DOI: 10.3724/SP.J.1006.2020.92046

研究简报

甬优中熟籼粳杂交稻栽后植株氮素积累模型与特征

孟天瑶¹ 葛佳琳² 张徐彬² 韦还和² 陆 钰² 李心月² 陶 源²
丁恩浩² 周桂生^{1,*} 戴其根^{2,*}

¹扬州大学教育部农业与农产品安全国际合作联合实验室 / 扬州大学农业科技发展研究院 / 扬州大学, 江苏扬州 225009; ²江苏省作物遗传生理重点实验室 / 江苏省作物栽培生理重点实验室 / 江苏省粮食作物现代产业技术协同创新中心 / 扬州大学农学院, 江苏扬州 225009

摘 要: 旨在定量描述甬优中熟籼粳杂交稻栽后植株氮素养分积累动态变化, 基于模型分析方法从氮素营养层面阐明甬优中熟籼粳杂交稻高产形成机制。2015—2016 年, 以甬优中熟籼粳杂交稻甬优 2640 和甬优 1640、常规粳稻扬粳 4038 和扬粳 4227、杂交籼稻新两优 6380 和扬两优 6 号为试材, 比较研究其栽后植株氮素积累特征差异。籼粳杂交稻两年平均产量达 11.65 t hm⁻², 显著高于常规粳稻(10.74 t hm⁻²)和杂交籼稻(10.01 t hm⁻²)。成熟期植株氮素吸收量和百千克籽粒吸氮量亦高于常规粳稻和杂交籼稻。成熟期植株各器官氮素吸收量及其所占比例, 籼粳杂交稻以穗部最多, 叶片其次, 茎鞘最少; 常规粳稻和杂交籼稻则均以穗部最多, 茎鞘其次, 叶片最少。与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻成熟期叶片氮素吸收量占植株总吸氮量的比例较高, 穗部氮素吸收量所占比例则较低。不同类型品种栽后植株氮素积累动态均以 Gompertz 方程拟合效果较好, 拟合系数一般在 0.995 左右。与常规粳稻和杂交籼稻相比, 甬优中熟籼粳杂交稻在各阶段氮素积累量均具优势, 在快增期是由于其较高的持续天数和氮素积累速率, 渐增期和缓增期是由于其较高的氮素积累速率。本文提出了符合不同类型水稻栽后植株群体氮素积累动态变化特征的 Gompertz 模型, 并采用该模型分析了甬优中熟籼粳杂交稻栽后植株氮素积累优势。

关键词: 甬优籼粳杂交稻; 中熟系列; 氮素积累; Gompertz 方程

A dynamic model and its characteristics for nitrogen accumulation after transplanting in medium-maturity types of Yongyou japonica/indica hybrids

MENG Tian-Yao¹, GE Jia-Lin², ZHANG Xu-Bin², WEI Huan-He², LU Yu², LI Xin-Yue², TAO Yuan², DING En-Hao², ZHOU Gui-Sheng^{1,*}, and DAI Qi-Gen^{2,*}

¹ Joint International Research Laboratory of Agriculture and Agro-product Safety, Ministry of Education / Institute of Agricultural Science and Technological Development, Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China; ² Jiangsu Key Laboratory of Crop Genetics and Physiology / Jiangsu Key Laboratory of Crop Cultivation and Physiology / Jiangsu Co-innovation Center for Modern Production Technology of Grain Crops / Agricultural College of Yangzhou University, Yangzhou 225009, Jiangsu, China

Abstract: In order to quantitatively describe the dynamics of nitrogen accumulation after transplanting of medium-maturity types of Yongyou japonica/indica hybrids (MJIH), and to elucidate the mechanism of high yield based on modelling methods, MJIH Yongyou 2640 and Yongyou 1640, japonica conventional rice (JC) Yangjing 4038 and Yangjing 4227, and indica hybrid rice (IH) Xinliangyou 6380 and Yangliangyou 6 were used to compare the differences in nitrogen uptake characteristics after transplanting in 2015 and 2016. Grain yield of MJIH averaged 11.65 t hm⁻² across two years, significantly higher than JC (10.74 t hm⁻²) and IH (10.01 t hm⁻²). Similar trends were also observed in nitrogen accumulation amount at maturity and nitrogen accumulation per 100 kg grain. For MJIH, the nitrogen accumulation and its ratio to total nitrogen accumulation at maturity was the highest in panicle, the medium in leaf, and

本研究由国家自然科学基金项目(31901448), 江苏省高等学校自然科学研究面上项目(19KJB210004)和江苏高校优势学科建设工程项目资助。

This study was supported by the National Natural Science Foundation of China (31901448), the Natural Science Foundation of the Jiangsu Higher Education Institutions of China (19KJB210004), and the Priority Academic Program Development of Jiangsu Higher Education Institutions.

* 通信作者(Corresponding authors): 周桂生, E-mail: gszhou@yzu.edu.cn; 戴其根, E-mail: qgdai@yzu.edu.cn;

第一作者联系方式: E-mail: 516060030@qq.com

Received (收稿日期): 2019-08-29; Accepted (接受日期): 2020-01-15; Published online (网络出版日期): 2020-01-24.

URL: http://kns.cnki.net/kcms/detail/11.1809.S.20200123.2228.016.html

lower in stem. For JC and IH, the nitrogen accumulation and its ratio to total nitrogen accumulation at maturity was the highest in panicle, the medium in stem, and lower in leaf. Compared with JC and IH, MJIH had higher ratio of leaf nitrogen accumulation, while lower ratio of panicle nitrogen accumulation to total nitrogen accumulation at maturity. There was a good fitness between Gompertz equation and dynamics of nitrogen accumulation of rice varieties in our study. Compared with JC and IH, MJIH had higher nitrogen accumulation amount in the early, middle and late nitrogen accumulation stages, which was due to long time of accumulation and higher accumulation rate in the middle stage, and higher nitrogen accumulation rate in the early and late stages. This study applied Gompertz equation to simulate the dynamics in nitrogen accumulation after transplanting of different rice varietal groups, and analyze the superiority of nitrogen accumulation of MJIH based on Gompertz equation.

Keywords: Yongyou *japonica/indica* hybrids; medium-maturity types; nitrogen accumulation; Gompertz equation

合理施氮是提高水稻产量的重要措施, 明确不同类型品种的氮素吸收、积累与利用特征, 可为其生产上氮肥合理运筹提供重要依据^[1-3]。当前, 就不同类型水稻品种的氮素吸收与积累差异已有相关研究报道^[4-6]。龚金龙等^[4]研究表明, 与籼型超级稻相比, 粳型超级稻在稳定生育前期氮素吸收的基础上, 大幅提高生育中、后期的氮素吸收速率和氮素积累量, 是其稳定形成较高的氮素吸收总量及高产的关键。张岳芳等^[5]总结出高氮素积累量类型籼稻品种的氮素吸收与分配特点, 即抽穗前、后植株吸氮量大, 抽穗后吸收的氮素比例较高; 抽穗期氮素在根系中的分配比例低, 茎鞘叶中的分配比例高; 成熟期植株含氮率高, 成熟期氮素在根系和穗部的分配比例较低, 茎鞘叶中的分配比例较高。前人就不同类型水稻品种氮素吸收与积累差异的研究以常规粳稻和杂交籼稻为主, 有关籼粳杂交稻的氮素吸收与积累研究较少, 尤其对目前在生产上有较高产量表现的甬优中熟籼粳杂交稻^[7-8]更是缺乏相关系统研究。

当前, 作物生长模型在拟合分析作物干物质积累^[9-11]、籽粒灌浆^[12-13]等方面已有较好的研究基础, 在作物养分积累方

面亦有较多研究^[14-17]。纪洪亭等^[14]采用 Gompertz 方程拟合超级杂交稻氮、磷、钾养分积累动态, 指出超级杂交稻养分积累优势主要在于快速增长期持续时间较长, 中后期的养分积累速率较快。韦还和等^[15]采用 Richards 方程拟合分析甬优 538 花后植株氮素积累特征表明, 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 甬优 538 花后植株氮素积累量优势主要体现在快增期。当前, 利用作物生长模型分析甬优中熟籼粳杂交稻栽后植株氮素吸收与积累的研究相对较少。本研究基于模型分析方法对水稻栽后植株氮素积累量与栽后天数进行拟合, 并利用推导出的特征参数定量分析甬优中熟籼粳杂交稻群体氮素积累特征, 旨在基于模型分析方法从氮素营养层面阐明甬优中熟籼粳杂交稻高产形成机制。

1 材料与方法

1.1 试验材料与栽培管理

以甬优中熟籼粳杂交稻甬优 2640 和甬优 1640、常规粳稻扬粳 4038 和扬粳 4227、杂交籼稻新两优 6380 和扬两优 6 号为试材。各参试品种的主要生育期及生育阶段天数见表 1。

表 1 各品种主要生育期及生育阶段天数

Table 1 Duration and dates of main growth stages of tested varieties

品种类型 Variety type	品种 Variety	主要生育期				主要生育阶段天数		
		Dates of main growth stages (month/day)				Duration of main growth periods (d)		
		播种期 Sowing date	拔节期 Jointing date	抽穗期 Heading date	成熟期 Maturity date	播种-拔节期 Sowing-Jointing	拔节-抽穗期 Jointing-Heading	抽穗-成熟期 Heading-Maturity
2015								
中熟籼粳杂交稻 MJIH	甬优 2640 Yongyou 2640	5/23	7/20	8/21	10/20	58	32	60
	甬优 1640 Yongyou 1640	5/23	7/20	8/22	10/21	58	33	60
常规粳稻 JC	扬粳 4038 Yangjing 4038	5/23	7/26	8/25	10/18	64	30	54
	扬粳 4227 Yangjing 4227	5/23	7/26	8/25	10/19	64	30	55
杂交籼稻 IH	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	5/23	7/30	8/27	10/17	68	28	51
	新两优 6380 Xinliangyou 6380	5/23	7/30	8/26	10/17	68	27	52
2016								
中熟籼粳杂交稻 MJIH	甬优 2640 Yongyou 2640	5/23	7/19	8/21	10/20	57	33	60
	甬优 1640 Yongyou 1640	5/23	7/20	8/21	10/20	58	32	60
常规粳稻 JC	扬粳 4038 Yangjing 4038	5/23	7/27	8/26	10/19	65	30	54
	扬粳 4227 Yangjing 4227	5/23	7/27	8/25	10/18	65	29	54
杂交籼稻 IH	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	5/23	7/30	8/26	10/17	68	27	52
	新两优 6380 Xinliangyou 6380	5/23	7/30	8/27	10/17	68	28	51

MJIH: medium-maturity type of *japonica/indica* hybrids; JC: *japonica* conventional rice; IH: *indica* hybrid rice.

试验于 2015—2016 年在扬州大学农学院试验农场进行。土壤类型为沙壤土, 含全氮 0.13%、碱解氮 88.2 mg kg⁻¹、速效磷 33.2 mg kg⁻¹、速效钾 87.4 mg kg⁻¹。采取完全随机区组设计, 小区面积 25 m², 2 次重复。小区间作埂隔离, 并用塑料薄膜覆盖埂体, 保证单独排灌。毯苗育秧, 秧龄 20 d, 栽插株行距为 30.0 cm × 13.2 cm。籼粳杂交稻和杂交籼稻每穴 2 苗栽插, 常规粳稻每穴 4 株苗栽插。籼粳杂交稻、常规粳稻、杂交籼稻施纯氮 262.5 kg hm⁻², 按基肥 穗粒肥 = 5 : 5 施用。各小区磷、钾肥施用量一致, 基施过磷酸钙(含 12% P₂O₅) 1125 kg hm⁻²。按基肥 穗粒肥 = 5 : 5 施氯化钾(含 60% K₂O) 450 kg hm⁻²。移栽后以湿润灌溉为主, 建立浅水层; 群体达到目标穗数的 80% 时搁田, 控制无效分蘖发生; 抽穗扬花期田间保持 3 cm 水层, 灌浆结实期间歇灌溉, 干湿交替, 收割前 7 d 断水搁田。按常规高产栽培要求防治病虫害。

1.2 测定项目与方法

2015 年, 于参试品种拔节、抽穗、抽穗后 20 d 和成熟期, 按每小区的平均茎蘖数取样, 每次取 5 穴植株。将样株分成叶、茎鞘、穗 3 个部分, 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 测定干物重。用半微量凯氏定氮法测定植株中的氮素含量。

2016 年, 栽后每隔 10 d 按每小区的平均茎蘖数取样,

每次取 5 穴植株。将样株分成叶、茎鞘、穗 3 个部分, 105℃ 杀青 30 min, 75℃ 烘干至恒重, 测定干物重。用半微量凯氏定氮法测定植株中的氮素含量。

于成熟期, 调查每小区 100 穴, 计算有效穗数, 取 20 穴调查每穗粒数、结实率和测定千粒重; 每小区实产收割面积 8 m², 脱粒后晾晒, 并称重。

1.3 计算方法与数据处理

氮素籽粒生产率(kg grain kg⁻¹) = 籽粒产量/成熟期植株氮素吸收量

百千克籽粒吸氮量(kg grain kg⁻¹) = 成熟期植株氮素吸收量 × 100 / 籽粒产量

2 结果与分析

2.1 不同类型品种产量、成熟期氮素吸收量及氮素利用率

由表 2 可知, 籼粳杂交稻两年平均产量达 11.65 t hm⁻², 显著高于常规粳稻(10.74 t hm⁻²)和杂交籼稻(10.01 t hm⁻²)。籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻成熟期植株氮素吸收量两年平均为 251.8、213.9、201.3 kg hm⁻², 籼粳杂交稻成熟期氮素吸收量较常规粳稻和杂交籼稻分别高 17.7% 和 25.1%。籼粳杂交稻百千克籽粒吸氮量(kg grain kg⁻¹)两年平均为 2.17, 显著高于常规粳稻(1.99)和杂交籼稻(2.02)。

表 2 各品种产量、成熟期氮素吸收量及氮素利用率

Table 2 Grain yield, nitrogen accumulation, and nitrogen use efficiency of tested varieties

品种类型 Variety type	品种 Variety	产量 Grain yield (t hm ⁻²)	总吸氮量 Total nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)	氮素籽粒生产率 NUEg (kg grain kg ⁻¹)	百千克籽粒吸氮量 100 kg nitrogen accumulation (kg grain kg ⁻¹)
2015					
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	11.56	250.7	46.3	2.16
	MJIH 甬优 1640 Yongyou 1640	11.64	251.7	46.1	2.17
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	10.68	210.7	50.8	1.97
	JC 扬粳 4227 Yangjing 4227	10.74	213.5	50.6	1.98
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	10.08	202.5	49.9	2.00
	IH 新两优 6380 Xinliangyou 6380	9.95	199.1	49.7	2.01
	MJIH 平均 MJIH mean	11.60 a	251.2 a	46.2 b	2.17 a
	JC 平均 JC mean	10.72 b	212.1 b	50.7 a	1.97 b
	IH 平均 IH mean	10.02 c	200.8 c	49.8 ab	2.01 ab
2016					
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	11.65	256.5	45.7	2.19
	MJIH 甬优 1640 Yongyou 1640	11.73	248.5	47.2	2.12
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	10.62	215.3	49.2	2.03
	JC 扬粳 4227 Yangjing 4227	10.87	216.1	50.5	1.98
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	10.13	202.9	49.8	2.01
	IH 新两优 6380 Xinliangyou 6380	9.88	200.6	49.3	2.03
	MJIH 平均 MJIH mean	11.69 a	252.5 a	46.5 a	2.16 a
	JC 平均 JC mean	10.75 b	215.7 b	49.9 a	2.00 a
	IH 平均 IH mean	10.00 c	201.8 c	49.6 a	2.02 a

标以不同小写字母的值在同一年份 5% 水平差异显著。

Values followed by different small letters are significantly different at the 5% probability level in the same year. MJIH: medium-maturity type of japonica/indica hybrids; JC: japonica conventional rice; IH: indica hybrid rice.

2.2 不同类型品种成熟期各器官氮素吸收量

两年中，籼粳杂交稻成熟期各器官氮素吸收量以穗部最多，叶片其次，茎鞘最少；常规粳稻和杂交籼稻则以穗部最多，茎鞘其次，叶片最少。籼粳杂交稻成熟期叶片吸氮量显著高于常规粳稻和杂交籼稻；茎鞘吸氮量则介于常规粳稻与杂交籼稻之间；穗部吸氮量与杂交籼稻持平，高于常规粳稻(表 3)。

籼粳杂交稻成熟期各器官氮素吸收量占总吸氮量

的比例呈穗部>叶片>茎鞘；常规粳稻和杂交籼稻则呈穗部>茎鞘>叶片。籼粳杂交稻成熟期植株叶片氮素吸收量所占比例(%)两年平均为 21.9，高于常规粳稻(16.5)和杂交籼稻(5.9)；成熟期茎鞘氮素吸收量所占比例以常规粳稻显著高于籼粳杂交稻和杂交籼稻；杂交籼稻穗部氮素吸收量所占比例近 82%，而籼粳杂交稻和常规粳稻穗部氮素吸收量所占比例较为接近，为 65%~ 67%(表 3)。

表 3 不同类型品种成熟期各器官氮素吸收量

Table 3 Nitrogen accumulation in rice organs at maturity of tested varieties

品种类型 Variety type	品种 Variety	总吸氮量 Total nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)	吸氮量			吸氮量所占比例		
			Nitrogen accumulation (kg hm ⁻²)			Nitrogen allocation rate (%)		
			叶片 Leaf	茎鞘 Stem	穗部 Panicle	叶片 Leaf	茎鞘 Stem	穗部 Panicle
2015								
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	250.7	53.6	32.8	164.2	21.4	13.1	65.5
MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	251.7	55.6	34.2	161.8	22.1	13.6	64.3
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	210.7	36.0	35.2	139.5	17.1	16.7	66.2
JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	213.5	33.3	36.9	143.3	15.6	17.3	67.1
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	202.5	11.9	26.5	164.0	5.9	13.1	81.0
IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	199.1	12.3	24.1	162.7	6.2	12.1	81.7
	MJIH 平均 MJIH mean	251.2 a	54.6 a	33.5 ab	163.0 a	21.8 a	13.4 b	64.9 c
	JC 平均 JC mean	212.1 b	34.7 b	36.1 a	141.4 b	16.4 b	17.0 a	66.7 b
	IH 平均 IH mean	200.8 c	12.1 c	25.3 b	163.3 a	6.1 c	12.6 b	81.4 a
2016								
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	256.5	59.8	32.6	164.1	23.3	12.7	64.0
MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	248.5	51.5	32.8	164.1	20.7	13.2	66.1
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	215.3	35.3	39.0	140.9	16.4	18.1	65.5
JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	216.1	36.1	34.8	145.3	16.7	16.1	67.2
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	202.9	12.3	25.7	164.9	6.1	12.7	81.2
IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	200.6	10.9	26.5	163.2	5.4	13.2	81.4
	MJIH 平均 MJIH mean	252.5 a	55.7 a	32.7 ab	164.1 a	22.0 a	13.0 b	65.0 c
	JC 平均 JC mean	215.7 b	35.7 b	36.9 a	143.1 b	16.6 b	17.1 a	66.3 b
	IH 平均 IH mean	201.8 c	11.6 c	26.1 b	164.0 a	5.7 c	13.0 b	81.3 a

标以不同小写字母的值在同一年份 5%水平差异显著。

Values followed by different small letters are significantly different at the 5% probability level in the same year. MJIH: medium-maturity type of japonica/indica hybrids; JC: japonica conventional rice; IH: indica hybrid rice.

2.3 水稻植株氮素积累动态模型方程的建立、检验及应用

2.3.1 水稻植株氮素积累动态模型方程的建立 籼粳杂交稻自栽后 30 d 起植株氮素吸收量均高于常规粳稻和杂交籼稻。不同类型水稻品种全生育期氮素积累动态基本一致，呈渐增、快增、缓增的趋势(图 1)。

以各品种栽后天数为自变量，群体氮素积累量为因变量，利用 Curve Expert 1.3 软件对各品种栽后天数和群体氮素吸收量之间的关系进行拟合，以甬优 2640 为例得到了包括 Gompertz、Richards、Logistic 等在内的 14 个方程，取模

拟效果较好的 6 个(相关系数均达 0.980 以上)列于表 4。

为筛选出具有生物学意义、能较好反应参试各品种栽后群体氮素积累量随时间变化的模型，分别对表 4 中的方程求极限值。模型 2， $x \rightarrow 0$ 时， y 为负值，没有生物学意义；模型 4 为模型 3 中 $d=1$ 时的一个特例，但模型 3 中的参数 b 值为负值，模拟效果较差。此外，模型 1 与模型 5 和模型 6 相比，拟合相关系数更高，模型效果更好。因此，本研究选用模型 1 即 Gompertz 方程作为各品种栽后群体氮素积累动态模型，其表达式为 $y = ae^{-e^{-bx}}$ ，式中， y 为群体氮素吸收量 (kg hm⁻²)， x 为移栽花后天数(d)， a 、 b 、 c 为常数。

图 1 水稻生长期间各类品种氮素积累动态(2016)
Fig. 1 Dynamics in nitrogen accumulation during rice growing season of tested varieties (2016)

利用 2016 年各品种栽后群体氮素积累量数据, 建立基于 Gompertz 方程的水稻栽后群体氮素积累量动态模型(表 5)。由表 5 可知, 不同类型品种氮素积累动态均以 Gompertz 方程拟合的效果较好, 拟合系数一般都在 0.995

左右。
2.3.2 水稻植株氮素积累动态模型方程的检验 利用 2015 年各品种拔节、抽穗、抽穗后 20 d 和成熟期植株群体氮素积累数据对模型进行检验。对参试的 6 个水稻品种关键生育时期的氮素积累量的模拟值与实测值进行 $y = x$ 的线性回归分析表明, 甬优 2640、甬优 1640、扬粳 4038、扬粳 4227、扬两优 6 号和新两优 6380 模拟的准确度(以 k 表示)分别为 1.027、0.954、1.015、0.927、0.974 和 1.020, 且参试品种栽后主要生育时期的氮素积累量模型值与实测值相关性均达极显著水平, 表明 Gompertz 方程可较好地拟合不同水稻品种栽后群体氮素积累动态特征(图 2)。
2.3.3 水稻植株氮素积累动态模型方程的应用 通过对 Gompertz 模型的分析, 可推导出一些具有生物学意义的特征参数。参照纪洪亭等^[14]的方法, 最大氮素积累速率($\text{kg hm}^{-2} \text{d}^{-1}$) = ac/e , 到达最大氮素积累速率的时间(d) = b/c 。籼粳杂交稻栽后植株最大氮素积累速率显著高于常规粳稻和杂交籼稻。就最大氮素积累速率出现时间而言, 常规粳稻出现时间最晚(大致在栽后 43~44 d)、籼粳杂交稻其次、杂交籼稻再其次(表 6)。

表 4 甬优 2640 栽后群体氮素积累动态模型(2016)
Table 4 Simulation equations of nitrogen accumulation after transplanting of Yongyou 2640 (2016)

编号 Number	模拟模型 Simulation model	参数 Parameter				相关系数 Correlation coefficient
		a	b	c	d	
1	$y = ae^{-e^{-bx}}$	256.26	2.10	0.0492		0.997
2	$y = \frac{ab + cx^d}{b + x^d}$	-4.10	14667.11	272.05	3.02	0.997
3	$y = \frac{a}{(1 + e^{-bx})^{\frac{1}{d}}}$	255.69	-0.0963	0.0504	0.0436	0.997
4	$y = \frac{a}{1 + be^{-cx}}$	248.28	45.87	0.0758		0.994
5	$y = ae^{-\frac{(x-b)^2}{2c^2}}$	262.51	108.99	45.02		0.982
6	$y = a + bx + cx^2$	-38.07	4.00	-0.0127		0.980

表 5 各品种全生育期氮素积累的拟合方程(2016)
Table 5 Simulation equations of nitrogen accumulation during growth period of tested varieties (2016)

品种类型 Variety type	品种 Variety	方程参数 Parameter			拟合方程 Simulated equation
		a	b	c	
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	256.26	2.10	0.0492	$W = 256.26 e^{-\exp(2.10 - 0.0492t)}$, $R^2 = 0.995$
	MJH 甬优 1640 Yongyou 1640	255.83	2.03	0.0479	$W = 255.83 e^{-\exp(2.03 - 0.0479t)}$, $R^2 = 0.994$
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	219.20	2.14	0.0486	$W = 219.20 e^{-\exp(2.14 - 0.0486t)}$, $R^2 = 0.996$
	JC 扬粳 4227 Yangjing 4227	219.21	2.35	0.0545	$W = 219.21 e^{-\exp(2.35 - 0.0545t)}$, $R^2 = 0.994$
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	203.21	2.18	0.0530	$W = 203.21 e^{-\exp(2.18 - 0.0530t)}$, $R^2 = 0.998$
	IH 新两优 6380 Xinliangyou 6380	202.97	2.04	0.0487	$W = 202.97 e^{-\exp(2.04 - 0.0487t)}$, $R^2 = 0.994$

MJH: medium-maturity type of japonica/indica hybrids; JC: japonica conventional rice; IH: indica hybrid rice.

图 2 各类品种氮素积累模拟值与实测值的关系
Fig. 2 Relationship between simulated value and measured value of nitrogen accumulation of the tested varieties
**表示在 1%水平差异显著。 ** represents significantly different at the 1% probability level.

表 6 各品种栽后植株氮素积累参数(2016)
Table 6 Parameters of nitrogen accumulation during growth period of tested varieties (2016)

品种类型 Variety type	品种 Variety	最大氮素积累速率 Maximum nitrogen accumulation rate (kg hm ⁻² d ⁻¹)	最大氮素积累速率出现时间 Time to maximum nitrogen accumulation rate (d)
中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	4.6	42.7
MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	4.5	42.4
常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	3.9	44.0
JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	4.4	43.1
杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	4.0	41.1
IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	3.6	41.9
	MJIH 平均 MJIH mean	4.6 a	42.5 a
	JC 平均 JC mean	4.2 b	43.6 a
	IH 平均 IH mean	3.8 c	41.5 a

标以不同小写字母的值在同一年份 5%水平差异显著。
Values followed by different small letters are significantly different at the 5% probability level in the same year. MJIH: medium-maturity type of japonica/indica hybrids; JC: japonica conventional rice; IH: indica hybrid rice.

水稻栽后植株群体氮素积累动态的 Gompertz 模型呈明显的三阶段增长趋势,即氮素积累阶段的渐增期为(0- t_1),快增期为(t_1 - t_2),缓增期为(t_2 -成熟期),其中 t_1 (d) = $(b - 0.9614)/c$, t_2 (d) = $(b + 0.9614)/c$ 。籼粳杂交稻在这三期氮素积累量均显著高于常规粳稻和杂交籼稻。与常规粳稻和杂交籼稻相比,籼粳杂交稻在快增期较高的氮素积累量是由于其较高的持续天数和氮素积累速率;渐增期

和缓增期较高的氮素积累量主要是由于其较高的氮素积累速率(表 7)。

3 讨论

3.1 甬优中熟类型籼粳杂交稻氮素积累与利用效率
不同类型水稻品种氮素积累量差异较大^[2,4,18-19]。吴文革等^[18]研究表明,超级中籼杂交稻氮素积累总量达

表 7 各品种栽后氮素积累渐增、快增、缓增 3 个阶段的特征(2016)

Table 7 Characteristics of nitrogen accumulation in the early, middle, and late stages of tested varieties (2016)

阶段 Stage	品种类型 Variety type	品种 Variety	天数 Days (d)	平均积累速率 ARNA (kg hm ⁻² d ⁻¹)	氮素积累量 NAA (kg hm ⁻²)	
渐增期 Early stage	中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	23.1	0.8028	18.6	
		MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	22.3	0.8313	18.5
		常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	24.3	0.6487	15.7
		JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	25.5	0.6174	15.7
	杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	23.0	0.6391	14.7	
		IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	22.1	0.6626	14.7
		MJIH 平均 MJIH mean	22.7 b	0.8171 a	18.6 a	
		JC 平均 JC mean	24.9 a	0.6331 b	15.7 b	
		IH 平均 IH mean	22.6 b	0.6508 b	14.7 c	
快增期 Middle stage	中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	39.1	3.9940	156.1	
		MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	40.1	3.8819	155.8
		常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	39.6	3.3747	133.5
		JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	35.3	3.7846	133.5
	杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	36.3	3.4118	123.8	
		IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	39.5	3.1313	123.6
		MJIH 平均 MJIH mean	39.6 a	3.9380 a	156.0 a	
		JC 平均 JC mean	37.4 b	3.5797 b	133.5 b	
		IH 平均 IH mean	37.9 b	3.2715 b	123.7 c	
缓增期 Late stage	中熟籼粳杂交稻	甬优 2640 Yongyou 2640	67.8	1.4808	100.4	
		MJIH	甬优 1640 Yongyou 1640	67.5	1.3712	92.6
		常规粳稻	扬粳 4038 Yangjing 4038	66.2	1.2351	81.7
		JC	扬粳 4227 Yangjing 4227	69.2	1.1933	82.6
	杂交籼稻	扬两优 6 号 Yangliangyou 6	70.7	1.1189	79.1	
		IH	新两优 6380 Xinliangyou 6380	68.4	1.1261	77.0
		MJIH 平均 MJIH mean	67.7 a	1.4260 a	96.5 a	
		JC 平均 JC mean	67.7 a	1.2142 b	82.2 b	
		IH 平均 IH mean	69.5 a	1.1225 b	78.1 b	

标以不同小写字母的值在同一年份 5%水平差异显著。

Values followed by different small letters are significantly different at the 5% probability level in the same year. MJIH: medium-maturity type of *japonica/indica* hybrids; JC: *japonica* conventional rice; IH: *indica* hybrid rice. ARNA: average rate of nitrogen accumulation; NAA: nitrogen accumulation amount.

196.5 kg hm⁻², 较对照汕优 63 的 176.5 kg hm⁻² 增加 20.0 kg hm⁻²。龚金龙等^[4]研究表明, 粳型超级稻氮素积累总量达 224.5 kg hm⁻², 较籼型超级稻高 32.7%。本试验条件下, 两年中籼粳杂交稻产量和植株氮素积累总量分别为 11.65 t hm⁻² 和 251.8 kg hm⁻², 均显著高于常规粳稻和杂交籼稻。就不同类型水稻品种氮素吸收利用效率方面也有较多研究报道^[3-4,20-22]。如葛梦婕等^[3]研究表明, 粳型超级稻较粳型非超级稻更耐肥, 在高肥条件下增产优势明显, 且对应的氮肥利用率也较高。龚金龙等^[4]研究表明, 粳型超级稻产量显著高于籼型超级稻; 氮素利用方面, 粳型超级稻氮素吸收利用率和农学利用率略高于籼稻, 但氮素籽粒生产效率和氮肥偏生产力显著或极显著低于籼稻。当前,

比较甬优中熟籼粳杂交稻、常规粳稻和杂交籼稻 3 类型品种间的氮素利用效率的相关报道较少。本试验条件下, 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻产量较高, 但氮素籽粒生产率较低, 表明甬优中熟籼粳杂交稻在保持较高产量优势的同时, 仍需注重其氮素利用效率的提高。

不同类型品种在氮素积累分配上存在较大差异^[4,23-24]。如董桂春等^[24]研究表明, 与小库容量类型品种相比, 大库容量类型品种吸氮能力特别是抽穗后的吸氮能力强, 成熟期氮素在营养器官中比例小、穗中比例大, 结实期茎鞘叶氮素运转量大。本试验条件下, 籼粳杂交稻成熟期叶片含氮量所占比例显著高于常规粳稻和杂交籼稻; 茎鞘含氮量所占比例与杂交籼稻持平, 低于常规粳稻; 穗部含

氮量所占比例则低于常规粳稻和杂交籼稻。与常规粳稻和杂交籼稻相比, 具有更大库容量的籼粳杂交稻成熟期植株氮素在营养器官中比例较大、穗部比例较小, 这与董桂春等^[24]研究结果相反, 这可能与试验材料差异有关。此前, 较多的研究表明^[25-26], 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻在花后灌浆阶段具有更高的叶面积指数和光合势、更多的单茎绿叶数以及较高的光合速率等, 这种较好的持绿特性使得籼粳杂交稻在成熟期植株氮素在营养器官中分配比例较高, 穗部则相对较低。

3.2 甬优中熟类型籼粳杂交稻植株氮素积累模型的建立及特征参数

因各稻作区生态以及试材品种差异, 众多作物生长模型被用于分析拟合水稻植株氮素吸收与积累特征^[14-16,27], 如纪洪亭等^[14]采用 Gompertz 方程拟合西南地区超级杂交稻氮、磷、钾养分积累动态。此外, 一些学者也采用 Richards^[15]、Logistic^[16,25] 方程对水稻植株氮素养分积累动态进行了定量模拟分析。本研究中, 就不同类型水稻品种栽后植株群体氮素积累动态的模拟而言, Gompertz 模型的参数在不同品种间变异较小, 而 Richards 模型的参数 b 和 c 在不同品种间变异较大; 此外, Gompertz 模型较 Logistic 模型拟合的效果更好。与此同时, 本研究也利用 2015 年各品种关键生育期植株氮素积累对 Gompertz 模型进行检验。因此, 本研究选择 Gompertz 模型来描述不同类型品种栽后植株氮素积累动态特征。

纪洪亭等^[14]指出超级杂交稻养分积累优势主要在于快速增长期持续时间较长, 中后期的养分积累速率较快。韦还和等^[15]研究表明, 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 甬优 538 花后氮素积累量优势体现在快增期, 甬优 538 在此期较强的氮素积累能力主要由于较长的持续天数。本试验条件下, 与常规粳稻和杂交籼稻相比, 籼粳杂交稻成熟期植株氮素积累总量高, 其在渐增期、快增期和缓增期氮素积累量均较高; 籼粳杂交稻在快增期较高的氮素积累量在于其较高的持续天数和氮素积累速率, 渐增期和缓增期较高的氮素积累量主要在于其较高的氮素积累速率。

References

- [1] Xu X P, Xie J G, Hou Y P, He P, Pampolino M F, Zhao S C, Qiu S J, Johnston A M, Zhou W. Estimating nutrient uptake requirements for rice in China. *Field Crops Res*, 2015, 180: 37–45.
- [2] Xiong J, Ding C Q, Wei G B, Ding Y F, Wang S H. Characteristics of dry-matter accumulation and nitrogen-uptake of super-high-yielding early rice in China. *Agron J*, 2013, 105: 1142–1150.
- [3] 葛梦婕, 王亚江, 颜希亭, 张洪程, 魏海燕, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 江峰, 朱聪聪. 长江中下游稻区粳型超级稻高产形成及氮素利用的研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 259–270.
Ge M J, Wang Y J, Yan X T, Zhang H C, Wei H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Jiang F, Zhu C C. Research on the formation of high yield and the nitrogen use of *japonica* super rice in the middle and lower areas of the Yangtze River. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 259–270 (in Chinese with English abstract).
- [4] 龚金龙, 邢志鹏, 胡雅杰, 张洪程, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 高辉. 籼、粳超级稻氮素吸收利用与转运差异研究. *植物营养与肥料学报*, 2014, 20: 796–810.
Gong J L, Xing Z P, Hu Y J, Zhang H C, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Gao H. Differences of nitrogen uptake, utilization and translocation between *indica* and *japonica* super rice. *J Plant Nutr Fert*, 2014, 20: 796–810 (in Chinese with English abstract).
- [5] 张岳芳, 陈培峰, 张传胜, 董桂春, 杨连新, 黄建晔, 王余龙. 不同氮素积累量类型籼稻品种氮素吸收与分配特点. *江苏农业学报*, 2010, 26: 904–909.
Zhang Y F, Chen P F, Zhang C S, Dong G C, Yang L X, Huang J Y, Wang Y L. Characteristics of nitrogen uptake and distribution in different nitrogen accumulation types of *indica* rice. *Jiangsu J Agric Sci*, 2010, 26: 904–909 (in Chinese with English abstract).
- [6] 赵敏, 胡剑锋, 钟晓媛, 张强, 周虹, 任万军. 不同基因型机插稻植株氮素积累运转特性. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21: 277–287.
Zhao M, Hu J F, Zhong X Y, Zhang Q, Zhou H, Ren W J. Differences in N accumulation and translocation in the machine-transplanted rice genotypes. *J Plant Nutr Fert*, 2015, 21: 277–287 (in Chinese with English abstract).
- [7] 孟天瑶, 李晓芸, 李超, 韦还和, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 张洪程. 甬优系列籼粳杂交稻中熟高产品系的株型特征. *中国水稻科学*, 2016, 30: 170–180.
Meng T Y, Li X Y, Li C, Wei H H, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Zhang H C. Plant-type characteristics of high-yielding lines of Yongyou *japonica/indica* hybrid rice with medium maturity. *Chin J Rice Sci*, 2016, 30: 170–180 (in Chinese with English abstract).
- [8] 胡雅杰, 朱大伟, 钱海军, 曹伟伟, 邢志鹏, 张洪程, 周有炎, 陈厚存, 汪洪洋, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 籼粳杂交稻甬优 2640 钵苗机插超高产群体若干特征探讨. *作物学报*, 2014, 40: 2016–2027.
Hu Y J, Zhu D W, Qian H J, Cao W W, Xing Z P, Zhang H C, Zhou Y Y, Chen H C, Wang H Y, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Some characteristics of mechanically transplanted pot seedlings in super high yielding population of *indica-japonica* hybrid rice Yongyou 2640. *Acta Agron Sin*, 2014, 40: 2016–2027 (in Chinese with English abstract).
- [9] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 甬优籼粳杂交稻花后干物质积累模型与特征分析. *作物学报*, 2016, 42: 265–277.
Wei H H, Meng T Y, Li C, Zhang H C, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Dynamic model and its characteristics analysis for dry matter production after heading of *indica/japonica* hybrid rice of Yongyou series. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 265–277 (in Chinese with English abstract).
- [10] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 李云, 武彪, 王小燕. 两个超级杂交水稻品种物质生产的特性. *作物学报*, 2013, 39:

- 2238–2246.
- Ji H T, Feng Y H, He T B, Li Y, Wu B, Wang X Y. Dynamic characteristics of matter production in two super hybrid rice cultivars. *Acta Agron Sin*, 2013, 39: 2238–2246 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李艳大, 汤亮, 陈青春, 张玉屏, 曹卫星, 朱艳. 水稻地上部干物质积累动态的定量模拟. *应用生态学报*, 2010, 21: 1504–1510.
- Li Y D, Tang L, Chen Q C, Zhang Y P, Cao W X, Zhu Y. Dry matter accumulation in rice aboveground part: quantitative simulation. *Chin J Appl Ecol*, 2010, 21: 1504–1510 (in Chinese with English abstract).
- [12] 张亚洁, 许德美, 孙斌, 刁广华, 林强森, 杨建昌. 种植方式对陆稻和水稻籽粒灌浆及垩白的影响. *中国农业科学*, 2005, 39: 257–264.
- Zhang Y J, Xu D M, Sun B, Diao G H, Lin Q S, Yang J C. Effects of cultivation methods on grain-filling and chalky grains of upland and paddy rice. *Sci Agric Sin*, 2005, 39: 257–264 (in Chinese with English abstract).
- [13] 朱庆森, 曹显祖, 骆亦其. 水稻籽粒灌浆的生长分析. *作物学报*, 1988, 14: 182–193.
- Zhu Q S, Cao X Z, Luo Y Q. Growth analysis on the process of grain filling in rice. *Acta Agron Sin*, 1988, 14: 182–193 (in Chinese with English abstract).
- [14] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 潘剑, 范乐乐, 李云, 武彪, 肖铭, 梁显林. 超级杂交稻群体干物质和养分积累动态模型与特征分析. *中国农业科学*, 2012, 45: 3709–3720.
- Ji H T, Feng Y H, He T B, Pan J, Fan L L, Li Y, Wu B, Xiao M, Liang X L. A dynamic model of dry matter and nutrient accumulation in super hybrid rice and analysis of its characteristics. *Sci Agric Sin*, 2012, 45: 3709–3720 (in Chinese with English abstract).
- [15] 韦还和, 孟天瑶, 李超, 张洪程, 史天宇, 马荣荣, 王晓燕, 杨筠文, 戴其根, 霍中洋, 许轲, 魏海燕, 郭保卫. 籼粳交超级稻甬优 538 花后氮素积累模型与特征分析. *作物学报*, 2016, 42: 540–550.
- Wei H H, Meng T Y, Li C, Zhang H C, Shi T Y, Ma R R, Wang X Y, Yang J W, Dai Q G, Huo Z Y, Xu K, Wei H Y, Guo B W. Dynamic model and its characteristics analysis for nitrogen accumulation after heading in Yongyou 538. *Acta Agron Sin*, 2016, 42: 540–550 (in Chinese with English abstract).
- [16] 孙成明, 庄恒扬, 杨连新, 杨洪建, 黄建晔, 董桂春, 朱建国, 王余龙. FACE 水稻氮素动态的模拟研究. *农业环境科学学报*, 2006, 25: 1408–1412.
- Sun C M, Zhuang H Y, Yang L X, Yang H J, Huang J Y, Dong G C, Zhu J G, Wang Y L. Simulation on nitrogen dynamic in FACE rice. *J Agro-Environ Sci*, 2006, 25: 1408–1412 (in Chinese with English abstract).
- [17] 任万军, 杨文钰, 伍菊仙, 樊高琼, 杨振华. 水稻栽后植株氮素积累特征及其与根系生长的关系. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13: 765–771.
- Ren W J, Yang W Y, Wu J X, Fan G Q, Yang Z H. Characteristics of nitrogen accumulation and its relationship with root growth of rice after transplanting. *J Plant Nutr Fert*, 2007, 13: 765–771 (in Chinese with English abstract).
- [18] 吴文革, 张洪程, 陈烨, 李杰, 钱银飞, 吴桂成, 翟超群. 超级中籼杂交水稻氮素积累利用特性与物质生产. *作物学报*, 2008, 34: 1060–1068.
- Wu W G, Zhang H C, Chen Y, Li J, Qian Y F, Wu G C, Zhai C Q. Dry-matter accumulation and nitrogen absorption and utilization in middle-season *indica* super hybrid rice. *Acta Agron Sin*, 2008, 34: 1060–1068 (in Chinese with English abstract).
- [19] 陈进红, 郭恒德, 毛国娟, 陶稚彪, 张国平, 赵伟明. 杂交粳稻超高产群体干物质生产及养分吸收利用特点. *中国水稻科学*, 2001, 15: 271–275.
- Chen J H, Guo H D, Mao G J, Tao Z B, Zhang G P, Zhao W M. Characteristics of dry matter production and nutrient uptake and utilization of super high yielding *japonica* hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2001, 15: 271–275 (in Chinese with English abstract).
- [20] Xu X P, He P, Zhao S C, Qiu S J, Johnston A M, Zhou W. Quantification of yield gap and nutrient use efficiency of irrigated rice in China. *Field Crops Res*, 2016, 186: 58–65.
- [21] Chen Y T, Peng J, Wang J, Fu P H, Hou Y, Zhang C D, Fahad S, Peng S B, Cui K H, Nie L X, Huang J L. Crop management based on multi-spilt topdressing enhances grain yield and nitrogen use efficiency in irrigated rice in China. *Field Crops Res*, 2015, 184: 50–57.
- [22] Ata-UI-Karim S T, Yao X, Liu X J, Cao W X, Zhu Y. Development of critical nitrogen dilution curve of *japonica* rice in Yangtze River reaches. *Field Crops Res*, 2013, 149: 149–158.
- [23] 霍中洋, 杨雄, 张洪程, 葛梦婕, 马群, 李敏, 戴其根, 许轲, 魏海燕, 李国业, 朱聪聪, 王亚江, 颜希亭. 不同氮肥群体最高生产力水稻品种各器官的干物质和氮素的积累与转运. *植物营养与肥料学报*, 2012, 18: 1035–1045.
- Huo Z Y, Yang X, Zhang H C, Ge M J, Ma Q, Li M, Dai Q G, Xu K, Wei H Y, Li G Y, Zhu C C, Wang Y J, Yan X T. Accumulation and translocation of dry matter and nitrogen nutrient in organs of rice cultivars with different productivity levels. *J Plant Nutr Fert*, 2012, 18: 1035–1045 (in Chinese with English abstract).
- [24] 董桂春, 于小凤, 董燕萍, 李进前, 田昊, 周娟, 王云霞, 杨连新, 黄建晔, 王余龙. 不同库容量类型常规粳稻品种氮素吸收与分配的差异. *中国农业科学*, 2009, 42: 3432–3441.
- Dong G C, Yu X F, Dong Y P, Li J Q, Tian H, Zhou J, Wang Y X, Yang L X, Huang J Y, Wang Y L. A difference in nitrogen uptake and distribution in conventional *indica* rice cultivars with different sink-potentials. *Sci Agric Sin*, 2009, 42: 3432–3441 (in Chinese with English abstract).
- [25] Meng T Y, Wei H H, Li X Y, Dai Q G, Huo Z Y. A better root morpho-physiology after heading contributing to yield superiority of *japonica/indica* hybrid rice. *Field Crops Res*, 2018, 228: 135–146.
- [26] Wei H H, Meng T Y, Li X Y, Dai Q G, Zhang H C, Yin X Y. Sink-source relationship during rice grain filling is associated with grain nitrogen concentration. *Field Crops Res*, 2018, 215: 23–38.
- [27] 宋桂云, 王云, 徐寿军, 侯迷红. 氮肥对西辽河平原灌区不同穗型水稻氮素吸收与分配的影响. *核农学报*, 2014, 28: 1715–1721.
- Song G Y, Wang Y, Xu S J, Hou M H. Influence of N fertilizer on N accumulation and distribution of different panicle rice in irrigated region of Xiliahe Plain. *J Nucl Agric Sci*, 2014, 28: 1715–1721 (in Chinese with English abstract).