

水稻-再生稻体系干物质积累及氮磷钾养分的吸收利用

王森¹ 莫菁华² 汪洋¹ 游秋香² 任涛¹ 丛日环¹ 李小坤^{1,*}

(¹ 华中农业大学 资源与环境学院, 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 436300; *通讯联系人, E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn)

Dry Matter Accumulation and N, P, K Absorption and Utilization in Rice-Ratoon Rice System

WANG Sen¹, MO Jinghua², WANG Yang¹, YOU Qiuxiang², REN Tao¹, CONG Rihuan¹, LI Xiaokun^{1,*}

(¹ College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; ² Wuxue Bureau of Cultivated Land Quality Protection and Fertilizer Management, Wuxue 435400, China; *Corresponding author, E-mail: lixiaokun@mail.hzau.edu.cn)

Abstract: 【Objective】To reveal the law of dry matter accumulation, N, P, K nutrients absorption and utilization in rice-ratoon rice system and lay a theoretical basis for scientific fertilization, 【Method】two years of field trials were conducted to study the dynamics of dry matter accumulation and N, P, K distribution and transformation in rice-ratoon rice system by investigating the dry matter weight and nutrients contents in different organs at various growth stages(tillering stage, young panicle differentiation stage, booting stage, full heading stage, filling stage, ripening stage) under the condition of adequate supplying of nutrients. 【Result】Total dry matter accumulation of the first-season rice followed the growth trend of ‘slow-fast-slow’ in the whole growth duration. The rapid accumulation period in stem and leaf were ‘tillering-full heading stage’ and ‘before the booting stage’, respectively, and the accumulation in stem and leaf accounted for 81.1% and 43.8% of their maximum. In addition, the dry matter accumulation in stem and leaf were not decreased significantly during the grain filling stage. The rapid dry matter accumulation period of panicle was from full heading stage to middle filling stage, which accounted for 58.8% of the total. The total dry matter accumulation of ratoon rice followed an S-shape curve. Dry matter accumulation in stem and leaf peaked at the filling stage and heading stage respectively, and that of the first-season rice stubble showed a downward trend in the whole growth period. The results of nutrient absorption showed that total N accumulation of the first-season rice was equal to that of the dry matter accumulation, as well as that of the stem and panicle. But the total accumulation of phosphorus and potassium of the first-season rice were decreased at the late filling stage. Nutrients accumulation of stem and leaf reached the maximum at heading stage. After harvest of the first season rice, accumulation of N, P and K in stubbles showed a downward trend, and that of ratoon rice stem and leaf were increased firstly and then decreased. However, that of panicle were increased constantly. From heading stage to ripening stage, N translocation in each organ showed a tendency of leaf>stem>stubble, for P translocation, stem>stubble>leaf, and for K translocation, stubble>leaf>stem. 【Conclusion】The rapid dry matter and nutrient accumulation period of the first-season rice was from booting stage to middle filling stage, and the critical period of ratoon rice was from the harvest of the first-season rice to full heading stage. The nutrient in stubbles could be transferred to the organs of ratoon rice after the harvest of the first season rice. Satisfying the nutrients demands between heading stage and filling stage of the first-season rice and timely nutrients supply to ratooning buds served as the basis and guarantee of high yield in rice-ratoon rice system.

Key words: rice; ratoon rice; dry matter; nutrition accumulation; absorption

摘 要: 【目的】阐明水稻-再生稻体系的干物质积累及氮、磷、钾养分吸收利用规律, 为其科学施肥提供理论依据。【方法】通过 2 年的田间试验, 以深两优 5814 为材料, 在养分供应充足的条件下, 于水稻关键生育期(分蘖期、幼穗分化期、孕穗期、齐穗期、灌浆期、完熟期)进行取样, 测定各器官的干物质量及氮、磷、钾养分含量, 计算养分积累量, 研究头季稻和再生稻干物质积累和氮、磷、钾养分吸收积累动态及分配、转运规律。【结果】头季稻总干物质积累量在整个生育期表现为“慢-快-慢”的增长趋势, 茎、叶干物质快速积累期分别在分蘖-齐穗期和孕穗前, 增长量分别占其最大积累量的 81.1%和 43.8%, 且茎、叶的干物质积累量在灌浆-完熟期之间没有明显降低; 从齐穗期至灌浆中期是穗的干物质快速积累期, 在此期间增加的干物质积累量占总量的 58.8%。再生稻的总

干物质积累呈“S”形曲线,茎、叶的干物质积累量分别在灌浆期和齐穗期达到最大;头季稻桩的干物质积累量从头季收割后呈下降趋势。养分吸收结果显示,头季稻氮的总积累量以及茎、穗两个器官的氮素积累量的变化规律与其干物质积累量相似,磷和钾的总积累量在灌浆后期降低;茎和叶的各养分积累量分别在齐穗期和灌浆期达到最大。头季收获后,头季稻桩的氮、磷和钾养分积累量表现为下降的趋势,茎和叶的养分积累量先增加后减少,穗的养分积累量则表现为不断增加。从齐穗期到完熟期,各器官的氮转运量表现为叶>茎>头季稻桩,磷转运量表现为茎>头季稻桩>叶,钾转运量表现为头季稻桩>叶>茎。【结论】头季稻孕穗期至灌浆中期是其干物质和养分的快速积累期,从头季收获至再生季齐穗期间是再生稻干物质及养分积累的关键时期,头季稻桩中的养分会在头季收获后转移至再生器官中。满足头季稻抽穗灌浆期间的养分需求,及时补充再生芽萌发生长期间的养分供应是水稻-再生稻体系高产的基础和保障。

关键词: 水稻;再生稻;干物质;养分积累;吸收

中图分类号: S143; S511.062

文献标识码: A

文章编号: 1001-7216(2018)01-0067-11

水稻(*Oryza sativa* L.)是我国主要粮食作物之一,稳定提高水稻的产量是保障粮食安全的关键。近年来,水稻单产的增长越来越困难,年增幅不到 3%,通过高投入来追求超高产还面临一系列资源浪费与环境污染的问题^[1-3];同时,我国耕地资源稀缺,通过增加耕地面积来提高水稻播种面积是不现实的^[4]。提高耕地复种指数就成为了确保水稻高产稳产,保证我国粮食安全的关键措施^[5]。但传统的双季稻种植受到劳动力短缺、净收益低等影响,播种面积不断下降,1984 年至 2014 年间的降幅高达 41.98%^[6-7]。与传统双季稻相比,再生稻具有生育期短、省种、省工、经济效益高等特点^[8-9],种植再生稻成为提高复种指数、增加稻田单位面积稻谷产量的又一重要措施,且我国现阶段的再生稻播种面积和单产都有巨大的增加潜力^[10-11]。

水稻产量的形成是干物质生产、分配和积累的过程^[12],植株营养是影响其产量的主要因素^[13],尤其是氮素营养对水稻产量和品质的影响最为显著^[14]。为此,众多学者对早晚稻^[15]、中稻^[16-17]的干物质积累和养分吸收开展了研究。水稻-再生稻种植模式下,头季稻的产量与其干物质积累量呈显著正相关,与传统一季中稻相似;但头季稻在生长后期易受到再生稻施肥的影响,头季稻对促芽氮肥的回收率为 22%~37%,增加促芽肥投入提高了稻桩和腋芽中的氮积累量^[18]。头季施肥同样能够影响再生季植株的生长,改变头季氮肥运筹,增加头季穗肥的投入能够增加干物质及养分向再生芽的输出量,促进再生芽早发快长^[19],但不一定能够增加再生稻的产量^[20]。再生稻的产量主要受到促芽促苗肥施用的影响,并与其氮肥用量呈抛物线型相关^[21],促芽促苗肥的施用提高了再生季齐穗期 14.8%~27.2%的根系伤流量,促进再生季根系对于水分和养分的吸收^[22],增加了再生芽的干物质和养分积累,促进其萌发生长形成稻穗^[23]。一方面头季稻和再生稻产量均与其干物质

和养分的积累有关,与施肥的关系显著;另一方面再生稻的施氮量约为头季的 80%,但产量远达不到头季的 80%,氮肥利用率较低^[11]。有学者提出应根据头季稻株营养状况调整促芽肥用量,有利于提高氮肥利用率^[24]。可见,将水稻-再生稻作为一个整体开展施肥技术的研究,明确干物质积累及养分吸收规律,对水稻-再生稻体系的高产高效养管理极为重要。

为此,本研究以深两优 5814 为材料,研究头季稻和再生稻在不同生育期的干物质及氮、磷、钾养分积累量,明确不同器官的干物质积累及氮、磷、钾养分吸收利用规律,以期为水稻-再生稻体系的科学施肥提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验设计

试验于 2015—2016 年在湖北省武穴市梅川镇丛政村(东经 115°59.7'51.1",北纬 30°12.0'23.6")进行。2015 年度耕层(0—20 cm)土壤 pH 值为 6.20,有机质 38.8 g/kg,全氮 2.2 g/kg,速效磷 8.4 mg/kg,速效钾 57.1 mg/kg;2016 年度耕层(0—20 cm)土壤 pH 值为 6.13,有机质 26.3 g/kg,全氮 1.5 g/kg,速效磷 20.0 mg/kg,速效钾 67.6 mg/kg。供试水稻品种为深两优 5814,前茬作物为油菜。

头季稻氮(以纯 N 计)、磷(以 P_2O_5 计)和钾(以 K_2O 计)肥的用量分别为 165 kg/hm², 75 kg/hm² 和 75 kg/hm²。氮肥的 50%作基肥、25%作分蘖肥、25%作穗肥;磷肥全部作基肥施用;钾肥的 70%作基肥、30%作穗肥。再生稻氮肥和钾肥用量为 120 kg/hm² 和 45 kg/hm²。氮肥的 50%作促芽肥、50%作促苗肥;不施用磷肥;钾肥全部作促芽肥施用。促芽肥于头季稻齐穗后 20 d 施用,促苗肥于头季稻收获后 3 d 施用。肥料品种分别为尿素(含 N 46%)、过磷酸钙(含

P₂O₅ 12%)和氯化钾(含 K₂O 60%)。小区面积为 20 m², 3 次重复。

2015 年 3 月 30 日播种, 5 月 7 日施用基肥, 5 月 8 日移栽(密度为 23.2 万株/hm², 每穴 2 苗), 5 月 19 日施用分蘖肥, 7 月 9 日施用穗肥, 8 月 8 日施用促芽肥, 8 月 22 日收获头季稻(人工收割, 留桩高度 40 cm 左右), 8 月 26 日施用促苗肥, 11 月 7 日收获再生稻; 2016 年 3 月 27 日播种, 5 月 5 日施用基肥, 5 月 6 日移栽(密度为 25 万株/hm², 每穴 2 苗), 5 月 19 日施用分蘖肥, 7 月 11 日施用穗肥, 8 月 14 日施用促芽肥, 8 月 21 日收获头季稻(人工收割, 留桩高度 40 cm 左右), 8 月 24 日施用促苗肥, 11 月 1 日收获再生稻。

1.2 测定项目与方法

自水稻移栽后, 间隔 15 d 左右取一次样品, 2015 年的取样时间为头季移栽后 0 d、31 d(分蘖期)、46 d(分蘖期)、62 d(孕穗期)、75 d(头季齐穗期)、90 d(头季灌浆期)、106 d(头季完熟期)、109 d(幼穗分化初期)、124 d(幼穗分化末期)、137 d(再生季齐穗期)、160 d(再生季灌浆期)、183 d(再生季完熟期); 2016 年的取样时间为头季收获后 1 d(幼穗分化初期)、9 d(幼穗分化中期)、16 d(幼穗分化末期)、31 d(再生季齐穗期)、46 d(再生季灌浆期)、72 d(再生季完熟期)。取样时齐地收割植株, 分器官(头季: 茎、叶、穗; 再生季: 头季稻桩、茎、叶、穗)于 105℃ 下杀青 30 min, 60℃ 下恒温烘干称量, 磨细过 0.5 mm 筛后测定相应的养分含量。2015 年包括头季和再生季, 2016 年仅包括再生季。

采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消煮, 流动注射分析法(SEAL AA3, 德国)测定各部位全氮、全磷含量; 火焰光度法测定全钾含量。

参考崔党群^[25]的方法, Logistic 曲线方程如下: $y=K/(1+ae^{-bt})$, y 为干物质积累量, t 为头季收获后天数, K 为常量, a 和 b 为回归参数。用于推算水稻生长发育的三个关键点: 始盛期 $[t_1=(\ln a - 1.317)/b]$ 、高峰期 $(t_2=\ln a/b)$ 和盛末期 $[t_3=(\ln a + 1.317)/b]$ 。

养分积累量(kg/hm²) = 干物质积累量 × 养分含量(%);

养分转运量(kg/hm²) = 齐穗期某器官养分积累量 - 完熟期该器官养分积累量;

转运养分的贡献率(%) = 养分转运量(kg/hm²) / 籽粒养分积累量(kg/hm²) × 100。

1.3 数据分析

用 Microsoft Office 2007、DPS 7.05 和 Origin 8.6 处理分析数据及绘图。

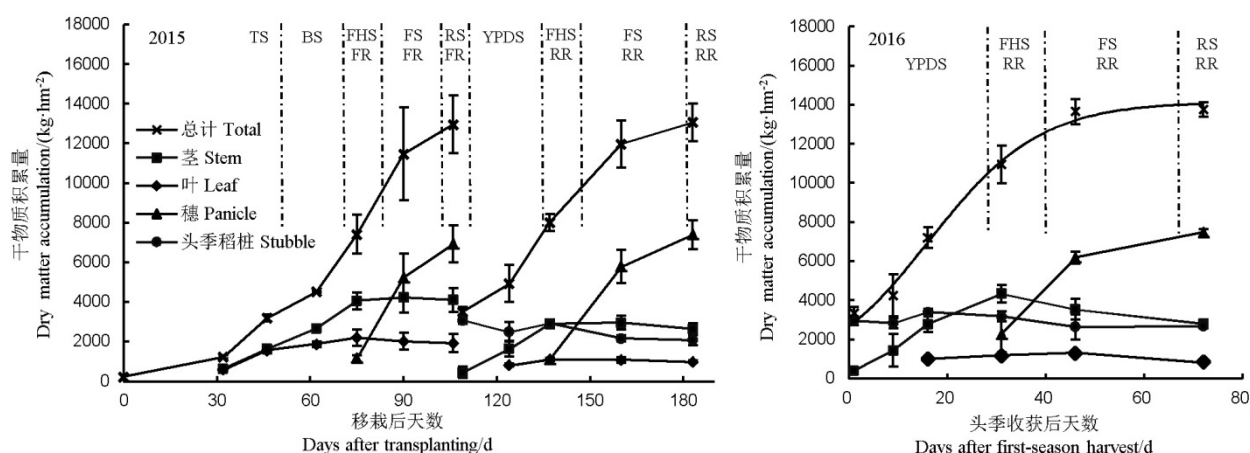
2 结果与分析

2.1 干物质积累动态

2015 年, 头季稻的总干物质积累量随生育进程呈逐渐增加的趋势(图 1)。头季稻 54.5% 的干物质积累集中在移栽后 62—90 d, 平均积累速率为 248 kg/(hm²·d)。茎、叶、穗的干物质积累量均表现为先增加后平稳的趋势。茎的干物质快速积累期发生在移栽后 31—62 d, 平均增速达 67.4 kg/(hm²·d); 移栽后 31—46 d 是叶的干物质快速积累期, 增速为 68.8 kg/(hm²·d); 移栽后 75—90 d 是穗的干物质快速积累期, 干物质增长量占整个生育期的 58.8%。茎、叶、穗的最大干物质积累量分别出现在移栽后 90 d(4221 kg/hm²)、75 d(2198 kg/hm²)和 106 d(6929 kg/hm²)。

再生稻的总干物质积累量呈“S”形曲线, 74.7% 的干物质积累集中在移栽后 124—160 d。移栽后 109—137 d 是再生稻茎和叶的干物质快速积累期, 两者分别在移栽后 160 d 和 137 d 达到最大(2950 kg/hm² 和 1099 kg/hm²); 穗的干物质积累量在移栽后 137—160 d 的平均增长速率为 190 kg/(hm²·d), 是 160—183 d 的 1.78 倍。收获时, 再生稻桩、茎、叶和穗的干物质积累量分别占再生稻干物质积累总量的 15.8%、20.1%、7.5%和 56.6%。头季稻桩的干物质积累量在整个生育期表现为下降的趋势, 主要发生移栽后 109—124 d 和 137—160 d。

2016 年重点分析再生稻, 其总干物质积累规律与 2015 年一致(图 1)。采用 Logistic 回归方程拟合总干物质积累动态 $[y=14143.54/(1+4.30e^{-0.08929t})]$, $R^2=0.98515$], 可以看出, 头季收获后 2 d(幼穗分化初期)再生稻干物质开始进入快速积累期, 为始盛期; 头季收获后 32 d(齐穗期)干物质快速积累期结束, 为盛末期。干物质快速积累期的持续时间为 30 d, 在此期间增加的干物质质量占整个生育期干物质净积累总量的 73.0%。再生稻干物质积累高峰期出现在头季收获后 17 d(幼穗分化末期), 积累速率为 315.5 kg/(hm²·d)。茎和叶的干物质积累均表现为先增加后降低的趋势, 分别在头季收获后 31 d 和 46 d 达到最大(4338 kg/hm² 和 1297 kg/hm²), 头季收获后 72 d 的干物质积累量分别占总量的 20.2%和 6.15%。穗的干物质积累量在整个生育期表现为持续增长, 其主要增长时期在头季收获后 31—46 d, 收获时的干物质积累量为 7464 kg/hm², 占再生稻干物质积累总量的 54.2%。头季稻桩的干物质积累量在整个生育期表现为下降的趋势, 降幅为 9.5%。



TS—分蘖期; BS—孕穗期; FHSFR—头季齐穗期; FSFR—头季灌浆期; RSFR—头季完熟期; YPDS—幼穗分化期; FHSRR—再生季齐穗期; FSRR—再生季灌浆期; RSRR—再生季完熟期。下同。

TS, Tillering stage; BS, Booting stage; FHSFR, Full heading stage of the first-season rice; FSFR, Filling stage of the first-season rice; RSFR, Ripening stage of the first-season rice; YPDS, Young panicle differentiation stage; FHSRR, Full heading stage of the ratoon rice; FSRR, Filling stage of the ratoon rice; RSRR, Ripening stage of the ratoon rice. The same as below.

图1 水稻-再生稻体系干物质积累动态

Fig. 1. Dynamics of dry matter accumulation in rice-ratoon rice system.

2.2 氮、磷、钾养分积累动态

2015年,头季稻的氮素总积累量呈持续增加的趋势(图2),移栽后106 d达到最大(167 kg/hm^2),快速积累期发生在移栽后62—106 d,在此期间的干物质积累量占最大积累量的55.4%。茎的氮素积累在整个生育期平稳增加,106 d达到最大积累量(35.5 kg/hm^2)。叶的氮素积累量表现为先增加后降低再保持平稳的过程,移栽后75 d达到最大(57.9 kg/hm^2),75—90 d降低了31.1%,90—106 d则保持平稳,头季收获时叶的氮素积累量为 41.3 kg/hm^2 。穗的氮素积累量在齐穗后快速增加,最终有53.9%的氮素积累在头季稻穗中。

再生稻的氮素总积累量呈“S”形曲线,74.8%的氮素积累集中在移栽后109—137 d。茎和叶的氮素积累量均是先增加后降低,分别在124 d和137 d达到最大值,为 24.5 kg/hm^2 和 33.5 kg/hm^2 ,之后均有不同程度的下降,降幅表现为叶>茎。137 d后穗的氮素积累量快速增加,收获时占再生稻总氮素积累量的69.3%。头季稻桩的氮素积累量总体呈下降趋势,109—124 d和137—160 d的降幅较大,分别占总下降量的62.1%和35.7%。

2016年,再生稻的氮素总积累量变化趋势与2015年一致。头季收割后1—16 d再生稻的氮素积累量占总增长量的66.0%,46 d达到最大(116.4 kg/hm^2)。茎的氮素积累量表现为先增加后降低的变化趋势,1—9 d为快速增长期,于31 d达到最大

(31.1 kg/hm^2)。叶片的氮素积累量随着籽粒灌浆的开始而逐渐下降,46—72 d的下降速率为 $0.74 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{d)}$,降幅为73.5%,72 d的叶片氮素积累量仅为 6.93 kg/hm^2 。穗的氮素积累量持续增加,31—46 d的平均增加速率为 $1.76 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{d)}$,最终穗的氮素积累量为 72.8 kg/hm^2 。头季稻桩氮素积累量呈逐渐下降的趋势,9—46 d的平均降低速率为 $0.62 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{d)}$,减少量占整个生育期的99.6%。

与氮素不同,2015年头季稻的磷总积累量表现为先增加后降低的趋势,移栽后90 d达到最大积累量(38.8 kg/hm^2),62—90 d是磷养分的快速积累期(图3)。茎的磷积累集中在32—75 d,占总量的80.9%,90 d达到最大(15.3 kg/hm^2)。叶的磷积累量表现为先增加后降低的过程,移栽后75 d达到最高值(7.91 kg/hm^2),收获时叶的磷积累量仅占植株磷总积累量的12.2%。80.8%的穗部磷积累发生于75—90 d,最终有49.0%的磷积累在头季稻穗中。

再生稻的磷总积累量呈先增加后降低的趋势,移栽后109—160 d直线增长至最大值(37.9 kg/hm^2)。茎和叶的磷积累量均表现为先增加后降低的变化,都在137 d达到最大值,分别为 9.99 kg/hm^2 和 3.25 kg/hm^2 ,均以160—183 d的降幅最大。82.2%的穗部磷积累集中在137—160 d,收获时穗的磷积累量占植株磷总积累量的77.5%。头季稻桩的磷积累持续降低,109—124 d的降幅较大,下降速率为 $2.44 \text{ kg/(hm}^2 \cdot \text{d)}$ 。

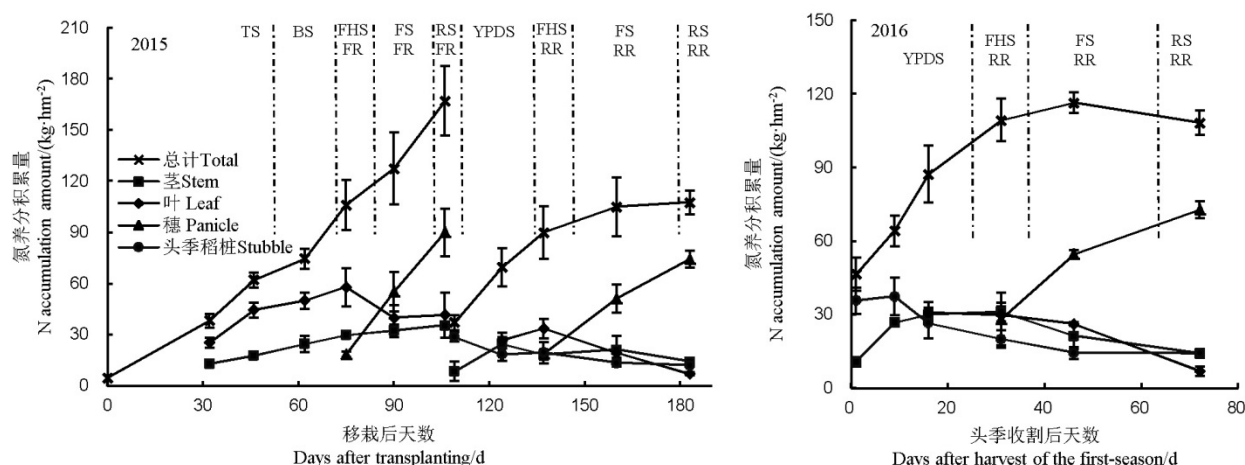


图2 水稻-再生稻体系 N 养分积累动态

Fig. 2. Dynamics of N accumulation in rice-ratoon rice system.

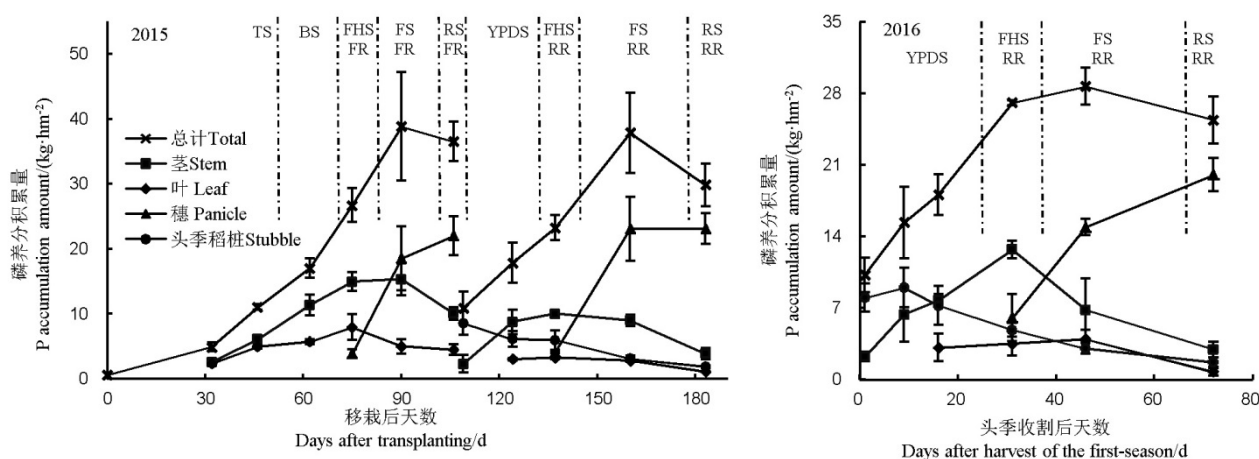


图3 水稻-再生稻体系 P 养分积累动态

Fig. 3. Dynamics of P accumulation in rice-ratoon rice system.

2016 年再生稻的磷总积累量与其氮总积累量相似, 表现为先增加后降低的变化趋势, 91.3% 的磷总积累量集中在头季收割后 1—31 d, 增加速率为 $0.56 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。1—31 d 也是茎的磷积累快速增长期, 在此期间的平均增长速率为 $0.35 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。叶的磷积累量表现为先增加后降低的变化, 在头季收获后第 46 d 达到最大值($3.95 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。穗的磷积累量持续增加, 31—46 d 为快速增长期, 平均增加速率为 $0.59 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 收获时穗的磷积累量达到最大($20.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。头季稻桩的磷积累量随生育进程持续下降, 9—46 d 平均下降速率为 $0.16 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 降幅占整个生育期的 78.7%, 收获时头季稻桩的磷积累量仅为 $1.68 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。

由图 4 我们可以看出, 2015 年头季稻的钾总积累量随生育期的推进先增加后降低, 移栽后 90 d 达到最大值($272 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 在此期间的平均增长速率为

$3.91 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$ 。茎的钾积累量在移栽后 90 d 时达到最大, 占钾总积累量的 66.4%。叶的钾积累表现为先增加后降低, 32—46 d 是其快速积累期, 75 d 达到最大积累量($56.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。穗在 75—90 d 的钾积累量占其最大积累量的 63.5%, 头季收获时穗的钾积累量仅为钾总积累量的 15.3%。

再生稻的钾总积累量表现为先增加后降低, 109—160 d 平稳增长至最大($198 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 随后下降。茎的钾积累量变化趋势与钾总积累量相似。叶和穗的钾积累量均先增加后降低, 分别在 137 d 和 160 d 达到最大值, 钾积累量分别为 $27.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 和 $49.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。头季留桩的钾积累量不断降低, 106—124 d 和 137—160 d 的降幅分别占降低总量的 37.5% 和 32.3%, 收获时仅占再生稻钾总积累量的 20.3%。

2016 年钾总积累量表现为先增加后降低的变化趋势(图 4), 头季稻收割后 9—31 d 为钾总积累量

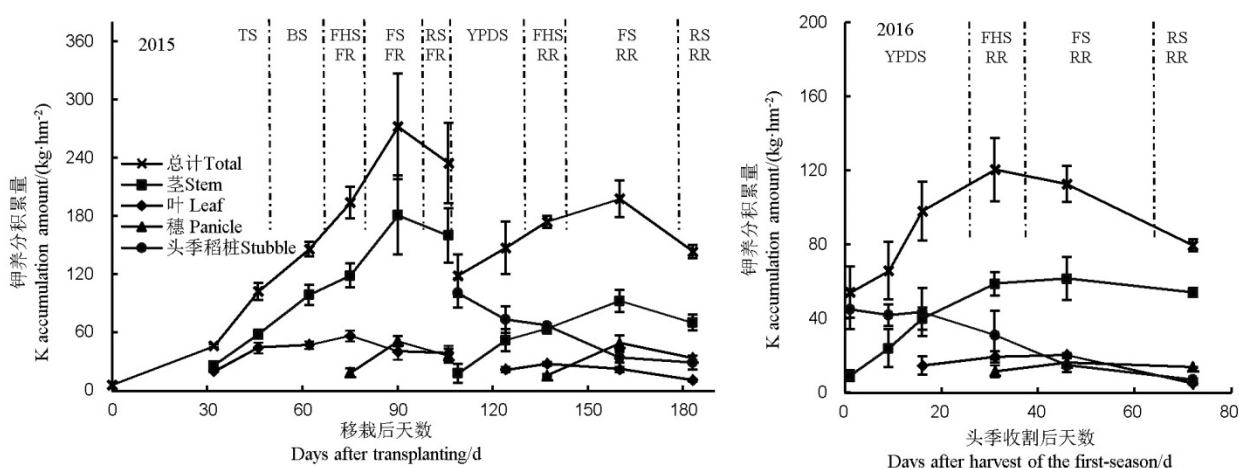


图 4 水稻-再生稻体系 K 养分积累动态

Fig. 4. Dynamics of K accumulation in rice-ratoon rice system.

的快速生长期, 平均增加速率为 $2.49 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 于 31 d 达到最大($120.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。1—31 d 是茎的钾积累快速增长期, 在此期间茎的钾积累量平均增加速率为 $1.65 \text{ kg}/(\text{hm}^2 \cdot \text{d})$, 于 46 d 达到最大($61.5 \text{ kg}/\text{hm}^2$)。叶片的钾积累量表现为先增加后降低的变化, 在头季收获后第 46 d 达到最大值($20.3 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 随后开始快速下降, 收获时仅为 $5.11 \text{ kg}/\text{hm}^2$ 。穗的钾积累量在灌浆中期达到最大($16.0 \text{ kg}/\text{hm}^2$), 然后降低了 13.7%。头季稻桩钾积累量的变化规律与头季稻桩氮、磷积累量的变化规律相似, 随生育进程持续降低, 收获时的降幅为 84.5%。

2.3 氮、磷、钾养分的分配和转运

不同生育期, 头季稻和再生稻的养分分配之间存在较大差异(表 1)。2015 年头季稻齐穗期的氮素分配表现为叶>茎>穗, 磷、钾养分主要积累于茎中; 完熟期氮和磷的养分分配均以穗为主, 钾则主要积累于茎中, 叶和穗之间的差异不大。

由表 1 还可以看出, 头季稻桩中的氮、磷、钾养分积累量在再生稻幼穗分化期均占有较大比例, 然后随生育进程不断减小, 完熟期头季稻桩的养分积累量占总积累量的比例为 6.1%~20.2%。不同养分在再生季齐穗期和完熟期的分配比例不同, 齐穗时头季稻桩、茎、穗中的氮素积累量差异不大, 但茎和头季稻桩中磷和钾养分分配比例较大, 穗的钾积累比例低于氮、磷。再生稻从齐穗期至完熟期之间, 头季稻桩、叶和茎中大量的氮、磷、钾养分转运至穗部, 不同器官对于不同养分的转运量不同, 叶的氮素转运量最大, 磷转运量表现为茎>头季稻桩>叶, 钾转运量表现为头季稻桩>叶>茎; 不同器官的养分贡献率与转运量的表现不完全一致, 氮、

磷的贡献率分别以叶和茎为主, 钾的贡献率表现为头季稻桩>叶。与 2015 年相比, 2016 年再生稻各部位的养分分配比例相似, 差异表现在茎的氮、磷、钾养分贡献率相对较大。

3 讨论

3.1 水稻-再生稻的干物质积累

作物产量形成的过程实质上是干物质积累与分配的过程^[26], 作物的干物质积累与其产量的形成关系密切^[27]。在促芽肥施用前, 头季稻的干物质积累和养分吸收规律与常规中稻相似^[28-30]。在本研究条件下, 促芽肥的施用使头季稻的茎、叶中仍保持较大的干物质积累量, 同时穗的干物质积累量持续增加, 使头季稻的总干物质积累量仍持续增加, 在完熟时达到最大, 总体呈现出“慢-快-慢”的增长趋势。

再生稻的干物质积累变化与头季稻相比, 最大的区别在于再生稻的总干物质积累量包括头季稻桩中的干物质质量。前人的研究表明, 头季收割至再生季齐穗期, 再生分蘖积累的干物质有 35%~40%来自残留稻桩中贮藏性干物质的转运, 60%~65%来自自身的光合生产; 再生季齐穗期至成熟期则有 9%~18%来自残留稻桩中贮藏性干物质的转运, 80%~90%来自自身的光合生产^[31]。也有研究认为, 再生稻干物质积累以叶片的光合生产为主要来源, 虽然头季稻桩积累的光合产物被再生稻的再利用率很低, 但对再生稻初期的生长发育影响很大^[32-33]。这可能与头季收割时的留桩高度以及再生稻的养分供应水平不同有关。在本研究中, 在再生稻幼穗

表 1 水稻-再生稻体系养分的分配和转运特点
Table 1. Characteristics of nutrient distribution and transfer in rice-ratoon rice system.

年份与养分 Year and Nutrient		器官 Organ	养分分配比例 Proportion of nutrient distribution /%					再生稻齐穗期-完熟期 Full heading stage to ripening stage of ratoon rice	
			头季稻 First-season rice		再生稻 Ratoon rice			转运量* Amount of transfer (kg·hm ⁻²) *	贡献率 Contribution rate/%
			齐穗期 Full heading stage	完熟期 Ripening stage	幼穗分化期 Young panicle differentiation stage	齐穗期 Full heading stage	完熟期 Ripening stage		
2015									
N	头季稻桩 Stubble	-	-	78.2±13.1 a	21.3±3.6 b	11.1±0.4 c	-7.5±6.6 b	10.4±9.8 b	
	叶 Leaf	54.4±3.2 a	24.6±6.6 b	0.0	37.3±1.5 a	6.5±0.8 d	-26.5±5.5 c	36.0±10.0 a	
	茎 Stem	28.3±2.3 b	21.4±1.9 b	21.8±13.1 b	20.3±1.1 b	13.1±0.6 b	-4.1±1.7 b	5.4±1.9 b	
	穗 Panicle	17.4±1.0 c	54.0±6.4 a	0.0	21.1±2.1 b	69.2±0.9 a	55.8±6.2 a	-74.7±3.4 c	
P	头季稻桩 Stubble	-	-	79.8±10.7 a	25.2±4.7 b	6.1±0.5 c	-4.1±1.6 bc	17.8±7.5 b	
	叶 Leaf	29.4±5.2 b	12.4±3.2 c	0.0	14.0±0.3 c	3.5±0.2 d	-2.2±0.2 b	9.6±1.7 b	
	茎 Stem	56.2±6.5 a	27.5±1.6 b	20.2±10.7 b	43.1±2.8 a	12.8±1.8 b	-6.1±0.7 c	26.9±5.2 a	
	穗 Panicle	14.5±1.3 c	60.1±3.3 a	0.0	17.7±1.6 c	77.5±1.2 a	19.0±2.5 a	-82.1±2.5 c	
K	头季稻桩 Stubble	-	-	85.6±6.5 a	38.6±2.1 a	20.2±4.7 b	-37.9±8.3 d	113±20.2 a	
	叶 Leaf	29.1±1.1 b	16.5±0.5 b	0.0	15.8±0.9 b	7.5±1.0 c	-16.7±2.7 c	50.1±10.4 b	
	茎 Stem	61.2±3.3 a	68.1±1.5 a	14.4±6.5 b	36.6±1.5 a	48.8±4.9 a	6.4±4.2 b	-19.6±14.3 c	
	穗 Panicle	9.6±2.3 c	15.3±1.9 b	0.0	9.0±0.4 c	23.4±2.9 b	17.2±2.5 a	-51.1±3.7 d	
2016									
N	头季稻桩 Stubble	-	-	76.9±2.5 a	18.5±4.4 a	15.5±1.6 b	-2.8±2.0 b	4.9±3.6 b	
	叶 Leaf	-	-	0.00	27.6±4.9 a	6.3±1.7 c	-22.9±3.1 c	38.4±7.4 a	
	茎 Stem	-	-	23.1±2.5 b	28.5±2.1 a	12.7±1.7 b	-17.0±2.9 bc	28.1±3.2 ab	
	穗 Panicle	-	-	0.0	25.4±7.5 a	65.5±1.9 a	44.6±12.8 a	-75.2±25.9 c	
P	头季稻桩 Stubble	-	-	78.2±2.9 a	18.0±2.5 b	6.9±1.4 bc	-3.2±0.7 b	18.4±3.3 b	
	叶 Leaf	-	-	0.00	13.0±4.4 b	3.1±1.3 c	-2.7±1.1 b	15.7±5.5 b	
	茎 Stem	-	-	21.8±2.9 b	47.2±3.3 a	12.0±2.3 b	-9.8±0.2 c	57.3±4.3 a	
	穗 Panicle	-	-	0.00	22.4±8.5 b	78.0±4.6 a	12.8±2.7 a	-74.3±13.8 c	
K	头季稻桩 Stubble	-	-	83.1±0.9 a	25.0±8.0 b	8.7±0.7 c	-31.3±5.0 d	266±50.2 a	
	叶 Leaf	-	-	0.0	16.3±4.1 bc	6.3±1.1 c	-14.1±2.6 c	120±24.9 b	
	茎 Stem	-	-	16.9±0.9 b	49.0±3.2 a	67.1±1.4 a	8.1±0.5 a	68.0±2.1 c	
	穗 Panicle	-	-	0.0	9.7±3.1 c	17.9±1.9 b	2.9±2.2 b	-24.3±18.0 d	

*正值表示养分净输入，负值表示养分净输出。同列数据(平均数±标准差)后不同小写字母表示同一时期不同器官的数据在 5%水平上差异显著(n=3，最小显著差数法)。
*Positive value means net nutrient export, negative value means net nutrient import. The values(mean±SD) within a column followed by different lowercase letters are significantly different at $P<0.05$ ($n=3$, LSD).

分化期，新生部位 12.0%~30.5%的干物质质量来自头季稻桩的干物质转运；再生季齐穗期至完熟期，头季稻桩和再生茎的干物质转运占再生穗干物质积累总量的 15.8%和 27.6%。我们在研究过程中发现，头季收获时稻桩上的老叶并未完全枯黄，头季收割后，对于老叶来说可能存在与剪穗处理相似的去库效果。段俊等^[34]报道，剪穗处理能明显提高水稻叶片的叶绿素含量；苗芳等^[35]研究发现对小麦进行剪 3/4 穗处理后，能延缓倒 2 叶和倒 3 叶的衰老，增加叶绿素含量。一方面，与常规中稻养分管理相比，应增加头季稻生育后期的养分供应，减少因茎叶衰老死亡而导致的干物质积累量降低，使得头季收割后稻桩中有更多的干物质能够转移至新生部位；另

一方面，头季稻桩上老叶光合产物的产生和分配可能是造成头季稻桩干物质积累和输出的研究结果存在差异的原因。已有的研究中头季稻桩均包括头季茎秆及叶片，头季稻桩对再生稻的干物质转运量可能包括头季后期的干物质储存和头季老叶的光合产物，针对头季稻收获后老叶对再生稻生长的影响需进一步研究。
前人针对再生稻叶片的研究表明，再生稻的叶面积指数和最大单茎叶面积约为头季稻的 1/8~1/5，但其净同化率较头季稻高 2.9 倍，剑叶光合产物分配到穗部的比例明显高于头季稻^[36]，延长叶片功能期有利于提高再生稻的光合生产力^[37]。在本研究中，与头季稻相比，再生稻的叶片干物质积累能更快到

达最大值,并在生育后期保持较高的干物质积累量。这可能是由于再生稻的生育期短,且前期对干物质的需求量大,而头季稻桩的干物质转运不能够满足再生稻的干物质需求,因此其叶片的分化生长速率较快,净光合速率相对较高。

3.2 水稻-再生稻的养分积累

合理供给氮、磷、钾等营养元素,能够提高水稻后期的物质积累能力,增加干物质积累量,提高物质转运率,为实现水稻的高产奠定物质基础^[38]。因此,研究再生稻的养分吸收、利用规律,对优化再生稻施肥技术、提高再生稻产量有重要意义。在本研究中,头季稻氮、磷、钾养分的积累变化与常规中稻相似^[30],区别表现在头季稻叶片氮养分的积累量在灌浆后期有增加的趋势,磷、钾的积累量则保持平稳,有别于常规中稻齐穗期至灌浆中期的降低。这可能是由于促芽肥中的氮肥增加了头季稻后期叶片氮积累量,钾肥维持了叶片的钾积累量没有继续降低。吴自明等^[39]的研究表明,水稻叶片后期衰老特性与叶片的持氮能力有关,氮素营养有延缓叶片衰老的重要作用。头季稻生育后期施用的促芽肥中包含氮肥和钾肥,能够增加水稻各器官对氮和钾的吸收和积累,起到了延缓叶片衰老的作用,水稻对氮、磷、钾的吸收的协同效应使得磷的积累量也能够维持在一定水平^[40]。同时,头季后期会进行田间控水,并于收获前进行晒田管理,可能诱导产生新根;前人的研究也发现,增施促芽肥可以提高头季根系活力,能够增加植株对磷、钾的吸收^[21]。而在一季水稻中,水稻叶片的钾积累量在中期达到峰值后开始持续下降,灌浆后期至成熟期之间仍会继续降低^[41]。

再生稻的养分积累量与头季稻的差异较大。在头季收获后,头季稻桩中的一部分氮养分能转运至茎、叶中,并能在后期转运至穗中^[42],这部分养分对再生稻早期的生长非常重要,营养器官的转化氮是再生稻籽粒氮素积累的主要来源^[19]。在本研究中,头季稻桩 23.9%~33.9%的氮素积累量于再生季转运至新生部位,其中 61.3%的氮素输出发生在齐穗前;再生稻叶和茎的氮素输出量分别为 19.9 kg/hm² 和 13.7 kg/hm²,是再生稻穗氮素积累的主要来源。再生稻的钾总积累量在生育后期有下降的趋势,一方面可能是由于干物质积累量的降低;另一方面可能是由于淋洗作用导致。从图 1 中可以看出,再生稻生育后期头季稻桩、茎和叶的干物质质量都有一定程度的降低,这可能是由于头季稻桩上的老叶和再生稻叶片的脱落导致,进而使得再

生稻的钾积累量出现降低。另一方面,在我们的研究中再生稻收获相对较迟,再生季新生的叶片已经枯黄,王丽娟等^[43]的研究发现,水稻生育后期吸收钾素的能力减弱,且枯叶中钾素被淋洗,使得水稻地上部钾总积累量有降低的趋势。水稻-再生稻生长发育过程中各器官间的养分转运特性还需要进一步研究。

4 结论

头季稻总干物质积累量在整个生育期表现为“慢-快-慢”的增长趋势,从孕穗期至灌浆期是头季稻的干物质快速积累期。再生稻总干物质积累量呈“S”形曲线,从头季收获至再生季齐穗期是再生稻干物质快速积累期。头季稻氮的总积累量呈不断增加的趋势,磷、钾的总积累量则表现为先增加后降低,均在灌浆期达到最大。再生稻的氮、磷、钾养分的总积累量均表现为先增加后降低的变化,氮、磷的总积累量在灌浆期达到最大,而钾则在齐穗期达到最大。

综上所述,可以通过增加头季稻后期的养分供应,促进再生芽的萌发,使头季稻收获后的稻桩为再生稻提供更多的养分,有利于再生芽前期的生长;同时保障再生稻的养分供应,满足再生稻前期快速生长对养分的需要,进而获得再生稻的高产。

参考文献:

- [1] 朱德峰, 庞乾林, 何秀梅. 我国历年水稻产量增长因素分析与今后的发展对策. 中国稻米, 1997, 3(1): 3-6.
Zhu D F, Pang Q L, He X M. Analysis on the factors of rice yield growth over the past years and the future development countermeasures in China. *China Rice*, 1997, 3(1): 3-6. (in Chinese)
- [2] 蔡承智, 梁颖, 万怀韬. 基于产量潜力预测的中国水稻单产分析. 中国农学通报, 2010, 26(4): 310-313.
Cai C Z, Liang Y, Wan H T. Analyses of rice yield in China based on the projection of yield potential. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, 26(4): 310-313. (in Chinese with English abstract)
- [3] 彭少兵, 黄见良, 钟旭华, 杨建昌, 王光火, 邹应斌, 张福锁, 朱庆森, Roland Buresh, Christian Witt. 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 G H, Zhou Y B, Zhang F S, Zhu Q S, Roland B, Christian W. 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)

- [4] 程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 赵艳霞, 黄敬峰. 中国水稻生产的时空动态分析. 中国农业科学, 2012, 45(17): 3473-3485.
Cheng Y X, Wang X Z, Guo J P, Zhao Y X, Huang J F. The temporal-spatial dynamic analysis of China rice production. *Sci Agric Sin*, 2012, 45(17): 3473-3485. (in Chinese with English abstract)
- [5] 陈善毅. 我国耕地复种指数继续提高的瓶颈与对策. 安徽农业科学, 2007, 35(21): 6560-6561.
Chen S Y. Research on the bottleneck of farmland's multicropping index-increasing and its countermeasure. *J Anhui Agric Sci*, 2007, 35(21): 6560-6561. (in Chinese with English abstract)
- [6] 辛良杰, 李秀彬. 近年来我国南方双季稻区复种的变化及其政策启示. 自然资源学报, 2009, 24(1): 58-65.
Xin L J, Li X B. Changes of multiple cropping in double cropping rice area of Southern China and its policy implications. *J Nat Resour*, 2009, 24(1): 58-65. (in Chinese with English abstract)
- [7] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴. 北京: 中国统计出版社, 2015.
NBS. China Statistical Yearbook. Beijing: China Statistics Press, 2015.
- [8] 蒋俊, 屠乃美. 再生稻产量形成与栽培技术研究进展. 作物研究, 2013, 27(1): 70-74.
Jiang J, Tu N M. Progress on research of yield formation and cultivation techniques of ratoon rice. *Crop Res*, 2013, 27(1): 70-74.
- [9] 张长海, 李立中, 吴行春, 方金旭, 汪祚开, 李朝晖, 郭亚玲. 粳型双晚杂交稻组合作再生稻表现及经济效益分析. 杂交水稻, 2012, 27(4): 37-43.
Zhang C H, Li L Z, Wu X C, Fang J X, Wang Z K, Li Z H, Guo Y L. Analysis on economic benefits of ratoon rice of double-cropping late indica hybrids. *Hybrid Rice*, 2012, 27(4): 37-43. (in Chinese with English abstract)
- [10] 朱永川, 熊洪, 徐富贤, 郭晓艺, 张林, 刘茂, 周兴兵. 再生稻栽培技术的研究进展. 中国农学通报, 2013, 29(36): 1-8.
Zhu Y C, Xiong H, Xu F X, Guo X Y, Zhang L, Liu M, Zhou X B. Progress on research of ratoon rice cultivation technology. *Chin Agric Sci Bull*, 2013, 29(36): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [11] 徐富贤, 熊洪, 张林, 朱永川, 蒋鹏, 郭晓艺, 刘茂. 再生稻产量形成特点与关键调控技术研究进展. 中国农业科学, 2015, 45(9): 1702-1717.
Xu F X, Xiong H, Zhang L, Zhu Y C, Jiang P, Guo X Y, Liu M. Progress in research of yield formation of ratooning rice and its high-yielding key regulation technologies. *Sci Agric Sin*, 2015, 45(9): 1702-1717. (in Chinese with English abstract)
- [12] 凌启鸿, 张洪程, 蔡建中, 苏祖芳, 凌励. 水稻高产群体质量及其优化控制探讨. 中国农业科学, 1993, 26(6): 1-11.
Ling Q H, Zhang H C, Cai J Z, Su Z F, Ling L. Investigation on the population quality of high yield and its optimizing control programme in rice. *Sci Agric Sin*, 1993, 26(6): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [13] 冉茂林, 熊洪, 洪松, 张乃洪, 陈应平, 刘华忠. 再生稻幼穗分化特性及发苗技术研究. 西南农业学报, 2002, 15(2): 28-33.
Ran M L, Xiong H, Hong S, Zhang N H, Chen Y P, Liu H Z. Study on the young ear differentiation character and the technology of sprouting for ratooning rice. *Southwest China J Agric Sci*, 2002, 15(2): 28-33. (in Chinese with English abstract)
- [14] 郭九信, 孔亚丽, 谢凯刘, 李东海, 冯绪猛, 凌宁, 王敏, 郭世伟. 养分管理对直播稻产量和氮肥利用率的影响. 作物学报, 2016, 42(7): 1016-1025.
Guo J X, Kong Y L, Xie K L, Li D H, Feng X M, Ling N, Wang M, Guo S W. Effects of Nutrient management on yield and nitrogen use efficiency of direct seeding rice. *Acta Agron Sin*, 2016, 42(7): 1016-1025. (in Chinese with English abstract)
- [15] 袁小乐, 潘晓华, 石庆华, 吴建富, 漆映雪. 双季超级稻的干物质生产特性研究. 杂交水稻, 2009, 24(5): 71-75.
Yuan X L, Pan X H, Shi Q H, Wu J F, Qi Y X. Studies on the characteristics of dry matter production in doublecropping early and late super rice. *Hybrid Rice*, 2009, 24(5): 71-75. (in Chinese with English abstract)
- [16] 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(7): 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(7): 1927-1936. (in Chinese with English abstract)
- [17] 王允青, 郭熙盛, 戴明伏. 氮肥运筹方式对杂交水稻干物质积累和产量的影响. 中国土壤与肥料, 2008, (2): 31-34.
Wang Y Q, Guo X S, Dai M F. Effects of nitrogen application on dry matter accumulation and yield of hybrid rice. *Soil Fert Sci China*, 2008, (2): 31-34. (in Chinese with English abstract)
- [18] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 卓传营, 谢华安. 不同氮肥施用量对再生稻氮素吸收和分配的影响. 福建农业学报, 2003, 18(1): 50-55.
Jiang Z W, Lin W X, Li Y Z, Zhuo C Y, Xie H A. Effect of nitrogen fertilizer rates on uptake and distribution of nitrogen in ratoon rice. *Fujian J Agric Sci*, 2003, 18(1): 50-55. (in Chinese with English abstract)
- [19] 杨东, 陈鸿飞, 卓传营, 林文雄. 头季不同施氮方式对

- 再生稻生理生化的影响. 中国生态农业学报, 2009, 17(4): 643-646.
- Yang D, Chen H F, Zhuo C Y, Lin W X. Effect of different N application modes in the first cropping rice on the physiobiochemistry of the first cropping rice and its ratoon rice. *Chin J Eco-Agric*, 2009, 17(4): 643-646. (in Chinese with English abstract)
- [20] 陈鸿飞, 杨东, 梁义元, 张志兴, 梁康迺, 林文雄. 头季稻氮肥运筹对再生稻干物质积累、产量及氮素利用率的影响. 中国生态农业学报, 2010, 18(1): 50-56.
- Chen H F, Yang D, Liang Y Y, Zhang Z X, Liang K J, Lin W X. Effect of nitrogen application strategy in the first cropping rice on dry matter accumulation, grain yield and nitrogen utilization efficiency of the first cropping rice and its ratoon rice crop. *Chin J Eco-Agric*, 2010, 18(1): 50-56. (in Chinese with English abstract)
- [21] 郑景生, 林文, 卓传营, 方宣钧, 林文雄. 再生稻根干物质质量及根系活力与产量的相关性研究. 中国生态农业学报, 2004, 12(4): 112-115.
- Zheng J S, Lin W, Zhuo C Y, Fang X J, Lin W X. The correlation of dry biomass and activity of root system with grain yield in ratoon rice (*Oryza sativa* L). *Chin J Eco-Agric*, 2004, 12(4): 112-115. (in Chinese with English abstract)
- [22] 姜照伟, 林文雄, 李义珍, 卓传营, 杨慧杰, 谢华安. 不同氮肥施用量对再生稻若干生理特性的影响. 福建农业学报, 2005, 20(3): 168-171.
- Jiang Z W, Lin W X, Li Y Z, Zhuo C Y, Yang H J, Xie H A. Effect of nitrogen fertilizer rates on some physiological characteristics of ratoon rice. *Fujian J Agric Sci*, 2005, 20(3): 168-171. (in Chinese with English abstract)
- [23] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 王贵雄. 再生稻促芽肥高效施用量与头季稻齐穗期库源结构关系. 西南农业学报, 2006, 19(5): 833-837.
- Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, Wang G X. Relationship between the efficient amount of nitrogen application for bud development and the source-sink structure at full heading stage of main crop. *Southwest China J Agric Sci*, 2006, 19(5): 833-837. (in Chinese with English abstract)
- [24] 徐富贤, 熊洪, 朱永川, 张林, 郭晓艺, 刘茂. 促芽肥施用时期对不同源库类型杂交中稻再生力的影响. 杂交水稻, 2010, 25(3): 57-63.
- Xu F X, Xiong H, Zhu Y C, Zhang Lin, Guo X Y, Liu M. Effects of the time of N application for bud development on the ratooning ability of mid-season rice hybrids with different source-sink structure. *Hybrid Rice*, 2010, 25(3): 57-63. (in Chinese with English abstract)
- [25] 崔党群. Logistic 曲线方程的解析与拟合优度测验. 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. *Appl Stat Manag*, 2005, 24(1): 112-115. (in Chinese with English abstract)
- [26] 吴文革, 张洪程, 钱银飞, 陈烨, 徐军, 吴桂成, 翟超群, 霍中洋, 戴其根. 超级杂交中籼水稻物质生产特性分析. 中国水稻科学, 2007, 21(3): 287-293.
- Wu W G, Zhang H C, Qian Y F, Chen Y, Xu J, Wu G C, Qu C Q, Huo Z Y, Dai Q G. Analysis on dry matter production characteristics of middle-season indica super hybrid rice. *Chin J Rice Sci*, 2007, 21(3): 287-293. (in Chinese with English abstract)
- [27] 陈建晓, 孟卫东, 林尤珍, 符研, 符淑瑜. 不同栽培模式对海南超级稻-再生稻产量形成的影响. 杂交水稻, 2015, 30(2): 38-44.
- Chen J X, Meng W D, Lin Y Z, Fu Y, Fu S Y. Effects of different cultivation models on yield formation of super rice-ratooning rice in Hainan. *Hybrid Rice*, 2015, 30(2): 38-44. (in Chinese with English abstract)
- [28] 林瑞余, 梁义元, 蔡碧琼, 何海斌, 林文雄. 不同水稻产量形成过程的干物质积累和分配特征. 中国农学通报, 2006, 22(2): 185-190.
- Lin R Y, Liang Y Y, Cai B Q, He H B, Lin W X. Characteristics of dry matter accumulation and partitioning in process of yield formation in different rice cultivars. *Chin Agric Sci Bull*, 2006, 22(2): 185-190. (in Chinese with English abstract)
- [29] 杨长明, 杨林章, 颜廷梅, 欧阳竹. 不同肥料结构对水稻群体干物质生产及养分吸收分配的影响. 土壤通报, 2004, 35(2): 199-202.
- Yang C M, Yang L Z, Yan T M, Ou Y Z. Effects of nutrient regimes on dry matter production and nutrient uptake and distribution by rice plant. *Chin J Soil Sci*, 2004, 35(2): 199-202. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李云春. 几种不同类型水稻养分吸收特性及施肥效果研究. 武汉: 华中农业大学, 2011.
- Li Y C. Study on nutrients absorption characteristic and NPK fertilization effects of several different types of rice. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [31] 张上守, 卓传营, 姜照伟, 李义珍, 郭聪华. 超高产再生稻产量形成和栽培技术分析. 福建农业学报, 2003, 18(1): 1-6.
- Zhang S H, Zhuo C Y, Jiang Z W, Li Y Z, Guo C H. Yield formation and cultivation techniques in super high-yielding ratoon rice. *Fujian J Agric Sci*, 2003, 18(1): 1-6. (in Chinese with English abstract)
- [32] 张明鹏, 刘振声, 邱泉发, 陈爱华, 林丽宽. 应用同位素 ^{14}C 和 ^{15}N 研究再生稻光合产物分配和氮素营养吸收的生理效应. 中国农业科学, 1980, (3): 1-5.
- Zhang M P, Liu Z S, Qiu Q F, Chen A H, Lin L K. Studies on the distribution of photosynthetic products and the absorption of nitrogen nutrients in regenerative rice by using isotopes ^{14}C and ^{15}N . *Sci Agric Sin*, 1980, (3): 1-5. (in Chinese with English abstract)

- [33] 王志强, 刘德林, 谭林. 超级杂交稻再生稻头季后期光合产物分配与产量形成. *湖南农业科学*, 2010, (19): 49-52.
Wang Z Q, Liu D L, Tan L. Distribution of photosynthate in late stage of first season of super hybrid ratoon rice and its yield formation. *Hunan Agric Sci*, 2010, (19): 49-52. (in Chinese with English abstract)
- [34] 段俊, 梁承邨, 黄毓文. 杂交水稻开花结实期间叶片衰老. *植物生理学报*, 1997, 23(2): 139-144.
Duan J, Liang C Y, Huang Y W. Studies on leaf senescence of hybrid rice at flowering and grain formation stage. *Acta Phytophysiol Sin*, 1997, 23(2): 139-144. (in Chinese with English abstract)
- [35] 苗芳, 白龙, 吕淑芳, 曹翠兰, 张嵩午. 过度剪穗对小麦功能叶片同化产物积累及转运的影响. *西北农林科技大学学报*, 2009, 37(5): 89-93.
Miao F, Bai L, Lü S F, Cao C L, Zhang S W. Effects of excessive ear removal on functional leaf assimilate accumulation and transport in wheat. *J Northwest A&F Univ*, 2009, 37(5): 89-93. (in Chinese with English abstract)
- [36] 易镇邪, 周文新, 秦鹏, 屠乃美. 再生稻与同期抽穗主季稻源库流特性差异研究. *作物学报*, 2009, 35(1): 140-148.
Yi Z X, Zhou W X, Qin P, Tu N M. Differences in characteristics of source, sink, and flow between ratooning rice and its same-term heading main-crop rice. *Acta Agron Sin*, 2009, 35(1): 140-148. (in Chinese with English abstract)
- [37] 张建福, 朱永生, 蔡秋华, 卓传营, 张上守, 郑容和, 谢华安. 再生稻净光合速率与产量及其构成因素的相关性分析. *中国水稻科学*, 2011, 25(1): 103-106.
Zhang J F, Zhu Y S, Cai Q H, Zhuo C Y, Zhang S S, Zheng R H, Xie H A. Analysis on correlation of net photosynthetic rate with yield and its components of ratooning rice. *Chin J Rice Sci*, 2011, 25(1): 103-106. (in Chinese with English abstract)
- [38] 陈鸿飞, 林瑞余, 梁义元, 郑履端, 梁康迺, 林文雄. 不同栽培模式早稻-再生稻头季干物质积累运转特性研究. *中国生态农业学报*, 2008, 16(1): 129-133.
Chen H F, Lin R Y, Liang Y Y, Zheng L D, Liang K J, Lin W X. Dry-matter accumulation and transportation in first-rice crop of early rice-ratoon rice under different cultivation patterns. *Chin J Eco-Agric*, 2008, 16(1): 129-133. (in Chinese with English abstract)
- [39] 吴自明, 王竹青, 李木英, 曾蕾, 石庆华, 潘晓华, 谭雪明. 后期水分亏缺与增施氮肥对杂交稻叶片光合功能的影响. *作物学报*, 2013, 39(3): 494-505.
Wu Z M, Wang Z Q, Li M Y, Zeng L, Shi Q H, Pan X H, Tan X M. Effect of water shortage and increasing nitrogen application on photosynthetic function of different hybrid rice combinations at grain filling stage. *Acta Agron Sin*, 2013, 39(3): 494-505. (in Chinese with English abstract)
- [40] 孙永健, 孙园园, 刘树金, 杨志远, 程洪彪, 贾现文, 马均. 水分管理和氮肥运筹对水稻养分吸收、转运及分配的影响. *作物学报*, 2011, 37(12): 2221-2232.
Sun Y J, Sun Y Y, Liu S J, Yang Z Y, Cheng H B, Jia X W, Ma J. Effects of water management and nitrogen application strategies on nutrient absorption, transfer, and distribution in rice. *Acta Agron Sin*, 2011, 37(12): 2221-2232. (in Chinese with English abstract)
- [41] 薛欣欣. 水稻钾素营养特性及钾肥高效施用技术. 武汉: 华中农业大学, 2016.
Xue X X. Study on characteristics of potassium nutrition and high-efficient application technologies of potassium fertilizer in rice. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2016. (in Chinese with English abstract)
- [42] 马均, 王化新, 孙晓辉, 任光璨, 任天举. 促芽肥 ^{15}N 在再生稻中的分配及其作用研究. *西南农业学报*, 1992, 5(1): 41-46.
Ma J, Wang H X, Sun X H, Ren G C, Ren T J. Distribution of budding ^{15}N fertilizer and its effect in ratooning rice. *Southwest China J Agric Sci*, 1992, 5(1): 41-46. (in Chinese with English abstract)
- [43] 王丽娟, 罗盛国, 刘元英, 赵广欣, 王欢. 寒地直播水稻钾素吸收与分配规律研究. *河南农业科学*, 2016, 45(8): 12-17.
Wang L J, Luo S G, Liu Y Y, Zhao G X, Wang H. Study on K uptake and distribution of direct-seeded rice in cold area. *J Henan Agric Sci*, 2016, 45(8): 12-17. (in Chinese with English abstract)