

紫云英还田配施化肥对单季晚稻养分利用和产量的影响*

王建红 曹凯 张贤

(浙江省农业科学院环境资源与土壤肥料研究所, 杭州 310021)

摘要 研究旨在探讨紫云英较高鲜草翻压量条件下配施不同比例常规用量化肥对单季晚稻养分吸收、养分利用效率和产量的影响。试验设置 7 个处理: CK (不翻压紫云英和不施化肥), CF (常规用量施肥) 及翻压 45 t hm⁻² (GM₄₅) 紫云英鲜草配施 0、20%、40%、60% 和 80% 常规用量化肥 (CF)。在浙江省金华市蒋堂农业科学试验站进行为期 2 年的田间试验, 结果表明, 在所有的紫云英翻压配施化肥处理中, 虽然水稻 N、P、K 的总吸收量以 GM₄₅ + 80% CF 处理最高, 但稻谷 P、K 养分最高吸收量出现在 GM₄₅ + 40% CF 处理中, 水稻养分内部利用效率随化肥配施量的增加而降低; 水稻的 N、P 和 K 的农学利用效率和稻谷产量均以 GM₄₅ + 40% CF 处理最高。从提高肥料利用率和降低环境风险的角度出发, 紫云英鲜草异地还田量为 45 t hm⁻² 时, 以配施 N 80.6 kg hm⁻²、P₂O₅ 21.5 kg hm⁻² 和 K₂O 43.3 kg hm⁻² 为宜。与 CK 处理相比, CF 和紫云英鲜草翻压配施化肥处理的稻谷产量分别提高 13.7% 和 8.5%~17.4%。在紫云英—单季晚稻耕作制中, 紫云英异地还田量 45 t hm⁻² 不会使单季晚稻苗期产生僵苗现象。

关键词 紫云英; 单季晚稻; 养分吸收; 产量; 养分利用率

中图分类号 S158.3 **文献标识码** A

紫云英 (*Astragalus sinicus* L.) 是我国南方稻区冬季稻田主栽绿肥, 它翻压腐解后可以作为后季水稻生长提供 N、P、K 等速效养分, 从而达到在水稻生长期少施化肥或不施化肥并获得较高产量的目的^[1-6]。在 20 世纪末以前, 紫云英—水稻的耕作方式以紫云英—双季稻为主, 研究也主要集中在紫云英—双季稻耕作的相关技术上^[7-11], 而很少涉及紫云英—单季稻耕作制。21 世纪以来, 随着市场经济的发展和劳动力成本的不断增加, 种植双季稻的经济效益低下, 紫云英与水稻的耕作方式随之由紫云英—双季稻耕作转向紫云英—单季稻, 且单季稻又以单季晚稻为主。据统计, 浙江省 2010 年全省水稻种植面积 102.8 × 10⁴ hm², 其中单季晚稻种植面积达 67.8 × 10⁴ hm², 占总面积的 66.0%^[12]。

当前在南方经济发达地区, 紫云英绿肥生产利用方式正发生深刻改变。一方面, 随着稻田化肥施用年限的增加, 土壤养分总体水平上升, 有利于稻田紫云英的高产; 另一方面, 随着紫云英优良品种的推广, 南方稻田紫云英鲜草的产量也普遍提高。

如福建的闽紫系列紫云英品种、浙江的宁波大桥种及江西的余江大叶种等中、迟熟紫云英品种的鲜草产量可以达到 40 t hm⁻² 左右, 高的可以达到 60 t hm⁻² 以上^[13-15]。与此同时, 随着畜牧业规模化养殖模式的发展, 紫云英分散刈割利用的生产模式因劳动力生产成本的提高和养殖方式的转变, 紫云英鲜草不再被刈割利用而是直接全量还田。研究表明, 在紫云英—双季稻传统耕作制中, 紫云英鲜草的适宜翻压量在 22.5~30.0 t hm⁻²^[1], 过高的翻压量会对早稻秧苗生长产生毒害、僵苗等负面影响^[16], 因此农民会将一部分紫云英鲜草刈割用作饲料^[17], 此种紫云英绿肥利用方式既保证了早稻的肥料需求又促进了当地畜牧业的发展。

紫云英—单季晚稻耕作中鲜草全量还田条件下单季晚稻的相关生长与施肥运筹技术急需解决, 如较高产量的紫云英鲜草还田生产单季晚稻是否会对晚稻生长产生不利影响, 以及紫云英还田如何配施化肥可以既提高单季晚稻产量又使水稻养分利用率达到最佳水平等问题需要深入研究。此外,

* 农业部公益性行业 (农业) 科研专项 (201103005)、浙江省重大科技专项重点农业项目 (2009C12001) 资助

作者简介: 王建红 (1971—), 浙江淳安人, 硕士, 副研究员, 主要从事土壤改良与草业开发利用研究。E-mail: jianhong1203@sina.com

收稿日期: 2013-07-01; 收到修改稿日期: 2013-12-06

在紫云英—单季晚稻耕作制中,由于紫云英翻压与水稻移栽期之间的间隔时间较长,单季晚稻移栽时的土壤养分环境条件与双季稻有很大差异,因此较高的紫云英翻压量是否会对单季晚稻的生长产生不利影响也有待试验验证。施用化肥和紫云英翻压作肥料的养分释放特点绝然不同,因此化肥与紫云英配施时水稻对养分的吸收特点也不同。目前虽有研究对紫云英、黑麦草等绿肥还田减施化肥对单季晚稻的生长和产量影响进行了研究,但结果并不系统^[18]。本研究旨在探讨紫云英较高异地还田量(45 t hm⁻²)时配施不同常规用量比例化肥对单季晚稻生长和养分吸收利用的影响,并以此来确定较高紫云英鲜草还田时合理的化肥配施量,以便为南方地区紫云英—单季晚稻耕作制的合理施肥提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况与供试材料

试验区位于金华市婺城区蒋堂农业科学试验站(119°32'12"E,29°04'8"N),海拔 62.5 m,属中亚热带季风气候,四季分明、年温适中、热量丰富。全年平均日照时数约 1 700 h,平均降水量约 1 500 mm,平均气温约 17.9 °C。试验区土壤类型为第四纪红色黏土发育的水稻土,试验前测得 0~20cm 耕层土壤基础肥力:有机质 22.5 g kg⁻¹、全氮 1.49 g kg⁻¹、碱解氮 258.2 mg kg⁻¹、速效磷 26.2 mg kg⁻¹、速效钾 36.4 mg kg⁻¹、pH 5.42。

试验选用的紫云英品种是当地主栽的宁波大

桥种,紫云英鲜草含水量 92.1%, N、P₂O₅、K₂O 含量分别为 3.82、0.95、4.35 g kg⁻¹。供试水稻品种为当地主栽的籼粳杂交晚稻甬优 9 号。

1.2 试验设计

试验在 2011 年 4 月至 2012 年 10 月间进行。采用大田小区试验,设 7 个处理,4 次重复,各小区随机排列,小区面积为 20 m²。各小区用硬田埂并用包覆塑料膜隔开,独立排灌,防止水肥串流。7 个处理分别设为:CK(不施肥);CF(常规用量施肥);GM₄₅(不施肥条件下翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草);GM₄₅+20% CF(翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草配施 20% 常规化肥量);GM₄₅+40% CF(翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草配施 40% 常规化肥量);GM₄₅+60% CF(翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草配施 60% 常规化肥量);GM₄₅+80% CF(翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草配施 80% 常规化肥量)。

供试水稻于 2011 年 5 月 8 日播种,6 月 18 日移栽至各小区。试验选用分蘖 2~3 棵且长势相对一致的晚稻秧苗,移栽密度为 25.0 × 10⁴ 丛 hm⁻²。常规施肥处理(CF):6 月 17 日施基肥碳酸氢铵 525.0 kg hm⁻²、过磷酸钙 375.0 kg hm⁻²;6 月 28 日施分蘖肥尿素 187.5 kg hm⁻²、氯化钾 112.5 kg hm⁻²;8 月 9 日施孕穗肥尿素 75.0 kg hm⁻²、氯化钾 75.0 kg hm⁻²。不同处理的养分投入量见表 1。10 月 28 日水稻统一收割,各小区单打单收,并测定稻谷和稻草产量。2011 年水稻收获后各小区冬闲,2012 年在水稻生长季按 2011 年的方法重复试验。

表 1 不同处理 N、P₂O₅、K₂O 养分的投入量

Table 1 Input rates of N, P₂O₅, and K₂O for different treatments

处理 Treatment	养分投入量 Nutrient inputs (kg hm ⁻²)								
	化肥 Chemical fertilizer			紫云英 Chinese milk vetch			合计 Total		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK ¹⁾	0	0	0	0	0	0	0	0	0
CF ²⁾	210.0	56.3	112.5	0	0	0	210.0	56.3	112.5
GM ₄₅ ³⁾	0	0	0	171.9	42.9	195.8	171.9	42.9	195.8
GM ₄₅ +20% CF	42.0	11.2	22.5	171.9	42.9	195.8	213.9	54.1	218.3
GM ₄₅ +40% CF	84.0	22.4	45.0	171.9	42.9	195.8	255.9	65.3	240.8
GM ₄₅ +60% CF	126.0	33.6	67.5	171.9	42.9	195.8	297.9	76.5	263.3
GM ₄₅ +80% CF	168.0	44.8	90.0	171.9	42.9	195.8	339.9	87.7	285.8

注:1)不翻压紫云英和不施化肥 No fertilizers and no Chinese milk vetch;2)常规用量施肥 Conventional chemical fertilizer rate;3)翻压 45 t hm⁻²紫云英鲜草 Incorporation of Chinese milk vetch at the rate of 45 t hm⁻² fresh grass 下同 The same below

1.3 样品采集与测定

水稻移栽后在各小区中间固定选取 15 丛水稻作为观测和考种植株,在水稻分蘖期结束后 8 月 4 日测定单株分蘖数,在水稻收获时 10 月 28 日测定单株有效穗数、每穗实粒数、结实率、千粒重等水稻农艺性状指标,并将这部分植株作为测定水稻收获期稻谷、稻草 N、P、K 养分含量的样品。此外,在水稻分蘖后期(8 月 4 日)和水稻乳熟期(9 月 24 日)各小区任选 20 丛水稻取全株洗净烘干测定植株 N、P、K 养分。

土壤有机质采用重铬酸钾滴定法,全氮采用硫酸—双氧水消煮—蒸馏滴定法;土壤碱解氮采用碱解扩散法,速效磷采用碳酸氢钠浸提—钼锑抗比色法,速效钾采用醋酸铵浸提—火焰光度法,pH 采用电位法;水稻植株中全氮采用浓硫酸—双氧水消煮—奈氏比色法,全磷采用浓硫酸—双氧水消煮—钒钼黄比色法,全钾采用浓硫酸—双氧水消煮—火焰光度法^[19]。

1.4 计算与统计方法

水稻对 N、P、K 养分利用效率的计算公式:养分农学利用效率 (Nutrient agronomy use efficiency, kg kg^{-1}) = [施肥区作物经济产量 (kg hm^{-2}) - 无肥区作物经济产量 (kg hm^{-2})] / 施肥量 (kg hm^{-2}),它表示施用肥料的每千克养分(如 N、P、K 等)增加作物经济产量的能力^[20-22];养分内部利用效率 (Internal nutrient use efficiency, kg kg^{-1}) = 经济产量 (kg hm^{-2}) / 养分吸收量 (kg hm^{-2}),它表示吸收单位重量养分(如 N、P、K 等)所生产稻谷的重量,即表现了养分利用在生理方面的效率^[23]。

紫云英翻压后最佳化肥用量计算公式 = 常规施肥中某养分的最佳用量 (kg hm^{-2}) - 某翻压量的紫云英中某养分的含量 (kg hm^{-2}) × 纯施紫云英的养分农学利用效率 / 纯施化肥的养分农学利用效率。

采用 Excel 2003 和 SAS 9.0 进行统计和方差分析,并采用 Duncan 'S 新复极差法 (LSR) 进行多重比较。

2 结果

2.1 紫云英翻压配施化肥下单季晚稻农艺性状与产量

苗期的田间观察表明,所有紫云英翻压配施不

同比比例常规用量化肥处理均未发现因紫云英翻压而产生的僵苗现象。从表 2 可以看出,与不施肥处理 (CK) 相比,所有施肥处理均显著增加每丛分蘖数和有效穗数,而对千粒重没有显著影响。常规用量施肥 (CF) 显著增加了每穗实粒数。所有施肥处理均显著增加稻谷和秸秆产量,常规用量施肥和紫云英翻压配施不同比例常规用量化肥处理与 CK 处理相比,稻谷产量分别增加 13.7% 和 8.5% ~ 17.4%,其中 $\text{GM}_{45} + 40\%$ CF 处理的稻谷产量最高 ($10\ 807\ \text{kg hm}^{-2}$)。

水稻产量由单位面积有效穗数、每穗粒数和千粒重三要素构成。从表 2 中可以看出,单一常规用量施肥处理下稻谷产量的增加归因于有效穗数和每穗实粒数的增加,而紫云英翻压减配施不同比例常规用量化肥处理则主要归因于有效穗数的增加。

紫云英翻压处理的水稻每丛分蘖数和有效穗数随化肥用量的增加而增加,而每穗实粒数和结实率随化肥配施量的增加出现先增加后降低的趋势。稻谷产量和秸秆产量的变化规律与每穗实粒数和结实率的变化规律相似。但稻谷产量的峰值较秸秆产量的峰值提前出现。稻谷最高产量出现在 $\text{GM}_{45} + 40\%$ CF 处理中,而秸秆最高产量出现在 $\text{GM}_{45} + 60\%$ CF 处理中。从水稻成熟期看,紫云英翻压处理随化肥施用量的增加,成熟期明显推迟。 $\text{GM}_{45} + 80\%$ CF 处理成熟期迟于常规用量施肥处理 1d。

2.2 紫云英翻压配施化肥下单季晚稻植株与稻谷养分含量

表 3 给出了不同处理在水稻不同生育期植株和稻谷中 N、P、K 的含量。在水稻分蘖期,紫云英翻压处理中的植株 N、K 含量随化肥用量的增加而增加,而 P 含量的增加趋势不显著。在乳熟期,紫云英翻压处理中水稻稻穗 N、K 含量随化肥用量的增加而增加,但只有 $\text{GM}_{45} + 80\%$ CF 处理下 N 和 $\text{GM}_{45} + 40\%$ CF 处理下 K 达到 5% 显著水平;紫云英翻压处理中化肥用量对水稻秸秆 N、K 含量影响不大,而对水稻秸秆 P 含量影响较大,其中, $\text{GM}_{45} + 60\%$ CF 处理下 P 达到 5% 显著水平。在成熟期,紫云英翻压处理中化肥用量对水稻稻谷 N、P、K 含量的影响不显著,但 $\text{GM}_{45} + 60\%$ CF 和 $\text{GM}_{45} + 80\%$ CF 则显著增加了水稻秸秆 N、P、K 含量。

表 2 紫云英配施不同用量化肥对单季晚稻农艺性状和产量的影响 (2011 和 2012 年的平均值)

Table 2 Effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer, varying in rate, on agronomic characters and yields of single-cropping late rice (average values in 2011 and 2012)

处理 Treatment	每丛 分蘖数 ^① TNPC	有效穗数 ^② EPN ($\times 10^4$ 丛 Clump hm^{-2})	每穗 实粒数 ^③ FGNPP	结实率 ^④ SSR (%)	千粒重 ^⑤ 1000SW (g)	稻谷产量 Grain yield (kg hm^{-2})	秸秆产量 Straw yield (kg hm^{-2})	成熟期 Mature (M-d)
CK	8.1d	180.0d	155.2c	94.0a	27.7a	9208d	6299d	10-19
CF	10.6b	247.5ab	170.4a	87.4c	27.4a	10472b	9093b	10-26
GM ₄₅	9.3c	230.2c	162.3ab	90.2b	27.0a	9987c	8305c	10-21
GM ₄₅ + 20% CF	9.5c	235.0bc	165.9ab	91.4ab	26.9a	10133c	8467bc	10-22
GM ₄₅ + 40% CF	10.6b	242.5b	161.2b	93.4a	27.2a	10807a	8718b	10-24
GM ₄₅ + 60% CF	11.5ab	257.5a	156.1c	89.8b	27.1a	10772a	10023a	10-25
GM ₄₅ + 80% CF	12.2a	267.5a	155.3c	85.1c	27.3a	10514ab	9965a	10-27

注:同列不同字母表示在 5% 水平差异显著。下同 Note: Different letters within the same column mean significant difference between treatments according to Duncan's new multiple range test, $p \leq 0.05$. The same below. ①Tiller number per clump; ②Number of effective panicles; ③Number of filled grains per panicle; ④Seed setting rate; ⑤Thousand seed weight

表 3 紫云英配施不同用量化肥对水稻不同生育期植株中 N、P、K 含量的影响 (2011 和 2012 年的平均值)

Table 3 Effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on contents of N, P, and K in rice plants at different growth stages (average values in 2011 and 2012, g kg^{-1})

处理 Treatment	分蘖期 Plant at the tillering stage			乳熟期稻穗 Panicle at the milking stage			乳熟期秸秆 Straw at the milking stage		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	9.02d	4.35b	20.75bc	8.57c	2.39b	2.49c	6.40c	3.07c	18.84a
CF	17.90c	4.80a	22.08b	10.31a	2.35b	4.48a	13.23a	4.72a	19.42a
GM ₄₅	15.81c	4.70a	19.34c	8.86b	2.71ab	3.49b	10.22b	4.17b	19.23a
GM ₄₅ + 20% CF	16.40c	4.84a	19.75c	8.93b	2.82a	3.69b	10.61b	4.35ab	20.00a
GM ₄₅ + 40% CF	17.82c	5.00a	20.58bc	9.11b	2.83a	4.66a	10.72b	4.00b	18.84a
GM ₄₅ + 60% CF	20.63b	5.08a	21.75b	9.92ab	2.98a	3.88b	11.60b	4.89a	19.17a
GM ₄₅ + 80% CF	24.11a	5.17a	26.56a	10.02a	3.00a	3.78b	11.01b	4.22b	20.08a

处理 Treatment	成熟期稻谷 Grain at the maturing stage			成熟期秸秆 Straw at the maturing stage		
	N	P	K	N	P	K
CK	9.56a	2.55a	3.54a	4.65c	0.55c	17.85a
CF	9.82a	2.15b	3.44a	6.77b	1.03b	15.27b
GM ₄₅	9.62a	1.97b	3.59a	5.69bc	0.96b	15.32b
GM ₄₅ + 20% CF	9.90a	2.03b	3.64a	5.84bc	1.14b	15.44b
GM ₄₅ + 40% CF	9.56a	2.33ab	3.74a	6.82b	0.94b	15.52b
GM ₄₅ + 60% CF	9.82a	1.95b	3.49a	8.72a	1.69a	16.27ab
GM ₄₅ + 80% CF	10.61a	2.12b	3.69a	8.46a	1.55a	17.10a

2.3 紫云英翻压配施化肥对单季晚稻养分吸收的影响

由表 1 可知,紫云英配施化肥各处理的 N 养分投入量,紫云英翻压不施肥处理明显低于常规用量施肥,而 $GM_{45} + 20\% CF$ 处理与常规施肥相当,其他各处理则明显高于常规施肥处理;P 养分投入量与 N 的投入规律相似,但各处理间的差异较小;K 养分投入量各处理均明显高于常规用量施肥处理。

表 4 表明,紫云英翻压处理下稻谷中 N 素累积

量随化肥用量的增加而增加,但 P、K 养分累积量随化肥用量增加有先增加后降低的趋势;秸秆中 N、P、K 养分累积量均随化肥用量的增加而增加;水稻 N、P、K 总养分累积量与秸秆养分累积量变化规律一致。此外,各施肥处理与不施肥相比,N、P、K 总养分累积量均显著增加。 $GM_{45} + 60\% CF$ 和 $GM_{45} + 80\% CF$ 处理的 N、K 养分总累积量增加最为显著,但这种增加主要来源于稻草而不是稻谷,水稻 P 素总累积量的增加趋势不如 N、K 明显。

表 4 紫云英配施不同用量化肥对单季晚稻养分吸收的影响(2011 和 2012 年的平均值)

Table 4 Effect of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on nutrient uptake of single-cropping late rice (average values in 2011 and 2012 ($kg\ hm^{-2}$))

处理 Treatment	稻谷 Grain			秸秆 Straw			合计 Total		
	N	P	K	N	P	K	N	P	K
CK	88.0c	23.5ab	32.6c	29.3d	3.46c	112.4c	117.3d	26.9c	145.0c
CF	102.8b	22.5b	36.0b	61.6b	9.37b	138.9b	164.4b	31.9b	174.9b
GM_{45}	96.1bc	19.7c	35.9b	47.3c	7.97b	127.2b	143.4c	27.7c	163.1b
$GM_{45} + 20\% CF$	100.3b	20.6c	36.9b	49.4c	9.65b	130.7b	149.8c	30.2bc	167.6b
$GM_{45} + 40\% CF$	103.3b	25.2a	40.4a	59.5b	8.19b	135.3b	162.8b	33.4b	175.7b
$GM_{45} + 60\% CF$	105.8ab	21.0b	37.6ab	87.4a	16.9a	163.1a	193.2a	37.9a	200.7a
$GM_{45} + 80\% CF$	111.6a	22.3b	38.8a	84.3a	15.4a	170.4a	195.9a	37.7a	209.2a

2.4 单季晚稻养分农学利用效率和养分内部利用效率

从表 5 可以看出,紫云英翻压处理中的 N、P、K 养分的农学利用效率呈现随化肥用量增加先增加后降低的趋势,而且均以 $GM_{45} + 40\% CF$ 处理最高。紫云英翻压处理中的 N、P、K 养分内部利用效率呈现随化肥用量增加而下降的趋势。

紫云英翻压不施肥处理(GM_{45})的 N、P、K 养分

农学利用效率均显著低于常规用量施肥处理(CF),紫云英翻压不施肥处理(GM_{45})的 N、P、K 养分农学利用效率较常规用量施肥处理分别降低 24.8%、18.9% 和 64.6%, $GM_{45} + 80\% CF$ 处理的 N、P、K 养分农学利用效率较常规用量施肥处理分别降低 36.2%、33.7% 和 59.3%。但 N、P、K 养分内部利用效率则高于单一常规施肥处理,其中 P 养分内部利用效率达到 5% 显著水平。

表 5 紫云英配施不同用量化肥对水稻养分农学利用效率和养分内部利用效率的影响(2011 和 2012 年的平均值)

Table 5 Effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on agronomic use efficiency of nutrients and internal nutrient use efficiency of rice (average values in 2011 and 2012 ($kg\ kg^{-1}$))

处理 Treatment	养分农学利用效率 Agronomic use efficiency of nutrients			养分内部利用效率 Internal nutrient use efficiency		
	N	P	K	N	P	K
CK	0	0	0	78.5a	341.7a	63.5a
CF	6.02a	54.72a	13.53a	63.7b	328.5b	59.9ab
GM_{45}	4.53b	44.39b	4.79c	69.7b	361.2a	61.2a
$GM_{45} + 20\% CF$	4.32b	41.67bc	5.11c	67.7b	335.3ab	60.5ab
$GM_{45} + 40\% CF$	6.25a	59.66a	8.00b	66.4b	323.8b	61.5a
$GM_{45} + 60\% CF$	5.25ab	49.81b	7.16b	55.8c	283.9c	53.7b
$GM_{45} + 80\% CF$	3.84c	36.28c	5.51c	53.7c	278.6c	50.3b

3 讨 论

3.1 单季晚稻耕作制中紫云英最佳翻压量

试验表明,紫云英—单季晚稻耕作制中,紫云英异地还田,翻压量为 45 t hm^{-2} 时单季晚稻能正常生长,未出现紫云英—双季稻耕作制中紫云英过量翻压对早稻秧苗的毒害现象。丁昌璞等^[16]的研究认为,紫云英翻压腐解初期会造成土壤还原性物质的积聚,导致土壤氧化还原电位(Eh)下降和 Fe^{2+} 浓度增加以及有机酸积聚,从而对后作水稻秧苗生长产生毒害作用而出现僵苗现象。

根据林多胡等^[1]多年的研究认为,紫云英鲜草翻压期地上部分 N 的含量一般占整株 N 含量的 85% 左右,若以 N 素作为影响水稻产量的主要因子,在考虑紫云英地下部分 N 素含量的情况下,本试验 45 t hm^{-2} 紫云英的翻压量相当于 38.3 t hm^{-2} 的本田翻压量。林多胡等^[1]的研究显示,紫云英—双季稻耕作制中的鲜草适宜翻压量为 $22.5 \sim 30 \text{ t hm}^{-2}$,增加翻压量会加剧早稻秧苗产生毒害的风险。试验表明,这种毒害作用仅发生在紫云英翻压期与水稻移栽期比较接近的紫云英—双季稻耕作制中,而紫云英—单季晚稻耕作制中并不存在这样毒害作用。然而,紫云英—单季晚稻耕作制中紫云英翻压 45 t hm^{-2} 并配施过量常规量化肥会导致单季晚稻成熟期的推迟。本研究 $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$ 处理的水稻成熟期迟于常规用量施肥处理 1d(表 2)。

试验证实,紫云英—双季稻耕作的鲜草适宜翻压量并不适用于紫云英—单季晚稻耕作制。紫云英腐解的养分释放规律研究结果显示,紫云英鲜草翻压后 30 d 内绝大部分有机物已矿化成无机物^[24-25]。南方地区紫云英鲜草翻压的适宜期在 4 月中旬,单季晚稻移栽一般要到 6 月中旬,因此,紫云英翻压期与水稻移栽期的时间间隔达 60 d 左右,因此,紫云英—单季晚稻耕作中较高的紫云英翻压量并不会造成单季晚稻秧苗受害。

3.2 紫云英翻压配施化肥的单季晚稻养分吸收特征

表 3 中不同处理单季晚稻的 N、P、K 养分含量的分析结果表明,紫云英翻压配施不同比例常规量化肥,会对水稻不同生育期的营养体部分养分含量造成差异,但并不影响成熟期稻谷的 N、P、K 养分含量,紫云英处理的稻谷与不施肥处理和常规施肥处理的差异也不显著,说明紫云英与化肥配施不会

对稻谷 N、P、K 养分产生明显影响,但会影响水稻秸秆 N、P、K 养分。

徐昌旭等^[7]研究了翻压 22.5 t hm^{-2} 紫云英鲜草配施不同比例化肥对早稻稻谷和秸秆 N、P、K 养分吸收的影响,认为紫云英翻压配施 80% 常规量化肥最有利于早稻稻谷和稻草中 N、P、K 养分的吸收。本试验结果表明,稻谷中 N 的吸收量随配施化肥量的增加而增加, $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$ 处理 N 吸收量最高达 111.6 kg hm^{-2} ,但 P 和 K 的吸收量均以 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理最高;水稻秸秆中 N、P、K 养分的吸收量和水稻总养分吸收量,各紫云英处理随化肥施用量的增加呈现增加的趋势,并以 $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$ 处理最高。

在所有的紫云英翻压处理中,稻谷中 N 素吸收量以 $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$ 处理最高,但 P、K 吸收量则以 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理最高。水稻秸秆和水稻地上部 N、P、K 总吸收量则以 $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$ 处理最高。 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理水稻秸秆中 N、P、K 的吸收量与常规施肥处理接近,但稻谷中 P、K 的吸收量则明显高于常规施肥处理(表 4)。进一步增加化肥用量,虽然显著增加了稻草中 N、P、K 的吸收量,但稻谷中 P、K 的吸收量反而减少,说明每公顷翻压 45 t 紫云英条件下,过量配施化肥并不能增加水稻经济产量,过高的 N、P、K 吸收造成了肥料的浪费。

3.3 紫云英翻压配施化肥的单季晚稻养分利用效率变化特征

吴萍萍等^[22]对红壤稻田进行长期施肥研究结果显示,N、P 和 K 的农学利用效率分别为 16.1 kg kg^{-1} 、 85.4 kg kg^{-1} 和 19.4 kg kg^{-1} 。然而,本研究常规施肥处理的 N、P 和 K 农学利用效率分别为 6.02 kg kg^{-1} 、 54.72 kg kg^{-1} 和 13.53 kg kg^{-1} 。与常规施肥相比,不施肥的紫云英翻压处理(GM_{45})显著降低了 N、P 和 K 的农学利用效率,可能是由于紫云英翻压期与水稻移栽期的间隔时间太长(60 d 左右),导致紫云英腐解后所释放的养分因不能及时吸收而流失,紫云英鲜草翻压后 30 d 内绝大部分有机物已矿化成无机物^[24-25]。

本研究结果显示,紫云英翻压处理中 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理的 N、P 和 K 的农学利用效率最高,过量配施化肥($\text{GM}_{45} + 60\% \text{ CF}$ 和 $\text{GM}_{45} + 80\% \text{ CF}$)导致 N、P、K 的农学利用效率显著降低(表 5),即导致作物经济产量增产能力的显著降低。 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理的 N、P 养分投入量分别较常规施肥处理高 21.9% 和 11.6%,但 $\text{GM}_{45} + 40\% \text{ CF}$ 处理的 N、P 养

分利用效率却高于常规施肥处理,说明紫云英养分与化肥养分的合理耦合有利于提高 N、P 的农学利用效率。至于 GM₄₅ + 40% CF 处理的 K 养分利用效率显著低于常规用量施肥处理,则是由于该处理的 K 素投入量较常规用量施肥处理高 113.9% 所致(表 1)。

各紫云英翻压处理水稻 N、P、K 养分内部利用效率随化肥配施量的增加而降低,说明增施化肥降低了肥料利用率。

3.4 紫云英翻压配施化肥的最佳量

在实际生产中,紫云英就地还田,当鲜草的产量高于 38.3 t hm⁻² 时,还可进一步减少单季晚稻的化肥配施量。根据本试验的研究结果,在南方紫云英鲜草高产区,实行紫云英与单季晚稻耕作制时,化肥的配施量在常规施肥量的 30%~60% 之间比较合理。在较高紫云英鲜草还田时,过量配施化肥不仅不能获得水稻高产,还会在造成化肥浪费的同时,增加养分流失风险,加剧农田面源污染。

试验结果显示,紫云英翻压后耕作单季晚稻的水稻产量随着化肥配施量的增加呈现先增加后降低的趋势,其中紫云英 45 t hm⁻² 翻压配施 40% 常规用量化肥最有利于水稻高产(表 2)。这说明紫云英 45 t hm⁻² 翻压后再全量施肥不但不能增加水稻产量,还容易造成肥料的浪费并增加环境污染的风险。

不同紫云英翻压量种植单季晚稻的条件下,化肥最佳配施量可根据当地常规化肥最佳施用量、紫云英翻压量、纯施紫云英和化肥的养分农学利用效率来决定。确定化肥配施量的原则是缺什么、补什么,缺多少、补多少,例如,本试验翻压 45 t hm⁻² 紫云英条件下,具体的施肥方案以配施 N 80.6 kg hm⁻²、P₂O₅ 21.5 kg hm⁻² 和 K₂O 43.3 kg hm⁻² 为宜。其结果是利用紫云英翻压释放的养分为单季晚稻供肥,配施化肥 N、P、K 的量可比常规减少 61.6%、61.9%、61.6%。

由于紫云英鲜草在翻压后 30 d 内大部分养分已发生矿化,且紫云英翻压期与单季晚稻移栽期的间隔时间又较长(60 d 左右)。因此,紫云英—单季晚稻耕作中所配施的氮肥和钾肥的施用时间最好推迟至孕穗期施用。因为单季晚稻生长前期紫云英鲜草有机物的矿化所产生的养分较多,容易造成水稻生长营养过旺,而生长后期容易产生脱肥现象。

4 结 论

在南方稻区,紫云英—单季晚稻耕作制中,较

高的紫云英鲜草翻压量(异地还田,45 t hm⁻²)不会对单季晚稻秧苗产生毒害现象。GM₄₅ + 40% CF 处理可以获得单季晚稻的最高产量和最高的 N、P 和 K 养分的农学利用效率。综合稻谷产量、养分利用效率、经济效益和环境效益 4 个因素,在翻压 45 t hm⁻² 紫云英的条件下,配施 N 80.6 kg hm⁻²、P₂O₅ 21.5 kg hm⁻² 和 K₂O 43.3 kg hm⁻² 为最佳施肥方案。它不仅可维持单季晚稻的最高产量和最佳经济效益,显著提高 N、P、K 养分利用效率,还可有效防止肥料的损失及因肥料过量施用而带来的环境问题,具有经济和环境双重效益。

参 考 文 献

- [1] 林多胡,顾荣申. 中国紫云英. 福州:福建科学技术出版社,2000:8—11,218—251,286—292. Lin D H, Gu R S. Milk vetch in China (In Chinese). Fujian: Fujian Science and Technology Press, 2000: 8—11, 218—251, 286—292
- [2] 高菊生,曹卫东,董春华,等. 长期稻—稻—绿肥耕作对水稻产量的影响. 中国水稻科学,2010,24(6):672—676. Gao J S, Cao W D, Dong C H, et al. Effect of long term rice-rice-green manure rotation on rice yield (In Chinese). Chinese Journal of Rice Science, 2010, 24(6): 672—676
- [3] 袁媛媛,刘勤,张少磊,等. 太湖地区稻田绿肥固氮量及绿肥还田对水稻产量和稻田土壤氮素特征的影响. 土壤学报,2011,48(4):797—803. Yuan M M, Liu Q, Zhang S L, et al. Effects of biological nitrogen fixation and plow-down of green manure crop on rice yield and soil nitrogen in paddy field (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 797—803
- [4] 王允青,曹卫东,郭熙盛,等. 不同还田条件下紫云英腐解特征研究. 安徽农业科学,2010,38(34):19388—19389,19391. Wang Y Q, Cao W D, Gou X S, et al. Study on the streptococcal debridement decompose characteristics of Chinese milk vetch under different return-to-field conditions (In Chinese). Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, 38(34): 19388—19389, 19391
- [5] 王琴,张丽霞,吕玉虎,等. 紫云英与化肥配施对水稻产量和土壤养分含量的影响. 草业科学,2012,29(1):92—96. Wang Q, Zhang L X, Lü Y H, et al. Effects of application of Chinese milk vetch and fertilizer on rice yield and soil nutrient content (In Chinese). Pratacultural Science, 2012, 29(1): 92—96
- [6] 莫淑勋,钱菊芳. 红壤地区紫云英中氮素的转化及其对水稻有效性的研究. 土壤学报,1983,20(1):12—24. Mo S X, Qian J F. Studies on the transformation of nitrogen of milk vetch in red earth and its availability to rice plant (In Chinese). Acta Pedologica Sinica, 1983, 20(1): 12—24
- [7] 徐昌旭,谢志坚,许政良,等. 等量紫云英条件下化肥用量对早稻养分吸收和干物质积累的影响. 江西农业学报,2010,22(10):13—15. Xu C X, Xie Z J, Xu Z L, et al. Effects of applying mineral fertilizer reasonably on nutrient ab-

- sorption and dry matter accumulation of early rice under applying equivalent Chinese milk vetch (In Chinese). *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(10): 13—15
- [8] 赵娜, 郭熙盛, 曹卫东, 等. 绿肥紫云英与化肥配施对双季稻区水稻生长有产量的影响. *安徽农业科学*, 2010, 38(36): 20668—20670. Zhao N, Guo X S, Cao W D, et al. Effects of green manure milk vetch and fertilizer combined application on the growth and yield of rice in double-cropping rice areas (In Chinese). *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(36): 20668—20670
- [9] 李双来, 李登荣, 胡诚, 等. 减施化肥条件下翻压紫云英对双季稻生长和产量的影响. *中国土壤肥料*, 2012(1): 69—73. Li S L, Li D R, Hu C, et al. Impact of reducing chemical fertilizer combined with Chinese milk vetch on growth and yield of double cropping rice (In Chinese). *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2012(1): 69—73
- [10] 唐海明, 汤文光, 肖小平, 等. 双季稻区冬季覆盖物残茬还田对水稻生物学特性和产量的影响. *江西农业大学学报*, 2012, 34(2): 213—219. Tang H M, Tang W G, Xiao X P, et al. Effects of straw recycling of winter covering crop on biological characteristics of plants and yield of rice in paddy field (In Chinese). *Acta Agriculturae Universitatis Jiangxiensis*, 2012, 34(2): 213—219
- [11] 高菊生, 曹卫东, 李冬初, 等. 长期双季稻绿肥耕作对水稻产量及稻田土壤有机质的影响. *生态学报*, 2011, 31(16): 4542—4548. Gao J S, Cao W D, Li D C, et al. Effects of long-term double-rice and green manure rotation on rice yield and soil organic matter in paddy field (In Chinese). *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(16): 4542—4548
- [12] 浙江省统计局. *浙江统计年鉴*. 北京: 中国统计出版社, 2011: 239. Statistics Bureau of Zhejiang Province. *Zhejiang statistical yearbook* (In Chinese). Beijing: China Statistics Press, 2011: 239
- [13] 李昱, 何春梅, 杨仁仙, 等. 氮磷钾对紫云英产量、养分累积及种植后土壤养分的影响. *江西农业学报*, 2010, 22(11): 112—114. Li Y, He C M, Yang R X, et al. Effects of N, P, K fertilizer on yield, nutrition accumulation of milk vetch and soil nutrition after planting milk vetch (In Chinese). *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2010, 22(11): 112—114
- [14] 张彭达, 周亚娣, 何国平, 等. 紫云英奉化大桥种的特征特性及留种技术. *浙江农业科学*, 2006(2): 162—163. Zhang P D, Zhou Y D, He G P, et al. Characteristics and planting technology of Fenghuadajiao Chinese milk vetch (In Chinese). *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2006(2): 162—163
- [15] 薛德乾, 李长英. 余江大叶紫云英栽培技术. *中国农技推广*, 2010, 26(10): 22—23. Xue D Q, Li C Y. High-yield cultivation techniques of Yujiang *Astragalus sinicus* (In Chinese). *China Agricultural Technology Extension*, 2010, 26(10): 22—23
- [16] 丁昌璞, De Nobili M, Geccanti B. 绿肥分解产物中水溶性有机质的伏安行为及其影响因素. *土壤学报*, 1989, 26(4): 331—335. Ding C P, De Nobili M, Geccanti B. Voltammetric behavior of water-soluble organic substances in decomposition products of green manures and its effecting factors (In Chinese). *Acta Pedologica Sinica*, 1989, 26(4): 331—335
- [17] 方德罗, 张运涛, 刘建新. 紫云英混合青贮饲料的发酵品质. *浙江农业大学学报*, 1996, 22(2): 168—171. Fang D L, Zhang Y T, Liu J X. Studies of the fermentation characteristics of *Astragalus silage* (In Chinese). *Journal of Zhejiang Agricultural University*, 1996, 22(2): 168—171
- [18] 徐建祥, 叶静, 王建红, 等. 紫云英和黑麦草与化肥配施对单季晚稻生长及产量的影响. *浙江农业科学*, 2012(2): 162—164. Xu J X, Ye J, Wang J H, et al. Chinese milk vetch and Ryegrass and chemical fertilizers on the growth and yield of single late rice (In Chinese). *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2012(2): 162—164
- [19] 鲍士旦. *土壤农化分析*. 北京: 中国农业出版社, 2000: 25—97. Bao S D. *Soil and agricultural chemistry analysis* (In Chinese). Beijing: China Agriculture Press, 2000: 25—97
- [20] Jagadeeswaran R, Murugappan V, Govindaswamy M. Effect of slow release NPK fertilizer sources on the nutrient use efficiency in turmeric (*Curcuma longa* L.). *World Journal of Agricultural Sciences* 2005, 1(1): 65—69
- [21] 霍竹, 付晋锋, 王璞. 秸秆还田和氮肥施用对夏玉米氮肥利用率的影响. *土壤*, 2005, 37(2): 202—204. Huo Z, Fu J F, Wang P. Effects of application of N fertilizer and crop residues as manure on N-fertilizer recovery rate of summer maize (In Chinese). *Soils*, 2005, 37(2): 202—204
- [22] 吴萍萍, 刘金剑, 周毅, 等. 长期不同施肥制度对红壤稻田肥料利用率的影响. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14(2): 277—283. Wu P P, Liu J J, Zhou Y, et al. Effects of different long term fertilizing systems on fertilizer use efficiency in red paddy soil (In Chinese). *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(2): 277—283
- [23] Gerloff G C. Plant efficiencies in the use of nitrogen, phosphorus, and potassium//Plant adaptation to mineral stress in problem soils. New York: Cornell University Press, 1997: 161—173
- [24] 刘威, 鲁剑巍, 潘福霞. 绿肥在现代农业发展中的探索与实践. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2011: 218—228. Liu W, Lu J W, Pan F X. Exploration and practice of green manure in the development of modern agriculture (In Chinese). Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2011: 218—228
- [25] 王飞, 林诚, 李清华, 等. 亚热带单季稻区紫云英不同翻压量下有机碳和养分释放特征. *草业学报*, 2012, 21(4): 319—324. Wang F, Lin C, Li Q H, et al. A study on organic carbon and nutrient releasing characteristics of different Chinese milk vetch manure use levels in a single cropping region of subtropical China (In Chinese). *Acta Pratacuturae Sinica*, 2012, 21(4): 319—324

EFFECTS OF INCORPORATION OF CHINESE MILK VETCH COUPLED WITH APPLICATION OF CHEMICAL FERTILIZER ON NUTRIENT USE EFFICIENCY AND YIELD OF SINGLE-CROPPING LATE RICE

Wang Jianhong Cao Kai Zhang Xian

(Institute of Environmental Resources and Soil and Fertilizer, Zhejiang Academy of Agricultural Sciences, Hangzhou 310021, China)

Abstract A field experiment was conducted at Jiangtang Agricultural Experiment Station, Jinhua City, Zhejiang Province, China to explore effects of incorporation of Chinese milk vetch coupled with application of chemical fertilizer on nutrient uptake, nutrient use efficiency, and yield of single-cropping late rice and hence to determine optimal application rate of chemical fertilizer in addition to incorporation of Chinese milk vetch at the rate of 45 t hm⁻² fresh grass (GM₄₅). The experiment consisted of 7 treatments: CK (no fertilizers and no Chinese milk vetch), CF (conventional chemical fertilizer rate), GM₄₅, GM₄₅ + 20% CF, GM₄₅ + 40% CF, GM₄₅ + 60% CF and GM₄₅ + 80% CF. Results of the 2 year (2011–2012) field experiment show that among all the GM₄₅ treatments, Treatment GM₄₅ + 80% CF was the highest in total N, P, and K uptake by rice, but Treatment GM₄₅ + 40% CF, the highest in N, P, and K uptake by grain, and the internal nutrient use efficiency decreased with increasing chemical fertilizer application rate. However, treatment GM₄₅ + 40% CF was the highest in both NPK agronomic use efficiency and grain yield. From the angle of improving fertilizer use efficiency and reducing environmental risk, in addition to incorporation of 45 t hm⁻² of fresh Chinese milk vetch produced in other fields, N 80.6 kg hm⁻², P₂O₅ 21.5 kg hm⁻² and K₂O 43.3 kg hm⁻² are recommended. Compared with treatment CK, treatment CF and treatments (GM₄₅, GM₄₅ + 20% CF, GM₄₅ + 40% CF, GM₄₅ + 60% CF and GM₄₅ + 80% CF) increased grain yield by 13.7% and 8.5%~17.4%, respectively. In the cropping system of Chinese milk vetch-single-cropping late rice, incorporation of 45 t hm⁻² fresh Chinese milk vetch will not result in the seedling.

Key words Chinese milk vetch (*Astragalus sinicus* L.); Single-cropping late rice; Nutrient uptake; Yield; Nutrient use efficiency

(责任编辑:檀满枝)