

早稻、晚稻和中稻干物质积累及氮素吸收利用的差异

叶廷红¹, 李鹏飞¹, 侯文峰¹, 邢烈火², 吴海亚², 张建设³, 李小坤^{1*}

(1 华中农业大学资源与环境学院/农业部长江中下游耕地保育重点实验室/华中农业大学微量元素研究中心, 武汉 430070; 2 湖北省武穴市耕地质量保护与肥料管理局, 湖北武穴 435400; 3 湖北省农业技术推广总站, 武汉 430070)

摘要:【目的】阐明早稻、晚稻、中稻的干物质积累和氮素吸收利用规律及其差异, 为水稻科学施用氮肥提供理论依据。【方法】以 2000—2016 年各年份及田间试验、籼稻、目标产量最佳施肥处理等关键词, 搜集了中国知网、维普科技期刊网等数据库中发表的论文和结果。分析了早稻、晚稻和中稻的产量、氮素积累量和百千克籽粒吸氮量。基于分析结果, 于 2016 和 2017 年在湖北省武穴市大金镇布置田间试验, 测定水稻关键生育时期的干物质质量及氮含量, 计算氮积累量, 采用 Logistic 方程 $y = K / (1 + ae^{-bx})$ 拟合水稻干物质积累和氮素积累过程, 分析早稻、晚稻和中稻的干物质积累和氮素吸收利用规律。【结果】符合筛选标准的早稻、晚稻、中稻产量样本数分别为 92、116、132 个, 氮素积累量样本数分别为 55、56、55 个, 百千克籽粒吸氮量样本数分别为 50、48、54 个。试验省份包括湖北、湖南、江西、广西、江苏、安徽、浙江、福建、四川。数据分析结果显示, 早稻、晚稻和中稻平均产量分别为 7.40、7.84、8.67 t/hm²; 平均氮素积累量分别为 140.8、148.9、157.7 kg/hm²; 平均百千克籽粒吸氮量分别为 2.00、1.92、1.79 kg。两年田间试验结果表明, 早稻、晚稻和中稻干物质积累均表现为“慢—快—慢”的增长趋势。早稻、晚稻、中稻的干物质快速积累期分别在移栽后 28~54、24~54、30~63 天, 均在拔节期—灌浆期; 干物质快速积累持续时间分别为 26、30、32 天左右, 表现为中稻 > 晚稻 > 早稻。早稻、晚稻和中稻氮素积累也表现为“慢—快—慢”的增长趋势。早稻、晚稻、中稻氮素快速积累期分别在移栽后 17~41、14~46、11~43 天; 氮素快速积累持续时间分别为 24、33、32 天, 中稻和晚稻氮素快速积累持续时间比早稻长。早稻、晚稻、中稻氮素籽粒生产效率分别为 50.5~54.4、54.6~57.9、62.7~64.8 kg/kg, 中稻显著高于早稻和晚稻; 稻氮肥偏生产力分别为 41.4~47.8、56.1~58.8、61.8~62.1 kg/kg, 表现为中稻显著高于早稻。【结论】早稻、晚稻、中稻的干物质积累和氮素积累均呈“S”型曲线增长, 但其特征值不同, 中稻和晚稻的干物质快速积累持续时间和氮素快速积累持续时间比早稻长, 有助于吸收较多的养分, 积累较多的干物质。3 种水稻的产量水平和氮素积累量均表现为中稻 > 晚稻 > 早稻, 因此在施肥决策时应考虑早稻、晚稻、中稻的生长情况和养分需求特点, 中稻氮肥投入要比早稻和晚稻略高。

关键词: 早稻; 晚稻; 中稻; 氮素积累; 氮素利用效率

Differences in dry matter accumulation and nitrogen absorption and utilization among early, late and middle rice

YE Ting-hong¹, LI Peng-fei¹, HOU Wen-feng¹, XING Lie-huo², WU Hai-ya², ZHANG Jian-she³, LI Xiao-kun^{1*}

[1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University/Key Laboratory of Arable Land Conservation (Middle and Lower Reaches of Yangtze River), Ministry of Agriculture/ Microelement Research Center, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Wuxue Bureau of Cultivated Land Quality Protection and Fertilizer Management, Wuxue, Hubei 435400, China; 3 Agricultural Technology Extension Station of Hubei Province, Wuhan 430070, China]

Abstract: 【Objectives】 The pattern of dry matter accumulation, N absorption and utilization of early, late and middle rice were summarized, to provide a theoretical basis for scientific application of nitrogen fertilizer.

【Methods】 We collected data from China National Knowledge Infrastructure Database and China Science and Technology Journal Database. The searched key words included year 2000—2016, field experiment, indica

收稿日期: 2019-02-20 接受日期: 2019-07-19

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(201503123); 中央高校基本科研业务费专项资金(2662017JC010)。

联系方式: 叶廷红 E-mail: yth@webmail.hzau.edu.cn; * 通信作者 李小坤 E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn

rice, optimum fertilizer treatment for best target yield, etc. We analyzed the yield, N accumulation and uptake for 100 kg grain production in early, late and middle rice. Based on above results, field trials were carried out in Dajin Town, Wuxue City, Hubei Province, in 2016 and 2017. The dry matter weight and N content in the key growth period of rice were determined, and the N accumulation was calculated. The logistic equation $y = K / (1 + ae^{-bt})$ was used to fit the dry matter and N accumulation process of rice, to studied the dry matter accumulation and N absorption and utilization of early, late and middle rice. 【 **Results** 】 The qualified sample number for early, late and middle rice were 92, 116 and 132; for N accumulation were 55, 56 and 55; for N uptake per 100 kg grain were 50, 48 and 54. The experiments covered provinces of Hubei, Hunan, Jiangxi, Guangxi, Jiangsu, Anhui, Zhejiang, Fujian and Sichuan. From the published literature the average yields of early, late and middle rice were 7.40, 7.84 and 8.67 t/hm², respectively; the average N accumulation were 140.8, 148.9 and 157.7 kg/hm²; the N uptake for 100 kg grains were 2.00, 1.92 and 1.79 kg, respectively. Our field trial results showed that the dry matter accumulation of early, late and middle rice were in line with the growth trend of “slow-fast-slow”, and the rapid accumulation period of dry matter were 28–54 days, 24–54 days and 30–63 days after transplanting, all in jointing–filling stage. The duration of dry matter accumulation were 26 days, 30 days and 32 days, respectively, and in order of middle rice > late rice > early rice. The N accumulation of early, late and middle rice all showed a trend of “slow-fast-slow”. The rapid N accumulation period were 17–41 days, 14–46 days and 11–43 days after transplanting. Duration of N accumulation were 24 days, 33 days and 32 days, respectively. The rapid accumulation of N in middle and late rice were longer than that in early rice. The N use efficiency for grain output of early, late and middle rice were 50.5–54.4 kg/kg, 54.6–57.9 kg/kg and 62.7–64.8 kg/kg, and that of middle rice was significantly higher than early and late rice. The N partial productivity were 41.4–47.8 kg/kg, 56.1–58.8 kg/kg, 61.8–62.1 kg/kg, that of middle rice was significantly higher than early rice. 【 **Conclusions** 】 The dry matter and nitrogen accumulation process of early, late and middle rice are accordant and all in “S” shape, however, the intensity of dry matter and nitrogen accumulation are different. The duration of rapid accumulation of dry matter and nitrogen accumulation in middle and late rice are longer than that of early rice, so they can absorb more nutrients and accumulate more dry matter. And the yield level and nitrogen uptake are in order of middle rice > late rice > early rice, indicating that middle rice need more nitrogen input than early rice and late rice.

Key words: early rice; late rice; middle rice; nitrogen accumulation; nitrogen use efficiency

水稻 (*Oryza sativa* L.) 是重要的粮食作物之一, 在全球粮食生产和消费中具有举足轻重的地位^[1-2]。因特殊的地理位置及丰富的光温资源, 我国华南、华中、西南等地区存在独特的单双季稻混作区^[3], 单季稻生育期长产量水平高, 但面临着自身呼吸消耗大、病虫害和植株倒伏等风险^[4]; 双季稻能够通过提高复种指数维持水稻总产, 但其劳动强度大、经济效益低^[5]。因此, 如何科学地种植单双季稻, 有效保障每季水稻产量, 是提高粮食生产能力的重要途径之一。

氮肥施用是实现水稻增产的有效措施之一^[6], 合理施用氮肥水稻增产达 38.9%~52.0%^[7-9]。但在生产实践中, 氮肥用量过大、施肥时期不合理等现象时有发生^[10], 不仅造成氮肥利用率低下, 影响水稻生产成本^[11], 还引发了水体富营养化和大气污染等一系列

环境问题^[12]。前人研究表明, 保证施肥时间和氮肥施用量与作物对氮的需求一致, 能有效提高氮肥利用效率^[13]。因此, 明确早稻、晚稻、中稻生长发育过程对氮素的需求特征, 增强关键时期养分管理, 有利于提高水稻的氮素利用效率。

水稻的干物质积累是产量形成的基础^[14], 干物质积累又与其体内的营养状况密切相关, 其中, 以氮的积累最为突出^[15]。植物体内氮素营养状况直接影响了光合速率和光合产物的积累分配, 最终影响水稻产量^[16]。水稻干物质积累和氮素吸收利用受多种因素影响, 包括基因型^[17-20]、氮肥用量^[17, 20]、氮肥类型^[21]等。前人已经开展了大量关于水稻干物质积累和氮素吸收利用方面的研究, 但这些研究大多是从单一品种或单个季型出发, 并未把不同季节生态型水稻作为一个体系展开研究。早稻、晚稻、中稻具有不

同的生育期和温光反应特性,其生长期间的温光资源也有差异,它们的干物质积累过程以及对氮素的吸收利用可能不同,关于这3种类型水稻干物质积累和氮素吸收利用的共性和差异还不明确。本研究通过查阅大量文献数据,分析了早稻、晚稻和中稻的产量、氮素积累量、百千克籽粒吸氮量等特征参数的差异,进而布置田间试验研究3种水稻在生长发育过程中的干物质积累和氮素吸收利用情况,并采用 Logistic 方程拟合水稻干物质积累和氮素积累过程,阐明早稻、晚稻、中稻在干物质积累和氮素吸收方面的差异,以期水稻科学施用氮肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 文献数据分析

查阅中国知网、维普科技期刊网等数据库,收集已发表的早稻、晚稻、中稻产量和氮素积累数据。为了保证数据的代表性,对文献数据进行筛选,选择标准如下:1)文献中报道的数据来源于2000—2016年间进行的田间试验;2)水稻品种属于籼稻;3)选取基于土壤养分供应和目标产量条件下的最佳施肥处理,所用肥料分别为尿素、过磷酸钙和氯化钾。符合以上筛选标准的早稻、晚稻、中稻产量样本数分别为92、116、132个,氮素积累量样本数分别为55、56、55个,百千克籽粒吸氮量样本数分别为50、48、54个。试验省区包括湖北、湖南、江西、广西、江苏、安徽、浙江、福建、四川。统计各试验的水稻产量、氮素积累量和百千克籽粒吸氮量,并进行分析。

1.2 试验设计

该试验是基于文献数据分析结果展开的,用于探究早稻、晚稻、中稻在干物质积累及氮素积累过程中的差异。于2016和2017年在湖北省武穴市大

金镇周干村进行田间试验。早稻、晚稻、中稻供试土壤均为水稻土,在基肥施用前一天取基础土样,测定土壤中有有机质、全氮、有效磷和速效钾的含量以及土壤 pH,其基本理化性质见表1。

将早稻、晚稻、中稻作为3个处理,进行田间试验,每季试验设置3个重复,小区面积20 m²,早稻和晚稻移栽密度为30万蔸/hm²,中稻为27万蔸/hm²,各季水稻的移栽时间如表2所示,采用相同的田间管理模式。供试肥料为尿素(含N 46%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12%)、氯化钾(含K₂O 60%),其中氮肥50%作基肥,25%作分蘖肥,25%作穗粒肥,磷肥和钾肥全部作为基肥施用,具体施肥时间见表2。氮(N)、磷(P₂O₅)、钾(K₂O)肥的用量分别为165、75和75 kg/hm²。供试水稻品种如下:早稻为鄂早18,晚稻为丰源优299,中稻为深两优5814,均属于籼稻品种。早稻和中稻前茬作物为油菜,晚稻前茬作物为早稻。水稻生长期气温降水如图1所示。

1.3 样品采集及测定

分别于早稻、晚稻、中稻生长的各个时期(移栽当天、分蘖期、拔节期、孕穗期、灌浆期、完熟期)取样,具体依生育期而定(表2)。每次每小区取5蔸有代表性的植株,取样时采取齐地割,将样品洗净,根据植株器官发育情况分籽粒和稻草两个部位于105℃杀青30 min,60℃恒温烘干称重。磨细过0.50 mm筛后测定氮含量。

采用H₂SO₄-H₂O₂消煮,流动注射分析法(SEAL AA3,德国)测定各部位全氮含量。

1.4 计算方法

参考崔党群^[22]的方法,用 Logistic 方程模型 $y = K/(1 + ae^{-bt})$ 拟合水稻干物质积累和氮素积累过程(y 为干物质积累量或氮素积累量, t 为移栽后天数, K 为常量, a 和 b 为回归参数),用于推算水稻生长

表1 土壤基本理化性质

Table 1 Basic physical and chemical properties of soil

年份 Year	水稻类型 Rice type	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
2016	早稻 Early rice	4.9	19.1	1.4	7.2	106.0
	晚稻 Late rice	4.9	21.2	2.0	14.7	61.3
	中稻 Middle rice	5.4	24.5	1.6	23.8	155.0
2017	早稻 Early rice	6.2	22.3	1.8	8.2	51.0
	晚稻 Late rice	6.3	40.2	2.2	8.2	150.0
	中稻 Middle rice	5.9	33.5	1.1	14.7	103.0

表 2 早稻、晚稻、中稻追肥和取样时间 (month/day)
Table 2 The top dressing and sampling time of early, late and middle rice

生育期 Growing stage	2016			2017		
	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	中稻 Middle rice	早稻 Early rice	晚稻 Late rice	中稻 Middle rice
移栽 Transplanting	5/4	7/28	7/2	5/1	7/29	6/22
分蘖期 Tillering stage	5/26	8/18	7/19	5/18	8/22	7/12
拔节期 Jointing stage	6/2	9/6	8/1	6/2	8/31	8/2
孕穗期 Booting stage	6/17	9/13	8/18	6/18	9/15	8/20
灌浆期 Filling stage	6/29	10/10	9/14	6/29	10/12	9/10
完熟期 Ripening stage	7/21	10/28	10/5	7/22	10/26	9/25
分蘖肥 Tiller fertilizer	5/14	8/5	7/10	5/10	8/8	7/1
穗肥 Panicle fertilizer	6/17	9/13	8/18	6/19	9/15	8/20

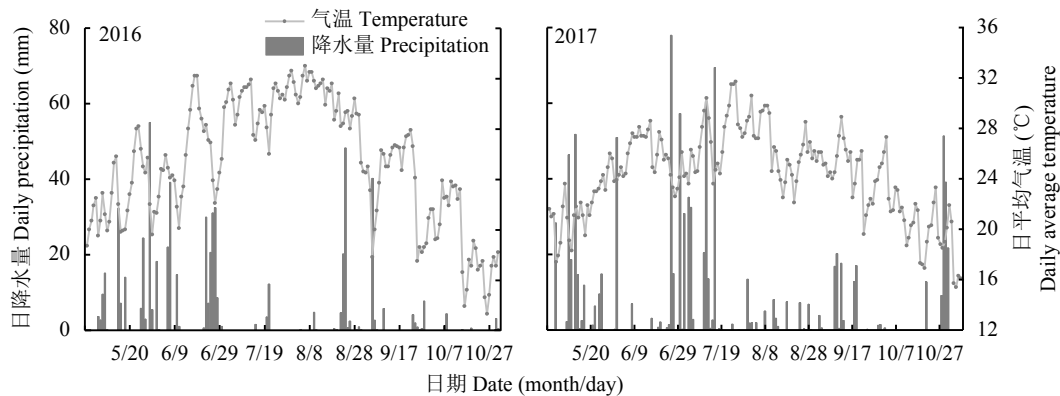


图 1 水稻生育期内气温降水动态

Fig. 1 Dynamics of temperature and precipitation in rice growing period

发育的 3 个关键点: 始盛期 $t_1 = (\ln a - 1.317)/b$ 、高峰期 $t_2 = \ln a/b$ 和盛末期 $t_3 = (\ln a + 1.317)/b$, 并根据 3 个点将水稻生长过程分为渐增期 ($0 \sim t_1$)、快增期 ($t_1 \sim t_3$)、缓增期 ($t_3 \sim \infty$)。其他指标计算如下:

氮素积累量 (kg/hm^2) = 某器官干物质重 \times 某器官氮含量;

百千克籽粒吸氮量 (kg) = 植株总吸氮量/籽粒产量 $\times 100$;

氮素收获指数 (%) = 籽粒氮素积累量/植株地上部氮素积累量 $\times 100$;

氮肥偏生产力 (kg/kg) = 水稻籽粒产量/施氮量;

氮素籽粒生产效率 (kg/kg) = 籽粒产量/植株地上部氮素积累量。

1.5 数据分析

采用 Microsoft Office 2013、Origin 8.0 等软件进行数据处理和画图, 采用 SPSS18.0 进行差异显著性检验 (LSD 法)。

2 结果与分析

2.1 产量、氮素积累量和百千克籽粒吸氮量

文献数据分析结果 (图 2) 显示, 中稻、晚稻、早稻的平均产量分别为 8.67、7.84、7.40 t/hm^2 , 中稻和晚稻分别比早稻高 17.2% 和 5.9%; 早稻、晚稻、中稻产量主要集中分布在 6.9~7.9、7.1~8.5、8.1~9.4 t/hm^2 。早稻、晚稻、中稻平均氮素积累量分别为 140.8、148.9、157.7 kg/hm^2 , 其中, 晚稻和中稻氮素积累量比早稻分别高了 5.8% 和 12.0%, 说明产量较高的水稻, 其吸收的营养也比较多。早稻、晚稻、中稻氮素积累主要集中分布在 127~152、121~174、138~168 kg/hm^2 , 分别有 10.9%、26.8%、14.5% 的试验氮素积累量超过 174 kg/hm^2 。早稻、晚稻、中稻百千克籽粒吸氮量平均值分别为 2.00、1.92、1.79 kg , 表明获得相同的产量, 早稻需要吸收的氮最多, 中稻则最少, 说明中稻对氮素的利用能力较强。早稻

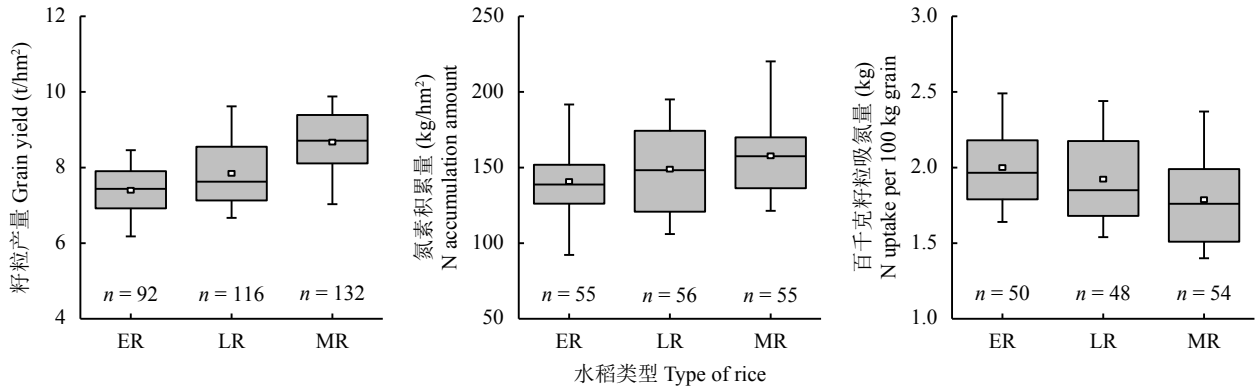


图 2 早稻、晚稻、中稻产量、氮素积累量和百千克籽粒吸氮量

Fig. 2 Yield, N accumulation and N uptake per 100 kg grain of early rice, late and middle rice

[注 (Note) : ER—早稻 Early rice; LR—晚稻 Late rice; MR—中稻 Middle rice; 图中灰色箱子下端和上端分别表示 25% 和 75% 点位, 中间实线代表中位数, 空心点代表平均值, 箱子外的上下两条水平短线分别表示 95% 和 5% 点位 The lower and upper ends of the grey box in the figure represent 25% and 75% points, respectively, the middle solid line represents the median, the hollow point represents the average value, and the upper and lower short lines outside box represent 95% and 5% points, respectively.]

百千克籽粒吸氮量主要集中在 1.8~2.2 kg, 晚稻和中稻主要集中在 1.7~2.2、1.5~2.0 kg。

2.2 基于 Logistic 方程的早稻、晚稻、中稻干物质积累动态

早稻、晚稻、中稻整株干物质积累过程均呈

“S”型曲线。随着生育进程推进, 水稻干物质积累量逐渐增加, 呈现“慢—快—慢”的增长趋势, 收获时水稻干物质总积累量表现为中稻 > 晚稻 > 早稻 (图 3)。采用 Origin 软件进行 Logistic 生长曲线的模拟 (表 3), 早稻、晚稻、中稻干物质积累的方程均达

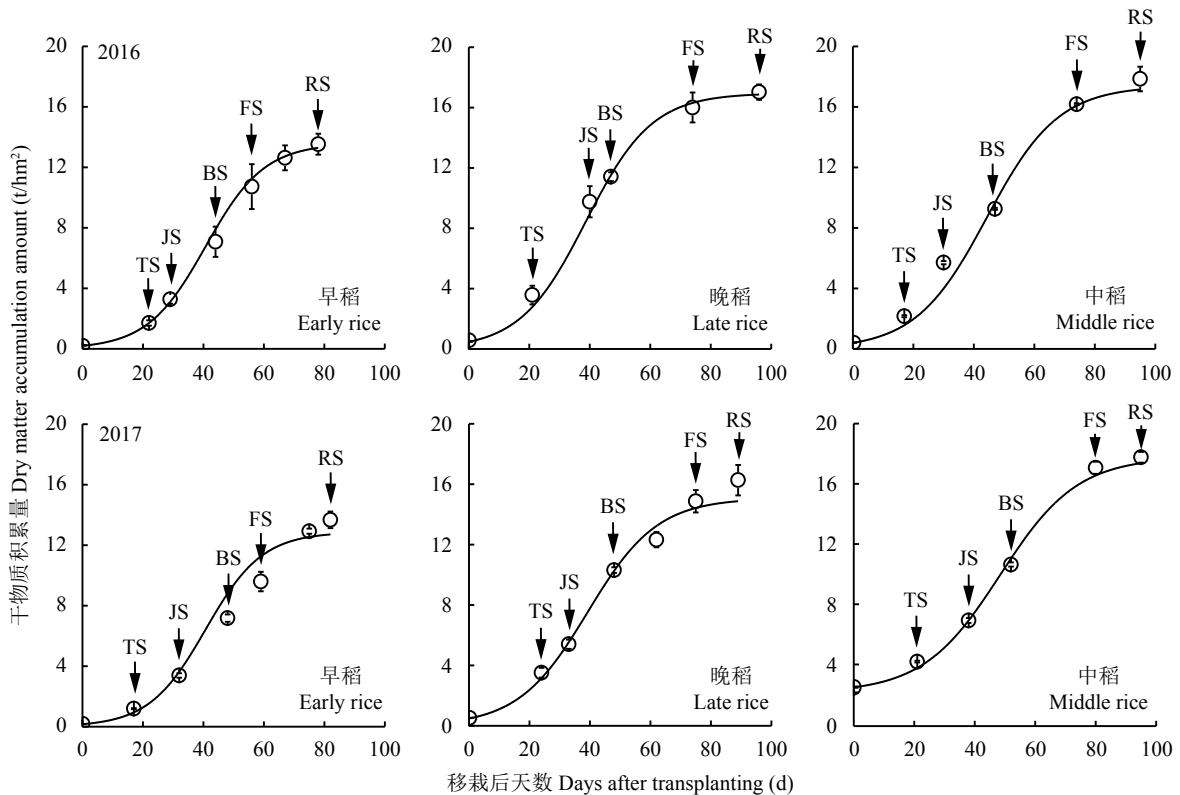


图 3 早稻、晚稻、中稻干物质积累动态

Fig. 3 Dynamics of dry matter accumulation of early, late and middle rice

[注 (Note) : TS—分蘖期 Tillering stage; JS—拔节期 Jointing stage; BS—孕穗期 Booting stage; FS—灌浆期 Filling stage; RS—完熟期 Ripening stage; 0—移栽当天 The day of transplanting.]

表 3 早稻、晚稻、中稻干物质积累的 Logistic 模型及其特征值

Table 3 The Logistic model and characteristic value of dry matter accumulation of early, late and middle rice

年份 Year	水稻类型 Rice type	方程 Formula	t_1 (d)	t_2 (d)	t_3 (d)	Δt (d)	v_m [t/(hm ² ·d)]	R^2
2016	早稻 Early rice	$y = 13.58/(1 + 66.98e^{-0.10x})^{**}$	28	41	54	26	0.35	0.998
	晚稻 Late rice	$y = 16.96/(1 + 34.81e^{-0.09x})^{**}$	24	39	53	29	0.39	0.998
	中稻 Middle rice	$y = 17.39/(1 + 42.46e^{-0.08x})^{**}$	29	44	60	31	0.37	0.990
2017	早稻 Early rice	$y = 12.87/(1 + 76.85e^{-0.11x})^{**}$	28	41	53	25	0.34	0.969
	晚稻 Late rice	$y = 15.07/(1 + 30.30e^{-0.09x})^{**}$	24	39	54	30	0.33	0.998
	中稻 Middle rice	$y = 17.50/(1 + 44.40e^{-0.08x})^{**}$	32	48	65	33	0.34	0.983

注 (Note): **— $P < 0.01$; t_2 —干物质积累最大速率出现时间 (高峰期) The time for maximum rate of dry matter accumulation occurring (peak period); t_1 和 t_3 分别为干物质快速积累开始 (始盛期) 和结束 (盛末期) 期 t_1 and t_3 are the begining and end time of the rapid accumulation of dry matter; Δt —干物质快速积累持续时间 The lasting period of dry matter rapid accumulation; v_m —干物质最大增长速率 The maximum growth rate of dry matter.

到极显著 ($P < 0.01$)。从两年数据可以看出, 早稻、晚稻、中稻干物质快速积累持续时间分别为 26、30、32 天左右, 表现为中稻 > 晚稻 > 早稻。3 种水稻干物质快速积累的 3 个关键点不同, 晚稻开始较早, 而早稻和中稻稍靠后。

2016 年, 早稻干物质积累渐增期和快增期分别在移栽后 0~28 和 28~54 天, 积累的干物质量占全生育期的 19.7% 和 56.2%; 干物质积累高峰期在移栽后 41 天, 速率为 0.35 t/(hm²·d)。晚稻干物质快速积累期在移栽后 24~53 天, 积累了全生育期 57.0% 的干物质, 最大积累速率出现在移栽后 39 天, 为 0.39 t/(hm²·d)。中稻干物质快速积累期在移栽后 29~60 天, 积累了全生育期 55.0% 的干物质量; 高峰期在移栽后 44 天, 积累速率为 0.37 t/(hm²·d)。

2017 年, 早稻干物质快速积累期在移栽后 28~53 天, 在此期间的平均积累速率为 0.31 t/(hm²·d); 晚稻和中稻的干物质快速积累期分别在移栽后 24~54 和 32~65 天, 平均积累速率分别为 0.29、0.31 t/(hm²·d)。早稻、晚稻、中稻的干物质积累高峰期分别在移栽后 41、39、48 天, 对应的速率分别为 0.34、0.33、0.34 t/(hm²·d)。3 种水稻在渐增期、快增期、缓增期积累的干物质量占全生育期百分比比较接近, 平均为 21.1%、57.5%、21.4%。

2.3 基于 Logistic 方程的早稻、晚稻、中稻氮素积累动态

随着生育进程推进, 水稻氮素积累量逐渐增加, 呈现“慢—快—慢”的增长趋势 (图 4)。采用 Logistic 方程拟合早稻、晚稻、中稻氮素积累过程 (表 4), 方程均极显著 ($P < 0.01$)。中稻和晚稻氮素快

速积累持续时间无明显差异, 均比早稻长。3 种水稻氮素快速积累的 3 个关键点不同, 晚稻和中稻开始较早, 早稻稍靠后。

2016 年, 早稻在移栽后 15 天进入氮素快速积累期, 在移栽后 40 天结束快速积累, 快增期持续时间为 24 天, 积累的氮素量占全生育期的 58.1%, 平均积累速率 3.2 kg/(hm²·d); 氮素积累高峰期出现在移栽后 27 天, 最大积累速率为 3.6 kg/(hm²·d)。晚稻的氮素积累渐增期在移栽后 0~14 天, 氮素快速积累期在移栽后 14~46 天, 最大积累速率出现在移栽后 30 天, 为 3.5 kg/(hm²·d), 在快增期积累的氮素量占全生育期的 55.1%, 平均积累速率 2.9 kg/(hm²·d)。中稻有 59.8% 的氮素集中积累在移栽后 11~42 天, 氮素积累高峰期在移栽后 26 天, 此时积累速率为 3.2 kg/(hm²·d)。

2017 年, 早稻氮素快速积累期在移栽后第 18~42 天, 在此期间的平均积累速率为 3.0 kg/(hm²·d), 最大积累速率出现在移栽后 30 天, 为 3.4 kg/(hm²·d); 晚稻和中稻的氮素快速积累始盛期分别在移栽后 13 和 11 天, 盛末期分别为移栽后 46 和 43 天, 平均增速为 2.7、2.6 kg/(hm²·d), 氮素积累高峰期在移栽后 30 [3.0 kg/(hm²·d)]、27 [3.0 kg/(hm²·d)] 天。3 种水稻在渐增期、快增期、缓增期积累的氮素比例为 21.1%、57.6%、21.3%, 以快增期积累最多, 渐增期和缓增期积累量相差不大。综上, 早稻、晚稻、中稻的氮素积累快增期均早于干物质积累快增期, 且干物质快速积累始盛期在氮素积累高峰期前后。

2.4 干物质和氮素积累量

完熟期, 晚稻和中稻的生物量、籽粒产量和氮

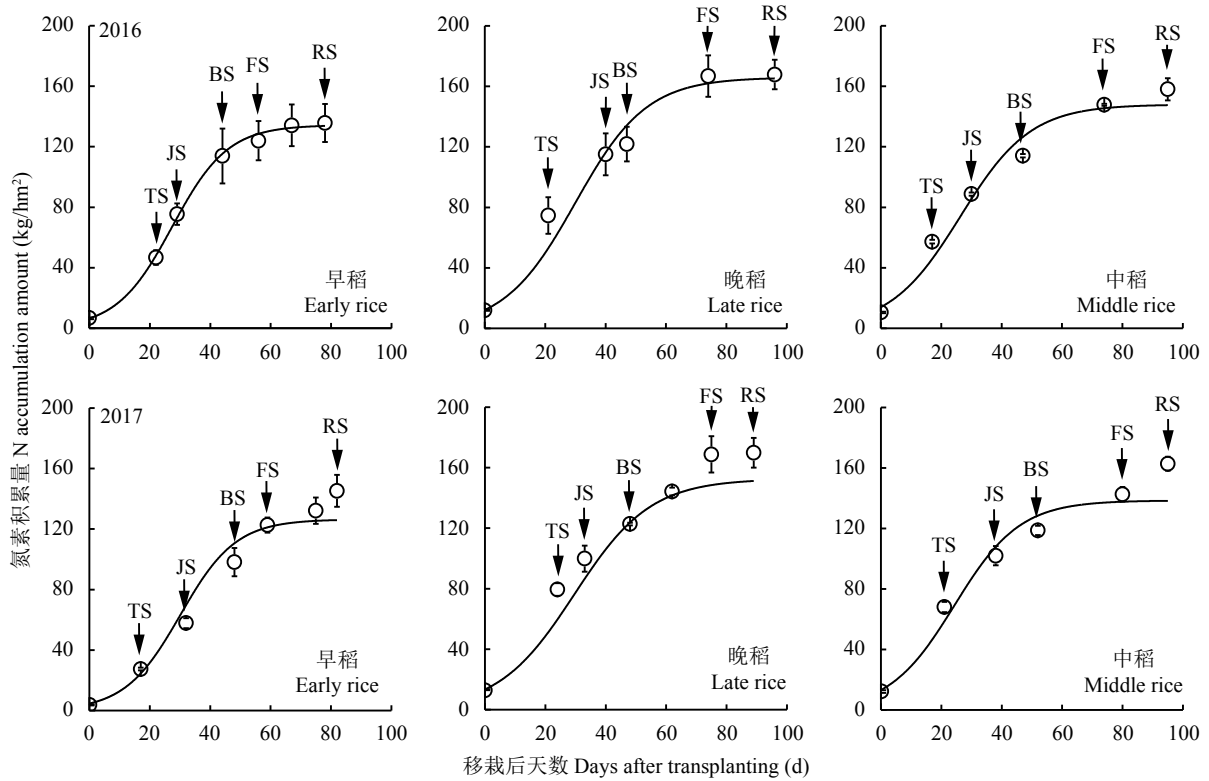


图 4 早稻、晚稻、中稻的氮素积累动态

Fig. 4 Dynamics of N accumulation of early, late and middle rice

[注 (Note) : TS—分蘖期 Tillingering stage; JS—拔节期 Jointing stage; BS—孕穗期 Booting stage; FS—灌浆期 Filling stage; RS—完熟期 Ripening stage; 0—移栽当天 The day of transplanting.]

表 4 早稻、晚稻、中稻氮素积累的 Logistic 模型及其特征值

Table 4 The Logistic model and characteristic value of N accumulation of early, late and middle rice

年份 Year	水稻类型 Rice type	方程 Formula	t_1 (d)	t_2 (d)	t_3 (d)	Δt (d)	v_m [kg/(hm ² ·d)]	R^2
2016	早稻 Early rice	$y = 134/(1 + 19.64e^{-0.11t})^{**}$	15	27	40	24	3.6	0.999
	晚稻 Late rice	$y = 166/(1 + 12.63e^{-0.08t})^{**}$	14	30	46	31	3.5	0.986
	中稻 Middle rice	$y = 148/(1 + 9.59e^{-0.09t})^{**}$	11	26	42	31	3.2	0.985
2017	早稻 Early rice	$y = 126/(1 + 26.39e^{-0.11t})^{**}$	18	30	42	24	3.4	0.971
	晚稻 Late rice	$y = 153/(1 + 10.42e^{-0.08t})^{**}$	13	30	46	33	3.0	0.997
	中稻 Middle rice	$y = 146/(1 + 9.68e^{-0.08t})^{**}$	11	27	43	32	3.0	0.973

注 (Note) : **— $P < 0.01$; t_2 —氮素积累最大速率出现时间 (高峰期) The time for maximum rate of N accumulation occurring (peak period); t_1 和 t_3 分别为氮素快速积累开始 (始盛期) 和结束 (盛末期) 的时间 t_1 and t_3 are the time when the rapid accumulation of nitrogen begin (initiation period) and end (end period); Δt —氮素快速积累持续时间 The lasting period for rapid N accumulation; v_m —氮素最大增长速率 The maximum rate of N increase.

素积累量没有明显差异, 均显著高于早稻 (表 5)。晚稻、中稻在两年中的平均干物质积累量分别为 16.65 和 17.67 t/hm², 比早稻 (13.60 t/hm²) 分别高出 22.4% 和 29.9%。早稻、晚稻、中稻的整株氮素积累量分别为 140.5、168.5、160.5 kg/hm², 早稻显著低

于晚稻和中稻。氮素积累量主要集中在籽粒中, 占整株总积累量的 56.2%~74.1%。

2.5 氮素利用效率

早稻、晚稻、中稻的百千克籽粒吸氮量分别为 1.8~2.0、1.7~1.8、1.5~1.6 kg (表 6), 早稻和晚稻

表 5 早稻、晚稻、中稻籽粒和全株干物质和氮素积累量
Table 5 Dry matter and N accumulation in grain and whole plant of early, late and middle rice

年份 Year	水稻类型 Rice type	干物质 Dry matter (t/hm ²)		氮素 N (kg/hm ²)	
		籽粒 Grain	整株 Total	籽粒 Grain	整株 Total
2016	早稻 Early rice	6.83 ± 0.44 b	13.53 ± 0.70 b	76.2 ± 7.8 b	135.7 ± 12.6 b
	晚稻 Late rice	9.70 ± 0.25 a	17.03 ± 0.51 a	124.3 ± 7.9 a	167.8 ± 9.7 a
	中稻 Middle rice	10.25 ± 0.67 a	17.85 ± 0.82 a	112.7 ± 6.3 a	158.0 ± 7.3 a
2017	早稻 Early rice	7.89 ± 0.34 b	13.68 ± 0.55 b	99.1 ± 9.2 b	145.3 ± 10.6 b
	晚稻 Late rice	9.26 ± 0.83 a	16.26 ± 1.01 a	116.8 ± 3.4 a	169.9 ± 9.8 a
	中稻 Middle rice	10.20 ± 0.14 a	17.50 ± 0.40 a	117.3 ± 4.6 a	162.8 ± 4.6 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示不同水稻类型间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant difference among different rice types at the 5% level.

表 6 早稻、晚稻、中稻的氮素利用效率
Table 6 Nitrogen use efficiency of early, late and middle rice

年份 Year	水稻类型 Rice type	百千克籽粒吸氮量 (kg) N uptake per 100 kg grain	氮素收获指数 (%) N harvest index	氮肥偏生产力 (kg/kg) N partial factor productivity	氮素籽粒生产效率 (kg/kg) N use efficiency for grain output
2016	早稻 Early rice	2.0 ± 0.1 a	56.2 ± 3.3 b	41.4 ± 2.7 b	50.5 ± 3.2 c
	晚稻 Late rice	1.7 ± 0.1 b	74.1 ± 0.9 a	58.8 ± 1.5 a	57.9 ± 3.0 b
	中稻 Middle rice	1.5 ± 0.0 c	71.3 ± 0.9 a	62.1 ± 4.1 a	64.8 ± 1.3 a
2017	早稻 Early rice	1.8 ± 0.1 a	68.2 ± 2.0 a	47.8 ± 2.1 b	54.4 ± 2.8 b
	晚稻 Late rice	1.8 ± 0.2 a	68.9 ± 2.7 a	56.1 ± 5.0 a	54.6 ± 4.6 b
	中稻 Middle rice	1.6 ± 0.1 b	72.0 ± 1.6 a	61.8 ± 0.8 a	62.7 ± 1.3 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示不同水稻类型间差异达到 5% 显著水平 Values followed by different letters in a column are significant difference among different rice types at the 5% level.

显著高于中稻。2016 年, 中稻和晚稻的氮素收获指数没有明显差异, 均显著高于早稻; 但在 2017 年早稻、晚稻、中稻的氮素收获指数没有显著差异。氮肥偏生产力反应的是土壤基础养分水平和肥料施用量之间的综合效应, 本试验中, 晚稻 (56.1~58.8 kg/kg) 和中稻 (61.8~62.1 kg/kg) 的氮肥偏生产力无显著差异, 均显著高于早稻 (41.4~47.8 kg/kg)。早稻、晚稻、中稻的氮素籽粒生产效率分别为 50.5~54.4 kg/kg、54.6~57.9 kg/kg、62.7~64.8 kg/kg, 其中, 早稻和晚稻显著低于中稻。

3 讨论

3.1 早稻、晚稻和中稻的干物质积累

水稻产量和氮素吸收利用受到基因型^[23-24]、施氮量^[17, 20]、环境因子^[25]等的影响, 因此, 本研究为了排除上述因子产生的影响, 首先利用中国知网、维普科技期刊网等数据库, 统计分析了早稻、晚稻、中

稻产量和氮素吸收利用的差异。在此基础上, 利用湖北省早稻、晚稻、中稻主推品种进行田间试验, 剖析早稻、晚稻、中稻在产量形成和氮素吸收过程中的差异。统计数据表明, 水稻平均产量和平均氮素积累量均表现为中稻 > 晚稻 > 早稻, 百千克籽粒吸氮量表现相反趋势, 这和 Xu 等^[26]研究结果一致。田间试验结果也符合上述趋势, 但中稻和晚稻的产量和氮素积累量无显著差异, 可能是因为本研究所采用的晚稻品种产量略高。

物质生产是水稻产量形成的基础, 水稻产量的形成过程, 实际上就是干物质生产与分配的过程^[27]。前人研究表明, 基因型和环境因子会影响水稻的干物质和氮素积累过程, 这些影响因素反映到 Logistic 模型上就是参数的变化^[28]。早稻、晚稻和中稻由于品种、生育期、生长期间的气候条件等不同, 其干物质形成过程和氮素吸收会有差异, 因此, 建立 Logistic 模型模拟水稻生长过程, 有助于了解 3 种水稻干物

质积累过程中的特点和差异。本研究结果表明,早稻、晚稻、中稻的干物质积累过程均呈“S”型增长,但其特征值不同,即干物质快速积累的始盛期、高峰期、盛末期以及积累速率和积累量均有差异,表现出各自的特点。早稻、晚稻、中稻的干物质积累快增期分别在移栽后 28~54、24~54、30~63 天,晚稻开始较早,而早稻和中稻稍靠后,这可能跟气候条件有关。早稻移栽期一般在 4 月下旬到 5 月上旬,中稻一般在 5 月下旬到 6 月中旬,此时气温较低,水稻的返青和生长较慢,干物质积累慢;而晚稻移栽时气温较高,光照充足,植株体内代谢较强,能快速分蘖并进入拔节期,开始干物质快速积累。早稻、晚稻、中稻干物质积累高峰期出现的时间(即移栽后天数)不同,但对应的生育时期均在孕穗期,与邓飞等^[29]研究结论一致。3 种类型水稻在快增期积累的干物质质量占全生育期干物质质量的 55.0%~59.1%,因此加强该时期的田间管理,保证养分供应充足尤为重要^[30]。

马均等^[31]研究表明,齐穗后的干物质积累量与籽粒产量呈极显著正相关,而籽粒产量是由两部分物质构成的,一部分是抽穗前营养器官的同化产物向穗部转化,另一部分是抽穗后的光合产物直接向穗部输送^[32-33]。与中稻和晚稻相比,早稻生物量和籽粒产量均较低,一方面是因为早稻在前期生长中因温度较低,营养生长不如晚稻和中稻旺盛,即抽穗前积累的物质基础差;另一方面,早稻的生育期较短,干物质快增期也明显短于中稻和晚稻,在此期间积累的干物质少;为了能及时种植晚稻,早稻一般需提前抢收,缩短了干物质积累过程。

3.2 早稻、晚稻、中稻的氮素积累及利用效率

氮素营养是影响水稻产量的一个重要因素,在水稻生长中最理想的氮肥养分释放速率应与水稻对氮素的需求基本一致^[34]。研究表明,中稻和晚稻的氮素积累量大于早稻,因此,在供应氮素时应考虑其需求量,相比于中稻和晚稻,早稻施氮量可适当减少。此外,本研究中用 Logistic 曲线方程模拟得出了氮素积累过程中的关键点,可根据不同季节生态型水稻生长需求供应氮素,有助于指导科学施肥。早稻、晚稻、中稻的氮素积累快增期分别在移栽后 17~41、14~46、11~43 天,中稻和晚稻的氮素积累快增期比早稻略早。此时水稻吸收的氮素主要来源于分蘖肥的供应,因此要特别注意分蘖肥的施用时间,相比于中稻和晚稻,早稻分蘖肥施用

间可略晚^[35],以免施肥过早,秧苗还未完全返青,造成肥料利用率低下、导致氮肥流失^[36]。早稻、晚稻和中稻的氮素快速积累期均始于移栽后两周左右,明显早于干物质快速积累期。这是因为水稻的吸肥规律与其整个生育期的 3 个生长中心相适应,分蘖期稻株生长主要是生根、生叶和分蘖,需要较多的氮素来形成氮化物。充足的养分积累是物质生产的前提,因此,干物质快速积累始盛期一般在氮素积累高峰期前后。

在氮素利用方面,早稻氮素利用效率显著低于中稻,一方面可能是因为本试验统一施氮 165 kg/hm²,对于早稻而言氮肥用量略高,且早稻生育期较短,吸收利用的氮素较少^[37];另一方面,早稻、晚稻、中稻基因型不同,早稻品种为常规稻,中稻和晚稻为杂交稻,其氮素吸收利用也会有一定差异^[23-24]。此外,在水稻生长过程中,还需要磷、钾和其他中微量元素的共同作用,关于 3 种水稻对磷、钾和中微量元素的吸收利用特点,还有待进一步研究。

4 结论

3 种水稻产量和氮素积累量均表现为中稻>晚稻>早稻,因此,相比于中稻和晚稻,早稻氮肥投入量可略微减少。不同季节生态型水稻干物质积累呈“S”型曲线,干物质快速积累期均在拔节期—灌浆期,但特征值不同。从两年数据来看,早稻、晚稻、中稻的干物质快速积累期分别在移栽后 28~54、24~54、30~63 天,持续时间分别为 26、30、32 天。早稻、晚稻、中稻氮素积累也呈“S”型曲线,氮素快速积累期分别在移栽后 17~41、14~46、11~43 天,持续时间分别为 24、32、32 天。干物质积累和氮素积累快增期积累的干物质质量和氮素量占全生育期的 50% 以上,因此,要增加该时期的田间管理,保证充足的养分供应。早稻和晚稻百千克籽粒吸氮量显著高于中稻,氮素籽粒生产效率显著低于中稻。

参 考 文 献:

- [1] 程式华, 胡培松. 中国水稻科技发展战略[J]. *中国水稻科学*, 2008, 22(3): 223-226.
Cheng S H, Hu P S. Development strategy of rice science and technology in China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2008, 22(3): 223-226.
- [2] 李小坤. 水稻营养特性及科学施肥[M]. 北京: 中国农业出版社, 2016.
Li X K. Rice Nutritional characteristics and scientific fertilization

- [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2016.
- [3] 段居琦, 周广胜. 中国双季稻种植区的气候适宜性研究[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(2): 218–227.
Duan J Q, Zhou G S. Climatic suitability of double rice planting regions in China[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(2): 218–227.
- [4] 彭少兵. 对转型时期水稻生产的战略思考[J]. *中国科学: 生命科学*, 2014, 44(8): 845–850.
Peng S B. Reflection on China's rice production strategies during the transition period[J]. *Scientia Sinica Vitae*, 2014, 44(8): 845–850.
- [5] 陈风波, 丁士军. 农村劳动力非农化与种植模式变迁——以江汉平原稻农水稻种植为例[J]. *南方经济*, 2006, (9): 43–52.
Chen F B, Ding S J. Rural labor non-agriculturalization and change with planting mode-taking rice cultivation of rice farmers in Jianghan plain as an example[J]. *South China Journal of Economics*, 2006, (9): 43–52.
- [6] 任万军. 杂交稻高产高效施氮研究进展与展望[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(6): 1505–1513.
Ren W J. The research progress and prospects of high yield and high efficiency nitrogen application for hybrid rice[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2017, 23(6): 1505–1513.
- [7] 邓中华, 明日, 李小坤, 等. 不同密度和氮肥用量对水稻产量、构成因子及氮肥利用率的影响[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 20–25.
Deng Z H, Ming R, Li X K, *et al.* Effect of different density and nitrogen application rate on rice yield, its components and nitrogen use efficiency[J]. *Soils*, 2015, 47(1): 20–25.
- [8] 张智, 王伟妮, 李昆, 等. 四川省不同区域水稻氮肥施用效果研究[J]. *土壤学报*, 2015, 52(1): 234–241.
Zhang Z, Wang W N, Li K, *et al.* Effect of nitrogen fertilizer application on rice in different regions of Sichuan Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(1): 234–241.
- [9] 张智, 李小坤, 丛日环, 等. 稻田优化施肥效果与氮、磷环境效益评价[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(5): 906–915.
Zhang Z, Li X K, Cong R H, *et al.* Optimized fertilization effects and environmental benefits evaluation of nitrogen and phosphorus in the paddy soil[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(5): 906–915.
- [10] 张福锁, 崔振岭, 王激清, 等. 中国土壤和植物养分管理现状与改进策略[J]. *植物学通报*, 2007, 24(6): 687–694.
Zhang F S, Cui Z L, Wang J Q, *et al.* Current status and improvement strategies of soil and plant nutrient management in China[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 2007, 24(6): 687–694.
- [11] 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.* Current status and improvement of fertilizer utilization rate of main grain crops in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [12] 朱兆良. 中国土壤氮素研究[J]. *土壤学报*, 2008, 45(5): 778–783.
Zhu Z L. Soil nitrogen research in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 778–783.
- [13] Peng S B, Buresh R J, Huang J L, *et al.* Strategies for overcoming low agronomic nitrogen use efficiency in irrigated rice systems in China[J]. *Field Crops Research*, 2006, 96(1): 37–47.
- [14] 林瑞余, 梁义元, 蔡碧琼, 等. 不同水稻产量形成过程的干物质积累与分配特征[J]. *中国农学通报*, 2006, 22(2): 185–190.
Lin R Y, Liang Y Y, Cai B Q, *et al.* Characteristics of dry matter accumulation and partitioning in the process of yield formation in different rice cultivars[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(2): 185–190.
- [15] 江立庚, 甘秀芹, 韦善清, 等. 水稻物质生产与氮、磷、钾、硅素积累特点及其相互关系[J]. *应用生态学报*, 2004, 15(2): 226–230.
Jiang L G, Gan X Q, Wei S Q, *et al.* Accumulation pattern of dry matter, nitrogen, phosphorus, potassium and silicon in rice genotypes and their relationships[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(2): 226–230.
- [16] Kropff M J, Cassman K G, Van Laar H H, Peng S. Nitrogen and yield potential of irrigated rice[J]. *Plant and Soil*, 1993, 155(1): 391–394.
- [17] 黄丽芬, 董芙蓉, 霍中洋, 等. 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[J]. *核农学报*, 2012, 26(9): 1290–1297.
Huang L F, Dong F R, Huo Z Y, *et al.* Effects of nitrogen levels on dry matter accumulation and distribution in rice genotype with different nitrogen use efficiencies[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2012, 26(9): 1290–1297.
- [18] 单玉华, 王余龙, 山本由德, 等. 不同类型水稻在氮素吸收及利用上的差异[J]. *扬州大学学报(自然科学版)*, 2001, 4(3): 42–45, 50.
Shan Y H, Wang Y L, Shanben Y D, *et al.* Differences in nitrogen uptake and utilization between different types of rice[J]. *Journal of Yangzhou University (Natural Science Edition)*, 2001, 4(3): 42–45, 50.
- [19] Zhang Y L, Fan J B, Wang D S, Shen Q R. Genotypic differences in grain yield and physiological nitrogen use efficiency among rice cultivars[J]. *Pedosphere*, 2009, 19(6): 681–691.
- [20] 宋桂云, 徐寿军, 范富, 等. 氮肥对不同穗型水稻产量及干物质积累与分配的影响[J]. *浙江农业学报*, 2014, 26(6): 1590–1595.
Song G Y, Xu S T, Fan F, *et al.* Influence of nitrogen fertilizer on grain yield, dry matter accumulation and distribution of rice varieties with different panicle types[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2014, 26(6): 1590–1595.
- [21] Li P F, Lu J W, Wang Y, *et al.* Nitrogen losses, use efficiency, and productivity of early rice under controlled-release urea[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2018, 251: 78–87.
- [22] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验[J]. *数理统计与管理*, 2005, 24(1): 112–115.
Cui D Q. Analysis and making good fitting degree test for logistic curve regression equation[J]. *Journal of Applied Statistics and Management*, 2005, 24(1): 112–115.
- [23] 张耀鸿, 张亚丽, 黄启为, 等. 不同氮肥水平下水稻产量以及氮素吸收、利用的基因型差异比较[J]. *植物营养与肥料学报*, 2006, 12(5): 616–621.
Zhang Y H, Zhang Y L, Huang Q W, *et al.* Effects of different nitrogen application rates on grain yields and nitrogen uptake and utilization by different rice cultivars[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2006, 12(5): 616–621.
- [24] Chen G, Chen Y, Zhao G H, *et al.* Do high nitrogen use efficiency rice cultivars reduce nitrogen losses from paddy fields?[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2015, 209: 26–33.
- [25] Zhuang J Y, Xu S W, Li G Q, *et al.* The influence of meteorological

- factors on wheat and rice yields in China[J]. *Crop Science*, 2018, 58: 837–852.
- [26] Xu X P, Xie J G, Hou Y P, *et al.* Estimating nutrient uptake requirements for rice in China[J]. *Field Crops Research*, 2015, 180: 37–45.
- [27] 颜振德. 杂交水稻高产群体的干物质生产与分配的研究[J]. *作物学报*, 1981, 7(1): 11–18.
Yan Z D. Study on dry matter production and distribution of high yield population of hybrid rice[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 1981, 7(1): 11–18.
- [28] 乔嘉, 朱金城, 赵姣, 等. 基于 Logistic 模型的玉米干物质积累过程对产量影响研究[J]. *中国农业大学学报*, 2011, 16(5): 32–38.
Qiao J, Zhu J C, Zhao J, *et al.* Study on the effect of dry matter accumulation process on maize yield based on Logistic model[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2011, 16(5): 32–38.
- [29] 邓飞, 王丽, 刘利, 等. 不同生态条件下栽培方式对水稻干物质生产和产量的影响[J]. *作物学报*, 2012, 38(10): 1930–1942.
Deng F, Wang L, Liu L, *et al.* Effects of cultivation methods on dry matter production and yield of rice under different ecological conditions[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(10): 1930–1942.
- [30] 刘凤丽, 彭世彰. 节水灌溉的水稻干物质积累 C-R 模型研究[J]. *节水灌溉*, 2006, 6: 1–3, 6.
Liu F L, Peng S Z. Study on Chapman-richards model of rice dry matter accumulation under water saving irrigation[J]. *Water Saving Irrigation*, 2006, 6: 1–3, 6.
- [31] 马均, 朱庆森, 马文波, 等. 重穗型水稻光合作用、物质积累与运转的研究[J]. *中国农业科学*, 2003, 36(4): 375–381.
Ma J, Zhu Q S, Ma W B, *et al.* Studies on the photosynthetic characteristics and accumulation and transformation of assimilation product in heavy panicle type of rice[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2003, 36(4): 375–381.
- [32] 姚克敏, 王志南. 气象条件与杂交水稻干物质积累及其分配规律的研究 (二) ——气象条件与经济系数[J]. *农业气象*, 1985, 6(3): 6–11.
Yao K M, Wang Z N. Study on meteorological conditions and dry matter accumulation and distribution of hybrid rice (II) meteorological conditions and economic coefficients[J]. *Journal of Agrometeorology*, 1985, 6(3): 6–11.
- [33] Yang J C, Peng S B, Zhang Z J, *et al.* Grain and dry matter yields and partitioning of assimilates in japonica/indica hybrid rice[J]. *Crop Science*, 2002, 42(3): 766–772.
- [34] 唐启源, 邹应斌, 米湘成, 等. 不同施氮条件下超级杂交稻的产量形成特点与氮肥利用[J]. *杂交水稻*, 2003, 18(1): 47–51.
Tang Q Y, Zou Y B, Mi X C, *et al.* Yield formation characteristics and nitrogen fertilizer utilization of super hybrid rice under different nitrogen application conditions[J]. *Hybrid Rice*, 2003, 18(1): 47–51.
- [35] 黄大山, 陈忠平, 程飞虎, 等. 不同时期施用分蘖肥对水稻产量及其结构的影响[J]. *江西农业学报*, 2014, 26(5): 29–32.
Huang D S, Chen Z P, Cheng F H, *et al.* Effects of applying tillering fertilizer at different times on yield and yield components of rice[J]. *Acta Agriculturae Jiangxi*, 2014, 26(5): 29–32.
- [36] 王佑浪, 黄毓, 郑伟, 林益增. 早稻“三控”施肥分蘖肥不同施用时期对比试验[J]. *安徽农学通报*, 2016, 22(13): 51–52.
Wang Y L, Huang Y, Zheng W, Lin Y Z. Comparative test of different application periods of "three-control" fertilization and splitting of early rice[J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*, 2016, 22(13): 51–52.
- [37] 赵敏, 胡剑锋, 钟晓媛, 等. 不同基因型机插稻植株氮素积累运转特性[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(2): 277–287.
Zhao M, Hu J F, Zhong X Y, *et al.* Differences in N accumulation and translocation in the machine-transplanted rice genotypes[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2015, 21(2): 277–287.