			农学效率 AE (kg kg^{-1})			回收率 RE (%)			偏生产力 PFP (kg kg^{-1})		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K	N	P	K
SI+NPK	70.46 b	74.05 a	27.99 a	27.94 a	50.69 a	63.40 a	65.13 a	26.71 a	0.83 a	60.13 a	109.12 a	143.31 a
SB+NPK	67.70 bc	73.02 ab	27.56 a	17.49 b	42.11 b	56.85 a	44.58 b	17.34 b	0.69 a	41.10 b	98.95 b	127.22 b
NPK	62.74 c	70.00 b	26.01 b	18.60 b	41.31 b	20.67 b	46.62 b	17.84 b	0.25 c	42.21 b	93.75 c	46.90 c
CK	77.59 a	75.24 a	27.12 a	—	—	—	—	—	—	—	—	—

同一列数据后不同小写字母分别表示差异达 5% 水平。SI+NPK: 稻草还田减施化肥; SB+NPK: 稻草烧灰还田减施化肥; NPK: 单施化肥; CK: 对照。

Values followed by different lowercase letters in same column are significantly different at the 5% probability level. SI+NPK: straw incorporation with reducing chemical fertilizers; SB+NPK: straw burning with reducing chemical fertilizers; NPK: chemical fertilizers application; CK: no fertilizer; HI: harvest index; AE: agronomy efficiency; RE: recovery efficiency; PFP: partial factor productivity.

3 讨论

3.1 稻草还田减施化肥对双季晚稻产量形成的影响

本试验结果表明, 同等养分投入条件下, SI+NPK 较 NPK 并没有降低双季晚稻产量, 反而略高于 NPK, 增幅 2.80%, 这与其穗粒结构协调有关。说明 SI+NPK 不仅能维持双季晚稻产量的稳定, 同时也可减少化肥氮磷钾养分的投入, 提高养分生产力, 实现养分高效利用。与 SB+NPK 相比, 连续 6 年 SI+NPK 产量在前两年偏低, 之后出现升高趋势, 但 6 年平均产量基本持平, 说明早稻稻草还田对晚稻产量的影响为累积效应的长期过程。这与笔者关于晚稻稻草还田对翌年早稻产量影响的变化趋势并不一致^[14], 与稻草在早、晚稻季生长期间腐解程度及其供肥作用程度的快慢有关。而历年水稻产量年际间发生不同的变化趋势, 可能与当年气候变化等因素有关, 但当年各处理的变化趋势是一致的。

一般来说, 稼秆还田主要通过两种途径影响作物的生长发育, 一是自身分解释放营养元素、化学物质等的直接影响; 二是作物生长环境因子的间接影响^[20]。而植株的养分吸收与积累表征了作物的生长发育状况, 从而影响作物的产量。笔者研究表明, 稻草还田在一定程度上改善土壤的结构, 增加土壤的通透性, 提高土壤的肥力^[14, 21-23], 从历年研究结果来看, 稻草还田较稻草不还田土壤有机质及全氮平均增幅分别为 3.90% 和 6.22%; 同时通过影响土壤环境来改善土壤理化与生物学性状。吴建富等^[23]研究指出, 土壤肥力指数与水稻产量存在密切相关。因此, 稻草还田减施化肥是通过改善土壤结构、提高地力的形式来供给地上部植株养分的吸收利用^[14], 保持双季晚稻有效穗与穗粒数结构协调, 协同稳定水稻产量。

3.2 稻草还田减施化肥对双季晚稻植株养分吸收利用的影响

本研究表明, 与 NPK 相比, 等量氮、磷、钾养分施用条件下, SI+NPK 植株氮、磷、钾含量在生育前期较低, 随着生育进程而增加, 其中氮含量在生育前期差异显著。这与前人关于稼秆还田后植株中 N 含量在生育前期较低, 而 P、K 含量在整个生育期均较高等研究结果不尽一致^[11-12], 这

与试验对象和研究方法有关。究其原因可能是早稻稻草还田因速效氮肥施用量比单施化肥处理少, 加之自然高温环境的影响, 土壤微生物大量繁殖, 而微生物分解稻草的过程中需要消耗氮素营养, 使得土壤微生物与水稻秧苗争夺土壤速效氮, 导致土壤速效养分供应少, 影响水稻前期生长发育^[24], 同时苗期水稻需氮量较少, 而秸秆腐解产生大量还原性物质, 促进了土壤氧化还原电位上升, 抑制水稻苗期根系的生长, 导致养分吸收受到抑制; 而随着稻草腐解程度推进, 稻草中释放的氮、磷、钾被植株所利用, 也为土壤微生物提供了丰富的可溶性能源物质, 提高土壤生物活性, 此时土壤开始矿质化释放速效养分^[25], 共同促进氮、磷、钾养分的释放^[26], 利于水稻后期养分的吸收积累。稻草还田后, 植株生育后期氮、磷、钾养分的吸收量增加, 且磷、钾积累量与单施化肥差异显著。这与徐国伟等^[11]研究结论相似。说明稻草有机养分可替代部分化学肥料, 增强生育后期土壤的供肥能力, 提高植株对养分的吸收能力。而 SB+NPK 植株前期氮含量显著低于 NPK, 其原因可能与植株前期生长不足有关, 影响干物质积累, 降低氮素含量的积累。此外, 稻草还田减施化肥处理投入的钾素量要低于水稻收获吸收带走的量, 说明进行稻草还田减施部分钾肥不足以弥补土壤钾素的亏缺, 启示在田间养分管理中应注重土壤钾素的培肥^[27]。而同等施钾量下的 SB+NPK 和 NPK, 两者植株钾的吸收量均显著低于 SI+NPK, 说明土壤速效性钾素可能出现了径流, 导致钾素利用率降低。这是因为南方地区晚稻生长期, 伴有高温多风暴雨天气, 土壤中硅酸盐矿物极易风化形成黏细的次生黏土矿物, 释放大量的钾素, 导致钾素极易随水流失^[28]。值得一提的是, SI+NPK 植株生长前期钾含量及钾积累量有所偏低, 这可能与稻草腐解过程中养分释放的快慢有关, 南方双季稻接茬比较紧, 早稻收获后来不及灌水泡田就耕整耙田, 导致早稻季稻草还田后并未充分腐解, 就种植下季晚稻, 而还田稻草中钾素输入农田的量占据钾肥总投入量的一半以上, 势必导致前期植株养分吸收的不足, 影响其钾素积累, 且秸秆释放的养分有部分可能被微生物及土壤利用。

养分收获指数及利用率表征其对作物生物量和籽粒

产量的贡献,而偏生产力指示土壤自身养分和投入肥料养分的综合效率。连续稻草还田减施化肥条件下,本研究发现 SI+NPK 的氮、磷、钾养分收获指数、农学效率、回收率及偏生产力均显著高于 NPK,这与前人研究结论较为一致^[13,29-30]。值得一提的是,本试验 SI+NPK 氮肥偏生产力为 60.1 kg kg^{-1} ,表明其在施肥量偏低的情况下,氮素管理仍较好^[31]。本研究是基于南方双季稻区等养分氮磷钾探讨稻草还田对植株养分吸收利用的影响,较以往宓文海等^[8]、徐国伟等^[11-12]单纯的稻草还田减施化肥的单季稻研究,方法上具有一定特色,生产上也具有一定实际意义,可为南方双季稻区养分合理施用提供理论依据。

3.3 机收稻草还田减施化肥与双季晚稻稻田培肥的关系

从生态环境角度来看,推广稻草还田是水稻清洁生产的重要工程,而稻草就地焚烧不仅对土壤生态造成影响,同时也严重污染环境。本研究发现 SB+NPK 除钾素养分利用效率显著高于 NPK 外,而氮、磷养分利用效率与 NPK 并无明显差异,氮素利用率反而略偏低,其氮、磷、钾养分利用率并未协同提高,均要低于 SI+NPK。表明早稻稻草烧灰还田后,尽管也补充了部分养分,但破坏了土壤表层结构及微生物活性,降低了土壤质量^[32],不利于土壤肥力的固持,易造成土壤养分的流失,特别是导致氮肥利用率下降。本试验稻草输入农田的氮养分量远高于稻草灰,磷、钾量相差不大。但 SI+NPK 作为有机培肥,其养分释放及产生的后效性高于 SB+NPK 和 NPK^[33],且其养分残效连续叠加,尽管晚稻生长前期会受到一定影响,但土壤在氮磷钾供肥方式上显得更具有渐进性和持续性;长期稻草还田,也明显增加了土壤供肥能力与持久性^[13],此外,本研究 6 年稻田耕作层土壤养分含量变化结果也表明早稻稻草连续还田有利于维持稳定土壤氮、磷、钾肥力,持续增加土壤有机质含量,增强土壤供肥能力,提高土壤肥效的后劲(数据另文报道),尽管 SI+NPK 水稻收获后带走的养分要高于 SB+NPK 和 NPK,导致残留到土壤中的养分量会降低。同时也更加适合作物根系对养分的吸收利用,这也是稻草有机肥优于速效化肥的重要原因之一^[34]。因此,从合理培肥和养分综合利用的角度考虑,开展连续稻草还田减施部分化肥是切实可行的,既有利于水稻养分吸收利用,又可保持双季晚稻持续稳产,是南方稻区土壤养分管理实现高效利用的有效途径之一。

References

- [1] 刘巽浩,高旺盛,朱文珊. 稻秆还田的机理与技术模式. 北京:中国农业出版社,2001. pp 55–61
Liu X H, Gao W S, Zhu W S. Mechanism and Technical Mode of Straw Incorporation. Beijing: Chinese Agricultural Science and Technology Press, 2001. pp 55–61 (in Chinese)
- [2] 周鸣铮. 土壤肥力概论. 杭州:浙江科学技术出版社,1985. pp 118–154
Zhou M Z. Soil Fertility Generality. Hangzhou: Zhejiang Science and Technology Press, 1985. pp 118–154 (in Chinese)
- [3] Wang G H, Dobermann A, Witt C, Sun Q Z, Fu R X. Performance of site-specific nutrient management for irrigated rice in southeast China. *Agron J*, 2001, 93: 869–878
- [4] 刘天学,纪秀娥. 焚烧秸秆对土壤有机质和微生物的影响研究. 土壤, 2003, 35: 347–348
Liu T X, Ji X E. Effect of crop straw burning on soil organic matter and soil microbes. *Soils*, 2003, 35: 347–348 (in Chinese with English abstract)
- [5] 李飞跃,汪建飞. 中国粮食作物秸秆焚烧排碳量及转化生物炭固碳量的估算. 农业工程学报, 2013, 29(14): 1–7
Li F Y, Wang J F. Estimation of carbon emission from burning and carbon sequestration from biochar producing using crop straw in China. *Trans CSAE*, 2013, 29(14): 1–7 (in Chinese with English abstract)
- [6] 陈安磊,谢小立,文苑玉,王卫,童成立. 长期施肥对红壤稻田氮储量的影响. 生态学报, 2010, 30: 5059–5065
Chen A L, Xie X L, Wen W Y, Wang W, Tong C L. Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil. *Acta Ecol Sin*, 2010, 30: 5059–5065 (in Chinese with English abstract)
- [7] 李恩尧,邱亚群,彭佩钦,侯红波,李裕元,任可爱. 洞庭湖红壤坡地减氮控磷对玉米产量和径流氮磷的影响. 水土保持学报, 2011, 25: 32–35
Li E Y, Qiu Y Q, Peng P Q, Hou H B, Li Y Y, Ren K A. Effects of reduction and control nitrogen and phosphorous on maize yield and surface runoff in red soil slopes of Dongting lake. *J Soil Water Conserv*, 2011, 25: 32–35 (in Chinese with English abstract)
- [8] 宓文海,吴良欢,马庆旭,张宣,刘彦伶. 有机物料与化肥配施提高黄泥田水稻产量和土壤肥力. 农业工程学报, 2016, 32(13): 103–108
Mi W H, Wu L H, Ma Q X, Zhang X, Liu Y L. Combined application of organic materials and inorganic fertilizers improving rice yield and soil fertility of yellow clayey paddy soil. *Trans CSAE*, 2016, 32(3): 103–108 (in Chinese with English abstract)
- [9] 丁文金,马友华,胡宏祥,田雁飞,李丁,方凡,孙本发. 稻秆还田与减量施肥对双季稻产量及土壤酶活性的影响. 农业环境与发展, 2013, 30: 72–77
Ding W J, Ma Y H, Hu H X, Tian Y F, Li D, Fang F, Sun B F. Effect of straw application and fertilizer application reduction on the double cropping rice output and soil enzyme activity. *Agro-Environ & Develop*, 2013, 30: 72–77 (in Chinese with English abstract)
- [10] 赵鹏,陈阜. 稻秆还田配施化学氮肥对冬小麦氮效率和产量的影响. 作物学报, 2008, 34: 1014–1018
Zhao P, Chen F. Effects of straw mulching plus nitrogen fertilizer on nitrogen efficiency and grain yield in winter wheat. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1014–1018 (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐国伟,杨立年,王志琴,刘立军,杨建昌. 麦秸还田与实地氮肥管理对水稻氮磷钾吸收利用的影响. 作物学报, 2008, 34: 1424–1434
Xu G W, Yang L N, Wang Z Q, Liu L J, Yang J C. Effects of wheat-residue application and site-specific nitrogen management on absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1424–1434 (in Chinese with English abstract)
- [12] 徐国伟,吴长付,刘辉,王志琴,杨建昌. 稻秆还田与氮肥管理对水稻养分吸收的影响. 农业工程学报, 2007, 23(7):

- 191–195
- Xu G W, Wu C F, Liu H, Wang Z Q, Yang J C. Effects of straw residue return and nitrogen management on nutrient absorption of rice. *Trans CSAE*, 2007, 23(7): 191–195 (in Chinese with English abstract)
- [13] 高洪军, 朱平, 彭畅, 张秀芝, 李强, 张卫建. 等氮条件下长期有机无机配施对春玉米的氮素吸收利用和土壤无机氮的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21: 318–325
- Gao H J, Zhu P, Peng C, Zhang X Z, Li Q, Zhang W J. Effects of partially replacement of inorganic N with organic materials on nitrogen efficiency of spring maize and soil inorganic nitrogen content under the same N input. *Plant Nutr Fert Sci*, 2015, 21: 318–325 (in Chinese with English abstract)
- [14] 曾研华, 范呈根, 吴建富, 曾勇军, 周春火, 谭雪明, 潘晓华, 石庆华. 等养分条件下稻草还田替代双季早稻氮钾肥比例的研究. 植物营养与肥料学报, 2017, 23: 658–668
- Zeng Y H, Fan C G, Wu J F, Zeng Y J, Zhou C H, Tan X M, Pan X H, Shi Q H. Replacement ratio of nitrogen and potassium fertilizer by straw incorporation in early rice under the same nitrogen, phosphorus and potassium input. *Plant Nutr Fert Sci*, 2017, 23: 658–668 (in Chinese with English abstract)
- [15] 史瑞和. 土壤农化分析. 北京: 农业出版社, 1981
- Shi R H. Soil and Agricultural Chemistry Analysis. Beijing: China Agriculture Press, 1981 (in Chinese)
- [16] 王小燕, 沈永龙, 高春宝, 刘章勇, 方正武. 氮肥后移对江汉平原小麦子粒产量及氮肥偏生产力的影响. 麦类作物学报, 2010, 30: 896–899
- Wang X Y, Shen Y L, Gao C B, Liu Z Y, Fang Z W. Effects of postponing N application on grain yield and partial factor productivity of wheat in Jianghan Plain. *J Trit Crops*, 2010, 30: 896–899 (in Chinese with English abstract)
- [17] 刘新宇, 巨晓棠, 张丽娟, 李鑫, 袁丽金, 刘楠. 不同施氮水平对冬小麦季化肥氮去向及土壤氮素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2010, 16: 296–300
- Liu X Y, Ju X T, Zhang L J, Li X, Yuan L J, Liu N. Effect of different N rates on fate of N fertilizer and balance of soil N of winter wheat. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 296–300 (in Chinese with English abstract)
- [18] 孙丽敏, 李春杰, 何萍, 刘孟朝, 胡景辉. 长期施钾和秸秆还田对河北潮土区作物产量和土壤钾素状况的影响. 植物营养与肥料学报, 2012, 18: 1096–1102
- Sun L M, Li C J, He P, Liu M C, Hu J H. Effects of long-term K application and straw returning on crop yield and soil K status in fluvo-aquic soil of Hebei Province. *Plant Nutr Fert Sci*, 2012, 18: 1096–1102 (in Chinese with English abstract)
- [19] 谢军, 赵亚南, 陈轩敬, 李丹萍, 徐春丽, 王珂, 张跃强, 石孝均. 有机肥氮替代化肥氮提高玉米产量和氮素吸收利用效率. 中国农业科学, 2016, 49: 3934–3943
- Xie J, Zhao Y N, Chen X J, Li D P, Xu C L, Wang K, Zhang Y Q, Shi X J. Nitrogen of organic manure replacing chemical nitrogenous fertilizer improve maize yield and nitrogen uptake and utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2016, 49: 3934–3943 (in Chinese with English abstract)
- [20] 梁天锋, 徐世宏, 刘开强, 王殿君, 梁和, 董登峰, 韦善清, 莫润秀, 曾可, 江立庚. 耕作方式对还田稻草氮素释放及水稻氮素利用的影响. 中国农业科学, 2009, 42: 3564–3570
- Liang T F, Xu S H, Liu K Q, Wang D J, Liang H, Dong D F, Wei S Q, Mo R X, Zeng K, Jiang L G. Influence of tillage patterns on incorporated straw nitrogen release and nitrogen utilization of rice. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 3564–3570 (in Chinese with English abstract)
- [21] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 朱德峰. 稻草不同还田方式对双季水稻产量及稻米品质的影响. 植物营养与肥料学报, 2013, 19: 534–542
- Zeng Y H, Wu J F, Pan X H, Shi Q H, Zhu D F. Study on yield and quality of double cropping rice in different straw return approaches. *Plant Nutr Fert Sci*, 2013, 19: 534–542 (in Chinese with English abstract)
- [22] 丁奇, 吴建富, 李涛, 潘晓华, 石庆华, 赵新帆, 吴玉成, 杨小华. 稻草全量还田对双季水稻生长和土壤肥力的影响. 江西农业大学学报, 2014, 36: 44–49
- Ding Q, Wu J F, Li T, Pan X H, Shi Q H, Zhao X F, Wu Y C, Yang X H. The Effect of total straw incorporation on rice growth and soil fertility. *Acta Agric Univ Jiangxiensis*, 2014, 36: 44–49 (in Chinese with English abstract)
- [23] 吴建富, 曾研华, 潘晓华, 石庆华, 李涛, 王苏影. 稻草还田方式对双季水稻产量和土壤碳库管理指数的影响. 应用生态学报, 2013, 24: 1572–1578
- Wu J F, Zeng Y H, Pan X H, Shi Q H, Li T, Wang S Y. Effects of rice straw returning mode on rice grain yield and soil carbon pool management index in double rice-cropping system. *Chin J Appl Ecol*, 2013, 24: 1572–1578 (in Chinese with English abstract)
- [24] Eagle A J, Bird J A, Horwath W R. Rice yield and nitrogen efficiency under alternative straw management practices. *Agron J*, 2000, 92: 1096–1103
- [25] Chaves B, Neve D S, Boeckx P, Berko C, Cleempot O V, Hofman G. Manipulating the N release from ¹⁵N labeled celery residues by using straw and vinasses. *Soil Biol Biochem*, 2006, 38: 2244–2254
- [26] 刘立军, 桑大志, 刘翠莲, 王志琴, 杨建昌, 朱庆森. 实时实地氮肥管理对水稻产量和氮素利用率的影响. 中国农业科学, 2003, 36: 1456–1461
- Liu L J, Sang D Z, Liu C L, Wang Z Q, Yang J C, Zhu Q S. Effect of real-time and site-special nutrient management on rice yield and N use efficiency. *Sci Agric Sin*, 2003, 36: 1456–1461 (in Chinese with English abstract)
- [27] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 孔丽丽, 秦裕波, 李前, 王立春. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响. 植物营养与肥料学报, 2014, 20: 1110–1118
- Xie J G, Hou Y P, Yin C X, Kong L L, Qin Y B, Li Q, Wang L C. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20: 1110–1118 (in Chinese with English abstract)
- [28] 袁东海, 王兆骞, 郭新波, 陈新, 张如良. 红壤小流域不同利用方式土壤钾素流失特征研究. 水土保持通报, 2003, 23(3): 16–20
- Yuan D H, Wang Z Q, Guo X B, Chen X, Zhang R L. A study on principle of potassium loss under different land use patterns in red soil watershed. *Bull Soil Water Conserv*, 2003, 23(3): 16–20 (in Chinese with English abstract)
- [29] 王宏庭, 金继运, 王斌, 赵萍萍. 山西褐土长期施钾和秸秆还田对冬小麦产量和钾素平衡的影响. 植物营养与肥料学报,

- 2010, 16: 801–808
Wang H T, Jin J Y, Wang B, Zhao P P. Effects of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutr Fert Sci*, 2010, 16: 801–808 (in Chinese with English abstract)
- [30] 孟琳, 张小莉, 蒋小芳, 黄启为, 徐阳春, 杨兴明, 沈其荣. 有机肥料氮替代部分无机氮对水稻产量的影响及替代率研究. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15: 290–296
Meng L, Zhang X L, Jiang X F, Huang Q W, Xu Y C, Yang X M, Shen Q R. Effects of partial mineral nitrogen substitution by organic fertilizer nitrogen on the yield of rice grains and its proper substitution rate. *Plant Nutr Fert Sci*, 2009, 15: 290–296 (in Chinese with English abstract)
- [31] Dobermann A, Dawe D, Rotter R P, Cassman K G. Reversal of rice yield decline in a long-term continuous cropping experiment. *Agron J*, 2000, 92: 633–643
- [32] 曾研华, 吴建富, 潘晓华, 石庆华, 朱德峰. 稻草原位还田对双季稻田土壤理化与生物学性状的影响. *水土保持学报*, 2013, 27: 150–155
Zeng Y H, Wu J F, Pan X H, Shi Q H, Zhu D F. Effects of rice straw incorporation on soil physical, chemical and biological properties in double cropping paddy fields. *J Soil Water Conserv*, 2013, 27: 150–155 (in Chinese with English abstract)
- [33] Sommerfeldt T G, Chang C, Entz T. Long-term annual manure applications increase soil organic matter and nitrogen, and decrease carbon to nitrogen ratio. *Soil Soc Am J*, 1988, 52: 1668–1672
- [34] 杨生茂, 李凤民, 索东让, 郭天文, 汪建国, 孙炳玲, 金绍龄. 长期施肥对绿洲农田土壤生产力及土壤硝态氮积累的影响. *中国农业科学*, 2005, 38: 2043–2052
Yang S M, Li F M, Suo D R, Guo T W, Wang J G, Sun B L, Jin S L. Effect of long-term fertilization on soil productivity and nitrate accumulation in Gansu Oasis. *Sci Agric Sin*, 2005, 38: 2043–2052 (in Chinese with English abstract)