

长期不同施肥对水稻干物质和磷素积累与转运的影响

刘彦伶^{1,2}, 李 渝^{1,2*}, 白怡婧^{1,2}, 黄兴成^{1,2}, 张雅蓉^{1,2}, 张 萌^{1,2}, 张文安^{1,2}, 蒋太明^{2,3*}

(1 贵州省农业科学院土壤肥料研究所, 贵阳 550006; 2 农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站, 贵阳 550006; 3 贵州省农业科学院茶叶研究所, 贵阳 550006)

摘要:【目的】磷是制约黄壤生产力的重要限制因子, 提高作物的磷效率是农业科学研究的热点之一。探讨不同施肥模式对水稻干物质和磷素积累与转运的影响, 为黄壤稻田合理施用磷肥提供理论依据。【方法】依托 22 年的黄壤(水田)长期定位试验, 选取其中 6 种施肥模式: 不施肥(CK); 不施磷肥(NK); 平衡施用化肥(NPK); 单施有机肥(M); 1/2 有机肥替代 1/2 NP(0.5 MNP); 有机肥化肥配施(MNPK)。除 CK 和 MNPK 外, NK、NPK、M、1/2 MN 处理为等氮量 165 kg/hm², 施磷量依次为 P₂O₅ 0、82.5、79.4、81.0 kg/hm², MNPK 施 N 330 kg/hm²、P₂O₅ 161.9 kg/hm²。于水稻分蘖期、开花期及成熟期, 采集水稻植株样品, 分析比较各处理水稻产量、干物质和磷素积累与转移特征、磷肥吸收利用效率的差异。【结果】水稻产量、干物质和磷素积累量大小顺序均表现为 MNPK > M > 0.5 MNP > NPK > CK > NK。磷素积累快速增长开始(t_1)和结束(t_2)时间均较干物质积累提前 2~8 d 和 5~20 d, 且磷素积累快速增长持续时间(Δt)也较干物质缩短了 4~12 d, 表明磷素快速吸收较干物质早, 且持续时间短。处理 NK、NPK、0.5 MNP、MNPK 干物质最大增长速率(V_m)出现时间(t_0)以及 t_1 、 t_2 分别比 CK 和 M 处理滞后 5~10 d、1~4 d、6~16 d, Δt 延长了 1~14 d。各处理干物质和磷素积累的 V_m 均表现为 M、MNPK > 0.5 MNP、CK > NPK > NK。水稻籽粒干物质积累量主要来源于花后干物质积累, 磷素积累量则主要来源于花前磷素积累向籽粒的转运, 各处理花后干物质积累率为 29.5%~43.4%, 施用化肥各处理显著高于 CK 和 M 处理, 各处理花前磷素积累率为 60.5%~85.6%, 大小为 CK > NPK、M > NK、0.5 MNP、MNPK。与 NPK 处理相比, M 和 0.5 MNP 处理磷肥吸收效率、磷肥偏生产力、磷肥利用率分别显著提高了 0.43 kg/kg、48.9 kg/kg、40.8 个百分点和 0.26 kg/kg、32.2 kg/kg、25.3 个百分点。【结论】黄壤地区水稻栽培中长期缺磷不利于花后干物质的积累, 也不利于花前磷素的积累, 严重制约水稻产量和磷吸收量的提高。在氮磷钾投入平衡前提下, 长期单施有机肥可促进花前干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运, 但不利于花后干物质和磷素的积累, 长期单施化肥可延长干物质和磷素积累的快速增长持续时间, 但最大增长速率较小, 而长期有机无机配施均较有利于促进水稻花前和花后干物质和磷素的积累, 水稻产量和磷肥利用率均较高, 是最合理的施肥方式。

关键词: 水稻; 黄壤; 干物质; 磷素; 积累与转运

Effect of long-term fertilization patterns on dry matter and phosphorus accumulation and translocation in rice

LIU Yan-ling^{1,2}, LI Yu^{1,2*}, BAI Yi-jing^{1,2}, HUANG Xing-cheng^{1,2}, ZHANG Ya-rong^{1,2},
ZHANG Meng^{1,2}, ZHANG Wen-an^{1,2}, JIANG Tai-ming^{2,3*}

[1 Institute of Soil and Fertilizer, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China; 2 Scientific Observing and Experimental Station of Arable Land Conservation and Agriculture Environment (Guizhou), Ministry of Agriculture, Guiyang 550006, China; 3 Institute of Tea Research, Guizhou Academy of Agricultural Sciences, Guiyang 550006, China]

收稿日期: 2018-08-21 接受日期: 2018-12-10

基金项目: 贵州省科技计划项目(黔科合基础[2018]1154 和黔科合支撑[2017]2852); 贵州省农业科学院青年基金(黔农科院青年基金[2018]19号); 贵州省农业科学院科技创新专项(黔农科院科技创新[2017]06号); 省科技平台及人才团队计划(黔科合平台人才[2018]5604号)。

联系方式: 刘彦伶 E-mail: lyl890615@163.com

* 通信作者 李渝 E-mail: liyu83110@163.com; 蒋太明 E-mail: jtm532@163.com

Abstract: 【 Objectives 】 Phosphorus (P) is often deficient in yellow soil, improving P efficiency in crop production is greatly concerned in researches. The effects of fertilization patterns on the dry matter and P accumulation and translocation in rice were compared in this paper, aiming to setup rational P fertilization in yellow paddy soil. 【 Methods 】 The study was based on a successive 22-years' field experiment in the yellow paddy soil. Six treatments were chosen from the experiment, they were blank CK, NK, NPK, manure alone (M), 0.5 MNP and MNPK. Except CK and MNPK, NK, NPK, M and 1/2 MNP had the same N input of 165 kg/hm², and P₂O₅ input of 82.5, 79.4 and 81.0 kg/hm² in turn. MNPK treatment had N and P₂O₅ input of 331 and 161.9 kg/hm². Rice aboveground parts were sampled at tillering, flowering and maturity stages, the grain yield, dry matter and P contents were measured. P accumulation and transfer characteristics, P uptake and utilization efficiency were calculated. 【 Results 】 Rice yield, dry matter and P accumulation ranked as follows: MNPK > M > 0.5 MNP > NPK > CK > NK. Compared with dry matter accumulation, the start time (t_1) and the end time (t_2) of P accumulation during fast-accumulation period advanced 2–8 d and 5–20 d, and the duration (Δt) of P accumulation in fast-accumulation period was shortened by 4–12 d, which indicated that the P accumulation was faster than dry matter and lasted for a shorter time. In contrast to the CK and M treatments, the t_0 [days of the maximum dry matter accumulation rate (V_m) occurred], t_1 , t_2 of dry matter accumulation in the treatments with chemical fertilizer application (NK, NPK, 0.5 MNP, MNPK) lagged 5–10 d, 1–4 d, 6–16 d, respectively. The Δt of dry matter and P accumulation also prolonged 1–14 d and 1–15 d, respectively. The V_m of dry matter and P accumulation ranked as M, MNPK > 0.5 MNP, CK > NPK > NK. Dry matter and P accumulation amount of rice grain were mainly derived by post-anthesis period dry matter accumulation and pre-anthesis period P translocation, respectively. The post-anthesis period dry matter accumulation rate of each treatment was 29.5%–43.4%, and the treatments with chemical fertilizer had significantly better effect than that of CK and M treatment. The pre-anthesis period P accumulation rate of treatments was 60.5%–85.6%, and the order was CK > NPK, M > NK, 0.5 MNP, MNPK. Compared with the NPK treatment, 0.5 MNP and M treatments significantly increased the P absorption efficiency, P partial factor productivity and P utilization efficiency by 0.43 kg/kg, 48.9 kg/kg, 40.8 percentage points and 0.26 kg/kg, 32.2 kg/kg, 25.3 percentage points, respectively. 【 Conclusions 】 Long-term P deficiency was not conducive to dry matter accumulation in post-anthesis period and P accumulation in pre-anthesis period, which seriously restricts the improvement of rice yield and phosphorus uptake. Long-term solely application of organic manure could promote the dry matter and P accumulation and transport in pre-anthesis period, but restricted those in post-anthesis period. Long-term solely application of chemical fertilizer could prolong the Δt of dry matter and P accumulation, but the V_m was small. Long-term integrated fertilization with organic manure and chemical fertilizers could promote the dry matter and P accumulation both in pre-anthesis period and after-anthesis period, leading to high grain yield and P use efficiency, which is the best fertilization pattern in yellow paddy soil.

Key words: rice; yellow soil; dry matter; phosphorus; accumulation and translocation

水稻是我国重要的粮食作物, 其产量在我国粮食安全和社会稳定中起重要作用, 而施肥是影响水稻高产和稳产的关键因素之一, 合理的施肥模式既可防止土壤生产力的退化, 而且能保持土地的可持续性生产^[1-2]。作物产量形成的过程实质是干物质合成、积累、运转与分配的过程, 研究表明植株干物质积累量与产量呈正相关, 而矿质元素的吸收和转运直接影响着植株干物质的积累和分配, 进而影响产量的形成^[3-5]。磷参与了光合酶的组成, 直接影响

植株光合效率及生长发育^[6-7], 故植株和土壤磷营养对干物质的形成和分配具有重要影响。目前, 关于氮肥运筹对小麦^[8]、玉米^[9]、水稻^[10-11]等谷类作物干物质和氮素积累与分配等影响已开展大量研究, 结果表明, 作物品种、氮肥类型、施用量、施用方式等均可影响植株干物质和氮素积累及分配, 但是关于磷肥运筹对作物干物质和磷素积累与转运的影响研究相对较少。相关研究结果表明, 合理的磷肥施用量、施用方式及肥料类型可提高作物花后干物质积

累量和转运量,提高植株磷素吸收利用效率^[12-15]。黄壤是贵州主要的农业土壤类型,土壤磷素有效性低是黄壤的主要障碍因子之一,故合理施用磷肥是提高作物产量和肥料利用效率的重要措施。土壤中有效磷含量的变化,会影响到水稻干物质和磷的积累与转运,进而影响产量,本课题组前期研究已表明,施用磷肥可显著提高黄壤的磷素水平,而长期不施磷肥土壤磷则严重耗竭^[16],有机无机配施可提高土壤有机质、土壤氮及土壤微生物量碳氮,长期不施肥或单施化肥不利于提高土壤肥力^[17-20]。黄壤性水稻土地区,不同施肥模式及土壤养分水平下水稻干物质和磷素积累量、干物质和磷素积累率和转运率及其对籽粒贡献率、磷肥利用效率等如何变化目前尚不完全清楚,故系统研究长期不同施肥模式对水稻干物质及磷素积累与转运的影响,对于黄壤地区磷肥合理施用具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

本研究依托于农业部贵州耕地保育与农业环境科学观测实验站。试验地位于贵州省贵阳市花溪区贵州省农业科学院内(106°39'52"E、26°29'49"N),地处黔中丘陵区,属亚热带季风气候,平均海拔1071 m,年均气温15.3℃,年均日照时数1354 h左右,相对湿度75.5%,全年无霜期270 d左右,年降水量1100~1200 mm。试验地土壤为黄壤性水稻土,成土母质为三叠系灰岩与砂页岩风化物。

1.2 试验设计

该长期定位试验于1994年开始基础设施建设和匀地,1995年开始连续监测。试验采用大区对比试验设计,小区面积201 m²(35.7 m×5.6 m),设置有10个施肥模式,本研究选取其中6个:不施肥(CK)、不施磷肥(NK)、平衡施用化肥(NPK)、1/2有机肥替代1/2NP(0.5 MNP)、单施有机肥(M)和常量有机化肥配施(MNPK)。供试化肥为尿素(含N 46.0%)、过磷酸钙(含P₂O₅ 12.0%)和氯化钾(含K₂O 60%);有机肥为牛廐肥,鲜基养分多年测试平均含N 2.7 g/kg、P₂O₅ 1.3 g/kg、K₂O 6.0 g/kg。化学氮肥按返青肥:分蘖肥40%:60%的比例分两次追施。各处理养分来源及施用量见表1。

本研究中水稻品种为‘汕优108’,栽培密度为2.08×10⁵株/hm²,栽培方式为人工手插,于2016年6月5日移栽,10月9日收割,分蘖期取样日期为

表1 不同施肥处理施肥量

Table 1 Nutrient application rates of different fertilization patterns

处理 Treatment	鲜牛廐肥 Cow manure (t/hm ²)	总养分投入量(kg/hm ²) Total nutrient input		
		N	P ₂ O ₅	K ₂ O
CK	0.0	0.0	0.0	0.0
NK	0.0	165.0	0.0	82.5
NPK	0.0	165.0	82.5	82.5
M	61.1	165.0	79.4	366.6
0.5 MNP	30.6	165.0	81.0	183.3
MNPK	61.1	330.0	161.9	449.1

7月4日,开花期取样日期为8月22日。水稻生长期采用前期淹水、中期烤田和后期干湿交替的水分管理模式,冬季翻耕炕田。试验过程中不使用除草剂和杀虫剂等化学农药,所有处理除施肥差异外,其他农事活动均一致。2015年水稻收获后各处理土壤基本化学性质见表2。

1.3 样品采集和分析

由于长期定位试验小区面积较大且未设置重复,本研究将试验地延长边三等分,设置3个调查取样重复小区,每重复小区分别于移栽时、分蘖期、开花期和成熟期采集水稻植株5株,于105℃杀青30 min,80℃烘至恒重,测定干物质质量,然后将植株样品粉碎后采用H₂SO₄-H₂O₂消煮—钼锑抗比色法测定水稻植株磷含量。水稻成熟期小区全部收获计产获取实际产量,在70℃条件下烘干48 h后称量,折算籽粒产量。

1.4 相关参数计算^[4-5]

花前干物质(磷)积累量(kg/hm²)=开花期干物质(磷)积累量,磷素积累量中磷含量均为单体P含量,下同;

花后干物质(磷)积累量(kg/hm²)=成熟期干物质(磷)积累量-开花期干物质(磷)积累量;

花前干物质(磷)积累率(%)=开花期干物质(磷)积累量/成熟期干物质(磷)积累量×100;

花后干物质(磷)积累率(%)=花后干物质(磷)积累量/成熟期干物质(磷)积累量×100;

营养器官干物质(磷)转运量(kg/hm²)=开花期干物质(磷)积累量-成熟期营养器官干物质(磷)积累量;

营养器官干物质(磷)转运率(%)=干物质(磷)

表 2 2015 年各施肥处理土壤化学性质
Table 2 Chemical properties of soils in different fertilization treatments in 2015

处理 Treatment	pH	有机质 (g/kg) Organic matter	全氮 (g/kg) Total N	碱解氮 (mg/kg) Alk. -hydr. N	有效磷 (mg/kg) Available P	速效钾 (mg/kg) Available K
CK	7.02 b	43.8 c	1.87 c	110.2 c	11.2 d	125.0 c
NK	6.83 c	44.8 c	1.90 c	120.4 c	7.1 e	130.0 c
NPK	7.01 b	45.0 c	1.88 c	115.0 c	17.7 c	122.5 c
M	7.23 a	58.7 a	2.59 a	160.9 a	23.6 b	238.3 a
0.5 MNP	7.14 ab	51.6 b	2.32 b	148.0 b	22.7 b	185.0 b
MNPK	7.13 ab	57.9 a	2.62 a	159.5 ab	42.6 a	262.5 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters represent significant difference among treatments at the 0.05 level.

转运量/开花期干物质 (磷) 积累量 $\times 100$;

干物质 (磷) 转运量对籽粒贡献率 (%) = 营养器官干物质 (磷) 转运量/成熟期籽粒干重 (磷吸收量) $\times 100$;

花后干物质积累量对籽粒贡献率 (%) = 花后干物质 (磷) 积累量/成熟期籽粒干重 (磷吸收量) $\times 100$;

磷吸收效率 (kg/kg) = 植株地上部磷积累量 $\times 2.29$ /施磷量;

磷肥偏生产力 (kg/kg) = 籽粒产量/施磷量;

磷肥利用率 (%) = (施磷处理吸磷量 - NK 处理吸磷量) $\times 2.29$ /施磷量;

逻辑斯蒂 (Logistic) 方程 $y = k/[1 + e^{-(a-bt)}]$, 其中 t_1 和 t_2 为 Logistic 生长曲线的两个拐点, 分别代表干物质 (磷素) 积累快速增长的开始时间 [t_1 (d) = $(a - 1.317)/b$] 和结束时间 [t_2 (d) = $(a + 1.317)/b$]; Δt 为干物质 (磷素) 快速增长持续期, Δt (d) = $t_2 - t_1$; V_m 为干物质 (磷素) 最大增长速率, V_m [kg/(hm²·d)] = $(k \times b)/4$;

t_0 为干物质 (磷素) 积累最大速率出现时间, t_0 (d) = a/b 。

1.5 数据分析

试验数据采用 Excel 2010 软件进行计算处理, 利用 SPSS 20.0 和 DPS 软件进行统计分析和函数模拟, 差异显著性分析用 Duncan 新复极差法, 显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ 。

2 结果与分析

2.1 不同施肥模式对产量及构成因素的影响

由表 3 可知, 各处理 2016 年水稻实际产量变化趋势与 2015—2017 年三年平均值趋势一致。与 NPK 处理相比, CK 和 NK 处理 2015—2017 年水稻实际产量平均值分别下降了 8.8% 和 15.9%, M、0.5 MNP、MNPK 处理分别增加了 6.1%、12.3%、25.1%。可见, 长期不施肥尤其是不施磷肥可降低水稻产量,

表 3 不同施肥模式水稻产量及产量构成因素

Table 3 Yield and its components of rice under different fertilization patterns

处理 Treatment	有效穗数 Effective spike ($\times 10^4/\text{hm}^2$)	千粒重 1000-grain weight (g)	穗粒数 Grain number per spike	2016 年产量 Yield in 2016 (kg/hm ²)	2015—2017 年平均产量 Mean yield from 2015 to 2017 (kg/hm ²)
CK	200.9 b	32.7 a	134.3 c	8114	7694 b
NK	184.4 b	31.6 b	135.3 c	7890	7088 b
NPK	191.0 b	31.6 b	161.7 a	9782	8432 ab
M	259.1 a	29.0 d	146.6 b	10383	8948 ab
0.5 MNP	243.6 a	30.2 c	142.7 b	11141	9471 ab
MNPK	264.1 a	30.0 c	144.5 b	11927	10546 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters represent significant difference among treatments at the 0.05 level.

施用有机肥尤其是有机无机配施最有利于提高水稻产量。从产量构成因子看，有效穗数增加是施用有机肥增产的主要原因，穗粒数低则是 CK 和 NK 处理减产的主要原因。

2.2 不同施肥模式对水稻干物质积累的影响

水稻移栽后，不同施肥模式水稻干物质积累量持续增加，在收获期达最大(图 1)。分蘖期、开花期、成熟期干物质积累量分别为 763~1631 kg/hm²、7646~13545 kg/hm²、12748~20602 kg/hm²，除分蘖期 NPK 处理较高外，各生育时期不施肥(CK)或单施化肥(NK、NPK)的处理干物质积累量都显著低于施用有机肥的各处理(M、0.5 MNP、MNPK)。通过对不同生育时期干物质积累量进行 Logistic 方程拟合(表 4)发现，不同施肥处理干物质积累模型相关系数(R²)均达到显著(P < 0.05)或极显著水平(P < 0.01)。从曲线相关参数可知，不施化肥的 CK 和 M 处理干物质积累最大速率出现时间(t₀)较施用化肥的 NK、

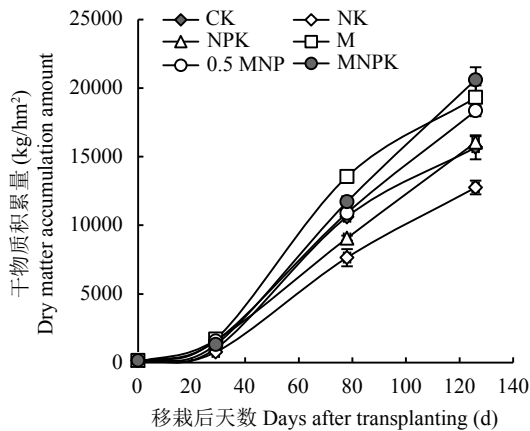


图 1 不同生育时期水稻干物质积累量
Fig. 1 Dry matter accumulation amount of rice in different growth stages

NPK、0.5 MNP、MNPK 处理提前 5~10 d，干物质积累快速增长的开始时间(t₁)和结束时间(t₂)也分别提前 1~4 d 和 6~16 d。干物质快速增长持续期(Δt)为 38~52 d，以 CK、M 和 NK 处理较短，MNPK 和 0.5 MNP 处理其次，NPK 处理最长。干物质最大增长速率(V_m)为 211.3~325.8 kg/(hm²·d)，处理间顺序为 NK、NPK < CK、0.5 MNP < M、MNPK，这说明 CK 和 M 处理可在短时间内快速积累干物质，0.5 MNP 和 MNPK 则较长时间内以较高速率积累干物质。

2.3 不同施肥模式对水稻干物质转运的影响

不同施肥模式对水稻干物质转运影响显著(表 5)，CK 和 M 处理更有利于花前干物质的积累，NPK 处理则更有利于花后干物质的积累，0.5 MNP 和 MNPK 处理花前和花后干物质积累量均较高，而 NK 处理花前和花后干物质积累量均较低。CK、M、NK 处理更有利于花前干物质的转运，干物质转运量对籽粒的贡献率高达 28.1%~42.0%，NPK、0.5 MNP、MNPK 处理干物质转运量对籽粒的贡献率仅为 13.5%~21.3%，但其花后干物质积累量对籽粒的贡献率高达 78.7%~86.5%。各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率(58.0%~86.5%)均高于干物质转运量对籽粒贡献率(13.5%~42.0%)，花后干物质积累量对提高水稻产量更为重要。

2.4 不同施肥模式对水稻磷素积累量的影响

不同施肥处理的水稻磷素积累量随生育期变化规律与干物质一致，均表现为持续增加的趋势，在收获期达最大(图 2)。分蘖期、开花期、成熟期磷素积累量分别为 0.80~3.88 kg/hm²、11.5~34.3 kg/hm²、19.0~51.7 kg/hm²，各生育时期基本表现为施用有机

表 4 水稻干物质积累方程及相关参数

Table 4 Logistic equations and parameters of rice dry matter accumulation

处理 Treatment	逻辑斯蒂方程 Logistic equation	R ²	t ₀	t ₁	t ₂	Δt	V _m
CK	y = 15957.1/[1 + e ^(4.72 - 0.07 t)]	0.9999**	68	49	87	38	276.4
NK	y = 13170.7/[1 + e ^(4.68 - 0.068 t)]	0.9999**	73	52	93	41	211.3
NPK	y = 17349.3/[1 + e ^(3.82 - 0.05 t)]	0.9992*	76	50	102	52	217.7
M	y = 19683.5/[1 + e ^(4.28 - 0.07 t)]	0.9998*	66	46	86	40	320.1
0.5 MNP	y = 19274.7/[1 + e ^(4.12 - 0.06 t)]	0.9996*	73	50	97	47	271.2
MNPK	y = 21550.9/[1 + e ^(4.54 - 0.06 t)]	0.9999*	75	53	97	44	325.8

注 (Note) : t— 水稻移栽后天数 Days after transplanting (d); y— 水稻干物质积累量 Dry matter accumulation (kg/hm²). **— P < 0.01; *— P < 0.05.

表 5 不同施肥模式水稻干物质积累、转运及对籽粒的贡献率

Table 5 Dry matter accumulation, translocation amount and contribution rate to grains in different fertilization patterns

处理 Treatment	积累量 (kg/hm ²) Accumulation amount		积累率 (%) Accumulation rate		转运量 Translocation amount (kg/hm ²)	转运率 Translocation rate (%)	对籽粒贡献率 (%) Contribution to grain	
	花前 Pre-anthesis	花后 Post-anthesis	花前 Pre-anthesis	花后 Post-anthesis			转运量 Translocation amount	花后积累量 Post-anthesis accumulation
	CK	10617 c	5058 c	67.8 a	32.2 b	2853 b	26.2 ab	36.0 a
NK	7646 e	5102 c	58.9 b	40.1 a	2003 c	27.1 a	28.1 b	71.9 c
NPK	9057 d	6983 b	56.6 b	43.4 a	1800 c	19.8 bc	20.6 c	79.4 b
M	13545 a	5758 c	70.5 a	29.5 b	4157 a	30.2 a	42.0 a	58.0 d
0.5 MNP	10896 bc	7438 b	59.2 b	40.8 a	2013 c	18.4 cd	21.3 c	78.7 b
MNPK	11702 b	8900 a	57.0 b	43.0 a	1394 c	12.1 d	13.5 d	86.5 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters represent significant difference among treatments at the 0.05 level.

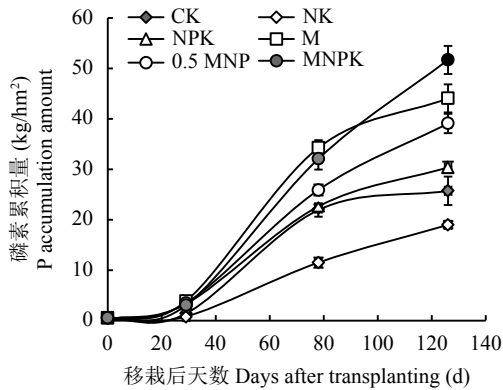


图 2 不同生育时期水稻磷素积累量

Fig. 2 P accumulation amount of rice in different growth stages

肥的处理显著高于不施肥或单施化肥的处理, 成熟期为 NK < CK < NPK < 0.5 MNP < M < MNPK, 处理间差异均达显著水平。通过对不同生育期磷素积累量进行 Logistic 方程拟合 (表 6), 不同施肥模式磷素积累模型决定系数 (R^2) 均达到显著或极显著水平。从曲线相关参数可知, CK、NPK、M 处理磷素积累最大速率出现时间 (t_0) 较 NK、0.5 MNP、MNPK 处理提前 6~14 d, 磷素积累快速增长的开始时间 (t_1) 和结束时间 (t_2) 也分别提前 2~12 d 和 7~18 d。磷素快速增长持续期 (Δt) 为 28~42 d, 以 CK 最短, M 和 NK 处理其次, NPK、MNPK、0.5 MNP 处理较长, 磷素积累最大增长速率为 NK < NPK < CK、0.5 MNP < M、MNPK。

2.5 不同施肥模式对水稻磷素转运的影响

不施磷肥处理中, NK 处理花前磷素积累量较其

表 6 水稻磷素积累方程及相关参数

Table 6 Logistic equations and parameters of rice P accumulation

处理 Treatment	逻辑斯蒂方程 Logistic equation	R^2	t_0	t_1	t_2	Δt	V_m
CK	$y = 25.8/[1 + e^{(5.55 - 0.09 t)}]$	1.0000**	59	45	74	28	0.60
NK	$y = 19.48/[1 + e^{(5.17 - 0.07 t)}]$	0.9999**	73	54	91	37	0.34
NPK	$y = 30.9/[1 + e^{(4.02 - 0.06 t)}]$	0.9999*	62	42	83	41	0.50
M	$y = 44.5/[1 + e^{(4.47 - 0.07 t)}]$	1.0000**	61	43	79	36	0.81
0.5 MNP	$y = 40.3/[1 + e^{(4.15 - 0.06 t)}]$	0.9999*	68	47	90	43	0.61
MNPK	$y = 53.1/[1 + e^{(4.71 - 0.07 t)}]$	1.0000**	72	52	92	40	0.87

注 (Note): t —水稻移栽后天数 Days after transplanting (d); y —水稻磷素积累量 P accumulation amount of rice.

他处理显著降低 47.5%~64.2%, 而 CK 处理花后磷素积累量最低, 较其他处理显著降低 49.3%~80.6% (表 7); 施用磷肥处理中, M 处理花前磷素积累量最高, 花后磷素积累量则较低, 施用化学磷肥的处理中, 花前和花后干物质积累量均表现为 MNPK > 0.5 MNP > NPK。各处理花前磷素积累率 (60.5%~85.6%) 远高于花后磷素积累率 (14.4%~39.5%), 花前磷素积累是水稻植株磷素的主要来源, CK、M、NPK 处理花前磷素积累率高于 NK、0.5 MNP、MNPK 处理, 花后磷素积累率则相反。干物质转运量以 M 处理最高, CK、NPK、0.5 MNP、MNPK 处理其次, NK 处理最低, 但干物质转运率则表现为 NK > CK > NPK > M、0.5 MNP > MNPK。各处理磷素转运量对籽粒贡献率 (49.1%~83.4%) 均高于花后磷素积累量对籽粒贡献率 (16.6%~50.9%), 花前磷素转运对提

表 7 不同施肥模式水稻磷素积累、转运及对籽粒的贡献率

Table 7 P accumulation, translocation amount and contribution rate to grains in different fertilization patterns

处理 Treatment	积累量 (kg/hm ²) Accumulation amount		积累率 (%) Accumulation rate		转运量 Translocation amount (kg/hm ²)	转运率 Translocation rate (%)	对籽粒贡献率 (%) Contribution to grain	
	花前 Pre-anthesis	花后 Post-anthesis	花前 Pre-anthesis	花后 Post-anthesis			转运量 Translocation amount	花后积累量 Post-anthesis accumulation
	CK	21.9 d	3.8 d	85.6 a	14.4 c	18.5 b	84.5 b	83.4 a
NK	11.5 e	7.5 c	60.5 c	39.5 a	10.1 c	88.0 a	57.4 c	42.6 b
NPK	22.6 d	7.8 c	74.6 b	25.4 b	17.7 b	78.2 c	69.7 b	30.3 c
M	34.3 a	9.8 c	77.8 b	22.2 b	24.9 a	72.6 d	71.8 b	28.2 c
0.5MNP	25.9 bc	13.2 b	66.3 c	33.7 a	18.9 b	73.0 d	58.9 c	41.1 b
MNPK	32.1 b	19.6 a	62.0 c	38.0 a	19.0 b	59.1 e	49.1 d	50.9 a

注 (Note): 同列数据后不同小写字母表示处理间差异达 0.05 显著水平 Values followed by different small letters represent significant difference among treatments at the 0.05 level.

高水稻产量更为重要, CK、M、NPK 处理更有利于花前磷素向籽粒转运, 磷素转运量对籽粒的贡献率高达 69.7%~83.4%, NK、0.5 MNP、MNPK 处理磷素转运量对籽粒的贡献率仅为 49.1%~58.9%, 但其花后磷素积累量对籽粒的贡献率高达 41.1%~50.9%。可见, 水稻植株磷素积累量和转运受肥料类型和土壤磷素水平共同影响, 施用磷肥可在一定程度上提高花前和花后磷素积累量, 有机肥施用量越高花前磷素积累量也越高, 土壤磷素水平越高花后磷素积累量越高, 花前磷素转运率越低, 单施有机肥和单施化肥 (NPK) 更有利于提高花前磷素积累率及花前磷素转运量对籽粒的贡献率, 而有机无机配施则更有利于提高花后磷素积累率及其花后磷素积累量对籽粒的贡献率。

2.6 不同施肥模式对磷肥利用的影响

各处理磷肥吸收效率为 0.73~1.27 kg/kg, M 处理分别比 0.5 MNP、MNPK、NPK 处理显著提高 15.5%、73.9%、51.2%; 各处理磷肥偏生产力为 127.1~242.9 kg/kg (表 8), M 和 0.5 MNP 处理磷肥偏生产力分别比 MNPK 处理显著提高 91.1% 和 78.0%, 比 NPK 处理显著提高 25.2% 和 16.6%; 各处理磷肥利用率以 M 处理最高, 0.5 MNP 和 MNPK 处理其次, NPK 处理最低。

3 讨论

植株地上部分干重反映植株干物质积累和生长状况, 且单株地上部干重为干物质向籽粒运转提供能源物质。本研究表明确施用有机肥尤其是有机无机

表 8 不同施肥模式对水稻磷肥吸收利用效率的影响

Table 8 Effects of the different fertilization patterns on P absorption and utilization efficiency of rice

处理 Treatment	磷肥吸收效率 PAE (kg/kg)	磷肥偏生产力 PPFP (kg/kg)	磷肥利用率 PUE (%)
NPK	0.84 c	194.0 b	31.6 c
M	1.27 a	242.9 a	72.4 a
0.5 MNP	1.10 b	226.2 a	56.9 b
MNPK	0.73 d	127.1 c	46.2 b

注 (Note): PPFP—P partial factor productivity; PAE—P absorption efficiency; PUE—P utilization efficiency.

配施可提高水稻干物质积累量和产量, 而不施肥或不施磷肥水稻干物质积累量和产量则大幅下降, 与前人研究结果一致^[21-23]。籽粒灌浆物质主要来源于花后光合同化产物积累和营养器官的转运^[24-25], 大多数研究表明^[4, 23, 26], 开花至成熟期的干物质积累量与稻谷产量关系更为密切, 本研究结果也表明, 各处理花后干物质积累量对籽粒贡献率 (58.0%~86.5%) 高于干物质转运量对籽粒贡献率 (13.5%~42.0%)。CK、M、NK 处理干物质快速积累时间较提前, 且干物质快速增长持续时间较短, 因而花前干物质的积累率及其转运率较高, NPK、0.5 MNP 和 MNPK 处理干物质快速积累时间较滞后, 且干物质快速增长持续时间较长, 因而更有利于增加花后干物质积累及其向籽粒的转运。综合各方面来看, 0.5 MNP 和 MNPK 处理可促进花后干物质的积累及其向籽粒的转运, 且花前干物质积累量也较高, 其可能的原

因^[27-28]: 一方面, 有机无机配施改善土壤理化性状、培肥地力, 协调土壤速效和缓效养分供给, 土壤养分释放动态与作物营养特性一致, 有利于植株对养分的吸收利用, 提高了干物质积累量, 从而为水稻高产奠定了物质基础; 另一方面, 有机无机肥配合施用既能保证一定数量的有效分蘖和穗数, 又防止水稻生长后期早衰, 延长花后光合作用时间, 保证水稻生长发育后期干物质的积累。单施有机肥虽然显著提高了花前干物质的积累量, 增加水稻有效穗数, 但由于花后养分供应不足导致籽粒灌浆受阻, 故而千粒重显著降低。

作物生物量的积累与养分的积累关系密切, 养分积累决定了生物量的积累, 最终会影响到作物产量的形成, 本研究中不施磷肥处理干物质积累量和产量均显著低于其他处理也说明了植株磷素养分对水稻生长发育影响极大。本研究表明, 各处理磷素积累快速增长开始时间和结束时间比干物质积累快速增长开始时间和结束时间提前 2~8 d 和 5~20 d, 且磷素快速积累持续期也较干物质快速增长持续期缩短了 4~12 d, 说明干物质和磷素的积累并非完全同步, 磷素快速积累先于干物质, 干物质快速积累持续时间更长, 这也说明磷素积累是干物质积累的基础, 磷素积累为干物质积累提供了营养保障。此外, 本研究中磷素转运量对籽粒的贡献率高于花后磷素积累量对籽粒的贡献率, 与干物质花后干物质积累量对籽粒的贡献率高于干物质转运对籽粒的贡献相反, 这与玉米^[29-30]上的研究结果一致, 磷转运对籽粒的贡献大于干物质转运对籽粒的贡献, 此结果

也再次说明花前磷素积累及其向籽粒转运对水稻植株生长更为重要。各施肥处理中, 施用磷肥可在一定程度上提高花前和花后磷素积累量, 有机肥施用量越高花前磷素积累量也越高, 土壤磷素水平越高花后磷素积累量越高, 花前磷素转运率越低, 单施有机肥和单施化肥 (NPK) 更有利于促进花前磷素向籽粒的转运, 而有机无机配施可促进花后籽粒对磷素的吸收。通过相关分析和通径分析分析干物质和磷素积累量与土壤养分之间的相互关系 (表 9), 干物质和磷素总积累量、花前和花后积累量与 pH、全磷和有机质联系最紧密, 干物质和磷素总积累量与 pH、有效磷和有机质均呈显著 ($P < 0.05$) 或极显著 ($P < 0.01$) 正相关, pH 和有机质主要影响花前干物质和磷素的累积, 而有效磷则影响花后干物质和磷素的积累。通径系数的大小反映了土壤指标与干物质和磷素累积的直接相关程度, 通径系数越大表明单项指标的影响越大, 本研究条件下, pH 值对干物质和磷素总积累量和花前积累量影响最大, 而有效磷对花后干物质和磷素积累量影响最大。前文分析已表明, 水稻产量的形成与花后干物质积累和花前磷素转运最为密切, 施用有机肥可显著提高土壤 pH 值、有效磷、有机质含量, 有利于促进干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运, 而不施磷肥土壤 pH 值和有效磷均最低, 最不利于水稻干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运。可见, 黄壤性水稻土地地区, 磷素积累是水稻干物质积累和产量形成的基础, 农业生产中应重视磷肥的施用, 且由于磷素积累先于干物质积累, 磷肥应以基施为宜。此外, 由

表 9 干物质和磷素积累与土壤养分的关系

Table 9 Relationship between dry matter and P accumulation and soil nutrients

指标 Index	pH		有效磷 Available P		有机质 Organic matter	
	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient	相关系数 Correlation coefficient	直接通径系数 Direct path coefficient
干物质积累量 DMA	0.919**	0.564**	0.908*	0.529**	0.883*	—
花前干物质积累量 PDMA	0.948**	0.948**	0.610	—	0.829*	—
花后干物质积累量 ADMA	0.450	—	0.886*	0.886**	0.540	—
磷素积累量 PA	0.863*	0.319**	0.949**	0.58**	0.922**	0.19
花前磷素积累量 PPA	0.964**	0.964**	0.790	—	0.865*	—
花后磷素积累量 APA	0.480	—	0.920**	0.92**	0.760	—

注 (Note): DMA—Dry matter accumulation; PDMA—Pre-anthesis period dry matter accumulation; ADMA—After-anthesis period dry matter accumulation; PA—P accumulation; PPA—Pre-anthesis period P accumulation; APA—After-anthesis period P accumulation. *— $P < 0.05$; **— $P < 0.01$.

于长期不同施肥导致的土壤养分差异可显著影响干物质和磷素的积累及转运,施用有机肥则可提高土壤综合肥力,增加花前干物质和磷素的积累量,平衡施用化肥可促进花后干物质的积累及花前磷素的转运,还可延长干物质和磷素快速增长持续期,不施化肥则不利于花后干物质的积累和磷素的吸收,易导致水稻早衰,因而合理选择肥料类型对水稻生长和磷素吸收意义重大,在施用有机肥提高地力促进水稻植株前期稳长的同时,还应注重化学肥料(尤其是氮磷肥)的合理配施,适当延缓水稻后期衰老,促进水稻干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运,提高水稻产量。

磷是制约黄壤生产力的一个重要限制因子,如何提高作物的磷效率是农业科学研究的热点之一。本研究表明,磷肥吸收效率和磷肥偏生产力均以高施肥量的 MNPK 处理最低,而磷肥利用率则以 NPK 处理最低,M 和 0.5 MNP 处理磷肥吸收效率、磷肥偏生产力、磷肥利用率均较高,说明磷肥施用量过高或长期施用化肥均不利于提高磷肥吸收和利用效率,适宜磷肥用量下,合理配施有机肥最有利于提高磷肥吸收和利用效率,研究结果与高静^[31]的一致,其原因是长期施用有机肥提高了土壤肥力,进而促进水稻干物质和磷素的积累及其向籽粒的转运,提高水稻产量,而长期施用化肥土壤肥力并未显著改善甚至有降低趋势^[20],因而制约了水稻生长和磷素的吸收。我国水稻磷肥的当季利用率只有 11.6%~13.7%^[32],而本研究各处理磷肥利用率均高于 30%,因为本研究是基于 22 年 NK 处理作为对照,长期缺磷造成土壤养分不断下降^[20,33],水稻产量不断降低,而长期施用磷肥处理地力和产量也不断增加,因而本研究磷肥利用率逐年提高。相较而言,磷肥偏生产力不需要测定空白区产量和养分吸收量,更适合评价长期试验中的肥料效应^[34]。

4 结论

花后干物质积累和花前磷素转运量对水稻籽粒贡献较大,平衡施用化肥并结合有机肥部分替代化肥可增大干物质和磷素积累的 Δt 和 V_m ,既可增加花后干物质的积累,又可促进花前磷素的转运,且具有较高的磷素利用效率,是黄壤性水稻土地区实现水稻高产磷高效养分管理的有效途径,而长期不施磷肥处理均不利于花前和花后干物质和磷素的积累及其向籽粒转运,进而导致水稻严重减产,农业生产中应加以避免。

参 考 文 献:

- [1] 黄晶,高菊生,张杨珠,等.长期不同施肥下水稻产量及土壤有机质和氮素养分的变化特征[J].应用生态学报,2013,24(7):1889-1894. Huang J, Gao J S, Zhang Y Z, *et al.* Change characteristics of rice yield and soil organic matter and nitrogen contents under various long-term fertilization regimes[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013, 24(7): 1889-1894.
- [2] Mi W H, Zheng S Y, Yang X, *et al.* Comparison of yield and nitrogen use efficiency of different types of nitrogen fertilizers for different rice cropping systems under subtropical monsoon climate in China[J]. European Journal of Agronomy, 2017, 90: 78-86.
- [3] 程建峰,蒋海燕,潘晓云,等.施氮量对不同氮效率水稻花后干物质和氮积累与转运的影响[J].中国农学通报,2010,26(6):150-156. Cheng J F, Jiang H Y, Pan X Y, *et al.* Effects of nitrogen rates on post-anthesis accumulation and transfer of dry matter and nitrogen in rice with differential nitrogen nutrition efficiency[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(6): 150-156.
- [4] 杨恒山,张玉芹,徐寿军,等.超高产春玉米干物质及养分积累与转运特征[J].植物营养与肥料学报,2012,18(2):315-323. Yang H S, Zhang Y Q, Xu S J, *et al.* Characteristics of dry matter and nutrient accumulation and translocation of super-high-yield spring maize[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2012, 18(2): 315-323.
- [5] 张瑞富,杨恒山,高聚林,等.深松促进春玉米干物质和磷素的积累与转运[J].农业工程学报,2016,32(19):106-112. Zhang R F, Yang H S, Gao J L, *et al.* Subsoiling facilitating accumulation and transportation of dry matter and phosphorus of spring maize[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(19): 106-112.
- [6] 潘晓华,王永锐.无机磷对植物叶片光合作用的影响及其机理的研究进展[J].植物营养与肥料学报,1997,3(3):201-208. Pan X H, Wang Y R. Advance in the study of effects of inorganic phosphate on plant leaf photosynthesis and its mechanism[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 1997, 3(3): 201-208.
- [7] 吴克宁,赵彦锋,吕巧灵,等.潮土区灌溉水和施磷对冬小麦光合作用和产量的影响[J].植物营养与肥料学报,2002,8(4):428-434. Wu K N, Zhao Y F, Lü Q N, *et al.* Effect of irrigation during grain filling stage and applying phosphate on the photosynthetic efficiency and yield of winter wheat in the fluvo-aquic soil area[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2002, 8(4): 428-434.
- [8] 李华,王朝辉,李生秀.地表覆盖和施氮对冬小麦干物质和氮素积累与转移的影响[J].植物营养与肥料学报,2008,14(6):1027-1034. Li H, Wang Z H, Li S X. Effect of soil mulching and N rate on dry matter and nitrogen accumulation and translocation of winter wheat[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2008, 14(6): 1027-1034.
- [9] 宋桂云,杨恒山,徐寿军,等.氮肥运筹对科尔沁地区粮饲兼用玉米金山10产量、干物质及氮素积累的影响[J].植物营养与肥料学报,2017,23(2):289-296.

- Song G Y, Yang H S, Xu S J, *et al.* Effects of nitrogen fertilizer management on yield, dry matter and N accumulation of maize cultivar Jinshan 10 used for both grain and feed purpose in Keerqin[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(2): 289–296.
- [10] 刘彦伶, 来庆, 徐旱增, 等. 不同氮肥类型对黄泥田双季稻产量及氮素利用的影响[J]. *浙江大学学报(农业与生命科学版)*, 2013, 39(4): 403–412.
- Liu Y L, Lai Q, Xu H Z, *et al.* Effects of different types of nitrogen fertilizers on grain yield and nitrogen utilization of double-cropping rice in yellow clayey soil[J]. *Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences Edition)*, 2013, 39(4): 403–412.
- [11] Jiang L G, Dong D F, Gan X Q, *et al.* Photosynthetic efficiency and nitrogen distribution under different nitrogen management and relationship with physiological N-use efficiency in three rice genotypes[J]. *Plant and Soil*, 2005, 271(1–2): 321–328.
- [12] 张勉, 孙敏, 高志强, 等. 施肥对旱地小麦土壤水分、干物质累积和转运的影响[J]. *麦类作物学报*, 2016, 36(1): 98–103.
- Zhang M, Sun M, Gao Z Q, *et al.* Effects of phosphorus fertilizer on soil moisture, dry matter accumulation and translocation of dryland wheat[J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2016, 36(1): 98–103.
- [13] 段刚强, 杨恒山, 张瑞富, 等. 施磷深度对春玉米干物质及磷积累与转运的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2016, 34(5): 103–108.
- Duan G Q, Yang H S, Zhang R F, *et al.* Effects of phosphorus placement depth on dry matter and phosphorus accumulation and transfer of spring maize[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2016, 34(5): 103–108.
- [14] 范秀艳, 杨恒山, 高聚林, 等. 施磷方式对高产春玉米磷素吸收与磷肥利用的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2013, 19(2): 312–320.
- Fan X Y, Yang H S, Gao J L, *et al.* Effects of phosphorus fertilization methods on phosphorus absorption and utilization of high yield spring maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2013, 19(2): 312–320.
- [15] 赵庆雷, 王凯荣, 马加清, 等. 长期不同施肥模式对稻田土壤磷素及水稻磷营养的影响[J]. *作物学报*, 2009, 35(8): 1539–1545.
- Zhao Q L, Wang K R, Ma J Q, *et al.* Effects of long-term application of different fertilizer patterns on rice paddy soil phosphorus and rice phosphorus nutrition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2009, 35(8): 1539–1545.
- [16] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期施肥对黄壤性水稻土磷平衡及农学阈值的影响[J]. *中国农业科学*, 2016, 49(10): 1903–1912.
- Liu Y L, Li Y, Zhang Y R, *et al.* Effect of long-term fertilization on the P balance and critical value of soil Olsen-P in paddy soil from yellow earth[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(10): 1903–1912.
- [17] 郭振, 王小利, 徐虎, 等. 长期施用有机肥增加黄壤稻田土壤微生物量碳氮[J]. *植物营养与肥料学报*, 2017, 23(5): 1168–1174.
- Guo Z, Wang X L, Xu H, *et al.* A large number of long-term application of organic fertilizer can effectively increase the yellow paddy soil microbial biomass carbon and nitrogen[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2017, 23(5): 1168–1174.
- [18] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期有机无机肥配施增强黄壤性水稻土有机氮的物理保护作用[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1481–1486.
- Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, *et al.* Combined application of chemical and organic fertilizers long-term increase physical protection of organic nitrogen in yellow paddy soil[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21(6): 1481–1486.
- [19] 张丽敏, 徐明岗, 娄翼来, 等. 长期施肥下黄壤性水稻土有机碳组分变化特征[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(19): 3817–3825.
- Zhang L M, Xu M G, Lou Y L, *et al.* Changes in yellow paddy soil organic carbon fractions under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(19): 3817–3825.
- [20] 刘彦伶, 李渝, 张雅蓉, 等. 长期不同施肥处理对黄壤性水稻土理化性质的影响[J]. *江苏农业科学*, 2017, 45(19): 294–298.
- Liu Y L, Li Y, Zhang Y R, *et al.* Effects of long-term fertilization on soil physical and chemical property in paddy soil from yellow earth[J]. *Jiangsu Agricultural Sciences*, 2017, 45(19): 294–298.
- [21] 高菊生, 黄晶, 董春华, 等. 长期有机无机肥配施对水稻产量及土壤有效养分影响[J]. *土壤学报*, 2014, 51(2): 314–324.
- Gao J S, Huang J, Dong C H, *et al.* Effects of long-term combined application of organic and chemical fertilizers on rice yield and soil available nutrients[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2014, 51(2): 314–324.
- [22] 唐海明, 程爱武, 徐一兰, 等. 长期有机无机肥配施对双季稻区水稻干物质积累及产量的影响[J]. *农业现代化研究*, 2015, 36(6): 1091–1098.
- Tang H M, Cheng A W, Xu Y L, *et al.* Effects of long-term mixed application of organic and inorganic fertilizers on dry matter accumulation and yield of rice in double cropping rice fields[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2015, 36(6): 1091–1098.
- [23] 姜佰文, 李贺, 王春宏, 等. 有机无机肥料配施对水稻干物质积累及运转的影响[J]. *东北农业大学学报*, 2013, 44(5): 10–13.
- Jiang B W, Li H, Wang C H, *et al.* Effect of mixed application of organic- inorganic fertilizers on dry matter accumulation and translocation of rice[J]. *Journal of Northeast Agricultural University*, 2013, 44(5): 10–13.
- [24] 李杰, 张洪程, 常勇, 等. 不同种植方式水稻高产栽培条件下的光合物质生产特征研究[J]. *作物学报*, 2011, 37(7): 1235–1248.
- Li J, Zhang H C, Chang Y, *et al.* Characteristics of photosynthesis and matter production of rice with different planting methods under high-yielding cultivation condition[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2011, 37(7): 1235–1248.
- [25] Ning P, Li S, Yu P, *et al.* Post-silking accumulation and partitioning of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in maize varieties differing in leaf longevity[J]. *Field Crops Research*, 2013, 144: 19–27.
- [26] 陈惠哲. 水稻物质运转规律及其产量形成的研究[D]. 北京: 中国农业科学院硕士学位论文, 2007.

- Chen H Z. Study on matter translocation characteristic and yield formation in rice (*Oryza sativa* L.)[D]. Beijing: MS Thesis of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2007.
- [27] 金磊, 李霞, 魏晓东, 等. 不同氮效率粳稻生育后期产量形成的生理基础[J]. 华北农学报, 2013, 28(5): 175–186.
- Jin L, Li X, Wei X D, *et al.* Physiological basis on the yield in Japonica rice with different N application efficiency during the later development stage[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 2013, 28(5): 175–186.
- [28] 孙永健, 孙园园, 严奉君, 等. 氮肥后移对不同氮效率水稻花后碳氮代谢的影响[J]. 作物学报, 2017, 43(3): 407–419.
- Sun Y J, Sun Y Y, Yan F J, *et al.* Effects of postponing nitrogen topdressing on post-anthesis carbon and nitrogen metabolism in rice cultivars with different nitrogen use efficiencies[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2017, 43(3): 407–419.
- [29] 曹国军, 刘宁, 李刚, 等. 超高产春玉米氮磷钾的吸收与分配[J]. 水土保持学报, 2008, 22(2): 198–201.
- Cao G J, Liu N, Li G, *et al.* Study on absorption and distribution of nitrogen phosphorus and potassium in super-high yield spring maize[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(2): 198–201.
- [30] 李文娟, 何萍, 金继运. 钾素营养对玉米生育后期干物质和养分积累与转运的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(4): 799–807.
- Li W J, He P, Jin J Y. Potassium nutrition on dry matter and nutrients accumulation and translocation at reproductive stage of maize[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15(4): 799–807.
- [31] 高静. 长期施肥下我国典型农田土壤磷库与作物磷肥效率的演变特征[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
- Gao J. Evolution characteristics of soil phosphorus pool and efficiency of phosphorus fertilizer in typical cropland of China under long-term fertilization[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.
- [32] 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.* Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2008, 45(5): 915–924.
- [33] 陈安磊, 谢小立, 王凯荣, 等. 长期有机物循环利用对红壤稻田土壤供磷能力的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(5): 874–879.
- Chen A L, Xie X L, Wang K R, *et al.* Effects of long-term cycling of organic matter on soil phosphorus supplying capacity in a red soil paddy ecosystem[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14(5): 874–879.
- [34] 唐旭. 小麦-玉米轮作土壤磷素长期演变规律研究[D]. 北京: 中国农业科学院博士学位论文, 2009.
- Tang X. Long-term change of phosphorus in soils under wheat-maize crop rotation in China[D]. Beijing: PhD Dissertation of Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2009.