

土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻产量、品质及氮肥利用的影响

刘梦红¹,杜春颖²,杨锡铜¹,周雪松¹,赵海成¹,李红宇¹,郑桂萍¹,吕艳东¹

(1. 黑龙江八一农垦大学农学院/黑龙江省现代农业栽培技术与作物种质改良重点实验室,
黑龙江大庆 163319; 2. 大庆市萨尔图区农业局,黑龙江大庆 163319)

摘要:以垦粳5号为材料,设计3种土壤肥力(高、中、低肥力)和5种氮肥运筹模式[农民习惯施肥(M1)、V字形施肥(M2)、减氮施肥(M3)、减氮减磷施肥(M4)、前氮后移施肥(M5)],研究不同土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻产量、品质及氮肥利用的影响,旨在为提高寒地水稻氮肥综合生产能力、改善稻米品质提供理论参考。结果表明,土壤肥力和氮肥运筹二因素互作对水稻产量、品质、氮肥利用影响显著。高肥力土壤条件下,M3模式产量(31.2 g/穴)最高,M1、M2、M4模式依次次之;中肥力土壤条件下,M1模式产量(28.0 g/穴)最高,M2、M4模式依次次之;低肥力土壤条件下,M1模式产量(26.7 g/穴)最高,M2、M4、M3模式依次次之。高肥力土壤条件下,M4模式的垩白粒率和垩白度、M3和M4模式的蛋白质含量较低;中、低肥力土壤条件下,M5模式的垩白粒率和垩白度、M1模式蛋白质含量较低。高肥力土壤条件下,M3—M5模式的食味评分(84.11、83.30、83.36)较高;中肥力土壤条件下,M1、M2模式的食味评分(85.49、84.47)较高;低肥力土壤条件下,M1、M3、M4模式的食味评分(85.17、85.39、85.14)较高。M1模式茎秆抗倒伏指数显著低于其他模式,其他模式间的差异均不显著。高肥力土壤条件下,M4、M5模式氮肥贡献率较高;中肥力土壤条件下,各模式间差异均不显著;低肥力土壤条件下,M2模式氮肥贡献率最低,其余模式间差异均不显著。高肥力土壤条件下,M3模式的地上部吸氮量、氮肥农学利用率(51.46%)、氮肥吸收利用率(66.83 g/g)和氮肥偏生产力(131.52 g/g)最高,M5模式的氮肥生理利用率(134.54 g/g)最高;中肥力土壤条件下,M5模式的氮肥吸收利用率(58.29 g/g)、M4模式的氮肥偏生产力(104.05 g/g)、M1模式的氮肥生理利用率(100.18 g/g)最高,M2模式较高;低肥力土壤条件下,M2模式的地上部吸氮量、M2模式的氮肥吸收利用率(61.18 g/g)、M4模式的氮肥偏生产力(100.39 g/g)、M1模式的氮肥生理利用率(90.93 g/g)最高,M3模式较高。综合考虑,高肥力土壤采用M3模式、中肥力土壤采用M2模式、低肥力土壤采用M3模式有利于协调寒地水稻产量、品质、氮肥利用率的关系。

关键词:寒地水稻;土壤肥力;氮肥运筹;产量;品质;氮肥利用率

中图分类号:S511 文献标志码:A 文章编号:1004-3268(2019)02-0025-10

Effects of Soil Fertility and Nitrogen Application Patterns on Yield, Quality and Nitrogen Utilization of Rice in Cold Region

LIU Menghong¹, DU Chunying², YANG Xitong¹, ZHOU Xuesong¹, ZHAO Haicheng¹,
LI Hongyu¹, ZHENG Guiping¹, LÜ Yandong¹

(1. Agricultural College, Heilongjiang Bayi Agricultural University/Heilongjiang Provincial Key Laboratory of Modern Agricultural Cultivation and Crop Germplasm Improvement, Daqing 163319, China;

收稿日期:2018-07-20

基金项目:国家科技支撑计划项目(2015BAD23B05-08);国家重点研发计划项目(2018YFD0300104);黑龙江农垦总局重点研发计划项目(HNK135-02-02)

作者简介:刘梦红(1980-),女,黑龙江讷河人,助理研究员,硕士,主要从事植物营养方面的研究。E-mail:ndsoil@163.com
通信作者:李红宇(1979-),男,黑龙江方正人,副教授,博士,主要从事水稻高产生理生态及遗传多样性方面的研究。

E-mail:ndsoil@163.com

2. Agriculture Bureau of Saertu Region of Daqing, Daqing 163319, China)

Abstract: Trials with three treatments of soil fertilizer (high, middle and low) and five N application patterns [local farmer's fertilization (M1), V shape fertilization (M2), reducing N fertilization (M3), reducing N and P fertilization (M4), application of N at late growth stage (M5)] were set up to study the effects of soil fertility and nitrogen application patterns on yield, quality and nitrogen utilization of rice in cold region, so as to provide theory reference for improving nitrogen comprehensive productivity and rice quality. The results showed that the interaction between soil fertility and nitrogen application patterns had significant effects on yield, quality and nitrogen utilization. Under high soil fertility condition, M3 pattern had the highest yield (31.2 g/hole), followed by M1, M2 and M4 patterns. Under middle soil fertility condition, the yield of M1 pattern was the highest (28.0 g/hole), followed by M1, M2 patterns. Under low soil fertility condition, M1 pattern had the highest yield (26.7 g/hole), followed by M2, M4 and M3 patterns. The chalky grain rate and chalkiness of M4 pattern, protein content of M3 and M4 were lower under high fertility soil condition, and the chalky grain rate and chalkiness of M5 pattern, protein content of M1 were lower under middle and low fertility soil conditions. The taste value of M3—M5 patterns (84.11, 83.30, 83.36), M1—M2 patterns (85.49, 84.47), and M1, M3, M4 patterns (85.17, 85.39, 85.14) were higher under high, middle and low fertility soil conditions, respectively. The lodging resistance index of M1 pattern was significantly lower than that of the other fertilization patterns, and there was no significant difference among the other fertilization patterns. The nitrogen fertilization contribution rate of M4 and M5 patterns were higher under high fertility soil condition, and there were no significant differences among patterns under middle fertilizer soil condition. The nitrogen fertilization contribution rate of M2 pattern was the lowest, and no significant differences were found among the other patterns under low fertility soil condition. Under high fertility soil condition, total aboveground plant nitrogen accumulation, nitrogen agronomic efficiency (51.46%), nitrogen recovery use efficiency (66.83 g/g) and nitrogen partial factor productivity (131.52 g/g) of M3 pattern, and nitrogen physiological efficiency (134.54 g/g) of M5 pattern were the highest. Under middle fertility soil condition, nitrogen recovery use efficiency (58.29 g/g) of M5 pattern, nitrogen partial factor productivity (104.05 g/g) of M4 pattern, and nitrogen physiological efficiency (100.18 g/g) of M1 pattern were the highest, and those of M2 pattern were higher. Under low fertility soil condition, total aboveground plant nitrogen accumulation and nitrogen recovery use efficiency (61.18 g/g) of M2 pattern, nitrogen partial factor productivity (100.39 g/g) of M4 pattern, and nitrogen physiological efficiency (90.93 g/g) of M1 pattern were the highest, and those of M3 pattern were higher. Therefore, the use of M3 pattern under high fertility soil condition, M2 pattern under medium soil fertility condition, M3 pattern under low fertility soil condition were helpful to coordinate the relationship of yield, quality and nitrogen use efficiency.

Key words: Rice in cold region; Soil fertility; Nitrogen application patterns; Yield; Quality; Nitrogen use efficiency

水稻为全球约 30 亿人口提供 35% ~ 60% 的口粮,是重要的粮食作物之一^[1]。氮素是水稻生长发育及产量、品质形成的主要养分限制因子之一^[2],增施氮肥仍然是水稻高产的关键措施^[3~4]。实际生产中,由于氮肥施用过量、施用方法不合理、分配比例不当等问题造成我国水稻单季平均施氮量达 180 kg/hm²,高出世界平均水平约 75%^[5];而氮肥吸收利用率只有 30% ~ 35%^[6~7],氮肥利用率低是水稻生产面临的一个难题。前人研究表明,水稻产

量与施氮量呈二次曲线关系,施氮水平超过某阈值后,产量呈现下降趋势^[8~9]。这是因为水稻籽粒灌浆需要的氮一方面来源于灌浆期间的根系吸收,另一方面来源于叶和茎鞘的转运,叶和茎鞘的氮素可以在一定程度上弥补根源氮的不足。随着施氮水平增加,水稻叶和茎鞘氮素向籽粒的转运量呈明显下降趋势^[10],通过调整氮肥施用量和施肥方法来调控植株的氮素水平,协调穗部氮需求的根系来源和叶、茎鞘来源,可以在提高氮肥利用率的同时保持一定

产量。过量施氮导致水稻叶片中 NH_4^+ - N 以 NH_3 的形式挥发损失^[11-12]，另外，高氮投入明显增加肥料氮在土壤中的残留量和损失量^[13]，造成氮肥利用率下降，并且过量施氮会造成植株倒伏^[14-15]、病虫害^[16-17]、空壳等致使产量下降。此外，氮肥运筹与稻米品质关系密切，过高的氮肥投入并不能进一步改善品质，适量氮肥投入是稻米实现优质高产、高效的前提保障^[18]。目前，关于寒地水稻氮肥运筹的研究多集中于特定土壤条件下施氮量及氮肥分配比例对水稻产量、品质的影响方面^[19-21]，而关于不同土壤肥力下的适宜氮肥运筹模式研究尚未见报道。为此，针对寒地特殊生态条件，在不同肥力土壤上比较不同氮肥运筹对水稻产量、品质及氮素利用的影响，旨在为提高寒地水稻氮肥综合生产能力、改善稻米

品质提供理论参考。

1 材料和方法

1.1 试验材料

试验于 2016 年 5—10 月在黑龙江省大庆市黑龙江八一农垦大学进行。采用盆栽试验,盆钵高 30 cm,上直径为 30 cm,下直径为 25 cm,每盆装土 12 kg。试验土壤为黑龙江 856 农场的高肥力(S1)、低肥力(S3)以及二者混配的中肥力(S2)土壤,土壤类型为白浆土,土壤养分含量见表 1。参试水稻品种为垦梗 5 号,4 月 17 日播种,5 月 25 日移栽,每盆钵 3 穴,每穴 3 苗。参试肥料为尿素(含 N 46.4%)、过磷酸钙(含 P₂O₅ 43%)和硫酸钾(含 K₂O 50%)。

表 1 供试土壤理化性状

Tab. 1 Physicochemical characteristics of soil in the experiment

土壤肥力 Soil fertility	处理 Treatments	全氮/(g/kg) Total nitrogen	碱解氮/(mg/kg) Available nitrogen	有效磷/(mg/kg) Available phosphorus	速效钾/(mg/kg) Available potassium	有机质/(g/kg) Organic matter	pH
高 High	S1	1.24	245.03	17.04	147.2	40.07	5.815
中 Middle	S2	1.08	200.76	16.72	112.5	35.54	5.785
低 Low	S3	0.94	189.53	16.23	95.3	32.44	5.790

1.2 试验设计

试验采用土壤肥力×氮肥运筹模式二因素完全随机试验设计。土壤肥力设3个水平,分别为高肥力(S1)、中肥力(S2)、低肥力(S3),每个水平土壤理化性质如表1。氮肥运筹模式设5个水平,以M1、M2、M3、M4、M5表示。M1为农民习惯施肥模式,氮:磷:钾=2.22:1.00:0.67,氮肥分配比例为基肥:分蘖肥=5:5,钾肥100%基施;M2为V字形施肥模式,氮:磷:钾=2:1:1,氮肥分配比例为基肥:分蘖肥:调节肥:穗肥=4:3:1:2,钾肥分配比例为基肥:穗肥=5:5;M3为减氮施肥模式,即在M2基础上减氮17.5%,氮肥分配比例同M2,磷肥和钾肥的

施用量及分配比例同 M2; M4 为减氮减磷施肥模式, 即在 M2 基础上减氮 17.5%、减磷 26%, 氮肥和磷肥分配比例同 M2, 钾肥的施用量及分配比例同 M2; M5 为前氮后移模式, 氮: 磷: 钾 = 2.22: 1.00: 1.35, 氮肥分配比例为基肥: 分蘖肥: 调节肥: 保花肥 = 4: 3: 1: 2, 钾肥分配比例为基肥: 保花肥 = 5: 5, 氮磷钾总量同 M4。所有处理磷肥 100% 基施。分蘖肥分 2 次施用, 第 1 次分蘖肥在 4 叶伸长期, 占分蘖期总氮的 80%; 第 2 次分蘖肥在 6 叶伸长期, 占分蘖期总氮的 20%。调节肥、穗肥、保花肥分别在倒 3.5 叶左右、倒 2 叶伸长期、剑叶露尖时施用。具体施肥量如表 2 所示。

表 2 不同处理施肥量

Tab. 2 Fertilizer application rate of different treatments

kg/hm²

氮肥运筹模式 Fertilizer application patterns	分蘖肥 Tillering fertilizer										穗肥 Panicle fertilizer		保花肥 Spikelet-developing fertilizer	
	基肥 Base fertilizer			4叶伸长期 4th leaf extending		6叶伸长期 6th leaf extending		调节肥 Regulating fertilizer		穗肥 Panicle fertilizer		保花肥 Spikelet-developing fertilizer		
	N	P ₂ O ₅	K ₂ O	stage	stage	stage	stage	N	N	K ₂ O	N	K ₂ O		
M1	75.0	67.5	45.0	60.0	15.0									
M2	48.5	60.8	30.5	29.1	7.2	12.2	24.3	30.5						
M3	40.1	60.8	30.5	24.0	6.0	10.1	20.1	30.5						
M4	40.1	45.0	30.5	24.0	6.0	10.1	20.1	30.5						
M5	40.1	45.0	30.5	24.0	6.0	10.1					20.1	30.5		

1.3 测定项目及方法

1.3.1 茎秆重心高度、抗折力和抗倒伏指数 齐穗后 20 d, 每处理取 10 个主茎测定茎秆重心高度、地上部单茎鲜质量和抗折力。测定方法参考李金才等^[22]的方法, 略有改进。茎秆抗折力: 取第 2 节间、第 3 节间和第 4 节间, 剥除叶鞘, 两端置于高 50 cm、间隔 5 cm 的支撑木架凹槽内, 在其中部挂一容器, 向容器内匀速加细沙, 使茎秆折断所用的细沙加上容器自身的质量即为茎秆抗折力。地上部单茎鲜质量包括穗、叶和鞘。茎秆重心高度: 测量茎秆基部至该茎(带穗、叶和鞘)平衡支点的距离。计算抗倒伏指数, 抗倒伏指数 = 抗折力/(重心高度 × 地上部单茎鲜质量)。

1.3.2 产量及其构成因素 成熟期, 取代表性植株 6 株, 于通风阴凉处风干。风干后植株剪穗, 称穗质量和籽粒质量。穗用于考种, 考察穗数、穗粒数、结实率和千粒质量。

1.3.3 氮肥利用率 成熟期, 取代表性植株 4 株, 风干后分为籽粒和茎秆 2 部分, 样品称质量后粉碎, 过 0.18 mm 孔径筛, 用浓 H₂SO₄ - H₂O₂ 消煮, 用 FOSS - 8400 凯氏定氮仪测定氮含量, 然后计算氮肥利用相关指标。氮肥农学利用率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮量 × 100%; 氮肥吸收利用率 = (施氮区地上部吸氮量 - 不施氮区地上部吸氮量)/施氮量; 氮肥生理利用率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/(施氮区地上部吸氮量 - 不施氮区地上部吸氮量); 氮肥偏生产力 = 施氮区产量/施氮量; 土壤氮肥依存率 = 不施氮区地上部吸氮量/施氮量;

区地上部吸氮量 × 100%; 氮肥贡献率 = (施氮区产量 - 不施氮区产量)/施氮区产量 × 100%。

1.3.4 品质指标 收获小区植株, 脱粒, 室内保存 3 个月左右用于品质分析, 稻谷品质测定前, 各样品统一用风选机等风量风选。加工品质测定依照《优质稻谷 GB/T 17891—1999》^[23]执行; 垒白粒率和垩白度使用大米外观品质判别仪(日本静冈制机株式会社 ES - 1000) 测定; 精米的直链淀粉、蛋白质含量和食味评分参照徐正进等^[24]的测定方法, 用近红外透过式 PS - 500 食味分析仪(日本静冈机械制造有限公司)测定。

1.4 统计分析

采用 Excel 2003 进行数据整理, 采用 DPS 7.5 进行方差分析。

2 结果与分析

2.1 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻产量及其构成因素的影响

由表 3 可知, 对于土壤肥力水平来说, S1 水平下水稻产量极显著高于 S2 和 S3 水平, 提高幅度分别为 18.0% 和 18.5%, 后二者差异不显著; 穗数也表现为 S1 水平极显著高于 S2 和 S3 水平; 结实率表现为 S1 水平极显著高于 S2 水平, 两者均与 S3 水平无显著差异; 穗粒数和千粒质量在 3 个水平之间均无显著差异。可见, 较高的穗数和结实率是 S1 水平下产量高于 S2 和 S3 水平的原因。5 种氮肥运筹模式中, 以 M1 模式产量最高, 极显著高于除 M2 模式之外的其余模式; 其次为 M2 模式, 较 M1 模式降低

表 3 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻产量及其构成因素的影响

Tab. 3 Effects of soil fertility and nitrogen application patterns on rice yield and its components in cold region

因素 Factors	处理 Treatments	穗数/(穗/穴) Number of panicles	穗粒数 Grains number per panicle	结实率/% Seed setting rate	千粒质量/g 1 000-grain weight	产量/(g/穴) Yield/ (g/hole)
S	S1	19.80aA	60.21aA	93.93aA	25.80aA	28.77aA
	S2	17.80bB	57.60aA	92.02bB	25.92aA	24.38bB
	S3	17.50bB	57.37aA	92.97abAB	26.08aA	24.28bB
	F _S	37.22 **	1.56	4.11 *	1.16	22.54 **
M	M1	20.00aA	61.40aA	92.15aA	25.32cB	28.49aA
	M2	18.94bB	58.25abAB	93.33aA	26.24abA	26.92abAB
	M3	18.28bBC	57.69abAB	92.72aA	25.78bcAB	25.36bB
	M4	17.39cCD	59.92aAB	93.25aA	26.38aA	25.55bB
	M5	17.22cD	54.71bB	93.41aA	25.94abAB	22.73cC
	F _M	18.84 **	2.41	0.76	5.98 **	9.36 **
S × M	F _{S × M}	5.52 **	2.49 *	2.18 *	0.95	2.45 *

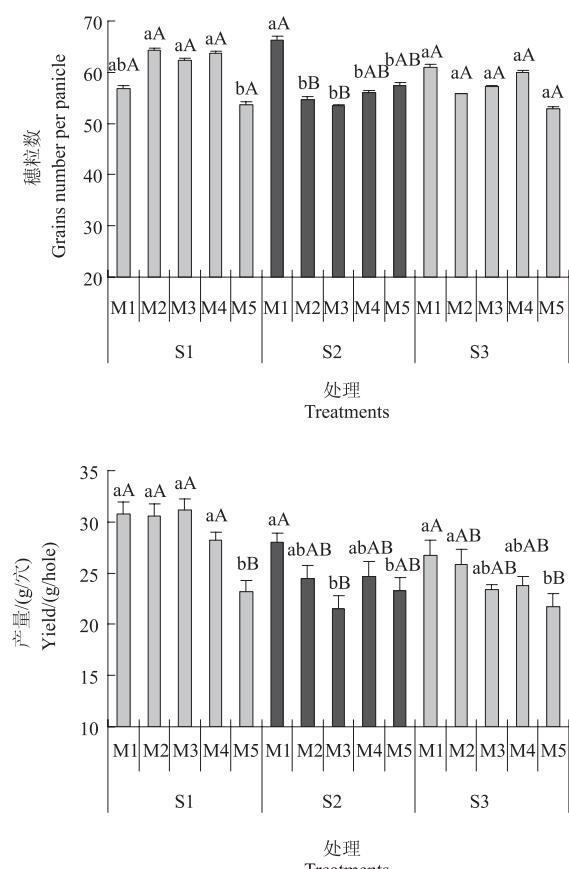
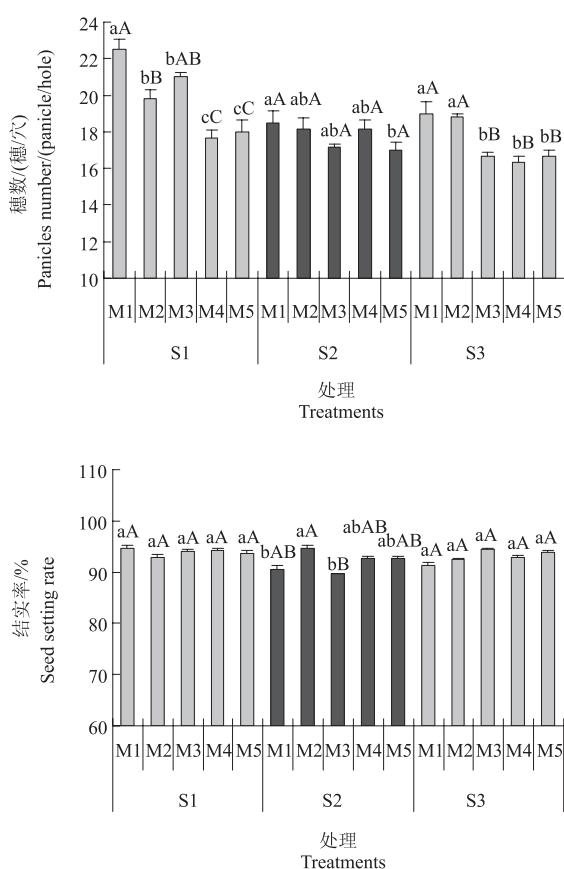
注: 同列数据后不同大、小写字母分别表示同一因素不同处理之间的差异达到极显著($P < 0.01$)、显著水平($P < 0.05$); *、** 分别表示影响显著($P < 0.05$)、极显著($P < 0.01$), 下同。

Note: The different uppercase, lowercase letters after data of the same column indicate that the differences among different treatments of the same factor are significant at 0.01, 0.05 levels respectively; *, ** mean significant influences at 0.01, 0.05 levels respectively, the same below.

5.5%,差异不显著;M5模式最低,较M1模式降低20.2%。从产量构成因素分析,穗数表现为M1>M2>M3>M4>M5,穗粒数表现为M1>M4>M2>M3>M5,各氮肥运筹模式结实率间的差异均不显著,千粒质量表现为M4>M2>M5>M3>M1。可见,M1模式的高产主要归因于较高的穗数和穗粒数,但其千粒质量较低;M5模式穗数和穗粒数较低是其产量低的主要原因。

土壤肥力和氮肥运筹二因素互作极显著或显著影响穗数、穗粒数、结实率和产量(表3)。由图1可知,S1水平下,M1模式穗数分别极显著、显著高于M2、M3模式,这3个模式均极显著高于M4、M5模式;M2—M4模式穗粒数均显著高于M5模式,与M1模式差异不显著;各模式结实率间的差异均不显著。S2水平下,M1模式穗数显著高于M5模式,M2—M4模式与二者之间的差异均不显著;M1模式穗粒数显著或极显著高于M2—M5模式,M2、M3、M4、

M5模式之间的差异均不显著;M2模式结实率分别显著、极显著高于M1、M3模式,与M4、M5模式间的差异均不显著。S3水平下,M1和M2模式穗数均极显著高于M3—M5模式,各模式穗粒数和结实率间的差异均不显著。S1水平下,以M3模式产量最高(31.2 g/穴),与M1、M2、M4模式间的差异均不显著,但这4个模式均极显著高于M5模式,增幅分别为32.7%、31.8%、34.5%、21.6%;S2水平下,以M1模式产量最高(28.0 g/穴),与M2、M4模式均无显著差异,分别较M3、M5模式极显著、显著提高30.3%、20.1%;S3水平下,以M1模式产量最高(26.7 g/穴),与M2、M3、M4模式均无显著差异,较M5模式极显著提高23.2%。从组合产量整体来看,最高的组合为S1M3,S1M1、S1M2组合依次次之,最低组合为S2M3,S1M3组合较S2M3组合增产45.1%。



不同大、小写字母分别表示同一土壤肥力条件下不同氮肥运筹模式间的差异达到极显著($P < 0.01$)、显著水平($P < 0.05$),下同。

The different uppercase, lowercase letters indicate that the differences among different nitrogen application patterns under the same soil

fertility are significant at 0.01, 0.05 levels respectively, the same below.

图1 土壤肥力和氮肥运筹的交互作用对寒地水稻产量及其构成因素的影响

Fig. 1 Effects of the interactions between soil fertility and nitrogen application patterns on rice yield and its components in cold region

2.2 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻稻米品质的影响

由表 4 可知,不同土壤肥力下稻米加工品质各指标间的差异总体上均不显著;垩白粒率和垩白度均表现为 $S_2 < S_3 < S_1$, 差异极显著;直链淀粉含量间的差异均不显著;蛋白质含量表现为 $S_1 > S_2 > S_3$ 的趋势,差异极显著;食味评分与蛋白质含量趋势相反。不同施肥模式糙米率、精米率相近,M1 模式整精米率显著高于 M2、M4 模式,与 M3、M5 模式间的差异均不显著;垩白粒率和垩白度均表现为 $M_1 > M_2 > M_3 > M_4 > M_5$, 除 M2、M3 模式间差异不显著

外,其余模式间差异均显著或极显著。直链淀粉和蛋白质含量与食味评分密切相关,国家标准中规定优质稻谷直链淀粉含量为 14% ~ 20%^[25];陈能等^[26]对 1 518 份粳稻谷的研究结果表明,蛋白质含量主要分布于 7% ~ 10%,一定范围内蛋白质含量与食味评分呈负相关。M3 模式直链淀粉含量最高,其次为 M1 模式,M2、M4、M5 模式较低,且彼此间差异均不显著;蛋白质含量以 M5 模式最高,M3、M4、M2 模式依次次之,M1 模式最低;M1、M3、M4 模式食味评分间的差异均不显著,三者均显著高于 M2、M5 模式。

表 4 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻稻米品质的影响

Tab. 4 Effects of soil fertility and nitrogen application patterns on rice quality in cold region

因素 Factors	处理 Treatments	糙米率/% Brown rice rate	精米率/% Milled rice rate	整精米率/% Head rice rate	垩白粒率/% Chalky grain rate	垩白度/% Chalkiness	直链淀粉 含量/% Amylose content	蛋白质含 量/% Protein content	食味评分 Taste score
S	S1	80.10aA	70.93bA	62.86aA	9.10aA	4.96aA	18.25aA	7.75aA	82.53cC
	S2	80.38aA	71.24aAB	62.52aA	6.42cC	3.27cC	18.08aA	7.55bB	83.52bB
	S3	80.28abA	71.34aA	62.72aA	7.34bB	3.67bB	18.68aA	7.42cC	84.68aA
	F_S	3.92 *	5.57 **	0.27	75.88 **	109.22 **	1.96	48.91 **	24.78 **
M	M1	80.28abAB	71.10bcAB	63.50aA	9.44aA	5.04aA	18.62abA	7.38cC	84.06aA
	M2	80.01bB	70.78cB	62.04bcA	7.96bB	4.26bB	17.97bA	7.54bB	82.89bA
	M3	80.26abAB	71.23abAB	62.89abcA	7.92bB	4.02bB	19.04aA	7.59bB	84.03aA
	M4	80.52aA	71.47aA	61.87cA	6.78cC	3.42cC	18.03bA	7.57bB	83.89aA
	M5	80.20bAB	71.26abAB	63.21aba	6.01dC	3.09dC	18.03bA	7.78aA	83.03bA
	F_M	3.91 *	4.69 **	2.89 *	42.08 **	48.57 **	2.82 *	22.99 **	4.19 **
S × M	$F_{S \times M}$	4.57 **	5.98 **	2.12	17.74 **	19.40 **	2.92 *	9.53 **	8.76 **

土壤肥力和氮肥运筹二因素互作对上述稻米品质指标的影响均达到显著或极显著水平(整精米率除外)(表 4)。由表 5 可知,S1 水平下 M1 和 M4 模式、S2 水平下 M3 模式、S3 水平下 M4 模式糙米率较高;S1 水平下 M1 和 M4 模式、S2 水平下 M3 和 M5 模式精米率较高,S3 水平下各模式精米率差异均不显著;各土壤肥力下均以 M1 模式垩白粒率和垩白度最高,S1 水平下 M4 模式、S2 水平下 M5 模式、S3 水平下 M5 模式的垩白粒率和垩白度均最低;S1 和 S2 水平下各氮肥运筹模式直链淀粉含量间的差异均不显著,S3 水平下 M3 模式直链淀粉含量显著高于其他模式,其他模式之间的差异均不显著;S1 水平下 M3 和 M4 模式、S2 和 S3 水平下 M1 和 M2 模式蛋白质含量较低;S1 水平下 M3—M5 模式,S2 水平下 M1 和 M2 模式,S3 水平下 M1、M3 和 M4 模式均获得较高的食味评分,食味评分介于 83.30 ~ 85.49。糙米率和精米率最高组合为 S2M3,分别较最低组合 S1M2 提高 1.6% 和 2.2%;垩白粒率和垩白度最低的组合均为 S2M5,分别较最高组合 S1M1 降低 66.3% 和 60.7%;直链淀粉含量最低的组合为

S3M2,较最高组合 S3M3 降低 16.5%;蛋白质含量最低的组合为 S3M1,较最高组合 S2M5 降低 10.5%;食味评分最高组合为 S2M1,较最低组合 S1M2 提高 6.4%(表 5)。

2.3 土壤肥力和氮肥运筹对氮肥贡献率和土壤氮肥依存率的影响

由图 2 可知,不同肥力土壤氮肥贡献率表现为 $S_3 > S_2 > S_1$, S_3 水平分别极显著、显著高于 S_1 、 S_2 水平, S_1 水平与 S_2 水平差异不显著,土壤氮肥依存率与之相反;不同氮肥运筹模式氮肥贡献率表现为 $M_1 > M_2 > M_4 > M_3 > M_5$, 土壤氮肥依存率表现为 $M_5 > M_4 > M_3 > M_1 > M_2$ 。土壤肥力和氮肥运筹二因素互作对氮肥贡献率的影响不显著,对土壤氮肥依存率的影响极显著。 S_1 水平下, M_5 模式土壤氮肥依存率最高, M_1 、 M_2 、 M_3 模式较低,且彼此间差异均不显著; S_2 水平下, 各氮肥运筹模式土壤氮肥依存率间的差异均不显著; S_3 水平下, M_3 和 M_5 模式土壤氮肥依存率较高, M_2 模式最低。土壤氮肥依存率最高的组合为 S_1M_5 , 最低的组合为 S_3M_2 , S_1M_5 组合较 S_3M_2 组合高 63.6%。

表5 土壤肥力和氮肥运筹的交互作用对寒地水稻稻米品质的影响

Tab. 5 Effects of the interactions between soil fertility and nitrogen application patterns on rice quality in cold region

因素 Factors	处理 Treatments	糙米率/% Brown rice rate	精米率/% Milled rice rate	垩白粒率/% Chalky grain rate	垩白度/% Chalkiness	直链淀粉含量/% Amylose content	蛋白质含量/% Protein content	食味评分 Taste score
						%	%	
S1	M1	80.59aA	71.62aA	6.18aA	11.02aA	18.53aA	7.77abAB	81.53bBC
	M2	79.50cB	70.31bC	5.63aA	9.98abA	18.03aA	7.87aA	80.37bC
	M3	80.02bAB	70.68bBC	5.80aA	11.02aA	18.40aA	7.60cB	84.11aA
	M4	80.58aA	71.44aAB	2.88cC	5.67dC	18.10aA	7.70bcAB	83.30aAB
	M5	79.82bcB	70.59bC	4.28bB	7.82cB	18.20aA	7.80abAB	83.36aAB
S2	M1	80.23abA	70.53cC	4.50aA	8.60aA	18.53aA	7.30dC	85.49aA
	M2	80.16bA	70.85bcBC	3.40bB	6.48cBC	18.30aA	7.43cdBC	84.47abAB
	M3	80.74aA	71.88aA	2.52cC	5.13dCD	17.70aA	7.60bB	82.59cBC
	M4	80.42abA	71.38abAB	3.83bAB	7.57bAB	18.03aA	7.50bcBC	83.22bcBC
	M5	80.37abA	71.56aAB	2.08cC	4.33dD	17.85aA	7.90aA	81.85cC
S3	M1	80.02bA	71.14aA	4.43aA	8.72aA	18.80bB	7.07cC	85.17abA
	M2	80.37abA	71.20aA	3.75bAB	7.40bAB	17.57bB	7.33bB	83.83bA
	M3	80.03bA	71.13aA	3.73bAB	7.62bAB	21.03aA	7.57aA	85.39aA
	M4	80.57aA	71.60aA	3.55bBC	7.10bBC	17.95bB	7.50aAB	85.14abA
	M5	80.41abA	71.63aA	2.90cC	5.88cC	18.05bB	7.65aA	83.89abA

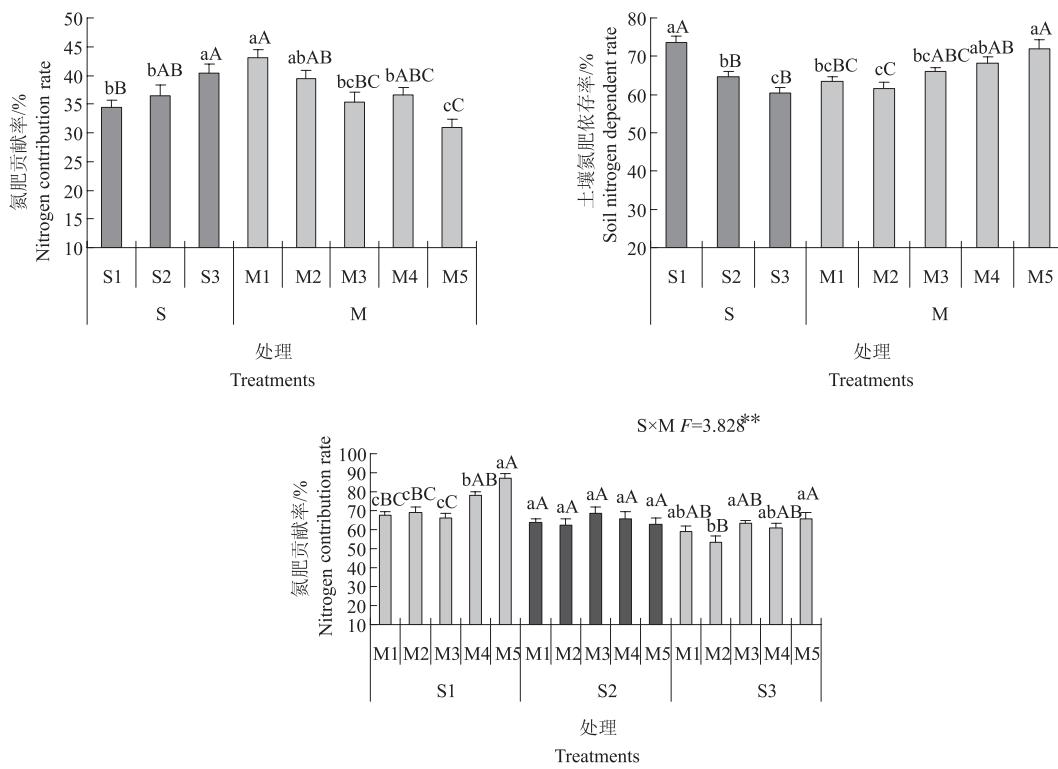


图2 土壤肥力和氮肥运筹对氮肥贡献率和土壤氮肥依存率的影响

Fig. 2 Effects of soil fertility and nitrogen application patterns on nitrogen fertilization contribution rate and soil nitrogen dependent rate

2.4 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻氮肥利用的影响

由表6可知,不同土壤肥力水平下氮肥农学利用率和吸收利用率均无显著差异;地上部吸氮量表现为S1>S2>S3,差异极显著;S1水平下氮肥生理利用率和偏生产力均极显著高于S2和S3水平,后

二者差异不显著。从氮肥运筹模式来看,地上部吸氮量表现为M2>M1>M3>M4>M5,其中M2模式显著或极显著高于M3、M4、M5模式,提高幅度分别为7.1%、11.3%、16.6%,M1模式与M3、M4模式间的差异均不显著,但极显著高于M5模式,提高幅度为12.2%;M3和M4模式氮肥农学利用率与M1、

M2 模式间的差异均不显著,但均显著高于 M5 模式,提高幅度分别为 25.4% 和 28.1%;M1 模式氮肥吸收利用率极显著低于 M2 和 M3 模式,降低幅度分别为 27.0% 和 27.1%,与 M4 和 M5 模式均无显著差异,M2、M3、M4 模式间均无显著差异;M1、M4、M5 模式氮肥生理利用率间的差异均不显著,三者均极显著高于 M2 和 M3 模式;氮肥偏生产力表现为 M3、M4 模式间差异不显著,但均显著高于 M2 和 M5 模式,这 4 个模式均极显著高于 M1 模式。

土壤肥力和氮肥运筹二因素互作对氮肥吸收利用各指标的影响均达到显著或极显著水平(表 6)。由表 7 可知,S1 水平下 M1—M3 模式、S3 水平下 M2 模式地上部吸氮量较高,而 S2 水平下不同氮肥运筹模式间均无显著差异。S1 水平下,M3 模式氮肥农学利用率最高,极显著高于 M1 和 M5 模式,与 M2 和 M4 模式均无显著差异;S2 和 S3 水平下,各氮肥

运筹模式间均无显著差异。S1 水平下 M3 模式、S2 水平下 M5 模式、S3 水平下 M2 模式氮肥吸收利用率最高,S1 水平下 M5 模式、S2 水平下 M1 模式、S3 水平下 M1 模式氮肥吸收利用率最低。S1 水平下,M5 模式氮肥生理利用率最高,M1—M3 模式生理利用率较低;S2 水平下,M1 模式最高,M3 和 M5 模式较低;S3 水平下,M1 模式最高,M2 模式最低。S1 水平下,氮肥偏生产力以 M3 模式最高,M4、M5、M2 模式依次次之,M1 模式最低;S2 水平下,则以 M4 模式最高,M1 和 M2 模式相对较低;S3 水平下,M2—M5 模式氮肥偏生产力间的差异均不显著,但均显著或极显著高于 M1 模式。地上部吸氮量、氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率、氮肥偏生产力均以 S1M3 组合最高,分别为 0.464 g/穴、51.46%、66.83 g/g、131.52 g/g,而氮肥生理利用率则以 S1M5 组合最高,为 134.54 g/g。

表 6 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻氮肥利用的影响

Tab. 6 Effects of soil fertility and nitrogen application patterns on nitrogen utilization of rice in cold region

因素 Factors	处理 Treatments	地上部吸氮量/ (g/穴) Nitrogen uptake of the overground parts	氮肥农学利用率/ % Nitrogen agronomic efficiency	氮肥吸收利用率/ (g/g) Nitrogen recovery use efficiency	氮肥生理利用率/ (g/g) Nitrogen physiological efficiency	氮肥偏生产力/ (g/g) Nitrogen partial factor productivity
S	S1	0.422aA	38.22aA	43.49aA	96.40aA	110.18aA
	S2	0.353bB	34.06aA	48.21aA	71.47bB	91.42bB
	S3	0.322cC	37.30aA	48.67aA	77.37bB	91.17bB
	F_S	55.450 **	1.23	1.22	30.70 **	30.55 **
M	M1	0.378abAB	34.89abA	38.71bB	90.31aA	80.25cC
	M2	0.393aA	37.71abA	53.04aA	72.00bB	93.86bB
	M3	0.367bABC	39.04aA	53.13aA	71.44bB	106.98aA
	M4	0.353bcBC	39.86aA	47.33abAB	87.14aA	107.79aA
	M5	0.337cC	31.12bA	41.74bAB	87.84aA	99.06bAB
	F_M	6.020 **	1.96	3.81 **	9.24 **	19.62 **
S × M	$F_{S \times M}$	3.860 **	2.13 *	4.13 **	14.08 **	2.47 *

表 7 土壤肥力和氮肥运筹的交互作用对寒地水稻氮肥利用的影响

Tab. 7 Effects of the interactions between soil fertility and nitrogen application patterns on nitrogen utilization of rice in cold region

因素 Factors	处理 Treatments	地上部吸氮量/ (g/穴) Nitrogen uptake of the overground parts	氮肥农学利用率/ % Nitrogen agronomic efficiency	氮肥吸收利用率/ (g/g) Nitrogen recovery use efficiency	氮肥生理利用率/ (g/g) Nitrogen physiological efficiency	氮肥偏生产力/ (g/g) Nitrogen partial factor productivity
S1	M1	0.452aAB	33.16bB	41.35bBC	79.81cC	86.62cC
	M2	0.447aAB	40.31abAB	49.42bAB	83.25cC	106.48bB
	M3	0.464aA	51.46aA	66.83aA	77.47cC	131.52aA
	M4	0.393bBC	38.88abAB	37.07bcBC	106.92bB	118.93bAB
	M5	0.352bC	27.27bB	22.79cC	134.54aA	107.33bB
S2	M1	0.355aA	36.26aA	36.43bA	100.18aA	78.88cC
	M2	0.365aA	32.43aA	48.52abA	67.29bcBC	85.17cBC
	M3	0.334aA	26.82aA	45.52abA	53.84cC	90.63bcABC
	M4	0.350aA	40.24aA	52.28abA	77.57bB	104.05aA
	M5	0.364aA	34.54aA	58.29aA	58.48cBC	98.35abAB
S3	M1	0.328abAB	35.24aA	38.34bA	90.93aA	75.26bB
	M2	0.367aA	40.41aA	61.18aA	65.46cB	89.94aAB
	M3	0.303bB	38.85aA	47.04abA	83.00abAB	98.79aA
	M4	0.317bAB	40.45aA	52.64abA	76.94abcAB	100.39aA
	M5	0.297bB	31.55aA	44.15abA	70.50bcAB	91.49aAB

2.5 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻抗倒伏指数的影响

由表8可知,不同土壤肥力条件下第2—第4节间茎秆抗折力均无显著差异,茎秆鲜质量和重心高度均随土壤肥力下降呈降低趋势,而茎秆抗倒伏指数变化趋势则相反;3种土壤肥力水平下抗倒伏指数间差异达到显著或极显著水平。不同氮肥运筹模式之间茎秆鲜质量和各节间茎秆抗折力的差异总

体上均不显著,茎秆重心高度以M1和M2模式较高,二者均显著或极显著高于M3—M5模式,后三者之间的差异均不显著;M2—M5模式茎秆抗倒伏指数无显著差异,均显著或极显著高于M1模式,提高幅度分别为17.3%、27.6%、34.6%、30.4%。土壤肥力和氮肥运筹二因素互作对上述指标的影响均不显著。

表8 土壤肥力和氮肥运筹对寒地水稻抗倒伏性状的影响

Tab. 8 Effects of soil fertility and nitrogen application patterns on lodging resistance traits of rice in cold region

处理 Treatment	茎秆鲜质量/g Fresh weight of stem	茎秆重心高度/ cm Height of stem gravity center	茎秆抗折力/g Fracture resistance of stem			茎秆抗倒伏指数 Lodging resistant index of stem	
			第4节间 4th internode	第3节间 3th internode	第2节间 2th internode		
S	S1	7.66aA	37.11aA	267.2aA	454.5aA	805.3aA	2.92cB
	S2	7.27abA	34.34bB	259.5aA	485.4aA	858.1aA	3.53bA
	S3	7.02bA	33.15cB	273.1aA	483.8aA	888.1aA	3.90aA
	F _S	3.35 [*]	24.89 ^{**}	0.781	0.912	2.288	14.362 ^{**}
M	M1	7.54aA	36.97aA	251.0aA	427.0bA	764.6bA	2.83bB
	M2	7.42aA	36.12aAB	278.7aA	511.5aA	850.9abA	3.32aAB
	M3	7.32aA	33.81bC	260.3aA	471.2abA	882.6aA	3.61aA
	M4	7.05aA	32.97bC	266.2aA	466.0abA	843.7abA	3.81aA
	M5	7.25aA	34.46bBC	276.7aA	497.2abA	910.7aA	3.69aA
	F _M	0.66	9.82 ^{**}	1.337	1.910	2.362	5.400 ^{**}
S × M	F _{S × M}	1.78	1.12	2.068	1.227	1.603	0.486

3 结论与讨论

本研究结果表明,在高肥力土壤条件下,农民习惯施肥、V字形施肥、减氮施肥和减氮减磷施肥模式水稻产量较高,彼此间均无显著差异;中肥力土壤条件下,农民习惯施肥模式产量最高,减氮减磷施肥、V字形施肥模式依次次之;低肥力土壤条件下,农民习惯施肥、V字形施肥产量较高。可见,在不同肥力土壤上农民习惯施肥模式均能获得较高产量。农民习惯施肥模式由于氮肥的前重型分配,利于获得较高的穗数和穗粒数,但千粒质量较低,并且由于过量施用氮肥,抗倒伏指数低,倒伏风险增加。相关研究表明,倒伏平均每年造成的水稻产量损失为10%~30%,甚至绝收^[27-28],且使稻谷品质变劣^[29]。因此,寒地水稻生产不宜采用农民习惯施肥模式。

土壤肥力对稻米品质的影响主要表现在外观品质、蛋白质含量及食味评分方面,对加工品质和直链淀粉含量的影响较小。高肥力土壤稻米垩白粒率和垩白度最高,中肥力土壤最低,低肥力土壤中等;蛋白质含量的变化趋势与植株地上部吸氮量、氮肥偏生产力变化趋势相符,呈高肥力>中肥力>低肥力,而食味评分则呈相反趋势。5种氮肥运筹模式的品质差异主要表现在外观品质、营养品质及食味评分

方面。农民习惯施肥模式在水稻6叶伸长期后再无氮肥投入,由于籽粒灌浆期间氮素供应量少,籽粒蛋白质含量极显著低于其他处理,其食味评分最高。减氮施肥和减氮减磷施肥模式总体氮肥施肥量较少,籽粒蛋白质含量中等,食味评分与农民习惯施肥模式相近。V字形施肥模式施氮量高于减氮施肥和减氮减磷施肥模式;前氮后移施肥模式尽管总氮素投入量较少,但后期施氮,所以这2种氮肥运筹模式籽粒灌浆期间氮素含量较高,食味评分低于其他处理。

在高肥力土壤上宜采用减氮施肥模式,较农民习惯施肥模式减少氮肥投入33.1%,较V字形施肥模式减少氮肥投入17.5%,其产量与农民习惯施肥、减氮施肥、减磷施肥模式差异不显著,极显著高于前氮后移施肥模式;另外,植株地上部吸氮量、氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率和氮肥偏生产力均高于其他模式,但氮肥生理利用率较低。中肥力土壤上宜采用V字形施肥,其较农民习惯施肥模式减少氮肥投入19.1%,其产量、植株地上部吸氮量、氮肥农学利用率、氮肥吸收利用率与其他模式均无显著差异,氮肥生理利用率中等,氮肥偏生产力较低。低肥力土壤条件下,农民习惯施肥、V字形施肥、减氮施肥和减氮减磷施肥模式产量相近,其中,减氮施

肥模式食味评分最高,垩白粒率和垩白度中等,氮肥生理利用率、氮肥偏生产力较高,氮肥吸收利用率、氮肥农学利用率中等,植株地上部吸氮量偏低;农民习惯施肥模式尽管产量高,但抗倒伏指数显著低于其他模式,不宜采用;减氮减磷模式和前氮后移模式也由于产量或品质方面的问题,不推荐应用。

参考文献:

- [1] FAGERIA N K. Plant tissue test for determination of optimum concentration and uptake of nitrogen at different growth stages in lowland rice [J]. *Commun Soil Sci Plan*, 2003, 34:259-270.
- [2] 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.
- [3] 何海兵,杨茹,廖江,等.水分和氮肥管理对灌溉水稻优质高产高效调控机制的研究进展[J].*中国农业科学*,2016,49(2):305-318.
- [4] 严奉君,孙永健,马均,等.不同土壤肥力条件下麦秆还田与氮肥运筹对杂交稻氮素利用、产量及米质的影响[J].*中国水稻科学*,2015,29(1):56-64.
- [5] 彭少兵,黄见良,钟旭华,等.提高中国稻田氮肥利用率的研究策略[J].*中国农业科学*,2002,35(9):1095-1103.
- [6] 刘立军,杨立年,孙小淋,等.水稻实地氮肥管理的氮肥利用效率及其生理原因[J].*作物学报*,2009,35(9):1672-1680.
- [7] 李庆逵.中国农业持续发展中的肥料问题[M].南昌:江西科学技术出版社,1997.
- [8] 潘圣刚,曹湊贵,蔡明历,等.不同灌溉模式下氮肥水平对水稻氮素利用效率、产量及其品质的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2009,15(2):283-289.
- [9] 尤小涛,荆奇,姜东,等.节水灌溉条件下氮肥对粳稻稻米产量和品质及氮素利用的影响[J].*中国水稻科学*,2006,20(2):199-204.
- [10] 孙永健.水氮互作对水稻产量形成和氮素利用特征的影响及其生理基础[D].雅安:四川农业大学,2010.
- [11] 王巧兰,吴礼树,赵竹青,等.氮水平对水稻植株氮素损失的影响[J].*植物营养与肥料学报*,2010,16(1):14-19.
- [12] 陈刚,徐阳春,沈其荣.施氮水平对水稻生育后期地上部氮挥发的影响[J].*应用生态学报*,2008,19(7):1483-1488.
- [13] 潘圣刚,黄胜奇,翟晶,等.氮肥用量与运筹对水稻氮素吸收转运及产量的影响[J].*土壤*,2012,44(1):23-29.
- [14] 房贤涛,何花榕,谢祖钦,等.不同施氮量对杂交稻茎秆性状及抗倒伏性的影响[J].*福建农业学报*,2016,31(10):1034-1038.
- [15] 吴晓然,张巫军,伍龙梅,等.超级杂交籼稻抗倒能力比较及其对氮素的响应[J].*中国农业科学*,2015,48(14):2705-2717.
- [16] 李超,陈恺林,刘洋,等.不同氮素水平对晚稻拟环纹豹蛛及稻飞虱种群动态的影响[J].*湖南农业科学*,2014,20(10):37-40,44.
- [17] 曾泉,胡春锦,史国英,等.氮素营养对水稻纹枯病菌致病力的影响[J].*南方农业学报*,2015,46(6):1012-1017.
- [18] 陈书强.氮肥运筹对水稻生育动态和茎蘖利用特征的影响[J].*湖北农业科学*,2018,57(6):20-25.
- [19] 王士强,陈淑洁,赵海红,等.氮肥运筹对寒地水稻生长和产量的影响[J].*中国稻米*,2015,21(3):68-71.
- [20] 杜晓东,赵宏伟,王敬国,等.氮肥运筹对寒地粳稻淀粉合成关键酶活性及淀粉积累的影响[J].*作物学报*,2012,38(1):159-167.
- [21] MITANI N, MA J F, IWASHITA T. Identification of the silicon form in xylem sap of rice (*Oryza sativa L.*) [J]. *Plant Cell Physiol*, 2005, 46(2):279-283.
- [22] 李金才,尹钧,魏凤珍.播种密度对冬小麦茎秆形态特征和抗倒指数的影响[J].*作物学报*,2005,31(5):662-666.
- [23] 国家质量技术监督局.优质稻谷:GB/T 17891—1999[S].北京:中国标准出版社,1999.
- [24] 徐正进,陈温福,马殿荣,等.辽宁水稻食味值及其与品质性状的关系[J].*作物学报*,2005,31(8):1092-1094.
- [25] 国家质量监督检验检疫总局,国家标准化委员会.优质稻谷:GB/T 17891—2017[S].北京:中国标准出版社,2018.
- [26] 陈能,罗玉坤,谢黎虹,等.我国水稻品种的蛋白质含量及与米质的相关性研究[J].*作物学报*,2006,32(8):1193-1196.
- [27] 阎志利,张景奎,林瑞敏.倒伏对水稻产量影响的分析研究[J].*盐碱地利用*,1990(3):7-9.
- [28] STAM P P. Seedling traits of maize as indicators of root lodging[J]. *Agronomie*, 1992, 12(2):157-162.
- [29] 郎有忠,杨晓东,王美娥,等.结实阶段不同时期倒伏对水稻产量及稻米品质的影响[J].*中国水稻科学*,2011,25(4):407-412.