

淮北地区氮高效高产型粳稻品种群体生长特征研究

梁健 赵晨 韩超 任红茹 陈梦云 张洪程 霍中洋*

(扬州大学 农业部长江流域稻作技术创新中心 / 江苏省作物遗传生理重点实验室, 江苏 扬州 225009; *通讯联系人, E-mail: huozy69@163.com)

Characteristics of Population Growth in *japonica* Rice Varieties with High Nitrogen Use Efficiency and High Yield in Huaibei Area

LIANG Jian, ZHAO Chen, HAN Chao, REN Hongru, CHEN Mengyun, ZHANG Hongcheng, HUO Zhongyang*

(Innovation Center of Rice Cultivation Technology in Yangtze River Valley, Ministry of Agriculture/Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology of Jiangsu Province, Yangzhou University, Yangzhou 225009, China; *Corresponding author, E-mail: huozy69@163.com)

Abstract: 【Objective】The aim was to clarify the characteristics of population growth of *japonica* varieties with high nitrogen use efficiency and high yield in Huaibei Area. 【Method】The yield components, number of stems and tillers, leaf area and population biomass production were investigated under their optimum N levels with 3 representative *japonica* varieties [high N use efficiency and high yield (HNUEHY), medium N use efficiency and high yield (MNUEHY), high N use efficiency and medium yield (MNUEMY)] as material. 【Result】Number of stems and tillers increased slowly to the peak in jointing stage of HNUEHY, and then decreased gently with the highest percentage of productive tillers. The leaf area indexes of HNUEHY and MNUEMY were the highest and lowest at heading stage. The leaf area index of HNUEHY were 2.53% and 2.58% higher than that of MNUEHY and MNUEMY. The order of effective leaf area index was HNUEHY > MNUEHY > MNUEMY, the order of high effective leaf area index was MNUEHY > HNUEHY > MNUEMY. From heading to maturity stage, the photosynthetic potentials of HNUEHY and MNUEHY were 10.58% and 9.86% higher than that of MNUEMY, showing no obvious difference between each other. The total dry matter accumulation of HNUEHY was slightly lower than that of MNUEHY. From heading to maturity stage, the dry matter accumulations increased with increasing yield level with the highest ratio for HNUEHY. Before jointing stage, the crop growth rate of HNUEHY was lower than that of MNUEHY. After jointing stage, the crop growth rate of HNUEHY were 8.79% and 17.46% higher than that of MNUEHY and MNUEMY. 【Conclusion】The leaf area index, dry matter accumulation and crop growth rate of HNUEHY were less than those of MNUEHY and MNUEMY before jointing stage; while the photosynthetic potential, harvest index, percentage of productive tillers, crop growth rate and dry matter accumulation and ratio of HNUEHY were the highest from heading to maturity stage.

Key words: rice; high nitrogen use efficiency and high yield; population; characteristics of growth

摘要: 【目的】本研究旨在阐明淮北地区氮高效高产型粳稻品种的群体生长特征。【方法】在各自最适施氮水平下, 选用淮北地区氮高效高产型、氮中效高产型和氮高效中产型3类代表性常规粳稻品种, 研究不同类型水稻品种产量、茎蘖动态、叶面积及物质生产与积累特征。【结果】拔节前氮高效高产型群体茎蘖数最少, 拔节后平缓下降, 最终成穗率最高; 氮高效高产型水稻品种抽穗期叶面积指数最大, 氮低效低产型最小, 氮高效高产型水稻品种最大叶面积指数分别比氮中效高产型、氮高效中产型高 2.53%、5.58%; 有效叶面积率表现为氮高效高产型 > 氮高效中产型 > 氮中效高产型, 高效叶面积率表现为氮中效高产型 > 氮高效高产型 > 氮高效中产型; 抽穗至成熟阶段, 氮中效高产型和氮高效高产型群体光合势差异不显著, 但均显著高于氮高效中产型, 分别高 10.58% 和 9.86%; 氮高效高产型水稻成熟期干物质积累总量略低于氮中效高产型, 抽穗至成熟阶段, 随着籽粒产量的提高, 干物质积累呈递增趋势, 干物质积累比例以氮高效高产型最高; 收获指数表现为氮高效型品种大于氮中效品种; 氮高效高产型品种群体生长率在抽穗前低于氮中效高产型品种, 而在抽穗至成熟阶段则显著高于氮中效高产型与氮高效中产型, 分别高 8.79%、17.46%。【结论】氮高效高产型水稻品种拔节前叶面积指数、干物质积累量和群体生长率均低于氮高效中产型和氮中效高产型; 抽穗到成熟期光合势、收获指数、群体生长率、成穗率和干

收稿日期: 2017-03-27 修改稿收到日期: 2017-04-27

基金项目: 国家科技支撑计划资助项目(2013BAD07B09, 2016YFD0200805); 江苏省科技计划资助项目(BE2015340, BE2016351); 江苏省农业三新工程资助项目(SXGC[2016]321); 扬州大学青蓝工程项目(2014)。

物质积累量及比例最高。

关键词：水稻；氮高效高产；群体；生长特征

中图分类号：S143.1; S511.01

文献标识码：A

文章编号：1001-7216(2017)04-0400-09

水稻是世界上主要的粮食作物之一，其中，亚洲水稻产量占 88%^[1]。我国作为世界上水稻种植面积最大的国家，全国有 60%以上的人口以稻米为主食^[2-3]。近些年，随着人口的增长以及生活质量的提高，人们对水稻产量及品质也提出了更高的要求。

增施氮肥是农民常用来提高产量的措施之一^[4-5]，但氮肥的不合理施用又会制约水稻高产，不仅降低氮素利用效率，造成肥料浪费，还会破坏环境，威胁人们的健康，这与可持续发展背道而驰^[6-9]。2016 年中央一号文件提出“农药化肥零增长”战略^[10]，提高水稻单产，保障粮食安全，实现可持续发展已经成为重大讨论课题^[11]。冯洋等^[12]研究发现，施用氮肥可提高水稻氮素吸收利用率和氮素生理利用率，但过量施氮会降低氮素吸收利用率和生理利用率。与其他稻区相比，淮北地区土壤养分含量处于较低水平^[13-14]，加上我国氮肥利用效率较低^[15-16]，造成淮北地区肥料浪费严重。不同水稻基因型间氮素吸收效率存在显著差异，并最终影响到籽粒产量^[17-19]。戢林等^[20]研究发现，不同基因型水稻品种对植株根系形态的塑造不同，直接影响氮的吸收，从而影响水稻产量。殷春渊等^[21]报道，不同水稻基因型在各个生育阶段的氮素积累量和氮素利用效率均有差异，说明通过选育氮高效基因型品种来提高水稻的产量水平是可行的。如何在现有甚至减少氮肥投入情况下筛选出优质水稻品种以提高水稻单产及氮肥利用效率，是淮北地区需要解决的问题^[22-23]。本研究以该地区广泛种植的 34 个中熟中粳水稻为试材，借鉴氮肥群体最高生产力的概念^[24]，通过氮肥施用量的调控，使各品种达到最高生产力，并依据各品种最高生产力产量，将这 34

个品种划分为 4 个产量等级(顶层水平、高层水平、中层水平和底层水平)，并选取氮高效高产型、氮中效高产型和氮高效中产型 3 类有代表性水稻品种为试材，系统比较不同类型水稻品种产量、茎蘖动态、叶面积及物质生产与积累特征，以期为淮北地区品种改良及因种合理施氮提供理论与实践依据。

1 材料与方法

1.1 供试品种

选用淮北地区广泛种植的 34 个中熟中粳品种，通过设置 7 个施氮水平，即 0、150、187.5、225、262.5、300、337.5 kg/hm²(以纯氮计)，让每一个品种均在某一施氮水平下最大限度地发挥其产量增长潜力以达到最高产，将该最高产量定义为氮肥群体最高生产力，其对应的施氮量为该品种的最适氮肥水平^[24-25]。在各品种于最适施氮水平充分表现出各自最高产量的前提下(表 1)，以氮肥吸收利用率和生产力等级为指标，筛选出农户种植面积较广的氮高效中产型品种(淮稻 14 和徐稻 3 号)、氮中效高产型品种(新稻 18 和连粳 11)和氮高效高产型品种(连粳 7 号和宁粳 4 号)作为试材(表 2)。

1.2 试验设计

试验于 2014 年和 2015 年在扬州大学江苏省连云港市东海县平明试验基地进行。试验土质为砂壤土，地力平衡、中等，前茬为小麦。土壤含氮量为 1.53 g/kg，碱解氮 90.30 mg/kg，速效磷含量 34.4 mg/kg，速效钾 88.6 mg/kg。采用裂区设计，以施氮量(纯氮)水平为主区，品种为裂区，裂区面积为 10 m²，各小区均分布于同一田块，品种随机排列，重

表 1 供试水稻品种及其最高生产力对应施氮量

Table 1. Rice varieties used in the experiment and its N application rates

生产力等级 Productivity level	品种个数 No. of varieties	全生育期 Growth duration/d	品种 Variety		
			225.0 kg·hm ⁻²	262.5 kg·hm ⁻²	300.0 kg·hm ⁻²
顶层水平 Top level(≥10.50 t·hm ⁻²)	7	155		中稻 1 号，新稻 18，连粳 11， 泗稻 12	武运粳 27，宁粳 4 号， 连粳 7 号
高层水平 High level(9.75~10.50 t·hm ⁻²)	12	154	连粳 9 号，淮稻 14， 徐稻 3 号	苏秀 10，苏秀 326，盐稻 11， 华粳 6 号，连粳 4 号，镇稻 99， 镇稻 88	郑稻 19，盐稻 12
中层水平 Middle level(9.00~9.75 t·hm ⁻²)	11	154	泗稻 785，武运粳 21， 徐稻 5 号，郑稻 18	W026，泗 1108，泗稻 11， 徐稻 8 号，津稻 263	淮稻 11，华粳 2 号
底层水平 Low level(≤9.00 t·hm ⁻²)	4	154	华粳 1 号，徐稻 2 号	豫粳 6 号，苏秀 867	

表 2 氮肥群体最高生产力水稻品种氮素吸收利用率的分类

Table 2. Classification of N use efficiency of different productivity types of rice variety.

类型 Type	变幅 Range/%	生产力等级 Productivity levels/(t·hm ⁻²)			
		底层水平 LL ≤9.00	中层水平 ML 9.00~9.75	高层水平 HL 9.75~10.50	顶层水平 TL ≥10.50
氮低效型 Low ANRE	29.58~35.01	豫粳 6 号, 苏秀 867, 华粳 1 号, 徐稻 2 号	华粳 2 号, 泗 1108, 淮稻 11, W026	盐稻 11	
氮中效型 Middle ANRE	35.78~39.21		郑稻 18, 泗稻 11, 徐稻 5 号, 泗稻 785, 徐稻 8 号, 津稻 263	盐稻 12, 苏秀 326, 连粳 9 号, 华粳 6 号, 镇稻 99, 镇稻 88, 苏秀 10, 郑稻 19	新稻 18, 泗稻 12, 连粳 11
氮高效型 High ANRE	40.13~43.45		武运粳 21	连粳 4 号, 淮稻 14, 徐稻 3 号	武运粳 27, 中稻 1 号, 宁 粳 4 号, 连粳 7 号

TL—顶层水平; HL—高层水平; ML—中层水平; LL—低层水平。
TL, Top level; HL, High level; ML, Middle level; LL, Low level. ANRE, Apparent nitrogen recovery efficiency.

复 3 次。主区间筑埂隔离,并用塑料薄膜覆盖埂体,保证各主区单独排灌。两年均采用机插软盘育秧,5 月 30 日播种,6 月 20 日机插移栽。栽插密度为 28.5 万穴/hm²(11.7 cm×30 cm),每穴 4 苗。氮肥按照 $m_{\text{基肥}}:m_{\text{蘖肥}}:m_{\text{穗肥}}=3:3:4$ 施入,其中,穗肥分别于倒 4 叶和倒 2 叶叶龄期等量施入。此外,各小区分别于前作小麦收获后基施磷肥(折合 P₂O₅) 135 kg/hm²,钾肥分别于耕翻前、拔节期各施 67.5 kg/hm²(以 K₂O 计)。其他管理措施按照常规栽培要求实施。

1.3 测定内容与方法

1.3.1 茎蘖动态

在各处理小区定点 20 穴作为观察点,于有效分蘖临界叶龄期、拔节期、抽穗期、成熟期调查茎蘖数,观察茎蘖消长动态。

1.3.2 叶面积和干物质量

分别于拔节期、抽穗期、成熟期每小区取代表性植株 2 穴,用 Li-3000A 型自动叶面积仪测量植株叶面积。105℃下杀青 30 min,80℃烘 72 h 后称重,计算干物质量,并留样测定植株养分。

1.3.3 植株全氮含量

将拔节期、抽穗期、成熟期的留样植株粉碎,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 硝化,半微量凯氏定氮法测定氮含量。

1.3.4 产量

成熟期每小区选择生长整齐的中部 6 行,每行 10 穴,共收割 60 穴,脱粒、晒干,测定实际产量。

1.4 数据处理

氮素吸收利用率=(施氮区水稻吸氮量-氮空白区水稻吸氮量)/施氮量;

氮素生理利用率=(施氮区籽粒产量-氮空白区籽粒产量)/(施氮区水稻吸氮量-空白区水稻吸氮量);

光合势(m²·d·m⁻²)=[(L₁+L₂)/2](t₂-t₁)。式中 L₁和 L₂ 为前后 2 次测定的叶面积(m²·m⁻²),t₁和 t₂ 为前后 2 次测定的时间(d);

粒叶比:颖花/叶(cm²)=总颖花数/孕穗期叶面积;实粒/叶(cm²)=总实粒数/孕穗期叶面积;粒重/叶(mg/cm²)=籽粒产量/孕穗期叶面积;

群体生长率(g·m⁻²·d⁻¹)=(W₂-W₁)/(t₂-t₁),式中 W₁和 W₂ 为前后 2 次测定的干物质量,t₁和 t₂ 为前后 2 次测定的时间(d);

使用 Microsoft Excel 2003 处理数据,唐启义的 DPS 软件进行统计分析, Sigmaplot 作图。

2 结果与分析

2.1 不同类型水稻品种氮肥利用效率及产量表现

研究结果表明(表 3),氮中效高产型水稻产量略低于氮高效高产型且差异未达显著水平,但二者均显著高于氮高效中产型。于各自最适施氮水平条件下,氮高效高产型和氮高效中产型的氮素吸收利用率及氮素生理利用率差异不显著,二者与氮中效高产型差异显著。以 2014 年为例,氮高效高产型较氮中效高产型水稻品种氮素吸收利用率和氮素生理利用率分别高 12.07%和 10.99%,氮高效中产型较氮中效高产型水稻品种氮素吸收利用率和氮素生理利用率分别高 11.61%和 8.98%,两年规律一致。

由于两年试验的重复性较好,品种间其他各指标值变化趋势一致,下文以 2014 年数据进行分析。

2.2 不同类型水稻品种茎蘖数及成穗率

有效分蘖临界叶龄期群体茎蘖数以氮中效高产型为最多,但与氮高效中产型差异未达显著,而氮高效高产型显著低于其他 2 个类型(表 4);拔节期茎蘖数仍以氮中效高产型最多,氮高效中产型次之,

表 3 不同氮素利用效率水稻品种产量表现及氮素利用率

Table 3. Yield performance and N use efficiency of rice cultivars with different nitrogen use efficiencies.

类型 Type	基因型 Genotype	2014			2015		
		氮素吸收利用率	氮素生理利用率	最高产量	氮素吸收利用率	氮素生理利用率	最高产量
		RE/%	PE /(kg·kg ⁻¹)	Highest yield /(kg·hm ⁻²)	NRE/%	NPE /(kg·kg ⁻¹)	Highest yield /(kg·hm ⁻²)
氮高效中产 HNUEMY	淮稻 14	41.76 a	38.57 a	102 264 b	42.07 a	39.01 a	102 684 b
	Huaidao 14						
	宁粳 3 号	42.58 a	39.69 a	102 468 b	41.68 a	38.58 a	103 403 b
氮中效高产 MNUEHY	Ningjing 3						
	新稻 18	38.31 b	36.53 b	105 935 a	37.29 b	36.97 b	105 670 a
	Xindao 18						
氮高效高产 HNUEHY	连粳 11	37.68 b	35.28 b	106 085 a	37.79 b	36.47 b	106 563 a
	Lianjing 11						
	连粳 7 号	42.69 a	40.32 a	107 487 a	43.02 a	40.53 a	107 582 a
	Lianjing 7						
	宁粳 4 号	42.47 a	39.83 a	107 094 a	42.52 a	39.21 a	107 808 a
	Ningjing 4						

标以不同小写字母的同—列数据在 5%水平上差异显著。下同。

Values within the same column and year followed by different letters are significantly different at the 5% probability level. HNUEMY, High N use efficiency and medium yield; MNUEHY, Medium N use efficiency and high yield; HNUEHY, High N use efficiency and high yield; NRE, Nitrogen recovery efficiency; NPE, Nitrogen physiological efficiency. The same as bellow.

表 4 不同氮素利用效率水稻品种茎蘖数及成穗率

Table 4. Number of stems and tillers and percentage of productive tillers of rice varieties with different nitrogen use efficiencies.

类型 Type	基因型 Genotype	茎蘖数 Number of stems and tillers/(×10hm ²)				成穗率 Percentage of productive tillers/%
		有效分蘖临界期	拔节期	抽穗期	成熟期	
		Critical stage of productive tillering	Jointing stage	Heading stage	Maturity stage	
氮高效中产 HNUEMY	淮稻 14	311.23 a	400.42 b	329.03 b	292.37 b	73.02 ab
	Huaidao 14					
	宁粳 3 号	310.45 a	405.82 b	336.48 ab	295.91 b	72.92 b
氮中效高产 MNUEHY	Ningjing 3					
	新稻 18	314.57 a	438.39 a	347.83 a	313.23 a	71.45 b
	Xindao 18					
氮高效高产 HNUEHY	连粳 11	317.12 a	447.30 a	355.73 a	320.73 a	71.70 b
	Lianjing 11					
	连粳 7 号	301.23 b	386.32 c	330.50 b	296.04 b	76.63 a
	Lianjing 7					
	宁粳 4 号	301.54 b	385.68 c	334.50 ab	289.32 b	75.02 a
	Ningjing 4					

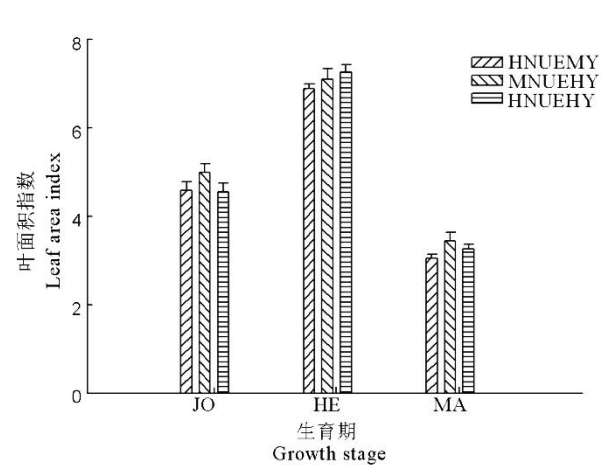
氮高效高产型最少；拔节期后，氮中效高产型分蘖减少速度相对较快，氮高效高产型下降相对稳定，与拔节期相比，抽穗期氮中效高产型茎蘖消亡率达 20.56%，而氮高效高产型为 13.86%，氮高效中产型为 17.45%；成熟期氮中效高产型茎蘖数最多，但氮高效品种间的差异不显著。氮中效高产型拔节期无效分蘖相对较多，导致茎蘖成穗率在 3 个类型中处于最低，氮高效高产型最高；氮高效品种间比较，随着产量的提高，成穗率也提高。可以看出，产量

与氮素吸收协同越好，拔节后分蘖越稳定，茎蘖成穗率也越高。

2.3 不同类型水稻品种叶面积与光合特性

由图 1 可知，拔节期和成熟期的 LAI 表现为氮中效高产型最高，其余 2 个类型之间差异不显著。抽穗期的 LAI 以氮高效高产型最大，氮中效高产型次之，氮高效中产型最小，氮高效高产型较 6 个品种平均水平高 2.66%。

有效叶面积率表现为氮高效高产型>氮高效中



JO—拔节; HE—抽穗; MA—成熟。
HNUEMY, High N use efficiency and medium yield; MNUEHY, Medium N use efficiency and high yield; HNUEHY, High N use efficiency and high yield. JO, Jointing; HE, Heading; MA, Maturity.
图1 不同氮素利用效率水稻品种各生育期的叶面积指数
Fig. 1. Leaf area indices of rice with different nitrogen use efficiencies during different growth stages

产型>氮中效高产型, 3种氮利用率不同的类型均未达到显著水平(表5); 高效叶面积率表现为氮中效高产型>氮高效高产型>氮高效中产型, 氮中效高产型较氮高效高产型和氮高效中产型的高效叶面积率分别高2.64%和5.15%。移栽至拔节阶段, 群体光合势水平以氮中效高产型最高, 氮中效高产型最低; 拔节至抽穗阶段, 群体光合势表现为氮中效高

产型>氮高效高产型>氮高效中产型, 差异显著; 抽穗至成熟阶段, 氮中效高产型和氮高效高产型群体光合势差异不显著, 氮高效中产型最低, 氮高效高产型和氮中效高产型分别较氮高效中产型高10.58%和9.86%。

在控制适宜叶面积指数条件下提高单产, 是通过提高粒叶比的途径实现的。粒叶比有颖花/叶、实粒/叶和粒重/叶3种表示方式。由表5可以看出, 粒叶比的3个指标均表现为氮高效高产型>氮中效高产型>氮高效中产型, 氮高效高产型和氮中效高产型差异不显著。

2.4 不同类型水稻品种干物质阶段积累及收获指数

对不同类型水稻品种整个生长期及移栽至拔节阶段、拔节至抽穗阶段、抽穗至成熟阶段3个重要生育阶段的干物质积累量分析比较(表6), 6个水稻品种整个生长期干物质积累量平均达20.42 t/hm², 氮中效高产型积累量最多, 平均达21.93 t/hm²。移栽至拔节阶段, 氮高效中产型水稻品种的干物质积累量及比例最高; 拔节后, 高产品种干物质积累明显高于中产品种, 拔节至抽穗阶段中产品种较高产品种干物质积累量少13.01%; 抽穗至成熟阶段的干物质积累量仍是高产品种大于中产品种, 氮高效高产型略低于氮中效高产型。抽穗后的干物质积累比例以氮高效高产型最高, 氮高效中产型最低, 差异显著。

就收获指数而言, 氮高效品种平均为0.5324,

表5 不同氮素利用效率水稻品种叶面积率、光合势和粒叶比
Table 5. Leaf area index, photosynthetic potential and grain-leaf ratio of rice cultivars with various nitrogen use efficiencies.

类型	基因型	有效叶面积率 Effective leaf area index	高效叶面积率 High-efficiency leaf area index	光合势 photosynthetic potential/(m ² ·d)			粒叶比 Grain-leaf ratio		
				移栽-拔节期 Transplanting- Jointing	拔节-抽穗期 Jointing- Heading	抽穗-成熟期 Heading- Maturity	颖花/叶 Spikelets per cm ² leaf area/cm ²	实粒/叶 Filled grains per cm ² leaf area/cm ²	粒重/叶 Grain weight per cm ² leaf area/(mg·cm ²)
氮高效中产 HNUEMY	淮稻14	93.92 a	76.94 b	96.83 c	205.43 d	139.83 b	0.587 ab	0.486 b	12.28 b
	宁粳3号	94.24 a	75.54 b	97.02 c	210.84 cd	145.99 b	0.575 b	0.483 b	12.41 b
	Ningjing 3								
氮中效高产 MNUEHY	新稻18	91.64 a	80.45 a	115.63 a	235.23 a	156.72 a	0.591 a	0.507 a	12.91 ab
	Xindao 18								
	连粳11	92.53 a	79.88 a	110.46 a	226.89 b	157.27 a	0.597 a	0.519 a	13.16 a
	Lianjing 11								
氮高效高产 HNUEHY	连粳7号	94.21 a	78.48 ab	99.35 c	216.32 c	160.54 a	0.602 a	0.528 a	13.43 a
	Lianjing 7								
	宁粳4号	94.51 a	77.73 ab	104.23 b	215.68 c	155.52 a	0.592 a	0.520 a	13.26 a
	Ningjing 4								

表 6 不同氮素利用效率水稻品种群体干物质积累量及比例和收获指数

Table 6. Harvest index, dry matter accumulation and ratio of rice varieties with various nitrogen use efficiencies.

类型 Type	基因型 Genotype	总干物质质量 Total dry matter accumulation (t·hm ⁻²)	移栽至拔节 Transplanting-Jointing		拔节至抽穗 Jointing-Heading		抽穗至成熟 Heading-Maturity		收获指数 Harvest index
			积累量	比例	积累量	比例	积累量	比例	
			Biomass/(t·hm ⁻²)	Ratio/%	Biomass/(t·hm ⁻²)	Ratio/%	Biomass/(t·hm ⁻²)	Ratio/%	
氮高效中产 HNUEMY	淮稻 14	19.26 c	5.06 a	26.27	7.68 c	39.87	6.52 c	33.86	0.5306 a
	Huaidao 14								
	宁粳 3 号	19.33 c	5.09 a	26.31	7.58 c	39.21	6.66 c	34.48	0.5297 a
氮中效高产 MNUEHY	Ningjing 3								
	新稻 18	22.03 a	4.95 a	22.49	9.28 a	42.13	7.79 a	35.38	0.4807 b
	Xindao 18								
氮高效高产 HNUEHY	连粳 11	21.82 a	4.87 a	22.33	9.30 a	42.62	7.65 a	35.05	0.4858 b
	Lianjing 11								
	连粳 7 号	20.00 b	4.24 b	21.20	8.25 b	41.23	7.51 b	37.57	0.5370 a
氮高效高产 HNUEHY	Lianjing 7								
	宁粳 4 号	20.10 b	4.29 b	21.34	8.26 b	41.07	7.56 b	37.59	0.5323 a
	Ningjing 4								

4 个品种差异未达显著水平，氮中效品种平均为 0.4833；高产品种间比较，氮高效高产型品种收获指数显著高于氮中效高产型品种，说明适当控制群体生长规模，保证较高的收获指数，既可达到高产，又利于提高氮素利用效率。

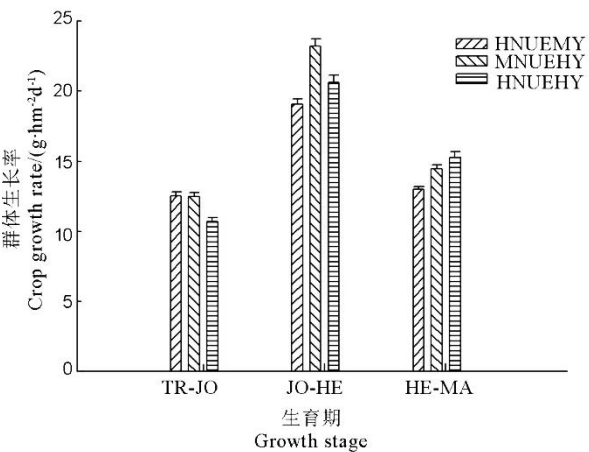
2.5 不同类型水稻品种群体生长率

水稻群体生长率即单位面积上水稻群体干物质的积累速率，是描述水稻群体生产速率的重要指标。移栽至拔节阶段，氮高效高产型群体生长率最小，氮中效高产型和氮高效中产型差异不显著，平均值为 12.51 g/(m² d¹)，较氮高效高产型高 17.22%(图 2)；拔节至抽穗阶段，氮中效高产型群体生长率最大，氮高效中产型最小；抽穗至成熟阶段，随着产量的增加群体生长率也变大，高产品种间比较，氮高效高产型显著高于氮中效高产型，平均高出 5.71%。

3 讨论

3.1 氮高效与中效高产型品种的群体生长特征

水稻高产条件下达到与氮高效协同统一的原因有很多，前人也有过许多阐述^[26-28]。魏海燕等^[29]研究表明，在群体茎蘖方面，氮高效品种较氮中效品种在有效分蘖临界叶龄期至拔节阶段无效分蘖发生少，拔节后分蘖稳定，因此最终成穗率相对高。本研究表明，氮中效高产型在拔节前无效积累较多，茎蘖数显著高于氮高效高产型，成熟期显著低于氮高效高产型，茎蘖成穗率较氮高效高产型平均低



TR-JO—移栽至拔节阶段；JO-HE—拔节至抽穗阶段；HE-MA—抽穗至成熟阶段。

HNUEMY, High N use efficiency and medium yield; MNUEHY, Medium N use efficiency and high yield; HNUEHY, High N use efficiency and high yield. JO, Jointing; HE, Heading; MA, Maturity.

图 2 不同氮素利用效率水稻品种各生育期的群体生长率
Fig. 2. Crop growth rate at various growth stages of rice varieties with different nitrogen use efficiencies

4.59%，与魏海燕等研究结果一致。笔者认为，同为高产品种，氮中效品种相较于氮高效品种在生育前期积累了过多氮素，使得无效分蘖期仍发生较多的无效分蘖，最终成穗率低，其高产水平则是通过更多的成熟期分蘖数(穗数)来达成的。

干物质生产是水稻库容量和产量形成的基础。李敏等^[30]研究表明，同为高产类型品种，干物质积累量越高，收获指数越低。本研究表明，氮中效高

产型较氮高效高产型干物质总积累量平均高 9.35%, 但收获指数却低 10.64%。对干物质阶段积累量及阶段积累比例分析, 氮高效高产型在拔节前较氮中效高产型阶段干物质积累量及比例较少, 而在抽穗至成熟阶段相对较高, 与前人研究的不同产量及不同氮效率品种干物质积累特征基本一致^[24,31]。薛亚光^[32]的研究表明, 高产品种间比较, 高产氮高效品种穗分化前群体生长率低, 抽穗后显著提高, 本研究也得出了一致规律, 氮高效高产型显著高于氮中效高产型, 平均高出 5.71%。由此可见, 生长量过大不仅不利于提高氮素的吸收利用效率, 还会造成群体拥挤, 不利于通风透气, 还有可能形成倒伏的风险。因此, 在高产超高产攻关中, 不能仅仅追求提高干物质积累总量, 协调好各个生育期个体与群体的关系, 提高收获指数, 才能获得更高产。

3.2 氮高效高产与中产型品种的群体生长特征

殷春渊等^[24]认为随着产量的提高, 不同品种的氮素利用效率呈递增趋势。而本研究发现, 产量中等的品种同样也可以获得较高的氮素吸收利用率。通过表 1 和表 2 比较可知, 氮高效高产型与氮高效中产型水稻品种的最大区别在于, 氮高效高产型水稻品种的最适施氮量是 300 kg/hm², 氮高效中产型水稻品种的最适施氮量是 225 kg/hm²。这说明对于氮高效水稻品种, 最高产量的差异也会受水稻不同基因型的影响^[33], 此规律在小麦、玉米栽培中也同样出现^[34-36]。

前人多关于水稻不同氮效率、不同产量的比较研究^[37-38], 而对于淮北地区相同氮效率、不同产量等级的研究很少。氮高效高产和中产型水稻品种的分蘖动态均表现出“前稳, 中促, 后保”的状态, 最终成穗率高。随着产量等级的提高, 氮高效品种的有效叶面积率差异不大, 但高效叶面积率呈递增趋势。氮高效高产型水稻品种的叶面积和光合势在生育前期与氮高效中产型差异不显著甚至略低, 而拔节后高于氮高效中产型。因此, 笔者认为, 相同氮效率品种产量等级差异在于生育中后期高产品种有更高效的光合物质积累, 植株绿叶能更充分地吸收光照, 具有更合理的群体透光性, 使拔节后植株有更强的光合生产能力, 甚至后期叶片仍有较强的光合功能, 积累更多的光合产物。

相关研究均证明, 成熟期的干物质积累量和抽穗到成熟阶段的干物质积累量与产量水平呈正比^[39-40]。凌启鸿^[39]研究发现, 高产品种干物质积累分配合理, 表现在拔节前群体有适宜的生长量, 拔节期的干物质积累不会过多, 抽穗期的群体干物质量

也就有可能适宜, 这就为提高抽穗至成熟阶段的光合生产积累量打下基础。本研究中, 氮高效高产型水稻品种拔节前干物质积累量低于氮高效中产型 15.23%, 抽穗到成熟阶段氮高效高产型水稻品种干物质积累量高于氮高效中产型 14.28%, 与前人研究结果一致。本研究还发现, 尽管氮高效中产型的干物质积累量相对较少, 但收获指数与氮高效高产型无异, 甚至显著高于氮中效高产型。原因可能是氮素吸收效率与收获指数成正比, 相同氮素吸收效率、不同基因型水稻品种的产量差异主要集中在生育后期的干物质积累。

参考文献:

- [1] 程式华. 2016 年中国水稻产业发展报告. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Chen S H. The Chinese Rice industry Development Report in 2016. Beijing: China Agriculture Press, 2016.(in Chinese)
- [2] 王志敏, 王树安. 发展超高产技术, 确保中国未来 16 亿人口的粮食安全. 中国农业科技导报, 2000, 2(7): 8-11.
Wang Z M, Wang S A. Develop super high yield techniques of grain crops for feeding 1.6 billion people in future. *Rev China Agric Sci Technol*, 2000, 2(7): 8-11.(in Chinese)
- [3] 章秀福, 王丹英, 方福平, 曾衍坤, 廖西元. 中国粮食安全和水稻生产. 农业现代化研究, 2005, 26(2): 85-88.
Zhang X F, Wang D Y, Fang F P, Zeng Y K, Liao X Y. Food Safety and Rice Production in China. *Res Agric Moder*, 2005, 26(2): 85-88.(in Chinese with English abstract)
- [4] 刘立军, 王志琴, 桑大志, 杨建昌. 氮肥运筹对水稻产量及稻米品质的影响. 扬州大学学报: 农业与生命科学版, 2002, 23(3): 46-50.
Liu L J, Wang Z Q, Sang D Z, Yang J C. Effect of nitrogen management on rice yield and grain quality. *J Yangzhou Univ :Agric&Life Sci*, 2002, 23(3): 46-50.(in Chinese with English abstract)
- [5] 叶全宝, 张洪程, 魏海燕, 张瑛, 汪本福, 夏科, 霍中洋, 戴其根, 许轲. 水稻粒重对氮素反应的基因型差异及其类型. 作物学报, 2005, 31(11): 1422-1428.
Ye Q B, Zhang H C, Wei H Y, Zhang Y, Wang B F, Xia K, Huo Z Y, Dai Q G, Xu K. Effects of nitrogen fertilizer on nitrogen use efficiency and yield of rice under different soil conditions. *Acta Agron Sin*, 2005, 31(11): 1422-1428.(in Chinese with English abstract)
- [6] Hasegawa H, Furukawa Y, Kimura S D. On-farm assessment of organic amendments effects on nutrient status and nutrient use efficiency of organic rice fields in Northeastern Japan. *Agric Ecosyst Environ*, 2005, 108: 350-362.
- [7] Jing Q, Bouman B A M, Hengsdijk H, van Keulen H, Cao W. Exploring options to combine high yield with high nitrogen use efficiencies in irrigated rice in China. *Europ J Agron*, 2007, 26: 166-177.

- [8] Tian Y H, Yin B, Yang L Z, Yin S X, Zhu Z L. Nitrogen runoff and leaching losses during rice-wheat rotations in taihu lake region, China. *Pedosphere*, 2007, 17(4): 445-456.
- [9] 巨晓棠, 谷保静. 我国农田氮肥施用现状、问题及趋势. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(4): 783-795.
Ju X T, Gu B J. Status-quo, problem and trend of nitrogen fertilization in China. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(4): 783-795.(in Chinese with English abstract)
- [10] 中共中央国务院关于落实发展新理念加快农业现代化, 实现全面小康目标的若干意见 http://www.moa.gov.cn/ztl/2016zyyhj/2016zyyhj/201601/t20160129_5002063.htm.
- [11] 刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 李志鹏, 吴文斌, 杨鹏, 游良志, 唐华俊. 近 30 年中国水稻种植区域与产量时空变化分析. *地理学报*, 2013, 68(5): 680-693.
Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, Li Z P, Wu W B, Yang P, You L Z, Tang H J. Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980-2010. *Acta Geogr Sin*, 2013, 68(5):680-693. (in Chinese with English abstract)
- [12] 冯洋, 陈海飞, 胡孝明, 蔡红梅, 徐芳森. 高、中、低产田水稻适宜施氮量和氮肥利用率的研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20(1): 7-16.
Feng Y, Chen H F, Hu X M, Cai H M, Xu F S. Optimal nitrogen application rates on rice grain yield and nitrogen use efficiency in high, middle and low-yield paddy fields. *Plant Nutr Fert Sci*, 2014, 20(1): 7-16.(in Chinese with English abstract)
- [13] 任意, 张淑香, 穆兰, 田有国, 卢昌艾. 我国不同地区土壤养分的差异及变化趋势. *中国土壤与肥料*, 2009, (6): 13-17.
Ren Y, Zhang S X, Mu L, Tian Y G, Lu C A. Change and difference of soil nutrients for various regions in China. *Soil Fert Sci in China*, 2009, (6): 13-17.(in Chinese with English abstract)
- [14] 赵明松, 李德成, 张文凯, 胡春华, 邵云鹏. 淮北平原农田土壤养分空间变异特征——以安徽省蒙城县为例. *土壤通报*, 2016, 47(3): 611-617.
Zhang M S, Li D C, Zhang W K, Hu C H, Shao Y P. Spatial variability characteristics of soil nutrient in north plain of Anhui Province-a case study of Mengcheng County, Anhui Province. *Chin J Soil Sci*, 2016, 47(3): 611-617.(in Chinese with English abstract)
- [15] 敖和军, 王淑红, 邹应斌, 彭少兵, 唐启源, 方远祥, 肖安民, 陈玉梅, 熊昌明. 超级杂交稻干物质生产特点与产量稳定性研究. *中国农业科学*, 2008, 41: 1927-1936.
Ao H J, Wang S H, Zou Y B, Peng S B, Tang Q Y, Fang Y X, Xiao A M, Chen Y M, Xiong C M. Study on yield stability and dry matter characteristics of super Hybrid Rice. *Sci Agric Sin*, 2008, 41: 1927-1936.(in Chinese with English abstract)
- [16] 崔玉亭, 程序, 韩纯儒, 李荣刚. 苏南太湖流域水稻经济生态适宜施氮量研究. *生态学报*, 2000, 20: 658-662.
Cui Y T, Chen X, Han C R, Li R G. The economic and ecological satisfactory amount of nitrogen fertilizer using on rice in Tai Lake Watershed. *Acta Ecol Sin*, 2000, 20: 658-662.(in Chinese with English abstract)
- [17] Singh U, Lagha J K, Castillo E G, Punzalan G, Tirol-Padre A, Duqueza M. Genotypic variation in nitrogen use efficiency in medium and long duration rice. *Field Crops Res*, 1998, 58: 35-53.
- [18] Koutroubas S D, Ntanosb D A. Genotypic differences for grain yield and nitrogen utilization in indica and japonica rice under Mediter-ranean conditions. *Field Crops Res*, 2003, 83: 251-260.
- [19] Kamiji Y, Yoshida H, Palta J A, Sakuratani T, Shiraiwa T. N applications that increase plant N during panicle development are highly effective in increasing spikelet number in rice. *Field Crops Res*, 2011, 122: 242-247.
- [20] 戢林, 李廷轩, 张锡洲, 余海英. 氮高效利用基因型水稻根系形态和活力特征. *中国农业科学*, 2012, 45(23):4770-4781.
Ji L, Li T X, Zhang X Z, Yu H Y. Root morphological and activity characteristics of rice genotype with high nitrogen utilization efficiency. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(23):4770-4781.(in Chinese with English abstract)
- [21] 殷春渊, 张庆, 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 马群, 杭杰, 张胜飞. 不同产量类型水稻基因型氮素吸收、利用效率的差异. *中国农业科学*, 2010, 43(1):39-50.
Yin C Y, Zhang Q, Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Ma Q, Hang J, Zhang S F. Differences in nitrogen absorption and use efficiency in rice genotypes with different yield performance. *Sci Agric Sin*, 2010, 43(1): 39-50.(in Chinese with English abstract)
- [22] Peng S B, Tang Q Y, Zou Y B. Current status and challenges of rice production in China. *Plant Prod Sci*, 2009, 12(1): 3-8.
- [23] 安宁. 我国水稻高产高效的实现途径研究. 北京: 中国农业大学, 2015.
An N. Approach to realize high yield and high nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. Beijing: China Agricultural University, 2015.(in Chinese with English abstract)
- [24] 张洪程, 马群, 杨雄, 李敏, 葛梦婕, 李国业, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉, 刘艳阳. 水稻品种氮肥群体最高生产力及其增长规律. *作物学报*, 2012, 38(1): 86-98.
Zhang H C, Ma Q, Yang X, Li M, Ge M J, Li G Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H, Liu Y Y. The highest population productivity of nitrogen fertilization and its variation rules in rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(1): 86-98.(in Chinese with English abstract)
- [25] 马群, 杨雄, 李敏, 李国业, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的物质生产积累. *中国农业科学*, 2011, 44(20): 4159-4169.
Ma Q, Yang X, Li M, Li G Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Studies on the characteristics of dry matter production and accumulation of rice varieties with different productivity levels. *Sci Agric Sin*, 2011, 44(20): 4159-4169. (in Chinese with English abstract)
- [26] 黄丽芬, 董芙蓉, 霍中洋, 全晓艳, 魏海燕, 戴其根, 许轲, 张洪程. 氮素水平对不同氮效率基因型水稻的物质生产与分配的影响. *核农学报*, 2012, 26(9): 1290-1297.
Huang L F, Dong F R, Huo Z Y, Quan X Y, Wei H Y, Dai Q G, Xu K, Zhang H C. Effects of nitrogen levels on dry matter accumulation and distribution in rice genotype

- with different nitrogen use efficiencies. *J Nucl Agric Sci*, 2012, 26(9): 1290-1297. (in Chinese with English abstract)
- [27] 董桂春, 王余龙, 张传胜, 张岳芳, 陈培峰, 杨连新, 黄建晔, 龙银成. 氮素籽粒生产效率不同的籼稻品种物质生产和分配的基本特点. *作物学报*, 2007, 33(1): 137-142.
Dong G C, Wang Y L, Zhang C S, Zhang Y F, Chen P F, Yang L X, Huang J Y, Long Y C. Characteristics of dry matter accumulation and distribution in conventional indica rice cultivars with different nitrogen use efficiency for grain output. *Acta Agron Sin*, 2007, 33(1): 137-142. (in Chinese with English abstract)
- [28] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 曹利强, 吴浩. 水稻高产氮高效型品种的根系形态生理特征. *作物学报*, 2012, 38(4): 648-656.
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Cao L Q, Wu H. Root morphological and physiological characteristics of rice cultivars with high yield and high nitrogen use efficiency. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(4): 648-656. (in Chinese with English abstract)
- [29] 魏海燕, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 杭杰, 马群, 张胜飞, 张庆, 刘艳阳. 不同水稻氮利用效率基因型的物质生产与积累特性. *作物学报*, 2007, 33(11): 1802-1809.
Wei H Y, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Hang J, Ma Q, Zhang S F, Zhang Q, Liu Y Y. Characteristics of Matter Production and Accumulation in Rice Genotypes with Different N Use Efficiency. *Acta Agron Sin*, 2007, 33(11): 1802-1809. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李敏, 张洪程, 杨雄, 葛梦婕, 马群, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲. 水稻高产氮高效型品种的物质积累与转运特性. *作物学报*, 2013, 39(1): 101-109.
Li M, Zhang H C, Yang X, Ge M J, Ma Q, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K. Characteristics of Dry Matter Accumulation and Translocation in Rice Cultivars with High Yield and High Nitrogen Use Efficiency. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(1): 101-109. (in Chinese with English abstract)
- [31] 杨建昌, 杜永, 吴长付, 刘立军, 王志琴, 朱庆森. 超高产粳型水稻生长发育特性的研究. *中国农业科学*, 2006, 39(7): 1336-1345.
Yang J C, Du Y, Wu C F, Liu L J, Wang Z Q, Zhu Q S. Growth and development characteristics of super-high-yielding mid-season japonica rice. *Sci Agric Sin*, 2006, 39(7): 1336-1345. (in Chinese with English abstract)
- [32] 薛亚光. 水稻高产与养分高效利用栽培技术及其生理基础研究. 扬州: 扬州大学, 2013.
Xue Y G. Cultivation techniques for high-yielding and high nutrient use efficiency in rice and their physiological bases. Yangzhou: Yangzhou University, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [33] 袁伟玲. 不同基因型水稻形态及生理特性对其产量潜力的影响. 武汉: 华中农业大学, 2010.
Yuan W L. Genotypic variation in Morpho-Physiological traits and its effect on rice yield potential. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张斯梅, 杨四军, 顾克军, 张恒敢, 许博, 陈涓. 基因型对小麦生物产量和籽粒产量的影响. *江西农业学报*, 2013, 25(3): 1-3.
Zhang S M, Yang S J, Gu K J, Zhang H G, Xu B, Chen J. Effects of genotype on biomass and grain yield of wheat. *Acta Agric Jiangxi*, 2013, 25(3): 1-3. (in Chinese with English abstract)
- [35] 闫翠萍, 张永清, 张定一, 裴雪霞. 基因型、播期和种植密度对优质小麦产量及灌浆特性的影响. *小麦研究*, 2007, (04): 1-11.
Yan C P, Zhang Y Q, Zhang D Y, Pei X X. Effects of variety, sowing date and planting density on grain filling and yield of wheat varieties with different qualities. *J Wheat Res*, 2007, (04): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [36] 赵龙飞, 李潮海, 刘天学, 王秀萍, 僧珊珊. 花期前后高温对不同基因型玉米光合特性及产量和品质的影响. *中国农业科学*, 2012, (23): 4947-4958.
Zhao L F, Li C H, Liu T X, Wang X P, Seng S S. Effect of high temperature during flowering on photosynthetic characteristics and grain yield and quality of different genotypes of maize (*Zea mays* L.). *Sci Agric Sin*, 2012, (23): 4947-4958. (in Chinese with English abstract)
- [37] 彭少兵, 黄建良, 钟旭华, 杨建昌, 王火光, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森. 提高中国稻田氮肥利用率的研究策略. *中国农业科学*, 2002, 35(9): 1095-1103.
Peng S B, Huang J L, Zhong X H, Yang J C, Wang H G, Zou Y B, Zhang F S, Zhu Q S. Research strategy in improving fertilizer-nitrogen use efficiency of irrigated rice in China. *Sci Agric Sin*, 2002, 35(9): 1095-1103. (in Chinese with English abstract)
- [38] 霍中洋, 顾海永, 马群, 杨雄, 李敏, 李国业, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 高辉, 芦燕, 张洪程. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种的氮素吸收利用差异. *作物学报*, 2012, 38(11): 2061-2068.
Huo Z Y, Gu H Y, Ma Q, Yang X, Li M, Li G Y, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Gao H, Lu Y, Zhang H C. Differences of nitrogen absorption and utilization in rice varieties with different productivity levels. *Acta Agron Sin*, 2012, 38(11): 2061-2068. (in Chinese with English abstract)
- [39] 凌启鸿. 作物群体质量. 上海: 上海科技出版社, 2000: 1-210.
Ling Q H. The Quality of Crop Population. Shanghai: Shanghai Scientific and Technical Publishers, 2000: 1-210. (in Chinese)
- [40] 陈爱忠, 潘晓华, 吴建富, 石庆华, 杨上勤. 施氮量对双季超级稻产量、干物质生产及氮素吸收利用的影响. *杂交水稻*, 2011, 26(2): 58-63.
Chen A Z, Pan X H, Wu J F, Shi Q H, Yang S Q. Effects of nitrogen application amount on yield, dry matter production and N-uptake and utilization of double-cropping super rice. *Hybrid Rice*, 2011, 26(2): 58-63. (in Chinese)