

## 紫云英与化肥配施对双季稻产量及氮钾平衡的影响

廖海燕<sup>1</sup>, 鲁艳红<sup>2,3</sup>, 廖育林<sup>2,3</sup>, 聂军<sup>2,3\*</sup>, 周兴<sup>2,3</sup>, 谢坚<sup>2,3</sup>, 杨曾平<sup>2,3</sup>

(1.湖南第一师范学院教育科学学院, 湖南 长沙 410205; 2.湖南省土壤肥料研究所, 湖南 长沙 410125; 3.农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南 长沙 410125)

**摘 要:**采用 7 年定位大田试验, 研究紫云英与化肥配施对双季稻种植制度下水稻产量, 产量构成因素, 植株氮、钾吸收量及种植体系中氮、钾平衡的影响。结果表明: 紫云英与化肥合理配施可提高早、晚稻产量, 80%化肥与 20%紫云英配施(20%GM)处理的增产效果最佳, 早、晚稻两季总产较施 100%化肥(100%CF)处理增产 8.3%, 其次为 60%化肥配施 40%紫云英(40%GM)处理, 增产 6.0%; 有效穗和每穗实粒数增加是水稻增产的主要原因。紫云英与化肥合理配施可促进早、晚稻对氮素和钾素的吸收, 20%GM 和 40%GM 早、晚稻稻谷和稻草的氮素、钾素积累量均较 100%CF 的高。100%CF、20%GM 和 40%GM 的氮素表观平衡为盈余。所有处理的钾素表观平衡均呈亏缺状态, 其中 40%GM 的钾素亏缺量最大, 其次为 20%GM。综合考虑作物产量效应、养分吸收利用及土壤肥力维持, 在该区域双季稻种植体系中, 紫云英所积累的氮、钾素量可替代 20%~40%的化学氮、钾素量。

**关 键 词:** 双季稻; 紫云英; 化肥; 产量; 氮素平衡; 钾素平衡

中图分类号: S511.42

文献标志码: A

文章编号: 1007-1032(2017)02-0129-06

## Effects of combined application of chinese milk vetch with chemical fertilizer on yield and the balance of nitrogen and potassium in double-cropping rice system

LIAO Haiyan<sup>1</sup>, LU Yanhong<sup>2,3</sup>, LIAO Yulin<sup>2,3</sup>, NIE Jun<sup>2,3\*</sup>, ZHOU Xing<sup>2,3</sup>, XIE Jian<sup>2,3</sup>, YANG Zengping<sup>2,3</sup>

(1.College of Education Science, Hunan First Normal University, Changsha 410205, China; 2.Soil and Fertilizer Institute of Hunan Province, Changsha 410125, China; 3.Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation (Hunan), Ministry of Agriculture of China, Changsha 410125, China)

**Abstract:** The 7-year field experiment was conducted to study the effects of applying different proportion of combination *Astragalus sincus* with chemical fertilizer on double rice yield, yield component, absorption of nitrogen and potassium and their apparent balance. Results showed that rational proportion of applying combined *Astragalus sincus* with chemical fertilizer could increase yield of both early and late rice. Compared to 100% CF treatment, the total yield from early and late rice was the highest in treatment with 20% GM, which increased by 8.3%, followed by the treatment with 40% GM, increased by 6.0%. The main reason for rice yield increase was derived from the increase of effective panicles per unit area, grain per panicle as well as plant height. Rational proportion of applying combined *Astragalus sincus* with chemical fertilizer could increase rice absorption for nitrogen and potassium. The accumulation of nitrogen and potassium whether in rice grain, rice straw or in the total rice plant in treatments of 20% GM and 40% GM were higher than that in treatment of 100% CF. Apparent nitrogen balance was surplus in treatments of 100% CF, 20% GM and 40% GM, whereas, apparent potassium balance was deficient in all the treatments, it was extreme deficient in treatment of 40% GM, followed by the treatment of 20% GM. Comprehensively taken the crop yield response, nutrient utilization as well as soil fertility cultivation into consideration, chemical fertilizer of nitrogen and potassium could be cut down 20%–40% by

收稿日期: 2016-05-09

修回日期: 2016-06-16

基金项目: 国家公益性行业(农业)科研专项(201203013, 201103005); 湖南省自然科学基金项目(2016JJ6063)

作者简介: 廖海燕(1974—), 女, 湖南邵阳人, 副教授, 主要从事基础生命科学研究, laohaiyan714@sina.com; \*通信作者, 聂军, 男, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与土壤培肥研究, junnie@foxmail.com

means of increase the application of *Astragalus sincus*.

**Keywords:** double rice; *Astragalus sincus*; chemical fertilizer; yield; apparent balance of N; apparent balance of K

化肥对作物产量的提高可起到一定的作用,但随着化肥的大量施用,作物增产效率下降,环境问题日益突出<sup>[1-2]</sup>。紫云英(*Astragalus sincus*)是中国南方稻田的一种优质绿肥资源,具有固氮富钾功能,其施用不仅可提高水稻产量,改善土壤理化性状<sup>[3]</sup>,且能长效地提供一定的氮、磷、钾和有机质等养分<sup>[4]</sup>。以紫云英绿肥替代部分化肥,不仅能降低种植成本,而且可减少农业面源污染,有利于维持农业的可持续发展。

提升耕地基础地力,用耕地内在养分替代外来化肥投入,在保持作物产量和维持土壤地力的基础上减少化肥投入,对提高资源利用效率和减少环境负担具有重要意义。用紫云英替代部分化肥是最重要、最有效的途径。关于紫云英利用对水稻产量和土壤肥力影响的研究较多<sup>[5-6]</sup>,但关于紫云英与化肥配施比例的研究尚少。本研究中采用连续 7 年定位试验,探讨紫云英与化肥配施条件下的水稻产量,水稻氮、钾吸收特性及双季稻种植体系中的氮、钾平衡特征,以期对双季稻种植中化肥减量施用和绿肥合理施用提供参考依据。

## 1 材料和方法

### 1.1 材料

早稻品种(组合)为湘早籼 45 号;晚稻品种(组合)为黄华占。

### 1.2 试验地点及供试土壤

试验于 2009—2015 年在湖南省南县三仙湖乡万元桥村(N 29°13', E 112°28', 海拔高度 30 m)进行。试验区属亚热带湿润气候,年均降水量 1 238 mm,年均气温 16.6 °C,全年日照时间 1 775 h。供试土壤为河湖沉积物母质发育的紫潮土。试验前耕层 0~20 cm 土壤 pH 7.78,有机质含量 47.9 g/kg,土壤全氮、全磷、全钾含量分别为 2.52、1.05、20.9 g/kg,碱解氮、有效磷、速效钾含量分别为 219、23.4、92.3 mg/kg。

### 1.3 试验设计

共设 6 个试验处理:1)CK(不施紫云英,早、晚

稻均不施化肥);2)100%CF(100%化肥,不施紫云英,早、晚稻各施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>);3)20%GM(施紫云英,早稻施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>,施入 N 中的 80%来自化肥,其余 20%来自紫云英,施入紫云英不足的钾由化肥补足,晚稻化肥施用量同早稻);4)40%GM(施紫云英,早稻施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>,施入 N 中的 60%来自化肥,其余 40%来自紫云英,施入紫云英不足的钾由化肥补足,晚稻化肥施用量同早稻);5)60%GM(施紫云英,早稻施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>,施入 N 中的 40%来自化肥,60%来自紫云英,施入紫云英不足的钾由化肥补足,晚稻化肥施用量同早稻);6)80%GM(施紫云英,早稻施 N 150 kg/hm<sup>2</sup>, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 75 kg/hm<sup>2</sup>, K<sub>2</sub>O 120 kg/hm<sup>2</sup>,施入 N 中的 20%来自化肥,80%来自紫云英,施入紫云英不足的钾由化肥补足)。晚稻化肥施用量同早稻。

紫云英于早稻移栽前一周翻压。氮肥为尿素,50%为基肥,余下 50%为分蘖肥,于抛秧后 10 d 施用。磷肥为过磷酸钙,钾肥为氯化钾,均用作基肥一次性施入。各处理基肥部分均于抛秧前 1 d 施入,施入后立即用铁齿耙耙入 5 cm 深的土层内。每处理 3 次重复。小区面积 20 m<sup>2</sup>。随机区组排列。小区间用高 20 cm、宽 30 cm 的泥埂覆膜隔离,实行单独排灌。为获得的数据与实际生产情况相一致,试验田采用大田常规管理模式。

### 1.4 样品采集与测定

试验开始前采集 0~20 cm 土层基础土样并测定其基本理化性状。采集每季秧苗样,测定其氮、钾养分含量。每季水稻各小区单打单晒,分别测产。于早、晚稻成熟期采集植株样品用于考种,并测定其氮、钾养分含量。于田间灌溉入水口处采集灌溉水样品,并分析其全氮、全钾含量。各指标均采用常规分析法<sup>[7]</sup>测定。

### 1.5 数据处理

用 Microsoft Excel 2003 和 DPS 7.5 等数据处理系统分析数据。

2 结果与分析

2.1 各处理早、晚稻的产量和产量构成因素

2.1.1 早、晚稻产量

由表 1 可见，早稻、晚稻产量和早、晚稻总产量均以 20%GM 的最高，其次为 40%GM 的，与 100%CF 相比，早稻分别增产 8.9%和 6.4%，晚稻

分别增产 7.8%和 5.6%，两季总产量分别增产 8.3%和 6.0%。60%GM 的早稻产量和全年两季总产量略低于 100%CF 的，晚稻产量略高于 100%CF 的，但两处理间的差异无统计学意义。所有施肥处理的早、晚稻产量及全年总产量均以 80%GM 的最低，其早、晚稻产量及全年总产量较 100%CF 分别减产 8.1%、7.7%和 7.9%。

表 1 各处理水稻的产量分析

| Table 1 Rice yield of different fertilizer treatments |                           |         |          |           |      |      |
|-------------------------------------------------------|---------------------------|---------|----------|-----------|------|------|
| 处理                                                    | 产量/(kg·hm <sup>-2</sup> ) |         |          | 较 CK 增加/% |      |      |
|                                                       | 早稻                        | 晚稻      | 全年       | 早稻        | 晚稻   | 全年   |
| CK                                                    | 3 402c                    | 5 666b  | 9 068c   |           |      |      |
| 100%CF                                                | 5 399ab                   | 7 040a  | 12 439ab | 58.7      | 24.2 | 37.2 |
| 20%GM                                                 | 5 879a                    | 7 587a  | 13 466a  | 72.8      | 33.9 | 48.5 |
| 40%GM                                                 | 5 745a                    | 7 434a  | 13 179 a | 68.9      | 31.2 | 45.3 |
| 60%GM                                                 | 5 358ab                   | 7 047a  | 12 406ab | 57.5      | 24.4 | 36.8 |
| 80%GM                                                 | 4 960b                    | 6 495ab | 11 455b  | 45.8      | 14.6 | 26.3 |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.1.2 早、晚稻的产量构成因素

由表 2 可见，各施肥处理的早、晚稻株高和有效穗均高于 CK 的，晚稻施肥处理的每穗实粒数和千粒质量也高于 CK 的。各施肥处理中，早、晚稻

产量较高处理(20%GM 和 40%GM)的株高和有效穗均较高 ,20%GM 和 40%GM 的晚稻每穗实粒数和结实率也高于其他施肥处理的。

表 2 各处理早、晚稻的产量构成因素

| Table 2 Yield components of early and late rice with different fertilizer treatments |       |        |         |       |       |       |       |      |        |        |
|--------------------------------------------------------------------------------------|-------|--------|---------|-------|-------|-------|-------|------|--------|--------|
| 处理                                                                                   | 株高/cm |        | 每蔸有效穗/数 |       | 每穗实粒数 |       | 结实率/% |      | 千粒质量/g |        |
|                                                                                      | 早稻    | 晚稻     | 早稻      | 晚稻    | 早稻    | 晚稻    | 早稻    | 晚稻   | 早稻     | 晚稻     |
| CK                                                                                   | 74.0a | 77.8b  | 6.2b    | 10.2a | 80.4  | 85.7  | 85.1  | 86.5 | 27.5bc | 23.8d  |
| 100%CF                                                                               | 78.4a | 85.6a  | 9.0a    | 12.6a | 80.0  | 102.1 | 79.1  | 86.4 | 27.4c  | 24.7c  |
| 20%GM                                                                                | 80.8a | 87.6a  | 9.8a    | 13.4a | 81.5  | 105.5 | 80.1  | 88.3 | 27.6a  | 25.0bc |
| 40%GM                                                                                | 79.4a | 85.0a  | 9.8a    | 12.6a | 75.6  | 104.4 | 79.3  | 88.0 | 27.3d  | 25.3b  |
| 60%GM                                                                                | 78.6a | 82.4ab | 9.4a    | 11.6a | 72.3  | 94.0  | 82.1  | 85.1 | 27.2d  | 25.2b  |
| 80%GM                                                                                | 76.6a | 81.6ab | 8.6a    | 12.2a | 76.2  | 89.7  | 80.8  | 86.2 | 27.7a  | 25.7a  |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.2 各处理水稻植株氮、钾的含量及吸收量

2.2.1 植株的氮素含量及吸氮量

由表 3 可见，早、晚稻的稻谷氮含量和稻草氮含量各处理间的差异均无统计学意义。各施肥处理早、晚稻稻谷的氮含量和稻草的氮含量均高于 CK 的；所有化肥与紫云英配施处理的早稻稻谷氮含量和稻草氮含量均高于 100%CF 的；晚稻仅 20%GM 的稻谷氮含量高于 100%CF 的，20%GM 和 40%GM 的稻草氮含量均高于 100%CF 的。

表 3 各处理早、晚稻植株的氮含量

| Table 3 Average nitrogen content in early and late rice with different fertilizer treatments |            |           |            |           | g/kg |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------|------------|-----------|------------|-----------|------|----|
| 处理                                                                                           | 早稻氮含量      |           | 晚稻氮含量      |           | 籽粒   | 稻草 |
|                                                                                              | 籽粒         | 稻草        | 籽粒         | 稻草        |      |    |
| CK                                                                                           | 10.37±1.20 | 6.18±0.37 | 10.29±0.59 | 5.64±0.79 |      |    |
| 100%CF                                                                                       | 10.37±1.96 | 6.30±0.51 | 10.87±1.22 | 6.34±0.58 |      |    |
| 20%GM                                                                                        | 10.80±1.89 | 6.56±0.42 | 11.23±1.06 | 6.48±0.58 |      |    |
| 40%GM                                                                                        | 10.62±1.85 | 6.38±0.33 | 10.84±0.92 | 6.36±0.67 |      |    |
| 60%GM                                                                                        | 10.95±2.32 | 6.58±0.80 | 10.36±0.93 | 5.88±0.49 |      |    |
| 80%GM                                                                                        | 10.72±2.09 | 6.60±0.86 | 10.71±0.51 | 5.96±0.97 |      |    |

紫云英与化肥配施可提高早、晚稻的籽粒、稻草和植株的氮素积累量(表 4), 早稻各施肥处理与 CK 间的差异均达显著水平, 晚稻 20%GM、40%GM 和 100%CF 与 CK 间的差异均达显著水平, 晚稻 60%GM 的植株氮素总积累量与 CK 间的差异达显

著水平。早稻 20%GM、40%GM 和 60%GM 的籽粒、稻草和植株的氮素积累量均高于 100%CF 的, 晚稻 20%GM 和 40%GM 的籽粒、稻草和植株的氮素积累量高于 100%CF 的。

表 4 各处理早、晚稻植株的氮素积累量

| Table 4 Nitrogen accumulation in early and late rice with different fertilizer treatments |              |              |              |               |              |                | kg/hm <sup>2</sup> |
|-------------------------------------------------------------------------------------------|--------------|--------------|--------------|---------------|--------------|----------------|--------------------|
| 处理                                                                                        | 早稻氮素积累量      |              |              | 晚稻氮素积累量       |              |                |                    |
|                                                                                           | 籽粒           | 稻草           | 植株           | 籽粒            | 稻草           | 植株             |                    |
| CK                                                                                        | (35.2±5.6)b  | (17.5±2.6)c  | (52.7±7.6)b  | (58.2±9.5)b   | (26.4±4.8)b  | (84.6±13.0)c   |                    |
| 100%CF                                                                                    | (55.8±10.4)a | (28.3±2.7)ab | (84.0±11.8)a | (76.5±14.8)a  | (37.3±7.6)a  | (113.9±21.7)ab |                    |
| 20%GM                                                                                     | (63.3±11.2)a | (32.0±1.8)a  | (95.3±11.9)a | (85.3±16.7)a  | (41.0±8.0)a  | (126.3±24.2)a  |                    |
| 40%GM                                                                                     | (60.7±9.5)a  | (30.6±3.4)ab | (91.3±10.0)a | (80.3±13.1)a  | (39.6±8.7)a  | (119.8±20.6)ab |                    |
| 60%GM                                                                                     | (58.6±13.4)a | (29.3±3.8)ab | (87.9±15.2)a | (72.8±11.6)ab | (34.6±6.7)ab | (107.4±16.5)ab |                    |
| 80%GM                                                                                     | (53.4±13.3)a | (27.4±5.0)b  | (80.7±16.6)a | (69.8±12.6)ab | (32.2±7.4)ab | (102.0±18.1)bc |                    |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

## 2.2.2 植株钾素含量及吸钾量

由表 5 可见, 各施肥处理早、晚稻稻草的钾含量均高于 CK 的; 早稻所有化肥与紫云英配施处理

的稻谷钾含量均高于 100%CF 的, 20%GM 和 60%GM 稻草的钾含量高于 100%CF 的; 晚稻所有化肥与紫云英配施处理的稻谷钾含量均高于 100%CF 的, 20%GM 和 40%GM 稻草的钾含量高于 100%CF 的。

表 5 各处理早、晚稻的植株钾含量

| Table 5 Potassium content in early and late rice in different fertilizer treatments |           |               |           |            | g/kg |
|-------------------------------------------------------------------------------------|-----------|---------------|-----------|------------|------|
| 处理                                                                                  | 早稻钾含量     |               | 晚稻钾含量     |            |      |
|                                                                                     | 籽粒        | 稻草            | 籽粒        | 稻草         |      |
| CK                                                                                  | 3.94±0.42 | (22.45±1.82)b | 3.45±0.62 | 20.15±3.32 |      |
| 100%CF                                                                              | 3.90±0.35 | (25.33±2.13)a | 3.36±0.52 | 20.95±3.14 |      |
| 20%GM                                                                               | 4.30±0.26 | (25.63±1.70)a | 3.67±0.72 | 21.09±3.75 |      |
| 40%GM                                                                               | 4.16±0.42 | (25.25±2.35)a | 3.72±0.68 | 21.45±2.93 |      |
| 60%GM                                                                               | 4.23±0.55 | (25.98±2.10)a | 3.57±0.58 | 20.42±3.18 |      |
| 80%GM                                                                               | 4.12±0.48 | (24.90±1.22)a | 3.54±0.60 | 20.64±3.06 |      |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

表 6 各处理早、晚稻植株的钾素积累量

| Table 6 Potassium accumulation in early and late rice with different fertilizer treatments |               |                |                |              |                |                | kg/hm <sup>2</sup> |
|--------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|----------------|----------------|--------------|----------------|----------------|--------------------|
| 处理                                                                                         | 早稻钾素积累量       |                |                | 晚稻钾素积累量      |                |                |                    |
|                                                                                            | 籽粒            | 稻草             | 植株             | 籽粒           | 稻草             | 植株             |                    |
| CK                                                                                         | (13.4±2.1)d   | (62.5±11.3)c   | (75.9±12.9)d   | (19.6±5.2)b  | (92.0±12.7)c   | (111.6±17.2)c  |                    |
| 100%CF                                                                                     | (21.1±2.8)bc  | (111.7±11.0)ab | (132.8±13.0)bc | (23.7±5.3)ab | (118.5±12.1)ab | (142.2±14.7)ab |                    |
| 20%GM                                                                                      | (25.2±2.2)a   | (123.3±12.7)a  | (148.5±14.0)a  | (27.7±6.6)a  | (128.1±16.6)a  | (155.8±22.0)a  |                    |
| 40%GM                                                                                      | (23.9±3.4)ab  | (118.9±16.7)a  | (142.9±18.6)ab | (27.5±6.4)a  | (128.3±14.1)a  | (155.8±17.4)a  |                    |
| 60%GM                                                                                      | (22.7±3.7)abc | (113.7±7.9)ab  | (136.4±9.7)ab  | (25.1±5.4)ab | (115.1±5.5)ab  | (140.2±9.2)ab  |                    |
| 80%GM                                                                                      | (20.4±2.8)c   | (100.7±6.7)b   | (121.1±7.7)c   | (22.9±5.1)ab | (107.7±10.7)b  | (130.6±12.5)b  |                    |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

## 2.3 各处理的氮素平衡和钾素平衡

### 2.3.1 氮素平衡

氮素输入项包括通过化肥、紫云英、秧苗、灌溉水、干湿沉降和稻茬归还输入的氮素量, 输出项

包括收获作物所带走的氮量和通过挥发、径流、淋溶等方式形成的氮素损失量。由表 7 可见, 各施肥处理的氮素输入量主要为化肥和紫云英施入的氮素量, 占总输入量的 88.1%~92.3%; 氮素输出量主要为收获作物所带走的氮素量, 占总输出量的

74.1%~85.2%。紫云英与化肥配施处理中，植株带走的氮素量随紫云英施用比例的增加而减少，但其占氮素总输出量的比例随紫云英施用比例的增加而增加。由水稻氮素表观平衡分析结果可知，因为没有通过施用化肥和紫云英来增加氮素投入，仅靠秧苗、灌溉水、干湿沉降和稻茬循环输入的氮素量

不足以平衡作物收获所带走的氮素量，所以 CK 处于氮素亏缺状态；100%CF、20%GM 和 40%GM 的氮投入量较大，氮素表观平衡表现为盈余状态；60%GM 和 80%GM 尽管植株带走和损失的氮素较少，但晚稻季氮投入较少，所以其表观平衡处于氮亏缺状态。

表 7 各处理全年的氮素平衡状况

| Table 7 Soil apparent nitrogen balance with different fertilizations |        |     |     |      |      |       |           |        |
|----------------------------------------------------------------------|--------|-----|-----|------|------|-------|-----------|--------|
| 处理                                                                   | 输入氮素量  |     |     |      |      | 输出氮素量 |           | 盈亏     |
|                                                                      | 化肥和紫云英 | 秧苗  | 灌溉水 | 干湿沉降 | 稻茬循环 | 作物收获  | 挥发、径流、淋溶等 |        |
| CK                                                                   | 0      | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 5.5  | 137.3 | 0.0       | -115.0 |
| 100%CF                                                               | 300    | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 8.2  | 197.9 | 69.0      | 58.1   |
| 20%GM                                                                | 270    | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 9.1  | 221.6 | 59.7      | 14.6   |
| 40%GM                                                                | 240    | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 8.8  | 211.1 | 50.4      | 4.1    |
| 60%GM                                                                | 210    | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 8.0  | 195.3 | 41.1      | -1.6   |
| 80%GM                                                                | 180    | 2.4 | 3.7 | 10.7 | 7.5  | 182.8 | 31.8      | -10.3  |

各指标值后不同字母表示在 0.05 水平上差异显著。

2.3.2 钾素平衡

钾素输入项包括通过化肥、紫云英、秧苗、灌溉水、干湿沉降和稻茬循环输入的钾素量，输出项主要为收获作物所带走的钾素量。由表 8 可见，各施肥处理通过化肥和紫云英输入的钾素量占总输入量的 73.9%~77.4%，通过稻茬还田循环输入的钾素量占总输入量的 11.2%~13.0%。化肥配施紫云英处理中，80%GM 的植株带走钾素量低于 100%CF 的，其余处理的均比 100%CF 的高。化肥配施紫云

英处理作物带走的钾素量随紫云英施用比例的增加而减少。所有处理的钾素表观平衡均表现为亏缺。CK 由于没有通过施入化肥和紫云英来增加钾素投入，所以其钾素亏缺量最大；化肥配施紫云英处理的钾素投入量少于 100%CF 的，所以其钾素亏缺量均高于 100%CF 的；20%GM、40%GM 和 60%GM 的作物生物量较大，作物收获所带走的钾素较多，所以其钾素亏缺量较大。

表 8 各处理的钾素平衡状况

| Table 8 Soil apparent potassium balance with different fertilizations |        |     |      |      |      |        |        |
|-----------------------------------------------------------------------|--------|-----|------|------|------|--------|--------|
| 处理                                                                    | 输入钾素量  |     |      |      |      | 输出钾素量  | 盈亏     |
|                                                                       | 化肥和紫云英 | 秧苗  | 灌溉水  | 干湿沉降 | 稻茬循环 | (作物收获) |        |
| CK                                                                    | 0.0    | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 19.3 | 187.5  | -138.9 |
| 100%CF                                                                | 199.1  | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 28.8 | 275.0  | -17.8  |
| 20%GM                                                                 | 188.5  | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 31.4 | 304.3  | -55.1  |
| 40%GM                                                                 | 177.8  | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 30.9 | 298.6  | -60.6  |
| 60%GM                                                                 | 167.1  | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 28.6 | 276.5  | -51.5  |
| 80%GM                                                                 | 156.5  | 6.2 | 15.4 | 7.7  | 26.1 | 251.7  | -39.9  |

3 结论与讨论

长期翻压绿肥对早、晚稻产量均有提高效果<sup>[8]</sup>，绿肥能替代部分化肥<sup>[9-10]</sup>。养分供应与作物吸收同步是实现作物高产和养分高效利用的重要条件，本试验中早稻等氮钾投入、晚稻氮钾投入量减少条件下，20%GM 或 40%GM 的早、晚稻产量及年总产

量均较 100%化肥处理的提高，60%GM 的早、晚稻产量基本与 100%化肥的持平。这可能是由于有机无机肥配施，化肥的速效性和有机肥的持久性结合，40%~80%的化肥量能满足水稻生长前期和中期的氮钾需求，紫云英氮钾满足水稻中后期的氮钾需求。80%GM 处理的化肥配施比例偏低，早稻生长

前期氮钾需求得不到满足,提供给晚稻的氮钾不足,水稻生长受到抑制而导致减产。可见,在早稻总氮钾投入量相等时,即使减少对晚稻氮钾肥料的投入,只要合理调配紫云英与化肥比例,还是可以实现稳产、高产。

与单施化肥相比,紫云英与化肥配施能提高水稻有效穗、成穗率、每穗总粒数、实粒数、结实率和千粒质量<sup>[11]</sup>。长期稻-稻-紫云英轮作能促使水稻分蘖成穗<sup>[12]</sup>。80%氮量尿素与紫云英配合施用可协调养分的释放时间和供应强度,在早稻全生育期保证氮素持续稳定供应,使早稻有效穗和穗粒数增加<sup>[13]</sup>。本研究中适宜比例的紫云英与化肥配施主要通过增加水稻株高、有效穗和穗粒数来实现水稻增产。该结果与前人研究结果<sup>[11-13]</sup>相符合。

本研究中,20%GM 和 40%GM 处理水稻对氮素、钾素的吸收量和积累量较高,表明这 2 种配施比例模式下,养分的释放供应较好地耦合了水稻全生育期的养分需求,有利于作物对氮钾养分的吸收和稻谷产量的形成。

养分表观平衡可以反映肥料施用的合理性。为了既实现作物高产,又不至于产生环境风险,基于养分平衡的施肥量是推荐施肥的根据。本研究中,除不施肥处理和晚稻氮素投入较少的 60%GM 及 80%GM 外,其余施肥处理的氮素表观平衡表现为盈余,而所有处理的钾素表观平衡均表现为亏缺。钾素亏缺可能与稻草离田带走大量钾素有关,这是由于水稻植株对钾素的积累主要集中在稻草中<sup>[14]</sup>,其吸收的钾素量占植株钾素总吸收量的 80%以上<sup>[15]</sup>。可见,在双季稻种植区,化肥与紫云英合理配施结合稻草钾的循环利用,将有利于水稻种植体系中钾素的平衡和土壤钾素肥力的提高。

综合考虑作物的产量效应、养分吸收利用及土壤肥力保育,在本试验区域或与本试验区域生态条件类似的双季稻种植区,早、晚稻在常规氮、钾肥施用量的基础上,以紫云英替代 20%~40%的化肥,可以取得较好的产量效应。为了维持土壤肥力和水稻生产的可持续性,建议配合一定量的稻草还田。

#### 参考文献:

[1] 李红莉,张卫峰,张福锁,等.中国主要粮食作物化肥施用量与效率变化分析[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1136-1143.

- [2] 赖力,黄贤金,王辉,等.中国化肥施用的环境成本估算[J].土壤学报,2009,46(1):63-69.DOI:10.3321/j.issn:0564-3929.2009.01.009.
- [3] 唐杉,王允青,赵决建,等.紫云英还田对双季稻产量及稳定性的影响[J].生态学杂志,2015,34(11):3086-3093.
- [4] 李继明,黄庆海,袁天佑,等.长期施用绿肥对红壤稻田水稻产量和土壤养分的影响[J].植物营养与肥料学报,2011,17(3):563-570.
- [5] 周兴,谢坚,廖育林,等.基于紫云英利用的化肥施用方式对水稻产量和土壤碳氮含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2013,39(2):188-193.DOI:10.3724/SPJ.1238.2013.00188.
- [6] 侯红乾,刘秀梅,刘光荣,等.有机无机肥配施比例对红壤稻田水稻产量和土壤肥力的影响[J].中国农业科学,2011,44(3):516-523.DOI:10.3864/j.ssn.0578-1752.2011.03.011.
- [7] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科学技术出版社,2000.
- [8] 高菊生,曹卫东,董春华,等.长期稻-稻-绿肥轮作对水稻产量的影响[J].中国水稻科学,2010,24(6):672-676.DOI:10.3969/j.issn.1001-7216.2010.06.020.
- [9] 周兴,李再明,谢坚,等.紫云英利用后减施化肥对水稻产量和产值及土壤碳氮含量的影响[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2014,40(3):225-230.DOI:10.13331/j.cnki.jhau.2014.03.001.
- [10] 王建红,曹凯,张贤.紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响[J].土壤学报,2014,51(4):888-896.
- [11] 王允青,张祥明,刘英,等.施用紫云英对水稻产量和土壤养分的影响[J].安徽农业科学,2004,32(4):699-700.DOI:10.3969/j.issn.0517-6611.2004.04.053.
- [12] 高菊生,徐明岗,秦道珠.长期稻-稻-紫云英轮作对水稻生长发育及产量的影响[J].湖南农业科学,2008(6):25-27.DOI:10.3969/j.issn.1006-060X.2008.06.009.
- [13] 廖育林,鲁艳红,谢坚,等.紫云英配施控释氮肥对早稻产量及氮素吸收利用的影响[J].水土保持学报,2015,29(3):190-195,201.DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2015.03.035.
- [14] 曾德武,刘强,彭建伟,等.不同钾肥用量对双季稻钾肥利用率的影响[J].中国稻米,2012,18(2):30-32.DOI:10.3969/j.issn.1006-8082.2012.02.007.
- [15] 鲁艳红,廖育林,聂军,等.五年定位试验钾肥用量对双季稻产量和施钾效应的影响[J].植物营养与肥料学报,2014,20(3):598-605.DOI:10.11674/zwylf.2014.0310.

责任编辑:王赛群  
英文编辑:王 库