

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.005

陈梅, 王远, 陈贵, 等. 施氮水平对超高产杂交稻氮平衡指数及产量的影响. 土壤, 2021, 53(4): 700–706.

施氮水平对超高产杂交稻氮平衡指数及产量的影响^①

陈梅^{1,2,3}, 王远¹, 陈贵⁴, 纪荣婷³, 施卫明^{1*}

(1 土壤与农业可持续发展国家重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 210008; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 生态环境部南京环境科学研究所, 南京 210042, 4 嘉兴市农业科学研究院, 浙江嘉兴 314016)

摘要: 采用两个超高产粳杂交水稻甬优 12、冬制 14 为材料, 以常规粳稻秀水 134 为对照, 设置田间小区试验, 比较研究超高产杂交稻甬优 12、冬制 14 氮平衡指数(NBI)及产量对不同施氮量(0、200、300、400 kg/hm²)的响应, 评估超高产杂交水稻叶片 NBI 与叶片氮含量、地上部氮素累积、产量之间的关系。结果表明, 在相同施氮量下, 超高产杂交稻甬优 12、冬制 14 的产量高于对照品种秀水 134, 产量优势主要体现在穗大粒多, 在施氮量 300 kg/hm²时产量最高, 分别为 13.48 t/hm²和 11.51 t/hm², 而常规粳稻在施氮量 200 kg/hm²时产量最高, 为 9.49 t/hm²。氮肥的施用提高了甬优 12、冬制 14 的叶绿素指数、NBI, 降低了类黄酮指数, 施肥量越高 NBI 提高的幅度越小。在齐穗期, 超高产杂交稻的 NBI 显著高于对照品种。在水稻分蘖期和拔节期, 甬优 12、冬制 14 的 NBI 与叶片氮含量、地上部氮素累积、产量显著正相关, NBI 可以用于超高产杂交水稻快速氮素营养诊断和产量预测。

关键词: 施氮量; 氮平衡指数; 产量; 超高产杂交稻

中图分类号: S511.01 文献标志码: A

Effects of Nitrogen Fertilizer Levels on Nitrogen Balance Index and Yield of Hybrid Super Rice

CHEN Mei^{1,2,3}, WANG Yuan¹, CHEN Gui⁴, JI Rongting³, SHI Weiming^{1*}

(1 State key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Nanjing Institute of Environmental Sciences, Ministry of Ecology and Environment, Nanjing 210042, China; 4 Jiaxing Academy of Agricultural Science, Jiaxing, Zhejiang 314016, China)

Abstract: A field experiment was conducted to study the influence of nitrogen fertilization on nitrogen balance index (NBI) and yield of hybrid super rice and evaluate NBI for the assessment of rice nitrogen status and yield. Rice cultivars included two hybrid super rice cultivars (Yongyou12, Dongzhi14) and one common variety (Xiushui 134), nitrogen fertilizer was applied at four levels (0, 200, 300 and 400 kg/hm²). The results showed that the yields of Yongyou 12 and Dongzhi 14 were higher than that of Xiushui 134 at the same amount of nitrogen application, and reached the peak (13.48 t/hm² and 11.51 t/hm², respectively) at N 300 kg/hm², while the yield of common rice reached the peak of 9.49 t/hm² at N 200 kg/hm². Nitrogen fertilizer increased Chl index and NBI but decreased Flav index of Yongyou12 and Dongzhi14. At the heading stage, values of Chl index and NBI of Yongyou12 and Dongzhi14 were significantly higher than that of Xiushui 134. At the tillering and jointing stages, NBI was significantly correlated with leaf nitrogen concentration, rice N accumulation in above-ground and yield. These results demonstrate NBI could be used for rapid nitrogen status diagnosis and yield prediction of rice.

Key words: Nitrogen fertilizer level; Nitrogen balance index (NBI); Grain yield; Hybrid super rice

水稻是我国最主要的粮食作物之一, 由于我国人口众多, 耕地面积有限, 增加单位面积水稻产量是保障粮食安全的关键。水稻增产的方法主要有培育高产

水稻品种和增加肥料投入^[1]。1996 年, 我国启动“中国超级稻育种计划”, 采用理想株型塑造与杂种优势利用相结合的技术, 选育了一批超高产并兼顾品质与

①基金项目: 国家自然科学基金项目(31701994)、江苏省太湖水环境综合治理科研课题(TH2018305)和山东省重大科技创新工程项目(2019JZZY010701)资助。

* 通讯作者(wmshi@issas.ac.cn)

作者简介: 陈梅(1987—), 女, 江苏淮安人, 博士, 主要从事农业面源污染控制研究。E-mail: chenmei@nies.org

抗性的新型水稻品种,创造了多个高产纪录^[2]。截至2018年底,已认定了176个超级稻水稻品种,其中杂交稻占55%,产量高达12.0~16.0 t/hm²,全国超级稻累计推广应用14.8亿亩(15亩=1 hm²),年种植面积约占我国水稻种植面积的30%^[3]。

氮素是影响水稻生长发育和产量形成的重要元素,与水稻生理代谢、冠层光合特性等密切相关。合理施用氮肥能提高水稻叶绿素含量,增加氮素和光合同化物积累,促进水稻生长,增加稻谷产量,提高氮肥利用效率^[4]。超高产杂交水稻在产量方面有着明显的优势,其干物质累积和氮素累积量高于常规水稻^[5]。在田间种植时也伴随着更高的氮肥投入^[6-7],从而可能产生更高的环境风险^[8]。但目前关于超高产杂交水稻氮肥合理施用的研究还比较缺乏。

在实际生产中,农民常常根据水稻叶色判断氮营养状况并进行追肥,研究中也大量采用稻叶SPAD值(相对叶绿素含量)诊断水稻氮素营养状况^[9-10]。然而,水稻叶色变化或SPAD变化对氮肥的响应有一定的延迟效应^[11]。叶片中多酚类物质类黄酮是植物重要次生代谢的产物,对植物胁迫十分敏感,与叶绿素相反,其含量在缺氮时会增加,对氮含量的响应更为灵敏^[12]。植物多酚-叶绿素测量仪是一种基于荧光光谱技术的新型便携式叶片测量仪,通过双重激发的叶绿素近红外荧光、紫外光实现叶绿素、类黄酮的实时、无损测量^[13]。氮平衡指数(NBI)是植物多酚-叶绿素测量仪测量的叶绿素指数和类黄酮指数的比值,当未发生氮肥胁迫时,作物生长健康,合成叶绿素较多,产生的类黄酮较少,NBI较高;当氮肥缺乏,作物合成叶绿素较少,产生的类黄酮较多,NBI较低。相比单一的叶绿素指标,NBI已证实能够更精确、更灵敏地反映玉米、小麦、大豆、甜瓜等作物的氮素营养状况^[14-16]。然而目前基于NBI快速无损评估新培育的超高产杂交水稻材料的生长状况和氮素营养状况的研究十分缺乏。

与常规水稻相比,超高产杂交水稻叶片更厚、叶色更深、叶面积指数更大、叶片功能期较长^[2],那么,超高产杂交水稻NBI和产量对氮肥响应是否有别于常规水稻?能否采用NBI评估其生长状况和氮素营养状况?这些问题目前仍不明确。因此,本研究以超高产杂交稻为研究材料,研究超高产水稻叶片NBI和产量对氮肥的响应,评估超高产杂交水稻叶片NBI与叶片氮含量、地上部氮素累积、产量之间的关系,以期为基于NBI的超高产水稻种植的实时氮肥管理提供参考和借鉴。

1 材料与方 法

1.1 试验地概况

试验于2018年6—11月在江苏省宜兴市丁蜀镇涓渎村(31°16′17.29″N, 119°55′23.92″E)开展,试验田处于长三角平原,太湖之滨,属于北亚热带湿润季风气候,年平均温度16℃,年平均日照时数1904 h,年降雨量1100~1400 mm,其中60%~70%发生在夏季6—10月。试验小区0~20 cm耕层土壤含全氮1.19 g/kg、有机质22.7 g/kg、碱解氮148.9 mg/kg、有效磷27.4 mg/kg、速效钾40 mg/kg, pH 5.45。

1.2 试验材料与试验设计

供试超高产杂交水稻材料为甬优12、冬制14,对常规水稻为太湖流域主栽的粳稻秀水134。甬优12是由宁波市农业科学研究院选育的超级杂交稻品种,冬制14是由嘉兴市农业科学研究院新选育的超级杂交稻材料。试验为裂区设计,氮水平为主处理,水稻品种为副处理,3次重复,各小区面积均为20 m²(4 m×5 m)。试验设4个氮肥水平,分别为N0、200、300、400 kg/hm²,简写为N0、N200、N300和N400。氮肥为尿素,以基肥、分蘖肥、穗肥3次施入,3次施肥比例为3:3:4,施用时间分别为2018年6月23日、7月7日和8月1日。基肥于水稻移栽前一天施用,施用方式为与耕层土壤混合施用,分蘖肥和穗肥则以撒施方式施入。磷肥为过磷酸钙,施用量为P₂O₅ 36 kg/hm²;钾肥为氯化钾,施用量为K₂O 90 kg/hm²;磷钾肥均以基肥形式于移栽前与耕层土壤充分混合一次性施入。水稻病虫害防治按试验当地病虫预报与周边稻田同期进行。

1.3 样品采集与测定

水稻关键生育期(分蘖期、拔节期、齐穗期)在每个小区中间选择生长均匀一致的水稻植株,用植物多酚-叶绿素测量仪(Dualex Scientific+, Force-A, France)测定各处理植株叶片的叶绿素指数、类黄酮指数、氮平衡指数(NBI)。每个小区测定3穴,顶一、顶二、顶三完全展开叶,每张叶片测定叶片上部1/3、中部和下部1/3,3点,取平均值作为该小区的代表值。

将各生育期的水稻植株样品磨碎,H₂SO₄-H₂O₂消煮后,用凯氏定氮法测定稻叶含氮量。

考种与计产:成熟期各小区计数具有代表性稻株30穴的有效穗数,计算平均值。随机选取10株测定穗粒数、结实率、千粒重。各小区去边行后全部脱粒后晒干、称重,测定含水率后按照标准含水率计算稻谷产量。

1.4 数据分析

试验数据通过 Excel 2019 进行统计,相关性分析运用 SPSS 18.0 软件进行,不同处理间差异性采用单因素 ANOVA 进行方差分析,并用 Duncan 法进行多重检验比较。NBI 与产量的拟合关系分析运用 Matlab 软件进行。图形采用 Origin 8.5 绘制。

2 结果与分析

2.1 超高产杂交水稻叶片 NBI 对施氮量的响应

NBI 是叶绿素指数与类黄酮指数的比值。由表 1 可见,与不施氮相比,氮肥的施用显著($P<0.05$)提高了水稻叶片叶绿素指数,显著降低了叶片类黄酮指数。随着施氮量的增加,超高产杂交水稻甬优 12 和冬制 14 的叶绿素指数在各生育期整体上呈现增加的趋势,类黄酮指数呈现降低的趋势,施氮量越高变化幅度越小。超高产杂交水稻甬优 12 和冬制 14 在不同生育期的表现则不同,甬优 12 与常规水稻秀水 134 相似,

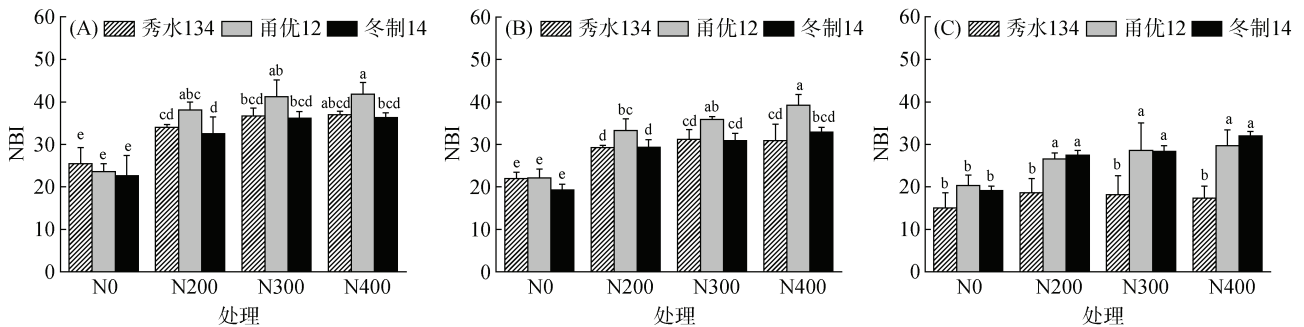
其叶片叶绿素指数随着生育期的增加呈现下降的趋势,分蘖期叶片叶绿素指数最高,齐穗期最低,而冬制 14 在拔节期的叶绿素指数最低。与相同氮水平下的常规粳稻秀水 134 相比,超高产杂交水稻甬优 12 和冬制 14 在分蘖期的叶片叶绿素指数和类黄酮指数没有显著差异,拔节期的平均叶绿素指数分别比常规粳稻高 18%、7%,而齐穗期的叶绿素指数分别比常规粳稻高 49%、79%,在 N400 处理下差异最大,表明在生育后期超高产杂交水稻冠层叶片光合作用强度高于常规水稻。

由图 1 可见,氮肥的施用显著提高了超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 的 NBI,随着施氮量的增加,各生育期 NBI 整体上呈现增高的趋势。与相同氮水平下的常规粳稻相比,甬优 12 和冬制 14 的 NBI 在分蘖期无显著差异,拔节期甬优 12 的 NBI 高于常规粳稻 14%,齐穗期甬优 12 和冬制 14 的 NBI 分别高于常规粳稻 51%、53%。

表 1 不同施氮量下水稻叶片叶绿素指数和类黄酮指数的变化
Table 1 Values of Chl index and Flav index of rice leaves under different N supply levels

水稻品种	施氮量处理	分蘖期		拔节期		齐穗期	
		叶绿素指数(Chl)	类黄酮指数(Flav)	叶绿素指数(Chl)	类黄酮指数(Flav)	叶绿素指数(Chl)	类黄酮指数(Flav)
常规粳稻秀水 134	N0	34.61 ± 2.95 c	1.38 ± 0.10 a	29.97 ± 1.53 de	1.39 ± 0.10 a	22.41 ± 4.17 f	1.45 ± 0.18 bcde
	N200	40.48 ± 0.69 b	1.20 ± 0.03 b	33.04 ± 2.14 cd	1.17 ± 0.05 de	24.76 ± 2.45 ef	1.31 ± 0.12 cdef
	N300	44.24 ± 1.20 ab	1.22 ± 0.03 b	36.72 ± 2.31 bc	1.19 ± 0.02 cde	22.76 ± 6.9 f	1.26 ± 0.09 ef
	N400	43.76 ± 1.72 ab	1.20 ± 0.03 b	34.32 ± 4.65 cd	1.13 ± 0.01 e	23.01 ± 5.41 f	1.28 ± 0.08 def
甬优 12	N0	34.36 ± 2.88 c	1.49 ± 0.05 a	32.19 ± 1.23 d	1.47 ± 0.08 a	30.35 ± 3.61 def	1.48 ± 0.10 bcd
	N200	44.75 ± 1.41 ab	1.19 ± 0.03 b	40.03 ± 2.86 b	1.21 ± 0.01 bcde	34.7 ± 4.92 cd	1.31 ± 0.17 cdef
	N300	48.50 ± 4.25 a	1.20 ± 0.02 b	41.27 ± 2.54 ab	1.17 ± 0.07 de	35.16 ± 7.82 cd	1.23 ± 0.01 f
	N400	48.68 ± 4.16 a	1.19 ± 0.04 b	45.25 ± 1.92 a	1.16 ± 0.01 de	38.10 ± 6.01 bcd	1.28 ± 0.14 def
冬制 14	N0	31.43 ± 4.39 c	1.43 ± 0.10 a	27.53 ± 2.02 e	1.44 ± 0.06 a	32.24 ± 0.83 de	1.70 ± 0.13 a
	N200	39.77 ± 1.57 b	1.25 ± 0.11 b	37.18 ± 1.93 bc	1.27 ± 0.04 bc	41.6 ± 1.43 abc	1.53 ± 0.08 ab
	N300	44.25 ± 2.90 ab	1.25 ± 0.05 b	39.53 ± 2.34 b	1.29 ± 0.04 b	44.81 ± 0.14 ab	1.60 ± 0.07 ab
	N400	42.95 ± 0.86 ab	1.20 ± 0.04 b	40.46 ± 1.65 b	1.24 ± 0.02 bcd	47.63 ± 1.12 a	1.50 ± 0.01 abc

注:表中同列小写字母不同表示处理间差异显著($P<0.05$),下同。



(A. 分蘖期; B. 拔节期; C. 齐穗期; 图中小写字母不同表示处理间差异达 $P<0.05$ 显著水平)

图 1 不同施氮量下水稻叶片 NBI 的变化

Fig. 1 NBI values of rice leaves under different N supply levels

2.2 超高产杂交水稻的产量及其构成对氮肥的响应

由图 2 可见, 在 N200 处理下, 超高产杂交稻甬优 12、冬制 14 的产量分别为 12.84 t/hm² 和 10.47 t/hm², 比秀水 134 高 35%、10%。在 N300 处理下, 甬优 12、冬制 14 的产量分别为 13.48 t/hm² 和 11.51 t/hm², 比对照品种秀水 134 高 46%、24%; 与 N200 处理相比, 甬优 12、冬制 14 的产量持续增加, 而秀水 134 的产量下降。在 N400 处理下, 甬优 12、冬制 14 的产量分别为 12.53 t/hm² 和 10.20 t/hm², 比秀水 134 高 38%、12%, 与 N300 处理相比, 超高产杂交稻材料与常规水稻均出现下降趋势。这表明, 超高产杂交稻甬优 12、冬制 14 在 3 个施氮水平下都呈现显著高产的特征, 产量优势明显。而最佳施氮量则有所不同, 对照品种产量在 N200 处理达到最高, 而超高产杂交稻的产量在 N300 处理达到最高, 继续增加氮肥投入量时产量呈下降趋势。

从产量构成因子对施肥水平的响应来看(表 2), 相对于不施氮, 氮肥的施用可以提高水稻单位面积穗数、每穗粒数, 但是结实率则随施氮的增加呈显著降低的趋势。当施氮量增加到 400 kg/hm², 单位面积穗

数、每穗粒数、结实率相较于 N300 处理呈下降趋势。在各施氮量下, 超高产杂交稻的每穗粒数显著高于对照品种, 变化趋势与产量一致; 超高产水稻甬优 12、冬制 14 的穗粒数平均比对照品种高 99%、25%, 表明超高产水稻甬优 12、冬制 14 的产量优势主要源于穗大粒多。不同水稻品种的千粒重随施氮量的变化则不同, 甬优 12 的千粒重随着施氮量的增加而增加, 而冬制 14 的千粒重随着施氮量的增加呈现降低趋势。

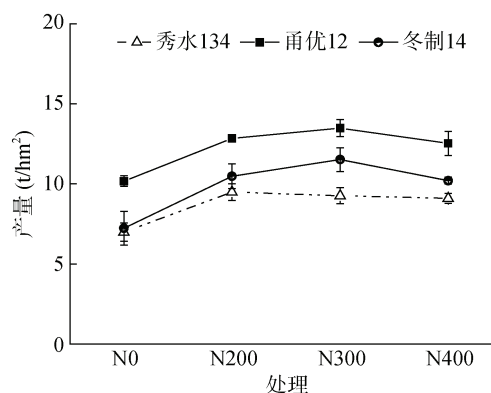


图 2 不同水稻品种在不同施氮量下的产量特征
Fig. 2 Yields of different rice cultivars under different N supply levels

表 2 不同水稻品种在不同施氮量下的产量构成特性
Table 2 Yield composition traits of different rice cultivars under different N supply levels

水稻品种	施氮量处理	单位面积穗数	每穗粒数	结实率(%)	千粒重(g)
常规粳稻秀水 134	N0	189 ± 30 cd	146 ± 18 e	92.67 ± 1.04 a	27.79 ± 1.09 ab
	N200	248 ± 17 b	186 ± 14 cde	86.36 ± 2.05 bc	28.97 ± 1.37 a
	N300	319 ± 21 a	156 ± 9 de	76.92 ± 1.66 de	28.65 ± 2.41 a
	N400	301 ± 24 a	153 ± 14 de	78.11 ± 2.01 de	28.21 ± 1.52 a
甬优 12	N0	138 ± 4 e	311 ± 4 ab	91.83 ± 1.44 ab	24.61 ± 0.72 b
	N200	174 ± 6 cde	318 ± 25 ab	83.44 ± 5.50 cd	26.14 ± 2.37 ab
	N300	233 ± 48 b	347 ± 51 a	73.00 ± 4.84 ef	26.46 ± 1.63 ab
	N400	212 ± 21 bc	294 ± 6 b	69.26 ± 3.53 f	28.92 ± 3.37 a
冬制 14	N0	149 ± 16 de	185 ± 9 cde	83.27 ± 1.66 cd	27.58 ± 1.05 ab
	N200	188 ± 15 cd	206 ± 39 c	83.30 ± 2.25 cd	27.42 ± 0.74 ab
	N300	244 ± 10 b	214 ± 11 c	82.23 ± 6.59 cd	27.10 ± 1.16 ab
	N400	240 ± 21 b	191 ± 22 cd	79.75 ± 3.09 d	26.22 ± 0.22 ab

2.3 超高产杂交水稻叶片氮含量与地上部氮素累积及 NBI 的关系

从水稻不同生育阶段叶片氮含量与叶绿素指数、类黄酮指数、NBI 的关系来看(表 3), 在分蘖期和拔节期, 超高产杂交稻甬优 12、冬制 14、常规粳稻秀水 134 的叶片氮含量与叶绿素指数、NBI 均存在显著正相关, 与类黄酮指数存在显著负相关, 且与 NBI 的相关系数高于与叶绿素指数的相关系数。不同品种间的相关系数表现则不同, 超级杂交稻甬优 12、冬制

14 的叶片氮含量与叶绿素指数、NBI 指标之间关系的紧密程度整体上高于常规粳稻秀水 134, 尤其是在齐穗阶段。NBI 可以作为衡量超级杂交稻甬优 12、冬制 14 叶片氮含量的评价指标。

地上部氮素累积既反映了水稻氮素营养状况, 又反映了水稻生长状况。对不同生育期水稻地上部氮累积量与对应的 NBI 进行相关分析(表 4), 结果表明, 常规粳稻秀水 134 在分蘖期和拔节期的地上部氮素累积与 NBI 呈显著正相关($r = 0.726^{**}$ 、 0.872^{**}), 在

表 3 水稻不同生育期叶片氮含量与叶绿素指数、类黄酮指数、NBI 的相关性
Table 3 Correlation coefficients between N concentration in rice leaves with Chl index, Flav index and NBI

生长阶段	水稻品种	叶绿素指数(Chl)	类黄酮指数(Flav)	氮平衡指数(NBI)
分蘖期	秀水 134	0.842**	-0.933**	0.912**
	甬优 12	0.872**	-0.914**	0.925**
	冬制 14	0.955**	-0.883**	0.975**
拔节期	秀水 134	0.678*	-0.909**	0.923**
	甬优 12	0.919**	-0.898**	0.935**
	冬制 14	0.951**	-0.873**	0.967**
齐穗期	秀水 134	0.04	-0.605*	0.323
	甬优 12	0.338	-0.640*	0.612*
	冬制 14	0.973**	-0.644*	0.954**

注: **表示相关性达 $P < 0.01$ 显著水平, *表示相关性达 $P < 0.05$ 显著水平, 样本数 $n = 12$, 下表同。

齐穗期的相关系数较低。甬优 12 与常规粳稻相似, 也是在分蘖期和拔节期的地上部氮素累积与 NBI 呈显著正相关($r = 0.931^{**}$ 、 0.922^{**}), 而冬制 14 在 3 个生育期的地上部氮素累积与 NBI 均呈显著正相关($r = 0.799^{**}$ 、 0.901^{**} 、 0.943^{**})。在分蘖期和拔节期, 甬优 12 和冬制 14 的相关系数高于常规粳稻。

表 4 水稻不同生育期地上部氮素累积与 NBI 的相关性
Table 4 Correlation coefficients between N accumulation in rice above-ground and NBI

生长阶段	水稻品种	氮平衡指数(NBI)
分蘖期	秀水 134	0.726**
	甬优 12	0.931**
	冬制 14	0.799**
拔节期	秀水 134	0.872**
	甬优 12	0.922**
	冬制 14	0.901**
齐穗期	秀水 134	0.557
	甬优 12	0.398
	冬制 14	0.943**

2.4 超高产杂交水稻产量与 NBI 的关系

从不同水稻品种的产量与 NBI 的关系来看(表 5), 不同品种间、不同生育阶段的 NBI 与产量的相关系数表现不同, 常规粳稻秀水 134 的产量仅与其分蘖

期、拔节期 NBI 显著正相关($r = 0.901^{**}$ 、 0.795^{**}); 超高产杂交稻甬优 12 的产量与分蘖期、拔节期 NBI 极显著正相关($r = 0.908^{**}$ 、 0.847^{**}), 与齐穗期 NBI 显著正相关($r = 0.652^{*}$); 冬制 14 的产量与分蘖期、拔节期、齐穗期 NBI 均极显著正相关($r = 0.902^{**}$ 、 0.846^{**} 、 0.764^{**})。

表 5 水稻产量与 NBI 的相关性
Table 5 Correlation coefficients between yield and NBI

水稻品种	分蘖期 NBI	拔节期 NBI	齐穗期 NBI
秀水 134	0.901**	0.795**	0.419
甬优 12	0.908**	0.847**	0.652*
冬制 14	0.902**	0.846**	0.764**

根据不同生长阶段水稻叶片 NBI 与产量的定量分析结果(表 6), 超高产杂交稻甬优 12、冬制 14, 常规稻秀水 134 的分蘖期和拔节期的 NBI 与产量以二次方程拟合效果较好, 决定系数 R^2 达到 0.81 ~ 0.85, 相对均方根误差在 4.91% ~ 8.32%。根据拟合方程, 甬优 12、冬制 14、常规稻秀水 134 在分蘖期的 NBI 值分别为 51.37、50.32、48.50 时达到产量峰值, 在拔节期的 NBI 分别为 38.03、29.89、30.82 时达到产量峰值, 超过此阈值时会出现产量下降, 甬优 12 的 NBI 阈值高于常规粳稻。

表 6 不同水稻品种叶片 NBI 与产量的拟合关系
Table 6 Determination coefficient (R^2) and RRMSE of regression models between yield and NBI

水稻品种	分蘖期			拔节期		
	拟合方程	R^2	RRMSE(%)	拟合方程	R^2	RRMSE(%)
秀水 134	$y = -0.005 3x^2 + 0.514 1x - 2.452 9$	0.83	6.00	$y = -0.028 2x^2 + 1.738 0x - 17.423 0$	0.81	6.20
甬优 12	$y = -0.004 2x^2 + 0.431 5x + 2.386 4$	0.84	4.91	$y = -0.011 0x^2 + 0.836 6x - 2.799 6$	0.82	5.29
冬制 14	$y = -0.005 7x^2 + 0.573 7x - 2.465 7$	0.83	8.32	$y = -0.032 5x^2 + 1.942 8x - 18.120 0$	0.85	7.76

注: y 为水稻产量(t/hm^2), x 为叶片 NBI; RRMSE(%)为相对均方根误差。

3 讨论

优化水稻氮素管理对于协调高产与环境保护具有十分重要的意义。超高产杂交稻的自身品种优势和充足氮素供应是实现超高产的重要因素^[17]，然而产量并非随着施氮量增加而一直增加，在一定施氮范围内，水稻产量随施氮量的增加而提高，超过一定范围后产量和部分产量构成因素则下降^[18]。付景等^[7]发现超级稻品种两优培九(两系杂交籼稻)和淮稻 9 号(粳稻)在施氮量 0 ~ 360 kg/hm² 条件下产量随着施氮量的增加而增加，当施氮量达 360 kg/hm² 时，产量则明显下降。本研究中，超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 的产量对施氮量的响应也明显差别于常规粳稻，表现出显著的高产特征，在施氮量 300 kg/hm² 时产量最高，而常规粳稻在 200 kg/hm² 时产量最高，继续增加氮肥投入量时产量呈下降趋势，施氮量与产量呈单峰曲线。过量施肥导致超高产杂交水稻穗粒数减少，籽粒灌浆不足，结实率降低。相对较高的氮肥水平更利于超高产杂交水稻产量潜力的发挥，这与刘荣杰^[19]、付景等^[7]的研究结果一致。超高产杂交水稻的产量对氮肥响应的差异提示人们其氮肥施用要有别于常规水稻。

为了最大限度发挥产量潜力，达到高产攻关目标，超高产水稻种植中通常会伴随着更高的氮肥投入，纯氮施用量甚至高达 420 kg/hm²，是普通农户一季稻氮肥施用量的 2 倍左右^[6]。本试验中超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 在 N300 处理时的产量更高，提示农民在超高产水稻生产中无需将施氮量增加到 400 kg/hm²；而且，随着施氮量的增加，不仅增加了资源消耗，由此带来的活性氮排放量也将明显增加，显著加重了环境负面影响。因此，从维持高产目标同时兼顾协调高产和资源节约及环境保护的角度，300 kg/hm² 的氮肥用量是合适的。另一方面，与 N200 处理相比，N300 处理的施氮量增加了 100 kg/hm²，而水稻产量只提高了 1 t/hm² 左右；同时，施氮量从 200 kg/hm² 增加到 300 kg/hm² 时，活性氮排放量也将随之增加，因此，单纯从环境保护角度而言，与 N300 处理相比，N200 处理下氮肥用量可能是不以追求高产而是环境保护优先情景下的更佳用量。

水稻籽粒形成过程中需要大量的碳和氮元素来合成淀粉和蛋白质，其中碳水化合物主要来自顶三叶的光合作用^[5]。已有研究表明，超级稻品种松粳 9 号和松粳 15 叶片 SPAD 值随着施氮量的增加而呈逐步增加的趋势，施肥量越高增加的幅度越小^[20]。本研究表明，随着施氮量的增加，超高产杂交水稻甬优 12

和冬制 14 的叶绿素指数、NBI 呈现增高的趋势，类黄酮指数呈现降低的趋势，施肥量越高 NBI 增高的幅度越小。在齐穗期，随着水稻的成熟，叶片氮含量进一步降低，类黄酮指数增高，这可能是因为叶绿素指数、类黄酮指数、NBI 与叶龄有关，在老叶中的类黄酮含量较高^[21]。齐穗期超高产杂交水稻甬优 12 和冬制 14 的叶绿素指数、NBI 显著高于对照品种，表明其生育后期叶绿素分解速度较慢，叶片衰老更慢，光合功能期较长。由于叶绿素含量与水稻剑叶净光合速率呈正相关^[22]，超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 生育后期较高的光合作用，促进了碳水化合物累积，对其产量潜力的发挥产生积极的作用。

叶色是叶片氮状况的外在表现^[23-25]，利用光谱分析技术可以更快速评价作物的长势和氮素营养状况^[26]，李杰等^[27]利用基于 SPAD 值的水稻施氮叶值模型指导水稻施氮提高了产量及氮素利用率，Tremblay 等^[14]发现 NBI 与小麦产量显著相关，NBI 能够比 SPAD 更可靠地预测小麦产量。通过进一步分析 NBI 与超高产杂交水稻的氮素营养状况的关系发现，在分蘖期和拔节期，超高产杂交水稻的叶绿素指数、NBI 均与叶片氮含量显著正相关，类黄酮指数与叶片氮含量显著负相关，这与在小麦、卷心菜上的表现一致^[16,28]。在分蘖期和拔节期，NBI 与地上部氮素累积、水稻产量显著正相关，NBI 与产量呈现明显的二次方曲线关系。这表明，可以进一步将 NBI 应用于超高产杂交水稻快速无损氮素营养诊断和产量预测。但同时，NBI 受到水稻品种、生长阶段的影响，超级杂交水稻甬优 12 和冬制 14 的叶片特征与常规水稻秀水 134 存在差异。基于本试验所处的气候和土壤条件，甬优 12 要获得高于 12.0 t/hm² 产量，其分蘖期 NBI 需在 32.67 ~ 51.37、拔节期 NBI 需在 27.99 ~ 38.03 范围。冬制 14 的产量潜力低于甬优 12，其分蘖期 NBI 在 34.27 ~ 50.32、拔节期 NBI 在 26.32 ~ 29.89 范围时指示其产量可高于 10.5 t/hm²。而常规水稻秀水 134 要获得高于 9.0 t/hm² 产量，其分蘖期 NBI 需在 34.67 ~ 48.50、拔节期 NBI 需在 27.26 ~ 30.82 范围。因此在田间应用 NBI 来指导施肥时，需要根据不同的水稻品种以及不同的生育期来采用不同的阈值，有针对性地进行氮肥施用。由于本研究仅开展了 2 个超高产水稻材料的一年试验，产量预测模型还有待进一步的测试与检验。

4 结论

超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 的产量、NBI

对施氮量的响应明显差别于常规粳稻, 在施氮量 300 kg/hm² 时产量最大, 而 NBI 随施氮量的增加而增高。在水稻生长前期(分蘖期和拔节期), 超高产杂交水稻甬优 12、冬制 14 的 NBI 与叶片氮含量、地上部氮素累积、产量显著相关, 可以进一步将 NBI 应用于超高产杂交水稻快速无损氮素营养诊断和产量预测。

参考文献:

- [1] Godfray H C J, Beddington J R, Crute I R, et al. Food security: The challenge of feeding 9 billion people[J]. *Science*, 2010, 327(5967): 812–818.
- [2] Yuan L P. Progress in super-hybrid rice breeding[J]. *The Crop Journal*, 2017, 5(2): 100–102.
- [3] Wei H Y, Zhu Y, Qiu S, et al. Combined effect of shading time and nitrogen level on grain filling and grain quality in *Japonica super* rice[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2018, 17(11): 2405–2417.
- [4] 冀建华, 侯红乾, 刘益仁, 等. 长期施肥对双季稻产量变化趋势、稳定性和可持续性的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 607–619.
- [5] 陈贵, 陈梅, 张红梅, 等. 籼粳杂交稻与常规粳稻产量、干物质氮素累积转运及氮素利用差异研究[J]. *浙江农业学报*, 2018, 30(12): 1992–2000.
- [6] 彭既明. 多穗型超级杂交稻研究[J]. *杂交水稻*, 2017, 32(4): 1–8.
- [7] 付景, 王志琴, 袁莉民, 等. 施氮量对超级稻产量和一些生理性状的影响[J]. *中国水稻科学*, 2014, 28(4): 391–400.
- [8] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
- [9] 李昌明, 周艳丽, 龙光强, 等. 镉污染水稻土中水稻氮素营养的 SPAD 诊断[J]. *土壤*, 2017, 49(5): 941–950.
- [10] 俞敏祎, 余凯凯, 费聪, 等. 水稻冠层叶片 SPAD 数值变化特征及氮素营养诊断[J]. *浙江农林大学学报*, 2019, 36(5): 950–956.
- [11] Tremblay N, Wang Z J, Cerovic Z G. Sensing crop nitrogen status with fluorescence indicators. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2012, 32(2): 451–464.
- [12] Li J W, Zhang J X, Zhao Z, et al. Use of fluorescence-based sensors to determine the nitrogen status of paddy rice[J]. *The Journal of Agricultural Science*, 2013, 151(6): 862–871.
- [13] Goulas Y, Cerovic Z G, Cartelat A, et al. Dualex: a new instrument for field measurements of epidermal ultraviolet absorbance by chlorophyll fluorescence[J]. *Applied Optics*, 2004, 43(23): 4488–4496.
- [14] Tremblay N, Wang Z J, Bélec C. Performance of dualex in spring wheat for crop nitrogen status assessment, yield prediction and estimation of soil nitrate content[J]. *Journal of Plant Nutrition*, 2009, 33(1): 57–70.
- [15] Padilla F M, Teresa Peña-Fleitas M, Gallardo M, et al. Evaluation of optical sensor measurements of canopy reflectance and of leaf flavonols and chlorophyll contents to assess crop nitrogen status of muskmelon[J]. *European Journal of Agronomy*, 2014, 58: 39–52.
- [16] Cartelat A, Cerovic Z G, Goulas Y, et al. Optically assessed contents of leaf polyphenolics and chlorophyll as indicators of nitrogen deficiency in wheat (*Triticum aestivum* L.)[J]. *Field Crops Research*, 2005, 91(1): 35–49.
- [17] 陈温福, 徐正进, 张文忠, 等. 水稻新株型创造与超高产育种[J]. *作物学报*, 2001, 27(5): 665–672, 681–682.
- [18] 周瑞庆, 萧光玉, 汪大明, 等. 施氮量对水稻产量及产量构成因素的影响[J]. *作物研究*, 1992, 6(S1): 21–26.
- [19] 刘荣杰. 施氮量对单季稻甬优 17 穗粒结构和产量的影响[J]. *浙江农业科学*, 2014, 55(7): 1005–1007.
- [20] 闫平, 张书利, 于艳敏, 等. 施肥量对 2 个超级稻品种叶片 SPAD 值的影响[J]. *中国农学通报*, 2019, 35(7): 7–14.
- [21] Abdallah S B, Rabhi M, Harbaoui F, et al. Distribution of phenolic compounds and antioxidant activity between young and old leaves of *Carthamus tinctorius* L. and their induction by salt stress[J]. *Acta Physiologiae Plantarum*, 2013, 35(4): 1161–1169.
- [22] 孟军, 陈温福, 徐正进, 等. 水稻剑叶净光合速率与叶绿素含量的研究初报[J]. *沈阳农业大学学报*, 2001, 32(4): 247–249.
- [23] 王绍华, 曹卫星, 王强盛, 等. 水稻叶色分布特点与氮素营养诊断[J]. *中国农业科学*, 2002, 35(12): 1461–1466.
- [24] 陶勤南, 方萍, 吴良欢, 等. 水稻氮素营养的叶色诊断研究[J]. *土壤*, 1990, 22(4): 190–193, 197.
- [25] 王绍华, 刘胜环, 王强盛, 等. 水稻产量形成与叶片含氮量及叶色的关系[J]. *南京农业大学学报*, 2002, 25(4): 1–5.
- [26] 陈青春, 田永超, 顾凯健, 等. 基于多种光谱仪的水稻前期植株氮积累量监测[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(1): 223–229.
- [27] 李杰, 冯跃华, 牟桂婷, 等. 基于 SPAD 值的水稻施氮叶值模型构建及应用效果[J]. *中国农业科学*, 2017, 50(24): 4714–4724.
- [28] Agati G, Tuccio L, Kuszczewicz B, et al. Nondestructive optical sensing of flavonols and chlorophyll in white head cabbage (*Brassica oleracea* L. var. capitata subvar. alba) grown under different nitrogen regimens[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2016, 64(1): 85–94.