

基于养分专家系统的不同施氮量对双季稻产量及养分利用效率的影响

鲁艳红^{1, 2}, 廖育林^{1, 2}, 聂军^{1, 2*}, 朱启东^{1, 2}, 周兴^{1, 2}, 程会丹^{1, 2}, 聂鑫^{1, 2}

(1. 湖南省土壤肥料研究所, 湖南长沙 410125; 2. 农业部湖南耕地保育科学观测实验站, 湖南长沙 410125)

摘要: 基于养分专家(NE)推荐系统推荐施肥方案, 采用田间试验研究不同施氮量对双季稻产量、氮、磷、钾养分吸收利用效率的影响, 探讨氮、磷、钾养分利用效率及磷钾养分吸收利用效率与氮养分吸收利用的关系。结果表明, 早、晚稻产量均表现为在一定范围内随施氮量提高而提高, 之后产量随施氮量升高而降低。本试验施氮条件下, 早稻产量最高的处理是 75%N (105 kg N/ha), 比不施肥(CK)和不施化学氮肥(N0)处理分别增产 58.1% 和 33.1%; 晚稻产量最高的为 100%N (146 kg N/ha) 处理, 比 CK 和 N0 分别增产 67.6% 和 42.1%。施氮水平对双季稻植株氮、磷、钾养分积累量有显著影响, 早、晚稻稻谷氮、磷、钾积累量均以 100%N 处理最高, 其水稻植株氮、磷、钾积累量也较高。不同施氮水平对氮、磷、钾养分利用效率也有显著影响。早晚稻植株磷、钾积累量与氮积累量之间存在极显著相关关系, 磷、钾素表现利用率及农学效率与水稻植株氮积累量也存在极显著正相关关系。综上所述, 适宜的施氮量可以增加双季稻产量, 促进水稻对氮、磷、钾养分的吸收, 同时提高双季稻的磷、钾素利用效率。在本试验条件下, 综合考虑双季稻产量效应及氮磷钾养分利用效率, 早稻施氮量 105 kg N/ha, 晚稻 146 kg N/ha 较为适宜。

关键词: 氮肥用量; 双季稻; 产量; 养分吸收利用

肥料在作物生产过程中有着无法取代的支撑作用, 被称之为作物的“粮食”。曾有学者在详细分析了 20 世纪作物生产发展的各影响因素之后得出结论: 20 世纪全世界所增加的作物产量中的一半是来自于化肥施用^[1]。同时, 施肥可以提高粮食单产 50% 以上, 总产 30%, 20 世纪 80 年代联合国粮农组织在世界各地通过大量田间试验已经验证此结论。我国化肥试验网的大量试验结果也表明, 施用化肥可提高水稻、玉米等粮食作物单产 40%–50%, 且根据其结果推算, 1986–1990 年粮食总产中有 35% 左右是来自于化肥施用的作用^[2]。国内外的经验均表明, 无论是处于什么阶段的国家, 最有效、最重要的增产措施是施肥, 特别是化肥的施用。

在越来越大的粮食需求压力下, 大量施用化肥在保障我国粮食安全中起着举足轻重的作用。但是, 随着化肥用量不断增加其增产效应呈现降低趋势, 在过去的 30 多年里, 我国化肥施用量增长了 4.5 倍, 粮食产量却只是增长了近 85%, 化肥施用量的增速与同时期粮食产量的增速相

差较大^[3]。同时, 大量和不合理施肥还带来其他不良后果, 如肥料利用率偏低、肥料损失严重、农产品品质下降、生态环境污染风险加大等, 严重威胁到农业生产效益及农业可持续发展^[1, 3–5]。尤其是氮肥的滥用是造成这些后果的主要原因^[6], 我们更应该在保障粮食安全的同时, 合理减少氮肥施用、提高氮肥利用率以减轻环境压力, 达到高产高效环保的目标。

如何调控氮肥施用量, 减少氮无效损失, 促进氮素有效吸收和利用, 同时提高作物产量, 一直是植物营养研究领域的焦点问题。在目前的条件下, 在我国耕地中每施用 1 公斤氮素可增加水稻、小麦和玉米三大粮食作物的产量在 10 kg 左右^[1]。闫湘等^[3]通过总结分析 2002–2005 年我国 19 个省的施肥调查结果和 22 个省的养分监测田间试验结果, 得出结论: 当前我国水稻的施氮量为 193.5 kg/ha, 存在氮肥施用过量的地区约占 25% ~ 40%, 而 10% ~ 25% 地区则是施用量不足。据报道, 我国谷类粮食作物氮肥利用率和农学效率远远低于同期世界水平^[3, 7]。

基金项目: 国际植物营养研究所合作项目(IPNI-Hunan); 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项(2017YFD0301504, 2018YFD03006); 湖南省农业科技创新资金项目(2018ZD02–2)。

作者简介: 鲁艳红(1974—), 女, 湖北武穴人, 博士, 副研究员, 主要从事植物营养与作物高效施肥研究。E-mail: luyanhong6376432@163.com

通讯作者: 聂军(1972—), 男, 湖南沅江人, 博士, 研究员, 主要从事植物营养与施肥原理研究。E-mail: niejun197@163.com

适宜的施氮量可以使作物增产,降低农业环境污染的风险,同时促进田间养管理平衡。了解氮、磷、钾三者作物吸收利用时相互影响的关系对于指导如何保证各种养分的平衡供应,提高化肥利用率,保证我国粮食安全,缓解环境压力有重要意义。目前,大部分研究主要集中在施氮量对粮食产量效应、氮肥利用率及对土壤氮素肥力的影响等方面,而在施氮量对作物磷、钾吸收积累及利用效率的影响上关注较少,本研究通过南方双季稻区氮肥量级试验,探讨不同施氮水平下双季稻的产量以及氮含量与磷、钾积累量及其利用率的关系,旨在为南方双季稻种植区制定高产高效的养管理策略提供科学依据。

1 材料与方

1.1 试验地点及材料

试验于2017年3月~2017年11月在湖南省长沙县高桥镇(北纬28°28'49",东经113°20'50")进行。该地处于东亚季风区,属亚热带湿润气候,海拔85m,年均气温17.2℃,日照时间1663h,年降水量1422mm。土壤类型属于河流沉积物发育而成的河沙泥。试验前采集0~20cm耕层土壤测定其基本理化性状:pH5.4,碱解氮202mg/kg,有效磷18.4mg/kg,速效钾83.4mg/kg。供试早稻品种为常规稻湘早粳32号,晚稻品种为杂交稻深优9586。

1.2 试验设计

试验共设7个处理:1)CK(不施任何肥料);2)N0(不施氮,磷、钾肥用量同100%N处理);3)50%N(氮肥按100%N用量的50%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);4)75%N(氮肥按100%N处理用量的75%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);5)100%N(早稻氮肥用量140kgN/ha,磷肥用量65kgP₂O₅/ha,钾肥用量81kgK₂O/ha;晚稻氮肥用量146kgN/ha,磷肥用量68kgP₂O₅/ha,钾肥用量108kgK₂O/ha);6)125%N(氮肥按100%N处理用量的125%施用,磷、钾肥用量同100%N处理);7)150%N(氮肥按100%N处理用量的150%施用,磷、钾肥用量同100%N处理)。100%N处理的施肥量及施肥方案采用养分专家系统(Nutrient Expert System)^[8]推荐所得。施用的肥料种类氮肥为尿素,磷肥为钙镁磷肥,钾肥为氯化钾。早稻施肥处理氮肥基-穗-基-穗肥比例为30%-35%-35%,钾肥按照基-穗

肥比例为50%-50%;分蘖肥追肥时间为早稻移栽后第17天,穗肥追肥为早稻移栽后第42天。晚稻氮、钾肥基-穗-穗肥比例均为40%-40%-20%;分蘖肥追肥时间晚稻移栽后第7天,穗肥追肥为早稻移栽后第30天。磷肥均做基施一次性施用。其他管理与当地田间管理一致。

1.3 分析测定项目

试验开始前采集0~20cm耕层土样,用于测定土壤pH、碱解氮、有效磷、速效钾。早、晚稻成熟期各小区单打单晒称重计产。并测定稻谷和稻草氮、磷、钾含量。

1.4 计算方法[9]

稻谷氮(磷、钾)积累量(Nitrogen/phosphorus/potassium accumulation by grain, GNA, kg/ha) = 稻谷产量 × 稻谷氮(磷、钾)含量

稻草氮(磷、钾)积累量(Nitrogen/phosphorus/potassium accumulation by straw, SNA, kg/ha) = 稻草产量 × 稻草氮(磷、钾)含量

植株氮(磷、钾)总积累量(Total nitrogen/phosphorus/potassium accumulation, TNA, kg/ha) = 稻谷氮(磷、钾)积累量 + 稻草氮(磷、钾)积累量

氮肥(磷、钾肥)表观利用率(Apparent use efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, ANE, %) = (施肥区作物吸氮(磷、钾)量 - 不施肥区作物吸氮(磷、钾)量) / 施肥量 × 100(注:不施肥区为CK处理,下同。)

氮肥(磷、钾肥)农学效率(Agronomic efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, NAE, kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / 施氮(磷、钾)肥量

氮肥(磷、钾肥)生理利用率(Physiological efficiency of nitrogen/phosphorus/potassium fertilizer, NPE, kg/kg) = (施肥区稻谷产量 - 不施肥区稻谷产量) / (施肥区地上部氮(磷、钾)积累量 - 不施肥区地上部氮(磷、钾)积累量)

1.5 数据处理与统计

数据处理及统计分析采用Microsoft Excel 2010和DPS 7.5等数据处理系统。

2 结果与分析

2.1 不同处理对双季稻产量的影响

施用氮肥对早、晚稻产量有影响作用(表1)。早稻不同处理稻谷产量表现为 75%N > 100%N > 125%N > 150%N > 50%N > N0 > CK, 在施氮量低于 75%N 时, 稻谷产量随着施氮量增加而增加; 当高于 75%N 时, 随着施氮量的增加而降低。晚稻不同处理稻谷产量 100%N > 75%N > 125%N > 150%N > 50%N > N0 > CK, 在施氮量不超过 100%N 处理时, 稻谷产量随施氮量增加而增加, 超过 100%N 后随施氮量提高稻谷产量呈降低趋势。早稻稻草产量在施氮量低于 125%N 时随施氮量增加而增加, 晚稻稻草产量随施氮量变化趋势与稻谷产量变化趋势一致; 早晚稻生物产量受施氮量影响的增、减产规律与稻谷产量相似。无论早晚稻的稻谷、稻草产量均是 CK 处

理最低, 其次为 N0 处理; 早稻季最高产量处理 75%N 比 CK 和 N0 处理分别增产 58.1% 和 33.1%, 达到显著差异水平 ($p < 0.05$); 晚稻季最高产量处理 100%N 比 CK 和 N0 分别增产 67.6% 和 42.1% ($p < 0.05$)。

2.2 不同处理对双季稻氮、磷、钾积累量的影响

2.2.1 不同处理的双季稻氮、磷、钾含量

由表2可知, 施氮提高了早、晚稻稻谷和稻草氮含量。早稻施氮处理稻谷、稻草氮含量比不施氮(CK 和 N0)处理高 13.87% 和 33.08%、11.07% 和 82.19%, 晚稻季除 150%N 处理的稻谷氮含量低于 CK 处理外, 其余各施氮处理均高于不施氮处理。施氮对双季稻吸钾能力也有一定的影响, 从表2中可以看出除早稻施氮处理稻谷钾含量与不施氮的 N0 处理无明显差异外, 早晚稻稻谷、稻草钾含量施氮处理均低于不施氮的 N0、CK 处理。施氮对

表 1 不同处理早、晚稻产量 (kg/ha)

处理	早稻			晚稻		
	稻谷产量	稻草产量	生物产量	稻谷产量	稻草产量	生物产量
CK	4250d	2207c	6458c	5093d	3331c	8425d
N0	5049cd	2605bc	7654bc	6008c	3739bc	9747c
50%N	5345bcd	3115ab	8460ab	7448b	4281ab	11729b
75%N	6718a	3335a	10053a	7759b	4752a	12510b
100%N	6560ab	3361a	9921a	8538a	5136a	13673a
125%N	6051abc	3661a	9712a	7548b	4488ab	12036b
150%N	5663abc	3372a	9035ab	7515b	4458ab	11972b

注: 差异显著性检验采用 Duncan 新复极差法, 同一列中数字后不同字母表示差异达 0.05 显著水平。下同。

表 2 不同处理早晚稻稻谷、稻草的 N、P、K 含量 (g/kg)

处理	早稻			晚稻			
	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	
稻谷	CK	11.32	3.15	8.14	9.53	2.73	6.18
	N0	10.67	3.14	6.48	8.35	2.72	6.13
	50%N	14.20	3.28	6.13	9.59	2.91	5.76
	75%N	12.89	3.22	5.47	9.62	2.56	5.50
	100%N	13.52	4.46	6.40	9.57	2.87	5.35
	125%N	14.01	4.20	5.88	10.27	2.94	5.60
	150%N	13.01	3.56	6.50	9.28	2.94	5.32
稻草	CK	5.60	2.77	39.06	5.42	1.42	42.31
	N0	5.56	2.74	39.28	5.20	1.34	38.24
	50%N	7.80	2.24	37.85	5.69	1.74	37.19
	75%N	6.22	3.03	37.47	7.34	1.53	36.11
	100%N	7.59	2.75	36.07	7.33	1.55	36.03
	125%N	8.09	2.69	35.48	7.01	1.75	37.05
	150%N	10.13	2.24	38.54	7.00	1.79	37.07

水稻磷素的影响不明显。

2.2.2 不同处理的双季稻氮、磷、钾积累量

施氮量对早、晚稻氮、磷、钾的吸收积累均产生一定影响(表3)。所有处理中早稻稻谷100%N处理氮、磷积累量最高,在施氮量低于100%时,稻谷氮、磷积累量随着施氮量的增加而增加,当施氮量超过100%N时,稻谷氮、磷积累量随施氮量增加而降低,钾虽无此规律,但早稻稻谷钾积累量仍以100%N处理最高。早稻稻草氮积累量在本试验施氮量条件下随施氮量的增加而增加,磷积累量以75%N处理最高,钾积累量以150%N处理最高。早稻植株氮、磷、钾积累量最高的处理分别为125%N、100%N和150%N处理。

晚稻稻谷氮积累量变化趋势与早稻类似,在施氮量

为100%N以下时随施氮量的提高而提高,当超过该施氮时随施氮量提高而降低。所有处理中稻谷磷、钾积累量最高均为氮积累量最高的100%N处理。晚稻稻草氮积累量随施氮量变化规律与稻谷类似,稻草氮积累量最高的100%N处理其磷、钾积累量也较高。晚稻植株氮、磷、钾积累量最高的处理均为100%N处理。这可能说明水稻吸收矿质营养元素时,氮的积累会对磷、钾元素的积累有一定的促进作用。

2.2.3 双季稻氮积累量与磷、钾素积累的关系

双季稻氮积累量对植株磷素的吸收积累有显著影响(图1)。早、晚稻植株磷积累量随着氮积累量的升高而增加,且呈极显著相关关系。

双季稻氮积累量会影响水稻对钾素的吸收积累(图

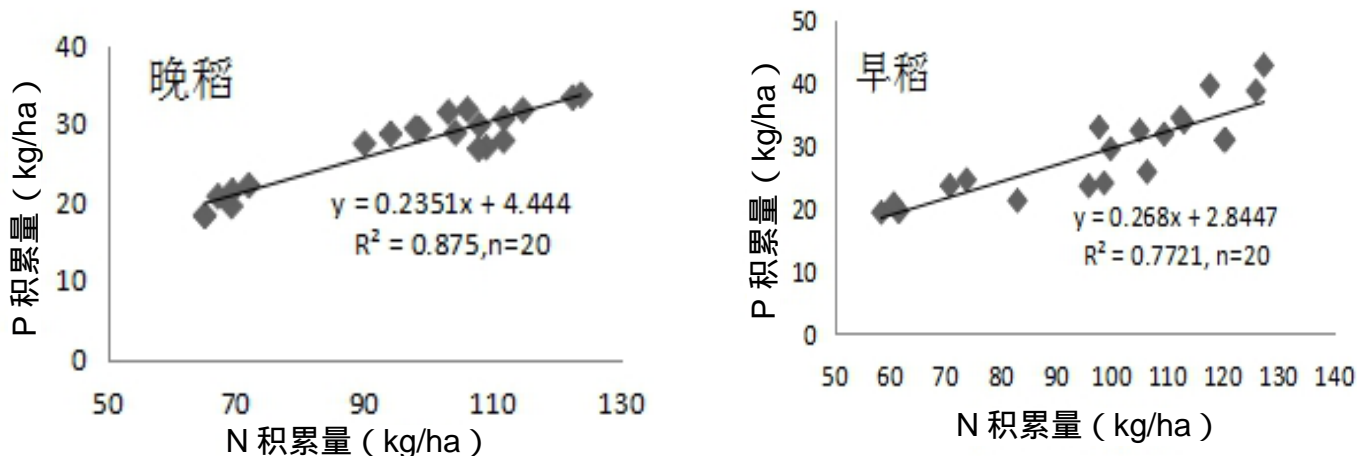


图1 早、晚稻N积累量与磷素吸收积累的关系

表3 不同处理早晚稻稻谷、稻草及植株的N、P、K积累量(kg/ha)

处理	稻谷			稻草			地上部		
	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)	氮(N)	磷(P)	钾(K)
	早稻								
CK	48.11b	13.39e	34.60ab	12.36d	6.11b	86.22c	60.47b	19.50e	120.82c
N0	53.87b	15.85de	32.72b	14.49d	7.14b	102.34bc	68.35b	22.35de	125.89bc
50%N	75.90a	17.53cde	32.77b	24.29c	6.98b	117.89ab	100.19a	24.51de	150.66ab
75%N	86.60a	21.63bc	36.75ab	20.74c	10.11a	124.96ab	107.34a	31.74bc	161.71a
100%N	88.69a	29.26a	41.98a	25.51bc	9.24a	121.23ab	114.20a	38.50a	163.21a
125%N	84.77a	25.41ab	35.58ab	29.62ab	9.85a	129.90a	114.39a	35.26ab	165.48a
150%N	73.67a	20.16cd	36.81ab	34.16a	7.55b	129.96a	107.83a	27.71cd	166.77a
	晚稻								
CK	48.54d	13.90e	31.48d	18.06d	4.73b	140.95b	66.60e	18.64e	172.43c
N0	50.16d	16.34d	36.83c	19.44cd	4.26b	142.98b	69.61e	21.35d	179.81bc
50%N	71.42c	21.67b	42.90ab	24.36c	7.45a	159.21ab	95.78d	29.12bc	202.11abc
75%N	74.64bc	19.86c	42.67ab	34.88ab	7.27a	171.58ab	109.52b	27.13c	214.26a
100%N	81.71a	24.50a	45.68a	37.64a	7.96a	185.04a	119.35a	32.46a	230.71a
125%N	77.51ab	22.19b	42.27ab	31.46b	7.85a	166.28ab	108.98bc	30.04b	208.55ab
150%N	69.74c	22.09b	39.98bc	31.20b	7.98a	165.25ab	100.94cd	30.07b	205.22ab

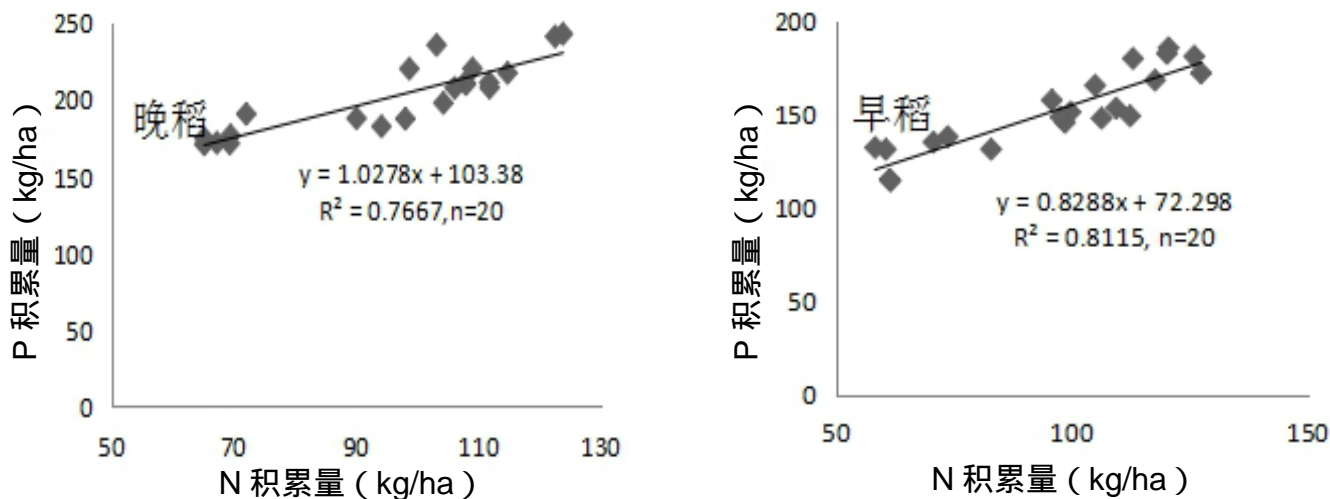


图 2 早、晚稻 N 积累量与钾素吸收积累的关系

2), 早、晚稻植株钾积累量与氮积累量存在极显著正相关。

2.3 不同处理对双季稻氮、磷、钾养分利用效率的影响

2.3.1 不同处理的双季稻氮、磷、钾利用效率

施氮对氮、磷、钾素利用效率有一定影响(表4)。早、晚稻的氮素表观利用率均随着氮肥施用量增加而降低;磷素表观利用率在早稻季是随着施氮量增加呈先升高后下降的趋势,晚稻季则无明显规律;钾素表观利用率在晚稻季也是先增加后下降,在早稻季却是随着施氮量增加而上升。早稻 100%N 处理的氮肥表观利用率与 50%N、150%N 处理差异显著 ($p < 0.05$), 晚稻 100%N 处理与 150%N 处理的氮肥表观利用率差异也显著 ($p < 0.05$)。100%N 处理的磷素表观利用率是所有处理中最高的,钾素的表现

利用率也较高。100%N 处理的两季水稻氮、磷、钾生理利用率较高。早稻氮、磷、钾肥农学效率均表现为在一定施氮量范围内先呈现随施氮量提高而上升,当超过该施氮量水平后随施氮量增加反而下降的趋势;晚稻氮肥农学效率随施氮量增加而下降,磷、钾肥农学效率与早稻表现为类似的变化趋势。早稻季氮、磷、钾肥农学效率最高的均为 75%N 处理,与 100%N 处理差异不显著 ($p > 0.05$), 75%N 氮肥农学效率与 125%N、150%N 差异均达到显著 ($p < 0.05$); 晚稻 100%N 处理的氮肥农学效率较高,与 50%N、150%N 处理差异均达显著水平 ($p < 0.05$), 磷、钾肥农学效率最高的 100%N 处理与其它处理差异显著 ($p < 0.05$)。

2.3.2 双季稻氮积累量与磷、钾素利用的关系

表 4 不同处理早晚稻的氮、磷、钾肥利用效率

处理	表观利用率 RE(%)			生理利用率 PE (kg/kg)			农学效率 AE (kg/kg)		
	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)	氮 (N)	磷 (P)	钾 (K)
早稻									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N0	—	12.28% ^d	21.19% ^b	—	227.06 ^a	140.91 ^a	—	28.11 ^b	11.88 ^b
50%N	56.75% ^a	17.63% ^d	44.41% ^{ab}	26.66 ^b	212.37 ^a	52.97 ^a	15.64 ^{ab}	38.56 ^{ab}	16.29 ^{ab}
75%N	44.63% ^{ab}	43.08% ^{bc}	60.85% ^{ab}	52.13 ^a	199.82 ^a	59.81 ^a	23.50 ^a	86.89 ^a	36.72 ^a
100%N	38.37% ^b	66.89% ^a	63.09% ^{ab}	40.55 ^{ab}	114.79 ^a	54.57 ^a	16.50 ^{ab}	81.31 ^a	34.37 ^a
125%N	30.81% ^{bc}	55.49% ^{ab}	66.47% ^a	31.88 ^{ab}	109.17 ^a	41.43 ^a	10.29 ^b	63.39 ^{ab}	26.79 ^{ab}
150%N	22.55% ^c	28.91% ^{cd}	68.38% ^a	21.89 ^b	98.56 ^a	22.33 ^a	6.73 ^b	49.73 ^{ab}	21.02 ^{ab}
晚稻									
CK	—	—	—	—	—	—	—	—	—
N0	—	9.14% ^d	8.23% ^b	—	341.24 ^a	-45.65 ^a	—	30.79 ^c	10.19 ^c
50%N	39.98% ^a	35.31% ^{bc}	33.09% ^{ab}	81.66 ^a	226.56 ^b	142.06 ^a	32.25 ^a	79.27 ^b	26.25 ^b
75%N	39.20% ^a	28.61% ^c	46.63% ^{ab}	62.13 ^b	313.82 ^a	64.96 ^a	24.34 ^b	89.74 ^b	29.71 ^b
100%N	36.13% ^a	46.56% ^a	64.98% ^a	65.44 ^b	249.46 ^b	63.55 ^a	23.59 ^b	115.97 ^a	38.40 ^a
125%N	23.22% ^b	38.41% ^{ab}	40.27% ^{ab}	57.33 ^b	213.08 ^b	67.92 ^a	13.45 ^c	82.64 ^b	27.36 ^b
150%N	15.68% ^b	38.51% ^{ab}	36.56% ^{ab}	70.51 ^{ab}	211.33 ^b	107.42 ^a	11.06 ^c	81.53 ^b	26.99 ^b

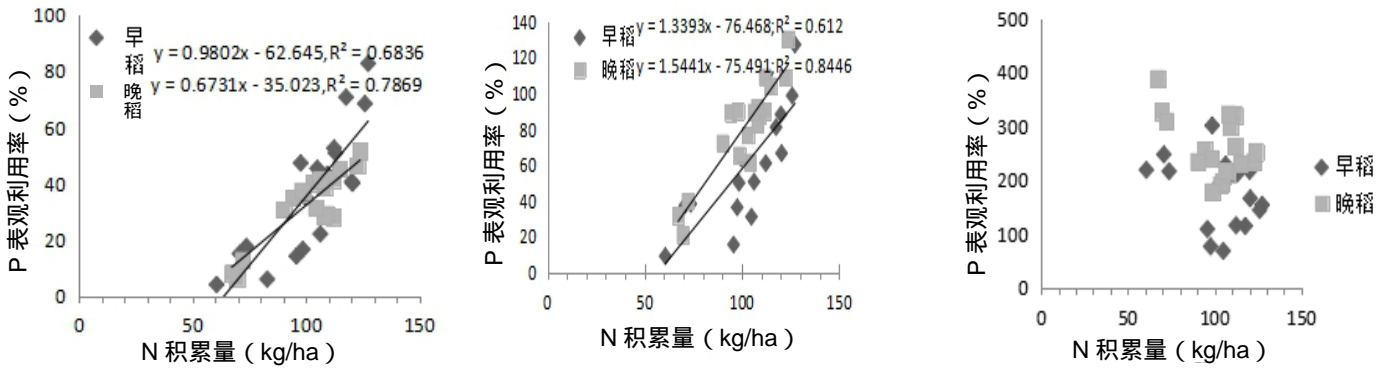


图3 氮含量与磷素利用的关系

双季稻氮积累量对磷素利用效率有不同影响(图3)。早、晚稻磷的表观利用率与水稻植株氮积累量呈正相关关系,农学效率也与氮素积累呈极显著相关性,磷素生理利用率与氮积累量的相关性不明显。

双季稻氮积累量对钾素利用效率有一定影响(图4)。双季稻钾素表观利用率与水稻氮素积累呈极显著的相关性,农学效率也与植株氮积累量呈正相关关系,生理利用率与氮素积累的相关性不明显。

3. 讨论

科学施肥是指按照作物养分的需求规律,以科学的方法合理施用化肥,使化肥资源得到充分合理的利用,以达到高产、高效农业生产和土壤生产力可持续,以及宏观调控农业生态系统的养分平衡和尽可能改善环境质量的目的。

氮肥合理施用增加双季稻产量。氮素作为水稻生长发育过程中所必需的大量元素之一,且由于“养分的不可替代性”,想要保证水稻稳产、高产,氮肥的施用必不可

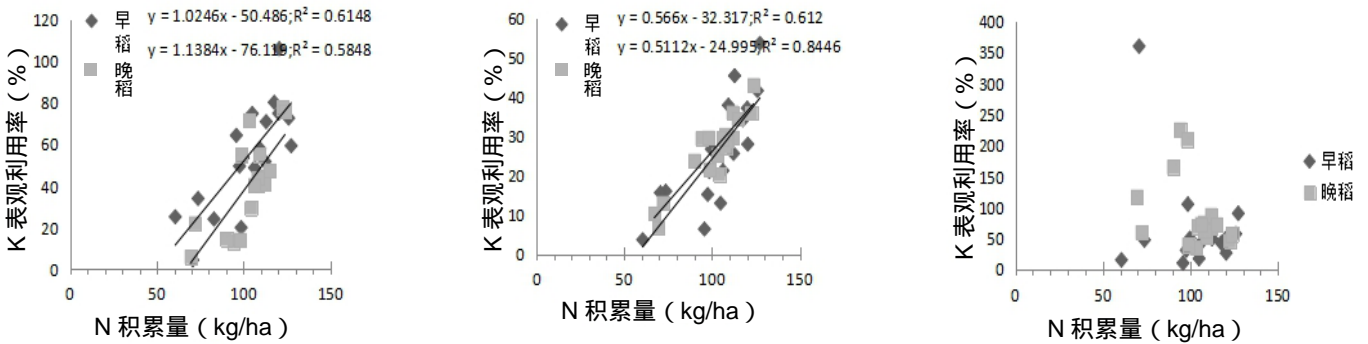


图4 氮含量与钾素利用的关系

少。施用氮肥可以显著提高水稻产量。近几年,鲁艳红等通过研究不同形态氮肥对水稻产量的影响,发现在我国南方双季稻区施用控释氮肥或尿素均可显著增加水稻产量,其中尿素增产41.9%–70.9%,控释氮肥增产45.6%–77.3%^[10]。本研究结果表明双季稻早稻施用氮肥比不施氮肥处理增产5.9%–58.1%,晚稻季增产24.0%–67.6%,这与前人研究结果相类似。合理施用氮肥在提高双季稻产量中的作用更大,我国学者在不同施氮量下,对江西省双季稻区高、中、低产田进行研究,认为随着施氮量增加,早、晚产量均呈先升高后降低的趋势,低、中、高产田获得最高产的施氮量分别为120、180、240 kg/ha^[9]。其他大量的研究也表明在当前的栽培技术和产量水平下,双季稻最适宜施氮量在120–200 kg/ha之间^[11–13],超过一定的

施氮量后,水稻产量开始下降^[14]。本文研究结果表明在双季稻早稻季,稻谷产量最佳处理为施氮量105kg/ha的75%N,晚稻稻谷产量最佳则为146 kg/ha的100%N处理,这与其他学者的研究结果相比,显得略低,原因可能是本试验所在地区稻田土壤氮素速效成分相对较高。另外本研究早、晚稻最佳产量处理不同,可能是由于本试验早、晚稻100%N处理是根据该田块连续3年的产量水平、农民施肥习惯和目标产量等调查数据,通过养分专家系统推荐所得,其得出的早稻100%N处理施氮量为140 kg N/ha,晚稻推荐施氮量146 kg N/ha,早、晚稻施氮量很接近,并且早稻使用品种为常规稻,晚稻品种为杂交稻,导致早稻季100%N处理的推荐量略有过量。

氮肥合理施用促进氮素吸收利用。如何调控土壤养分

的投入量，减少养分的无效损失，对促进养分的有效吸收与利用具有重要意义。氮素是土壤肥力中最活跃的组成部分，施用氮肥显著提高了水稻氮素吸收量，合理施氮更促进氮素向稻谷积累^[15]。王秀斌等对机插双季稻进行研究认为施氮与不施氮相比，显著增加了早、晚稻氮素积累量，增幅分别为43.7%—67.41%和63.76%—107.65%^[16]。本试验中氮素吸收量最高的施氮处理比不施氮的CK处理早稻增幅89.2%，晚稻增幅79.2%，在达到最高的增幅后，随着施氮量的增加，水稻的氮吸收量随之下降，施氮的促进作用转化为抑制作用。段云佳等也指出适宜的施氮量有利于棉花氮素的快速积累，氮肥用量过多或不足均不利于棉花生长发育，从而影响氮素的吸收^[17]。增施氮肥虽然促进了水稻氮素吸收，但是高氮水平的氮肥利用率比低氮水平处理要低。一些学者认为这主要是由于增施氮肥虽然促进了水稻营养器官中氮素向稻谷中转移，但是转移率相对降低，过多氮素滞留在营养器官中，造成植株“奢侈”吸氮，从而使氮素利用率下降^[18]。2009年Artacho等^[19]在智利地区的研究也指出，随着氮肥施用量的增加，氮肥利用率会逐渐下降。如何保证水稻尽可能地吸收氮素养分，保持稳产增产的同时，提升氮素利用效率，众多学者对此看法不一。廖育林等^[20]认为通过减少20%常规尿素与紫云英配施或者减40%控释尿素与紫云英配施可以使早稻增产并促进植株氮素吸收，从而提高氮肥利用效率和农学效率。鲁艳红等的研究表明在南方双季稻种植区，氮肥减量下添加氮素抑制剂在保证水稻稳产的同时，有利于氮素利用效率的提升及土壤氮素平衡的保持^[21]。本文的结果是氮肥合理施用可在保证双季稻稳产增产条件下，进一步地稳定、提升氮肥利用效率，如早稻产量最高的75%处理氮肥表观利用率较高，农学效率最高；晚稻100%处理产量最高，氮肥表观利用率，农学效率也处于较高水平。

氮肥合理施用促进磷、钾素吸收利用。在相同的土壤类型、水分管理及其他栽培措施条件下，养分平衡状况对养分效应高低有明显作用。当某种养分供应过量时，可能会造成其他养分的缺乏或毒害，而导致减产。比如，单施大量氮肥会破坏植物体内激素的平衡，使植物的生长受到严重影响，配合施用磷、钾肥则可使植物生长得到改善^[22]。闫湘等^[23]也提出缺乏某种养分会限制其他养分发挥作用，而保证作物生长期所需的各种养分均衡供给可以避免此种状况发生。我们试验的结果也出现了同样的现象：氮肥施用不足，双季稻氮素表观利用率虽然很高，氮、磷、钾积累量却相对较低，双季稻产量同样处于低水平状态，

这造成氮、磷、钾素利用效率不高；施氮过量，水稻氮吸收量增加，但是籽粒的氮积累却相应降低，稻草中的钾素积累偏高，产量有所下降，同样地氮、磷、钾素利用效率也下降。双季稻植株对氮、磷、钾养分吸收利用均表现出随施氮量增加而先增后降的趋势，这一特点与杂交棉^[24]、甜瓜^[25]和加工番茄^[26]的养分吸收规律相一致。氮是植物体内许多化合物的物质基础，氮素供应状况关系到植物体内各种物质及能量的转化。氮肥合理施用可以保证作物体内积累充足的氮素，使作物更好地进行各种代谢过程，进而促进对磷、钾素的吸收利用。氮、磷、钾素间的影响是相互的。王伟妮等^[27]指出当施肥量处于低、中水平时，氮、磷、钾间互作效应均表现为协同促进作用；施肥量超过一定水平后则表现为拮抗作用。本文研究结果表明，适宜施氮处理的水稻籽粒氮素积累量最高，说明施氮虽然降低了氮肥表观利用率，但合理地施用氮肥可以促使双季稻中的氮素向稻谷转运；而经过相关性分析，表明双季稻氮积累与磷、钾积累量均呈极显著正相关关系，磷、钾积累量均随着氮积累量的增加而增加。由此可以推测，氮肥合理施用可促进双季稻对氮、磷、钾的吸收并使其向籽粒积累，从而增加双季稻产量。

4. 结论

合理施用氮肥可增加双季稻产量，施氮过量或不足均可能导致双季稻不同程度的减产，综合考虑养分专家系统推荐所得及其他因素影响：本试验条件下，为保证水稻达到稳产、高产目的，早稻施氮量105 kg N/ha，晚稻施氮146 kg N/ha较为适宜，在该施氮条件下，双季稻氮、磷、钾积累量和利用效率均处于较高或最高水平。然而，本研究只是针对施氮量对双季稻产量，氮、磷、钾养分吸收积累量及氮、磷、钾养分利用效率的部分组成参数进行分析研究，明确施氮量对双季稻磷、钾利用的关系还需对施氮量与养分利用效率其它各参数的关系进行更深的研究。

参考文献

- [1] 朱兆良，金继运．保障我国粮食安全的肥料问题[J]．植物营养与肥料学报，2013，19(2):259—273．
- [2] 金继运，林葆．化肥在农业生产中的作用和展望[J]．作物杂志，1997，(2):5—9．
- [3] 闫湘，金继运，梁鸣早．我国主要粮食作物化肥增产效应与肥料利用效率[J]．土壤，2017，49(6):1067—1077．

- [4] 白由路. 我国肥料发展若干问题的思考[J]. 中国农业信息, 2014, (22):5-9
- [5] 金继运. 我国肥料资源利用中存在的问题及对策建议[J]. 中国农技推广, 2005, (11):4-6.
- [6] 蔡祖聪, 颜晓元, 朱兆良. 立足于解决高投入条件下的氮污染问题[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(1):1-6.
- [7] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5):915-924.
- [8] 何萍, 金继运, Pampolino, 等. 基于作物产量反应和农学效率的推荐施肥方法[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2):499-505.
- [9] 鲁艳红, 廖育林, 汤海涛, 等. 不同施氮量对水稻产量、氮素吸收及利用效率的影响[J]. 农业现代化研究, 2010, 31(4):479-483.
- [10] 鲁艳红, 聂军, 廖育林, 等. 不同控释氮肥减量施用对双季水稻产量和氮素利用的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(2):155-161.
- [11] 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.
- [12] 侯云鹏, 杨建, 李前, 等. 施氮对水稻产量、氮素利用及土壤无机氮积累的影响[J]. 土壤通报, 2016, 47(1):118-124.
- [13] 刘桃菊, 朱冰, 江绍琳, 等. 施氮量对双季稻氮素吸收和产量的影响及其优化[J]. 浙江农业学报, 2014, 26(4):1004-1009.
- [14] Aslam M M, Zeeshan M, Irum A, et al. Influence of seedling age and nitrogen rates on productivity of rice: A review[J]. American Journal of Plant Sciences, 2015, 6(9):1361-1369.
- [15] 郭晨, 徐正伟, 李小坤, 等. 不同施氮处理对水稻产量、氮素吸收及利用率的影响[J]. 土壤, 2014, 46(4):618-622.
- [16] 王秀斌, 徐新朋, 孙静文, 等. 氮肥运筹对机插双季稻产量、氮肥利用率及经济效益的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(5):1167-1176.
- [17] 段云佳, 谭玲, 张巨松, 等. 施氮量对枣棉间作系统棉花干物质和氮素积累的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6):1441-1448.
- [18] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 等. 不同土壤及氮肥条件下水稻氮利用效率和增产效应研究[J]. 作物学报, 2005, 31(11):1422-1428.
- [19] Pamela Artacho, Claudia Bonomelli, Francisco Meza. Nitrogen application in irrigated rice grown in Mediterranean conditions: Effects on grain yield, dry matter production, nitrogen uptake, and nitrogen use efficiency[J]. Journal of Plant Nutrition, 2009, 32(9):1574-1593.
- [20] 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.
- [21] 鲁艳红, 汤文光. 氮素抑制剂对双季稻产量、氮素利用效率及土壤氮平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(1):95-104.
- [22] 陆景陵. 植物营养学(上)(第2版)[M]. 中国农业大学出版社, 2003.
- [23] 闫湘, 金继运, 何萍, 等. 提高肥料利用率技术研究进展[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2):450-459.
- [24] 李伶俐, 房卫平, 马宗斌, 等. 施氮量对杂交棉氮、磷、钾吸收利用和产量及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(3):663-667
- [25] 胡国智, 冯炯鑫, 张炎, 等. 不同施氮量对甜瓜养分吸收、分配、利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3):760-766.
- [26] 汤明尧, 张炎, 胡伟, 等. 不同施氮水平对加工番茄养分吸收、分配及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5):1238-1245.
- [27] 王伟妮, 鲁剑巍, 何予卿, 等. 氮、磷、钾肥对水稻产量、品质及养分吸收利用的影响[J]. 中国水稻科学, 2011, 25(6):645-653.