

DOI: 10.11766/trxb201910300311

柳开楼, 韩天富, 黄晶, 李亚贞, 马常宝, 薛彦东, 都江雪, 王远鹏, 李文军, 张会民. 中国稻作区土壤速效钾和钾肥偏生产力时空变化[J]. 土壤学报, 2021, 58(1): 202–212.

LIU Kailou, HAN Tianfu, HUANG Jing, LI Yazhen, MA Changbao, XUE Yandong, DU Jiangxue, WANG Yuanpeng, LI Wenjun, ZHANG Huimin. Spatio-temporal Variation of Soil Readily Available Potassium and Partial Factor Productivity of Potassium Fertilizer in Rice Cultivation Regions of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(1): 202–212.

中国稻作区土壤速效钾和钾肥偏生产力时空变化*

柳开楼^{1, 2}, 韩天富¹, 黄晶^{1, 3}, 李亚贞², 马常宝⁴, 薛彦东⁴, 都江雪¹,
王远鹏¹, 李文军^{1, 2, 5}, 张会民^{1, 3†}

(1. 中国农业科学院农业资源与农业区划研究所/耕地培育技术国家工程实验室, 北京 100081; 2. 江西省红壤研究所, 国家红壤改良工程技术研究中心, 南昌 330046; 3. 中国农业科学院祁阳农田生态系统国家野外试验站, 湖南祁阳 426182; 4. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 5. 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 湖南常德 415000)

摘 要: 基于农业农村部布置在全国的水稻土监测样点(1988—2017), 分析不同稻作区水稻土的速效钾、钾肥偏生产力和钾素表现平衡的时空变化趋势。在 30 a 间, 东北区水稻土速效钾含量显著高于长江三角洲(长三角)、长江中游、华南和西南地区。随试验年限的延长, 除了长江中游的水稻土速效钾为先增加后稳定的趋势外, 东北、长三角和华南区的水稻土速效钾含量均呈现出先稳定后增加的趋势, 而西南区的水稻土速效钾含量则无明显变化。线性拟合方程表明, 土壤速效钾含量每增加 10 mg·kg⁻¹, 30 a 间东北、长三角、长江中游、华南的钾肥偏生产力提升幅度分别为 0.31、1.51、0.26 和 0.49 kg·kg⁻¹。除西南区域外, 其他区域的钾素表现平衡与土壤速效钾含量均存在显著的正相关关系($P < 0.05$)。因此, 1988—2017 年, 全国尺度上水稻土的速效钾含量呈增加趋势, 但不同稻作区土壤速效钾含量及年均增幅则差异较大。土壤速效钾含量的增加显著促进了水稻钾肥偏生产力的提升, 而长期进行水稻种植导致的钾素表现盈余则进一步有利于土壤速效钾含量的提升。

关键词: 土壤速效钾; 水稻土; 区域; 钾肥偏生产力; 钾素表现平衡

中图分类号: S156.6 **文献标志码:** A

Spatio-temporal Variation of Soil Readily Available Potassium and Partial Factor Productivity of Potassium Fertilizer in Rice Cultivation Regions of China

LIU Kailou^{1, 2}, HAN Tianfu¹, HUANG Jing^{1, 3}, LI Yazhen², MA Changbao⁴, XUE Yandong⁴, DU Jiangxue¹, WANG Yuanpeng¹, LI Wenjun^{1, 2, 5}, ZHANG Huimin^{1, 3†}

(1. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 2. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research

* 国家自然科学基金项目(41671301)、国家重点研发计划项目(2016YFD0300901)和中央级公益性科研院所基本科研业务费专项(161032019035)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671301), the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901) and the Fundamental Research Funds for Central Non-profit Scientific Institution of China (No. 161032019035)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: zhanghuimin@caas.cn

作者简介: 柳开楼(1984—), 男, 河南滑县人, 博士研究生, 主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: liukailou@163.com

收稿日期: 2019-10-30; 收到修改稿日期: 2019-12-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-03-11

Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China; 3. National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China; 4. Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 5. College of Resources and Environment and Tourism, Hunan University of Arts and Science, Changde 415000, Hunan, China)

Abstract: 【 Objective 】 In the past 30 years (1988—2017), rice planting patterns, potassium (K) fertilization application and crop yield all changed greatly in the rice-cropping areas of China. Therefore, it is necessary to follow spatio-temporal changes in readily available K in paddy soils in those regions, which may help provide guidance to improvement of soil K utilization efficiency use and rationalization of K fertilizer application. 【 Method 】 Based on the data gathered from the nationwide paddy soil monitoring network, laid out in 1988—2017, spatio-temporal variation of soil readily available K, K fertilizer partial factor productivity (PFP-K) and K apparent balance (KAB) was analyzed in Northeast China, the Yangtze River Delta, Middle Reaches of the Yangtze River, South China and Southwest China, and relationships between the three also discussed. 【 Result 】 In the past 30 years, soil available K content was significantly higher Northeast China than in the other four regions. In the Middle Reaches of the Yangtze River, soil readily available K increased first and then levelled off in content, but in in the Northeast China, the Yangtze River Delta and South China soil readily available K content were steady first and then increased in content with the experiment going on, while in Southwest China little change was observed. Soil readily available K content was significantly and positively related to PFP-K. In Northeast China, the Yangtze River Delta, the Middle Reaches of the Yangtze River and South China, for the increase of each $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ of soil readily available K in paddy soil, PFP-K increased by 0.31, 1.51, 0.26 and $0.49 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. The paddy soils in China and all the five regions exhibited a declining trend or remained in balance in KAB during the period from 1988 to 1998, but a rising trend was observed during the period from 1998 to 2017. South China was the highest in KAB of paddy soil, followed by the Middle Reaches of the Yangtze River, Northeast China, the Yangtze River Delta and Southwest China in a decreasing order. The relationships between KAB and soil readily available K content ($P<0.05$) in paddy soils of the country and in the five regions could be fitted with a linear equation. 【 Conclusion 】 Therefore, for the paddy soils in China, soil readily available K content was on a rising trend during the period from 1988 to 2017, but soil readily available K content and its annual growth rate varied quite sharply from region to region. Higher soil readily available K content could significantly promote rise of PFP-K, and the K apparent surplus in paddy soils as a result of long-term rice cultivation was conducive further to increase in soil readily available K content.

Key words: Soil readily available potassium; Paddy soil; Region; Partial factor productivity of potassium fertilizer; Apparent balance of potassium

水稻是中国的主要粮食作物，目前，中国水稻种植面积 3 300 多万 hm^2 ，占全国粮食作物播种面积的 27.4%，其产量约占全国粮食总产量的 36.1%^[1]。研究表明，由于秸秆还田、种植绿肥等农业技术的推广，1980 年以来全国尺度的水稻土有机碳储量、速效氮磷钾含量等均得到明显提升^[2-3]。我国地域辽阔，东北、长江三角洲（长三角）、长江中游、华南和西南等区域均有大面积的水稻种植^[3-4]，但不同区域水稻的种植模式不一，主要的稻作模式有单季稻、双季稻和水稻与其他作物轮作等^[5]。因此，长期的水稻种植过程中，不同区域的水稻土肥力水平差异较大^[3]。

作为植物所需的三大元素之一，钾在作物产量、品质和抗逆方面的作用至关重要^[6]。虽然已有研究

表明，由于成土母质的差异，全国土壤钾素的含量分布趋势为西北大于东南^[7]，且已有大量研究^[8-11]利用长期施肥定位试验对不同土壤类型的钾素时空演变进行深入分析。在长期施肥条件下，由于主要黏土矿物类型不同，不同土壤类型的固钾能力差异较大^[7]。在华北地区，与不施钾肥相比，施钾肥和秸秆还田均可显著提高土壤速效钾含量，不同点位的土壤速效钾增幅和固钾能力也存在差异^[8]，且主要集中于 0~30 cm 土层^[9]。此外，受钾肥施用量的影响，与粮食作物相比，种植经济作物条件下土壤速效钾的增幅明显较快^[10]。但是，这些基于长期定位试验的单点或多点研究均由于施肥量偏低（20 世纪 80 和 90 年代的施肥水平）^[7-8]、不能涵盖全国稻

区面上尺度状况^[9]和不同区域^[10-11]等因素特征,难以较好地揭示全国尺度下水稻土的钾素时空变化趋势。同时,自我国改革开放以来,全国稻作区的水稻品种、钾肥施用和产量水平等发生较大变化^[3, 11]。因此,开展不同区域水稻土的钾素时空变化特征研究,对于指导我国未来的土壤钾素管理和钾肥合理施用意义重大。本研究基于农业农村部自1988年开始布置于全国的水稻土监测数据,深入分析东北、长三角、长江中游、华南和西南等稻作区土壤速效钾的时空变化规律,并进一步明确土壤速效钾与钾肥偏生产力及钾素表观平衡的量化关系,以期为不同区域水稻土制定具体的土壤钾素管理策略提供理论和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

基于农业农村部布置于全国的水稻土监测样点(始于1988年),监测点以当地主要种植制度和种植方式为主,耕作、栽培等管理方式以及施肥水平和作物产量等均能代表当地一般水平,每个点位一个大区,设计面积不小于334 m²。各监测点的土壤类

型均为水稻土。但各监测点的成土母质差异较大,东北的水稻土发育类型以黑土和棕壤为主,长三角、长江中下游和华南区以潮土和红黄壤为主,西南则以红壤和紫色土等为主。

根据全国的水稻分布特点,将全国130个水稻土监测点划分为东北(7个点位,黑龙江省、吉林省和辽宁省)、长三角(28个点位,江苏省、安徽省、浙江省和上海市)、长江中游(44个点位,湖南省、江西省和湖北省)、华南(31个点位,广东省、福建省、海南省和广西壮族自治区)和西南(14个点位,四川省、云南省、贵州省和重庆市)等区域(考虑到西北和华北不是水稻土的主要分布区域,且大部分监测点位开始时间较晚,本研究未包含分布于陕西的1个点和河南的5个点)。

监测点的钾肥投入量主要是根据各个点位的生产实际,且不同年限存在明显差异。本研究根据各监测点的钾肥用量进行汇总分析(表1)表明,1988—2017年,东北、长三角、长江中游、华南和西南等区域每季水稻的钾肥(K₂O)投入平均为61.17、72.09、77.06、128.16和59.10 kg·hm⁻²。此外,1988—2000年,所有监测点均不进行秸秆还田,但从2000—2017年,所有监测点陆续开始了秸秆还田。

表1 不同区域每季水稻钾肥(K₂O)用量

Table 1 Potassium fertilizer (K₂O) application rate relative to region and rice season

区域 Regions	样本数 <i>n</i>	最小值 Min/ (kg·hm ⁻²)	最大值 Max/ (kg·hm ⁻²)	平均值 Average/ (kg·hm ⁻²)	标准差 Standard deviation/ (kg·hm ⁻²)	变异系数 Coefficient of variation/%
NE	31	1.50	90.00	61.17	30.06	49.15
YRD	355	45.00	269.30	72.09	15.79	21.91
MRY	327	3.75	435.00	77.06	67.06	87.03
SC	258	12.00	465.00	128.20	86.57	67.55
SW	119	5.00	243.90	59.10	41.42	70.08

注: NE 为东北, YRD 为长三角, MYR 为长江中游, SC 为华南, SW 为西南。下同。Note: NE stands for Northeast China; YRD for the Yangtze River Delta; MYR for the Middle Reaches of the Yangtze River; SC for South of China; and SW for Southwest China. The same below.

1.2 数据采集与测试分析

各监测点位中土壤样品采集的方法是按照耕地地力调查与质量评价技术规程^[12]进行,为了尽可能地避免施肥对于样品的影响,统一在秋季作物收获后的11月中旬进行取样。收获期采用实打实收进行

脱粒测产。并根据产量和钾肥投入量计算钾肥偏生产力,具体计算公式如下:

$$PFP-K = \frac{Y}{F-K} \quad (1)$$

式中, PFP-K 为钾肥偏生产力, $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$; Y 为水稻籽粒产量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$; F-K 为 K_2O 的施肥量, $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ 。

土壤样品采集深度为 0~20 cm, 每个监测点用不锈钢土钻随机采集 5 个样品, 混匀后风干研磨, 过 2 mm 筛, 送相应省级土壤测试中心进行测定, 其中土壤速效钾含量采用醋酸铵浸提—火焰光度计法^[13]测定。

采用表观平衡法计算钾素平衡, 即钾素投入量与钾素支出量的差值, 正值表示盈余, 负值表示亏缺。钾素投入仅包括水稻季的化肥、有机肥、秸秆还田等带入的钾素, 未考虑因降水或灌溉、大气沉降以及种子等带入的钾素; 钾素支出仅包括水稻籽粒和秸秆收获而带出的钾素, 未包括因淋洗等过程导致的钾素损失^[10]。水稻籽粒和秸秆含钾量参考何萍等^[14]文献资料, 分别取 $3.5\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $21.7\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

1.3 数据处理

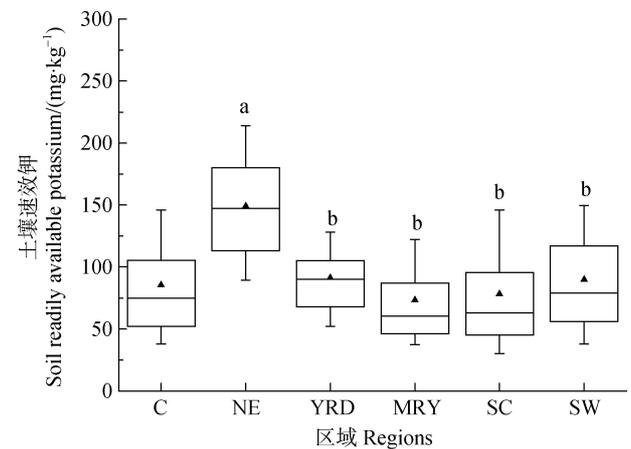
试验数据用 Excel 2016 整理, 运用 SPSS 17.0 进行相关性分析及显著性检验。为避免个别年份异常气候和个别点位差异对土壤速效钾变化规律造成影响, 本研究按照监测点位的试验年限每隔 5 年划分成 6 个阶段, 分别为 1988—1992 (5 a)、1993—1997 (10 a)、1998—2002 (15 a)、2003—2007 (20 a)、2008—2012 (25 a) 和 2013—2017 (30 a)。本研究中所涉及的土壤速效钾时空变化趋势的数据采用箱式图表示, 而由于部分年份缺失钾肥投入量数据, 钾肥偏生产力和钾素表观平衡数据偏少, 所以, 钾肥偏生产力和钾素表观平衡采用柱状图表示; 试验年限与土壤速效钾含量的量化关系采用双直线方程拟合。在土壤速效钾含量和钾肥偏生产力的量化关系中, 除了全国尺度上采用双直线方程拟合之外, 各区域均采用线性回归方程拟合, 钾素表观平衡与土壤速效钾的相关关系也采用线性方程拟合。所有图件均采用 Origin 8.1 制作。

2 结果

2.1 不同区域水稻土速效钾时空变化

图 1 显示, 在 1988—2017 年的 30 a 间, 东北、长三角、长江中游、华南和西南区域水稻土的速效钾含量平均值分别为 149.1、91.28、73.27、78.31 和 $89.84\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 全国的平均值为 $96.37\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。不同区域间相比, 东北的水稻土速效钾含量显著高于长

三角、长江中游、华南和西南, 而长三角、长江中游、华南和西南的土壤速效钾含量则无显著差异。



注: 图中不同的小写字母表示差异显著 ($P < 0.05$); 中间实线代表中位数, ▲ 代表平均值。上下两条线分别代表 75% 和 25% 的置信区间。上下两个短线分别代表 95% 和 5% 的置信区间, C 为全国。下同。Note: Different lowercase letter indicate significantly different ($P < 0.05$); The solid line in the box represents the median value, and ▲ represents the average value. The upper and lower line represent 75% and 25% confidence intervals, respectively. The upper and lower dots represent 95% and 5% confidence intervals, respectively. C stands for China. The same below.

图 1 不同区域水稻土速效钾含量

Fig. 1 The soil readily available potassium content of paddy soil in different regions

在 30 a 试验时间内, 除了西南之外, 东北、长三角和华南的水稻土速效钾含量均呈现出先稳定然后随着试验年限的增加而逐渐提升的趋势 (图 2), 且可以用双直线方程进行拟合 ($P < 0.05$), 但不同区域的时间转折点不一, 表 2 结果显示, 全国水稻土速效钾含量在试验 14 a 后开始随试验年限延长而增加, 东北、长三角、华南区域的土壤速效钾含量则分别在试验 13、11、23 和 13 a 后开始快速提升; 而长江中游则表现出试验 23 a 内土壤速效钾随试验年限延长而快速增加, 其年均增速为 $1.59\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 23 a 至 30 a 则基本稳定 (土壤速效钾为 $75.18\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。进一步通过线性拟合方程的斜率 (表 2) 发现, 不同区域间, 水稻土速效钾含量的年均增幅明显不同, 全国水稻土速效钾含量在试验 14 a 至 30 a 内的年均增幅为 $0.81\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$, 东北 (13 a 至 30 a)、长三角 (11 a 至 30 a) 和华南 (13 a 至 30 a) 水稻土速效钾含量的年均增幅则分别为 1.39 、 0.85 和 $1.79\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。

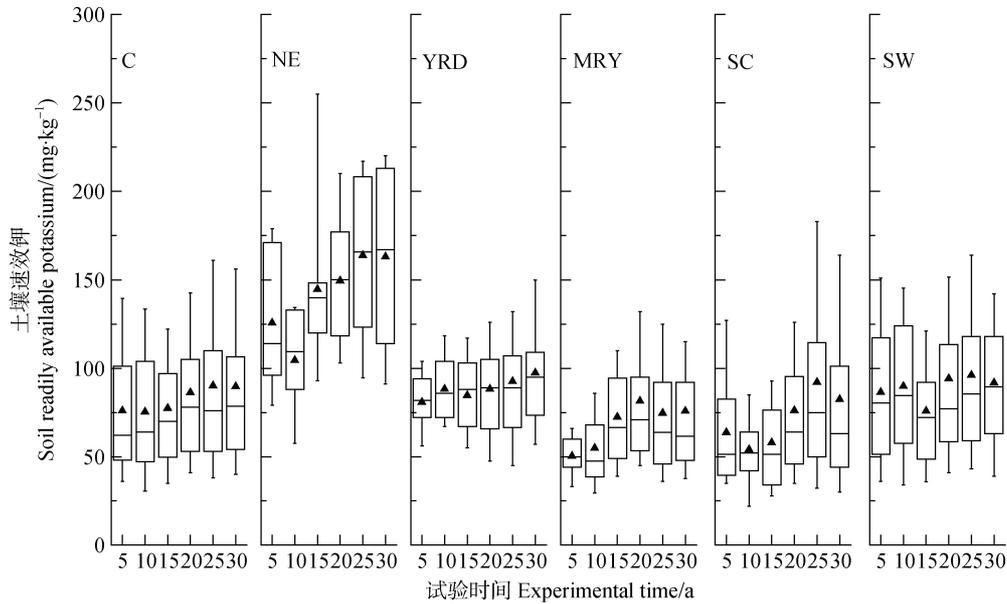


图 2 不同区域水稻土速效钾含量与试验时间的关系

Fig. 2 Relationships between soil readily available potassium content in paddy soil and phase of the experimental relative to regions

表 2 不同区域水稻土速效钾含量 (y , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与试验时间 (x , a) 的拟合方程

Table 2 Equation fitting the relationship between soil readily available potassium content in paddy soil (y , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and phase of the experiment (x , a) relative to region

区域 Regions	拟合方程 Fitted equation	R^2	P
C	$y = 75.59, x < 14.0$	0.785 8	0.041 34
	$y = 0.811 2x + 67.55, x > 13.5$		
NE	$y = 115.0, x < 13.0$	0.865 6	0.033 42
	$y = 1.389x + 124.0, x > 12.5$		
YRD	$y = 84.46, x < 11.0$	0.995 5	0.002 20
	$y = 0.843 8x + 71.69, x > 11.0$		
MYR	$y = 1.596x + 48.82, x < 22.5$	0.989 4	0.022 45
	$y = 75.18, x > 23.0$		
SC	$y = 58.83, x < 13.0$	0.743 5	0.048 36
	$y = 1.793x + 36.77, x > 13.0$		
SW	$y = 88.09, x < 12.0$	0.483 3	0.194 4
	$y = 0.999 6x + 66.93, x > 12.0$		

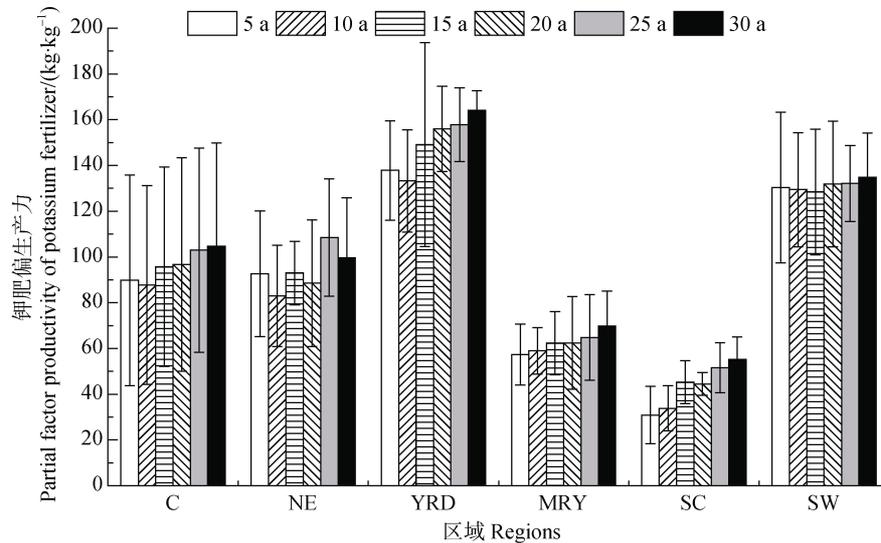
2.2 不同区域钾肥偏生产力变化

在图 3 中, 各区域水稻钾肥偏生产力基本呈现出长三角和西南较高, 其次为东北, 而长江中游和华南则较低的趋势。进一步分析发现, 水稻钾肥偏生产力与试验时间的关系均可用线性方程拟合 ($P < 0.05$)。但线性方程的斜率表明, 各区域水稻钾肥偏生产力的年均增幅差异较大 (表 3)。30 a 间, 全国的钾肥偏生产力年均增幅为 $0.56 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; 在

不同区域间, 则呈现出长三角和华南的钾肥偏生产力年均增幅 (1.00 和 $0.82 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) 较高, 其次为东北和长江中游 (0.49 和 $0.36 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), 而西南最低 ($0.15 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$) 的趋势。

2.3 土壤速效钾含量与钾肥偏生产力的相互关系

土壤速效钾含量与钾肥偏生产力存在显著的正相关关系 (图 4), 在全国尺度上可用双直线方程进行拟合 ($P < 0.05$)。当土壤速效钾含量低于 $100.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$



注：图中数值为平均值±标准差。下同。Note: Values represent mean ± SD. The same below.

图 3 不同区域的钾肥偏生产力

Fig. 3 Partial factor productivity of potassium fertilizer relative to regions

表 3 不同区域钾肥偏生产力 (y , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与试验时间 (x , a) 的拟合方程

Table 3 Equation fitting the relationships between partial factor productivity of potassium fertilizer (y , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and phase of the experiment (x , a) relative to region

区域 Regions	拟合方程 Fitted equation	R^2	P
C	$y = 0.563 5x + 87.37$	0.919 9	0.002 36
NE	$y = 0.492 0x + 86.46$	0.413 9	0.031 24
YRD	$y = 0.999 6x + 133.9$	0.926 1	7.46×10^{-4}
MYR	$y = 0.364 7x + 56.87$	0.910 3	0.001 36
SC	$y = 0.816 0x + 30.69$	0.971 9	0.001 54
SW	$y = 0.145 1x + 128.9$	0.541 7	0.032 46

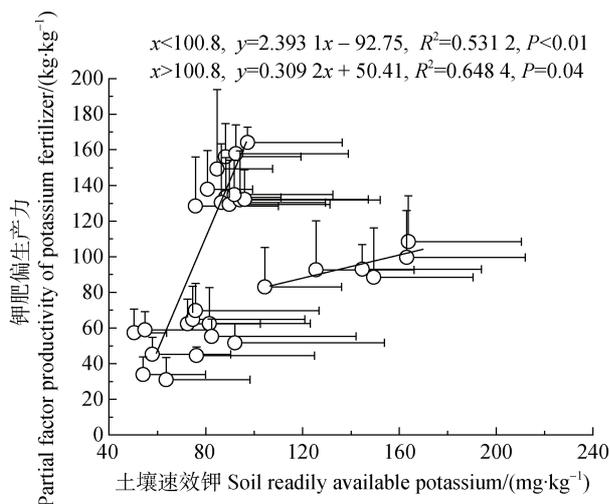


图 4 全国尺度上土壤速效钾含量与钾肥偏生产力的关系

Fig. 4 Relationship between partial factor productivity of potassium fertilizer and soil readily available potassium on a country scale

时，土壤速效钾含量每增加 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，水稻的钾肥偏生产力增加 $23.93 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ；当土壤速效钾含量高于 $100.8 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时，土壤速效钾含量每增加 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，水稻的钾肥偏生产力增加 $3.09 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

表 4 表明，除了西南之外，各区域水稻钾肥偏生产力与土壤速效钾含量的关系均可用线性方程拟合 ($P < 0.05$)。但不同区域中线性方程的斜率明显不同，土壤速效钾含量每增加 $10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，30 a 间长三角的水稻钾肥偏生产力提升幅度 ($1.51 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 最高，其次为华南和东北 (0.49 和 $0.31 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)，长江中游最低 ($0.26 \text{ kg}\cdot\text{kg}^{-1}$)。

2.4 钾素表观平衡变化及其与土壤速效钾含量的相关关系

通过估算表明，全国及各区域的水稻土钾素表观平衡均呈现出试验 10 a 内 (1988—1998) 为亏缺

表 4 不同区域钾肥偏生产力 (y , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与土壤速效钾含量 (x , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 的拟合方程Table 4 Equation fitting the relationship between partial factor productivity of potassium fertilizer (y , $\text{kg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and soil readily available potassium (x , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) relative to regions

区域 Regions	拟合方程 Fitted equation	R^2	P
NE	$y = 0.3092x + 50.41$	0.6484	0.04266
YRD	$y = 1.5120x + 15.78$	0.5347	0.02782
MYR	$y = 0.2630x + 44.70$	0.5562	0.04455
SC	$y = 0.4867x + 9.045$	0.5751	0.09252
SW	$y = 0.2144x + 112.2$	0.4690	0.2030

或平衡状况, 而 10 a 后 (1998—2017) 则均表现为盈余 (图 5)。但是不同区域间的钾素盈余量差异较大, 其中, 以华南的水稻土钾素盈余量最高, 其次为长江中游, 而东北、长三角和西南则较低。

稻作系统内钾素的表观平衡可以在一定程度上影响土壤速效钾含量。表 5 结果显示, 除了西南之外, 线性方程均可较好地拟合各区域中土壤速效钾含量与钾素表观平衡的相关关系 ($P < 0.05$)。结合拟合方程的斜率表明, 在全国尺度上, 稻作区钾素盈余量每增加 $1 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}$, 土壤速效钾含量增加 $0.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$; 而在不同区域, 则以东北的土壤速效钾含量增幅最高 ($0.32 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), 其次为华南和长江中游 (增幅分别为 0.11 和 $0.10 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$), 而长三角最低 (增幅为 $0.03 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$)。根据拟合方程进一步推算可知, 当系统内钾素呈现平衡状态 ($x=0$) 时, 全国水稻土的速度钾含量为 $81.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 而东北、长三角、长江中游和华南区域的水稻土速

效钾含量则分别为 146.9 、 89.86 、 67.14 和 $59.06 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 不同区域水稻土速效钾和钾肥偏生产力的空间变化

土壤速效钾是直接影响水稻钾素吸收的土壤钾素形态之一^[15]。大量研究^[16-17]表明, 提高土壤速效钾含量能显著提高水稻的钾素吸收量和籽粒产量。但是, 由于我国水稻土分布广泛, 不同区域的水稻土钾素含量也不同^[3]。本研究显示, 在 1988—2017 年间, 不同区域间相比, 东北的水稻土速效钾含量显著高于长三角、长江中游、华南和西南, 而长三角、长江中游、华南和西南的土壤速效钾含量则无显著差异 (图 1)。这与前人的研究^[3, 10-11]相似, 其原因主要与各区域水稻土成土母质的含钾矿物不同有关, 其中, 东北水稻土成土母质的含钾矿物以钾

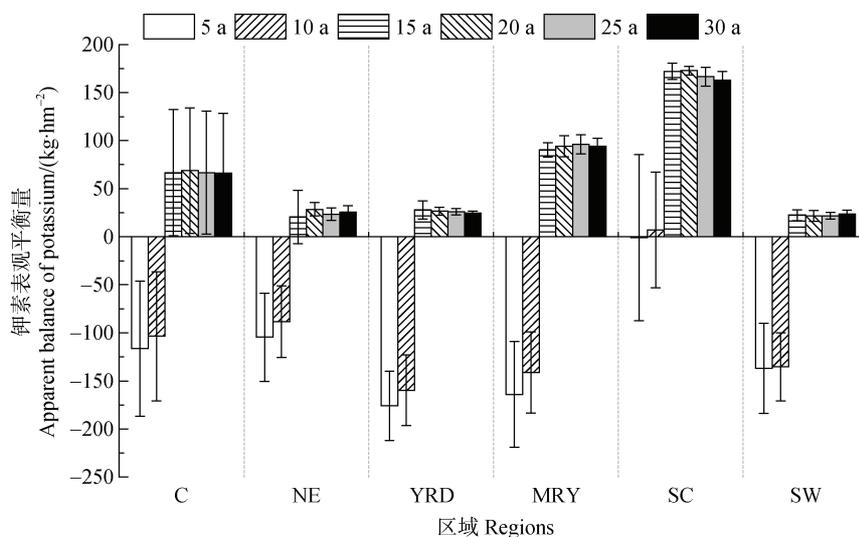


图 5 不同区域钾素表观平衡量变化

Fig. 5 Variation of apparent balance of potassium relative to regions

表 5 不同区域土壤速效钾含量 (y , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 与钾素表观平衡 (x , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 的拟合方程Table 5 Equation fitting relationship between soil readily available potassium (y , $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) and apparent balance of potassium (x , $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) relative to regions

区域 Regions	拟合方程 Fitted equation	R^2	P
C	$y = 0.0575x + 81.94$	0.6669	0.04654
NE	$y = 0.3221x + 146.9$	0.7676	0.01833
YRD	$y = 0.0327x + 89.86$	0.7181	0.02800
MYR	$y = 0.0957x + 67.14$	0.9426	3.47×10^{-4}
SC	$y = 0.1055x + 59.06$	0.7654	0.02786
SW	$y = 0.0083x + 89.23$	0.0086	0.8356

长石和伊利石为主^[18]，而长三角、长江中游、华南和西南（除了紫色土发育的水稻土）的成土母质中含钾矿物较少^[19-20]。但是，水稻的钾肥偏生产力则基本呈现为长三角和西南较高，东北次之，长江中游和华南最低（图 3）。原因一方面与表 1 中不同稻作区的钾肥用量（长三角和西南区施钾量较低，分别为 72.09 和 59.10 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ；而长江中游和华南区相对较高，分别为 77.06 和 128.2 $\text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$ ）有关，同时，长三角和西南的主要稻作模式分别为稻麦轮作和水稻-其他作物轮作模式，而长江中游和华南则主要为双季稻模式，这些稻作模式导致不同区域稻农的管理水平存在差异^[21]；再加上不同稻作模式中前茬作物的钾肥投入量不一致，秸秆还田量差异较大^[22]，可能影响水稻季的化学钾肥对水稻产量的提升作用，进而影响钾肥偏生产力。另一方面，不同区域的水稻类型（东北和长三角为粳稻，长江中游、华南、西南多为籼稻）^[23]和气候条件不同，从而导致各区域的水稻产量差异较大。

3.2 不同区域水稻土速效钾和钾肥偏生产力的时间变化

1988—2017 年间，尤其是在试验后期，随着钾肥的普遍施用和秸秆还田的大力推广^[2-3, 11]，各区域的水稻土速效钾含量均随着试验年限的增加而逐渐提升（除了西南，原因可能与作物吸收的钾素大于外源钾投入和钾素淋溶损失有关^[10, 24]）。双直线方程显示，全国水稻土速效钾含量在试验 14 a 至 30 a 内的年均增幅为 0.81 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在不同区域间，则以东北（13 a 至 30 a）和华南（13 a 至 30 a）水稻土速效钾含量的年均增幅明显高于长三角（11 a 至 30 a）；而长江中游则表现出试验 23 a 内土壤速效钾随试验年限延长而增加的趋势（图 2 和表 2）。

这与武红亮等^[3]的研究结果相似。原因主要与各区域钾肥投入和根系分泌物活化钾素有关^[25-26]。但是，不同区域间，钾肥偏生产力的年均增幅明显不同于土壤速效钾含量年均增幅的规律，长三角和华南的钾肥偏生产力年均增幅较高，其次为东北和长江中游，西南最低（图 3 和表 3）。原因可能与水稻品种、气候条件和钾肥运筹等有关^[27-28]，具体原因尚有待进一步研究和分析。

3.3 不同区域水稻钾肥偏生产力和钾素表观平衡与土壤速效钾的相关关系

土壤速效钾含量通过影响水稻钾吸收调控钾肥的增产作用^[29]。本研究表明，土壤速效钾含量与钾肥偏生产力存在显著的正相关关系，因此，提升土壤速效钾含量是提高我国水稻钾肥偏生产力的重要途径之一。对于速效钾含量低于 100.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的水稻土，通过施肥等途径提高等量的土壤速效钾含量，水稻钾肥偏生产力的增幅显著高于速效钾含量大于 100.8 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的水稻土（图 4）。这说明土壤速效钾含量越高，钾肥的偏生产力增幅越小。不同区域间，当土壤速效钾含量增加 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，30 a 间长三角的水稻钾肥偏生产力提升幅度最高，其次为华南和东北，长江中游最低（表 4）。原因可能与 30 a 内化学钾肥的施用和秸秆还田的推广显著改变了我国不同区域间钾素盈亏状态有关^[30]。

本研究通过估算表明，与 1988—1998 年的钾素匮乏或平衡相比，1998—2017 年，全国及各区域的水稻土均为钾素盈余状态；且不同区域间以华南的水稻土钾素盈余量最高，其次为长江中游，而东北、长三角和西南则较低（图 5）。Liu 等^[30]研究也表明，由于化学钾肥的施用和秸秆还田的推广，与 1980 年相比，2010 年的土壤钾素表观平衡已经开始从匮乏

向盈余转变;在2010年,除了东北地区为钾素匮乏之外,其余地区均表现为钾素盈余,且东南地区的钾素盈余量最高。其中,东北稻作区的钾素盈余则主要是由于本研究主要以水稻季的钾肥投入和输出为主,而不同作物的钾素投入与吸收差异较大^[31],进而可能影响了钾素平衡的估算。因此,后续有待针对东北地区进行不同作物系统下钾素的表现平衡研究,以期较为客观地揭示该区域的钾素表现平衡。此外,生态条件和土壤类型也显著影响钾素盈亏,廖育林等^[32]研究认为,与洞庭湖生态区紫潮泥田相比,丘陵生态区红黄泥田的钾素匮乏量明显偏高。然而,除了土壤速效钾和钾素盈余之外,钾肥用量和水稻品种特性等^[33-34]也可能显著影响钾肥偏生产力。

在本研究中,1988—2017年的长期监测表明,除了西南之外,全国及东北、长三角、长江中游和华南区域的钾素表现平衡均与土壤速效钾含量存在显著的正相关关系($P < 0.05$),且可用线性方程进行拟合(表5)。这与其他人^[24]在水稻土上的研究结果相似。通过拟合方程的斜率发现,当稻作区钾素盈余量每增加 $1 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,东北的土壤速效钾含量增幅最高,其次为华南和长江中游,而长三角最低。原因可能与土壤钾素形态转化有关,前人研究^[20, 35]表明,种植作物的根系特征、土壤含钾矿物类型和铵根离子及有机质含量等均显著影响土壤速效钾含量。总之,在稻作系统中,不同区域的钾肥施用和秸秆还田有利于土壤速效钾的提升。本研究根据拟合方程进一步推算可知,不同区域稻作系统中钾素维持平衡状态时,水稻土速效钾含量差异较大。因此,在后续的钾肥资源配置上,建议重点向长三角和西南等地区进一步推广秸秆还田和钾肥施用,同时,各稻作区应因地制宜,结合土壤速效钾含量综合调控钾肥运筹和推广秸秆还田。

4 结 论

1988—2017年间,东北区水稻土速效钾含量显著高于其他水稻种植区域。除了长江中游的水稻土速效钾随试验年限呈先增加后稳定的趋势,东北、长三角和华南的水稻土速效钾含量则呈现先稳定后增加的趋势。不同区域间,当增加相同的土壤速效钾含量,长三角的水稻钾肥偏生产力提升幅度最高,其次为华南和东北,长江中游最低。除了西南之外,

其他区域的钾素表现盈余均显著促进了土壤速效钾含量的提升。

参考文献 (References)

- [1] Zhang G L, Xiao X M, Biradar C M, et al. Spatiotemporal patterns of paddy rice croplands in China and India from 2000 to 2015[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 579: 82—92.
- [2] Zhao Y C, Wang M Y, Hu S J, et al. Economics- and policy-driven organic carbon input enhancement dominates soil organic carbon accumulation in Chinese croplands[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115 (16): 4045—4050.
- [3] Wu H L, Wang S C, Yan Z H, et al. Evolution characteristics of fertility of typical paddy soil in China in recent 30 years [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2018, 24 (6): 1416—1424. [武红亮, 王士超, 闫志浩, 等. 近30年我国典型水稻土肥力演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1416—1424.]
- [4] Liu Z H, Li Z G, Tang P Q, et al. Spatial-temporal changes of rice area and production in China during 1980-2010[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2013, 68 (5): 680—693. [刘珍环, 李正国, 唐鹏钦, 等. 近30年中国水稻种植区域与产量时空变化分析[J]. *地理学报*, 2013, 68 (5): 680—693.]
- [5] Cheng Y X, Wang X Z, Guo J P, et al. The temporal-spatial dynamic analysis of China rice production[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45 (17): 3473—3485. [程勇翔, 王秀珍, 郭建平, 等. 中国水稻生产的时空动态分析[J]. *中国农业科学*, 2012, 45 (17): 3473—3485.]
- [6] Wang Y, Wu W H. Regulation of potassium transport and signaling in plants[J]. *Current Opinion in Plant Biology*, 2017, 39: 123—128.
- [7] Zhang H M, Xu M G, Zhang W J, et al. Factors affecting potassium fixation in seven soils under 15-year long-term fertilization[J]. *Science Bulletin*, 2009, 54 (10): 1773—1780.
- [8] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term application of potassium fertilizer and wheat straw to soil on yield of crops and soil potassium in fluvo-aquic soil and brown soil of northcentral China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (1): 106—112. [谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 长期施钾与秸秆还田对华北潮土和褐土区作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (1): 106—112.]
- [9] Zhao S C, He P, Qiu S J, et al. Long-term effects of potassium fertilization and straw return on soil potassium levels and crop yields in north-central China[J]. *Field Crops Research*, 2014, 169: 116—122.

- [10] He P, Yang L P, Xu X P, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012) [J]. *Field Crops Research*, 2015, 173: 49–56.
- [11] Li J J, Xin J S, Zhang H M, et al. Evolution characteristics of soil nutrients in the main rice production regions, the middle-lower reach of Yangtze River of China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2015, 21 (1): 92–103. [李建军, 辛景树, 张会民, 等. 长江中下游粮食主产区 25 年来稻田土壤养分演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(1): 92–103.]
- [12] Ministry of Agriculture and Rural Affairs of the People's Republic of China. Rules for soil quality survey and assessment : NY/T 1634-2008[S]. Beijing : China Standards Press, 2008. [中华人民共和国农业农村部. 耕地地力调查与质量评价技术规程: NY/T 1634-2008S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.]
- [13] Lu R K. Analytical methods for soil and agricultural chemistry [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000. [鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.]
- [14] He P, Xu X P, Zhou W, et al. Fertilizer recommendation based on yield response and agronomic efficiency[M]. Beijing: Science Press, 2018. [何萍, 徐新朋, 周卫, 等. 基于产量反应和农学效率的作物推荐施肥方法[M]. 北京: 科学出版社, 2018.]
- [15] Liao Y L, Lu Y H, Xie J, et al. Effects of long-term application of chemical potassium fertilizer and incorporation of rice straw on potassium supplying capacity of red soil in double cropping paddy field[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2017, 54 (2): 456–467. [廖育林, 鲁艳红, 谢坚, 等. 长期施用钾肥和稻草对红壤双季稻田土壤供钾能力的影响[J]. *土壤学报*, 2017, 54 (2): 456–467.]
- [16] Singh V K, Dwivedi B S, Yadvinder-Singh, et al. Effect of tillage and crop establishment, residue management and K fertilization on yield, K use efficiency and apparent K balance under rice-maize system in north-western India[J]. *Field Crops Research*, 2018, 224: 1–12.
- [17] Xu X P, Wang X B, Li D M, et al. Optimum combination of phosphorus, potassium and density for double-rice systems[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (3): 598–608. [徐新朋, 王秀斌, 李大明, 等. 双季稻最佳磷肥和钾肥用量与密度组合研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (3): 598–608.]
- [18] Liu S X, Zhao L P, Li N, et al. Relationship between composition of K-bearing minerals and potassium status of cultivated soils in Jilin Province[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2002, 8 (1): 70–76. [刘淑霞, 赵兰坡, 李楠, 等. 吉林省主要耕作土壤中含钾矿物组成及其与不同形态钾的关系[J]. *植物营养与肥料学报*, 2002, 8 (1): 70–76.]
- [19] Zhu Y G, Luo J X. Potassium status and contents of K-bearing minerals of some soils in Southern China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1994, 31 (4): 430–438. [朱永官, 罗家贤. 我国南方一些土壤的钾素状况及其含钾矿物[J]. *土壤学报*, 1994, 31 (4): 430–438.]
- [20] Xie Q, Zhang Y T, Jiang Q J, et al. Effect of long-term potassium unbalanced input on clay mineralogical property of purple soil[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36 (6): 1910–1915. [谢青, 张宇亭, 江秋菊, 等. X 射线衍射分析长期钾素盈亏对土壤含钾类矿物的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2016, 36 (6): 1910–1915.]
- [21] Tang L Q, Zhou J H, Yu X H. The impact of conservation tillage on reduction in rice yield loss: Evidence from 1080 Chinese rice farmers[J]. *Journal of Natural Resources*, 2017, 32 (6): 1016–1028. [唐利群, 周洁红, 于晓华. 采用保护性耕作对减少水稻产量损失的实证分析——基于 4 省 1080 个稻农的调研数据[J]. *自然资源学报*, 2017, 32 (6): 1016–1028.]
- [22] Liu X Y, Li S T. Temporal and spatial distribution characteristics of crop straw nutrient resources and returning to farmland in China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33 (21): 1–19. [刘晓永, 李书田. 中国秸秆养分资源及还田的时空分布特征[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(21): 1–19.]
- [23] Lin H, Li T T, Tong H H, et al. Analysis on evolution of major rice cultivars in China[J]. *Chinese Journal of Rice Science*, 2018, 32 (6): 565–571. [林海, 李婷婷, 童汉华, 等. 我国水稻主栽品种演替分析[J]. *中国水稻科学*, 2018, 32 (6): 565–571.]
- [24] Dong Y H, Wang H Y, Zhou J M, et al. Preliminary study on potassium leaching characteristics of different soils[J]. *Soils*, 2014, 46 (2): 225–231. [董艳红, 王火焰, 周健民, 等. 不同土壤钾素淋溶特性的初步研究[J]. *土壤*, 2014, 46 (2): 225–231.]
- [25] He B, Xue G, Zhang X Q, et al. Analysis on chemical mechanism of potassium release process from soil as influenced by organic acids[J]. *Soils*, 2015, 47 (1): 74–79. [何冰, 薛刚, 张小全, 等. 有机酸对土壤钾素活化过程的化学分析[J]. *土壤*, 2015, 47(1): 74–79.]
- [26] Shahrokh V, Khademi H, Faz Cano A, et al. Different forms of soil potassium and clay mineralogy as influenced by the lemon tree rhizospheric environment[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2019, 16 (8): 3979–3988.
- [27] Yuan M M, Wu G, Hu R, et al. Effects of straw returning plus fertilization on crop yield and fertilizer use efficiency in rice-rapeseed rotation system[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2018, 37 (12): 3597–3604. [袁嫚嫚, 邬刚, 胡润, 等. 稻油轮作下秸秆还田配施化肥对作物产量及肥料利用率的影响[J]. *生态学杂志*, 2018, 37 (12): 3597–3604.]

- [28] Zhao H, Gou J L, Zhao L X, et al. Analysis on status of soil potassium and the effects of potassium fertilizer in dryland soil in Guizhou[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2016, 22 (1): 277—285. [赵欢, 苟久兰, 赵伦学, 等. 贵州旱作耕地土壤钾素状况与钾肥效应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2016, 22 (1): 277—285.]
- [29] Wang W N, Lu J W, Lu M X, et al. Effects of potassium fertilizer and potassium use efficiency on early-, mid-and late-season rice in Hubei Province, China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2011, 17 (5): 1058—1065. [王伟妮, 鲁剑巍, 鲁明星, 等. 湖北省早、中、晚稻施钾增产效应及钾肥利用率研究[J]. *植物营养与肥料学报*, 2011, 17 (5): 1058—1065.]
- [30] Liu Y X, Yang J Y, He W T, et al. Provincial potassium balance of farmland in China between 1980 and 2010[J]. *Nutrient Cycling in Agroecosystems*, 2017, 107 (2): 247—264.
- [31] Xu G H, Bao S D, Yang J P, et al. The relationship between potassium absorption ability and root parameters of different crops[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 1995, 18 (1): 49—52. [徐国华, 鲍士旦, 杨建平, 等. 不同作物的吸钾能力及其与根系参数的关系[J]. *南京农业大学学报*, 1995, 18 (1): 49—52.]
- [32] Liao Y L, Zheng S X, Nie J, et al. Potassium efficiency and balance of the rice-rice cropping system in different types of ecosystems[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2008, 39 (3): 612—618. [廖育林, 郑圣先, 聂军, 等. 不同类型生态区稻-稻种植制度中钾肥效应及钾素平衡研究[J]. *土壤通报*, 2008, 39 (3): 612—618.]
- [33] Zeng D W, Liu Q, Peng J W, et al. Effect of different potassium fertilizer amount on potassium utilization of double cropping rice[J]. *China Rice*, 2012, 18 (2): 30—32. [曾德武, 刘强, 彭建伟, 等. 不同钾肥用量对双季稻钾肥利用率的影响. *中国稻米*, 2012, 18 (2): 30—32.]
- [34] 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. [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. *土壤学报*, 2008, 45 (5): 915—924.]
- [35] Wang Z, Lu J W, Zhang W J, et al. Influential factors on soil available potassium evaluation in agriculture[J]. *Soils*, 2012, 44 (6): 898—904. [王箬, 鲁剑巍, 张文君, 等. 田间土壤钾素有效性影响因素及其评估[J]. *土壤*, 2012, 44 (6): 898—904.]

(责任编辑: 陈荣府)