

绿肥配施氮肥对双季稻产量和养分吸收的影响

庾振宇^{1,2}, 方畅宇^{1,2}, 刘芳禧^{1,2}, 张江林^{2,3},
高雅洁^{2,3}, 鲁艳红^{2,3}, 廖育林^{2,3}, 屠乃美¹, 聂军^{2,3}

(1.湖南农业大学农学院,长沙 410128;2.湖南省土壤肥料研究所,
长沙 410125;3.农业农村部湖南耕地保育科学观测实验站,长沙 410125)

摘要: 基于 2016 年的田间定位试验,在冬闲(F)和冬种绿肥(G)2 种模式下,探究不同施氮量(N0:不施氮;N50:减氮 50%;N100:常规氮;N150:增施氮 50%)对双季稻产量、养分吸收特征及氮素利用率的影响,以期为南方稻区绿肥利用和氮肥施用提供科学理论依据。结果表明,与冬闲模式相比,冬种绿肥模式提高 4 种不同氮水平下的早晚稻产量,其中早、晚稻稻谷产量平均增产 8.0%,5.7%。2 种模式下的早稻产量随施氮量增加均呈现出先增加后降低的趋势,而晚稻则呈现上升的趋势。冬种绿肥模式同样提高植株地上部氮(N)、磷(P)和钾(K)素积累量和氮肥偏生产力。随施氮量的增加,这 2 种模式的早晚稻养分收获指数和氮肥利用率大多呈下降趋势,高量氮肥处理(N150)降低早稻地上部 K 素的积累量。早晚稻稻谷产量与水稻 N、P 和 K 素积累量存在显著正相关,2 种模式下的高氮处理(N150)K 素吸收的降低与其早稻产量下降相关联。结合稻谷产量与施氮量拟合分析、养分吸收利用等多方面效应,综合考量,冬闲模式下,早稻季氮肥适宜施用范围为 150.0~170.3 kg/hm²,冬种绿肥模式下,早稻季氮肥适宜施用范围为 75.0~122.8 kg/hm²。因此,在我国南方双季稻区,冬种植绿肥还田,可提高水稻对 N、P 和 K 素的吸收量,早稻季可以实现氮肥减施,且不降低双季稻产量,对于实现水稻高效生产具有实际意义。

关键词: 绿肥; 施氮量; 双季稻; 养分吸收; 氮素利用率

中图分类号:S511.42

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2023)05-0320-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.05.039

Effects of Green Manure with Nitrogen Fertilizer on the Yield and Nutrient Absorption of Double-Cropping Rice

YU Zhenyu^{1,2}, FANG Changyu^{1,2}, LIU Fangxi^{1,2}, ZHANG Jianglin^{2,3}, GAO Yajie^{2,3},
LU Yanhong^{2,3}, LIAO Yulin^{2,3}, TU Naimei¹, NIE Jun^{2,3}

(1.College of Agronomy, Hunan Agricultural University, Changsha 410128;

2.Hunan Institute of Soil and Fertilizer, Changsha 410125; 3.Hunan Arable Land Conservation

Scientific Observation and Experimental Station, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Changsha 410125)

Abstract: In order to provide scientific theoretical basis for green manure utilization and nitrogen fertilizer application in southern rice, based on the field localization experiment in 2016, the influence of different nitrogen application rates (N0: no nitrogen application; N50: 50% reduction in nitrogen; N100: conventional nitrogen; N150: 50% increase in nitrogen application) on yield, nutrient uptake characteristics and nitrogen efficiency of double-cropping rice were explored in the two modes of fallow (F) and green manure (G). The results showed that compared with the fallow mode, the green manure mode of winter planting increased the yield of early and late rice under these four different nitrogen levels, and the yield of early and late rice increased by 8.0% and 5.7% on average. In both modes, the yield of early rice increased firstly and then decreased with the increase of nitrogen application, while the increase of late rice showed an upward trend. The green manure model of winter planting also increased the accumulation of nitrogen (N), phosphorus (P), and potassium (K) in the aboveground part of the plant and the partial productivity of nitrogen fertilizer. With the increase of nitrogen application, the nutrient harvest index and nitrogen fertilizer utilization rate of

收稿日期:2023-02-21

资助项目:国家重点研发计划项目(2021YFD1700200);湖南省农业科技创新项目(2022CX123);现代农业产业技术体系建设专项(CARS-22-G-11)

第一作者:庾振宇(1999—),男,硕士研究生,主要从事水稻高产高效栽培技术研究。E-mail:1574626740@qq.com

通信作者:屠乃美(1962—),男,教授,主要从事作物高效生产研究。E-mail:tnm505@163.com

聂军(1972—),男,研究员,主要从事植物营养与土壤培肥研究。E-mail:niejun197@163.com

early and late rice in these two modes mostly showed a downward trend, and the high-level nitrogen fertilizer treatment (N150) reduced the accumulation of aboveground K elements in the early rice season. There was a significant positive correlation between early and late rice yields and N, P and K accumulation, and the decrease of high nitrogen treatment (N150) K uptake in the two modes was associated with the decline of early rice yield. Comprehensive consideration combined with the fitting analysis of rice yield and nitrogen application rate, nutrient absorption, and utilization, etc., the suitable application range of nitrogen fertilizer in early rice season was 150.0 to 170.3 kg/hm² under the fallow mode, and 75.0 to 122.8 kg/hm² in early rice season under winter green manure mode. Therefore, in the double-cropping rice area of southern China, planting green manure in winter can increase the absorption of N, P, and K elements in rice, and can reduce nitrogen fertilizer without reducing the yield of double-cropping rice in the early rice season, which is of practical significance for achieving efficient rice production.

Keywords: green manure; nitrogen application rate; double-cropping rice; nutrient absorption; nitrogen utilization rate

绿肥翻压还田是我国南方稻区实现减肥增产、改善农田生态环境的有效措施。近年来,大量化学肥料被用于提升水稻产量,其中氮肥投入量的年增幅更为明显^[1]。而过量的化肥施用后,通过农田地表径流、田间排水、地下水渗透等途径易引发一系列农业环境污染问题,是导致我国稻田土壤退化的重要原因。当前,我国稻田总体氮肥利用率约为 30%~35%^[2],一些地区甚至更低,不利于我国农业实现可持续发展。为此,探明在绿肥还田下合理的氮肥用量,提高氮肥利用率,对于维持稻田健康、缓解环境压力、实现水稻高效高产以及保障我国粮食安全具有重大意义。

前人^[3]研究表明,豆科绿肥作物生长过程中,其根瘤菌的生物固氮特性在阻止土壤氮素流失方面发挥着重要作用,加上绿肥本身含有丰富氮(N)、磷(P)和钾(K)等营养元素,较低的 C/N 值使得还田后更易腐解,为后续作物提供的持续稳定的养分,是我国南方稻田生产实现减肥增产效益的理论依据。与冬闲相比,绿肥利用下土壤肥力的提升和作物养分充分吸收是水稻增产的重要原因。Chen 等^[4]研究发现,绿肥可以提高土壤中碳氮含量,改善土壤层次结构,平衡土壤养分;也有研究^[5]表明,在绿肥与稻草联合利用下,实现水稻高产的关键在于有机物料养分释放过程相对缓慢,前期化肥为水稻提供快速养分,后期绿肥与秸秆腐解释放养分后,水稻养分吸收又可持续进行,养分均衡供应能力得以提升,尤其是土壤中 N 素的稳定供应,是提高水稻产量的关键所在。氮肥用量是影响作物 N 素吸收的重要因素^[6],适宜的施氮量可以促进作物 P 素和 K 素吸收利用^[7]。因此,无论是在冬闲模式下还是冬种绿肥模式下,研究氮肥用量对水稻养分吸收的影响,对于提高水稻养分利用和减少化肥施用有重大意义。

截至目前,前人在绿肥配施化肥研究中,主要集

中在绿肥翻压量与施氮量互作效应^[8]、绿肥替代部分化肥效应^[9]、绿肥与控释肥共用^[10]等方面,且研究多集中于土壤理化性质等方面,研究不同施氮量对冬闲和冬种绿肥 2 种模式下水稻植株养分吸收利用特性和氮素利用率的影响鲜有报道,在双季稻区的研究更是少有。本研究依托田间定位试验,探究在冬闲和冬种绿肥这 2 种模式下,不同施氮量对双季稻产量、植株养分吸收、氮素利用率的影响,以期为南方稻区绿肥利用和氮肥合理施用及增产机制提供理论基础和科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与供试材料

田间定位试验地位于湖南省农科院高桥试验基地,该地区属于亚热带季风气候,年平均气温 17.2℃,年平均降水量 1422 mm,供试土壤为第四纪红土发育而来的红黄泥,试验前土壤(0—20 cm)的基础理化性质为 pH 5.21,有机质含量 19.80 g/kg,全氮含量 1.66 g/kg,全磷含量 0.50 g/kg,全钾含量 25.90 g/kg,碱解氮含量 171.00 mg/kg,有效磷含量 16.70 mg/kg,速效钾含量 66.00 mg/kg。供试紫云英品种为“湘紫 1 号”,早稻品种为常规稻“湘早籼 32”,晚稻品种为杂交稻“深优 9586”。

1.2 试验设计

定位试验于 2016 年春季开始,试验在秸秆均还田的前提下,采用绿肥(Fallow, F; 冬闲; Green manure, G; 冬种绿肥)和施氮量(N0: 不施氮; N50: 减氮; N100: 常规氮; N150: 增施氮)二因素随机区组设计,共 8 个处理,每个处理 3 次重复,随机区组排列,田间小区面积 20 m² (4 m×5 m),各小区间采用泥埂覆膜隔离。N100 表示常规施氮量, N50、N100、N150 氮肥用量早稻分别为 75, 150, 225 kg/hm², 晚稻分别为 90, 180, 270 kg/hm²。氮肥、磷肥、钾肥分别为尿

素、钙镁磷肥、氯化钾。所有处理磷肥和钾肥施用均保持一致, P_2O_5 和 K_2O 早稻用量分别为 75, 90 kg/hm², 晚稻用量分别为 45, 120 kg/hm²。氮肥和钾肥按基肥和追肥各 50% 施用, 磷肥全部作基肥施用。

仅 2016 年早稻移栽前, 冬种绿肥处理的紫云英统一由外地移入, 每个小区翻压量均为 10 kg, 此后冬种绿肥模式均于每年 10 月中下旬播种紫云英, 播种量均为 30 kg/hm², 紫云英生长季节均不施肥。翌年早稻移栽前 15 天原小区翻压紫云英, 翻压前称重, 相同处理的 3 个重复之间平均分配后翻压入土。每年早、晚稻收获后, 所有处理的水稻秸秆称重后全部原小区还田, 相同处理的 3 个重复之间平均分配后还田。早稻于每年 4 月底移栽, 7 月中旬收获, 晚稻 7 月下旬移栽, 10 月中下旬收获。基肥在水稻移栽前 1 天施入, 追肥在水稻分蘖盛期施用。早稻插秧密度为 20 cm×20 cm, 晚稻插秧密度为 20 cm×25 cm, 其他管理与当地大田管理措施保持一致。

1.3 测定项目与方法

于 2019 年早、晚稻成熟后, 各小区单独收获, 晒干水分后测产。早、晚稻成熟期每个小区采取水稻 5 蔸用于测定植株中养分含量。采用常规化学分析方法^[11], $H_2SO_4-H_2O_2$ 消煮, 全氮使用凯氏定氮法测定, 全磷使用钒钼黄比色法测定, 全钾使用火焰光度计法测定。

1.4 计算方法

稻谷或稻草氮(磷、钾)积累量(kg/hm²) = 稻谷或稻草产量×稻谷或稻草氮(磷、钾)含量

氮(磷、钾)地上部总积累量(kg/hm²) = 稻谷氮(磷、钾)积累量 + 稻草氮(磷、钾)积累量

氮(磷、钾)收获指数(%) = 稻谷氮(磷、钾)积累量/氮(磷、钾)地上部总积累量×100%

氮肥回收利用率(%) = (施氮肥处理氮素总积累量 - 同一模式下不施氮肥处理氮素总积累量)/施氮量×100%

氮肥农学效率(kg/kg, N) = (施氮肥处理稻谷产量 - 同一模式下不施氮肥处理稻谷产量)/施氮量

氮肥偏生产力(kg/kg, N) = 施氮肥处理稻谷产量/施氮量

1.5 数据处理

数据采用 Microsoft Excel 2003 软件处理, 运用 SPSS 25.0 软件进行统计检验和方差分析, 不同处理间用 Duncan 法多重比较检验 0.05 水平上的差异显著性, Origin 软件作图。

2 结果与分析

2.1 绿肥配施不同量氮肥对双季稻产量的影响

不同处理的早、晚稻产量见表 1。冬种绿肥下的早、晚稻稻谷产量分别是 N50、N150 处理最高; 冬闲下分别是 N100、N150 处理最高。冬种绿肥下, 与冬闲相比, 除在 N150 水平下早稻稻谷产量略有降低外, 均可提高其他施氮水平下早、晚稻稻谷产量, 且 N50 水平下早稻稻谷产量差异显著。

施氮可以提高这 2 种模式的早、晚稻稻谷产量, 其中冬闲下, 与 N0 处理相比, 施氮可使早稻显著增产 33.2%~42.0%, 晚稻增产 16.0%~29.2%; 冬种绿肥下, 与 N0 处理相比, 施氮可使早稻增产 7.3%~15.3%, 晚稻显著增产 16.5%~25.5%, 但施氮各处理间早稻谷产量差异均无显著差异。本试验中这 2 种模式下的稻谷产量随施氮量的增加均表现出早稻先增后降, 晚稻上升的一致趋势。稻草产量和地上部生物产量表现趋势同稻谷产量一致。

表 1 不同处理早、晚稻产量

单位: kg/hm²

处理	早稻			晚稻		
	稻谷产量	稻草产量	地上部生物产量	稻谷产量	稻草产量	地上部生物产量
F	N0	3980bA	3317bA	7297bA	6170bA	4863bA
	N50	5300aB	4417aB	9717aB	7157abA	5291abA
	N100	5650aA	4708aA	10358aA	7330abA	5598abA
	N150	5577aA	4647aA	10224aA	7970aA	6180aA
G	N0	4997bA	4131bA	9127bA	6590bA	5094bA
	N50	5763aA	4803aA	10566aB	7683aA	5852abA
	N100	5743aA	4786aA	10529aA	7677aA	6120abA
	N150	5363abA	4469abA	9833abA	8273aA	6579bA

注: 同列不同小写字母表示同一模式下不同施氮量处理产量在 0.05 水平上差异显著; 不同大写字母表示同一施氮水平下不同模式产量在 0.05 水平上差异显著。下同。

2.2 绿肥配施不同量氮肥对植株养分吸收的影响

2.2.1 绿肥配施不同量氮肥对 N 素吸收的影响 由表 2 可知, 冬种绿肥下, 与冬闲相比, 提高早晚稻稻谷、稻草和地上部的 N 素积累量, 在 N0、N50、N100、N150 这 4 个施氮水平上早、晚稻稻谷平均增幅分别

为 36.9%, 11.9%, 稻草平均增幅分别为 41.7%, 23.2%, 地上部的平均增幅分别为 38.6%, 19.7%。施氮显著提高这 2 种模式下早晚稻稻谷、稻草和地上部的 N 素积累量, 且随施氮量的增加, 均呈升高趋势。

与冬闲相比, 冬种绿肥的早、晚稻 N 素收获指

数,除在早稻 N150、晚稻 N100 水平下存在显著差异外,其余氮水平下均无显著差异。冬闲模式下,随施氮量的增加,早稻各处理间的 N 素收获指数均无显著差异,其中 N100 处理最高,但晚稻却呈下降趋势。冬种绿肥模式下的早、晚稻 N 素收获指数均随施氮量增加而降低。

表 2 不同处理早、晚稻植株的 N 素积累量

		早稻				晚稻			
处理		稻谷/	稻草/	地上部积累量/	收获	稻谷/	稻草/	地上部积累量/	收获
		(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	指数/%	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	(kg·hm ⁻²)	指数/%
F	N0	20.78bB	9.35bA	30.13bB	70.2aA	36.73cA	10.53cA	47.26bA	78.5aA
	N50	43.49aA	21.08abA	64.58aA	67.8aA	46.84bcA	20.18bcA	67.02bA	69.7abA
	N100	50.50aA	20.10abA	70.60aA	71.4aA	57.30bA	32.63bB	89.92bB	63.8bcA
	N150	54.57aA	25.53aB	80.10aB	68.4aA	75.03aA	59.37aA	134.41aA	56.0cA
G	N0	42.18bA	10.70cA	52.89cA	79.7aA	39.67cA	13.17cA	52.84dA	75.7aA
	N50	51.02abA	29.22bA	80.24bA	63.5bA	55.18bA	23.08cA	78.26cA	71.2aA
	N100	59.06aA	25.82bA	84.88bA	69.6bA	63.13bA	46.79bA	109.92bA	57.4bB
	N150	60.21aA	47.34aA	107.55aA	56.0cB	83.25aA	65.27aA	148.52aA	56.3bA

2.2.2 绿肥配施不同量氮肥对 P 素吸收的影响 从表 3 可以看出,与冬闲相比,冬种绿肥增加早晚稻稻谷、稻草和地上部 P 素积累,其中显著提高 N0 水平下早稻稻谷的 P 素积累,增幅达 65.2%。与 N0 处理相比,施氮同样地提高这 2 种模式的早晚稻稻谷、稻草和地上部 P 素积累,值得注意的是,当施氮量超过 N100 时,高氮处理(N150)降低这 2 种模式下的早稻稻谷 P 素吸收。冬种绿肥与冬闲的早、晚稻 P 素收获指数同一氮水平下表现同 N 素类似。随施氮量的增加,冬闲下的早稻 P 素收获指数有升高趋势,晚稻各处理间无显著差异,冬种绿肥的早、晚稻 P 素收获指数则是波动下降。

表 3 不同处理早、晚稻植株的 P 素积累量

		早稻				晚稻			
处理		稻谷/ (kg·hm ⁻²)	稻草/ (kg·hm ⁻²)	地上部积累量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%	稻谷/ (kg·hm ⁻²)	稻草/ (kg·hm ⁻²)	地上部积累量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%
F	N0	8.74cB	8.38abA	17.12bA	51.2cA	17.41aA	9.80aA	27.21aA	65.0aA
	N50	16.90bA	11.87aA	28.76aA	59.0bA	20.58aA	10.62aA	31.20aA	67.1aA
	N100	21.22aA	7.42bA	28.64aA	61.2bA	21.33abA	13.56aA	34.89aA	61.1aA
	N150	18.77abA	12.04aA	30.81aA	74.3aA	23.83aA	14.82aA	38.66aB	61.5aA
G	N0	14.44aA	9.88bA	24.33aA	59.9abA	18.35bA	12.02bA	30.37bA	60.4aA
	N50	15.49aA	13.35abA	28.83aA	53.8bA	22.32bA	13.90bA	36.22bA	62.7aA
	N100	19.88aA	10.34abA	30.22aA	66.0aA	22.34bA	15.99bA	38.33bA	58.3aA
	N150	15.28aA	15.20aA	30.48aA	49.5bB	28.74aA	25.16aA	53.90aA	53.7aA

2.2.3 绿肥配施不同量氮肥对 K 素吸收的影响 由表 4 可知,与冬闲相比,冬种绿肥同样增加 4 个氮水平下早、晚稻植株的 K 素积累量。施氮对这 2 种模式下的水稻植株 K 素积累量的影响与 P 素类似,有所不同的是高氮处理(N150)不仅降低 2 种模式下的早稻稻谷 K 素吸收,早稻的稻草和地上部也有所下降。施氮量对于 2 种模式下的氮素利用率的影响一致,即早稻氮肥利用率均以 N50 处理最高,晚稻 N150 处理最高;早、晚稻的农学效率和偏生产力随施氮量增加均是降低,值得注意的是,2 种模式的晚稻氮肥回收利用效率均随施氮量增加呈升高趋势。

2 种模式的早、晚稻 K 素收获指数在同一氮水平下的表现同 N、P 素收获指数相似。随施氮量增加,除冬闲下的早稻 K 素收获指数随施氮量的增加略有上升外,其他条件下的 K 素收获指数随施氮量的增加均呈下降趋势。

2.3 绿肥配施不同量氮肥对氮素利用率的影响

由表 5 可知,与冬闲相比,冬种绿肥在 N50、N100、N150 水平下的氮肥利用率、农学效率差异均未达显著水平,但氮肥偏生产力有所升高,早稻平均提高 2.2%,晚稻提高 5.3%。

2.4 双季稻稻谷产量、施氮量、地上部养分吸收之间的关系

2.4.1 双季稻稻谷产量与施氮量的关系 从图 1 可以看出,采用一元二次曲线对水稻稻谷产量和施氮量进行拟合,对于早稻而言,冬闲模式下,当施氮量为 170.3 kg/hm² 时,产量最高为 5701 kg/hm²,这与 N100 处理(施氮量 150 kg/hm²,产量 5 650 kg/hm²)相差较小,可认为拟合效果较好;冬种绿肥下,当施氮量为 122.8 kg/hm² 时,产量最高为 5 819 kg/hm²,最接近此时产量的为 N50 处理(施氮量 75 kg/hm²,产量 5 763 kg/hm²)。晚稻产量和施氮量拟合效果一般。

表 4 不同处理早、晚稻植株的 K 素积累量

处理	早稻				晚稻			
	稻谷/ (kg·hm ⁻²)	稻草/ (kg·hm ⁻²)	地上部积累量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%	稻谷/ (kg·hm ⁻²)	稻草/ (kg·hm ⁻²)	地上部积累量/ (kg·hm ⁻²)	收获 指数/%
F	N0	7.76bB	126.42bA	134.18bA	5.9aB	15.08aA	117.88bA	132.96bA
	N50	12.41aA	185.38abA	197.78aA	6.3aA	16.48aA	149.38bA	165.87bA
	N100	14.28aA	194.95aA	209.23aA	6.9aA	16.47aA	155.64bA	172.11bA
	N150	12.46aA	168.65abA	181.11abA	7.0aA	16.84aA	210.96aA	227.80aA
G	N0	12.33aA	143.60bA	155.93bA	7.9aA	15.35bA	127.11bA	142.46bA
	N50	13.59aA	198.59aA	212.18aA	6.4bA	17.68abA	155.00bA	172.68bA
	N100	14.64aA	218.23aA	232.86aA	6.3bA	15.85abA	176.62bA	192.47bA
	N150	11.71aA	175.44abA	187.15abA	6.3bA	18.14aA	231.22aA	249.36aA

表 5 不同处理早、晚稻氮素利用率

处理	氮肥回收利用率/%		氮肥农学效率/(kg·kg ⁻¹ ,N)		氮肥偏生产力/(kg·kg ⁻¹ ,N)	
	早稻	晚稻	早稻	晚稻	早稻	晚稻
N0						
F	N50	45.93aA	21.95aA	17.60aA	10.96aA	70.67aB
	N100	26.98aA	23.67aA	11.13aA	6.44aA	37.67bA
	N150	22.21aA	32.28aA	7.10aA	6.67aA	24.79cA
	N0					
G	N50	36.47aA	28.25abA	10.22aA	12.15aA	76.84aA
	N100	21.33bA	31.70aA	4.98aA	6.04aA	38.29bA
	N150	24.29abA	35.44aA	1.63aA	6.23aA	23.84cA
	N0					

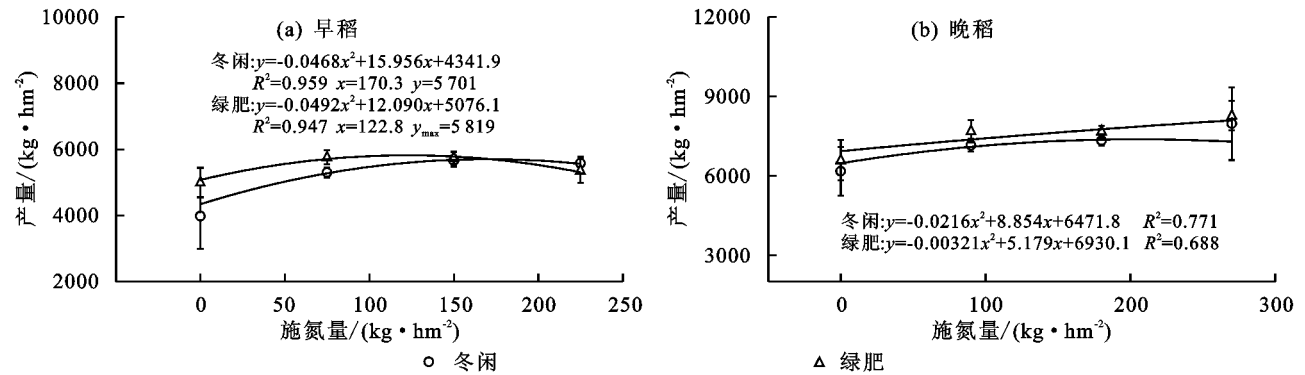


图 1 双季稻稻谷产量与施氮量的关系

2.4.2 施氮量与双季稻养分吸收的关系 由表 2、表 3、表 4 可知,施氮量增加降低早稻对 P、K 素吸收,促进晚稻对 N、P、K 素吸收。采用一元二次曲线对早稻的养分积累量和施氮量进行拟合,晚稻采用线性拟合。从图 2 可以看出,无论早稻还是晚稻,同一施氮量下,冬种绿肥的地上部 N、P、K 养分积累量均高于冬闲。从拟合效果来看,冬闲下的施氮量分别为 178.6、136.6 kg/hm²时,早稻地上部 P、K 素积累量最高,分别为 31.22、211.30 kg/hm²;冬种绿肥下的施氮量 130.0 kg/hm²,早稻地上部 K 素积累量最高,为 230.44 kg/hm²。

2.4.3 双季稻稻谷产量与养分吸收的关系 由图 3 可知,在冬闲下,早、晚稻稻谷产量与植株 N、P、K 养分吸收均呈显著正相关($p < 0.05$)。在冬种绿肥模式下,早稻稻谷产量与 K 吸收呈显著正相关,晚稻稻谷产量与植株 N、P、K 养分吸收均呈显著正相关。

同时,从图 3 还可看到,无论早稻还是晚稻,随 N、P、K 素积累量升高时(两直线相交之前),在相同 N、P、K 积累量下,冬种绿肥的早、晚稻稻谷产量均高于冬闲。

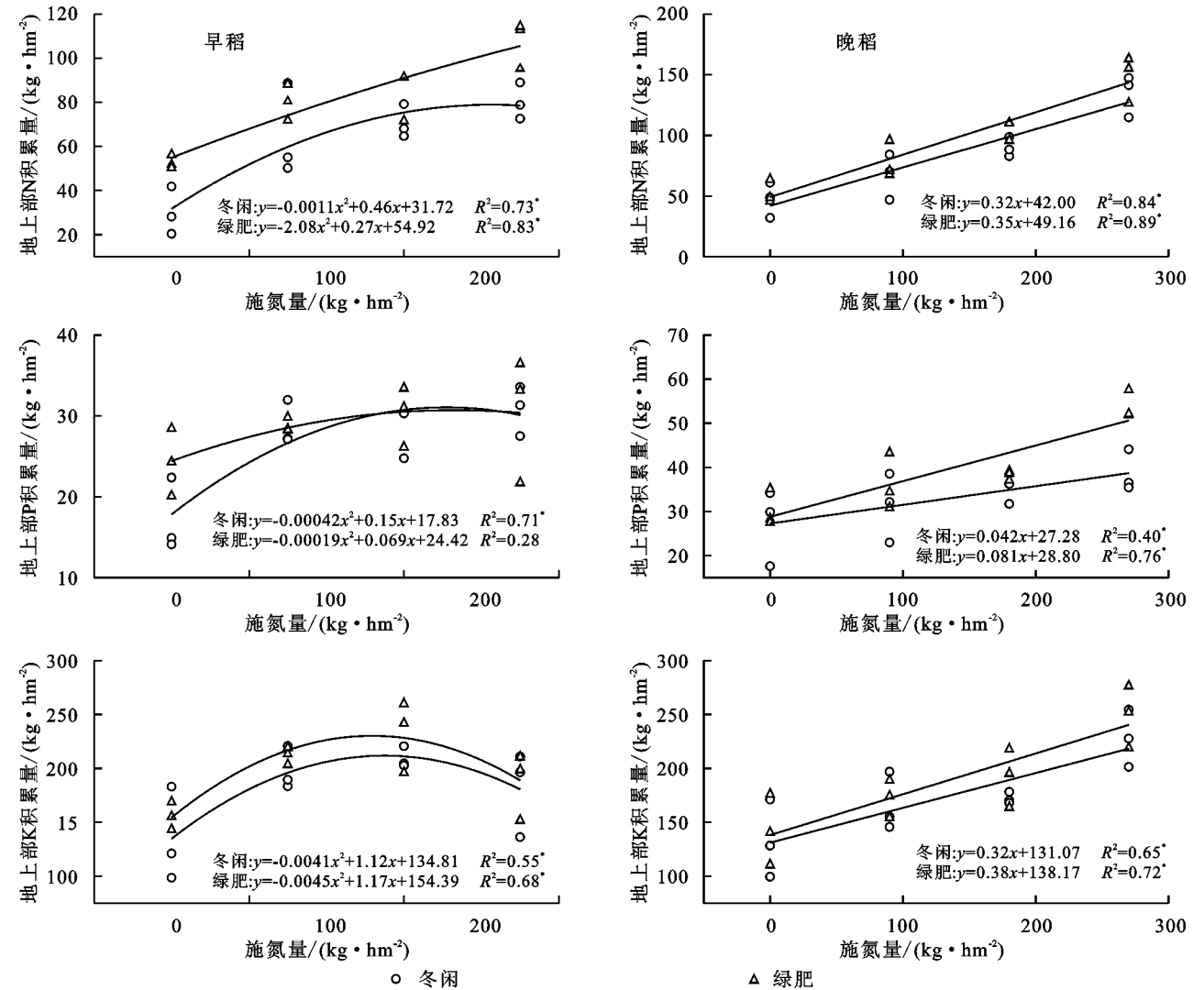
3 讨论

3.1 冬闲和绿肥利用下的合理施氮范围

氮素是水稻生长需求最多的元素之一,而科学施氮是水稻获得高产的关键。唐利忠等^[12]和徐新朋等^[13]试验均表明,早稻季氮肥用量 180 kg/hm²时,水稻产量最高;罗亢等^[14]试验表明,早稻季氮肥用量 150 kg/hm²为最佳。本试验研究中,即冬闲条件下,由双季稻稻谷产量与施氮量拟合得到早稻施氮量为 170.3 kg/hm²,稻谷产量最佳,这与前人研究结果类似,最接近此稻谷产量的为 N100 处理(施氮量 150 kg/hm²)。施氮量与早稻养分吸收拟合表明,冬闲下施氮量为 178.6 kg/hm²时,早稻地上部 P 素积累量

最高,此施氮量与 170.3 kg/hm²相近。同时 N100 处理的早稻 N 素收获指数最高,P、K 素收获指数与其他施氮处理相近。因此,冬闲下早稻季适宜施氮范围为 150.0~170.3 kg/hm²。紫云英作为南方重要的绿肥资源,翻压还田后,同样可以达到增产效果。本试验中,与冬闲相比,冬种绿肥可使早稻平均增产 8.0%,晚稻增产 5.7%,这与前人^[15]研究结果相似。同时紫云英作为豆科作物具有减肥潜力,紫云英作为豆科作物,其固氮作用可为水稻生长提供氮素,同时紫云英归还土壤后带入的有机物养分也可以显著改善土壤肥力,鲁艳红等^[10]研究表明,紫云英可替代早稻季 40%氮肥,对应本研究中的早稻季氮肥用量为 90 kg/hm²;胡柯鑫等^[9]试验表明,紫云英配施减氮 30%最佳,对应本研究中的早稻氮肥用量为 105 kg/

hm²,这与紫云英还田后腐解释放养分起到替代部分化肥的作用有关^[16]。本试验结果表明,冬种绿肥下,早稻 N50(75 kg/hm²)处理产量最高,且在施氮处理中的养分收获指数和氮肥利用率整体最佳,此氮肥用量均低于前人研究结果,这可能是因为本试验是基于秸秆还田条件下进行的,由于秸秆作为常见的有机物料,腐解后可以释放速效养分和有机物质,提高土壤有机质,改善土壤质量,可以起到减施化肥的效果。同时早稻稻谷产量与施氮量拟合表明,当施氮量为 122.8 kg/hm²时,水稻产量最佳,N50 处理下的稻谷产量与其最为接近;施氮量与早稻养分拟合表明施氮量为 130.0 kg/hm²,早稻地上部 K 积累量最高。因此,冬种绿肥模式下,可以认为早稻适宜施氮范围为 75.0~122.8 kg/hm²。



注: * 表示相关性达到显著水平 ($p < 0.05$)。下同。

图 2 施氮量与双季稻养分吸收的关系

本研究中,2 种模式下的晚稻产量均随施氮量增加均表现上升趋势,这可能与晚稻品种有关,本试验晚稻品种为杂交稻,氮素需求量相对较多一些,也有可能与本试验田块的土壤肥力有关,相关研究^[17]表

明,水稻高产田需氮量为 240 kg/hm²,而本试验中最高氮水平为 270 kg/hm²,为此明确这 2 种模式下的晚稻季氮肥用量,应考虑从经济效益、土壤质量、精米产量与施氮量关系^[18]等方面深入研究。

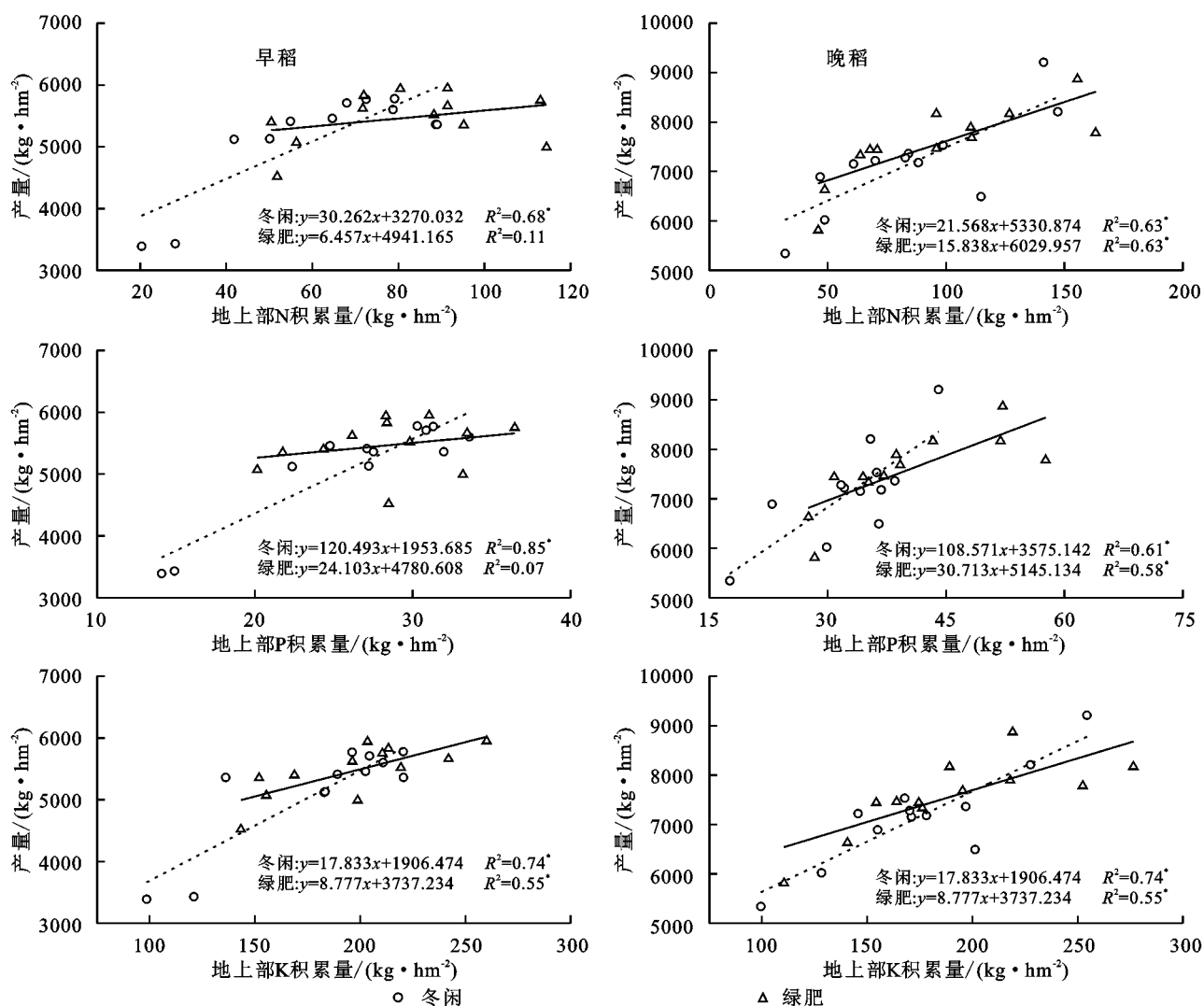


图 3 双季稻稻谷产量与植株地上部养分吸收的关系

3.2 绿肥利用与养分吸收、氮素利用率关系

与冬闲相比,绿肥利用后,土壤肥力的提高可为后续水稻生长提供更多 N、P、K 等系列元素,促进水稻养分吸收,本文试验中,冬种绿肥较冬闲相比,可以增加水稻植株 N、P、K 素吸收,从而达到增产效果,这与周泽弘等^[19]研究结果一致。氮素利用率和养分收获指数是反映作物对养分吸收的重要指标,过量的施氮导致氮素利用率低下,同时降低作物养分收获指数^[7]。本研究中,无论是冬种绿肥还是冬闲下,早晚稻的氮肥农学效率、氮肥偏生产力均以 N50 处理最高,且随施氮量增加呈降低趋势,养分收获指数随施氮量增加呈降低趋势。早稻的氮肥回收利用率以 N50 处理最高,当施氮量增加时,冬闲和冬种绿肥下早稻氮肥利用率可分别最低降至 22.21%, 21.33%。这可能与过多的氮肥施入后,大量的氮素通过淋溶、反硝化作用、氨挥发和径流等途径^[20]从稻田中损失密切相关,从而影响水稻产量增加。本试验中,2 种模式下的晚稻氮肥利用率随施氮量增加有增加趋势,这与二者晚稻地上部 N 素积累量随施氮量增加而显著升高相关联,也是晚

稻产量随施氮量增加而上升的重要原因。

施氮可以促进水稻对 P、K 素的吸收,这与本试验中高氮(N150)处理降低早稻 K 素吸收的结果不同。在本研究中,早稻地上部 K 素吸收随施氮量增加表现出先增后降的规律,造成这种差异的主要原因是,相对 K 素来说,水稻对于 N 素吸收相对较多,早稻氮肥用量没有超过水稻对 N 素的需求,但过多的氮肥用量使得水稻 K 素超过其需要阈值^[21],导致 K 素吸收降低。有研究^[22]表明,水稻产量与植株 N、P、K 养分吸收密切相关,张立成等^[23]研究表明,早稻产量与植株的氮、磷、钾吸收呈显著正相关,这与本研究在冬闲条件下相类似。图 2、图 3 表明,前期随着 N、P、K 吸收的增加,同一施氮量和相同积累量下,冬种绿肥下早晚稻养分积累量和产量均高于冬闲,这是因为绿肥还田后,土壤有机质、全氮、速效钾等综合肥力指标得以提升^[24-25],相对冬闲条件下,能为水稻提供更多速效养分,促进 N、P、K 素的高效吸收。单从这 2 种模式相对稳定的早稻地上部 K 素积累量(图 2)来看,冬闲下和冬种绿肥下的施氮量分别为 136.6,

130.0 kg/hm²,说明冬种绿肥存在一定减肥潜力。因此,本试验中高氮处理 N150 降低早稻地上部 K 素吸收,施氮量过高下导致早稻氮素利用率和部分养分收获指数降低是 2 种模式的早稻产量降低的重要原因。

4 结论

(1)与冬闲相比,冬种绿肥可使早稻平均增产 8.0%,晚稻 5.7%,同时促进水稻植株 N、P、K 素吸收。

(2)施氮提高 2 种模式的水稻产量和水稻 N、P 素吸收,高氮处理 N150 降低早稻 K 素吸收,早晚稻的氮素利用率和养分收获指数均随施氮量增加大多呈下降趋势。

(3)结合稻谷产量与施氮量拟合分析、施氮量与早稻地上部拟合分析、养分吸收利用等方面,综合考量,冬闲条件下,早稻季氮肥适宜施用范围为 150.0~170.3 kg/hm²,绿肥利用下,早稻季氮肥适宜施用范围为 75.0~122.8 kg/hm²,明确晚稻季氮肥用量还需从经济效益等其他参数深入研究。

因此,在南方双季稻区,冬季种植绿肥,在早稻移栽前翻压利用,对于减少氮肥投入及实现水稻高产具有切实意义。

参考文献:

- [1] 杨德生,黄冠军,李勇,等.水稻氮高效栽培技术、品种改良和生理机制研究进展[J].华中农业大学学报,2022,41(1):62-75.
- [2] 秦娜,朱灿灿,代书桃,等.施氮时期对谷子产量、品质和氮素利用率的影响[J].中国农业大学学报,2023,28(1):67-78.
- [3] 聂良鹏,郭利伟,郑春风,等.种植翻压紫云英配施化肥对稻田土壤理化性状和水稻产量的影响[J].中国农学通报,2021,37(27):65-69.
- [4] Chen S, Xu C M, Yan J X, et al. The influence of the type of crop residue on soil organic carbon fractions: An 11-year field study of rice-based cropping systems in southeast China[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 223:261-269.
- [5] 朱强,张静,郭再华,等.稻草和紫云英联合还田下施氮水平对水稻产量及土壤氮素形态的影响[J].植物营养与肥料学报,2020,26(12):2177-2183.
- [6] 朱启东,鲁艳红,廖育林,等.施氮量对双季稻产量及氮磷钾吸收利用的影响[J].水土保持学报,2019,33(2):183-188.
- [7] 褚旭,李帅,赵亚南,等.施氮量和种植密度对玉米产量及磷钾吸收利用的影响[J].中国农业科技导报,2020,22(12):115-126.
- [8] 张颖睿,杨滨娟,黄国勤.紫云英翻压量与不同施氮量对水稻生长和氮素吸收利用的影响[J].生态学杂志,2018,37(2):430-437.
- [9] 胡柯鑫,罗尊长,董春华,等.紫云英协同秸秆还田下氮钾减施对双季稻产量及光合特性的影响[J].华北农学报,2020,35(1):141-148.
- [10] 鲁艳红,廖育林,聂军,等.紫云英与尿素或控释尿素配施对双季稻产量及氮钾利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):360-368.
- [11] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法[M].北京:中国农业科技出版社,1999.
- [12] 唐利忠,石泉,王晓玉,等.氮肥用量和运筹方式对湘南早稻产量和氮素利用效率的影响[J].中国农学通报,2019,35(11):72-81.
- [13] 徐新朋,周卫,梁国庆,等.氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2015,21(3):763-772.
- [14] 罗亢,曾勇军,石庆华,等.施氮量和密度对机直播双季稻产量与氮素利用率的影响研究[J].核农学报,2021,35(12):2850-2859.
- [15] 王慧,周国朋,常单娜,等.湘北双季稻区种植翻压紫云英的氮肥减施效应[J].植物营养与肥料学报,2022,28(1):33-44.
- [16] 程会丹,鲁艳红,聂军,等.化肥减施下紫云英不同翻压量对双季稻产量及养分利用效率的影响[J].华北农学报,2020,35(3):143-152.
- [17] 王秀斌,徐新朋,孙刚,等.氮肥用量对双季稻产量和氮肥利用率的影响[J].植物营养与肥料学报,2013,19(6):1279-1286.
- [18] 彭显龙,车俊杰,宋聪,等.确定经济合理施氮量的新方法:基于施氮量与稻米产量效应函数[J].植物营养与肥料学报,2022,28(7):1182-1193.
- [19] 周泽弘,梁琴,全紫曼,等.翻压山豆绿肥与氮肥减施对水稻生长及其养分吸收与产量的影响[J].西北植物学报,2021,41(11):1962-1970.
- [20] 孙文彦,田昌玉,尹红娟,等.长期施用有机肥小麦玉米轮作土壤系统氮盈余及损失量估算[J].中国土壤与肥料,2022(3):21-28.
- [21] 肖新,朱伟,肖靛,等.不同水肥管理对水稻分蘖期根系特征和氮磷钾养分累积的影响[J].土壤通报,2016,47(4):903-908.
- [22] Katsura K, Okami M, Mizunuma H, et al. Radiation use efficiency, N accumulation and biomass production of high-yielding rice in aerobic culture[J]. Field Crops Research, 2010, 117(1):81-89.
- [23] 张立成,李娟,章明清,等.不同轮作施肥模式对菜田作物产量及养分吸收的影响[J].福建农业学报,2021,36(10):1194-1202.
- [24] 王飞,王利民,何春梅,等.紫云英与有机物料连续还田在黄泥田水稻稳产提质增效中的作用[J].土壤,2022,54(3):455-463.
- [25] 高嵩涓,周国朋,曹卫东.南方稻田紫云英作冬绿肥的增产节肥效应与机制[J].植物营养与肥料学报,2020,26(12):2115-2126.