植物营养与肥料学报 2015,21(3): 763 - 772 doi: 10.11674/zwyf.2015.0324
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

氮肥用量和密度对双季稻产量及氮肥利用率的影响

徐新朋[1], 周 卫[1*], 梁国庆[1], 孙静文[1], 王秀斌[1],
何 萍[1], 徐芳森[2], 余喜初[3]
(1 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所, 北京 100081; 2 华中农业大学资源与环境学院,
湖北武汉 430070; 3 江西省红壤研究所, 江西进贤 331717)

摘要:【目的】高量化肥投入不仅不能使作物产量进一步增加,相反还会造成肥料资源的浪费并威胁到生态环境安全,同时导致肥料吸收利用率、农学效率等不断降低。为了明确氮肥用量和移栽密度的相互作用,在田间试验条件下研究了不同氮肥用量和移栽密度组合对江西双季稻产量、产量构成要素及氮肥利用率的影响,以期为双季稻的高产高效栽培技术提供理论基础。**【方法】**采用裂区试验设计,以氮肥施用量为主区,密度为副区,设 4 个施氮水平(N 0、135、180 和 225 kg/hm^2,以 N0、N135、N180 和 N225 表示)和 4 种移栽密度(21×10^4、27×10^4、33×10^4、39×10^4 hole/hm^2,以 D21、D27、D33 和 D39 表示)组合,在水稻成熟期对产量以及产量构成要素进行测定,并分析其吸氮量和氮肥利用率、氮收获指数等指标。**【结果】**施氮水平和移栽密度对水稻产量具有显著影响;增加移栽密度有助于提高单位面积水稻的有效穗数、稻谷产量和地上部吸氮量;在高施氮量下,水稻氮素积累总量增加,而氮素吸收利用率(REN)、氮素偏生产力(PFPN)、氮素生理利用率(PEN)、氮素内在养分效率(IEN)和氮素收获指数(NHI)降低;氮素农学效率(AEN)则是先升高后降低,而产量并未增加。与其它处理组合相比,施氮量为 180 kg/hm^2 和 39×10^4 hole/hm^2 密度的组合产量最高,早稻和晚稻分别为 9823.0 和 11354.7 kg/hm^2,此时早稻和晚稻的氮素吸收率分别为 42.4% 和 47.5%。当施氮量超过 180 kg/hm^2 时产量则不再增加,但产量随着移栽密度的增加而显著增加。**【结论】**合理氮肥用量和移栽密度可以显著增加水稻单位面积的有效穗数和氮累积量,进而增加水稻产量和氮肥利用率,建议在江西双季稻栽培中采用施氮量为 N 180 kg/hm^2,栽培密度 39×10^4 hole/hm^2 的组合。

关键词: 水稻; 氮肥用量; 移栽密度; 产量; 氮肥利用率
中图分类号: S511.4$^+$2.062 **文献标识码:** A **文章编号:** 1008-505X(2015)03-0763-10

Effects of nitrogen and density interactions on grain yield and nitrogen use efficiency of double-rice systems

XU Xin-peng[1], ZHOU Wei[1*], LIANG Guo-qing[1], SUN Jing-wen[1], WANG Xiu-bin[1],
HE Ping[1], XU Fang-sen[2], YU Xi-chu[3]
(*1 Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Beijing 100081, China;*
2 College of Resources and Environmental Sciences, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China;
3 Jiangxi Institute of Red Soil, Jiangxi, Jinxian 331717, China)

Abstract:【Objectives】 Over-fertilization by farmers driven by desire for higher yields does not always contribute to increase yield, however, the over-fertilization causes fertilizer waste and negative effects on environment, meanwhile leads to low nutrient recovery efficiency and agronomic efficiency. In order to determine effects of nitrogen(N) application and transplanting density(D) on double-rice systems, a field experiment was conducted to study yield, yield components and nitrogen use efficiency of double-rice in Jiangxi province. **【Methods】** A split-

收稿日期: 2014-02-18 **接受日期:** 2014-07-16
基金项目: 现代农业产业技术体系建设专项资金(CARS-01-31); 农业部公益性行业(农业)科研专项(201003016); 国家重点基础研究发展计划(2013CB127405)资助。
作者简介: 徐新朋(1984—), 男, 河北承德人, 博士研究生, 主要从事高效施肥方面的研究。E-mail: xinpengxu@163.com
* 通信作者 E-mail: wzhou@caas.ac.cn

plot experimental design was used with different nitrogen application amounts in the main plots and transplanting density in the sub-plots to study grain yield and N use efficiency under four N rates (N 0, 135, 180 and 225 kg/hm^2, and express as N0, N135, N180 and N225) and four transplanting densities (21×10^4, 27×10^4, 33×10^4 and 39×10^4 hole/hm^2, and express as D21, D27, D33 and D39) for double-rice systems, the grain yield and its components were measured, and N uptake, N use efficiency and N harvest index were analyzed at rice maturity. 【**Results**】The results show that there are significant effects of the N levels and planting density on the rice yield separately. The high transplanting density contributes to increase effective panicle number per unit area, grain yield and total N uptake of shoot. The high N rate increases total N accumulation of rice, but decreases the N recovery efficiency, N partial factor productivity, N internal efficiency, N physiological efficiency and N harvest index. The agronomic efficiency of N is increased with increasing of N application rate at first and decreased after N application rate exceeding 180 kg/hm^2. Compared to other treatments, there are the highest yields under the 180 kg/hm^2 and 39×10^4 hole/hm^2 treatment combination, the yields are 9823.0 and 11354.7 kg/hm^2 for early and late rice, and the N recovery efficiencies are 42.4% and 47.5% for early rice and late rice, respectively. The grain yield is not increased when N application rate exceeding 180 kg/hm^2, while the yield is increased with increasing transplanting density in our study. 【**Conclusions**】The rational combination of nitrogen application and transplanting density can indeed significantly increase the effective panicle number per unit area and total N uptake of rice shoot, which further increases the rice yield and nitrogen use efficiency. The N180D39 treatment combination is recommended for double-rice systems in Jiangxi province.

Key words: rice; N fertilizer rate; planting density; grain yield; N use efficiency

水稻作为我国主要粮食作物之一,对我国粮食安全起着至关重要的作用。在“高投入、高回报”的传统耕作理念的驱使下,化肥的施用量不断增加,导致过量施肥和不合理施肥的严重问题。然而,高量的化肥投入不仅不能带来作物产量的进一步增加,相反还会威胁到生态环境的安全[1-5],造成地表水或地下水体硝酸盐含量超标,同时导致肥料利用率以及农学效率等不断降低。因此在水稻栽培的生产实践中提高肥料利用率和产量已成为重要的目标之一。要同时兼顾产量、经济、环境及农学效益,则需要重点对氮肥施用量和移栽密度进行重点研究。随着水稻品种的不断更新和生产基础条件的不断改进,合理的氮肥施用量及管理方式不仅能促进作物生长、提高产量,而且能够提高氮肥利用率[6-8]。科学的移栽密度能够保证水稻个体及群体有效的发挥潜能,从而获得高产。研究表明,合理的氮肥用量、施用时期和密度对水稻分蘖及产量有显著影响[9],同时可以增强水稻的抗倒伏性能[10],最终达到提高产量和氮肥利用率的效果[11],施氮量和移栽密度也影响着水稻的氮素吸收、转运及利用。在施氮量和栽培密度方面以往的研究多集中在单季水稻上,对双季稻的研究还比较少,为此,本试验在综合前人研究的基础上,系统研究了施氮量和移栽密度对双季稻产量、经济性状、氮肥吸收转运及氮素利用率的影响,以期为双季稻的高产高效栽培技术提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于2013年在江西省南昌市进贤县张公镇江西省红壤研究所试验基地的红壤性水稻田块上进行(东经116°20′24″,北纬28°15′30″)。供试土壤为水稻土,耕层土壤(0—20 cm)有机质含量22.82 g/kg、全氮1.50 g/kg、全磷0.63 g/kg、全钾16.80 g/kg、有效磷15.96 mg/kg、速效钾167.73 mg/kg、pH 5.15。供试的早稻品种为赣早籼54号,晚稻品种为正成456,

试验采用裂区设计,以施氮量为主区(面积120 m^2),密度为副区(面积为30 m^2),早稻和晚稻施氮量和密度设置相同,施氮量设N0、135、180和225 kg/hm^2 4个水平,以N0、N135、N180和N225表示。移栽密度设每公项21×10^4穴(20 cm × 23.8 cm)、27×10^4穴(20 cm × 18.5 cm)、33×10^4穴(20 cm × 15.2 cm)和39×10^4穴(20 cm × 12.8 cm)4种,以D21、D27、D33和D39表示。每处理3次重复,随机区组排列。

早稻于3月28日播种,4月25日移栽,7月16日收获;晚稻6月25日播种,7月26日移栽,10月

27 日收获。氮肥用尿素(含 N 46%),分基肥、分蘖肥、穗肥 3 次施用,基肥∶分蘖肥∶穗肥为 4∶3∶3。磷肥用钙镁磷肥(含 P_2O_5 12.5%),全部作基肥;钾肥用氯化钾(含 K_2O 60%),基肥∶穗肥为5∶5。各处理磷肥施用量为 450 kg/hm^2,钾肥用量 225 kg/hm^2。试验小区间作埂隔离,并用塑料膜覆盖埂体,以保证各小区单独排灌并防止水肥渗出。

1.2　测定项目及方法

水稻成熟后,每个小区单独收割测定子粒产量,采集有代表性的植株 5 兜,对水稻产量构成要素进行考察,包括株高、穗数、穗长、穗粒数、结实率、千粒重,并分别称量茎、叶和籽粒的重量。

用凯氏定氮法测定茎鞘、叶片和子粒氮含量。

相关计算方法:

氮素吸收利用率(N recovery efficiency,REN) = (施氮区植株地上部氮累积量 - 空白区地上部植株氮累积量)/施氮量 ×100%;

氮素农学利用率(agronomic efficiency of applied N,AEN) = (施氮区产量 - 空白区产量)/施氮量;

氮素偏生产力(partial factor productivity of applied N,PFPN) = 施氮区产量/施氮量;

氮素生理利用率(physiological efficiency of applied N,PEN) = (施氮区产量 - 空白区产量)/(施氮区地上部氮累积量 - 空白区地上部氮累积量);

氮素内在养分效率(internal efficiency of applied N,IEN) = 施氮区产量/施氮区地上部氮累积量;

氮素收获指数(N harvest index,NHI) = 子粒氮累积量/植株地上部氮累积量。

试验数据采用 Excel 2007 和 SAS 进行处理和分析。

2　结果与分析

2.1　氮肥和密度对水稻产量的影响

试验结果表明,氮肥用量及移栽密度对水稻产量具有显著的影响(图 1)。无论是早稻还是晚稻均以 N180D39 处理组合的产量最高,分别为 9823.0 和 11354.7 kg/hm^2(表 1 和表 2)。从密度看,增加水稻的移栽密度可以显著增加水稻产量,所有处理中都以 D39 的产量最高,N180 与 N0、N135 和 N225 相比,早稻产量分别提高了 40.0%、15.6% 和 4.1%,晚稻产量分别提高了 57.3%、5.3% 和 6.5%。而从施氮水平看,在施氮水平达到 180 kg/hm^{2}时,早稻和晚稻的产量达到最大,施氮量与水稻产量呈抛物线关系,移栽密度与水稻产量在本试验设置中呈线性关系。

施氮水平和移栽密度对一些产量构成要素的影响达到了显著水平。施氮水平和移栽密度对早稻和晚稻穗粒数的影响达到了显著水平,而氮肥水平对晚稻结实率的影响也达到了显著水平,而对早稻的结实率则无影响。在同一施氮水平下有效穗数随着移栽密度的增加而增加,均以 D39 的有效穗数最高,而单个穗子的穗粒数却相反,穗粒数与施氮量间呈抛物线关系,在相同氮水平中均以 D21 的穗粒数最多,在本研究中当施氮量超过 180 kg/hm^2 时,穗

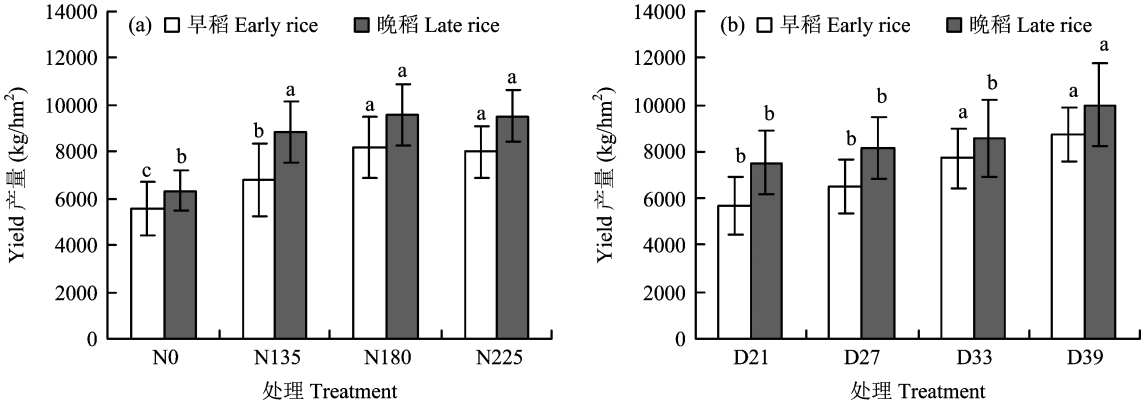

图 1　不同处理对产量的影响

Fig. 1　Effects of different treatments on grain yields of rice

[注(Note):N—氮肥 N fertilizer;D—种植密度 Planting density;柱上不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Different letters above the bars for different treatments are significantly different at the 5% probability level.]

粒数则开始降低。因此,增加施氮量和移栽密度主要通过增加有效分蘖而提高水稻有效穗数及总穗粒数增加水稻产量。除此之外,施氮对水稻的株高和穗长具有显著影响。移栽密度对早稻穗长的影响达到了显著水平,同施氮量水平下早稻穗长随移栽密度增加而降低。

2.2 氮肥和密度对水稻氮素利用效率的影响

随着过量施氮对环境的影响日益严重,如何在不降低作物产量的情况下提高氮肥利用效率的研究也越来越多。在水稻的栽培条件中施氮水平和移栽密度则是两个重要影响因素。施氮水平和移栽密度对早稻和晚稻的氮素吸收率、农学效率和偏生产力的影响都达到了显著水平(表3和表4)。早稻氮素吸收利用率所有处理中以N180D39处理组合最高,为42.4%。晚稻氮素吸收率最高的是N135D39处理组合,为50.8%,其次是N180D39处理组合,为47.5%。氮素吸收率随着移栽密度的增加而增加,在不同移栽密度条件下,均以高密度处理的氮素吸

表1 不同处理下早稻产量及其构成因子

Table 1 The grain yield and its components of early rice under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	有效穗数 Panicle (No./m^2)	穗长 Ear length (cm)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-seed weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
N0D21	80.3 bcd	177 fg	19.0 abc	174.2 bcd	89.9 ab	29.2 a	4175.2 k
N0D27	78.3 d	174 g	17.3 f	142.0 ef	88.9 ab	29.0 ab	5142.4 ij
N0D33	79.3 cd	205 efg	17.4 ef	143.3 ef	90.2 ab	28.9 ab	5905.4 hi
N0D39	83.7 abcd	264 de	17.3 f	142.0 ef	88.1 ab	27.6 b	7016.4 efg
N135D21	87.0 abcd	261 de	19.0 ab	196.2 ab	90.1 ab	29.5 a	5075.6 j
N135D27	87.0 abcd	255 abc	18.2 bcde	173.1 bcd	89.0 ab	28.6 ab	5742.7 ij
N135D33	89.0 ab	315 abcd	17.5 def	159.4 cdef	91.5 a	29.7 a	8013.3 bcd
N135D39	88.3 abc	355 abc	17.2 f	151.7 cdef	86.9 ab	29.3 a	8494.9 b
N180D21	86.3 abcd	287 cd	19.6 a	208.4 a	89.0 ab	28.6 ab	6826.2 fg
N180D27	84.7 abcd	279 cde	18.8 abc	177.6 bc	89.0 ab	29.3 a	7453.0 def
N180D33	90.3 a	330 abcd	17.9 def	162.7 cde	88.6 ab	29.4 a	8653.0 b
N180D39	91.0 a	386 a	17.2 f	136.2 f	88.9 ab	28.8 ab	9823.0 a
N225D21	91.7 a	306 bcd	19.2 a	173.5 bcd	87.2 ab	28.5 ab	6667.4 gh
N225D27	86.3 abcd	288 cd	18.2 cde	165.5 cde	88.7 ab	29.2 a	7605.3 cde
N225D33	87.7 abc	374 ab	18.3 bcd	154.1 cdef	86.6 b	28.5 ab	8294.8 bc
N225D39	86.0 abcd	394 a	17.4 ef	150.9 efd	87.6 ab	28.8 ab	9436.4 a
氮肥 N	**	**	*	**	ns	ns	**
密度 D	ns	**	**	**	ns	ns	**
N×D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注(Note): N—N fertilizer; D—Planting density. 数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters for different treatments are significantly different at the 5% probability level. ns 表示不显著 Indicates no significant; * 和 ** 分别表示达到5%和1%显著水平 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

表 2　不同处理下晚稻产量及其构成因子

Table 2　The grain yield and its components of late rice under different treatments

处理 Treatment	株高 Plant height (cm)	有效穗数 Panicle (No./m^2)	穗长 Ear length (cm)	穗粒数 Grain No. (No./panicle)	结实率 Seed-setting rate (%)	千粒重 1000-seed weight (g)	产量 Yield (kg/hm^2)
N0D21	90.3 g	273 i	18.9 cde	138 abc	83.9 d	28.3 abc	5507.8 h
N0D27	93.3 efg	315 ghi	18.0 e	126 bc	84.0 d	28.5 a	6213.2 gh
N0D33	90.3 g	347 efghi	20.4 abcde	160 abc	83.5 d	28.2 bc	6403.1 gh
N0D39	91.7 fg	403 defg	19.2 bcde	150 abc	83.5 d	28.3 abc	7217.1 fg
N135D21	105.3 ab	326 fghi	18.3 de	123 c	87.4 abcd	28.4 abc	7732.6 ef
N135D27	98.0 bcdefg	374 defgh	20.6 abcd	160 abc	91.4 a	28.3 abc	8465.1 de
N135D33	96.3 cdefg	413 def	20.4 abced	152 abc	89.4 abc	28.2 c	8410.9 de
N135D39	102.5 abc	501 abc	21.3 abc	179 a	87.1 abc	28.2 bc	10784.9 ab
N180D21	99.0 abcdef	301 hi	21.7 a	175 ab	86.6 bcd	28.5 ab	8112.4 def
N180D27	101.0 abcd	464 bcd	20.7 abcd	158 abc	90.8 ab	28.5 ab	9143.4 cd
N180D33	101.3 abcde	435 cde	20.8 abcd	142 abc	89.8 abc	28.2 abc	9686.0 bc
N180D39	94.5 defg	533 ab	22.6 a	184 a	87.8 abc	28.3 abc	11354.7 a
N225D21	106.3 a	333 fghi	21.2 abc	166 abc	90.3 ab	28.4 abc	8736.4 cde
N225D27	103.0 abc	414 def	21.4 ab	160 abc	91.2 a	28.4 abc	8845.0 cde
N225D33	106.0 a	402 defg	21.1 abc	155 abc	85.7 cd	28.3 abc	9794.6 bc
N225D39	100.0 abcde	585 a	21.9 a	172 abc	89.8 a	28.3 abc	10662.8 ab
氮肥 N	* *	* *	* *	ns	* *	ns	* *
密度 D	ns	* *	ns	ns	ns	* *	* *
N × D	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

注(Note):N—N fertilizer; D—Planting density. 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters for different treatments are significantly different at the 5% probability level. ns 表示不显著 Indicates no significant; * 和 * * 分别表示达到 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

收率最高,早稻为 35.2% ～ 42.2%,晚稻的为 43.2%～50.8%。增加移栽密度增加了总分蘖数以及地上部总生物质量,有助于提高水稻对氮素的吸收,从而提高氮素吸收利用率。合理的氮肥施用量不仅能够显著提高产量,同时有助于提高氮素的农学效率,从早稻试验结果得出,氮素农学效率与施氮量呈抛物线关系,当施氮量超过作物需求时农学效率则呈下降趋势。虽然 N180 与 N225 处理的氮素农学效率没有显著差异,但前者要高于后者。晚稻的氮素农学效率与早稻具有相同的趋势,但 N135D39 处理组合的氮素农学效率显著高于其他处理组合,为 29.8 kg/kg,主要归因于此处理有较高的产量。当施氮量在合理范围内时增加移栽密度可以提高氮素农学效率,在产量最高时的施氮水平下(本研究为 180 kg/hm^2)均以 D39 密度处理的农学效率最高,早稻和晚稻分别为 15.6 和 22.6 kg/kg。氮素偏生产力可反映单位施肥量下的作物产量,从试验结果可以看出,氮素偏生产力随氮肥用量的增加而降低,而在同一施氮水平下随着密度的增加而增加。移栽密度的增加有助于增加有效穗数,可以进一步增加产量,从而增加氮素偏生产力。产量与施氮量呈抛物线关系,而整个地上部氮素累积随着施氮量的增加而增加(图 2),导致高氮水平下氮素生理利用率和内在养分效率均最低。

表3 早稻不同处理的氮素利用效率

Table 3 N use efficiency for early rice under different treatments

处理 Treatment	氮素吸收利用率 REN (%)	氮素农学效率 AEN (kg/kg)	氮素偏生产力 PFPN (kg/kg)	氮素生理利用率 PEN (kg/kg)	氮素内在养分效率 IEN (kg/kg)	氮收获指数 NHI
N135D21	21.8 b	6.7 bc	37.6 efg	31.4 cd	66.8 ab	0.74 a
N135D27	22.4 b	4.4 c	42.5 d	18.3 d	63.5 bc	0.74 ab
N135D33	31.7 ab	15.6 a	59.4 ab	50.1 a	71.6 a	0.73 ab
N135D39	35.2 a	11.0 ab	62.9 a	30.9 cd	64.3 abc	0.70 ab
N180D21	32.1 ab	14.7 a	37.9 defg	46.5 ab	65.2 ab	0.74 ab
N180D27	32.4 ab	12.8 a	41.4 def	38.7 abc	62.9 bcd	0.73 ab
N180D33	38.4 a	15.3 a	48.1 c	39.3 abc	62.4 bcde	0.69 b
N180D39	42.4 a	15.6 a	54.6 b	37.0 abc	61.1 bcde	0.70 ab
N225D21	31.1 ab	11.1 ab	29.6 h	35.5 bc	56.8 cde	0.71 ab
N225D27	32.6 ab	10.9 ab	33.8 gh	33.3 c	57.0 cde	0.71 ab
N225D33	36.6 a	10.6 ab	36.9 fg	29.1 cd	55.4 de	0.72 ab
N225D39	39.4 a	10.8 ab	41.9 de	28.2 cd	55.0 e	0.69 ab
氮肥 N	*	**	**	*	**	ns
密度 D	*	*	**	ns	ns	ns
N×D	ns	ns	**	*	ns	ns

注(Note): N—N fertilizer; D—Planting density. REN—N recovery efficiency; AEN—Agronomic efficiency of applied N; PFP —Partial factor productivity of applied N; PEN—Physiological efficiency of applied N; IEN—Internal efficiency of applied N; NHI—N harvest index. 数值后不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Values followed by different letters for different treatments are significantly different at the 5% probability level. ns 表示不显著 Indicates no significant; * 和 ** 分别表示达到5%和1%显著水平 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

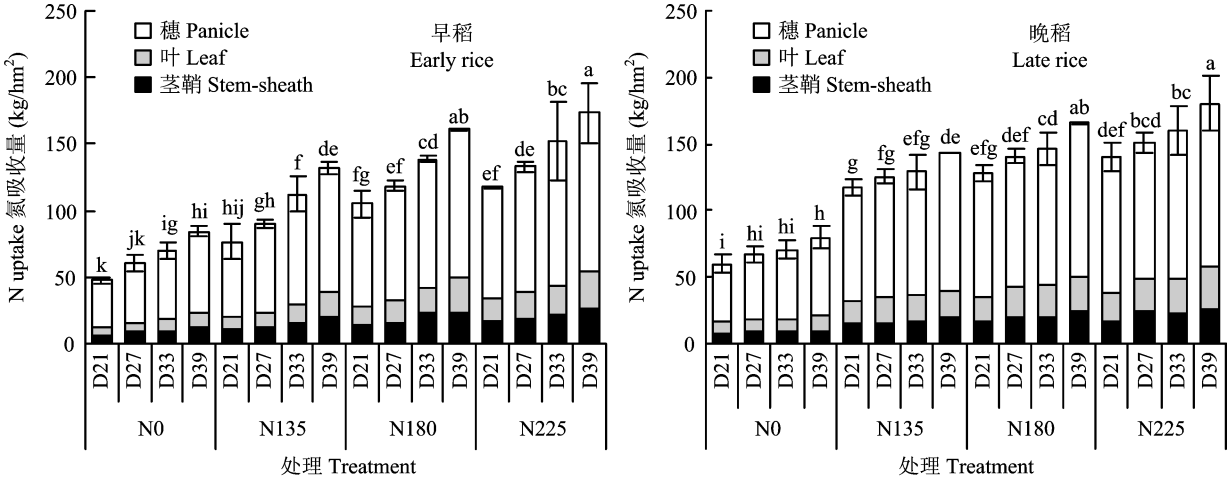

图2 不同处理对氮素累积的影响

Fig. 2 Effects of different treatments on N accumulation

[注(Note): N—氮肥 N fertilizer; D—种植密度 Planting density. 柱上不同字母表示处理间差异达5%显著水平 Different letters above the bars for different treatments are significantly different at the 5% probability level.]

表 4　晚稻不同处理的氮素利用效率

Table 4　N use efficiency for late rice under different treatments

处理 Treatment	氮素吸收利用率 REN (%)	氮素农学效率 AEN (kg/kg)	氮素偏生产力 PFPN (kg/kg)	氮素生理利用率 PEN (kg/kg)	氮素内在养分效率 IEN (kg/kg)	氮收获指数 NHI
N135D21	42.8 abc	16.5 bc	57.3 bc	38.5 bcd	66.0 bcd	0.72 a
N135D27	43.7 abc	16.7 bc	62.7 b	38.2 bcd	67.5 bc	0.72 a
N135D33	43.2 abc	14.9 c	62.3 b	34.0 cd	65.2 cd	0.72 a
N135D39	50.8 a	29.8 a	79.9 a	58.8 a	75.2 a	0.72 a
N180D21	38.1 c	14.5 c	45.1 efg	37.1 bcd	63.2 de	0.72 a
N180D27	41.2 bc	16.3 bc	50.8 cde	39.5 bcd	65.1 cd	0.70 ab
N180D33	42.1 bc	18.2 bc	53.8 cd	43.2 bc	66.2 bc	0.70 ab
N180D39	47.5 ab	22.6 b	63.1 b	47.2 b	68.6 b	0.70 ab
N225D21	36.0 c	14.3 c	38.8 g	39.0 bcd	62.2 e	0.72 a
N225D27	37.8 c	11.7 c	39.3 g	30.9 d	58.4 f	0.68 b
N225D33	40.0 bc	15.1 c	43.5 fg	36.9 bcd	60.9 ef	0.70 ab
N225D39	43.2 abc	13.6 c	47.4 def	29.5 d	59.0 f	0.68 b
氮肥 N	*	**	**	**	**	*
密度 D	*	**	**	*	**	ns
N×D	ns	*	ns	**	**	ns

注(Note):N—N fertilizer; D—Planting density. REN—N recovery efficiency; AEN—Agronomic efficiency of applied N; PFP —Partial factor productivity of applied N; PEN—Physiological efficiency of applied N; IEN—Internal efficiency of applied N; NHI—N harvest index. 数值后不同字母表示处理间差异达 5% 显著水平 Values followed by different letters for different treatments are significantly different at the 5% probability level. ns 表示不显著 Indicates no significant; * 和 ** 分别表示达到 5% 和 1% 显著水平 Mean significant at the 5% and 1% levels, respectively.

3　讨论

3.1　施氮水平和移栽密度与水稻产量的关系

施氮水平和移栽密度作为水稻高产的主要栽培条件,是水稻生产中不可忽视的因素。从试验结果可以看出,适宜的氮肥用量和移栽密度合理搭配能够显著提高水稻产量。当施氮量超过 180 kg/hm^2 时早稻和晚稻产量不再增加,相反还有所降低。诸多研究表明,当氮肥用量超过一定水平后,水稻产量将不再提高,这样就造成了资源的浪费和污染环境[4,12]。李红莉等[13]对水稻主产区施肥量的调查结果显示,水稻的单季施肥量 2007 年与 2000 年相比明显增加,而水稻的单产水平却有所降低。杨梢娜等[14]提出杂交晚粳“浙优 12”综合稻谷产量、生态效应和经济效益的施氮量为 234.8 ～ 241.0 kg/hm^2。江立庚等[15]、谢黎虹等[16]研究表明,施氮量不仅影响水稻产量,同时对水稻品质也有显著影响。李国辉等[17]指出,随着施氮量的增加水稻的株高增加,重心上移,基部节间长度增加,节间充实度下降,抗折力和弹性模量减小,进而影响水稻产量。在种植密度方面,汤亮等[18]、朱相成等[19]研究提倡合理密植以提高水稻冠层光合有效辐射截获率和光能利用率,并提高水稻产量。李旭毅等[20]提出,在温光条件较差的地区实现高产应当适当降低单位面积穗数以提高每穗粒数保证足量的群体颖花量和较高的结实率。除此之外移栽密度和施氮量对水稻叶面积指数、冠层平均叶倾角和株高有显著影响[19]。综上所述,不同地区水稻的最佳施氮量并不相同,并且施氮量影响水稻的抗逆性和产量,而合理密植亦能提高水稻产量,但施氮量与密度合理搭配对提高产量都是必不可少的。在本研究中,水稻产量随着密度的增加而增加,说明在本研究区域可以适当增加移栽密度。氮肥用量和移栽密度的增加均会提高早稻和晚稻的单位有效穗数,且呈显著的正相关关

系,合理氮肥用量可以减少无效分蘖的发生、优化群体结构,并能发挥品种的增产潜力,有利于水稻后期养分的吸收,而二者的交互作用不显著,这与周江明等[11]的研究结果相同。氮肥用量和移栽密度对水稻单位有效穗数的影响均达到了显著水平,说明氮肥用量和移栽密度对水稻产量的影响主要是通过增加单位有效穗数。在本试验中,早稻和晚稻均以N180处理的产量最高(图1a),密度则以D39的产量最高(图1b)。然而增加密度对产量仍有增加趋势,而在高施氮量下(N225)无益于产量的增加,因此在密植的情况下要充分考虑水稻对氮肥的需求情况。

3.2 施氮水平和移栽密度与氮素利用效率的关系

提高氮肥利用率是实现水稻高产高效的主要研究方向之一。张福锁等[21]研究显示,我国水稻的平均氮肥吸收率只有26.1%。诸多研究表明,施氮量增加,水稻氮素积累总量增加,而氮素的生产效率却下降[15]。赵庆雷等[22]的研究结果显示,在当前农民习惯氮肥施用水平上减施30%,可有效抑制无效分蘖,提高氮肥利用率,且不影响水稻产量。加强氮肥运筹模式能够提高氮肥利用效率[23-26]。在本研究中,早稻和晚稻的氮素吸收率最高的分别为N180D39和N135D39处理组合,分别为42.4%和50.8%。但对于晚稻而言,虽然施氮水平在135 kg/hm^{2}时,其各密度水平都具有较高的氮素吸收率,范围为42.8%～50.8%,这与晚稻季温度较高,有利于作物养分吸收有关,但产量最高时(N180D39)的氮素吸收率为47.5%,与N135D39处理组合无显著性差异。施氮增加了水稻对氮素的吸收,从图2可以看出,水稻地上部养分吸收量随着施氮量的增加而增加。在相同氮水平下,密植增加了单位穗数,提高了作物生物质量从而提高氮素的积累总量,增加了氮肥吸收量,减少氮素损失,以N225D39处理组合的氮素累积量最大,早稻和晚稻分别为173.3和180.5 kg/hm^2,与N180处理相比分别提高了7.8%和9.0%,但过高的施氮量使得氮肥吸收利用率并没有进一步提高,相反对产量的增加造成了一定的影响。而N225与N180相比,D39密度处理下具有较高的氮吸收量,但产量却未增加,相反还有所降低,致使氮素偏生产力、农学效率、生理利用率和内在养分效率降低。与N135和N180相比,N225处理降低了氮素收获指数,早稻和晚稻最低的分别为0.69和0.68,其叶片和茎鞘中有较高的氮素残留(图2)。施氮增加了水稻氮素累积,但过量的氮肥促使水稻营养生长、贪青晚熟,过多的氮素在茎鞘和叶片中积累,这部分没有转移到子粒中去的养分,如果不加以利用就会对环境造成一定危害。N180处理在本研究中具有最高的氮素农学效率,但是仍低于最佳养分管理系统下25 kg/kg的农学效率[27]。从试验结果得出,施氮量在225 kg/hm^{2}时的氮素内在养分效率和氮素生理利用率都是最低的,早稻平均为56.1和31.5 kg/kg,晚稻平均为60.2和34.5 kg/kg。Buresh等[28]在对8000多个水稻观测数据的研究结果得出,平衡的内在养分效率为68.5 kg/kg,而在本研究中N180处理与其较为接近,早稻和晚稻的平均值分别为62.9和65.5 kg/kg,虽然N135处理有较高的内在养分效率,但其产量则成为了主要限制因子。

3.3 氮肥用量和密度的协同优化

移栽密度和氮肥施用量对水稻的群体动态和产量构成具有显著的影响[29],同时影响水稻的叶面积指数、净光合速率及叶绿素含量等[30],进而影响水稻产量。在本研究中,早稻N180D39处理组合具有最高的产量、氮素吸收率和农学效率,对于晚稻而言,N180D39处理组合的氮素吸收率(47.5%)略低于N135D39处理组合(50.8%)且无显著差异,但前者具有较高的产量,增加了5.3%。在水稻栽培中不能一味地追求高氮素吸收率,同时要考虑产量及经济效益等因素。施氮有助于提高产量和养分吸收,增加移栽密度通过提高有效分蘖数而提高产量,但也增加了叶片和茎鞘中的氮累积量,当施氮量达到一定水平时(本试验条件下为180 kg/hm^2),虽然能够继续促进作物对氮素的吸收,但并不利于氮素向子粒中转移。因此,协调施氮量和移栽密度是实现高产及高氮肥利用率的关键。统计分析结果表明,本研究设计中N180D39组合产量最高,并具有较高的氮素农学效率、氮素吸收率、氮素内在养分效率等,因此是适宜当地的施氮量和移栽密度。但在合理的氮肥用量下使用更高的移栽密度(大于39×10^4 hole/hm^2)是否能够进一步增加本研究区域的水稻产量还有待进一步研究。

参考文献:

[1] Ju X T, Xing G X, Chen X P *et al*. Reducing environmental risk by improving N management in intensive Chinese agricultural systems[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2009, 106(9): 3041-3046.

[2] Le C, Zha Y, Li Y *et al*. Eutrophication of lake waters in China: cost, causes, and control[J]. Environmental Management, 2010,

45(4): 662-668.

[3] Zheng X H, Han S H, Huang Y *et al*. Re-quantifying the emission factors based on field measurements and estimating the direct N_2O emission from Chinese croplands [J]. Global Biogeochemical Cycles, 2004, 18: 1-19.

[4] 王德建, 林静慧, 孙瑞娟, 等. 太湖地区稻麦高产的氮肥适宜用量及其对地下水的影响[J]. 土壤学报, 2003, 40(3): 426-432.
Wang D J, Lin J H, Sun R J *et al*. Optimum nitrogen rate for a high productive rice-wheat system and its impact on the groundwater in the Taihu Lake area[J]. Acta Pedologica Sinica, 2003, 40(3): 426-432.

[5] 俞映倞, 薛利红, 杨林章. 太湖地区稻田不同氮肥管理模式下氨挥发特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(8): 1682-1689.
Yu Y L, Xue L H, Yang L Z. Ammonia volatilization from paddy fields under different nitrogen schemes in Tai Lake region[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2013, 32(8): 1682-1689.

[6] 晏娟, 尹斌, 张绍林, 等. 不同施氮量对水稻氮素吸收与分配的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 835-839.
Yan J, Yin B, Zhang S L *et al*. Effect of nitrogen application rate on nitrogen uptake and distribution in rice[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2008, 14(5): 835-839.

[7] 贺帆, 黄见良, 崔克辉, 等. 实时实地氮肥管理对不同杂交水稻氮肥利用率的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(2): 470-479.
He F, Huang J L, Cui K H *et al*. Effect of real-time and site-specific nitrogen management on various hybrid rice[J]. Scientia Agricultura Sinica 2008, 41(2): 470-479.

[8] 易琼, 赵士诚, 张秀芝, 等. 实时实地氮素管理对水稻产量和氮素吸收利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(4): 777-785.
Yi Q, Zhao S C, Zhang X Z *et al*. Yield and nitrogen use efficiency as influenced by real time and site specific nitrogen management in two rice cultivars[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2012, 18(4): 777-785.

[9] 汪秀志, 钱永德, 吕艳东, 等. 施氮和密度对寒地水稻分蘖状况及产量的影响[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2011, 37(1): 69-76.
Wang X Z, Qian Y D, Lü Y D *et al*. Effects of N-fertilizer application and density on tiller and yield of rice in cold area[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2011, 37(1): 69-76.

[10] 石扬娟, 黄艳玲, 申广勒, 等. 氮肥用量和栽插密度对水稻茎秆力学特性的影响研究[J]. 中国农学通报, 2008, 24(7): 101-106.
Shi Y J, Huang Y L, Shen G L *et al*. Effect of N-application rate and planting density on mechanic characteristics of rice culms [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2008, 24(7): 101-106.

[11] 周江明, 赵琳, 董越勇, 等. 氮肥和栽植密度对水稻产量及氮肥利用率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(2): 274-281.
Zhou J M, Zhao L, Dong Y Y *et al*. Nitrogen and transplanting density interactions on the rice yield and N use rate[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2010, 16(2): 274-281.

[12] 王淳, 周卫, 李祖章, 等. 不同施氮量下双季稻连作体系土壤氨挥发损失研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(2): 349-358.
Wang C, Zhou W, Li Z Z *et al*. Effects of different nitrogen application rates on ammonia volatilization from paddy fields under double-harvest rice system [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 349-358.

[13] 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.
Li H L, Zhang W F, Zhang F S *et al*. Chemical fertilizer use and efficiency change of main grain crops in China [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1136-1143.

[14] 杨梢娜, 俞巧钢, 叶静, 等. 施氮水平对杂交晚粳"浙优 12"产量及氮素利用效率的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2010, 16(5): 1120-1125.
Yang S N, Yu Q G, Ye J *et al*. Effects of nitrogen fertilization on yield and nitrogen use efficiency of hybrid rice [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2010, 16(5): 1120-1125.

[15] 江立庚, 曹卫星, 甘秀芹, 等. 不同施氮水平对南方早稻氮素吸收利用及其产量和品质的影响[J]. 中国农业科学, 2004, 37(4): 490-496.
Jiang L G, Cao W X, Gang X Q *et al*. Nitrogen uptake and utilization under different nitrogen management and influence on grain yield and quality in rice[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2004, 37(4): 490-496.

[16] 谢黎虹, 叶定池, 胡培松, 等. 氮肥用量和施用方式对水稻"甬优 6 号"产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 789-794.
Xie L H, Ye D C, Hu P S *et al*. Effects of nitrogen fertilizer application rate and management strategy on grain yield and quality of rice variety "Yongyou 6"[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 789-794.

[17] 李国辉, 钟旭华, 田卡, 等. 施氮对水稻茎秆抗倒伏能力的影响及其形态和力学机理[J]. 中国农业科学, 2013, 46(7): 1323-1334.
Li G H, Zhong X H, Tian K *et al*. Effect of nitrogen application on stem lodging resistance of rice and its morphological and mechanical mechanisms[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2013, 46(7): 1323-1334.

[18] 汤亮, 朱相成, 曹梦莹, 等. 水稻冠层光截获、光能利用与产量的关系[J]. 应用生态学报, 2012, 23(5): 1269-1276.
Tang L, Zhu X C, Cao M Y *et al*. Relationships of rice canopy PAR interception and light use efficiency to grain yield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(5): 1269-1276.

[19] 朱相成, 汤亮, 张文宇, 等. 不同品种和栽培条件下水稻冠层光合有效辐射传输特征[J]. 中国农业科学, 2012, 45

(1): 34-43.
Zhu X C, Tang L, Zhang W Y *et al*. Transfer characteristics of canopy photo-synthetically active radiation in different rice cultivars under different cultural conditions [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2012, 45(1): 34-43.

[20] 李旭毅, 孙永健, 程洪彪, 等. 两种生态条件下氮素调控对不同栽培方式水稻干物质积累和产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 773-781.
Li X Y, Sun Y J, Cheng H B *et al*. Effects of nitrogen regulation on dry matter accumulation and grain yield of rice under different cultivation models and two kinds of ecological conditions[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 773-781.

[21] 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.
Zhang F S, Wang J Q, Zhang W F *et al*. Nutrient use efficiency of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.

[22] 赵庆雷, 吴修, 高洁, 等. 氮肥不同用量对南四湖区水稻产量及氮素利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2013, 45(7): 78-82.
Zhao Q L, Wu X, Gao J *et al*. Influence of different nitrogen application amounts on rice yield and nitrogen use efficiency in Nansi Lake area[J]. Shandong Agricultural Sciences, 2013, 45(7): 78-82.

[23] 吴文革, 张四海, 赵决建, 等. 氮肥运筹模式对双季稻北缘水稻氮素吸收利用及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2007, 13(5): 757-764.
Wu W G, Zhang S H, Zhao J J *et al*. Nitrogen uptake, utilization and rice yield in the north rimland of double-cropping rice region as affected by different nitrogen management strategies [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2007, 13(5): 757-764.

[24] 仇少君, 赵士诚, 苗建国, 等. 氮素运筹对两个晚稻品种产量及其主要构成因素的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2012, 18(6): 1326-1335.
Qiu S J, Zhao S C, Miao J G *et al*. Effect of different N management practices on yield and its main formed factors in two later-season rice genotypes [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2012, 18(6): 1326-1335.

[25] 张秀芝, 易琼, 朱平, 等. 氮肥运筹对水稻农学效应和氮素利用的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 782-788.
Zhang X Z, Yi Q, Zhu P *et al*. Agronomic responses to nitrogen application and nitrogen utilization in rice fields [J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2011, 17(4): 782-788.

[26] 李向辉, 鲁艳红, 廖育林, 等. 氮肥施用量对晚稻产量和氮肥利用效率的影响[J]. 湖南农业科学, 2010, 15: 52-54.
Li X H, Lu Y H, Liao Y L *et al*. Effects of nitrogen application rate on yield and nitrogen use efficiency of late rice[J]. Hunan Agricultural Sciences, 2010, 15: 52-54.

[27] Krauss A, Isherwood K, Heffer P. Fertilizer best management practices: General principles, strategy for their adoption and voluntary initiatives vs regulations[D]. Paris, France: International Fertilizer Industry Association, 2007. 1-28.

[28] Buresh R J, Pampolino M G, Witt C. Field-specific potassium and phosphorus balances and fertilizer requirement for irrigated rice-based cropping systems[J]. Plant and Soil, 2010, 335: 35-54.

[29] 程建平, 张再君, 赵锋, 等. 机械插秧密度和氮肥运筹对两优1528群体动态和产量的影响[J]. 杂交水稻, 2011, 26(6): 69-73.
Cheng J P, Zhang Z J, Zhao F *et al*. Effects of planting density and nitrogen fertilizer management on population formation and yield of Liangyou 1528 under mechanized transplanting conditions [J]. Hybrid Rice, 2011, 26(6): 69-73.

[30] 杨艳君, 王宏富, 郭平毅, 等. 施肥和密度对张杂谷5号光合特征及产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2013, 19(3): 566-576.
Yang Y J, Wang H F, Guo P Y *et al*. Effects of fertilization and density on photosynthetic characteristics and yield of hybrid foxtail millet[J]. Plant Nutrient and Fertilizer Science, 2013, 19(3): 566-576.