

# 不同氮磷钾施肥方式对水稻碳、氮累积与分配的影响\*

冯 蕾<sup>1,2</sup> 童成立<sup>1\*\*</sup> 石 辉<sup>2</sup> 吴金水<sup>1</sup> 陈安磊<sup>1</sup> 周 萍<sup>1</sup>

(<sup>1</sup>中国科学院亚热带农业生态研究所农业生态系统过程重点实验室, 长沙 410125; <sup>2</sup>西安建筑科技大学环境与市政工程学院, 西安 710055)

**摘 要** 基于我国南方双季稻区 20 年长期田间定位施肥试验, 研究了不同氮磷钾施肥方式对水稻碳、氮积累与分配的影响. 结果表明: 偏施氮肥处理水稻籽实的碳、氮含量最高, 分别达到 433 和 18.9 g · kg<sup>-1</sup>. 水稻植株的碳、氮储量以氮磷钾平衡施肥(NPK)及氮磷钾基础上有机物料循环施肥处理(NPKC)最高, 其中 NPKC 和 NPK 处理籽实碳储量分别为 2015 和 1960 kg · hm<sup>-2</sup>, 茎叶碳储量分别为 2048 和 2002 kg · hm<sup>-2</sup>; 籽实氮储量分别为 80.6 和 80.5 kg · hm<sup>-2</sup>, 茎叶氮储量则以 NPK 处理最高, 为 59.3 kg · hm<sup>-2</sup>. 有机无机肥的配合施用显著增加了水稻植株体内碳和氮的累积; 与偏施氮肥处理相比, 氮磷钾的综合施用更利于水稻生长过程中碳、氮的累积与分配.

**关键词** 水稻 长期试验 生物量 碳、氮含量 施肥

**文章编号** 1001-9332(2011)10-2615-07 **中图分类号** X171 **文献标识码** A

**Effects of different nitrogen, phosphorous, and potassium fertilization modes on carbon- and nitrogen accumulation and allocation in rice plant.** FENG Lei<sup>1,2</sup>, TONG Cheng-li<sup>1</sup>, SHI Hui<sup>2</sup>, WU Jin-shui<sup>1</sup>, CHEN An-lei<sup>1</sup>, ZHOU Ping<sup>1</sup> (<sup>1</sup>Key Laboratory for Agro-ecological Processes in Subtropical Regions, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; <sup>2</sup>School of Environment and Municipal Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China). -Chin. J. Appl. Ecol., 2011, 22(10): 2615–2621.

**Abstract:** Based on a 20-year field site-specific fertilization experiment in Taoyuan Experimental Station of Agriculture Ecosystems under Chinese Ecosystem Research Network (CERN), this paper studied the effects of different fertilization modes of N, P, and K on the accumulation and allocation of C and N in rice plant. The fertilization mode N-only showed the highest C and N contents (433 g · kg<sup>-1</sup> and 18.9 g · kg<sup>-1</sup>, respectively) in rice grain, whereas the modes balanced fertilization of chemical N, P and K (NPK) and its combination with organic mature recycling (NPKC) showed the highest storage of C and N in rice plant. In treatments NPK and NPKC, the C storage in rice grain and in stem and leaf was 1960 kg · hm<sup>-2</sup> and 2015 kg · hm<sup>-2</sup>, and 2002 kg · hm<sup>-2</sup> and 2048 kg · hm<sup>-2</sup>, and the N storage in rice grain was 80.5 kg · hm<sup>-2</sup> and 80.6 kg · hm<sup>-2</sup>, respectively. Treatment NPK had the highest N storage (59.3 kg · hm<sup>-2</sup>) in stem and leaf. Balanced fertilization of chemical N, P, and K combined with organic manure recycling increased the accumulation of C and N in rice plant significantly. Comparing with applying N only, balanced fertilization of chemical N, P, and K was more favorable to the accumulation and allocation of C and N in rice plant during its growth period.

**Key words:** rice; long-term experiment; biomass; C and N contents; fertilization.

\* 国家重点基础研究发展计划项目(2010CB833501-01)、国家科技支撑计划项目(2008BAD95B02)和国家自然科学基金面上项目(40971180)资助.

\*\* 通讯作者. E-mail: tong@isa.ac.cn

2011-02-19 收稿, 2011-07-26 接受.

氮(N)、磷(P)、钾(K)是水稻3大营养元素,在水稻生长过程中具有不可忽视的作用<sup>[1]</sup>.作物吸收利用氮素与施肥模式密切相关<sup>[2-3]</sup>,不合理的施氮模式(如长期偏施氮肥)并不能有效提高水稻产量和氮肥利用率<sup>[4-5]</sup>.磷和钾两大元素对水稻的生长发育也具有重要作用.磷是核酸和核苷酸的构成成分,参与物质循环和能量代谢,是植物生长和作物产量的主要限制因子<sup>[6-7]</sup>.钾对促进水稻植株代谢功能及增强其抗逆性具有重要作用,尤其在增施氮肥和磷肥时,钾肥的作用尤为重要<sup>[8]</sup>.已有研究表明,钾可以明显提高碳、氮在作物各器官的转移量和转移率<sup>[9]</sup>.可见,合理的肥料配比不仅能提高稻田土壤的肥力,同时也增加了水稻各器官的生物量,促进了碳、氮在水稻植株体内的吸收与同化,是确保水稻高产稳产的有效措施之一<sup>[10-11]</sup>.

另一方面,有机肥或秸秆还田配合化肥施用有利于作物对养分的吸收利用.Xu等<sup>[12]</sup>研究表明,在稻麦轮作系统中利用小麦秸秆还田与氮肥结合能有效促进水稻植株对氮、磷和钾元素的吸收利用.尹春梅等<sup>[13]</sup>研究表明,在单施化肥的基础上添加有机肥促进了稻田土壤有机质和氮素的积累,并通过可持续性指数分析得出,氮素的可持续性对化肥的依赖性较大,而磷、钾养分的可持续性对有机肥的依赖性较大.在氮素充足的情况下,植物基因蛋白较丰富,每单位氮素能够吸收同化更多的碳,从而增加植株生物量及碳在植株体内的积累<sup>[14]</sup>.

以往有关稻田生态系统碳、氮循环的研究,主要集中在土壤碳、氮积累和稻田温室气体的排放等方面<sup>[15-17]</sup>.而有关水稻植株的碳、氮固持量及其特征,以及水稻植株碳、氮储量对施肥方式的响应有待深入研究.本课题组前期研究表明,等氮输入下,有机无机肥配施更利于水稻植株对氮素的吸收和碳、氮积累<sup>[18]</sup>,但对于不同氮磷钾水平下不同施肥模式对水稻植株碳、氮积累与分配的影响还有待进一步研究.本文基于我国南方双季稻区长期定位施肥试验,研究了不同氮磷钾施用水平及不同施肥方式下水稻植株的碳、氮含量及储量的变化规律,以期为我国南方稻田生态系统优化施肥管理模式提供理论依据.

## 1 材料与方法

### 1.1 试验地点

稻田长期定位试验位于中国科学院桃源农业生态站(111°33'N,28°55'E).试验始于1990年,土壤为第四纪红色粘土发育的水稻土.大田试验前

(1990年)土壤基础肥力:有机碳15.4 g·kg<sup>-1</sup>,全氮1.88 g·kg<sup>-1</sup>,全磷0.60 g·kg<sup>-1</sup>,全钾12.8 g·kg<sup>-1</sup>,速效磷16.2 mg·kg<sup>-1</sup>,速效钾74.3 mg·kg<sup>-1</sup>,土壤pH值5.7.

### 1.2 试验设计

该长期定位试验共设置10个施肥处理,本研究选取其中的7个处理进行,分别为:1)无肥对照(CK);2)有机物循环(OM);3)减量施肥,即与NPK处理相比,减少1/3化学氮肥和磷肥、减少2/3化学钾肥和1/2秸秆还田(NKS);4)化学氮肥(N);5)化学氮肥+有机物循环(NC);6)NPK;7)NPK+有机物循环(NPKC).每个处理设3次重复,随机区组排列,小区面积为4.1 m×8.1 m,1990年至今,种植制度为水稻-水稻-绿肥.其中有机物循环利用是指早、晚稻秸秆全量还田,收获稻谷的50%(1994年前为80%)及全部空秕谷作饲料喂猪,所得猪粪尿还田,冬季种植紫云英肥田.无有机物循环利用处理中水稻秸秆全部移出小区,稻谷和空秕谷中的养分不循环利用,且稻田冬季无绿肥,板田越冬.氮、磷、钾肥分别为尿素、普通过磷酸钙和氯化钾.1990—1996年,氮、磷、钾肥的施用量分别为262.5 kg N·hm<sup>-2</sup>、39.3 kg P·hm<sup>-2</sup>和137.0 kg K·hm<sup>-2</sup>;1997年至今,氮、磷、钾肥的施用量分别为182.3 kg N·hm<sup>-2</sup>、39.3 kg P·hm<sup>-2</sup>和197.2 kg K·hm<sup>-2</sup>.1990—2009年的年均养分投入量见表1,其中循环处理收获稻谷的50%及全部空秕谷喂猪和猪粪尿还田环节从2006年起取消;循环处理稻草和绿肥全量还田;NKS处理的绿肥全量还田、稻草半量还田;无循环处理不播种绿肥,收获的稻草全部移出小区.本研究选用该长期定位试验2009年的晚稻为研究对象.晚稻品种为杂交稻T优207,晚稻播种日期为6月17日,播种量为150 kg·hm<sup>-2</sup>,移栽日期为7月21日,收获日期为10月10日.

### 1.3 测定项目与方法

**1.3.1 生物量测定** 在晚稻收获期采集水稻植株样品,每个处理小区3个重复样方,每个样方采集2兜.具体方法为:在所取植株的行、株距中间位置垂直下切20 cm,把取出的带土根体放入尼龙网袋后在大田整体清洗,将洗去浮土的根系带回实验室用自来水冲洗,然后再用去离子水冲洗.从根系底端到与地面相平处将根系与地上部分分开(水稻植株冲洗干净后,地下与地上部分有明显的分界点,埋在地下部分呈白色).将植株分为根、茎叶、籽实3个部分,在105℃条件下杀青30 min,然后65℃下烘干

表 1 1990—2009 年各处理年均养分输入量  
Table 1 Average annual nutrient input during 1990–2009 with different treatments (kg · hm<sup>-2</sup>)

处理 Treatment	绿肥 Green manure	猪粪 Pig manure			化肥 Chemical fertilizer			总量 Total amount		
	N	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—	—
OM	54.2	24.3	11.6	8.4	—	—	—	78.5	11.6	8.4
NKS	66.0	—	—	—	145.3	34.9	57.6	211.3	34.9	57.6
N	—	—	—	—	217.9	—	—	217.9	—	—
NC	76.6	36.2	17.0	13.6	217.9	—	—	330.7	17.0	13.6
NPK	—	—	—	—	217.9	52.4	172.7	217.9	52.4	172.7
NPKC	76.6	36.2	17.0	13.6	217.9	52.4	172.7	330.7	69.4	186.3

到恒量,测定其干物质质量.

1.3.2 碳、氮测定 碳用碳氮元素分析仪 (Vario MAX CN, Elementar Co., Germany) 测定;氮采用硫酸-加速剂消煮,流动注射仪 (FIAstar 5000, FOSS Company, Sweden) 测定. 水稻植株中碳、氮储量按下列公式计算:

$$C_{store} = CB$$

$$N_{store} = NB$$

$$R = C/N$$

式中: $C_{store}$  和  $N_{store}$  分别表示水稻植株的碳、氮储量 (kg · hm<sup>-2</sup>); $B$  表示植株生物量 (t · hm<sup>-2</sup>); $C$  和  $N$  分别表示水稻植株中碳、氮含量 (g · kg<sup>-1</sup>); $R$  表示水稻植株的碳氮比.

1.4 数据处理

所有统计分析均在 SAS 软件(6.12 版本)平台实现. 采用单因素方差分析 (Duncan 检验) 比较处理间和水稻植株各部分间的差异显著性.

2 结果与分析

2.1 水稻产量及生物量分配

与 CK 相比,偏施 N 肥(N)处理未显著提高水稻产量,而其他施肥处理均显著增加,平均增幅 65% (图 1). 以 NPK 及其与有机肥配施处理 (NPKC) 的水稻产量较高,分别达 4.75 和 4.99 t · hm<sup>-2</sup>. NPKC 处理水稻产量比 NC 处理高 32%; NPK 处理水稻产量比 N 处理高 64%.

不同施肥处理间水稻总生物量的变化规律与产量类似(图 1),以 NPKC、NPK 和 NKS 处理水稻总生物量较高,分别为 13.09、12.58 和 11.75 t · hm<sup>-2</sup>,显著高于其他处理. CK 和 N 处理水稻总生物量处于较低水平,分别仅为 7.44 和 8.22 t · hm<sup>-2</sup>.

由表 2 可以看出,晚稻地上部生物量占总生物量的 90% 左右,其中,籽实生物量占总生物量的 42.7% ~ 47.6%,而根生物量只占总生物量的

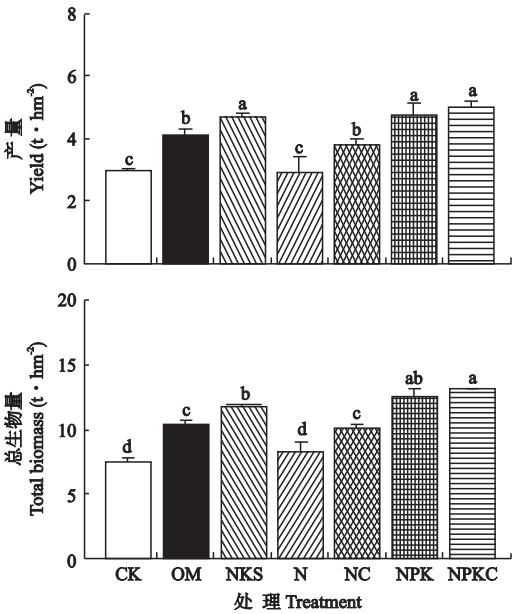


图 1 施肥对水稻产量和总生物量的影响  
Fig. 1 Effects of fertilization on yield and total biomass of rice. 不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

9.8% ~ 13.6%. 除 CK 处理外,偏施 N 肥(N 和 NC 处理)显著降低了籽实在总生物量中的比例,而根系在总生物量中的比例显著高于平衡施肥或其与有机肥配施处理(NKS、NPK 和 NPKC).

2.2 施肥对水稻植株碳、氮含量的影响

从图 2 可以看出,水稻根和茎叶的碳含量在不同施肥处理间差异不显著,而籽实碳含量在部分施肥处理间差异显著,以 N 处理的籽实碳含量最高,为 433 g · kg<sup>-1</sup>;其次为 CK、OM 和 NC 处理,分别为 424、424 和 421 g · kg<sup>-1</sup>;而 NKS 和 NPKC 处理的籽实碳含量最低. 可见,有机肥配施化肥降低了水稻籽实碳含量.

不同施肥处理对水稻植株各器官氮含量的影响较大,不同处理之间差异显著. 总体上,水稻籽实中

表 2 不同施肥处理下水稻根、茎叶和籽实生物量占总生物量的比例  
Table 2 Proportion of root, stem and leaf and grain biomass to total biomass of rice under different fertilizer treatments (%)

处理 Treatment	根 Root	茎叶 Stem and leaf	籽实 Grain
CK	12.9a	39.5c	47.6a
OM	10.8bc	41.6bc	47.6a
NKS	9.8c	43.6ab	46.6ab
N	13.7a	43.6ab	42.7c
NC	11.7b	44.6a	43.7bc
NPK	10.6bc	44.6a	44.8abc
NPKC	10.5bc	44.0ab	45.5abc

同列不同小写字母表示处理间差异显著 ( $P<0.05$ ) Different small letters in the same column meant significant difference among treatments at 0.05 level. 下同 The same below.

的氮含量普遍高于茎叶和根部,并且以 N 处理最高,达  $18.9\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ,其余各施肥处理间的籽实氮含量没有显著性差异.茎叶中的氮含量在 NPK 和 NC 处理中较高,分别为  $12.6$  和  $12.2\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ .而根部氮含量在 N 和 NC 处理中较高,分别为  $11.5$  和  $11.6\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2).

不同施肥处理下水稻植株不同器官的碳氮比(C/N)存在明显差异,以水稻籽实中的 C/N 最低( $P<0.05$ ).籽实 C/N 以 CK 处理相对较高( $28.3$ ),其余处理之间没有显著差异;而茎叶和根部 C/N 在不同施肥处理间差异较大,茎叶 C/N 以 N 处理最高( $67.6$ ),其次为 OM 处理;而根部 C/N 却在 N 处理下显著降低( $37.5$ ).此外,籽实 C/N 中,在相同的化肥投入下,添加有机物处理稍高于其对应的无有机物处理;有机肥处理中,NC 处理稍低于 NPKC 处理(图 2).

2.3 施肥对水稻植株碳、氮储量的影响

水稻碳储量主要集中在植株的地上部分,占总储量的  $87\%\sim90\%$ (表 3).与 CK 相比,NPK 平衡施肥或 NPK 配施有机肥处理均能显著提高水稻碳储

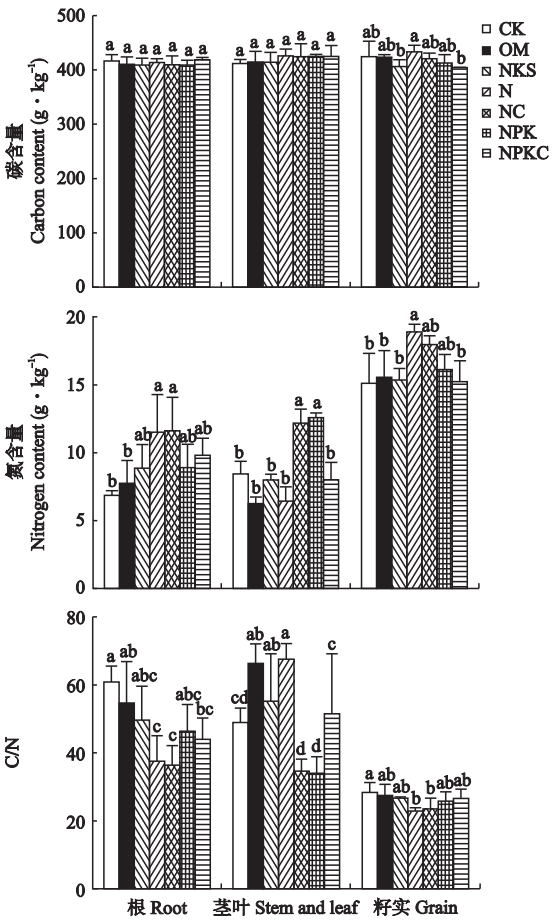


图 2 不同施肥处理下水稻植株碳、氮含量和碳氮比  
Fig. 2 C and N contents and C/N ratio of rice plants under different fertilizer treatments.

量,而偏施 N 肥处理植株碳储量的提高幅度较小.各施肥处理中,NPKC 和 NPK 处理籽实、茎叶和根中的碳储量均为最高,其籽实碳储量分别为  $2015$  和  $1960\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,茎叶分别为  $2048$  和  $2002\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ,根分别为  $480$  和  $456\text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ;而 CK 处理水稻植株各器官的碳储量均为最低.在相同的化学氮肥投入下,N 处理的水稻植株各器官碳储量低于 NC 处理;在相同的有机肥处理下,NC 处理植株各器官碳储量低于 NPKC 处理.

表 3 不同施肥处理下水稻植株的碳、氮储量  
Table 3 Storage of carbon and nitrogen of rice plants under different fertilizer treatments ( $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ )

处理 Treatment	根 Root		茎叶 Stem and leaf		籽实 Grain		合计 Total	
	C	N	C	N	C	N	C	N
CK	333c	5.5c	1011e	20.7d	1259d	45.0c	2602e	71.2e
OM	380b	7.2bc	1484c	22.4d	1736bc	63.8ab	3601c	93.5cd
NKS	402b	8.7abc	1806b	35.0c	1898ab	73.3ab	41061b	117.0bc
N	378b	10.5ab	1249d	18.9a	1254d	54.8b	28811d	84.2de
NC	411b	11.7a	1626c	46.8b	1586c	67.6ab	36241c	126.1ab
NPK	456a	10.0ab	2002a	59.3a	1960a	80.6a	44181a	150.0a
NPKC	480a	11.3a	2048a	39.8bc	2015a	80.5a	4544a	131.5ab



与水稻碳储量的分布相似,水稻氮储量也主要分布在植株的地上部分,并且施肥显著增加了水稻植株的氮储量(表3)。籽实中氮储量以 NPK 和 NPKC 处理最高,分别为  $80.6$  和  $80.5 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其次为 NC 和 NKS 处理,显著高于 N、OM 和 CK 处理。茎叶氮储量以 NPK 处理最高,为  $59.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;其次为 NC 处理,均显著高于 NKS 和 N 处理。根部氮储量以 NC 和 NPKC 处理最高,分别为  $11.6$  和  $11.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ,其次为 NPK 和 NKS 处理。可见,对于大多数施肥处理,有机肥的配合施用显著增加了水稻植株体内碳和氮的累积,并且磷、钾在水稻碳累积过程中发挥着重要作用。

### 3 讨 论

水稻对氮素的吸收利用是影响产量的一个重要因素<sup>[12]</sup>,合理的施肥是保证水稻高产的有效措施。本研究表明,在相同的施氮水平下,磷、钾两大营养元素在提高水稻产量上起重要作用。偏施氮肥或氮肥添加有机物处理下的水稻产量明显低于氮磷钾配施和氮磷钾基础上添加有机物处理(图1),平衡施肥或化肥添加有机物处理能够有效提高水稻产量。

土壤氮的供应是植物碳、氮积累与分配的主要影响因素之一<sup>[5]</sup>。从水稻植株碳、氮储量来看,水稻碳、氮储量大部分积累在植株的地上部分,籽实碳储量占整个植株碳储量的  $44\% \sim 48\%$ ,茎叶碳储量占  $39\% \sim 45\%$ ;籽实氮储量占整个植株氮储量的  $54\% \sim 68\%$ ,茎叶氮储量占  $22\% \sim 37\%$ ;表明水稻的地上部分,尤其籽实是水稻碳、氮重要的汇。长期不同养分投入对水稻植株中碳、氮含量及储量的影响较大。在 NPK 减量施肥处理下,水稻根、茎叶和籽实中的氮含量普遍较低,甚至低于无肥基础上的有机物处理。究其原因:一方面,可能是由于长期采用这种施肥方式引起土壤养分结构的变化,使土壤中速效养分减少,从而降低其向植株地上部分的传输;另一方面,有机肥的分解是一个漫长的过程,长期施用有机肥对植株氮素吸收利用发挥着重要作用。已有研究表明,短期施肥条件下,施用无机肥更能有效促进水稻对氮素的吸收<sup>[19-21]</sup>;在长期条件下,与偏施氮肥或单施化肥处理相比,有机肥与化肥配施更有利于稻田土壤氮素的矿化,促进了水稻植株对氮素的吸收和利用<sup>[22-23]</sup>。尽管氮磷钾处理和氮磷钾配合有机物处理水稻籽实的碳、氮含量均低于偏施氮肥处理,但这两种处理下水稻植株(包括籽实、茎叶、根)的碳、氮储量明显提高,显著高于对照和偏

施氮肥处理。这表明添加有机物能够有效提高水稻对碳和氮的累积及其在籽实中的分配。

笔者之前的研究亦已表明<sup>[18]</sup>,在等氮投入的前提下,与单施化肥处理相比,有机肥与化肥配施处理均提高了水稻植株各个器官的碳、氮储量,促进了碳、氮从根部向地上部分的有效转运。需要注意的是,籽实碳、氮储量在 NPK 和 NPKC 处理中最高;而在相同的施氮量下,N 处理籽实碳、氮储量均低于 NPK 处理;NC 处理籽实碳、氮储量均低于 NPKC 处理。表明除氮素外磷钾两大元素对水稻生长过程中碳、氮的累积和分配起重要作用。这主要是因为植株体内氮磷钾的累积和代谢与碳累积之间存在着直接或间接的关系。如 Osaki 等<sup>[24-25]</sup>研究表明,在植株生长过程中碳的同化与植株体内氮的累积存在相关性,并且碳、氮平衡对叶片光合作用及维持较高的光合速率具有重要作用;而在磷素供应不足条件下,植物叶片的扩展受到显著影响,从而降低了叶片同化面积并严重限制了光合作用的总固定碳量<sup>[26]</sup>。由于水稻具有生长周期短、生物量大等特点,相对于其他陆地生态系统,具有较高的固碳持氮潜力<sup>[27-28]</sup>。因此,合理的养分投入不仅提高了稻田生产力,而且在提高氮素利用率的同时增加了植株的固碳潜力,甚至可减少因施肥过多而造成的氮素流失等问题。

此外,农作物秸秆是一种含碳丰富的能源物质,秸秆还田对保持土壤肥力,提高土壤碳、氮储量具有重要作用<sup>[29]</sup>。本研究各处理在秸秆等量还田的前提下,若不考虑氮素挥发等损失,仅晚稻秸秆全量还田可向土壤归还的氮量达  $20.7 \sim 59.3 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$ ;长期施肥研究结果表明,含有较高碳、氮储量的水稻植株通过秸秆还田不仅能有效促进下一季水稻植株体内的碳、氮储量,而且能减少下一季水稻种植过程中的化肥投入。Xu 等<sup>[12]</sup>研究表明,秸秆还田后水稻氮肥利用效率增加,并且不同氮肥处理间表现一致,认为其原因是由于秸秆还田增强了根系和叶片的硝酸还原酶活性<sup>[30]</sup>。一方面,秸秆还田使土壤在水稻生育后期能够提供足够可利用的养分,并且抽穗及籽粒灌浆后期根系活性明显增强,吸收利用养分的能力明显提高;另外,秸秆还田增加了籽粒库的活性,增强了库对养分的吸收,能够促进营养物质向籽粒库的转移<sup>[31]</sup>。

### 4 结 论

稻田中有机肥的循环利用能够有效提高水稻籽实产量和总生物量,但施肥方式对水稻生物量分配

的影响较小. 氮投入较高的施肥处理(如 NC 处理)籽实中氮含量也较高;而在化学氮素投入水平相同的条件下,添加有机物处理(NC、NPKC)水稻植株体内碳、氮储量普遍高于无有机物处理. 籽实碳、氮储量在 NPK 处理中较高,而在相同的氮投入水平下,偏施化学氮肥处理籽实碳、氮储量低于 NPK 处理,NC 处理籽实碳、氮储量低于 NPKC 处理. 因此,除氮素外,磷、钾两大元素对水稻生长过程中碳、氮的积累与分配也起重要作用.

## 参考文献

- [1] Zhang YH, Fan JB, Zhang YL, *et al.* N accumulation and translocation in four Japonica rice cultivars at different N rates. *Pedosphere*, 2007, **17**: 792–800
- [2] Jiang LG, Dai TB, Jiang D, *et al.* Characterizing physiological N-use efficiency as influenced by nitrogen management in three rice cultivars. *Field Crops Research*, 2004, **88**: 239–250
- [3] Chen Y, Wu CY, Tang X, *et al.* Fate of nitrogen from organic and inorganic sources in rice-wheat rotation cropping system. *Agricultural Sciences in China*, 2010, **9**: 1017–1025
- [4] She D-L (余冬立), Wang K-R (王凯荣), Xie X-L (谢小立), *et al.* Effect of application of N fertilizer and incorporation of rice straw on soil nitrogen supply and rice yield. *Journal of Ecology and Rural Environment* (生态与农村环境学报), 2006, **22**(2): 16–20, 44 (in Chinese)
- [5] Chen A-L (陈安磊), Xie X-L (谢小立), Wen W-Y (文菀玉), *et al.* Effect of long term fertilization on soil profile nitrogen storage in a reddish paddy soil. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2010, **30**(18): 5059–5065 (in Chinese)
- [6] Vance CP, Uhde-Stone C, Allan DL. Phosphorus acquisition and use: Critical adaptations by plants for securing a nonrenewable resource. *New Phytologist*, 2003, **157**: 423–447
- [7] Sepaskhah AR, Barzegar M. Yield, water and nitrogen-use response of rice to zeolite and nitrogen fertilization in a semi-arid environment. *Agricultural Water Management*, 2010, **98**: 38–44
- [8] Li H (李 华), Yang X-E (杨肖娥), Luo A-C (罗安程). Genotypic difference in N and K accumulation under different N sources and K levels in rice. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2002, **16**(1): 86–88 (in Chinese)
- [9] Liu X-Y (刘晓燕), He P (何 萍), Jin J-Y (金继运). Advances in effect of potassium nutrition on plant disease resistance and its mechanism. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2006, **12**(3): 445–450 (in Chinese)
- [10] Jiang L-G (江立庚), Gan X-Q (甘秀芹), Wei S-Q (韦善清), *et al.* Accumulation pattern of dry matter, nitrogen, phosphorus, potassium and silicon in rice genotypes and their relationships. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2004, **15**(2): 226–230 (in Chinese)
- [11] Xie F (谢 芳), Han X-R (韩晓日), Yang J-F (杨劲峰), *et al.* Study on effect of various free-plowing and throwing super-rice seedling fertilization technique. *Soil and Fertilizer Sciences in China* (中国土壤与肥料), 2010(4): 24–25 (in Chinese)
- [12] Xu GW, Yang LN, Zhang H, *et al.* Absorption and utilization of nitrogen, phosphorus, and potassium in rice plants under site-specific nitrogen management and wheat-residue incorporation. *Acta Agronomica Sinica*, 2008, **34**: 1424–1434
- [13] Yin C-M (尹春梅), Xie X-L (谢小立), Zhong S-L (钟石仑). Effect of different fertilizer application on sustainable soil fertility and rice production in red soil paddy ecosystem. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2009, **29**(6): 3059–3065 (in Chinese)
- [14] Lawlor DW. Carbon and nitrogen assimilation in relation to yield: Mechanisms are the key to understanding production systems. *Journal of Experimental Botany*, 2002, **53**: 773–787
- [15] Zhu Y-L (朱咏莉), Wu J-S (吴金水), Tong C-L (童成立), *et al.* Response of CO<sub>2</sub> fluxes to light intensity and temperature in rice paddy field. *Environmental Science* (环境科学), 2008, **29**(4): 1040–1044 (in Chinese)
- [16] Zong H-Y (宗海英), Wang K-R (王凯荣), Xie X-L (谢小立). Effect of long-term fertilization on soil organic nitrogen components in paddy soil derived from red earth. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2008, **19**(8): 1721–1726 (in Chinese)
- [17] Wang L (王 亮), Zhu J-G (朱建国), Zeng Q (曾青), *et al.* Responses of nitrogen metabolism in rice plant to elevated atmosphere CO<sub>2</sub>: A research review. *Soils* (土壤), 2010, **42**(3): 344–351 (in Chinese)
- [18] Feng L (冯 蕾), Tong C-L (童成立), Shi H (石辉), *et al.* Effect of fertilization on the absorption, partition and accumulation of carbon and nitrogen of rice under the equal N conditions. *Environmental Science* (环境科学), 2011, **32**(3): 206–212 (in Chinese)
- [19] Haynes RJ, Naidu R. Influence of lime, fertilizer and manures applications on soil organic matter content and soil physical conditions: A review. *Nutrient Cycling in*

- Agroecosystems*, 1998, **51**: 123–137
- [20] Suo D-R (索东让). Combined fertilization of chemical and organic fertilizers in a long-term position experiment. *Agricultural Research in the Arid Areas* (干旱地区农业研究), 2005, **23**(2): 71–75 (in Chinese)
- [21] Levang BZ, Biondini ME. Growth rate, root development and nutrient uptake of 55 plant species from the Great Plains Grasslands, USA. *Plant Ecology*, 2002, **165**: 117–144
- [22] Hao X-H (郝晓晖), Liu S-L (刘守龙), Tong C-L (童成立), *et al.* The influence of long-term fertilization on microbial biomass nitrogen and organic nitrogen fractions in paddy soil. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2007, **40**(4): 757–764 (in Chinese)
- [23] Sun F-X (孙凤霞), Zhang W-H (张伟华), Xu M-G (徐明岗), *et al.* Effects of long-term fertilization on microbial biomass carbon and nitrogen and on carbon source utilization of microbes in a red soil. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2010, **21**(11): 2792–2798 (in Chinese)
- [24] Osaki M, Shinano T, Tadano T. Carbon-nitrogen interaction model in field crop production. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1992, **38**: 553–564
- [25] Osaki M, Zheng TG, Konno K, *et al.* Carbon-nitrogen interaction related to P, K, Ca, and Mg nutrients in field crops. *Soil Science and Plant Nutrition*, 1996, **42**: 539–552
- [26] Mollier A, Pellerin S. Maize root system growth and development as influenced by phosphorus deficiency. *Journal of Experimental Botany*, 1999, **50**: 487–497
- [27] Xiang W-H (项文化), Huang Z-H (黄志宏), Yan W-D (闫文德), *et al.* Review on coupling of interactive functions between carbon and nitrogen cycles in forest ecosystems. *Acta Ecologica Sinica* (生态学报), 2006, **26**(7): 2365–2372 (in Chinese)
- [28] Wang W (王 妮), Peng S-S (彭书时), Fang J-Y (方精云). Biomass distribution of natural grasslands and its response to climate change in north China. *Arid Zone Research* (干旱区研究), 2008, **25**(1): 90–97 (in Chinese)
- [29] Zhou W-J (周卫军), Wang K-R (王凯荣), Hao J-J (郝金菊), *et al.* Effects of organic materials cyclings on soil organic carbon turnover in a red soil paddy ecosystem. *Chinese Journal of Ecology* (生态学杂志), 2006, **25**(2): 140–144 (in Chinese)
- [30] Yang C-M (杨长明), Yang L-Z (杨林章), Yan T-M (颜廷梅), *et al.* Effect of nutrient regimes on dry matter production and nutrient uptake and distribution by rice plant. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2004, **35**(2): 199–202 (in Chinese)
- [31] Sheng H-J (盛海君), Zhou C-L (周春霖), Shen Q-R (沈其荣), *et al.* Growth and developmental characteristics of rice cultivated in aerobic soil mulched with straw. *Chinese Journal of Rice Science* (中国水稻科学), 2004, **18**(1): 53–58 (in Chinese)

---

作者简介 冯 蕾,女,1986年生,硕士研究生.主要从事生态环境研究. E-mail: sxfilllei@163.com

责任编辑 张凤丽

---