

李长洲,袁国印,王一柳,等. 秸秆还田配施钾肥对水稻产量与钾素吸收的影响[J]. 江苏农业科学,2021,49(2):43-47.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2021.02.008

秸秆还田配施钾肥对水稻产量与钾素吸收的影响

李长洲^{1,2}, 袁国印^{1,2}, 王一柳^{1,3}, 王火焰¹, 陈小琴¹, 卢殿君¹

(1. 中国科学院南京土壤研究所/土壤与农业可持续发展国家重点实验室, 江苏南京 210008;

2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 云南农业大学, 云南昆明 650201)

摘要:为了研究秸秆还田配施钾肥对水稻产量及吸钾规律的影响,在长江三角洲地区稻麦轮作系统中开展秸秆还田供钾试验,设置对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥 3 个处理。研究发现,秸秆供钾比对照增产 9.27%,秸秆还田配施钾肥没有继续增产,但钾素利用效率比秸秆供钾提高了 20%。秸秆还田配施钾肥提前并缩短了水稻钾素吸收的快速积累期。由此可见,秸秆还田配施钾肥是农田系统的高效施钾策略。

关键词:水稻;秸秆还田配施钾肥;钾素积累

中图分类号:S511.06

文献标志码:A

文章编号:1002-1302(2021)02-0043-05

稻麦轮作系统是世界上最大的农业生产系统,主要分布在中国和印度^[1-3]。作为禾本科作物,水稻和小麦都是吸钾量较多的作物,而 80% 的钾素存在于水稻和小麦的秸秆中,这部分钾素经常被无视并被从农田中移除,且被移除的秸秆中钾量远远超过了投入农田系统中的化肥钾^[4-7]。长此以往,必将导致土壤钾素的负平衡并影响稻麦轮作系统的产量,尤其高产品种的推广更加剧了这种趋势^[8-10]。所以,稻麦轮作系统中秸秆还田在供钾方面具有重要意义。我国钾肥施用量呈现逐年增长的趋势,从 2002 年的 434 万 t(K₂O)增长到 2013 年

的 640 万 t^[4]。而我国钾肥产量只能满足消费市场的 50%,另外 50% 的钾肥需要进口,为了减少对不可再生钾矿资源的依赖,秸秆作为钾肥补充资源得到越来越多的重视^[11-13]。

水稻吸钾量一般是小麦吸钾量的 2~4 倍,在供钾充足的条件下,水稻钾素吸收量远远高于氮素吸收量^[14]。水稻钾素吸收量是由生长发育期各个阶段中不同器官如叶片、叶鞘、茎秆和籽粒逐步积累完成的,研究水稻吸钾规律对钾素营养诊断和精确施肥具有重要意义。前人对水稻钾素吸收以及转运规律做了一些报道,但这些研究均集中于矿物钾肥的吸钾规律方面,而秸秆还田条件下水稻吸钾规律尚未见报道^[4-5]。本研究在长江三角洲地区稻麦轮作系统中开展秸秆还田供钾试验,分析秸秆还田供钾条件下的水稻产量、钾素利用效率、钾素吸收规律,以期为水稻生产中秸秆还田供钾提供理论依据。

收稿日期:2020-04-27

基金项目:国家重点研发计划(编号:2016YFD0200108);国家自然科学基金青年科学基金(编号:41907075)。

作者简介:李长洲(1988—),男,山东济宁人,博士研究生,主要从事土壤和植物钾素研究。E-mail:changzhou_li@163.com。

通信作者:卢殿君,博士,助理研究员,主要从事养分管理研究。E-mail:djlu@issas.ac.cn。

[16] Li M, Xiong G Y, Li R, et al. Rice cellulose synthase - like D4 is essential for normal cell - wall biosynthesis and plant growth [J]. Plant Journal, 2009, 60(6): 1055 - 1069.

[17] Wu C, Fu Y, Hu G, et al. Isolation and characterization of a rice mutant with narrow and rolled leaves [J]. Planta, 2010, 232(2): 313 - 324.

[18] Hu J, Zhu L, Zeng D, et al. Identification and characterization of *NARROW AND ROLLED LEAF 1*, a novel gene regulating leaf morphology and plant architecture in rice [J]. Plant Molecular Biology, 2010, 73(3): 283 - 292.

[19] Luan W J, Liu Y Q, Zhang F X, et al. *OsCDI* encodes a putative

member of the cellulose synthase - like *D* sub - family and is essential for rice plant architecture and growth [J]. Plant Biotechnology Journal, 2011, 9(4): 513 - 524.

[20] Yoshikawa T, Eiguchi M, Hibara K, et al. Rice slender leaf 1 gene encodes cellulose synthase - like D4 and is specifically expressed in M - phase cells to regulate cell proliferation [J]. Journal of Experimental Botany, 2013, 64(7): 2049 - 2061.

[21] Ding Z, Lin Z F, Li Q, et al. *DNLI*, encodes cellulose synthase - like D4, is a major QTL for plant height and leaf width in rice (*Oryza sativa* L.) [J]. Biochemical and Biophysical Research Communications, 2015, 457(2): 133 - 140.

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在安徽省广德县前路村开展,本地种植制度为稻麦轮作。该试验地位于苏浙皖 3 省交界处,属亚热带湿润气候区,年均气温 17.5 ℃,年均降水量 1 149.7 mm。供试土壤类型为棕红壤,成土母质为第四纪红色黏土。试验地基础土壤理化性状为:pH 值 5.58,有机质含量 25.9 g/kg,全氮含量 1.29 g/kg,有效磷含量 23.5 mg/kg,速效钾含量 60.1 mg/kg,缓效钾含量 318 mg/kg。

1.2 试验设计

本试验设置 3 个处理:(1)对照(CK);(2)秸秆还田(straw),即秸秆全量还田;(3)秸秆还田配施钾肥(straw + KCl),钾肥(K₂O)用量为 50 kg/hm²。每个处理 4 次重复,小区面积为 30 m²。氮肥(尿素,含 N 46%)用量为 N 180 kg/hm²,氮肥分次施用:基肥 50%,分蘖肥 25%,穗肥 25%;磷肥(过磷酸钙,含 P₂O₅ 12%)用量为 P₂O₅ 120 kg/hm²,作基肥施入;钾肥为氯化钾(含 K₂O 60%),作基肥施入。2016 年 6 月 19 日水稻移栽,品种为两优 6188,其他田间管理措施如除草、除虫等均采用当地习惯管理,于 2016 年 10 月 10 日收获。

1.3 样品采集与分析

植株取样时间为水稻移栽后 14 d(分蘖始期)、28 d(分蘖盛期)、42 d(拔节孕穗期)、56 d(抽穗期)、70 d(齐穗期)、84 d(灌浆期)、98 d(灌浆期)和 112 d(成熟期),在各小区随机采集 3 蔸水稻植株,分为叶片、叶鞘、茎秆、穗和根,于 105 ℃杀青 30 min,70 ℃烘干至恒质量,记录各器官干质量;磨碎,采用 H₂SO₄-H₂O₂ 消化,用火焰光度计测定钾含量。

1.4 数据处理

钾素当季利用率(RE_K,%)=[供钾区吸钾量(K₂O)-对照区吸钾量]÷供钾量(K₂O)×100;

钾素农学效率(AE_K,kg/kg)=(供钾区产量-对照区产量)÷供钾量(K₂O);

钾素偏生产力(PFP_K,kg/kg)=供钾区产量÷供钾量(K₂O);

钾素生理效率(PE_K,kg/kg)=(施钾区产量-对照产量)÷[施钾区吸钾量(K₂O)-对照区吸钾量(K₂O)];

水稻吸钾量(y)与移栽后时间(t ,d)的关系可

用 Logistic 生长模型表示:

$$y = k \div (1 + ae^{-bt})。$$

式中: y (kg/hm²)为水稻地上部钾素积累量,kg/hm²; k 为钾素积累量的模拟最大值,kg/hm²; a 、 b 为模型参数; t 为水稻移栽后时间,d。

根据 Logistic 方程一阶求导可得钾素积累速率表达式:

$$y' = kabe^{-bt} \div (1 + ae^{-bt})^2。$$

根据 Logistic 方程三阶求导,特征值分别为:

$$T_1 = (\ln a - 1.317) \div b; T_{\max} = (\ln a) \div b; T_2 = (\ln a + 1.317) \div b;$$

式中: T_{\max} 为钾素最大积累速率出现的时间; T_1 和 T_2 分别代表钾素快速积累期的开始时间和结束时间; V_{\max} 为积累速率最大值,kg/(hm²·d); ΔT 为钾素快速积累持续时间, $\Delta T = T_2 - T_1$ 。

本研究使用 Microsoft Excel 2016 (Microsoft Corp., Washington, USA) 软件对数据进行分析。统计分析使用 SPSS 22.0 (IBM Corp., Armonk, USA) 软件统计。方程使用 1stOpt (7D - Soft High Technology Inc.) 软件拟合。作图使用 SigmaPlot 14.0 (Systat Software Inc., San Jose, USA) 软件绘制。

2 结果与分析

2.1 秸秆还田配施钾肥对水稻产量和钾素利用效率的影响

在稻麦轮作系统中秸秆还田供钾能有效提高水稻的产量,对照(CK)、秸秆还田(straw)和秸秆还田配施钾肥(straw + KCl)处理产量分别为 6 472、7 066、7 072 kg/hm²,秸秆还田处理水稻产量显著增加,与对照相比,秸秆还田处理和秸秆还田配施钾肥处理分别增产 9.18% 和 9.27%,但秸秆还田处理间产量差异不显著。不同处理水稻吸钾量表现为秸秆还田配施钾肥>秸秆还田>对照,吸钾量分别为 183、142、98 kg/hm²。秸秆还田配施钾肥处理和秸秆还田处理吸钾量分别比对照处理增加 86.7% 和 44.9%,同时秸秆还田配施钾肥处理吸钾量比秸秆还田处理增加 28.9%(表 1)。在本试验秸秆还田的基础上施用钾肥,水稻产量增加不明显,但吸钾量增加显著。

秸秆和化学钾肥不分种类,统一作为水稻的钾素来源,以此计算钾素利用效率。随着供钾量的增加,水稻钾素当季利用率增加,秸秆还田和秸秆还田配施钾肥处理钾素当季利用率分别为 74.5% 和

94.3%。随着供钾量的增加,水稻的钾素农学效率、钾素偏生产力和钾素生理效率降低,秸秆还田和秸秆还田配施钾肥处理钾素农学效率分别为 9.89、6.66 kg/kg,钾素偏生产力分别为 118、79 kg/kg,钾素生理效率分别为 13.3、7.1 kg/kg。在秸秆还田

的基础上施用钾肥,出现了水稻吸钾量增加但产量不增加的钾素奢侈吸收现象(表 1),这样导致了随着供钾量增加其钾素当季利用率升高但钾素农学效率、钾素偏生产力和钾素生理效率下降的情况。

表 1 秸秆还田供钾条件下的水稻产量和钾素利用效率

处理	产量 (kg/hm ²)	吸钾量 (K ₂ O,kg/hm ²)	RE _K (%)	AE _K (kg/kg)	PFP _K (kg/kg)	PE _K (kg/kg)
CK	6 472b	98c				
straw	7 066a	142b	74.5	9.89	118	13.3
straw + KCl	7 072a	183a	94.3	6.66	79	7.1

注:RE_K,钾素当季利用率;AE_K,钾素农学效率;PFP_K,钾素偏生产力;PE_K,钾素生理效率。

2.2 秸秆还田配施钾肥对水稻地上部钾素积累动态变化的影响

对水稻地上部钾素积累量进行 Logistic 方程拟合(图 1、表 2),地上部钾素积累量的实测值与拟合值相关性极显著($P < 0.01$)。对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥的钾素积累始盛期分别出现在移栽后 42.5、41.8、37.4 d,此阶段为水稻拔节孕穗期。钾素积累的盛末期出现在齐穗期阶段,各处理间差

异较大,秸秆还田在移栽后 70.6 d,比对照提前 4.7 d;秸秆还田配施钾肥又比秸秆还田提前 7.8 d。由于始盛期和盛末期不同,对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥的钾素快速积累期也不同,分别为 32.8、28.8、25.3 d,秸秆还田配施钾肥使钾素快速积累期明显缩短。在成熟黄化期,钾素积累出现了损失,对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥的钾素损失率分别为 2.29%、6.35% 和 7.32%。

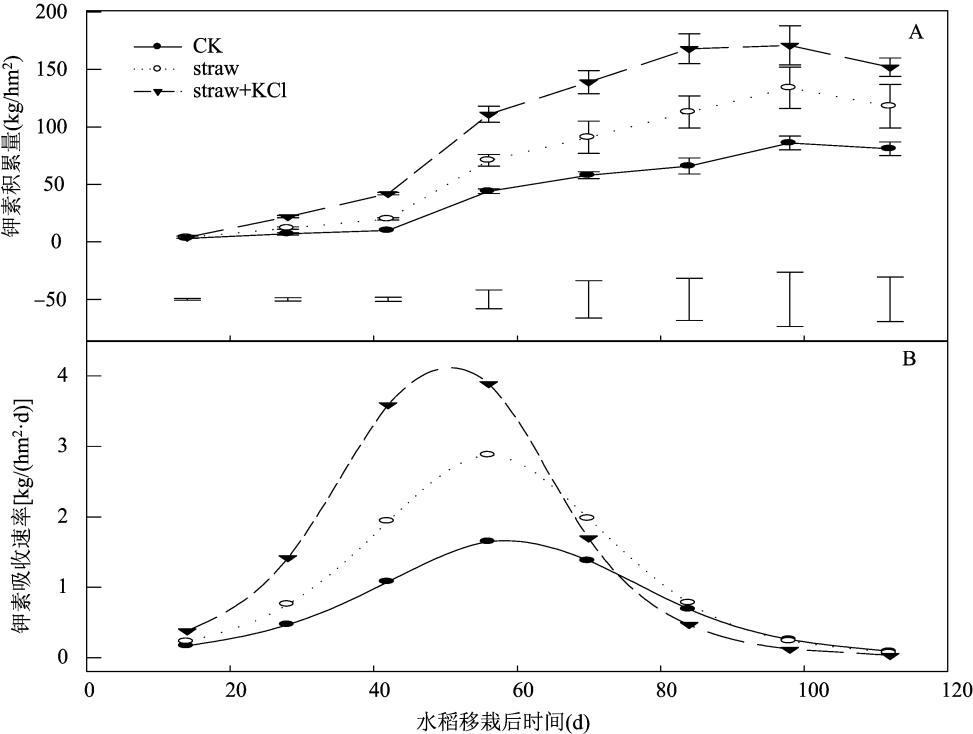


图1 水稻地上部钾素积累量(A)及吸收速率(B)的动态变化

水稻的钾素积累速率呈单峰变换,先升高后降低(表 2)。秸秆还田处理钾素最大积累速率为 2.88 kg/(hm²·d),出现时间在移栽后 56.2 d。秸秆还田配施钾肥处理钾素最大积累速率为

4.26 kg/(hm²·d),是秸秆还田的 1.48 倍,是对照的 2.55 倍。秸秆还田配施钾肥处理钾素最大积累速率出现时间为移栽后 50.1 d,比秸秆还田提前了 6.1 d,比对照提前了 8.8 d。水稻钾素最大积累速

表 2 水稻钾素积累的 Logistic 方程

处理	回归方程	r^2	k (kg/hm ²)	T_1 (d)	T_2 (d)	ΔT (d)	T_{\max} (d)	V_{\max} [kg/(hm ² ·d)]
CK	$y = 83.0 / (1 + 114 \times e^{-0.0804t})$	0.975 3 **	83.0	42.5	75.3	32.8	58.9	1.67
straw	$y = 126 / (1 + 169 \times e^{-0.0913t})$	0.981 8 **	126.0	41.8	70.6	28.8	56.2	2.88
straw + KCl	$y = 164 / (1 + 183 \times e^{-0.104t})$	0.986 8 **	164.0	37.4	62.8	25.3	50.1	4.26

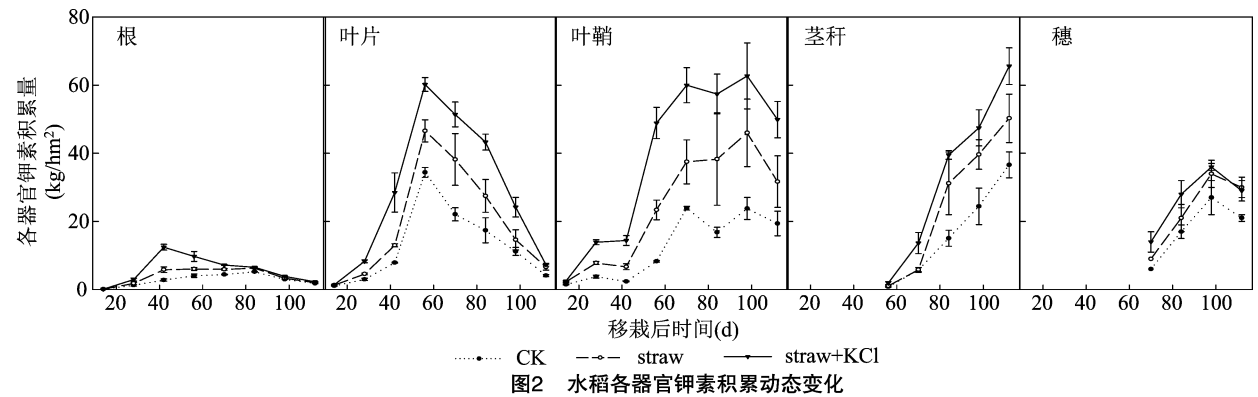
注： t 为水稻移栽后的时间，d； y 为水稻地上部钾素积累量，kg/hm²； V_{\max} 为钾素最大积累速率，kg/(hm²·d)； $\Delta T = T_2 - T_1$ ，为水稻钾素快速积累持续时间，d；** 代表在 $P < 0.01$ 水平下相关性极显著。

率阶段为抽穗期。秸秆还田配施钾肥增加了水稻钾素最大积累速率，并提前了吸收峰和快速积累期。

2.3 秸秆还田配施钾肥对水稻各部位钾素吸收及分配的影响

在水稻不同生长发育阶段，各部位钾素积累量均表现为秸秆还田配施钾肥 > 秸秆还田 > 对照(图 1)。根的钾素积累量随生育期的推进先增加后降低，对照和秸秆还田处理在移栽后 84 d 最大，分别为 5.23、6.30 kg/hm²，秸秆还田配施钾肥处理在移栽后 42 d 达到最大值，为 12.5 kg/hm²。叶鞘的钾素积累量基本为先增加后降低的趋势，在移栽后 98 d 达到最大值，对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥分别为 23.8、46.0、62.7 kg/hm²。叶片的钾素

积累变化为先增加后降低，在移栽后 56 d 为最大值，此时为抽穗期，对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥分别为 34.4、46.6、60.2 kg/hm²。茎秆的钾素积累呈现一直增加的趋势，在成熟期最大，对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥分别为 36.6、50.3、65.5 kg/hm²。穗的钾素积累量变化为先增加，在成熟期有所降低。在成熟期，秸秆还田配施钾肥各部位钾素积累量大小为茎秆 > 叶鞘 > 穗 > 叶片 > 根，秸秆还田各部位钾素积累量大小为茎秆 > 叶鞘 > 穗 > 叶片 > 根，对照各部位钾素积累量大小为茎秆 > 穗 > 叶鞘 > 叶片 > 根。在生长发育前期钾素主要积累在叶鞘和叶片中，在生长发育后期钾素主要积累在叶鞘和茎秆中(图 2)。



在水稻不同生长发育阶段，钾素在各器官的分配比例也不同。在分蘖期，钾素主要分配在叶鞘中，分配占比为 47.2% ~ 62.3%；在拔节期到抽穗期，钾素主要分配在叶片中，分配占比为 50.1% ~ 72.1%；在齐穗期，钾素主要分配在叶鞘和叶片中，分配占比分别为 38.4% ~ 40.9% 和 35.3% ~ 38.7%；在灌浆期，钾素主要分配在叶鞘中，分配占比为 26.6% ~ 35.4%；在成熟期，钾素主要分配在茎秆中，分配占比为 42.0% ~ 44.0%。

3 讨论

禾本科作物大约 80% 的钾素集中在秸秆中，水

稻、小麦秸秆钾素当季释放率在 85% ~ 90%^[15]。稻麦轮作系统中，水稻和小麦的秸秆还田供钾量一般为 300 ~ 360 kg/(hm²·年)^[9]，而秸秆不还田的推荐施钾量只有 180 ~ 240 kg/(hm²·年)^[4-5]，秸秆还田供钾能力远高于秸秆不还田推荐施钾，秸秆还田对农田土壤钾素平衡有重要作用^[16]。不仅如此，秸秆还田还提供了大量的氮素、磷素和盐基离子，而补充盐基离子正是预防土壤酸化的有效措施^[17-19]。与单纯秸秆还田相比，秸秆还田配施钾肥尽管没有显著提高水稻产量，但提高了水稻吸钾量和当季钾素利用率，水稻继续秸秆还田能够为下季小麦供应充足的钾素。长期单纯秸秆还田供钾依

然会导致土壤钾素的负平衡,只有秸秆还田配施钾肥才能使农田钾素达到正平衡,长期维持土壤钾素肥力。

水稻钾素积累量的变化可用 Logistic 生长曲线模拟,方程模拟值与实测值的相关性极显著($P < 0.01$)。钾素积累速率呈单峰变化特征,对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥处理出现钾素最大积速率的时间依次提前,分别为移栽后 58.9、56.2、50.1 d。同时,对照、秸秆还田和秸秆还田配施钾肥的钾素快速积累期依次缩短,分别为 33、29、25 d。研究结果表明,秸秆还田配施钾肥对水稻钾素快速积累起到了提前并缩短的作用,秸秆还田供钾对水稻吸钾规律的影响与化学钾肥对吸钾规律的影响结果^[20]一致。有研究结果表明,钾素快速积累期越早,快速积累时间越短,越有利于水稻生物量的积累和优质群体结构的形成^[21]。若在水稻生长发育过程中缺钾,最高效的补钾时间是拔节孕穗期到齐穗期。通过叶片进行钾素营养诊断的时间须要在拔节孕穗期之前,最好是有效分蘖临界期或拔节期,这与薛欣欣等对水稻功能叶片营养诊断的研究结果^[22]一致。

4 结论

秸秆供钾比对照增产 9.27%,秸秆还田配施钾肥没有继续增产,但钾素利用效率比秸秆还田提高了 20%,且秸秆还田配施钾肥更有利于农田钾素平衡。秸秆还田配施钾肥提前并缩短了水稻钾素吸收快速积累期。秸秆还田配施钾肥是农田系统的高效施钾策略。

参考文献:

- [1] Timsina J, Connor D J. Productivity and management of rice - wheat cropping systems; issues and challenges[J]. Field Crops Research, 2001, 69(2): 93 - 132.
- [2] Singh B, Singh Y S, Inas P, et al. Potassium nutrition of the rice - wheat cropping system[J]. Advances in Agronomy, 2003, 81: 203 - 259.
- [3] Chauhan B, Mahajan G, Sardana V, et al. Productivity and sustainability of the rice - wheat cropping system in the Indo - Gangetic Plains of the Indian subcontinent; problems, opportunities, and strategies[J]. Advances in Agronomy, 2012, 117: 315 - 369.
- [4] Food and Agriculture Organization of the United Nations. FAOSTAT database; 2014 [EB/OL]. [2020 - 03 - 11]. <http://faostat.fao.org/>.
- [5] 侯云鹏, 杨建, 孔丽丽, 等. 水稻养分吸收和转运及产量对施钾

- 的响应[J]. 吉林农业大学学报, 2018, 40(1): 17 - 24.
- [6] Zhang P, Chen X, Wei T, et al. Effects of straw incorporation on the soil nutrient contents, enzyme activities, and crop yield in a semiarid region of China[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 160: 65 - 72.
- [7] Malhi S S, Nyborg M, Solberg E D, et al. Improving crop yield and N uptake with long - term straw retention in two contrasting soil types[J]. Field Crops Research, 2011, 124(3): 378 - 391.
- [8] Lu D, Li C, Sokolowski E, et al. Crop yield and soil available potassium changes as affected by potassium rate in rice - wheat systems[J]. Field Crops Research, 2017, 214: 38 - 44.
- [9] Li C, Zhao X, Liu X, et al. Rice and wheat yield and soil potassium changes in response to potassium management in two soil types[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(1): 121 - 130.
- [10] Regmi A P, Ladha J, Pasquin E, et al. The role of potassium in sustaining yields in a long - term rice - wheat experiment in the Indo - Gangetic Plains of Nepal[J]. Biology and Fertility of Soils, 2002, 36: 240 - 247.
- [11] 赵信林, 王火焰, 刘晓伟, 等. 长三角地区耐低钾小麦品种筛选[J]. 江苏农业科学, 2018, 46(18): 73 - 76.
- [12] 李继鲁, 鲁剑巍, 任涛, 等. 稻田不同供钾能力条件下秸秆还田替代钾肥效果[J]. 中国农业科学, 2014, 47(2): 292 - 302.
- [13] 傅伟, 刘坤平, 陈洪松, 等. 秸秆还田替代化学钾肥对喀斯特峰丛洼地春玉米产量及土壤钾素的影响[J]. 中国生态农业学报, 2017, 25(12): 1823 - 1831.
- [14] 姜照伟, 李小萍, 赵雅静, 等. 杂交水稻氮钾素吸收积累特性及氮素营养诊断[J]. 福建农业学报, 2011, 26(5): 852 - 859.
- [15] 柴如山, 安之冬, 马超, 等. 我国主要粮食作物秸秆钾养分资源量及还田替代钾肥潜力[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(2): 201 - 211.
- [16] Li C, Zhao X, Liu X, et al. Rice and wheat yield and soil potassium changes in response to potassium management in two soil types[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2020, 117(1): 121 - 130.
- [17] Bruun S, Harmer S L, Bekiaris G, et al. The effect of different pyrolysis temperatures on the speciation and availability in soil of P in biochar produced from the solid fraction of manure[J]. Chemosphere, 2017, 169: 377 - 386.
- [18] Xu X, Zhao Y, Sima J, et al. Indispensable role of biochar - inherent mineral constituents in its environmental applications: a review[J]. Bioresource Technology, 2017, 241: 887 - 899.
- [19] 石岩松, 曹晶晶, 李琳琳, 等. 长期连作棉田土壤团聚体有机碳及氮磷钾含量的变化[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(19): 270 - 275.
- [20] 薛欣欣, 李小坤. 施钾量对水稻干物质积累及吸钾规律的影响[J]. 江西农业大学学报, 2018, 40(5): 905 - 913.
- [21] 纪洪亭, 冯跃华, 何腾兵, 等. 超级杂交稻群体干物质和养分积累动态模型与特征分析[J]. 中国农业科学, 2012, 45(18): 3709 - 3720.
- [22] 薛欣欣, 李岚涛, 鲁剑巍, 等. 利用功能叶片钾含量作为水稻钾营养诊断指标的可行性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 492 - 499.