

DOI: 10.11766/trxb202109080399

柳开楼, 都江雪, 马常宝, 曲潇琳, 韩天富, 刘淑军, 黄晶, 李亚贞, 申哲, 张璐, 李冬初, 张会民. 中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征[J]. 土壤学报, 2023, 60 (3): 673–684.

LIU Kailou, DU Jiangxue, MA Changbao, QU Xiaolin, HAN Tianfu, LIU Shujun, HUANG Jing, LI Yazhen, SHEN Zhe, ZHANG Lu, LI Dongchu, ZHANG Huimin. Spatio-temporal Evolution Characteristics of Soil Potassium in Main Dry-farming Grain Arable Land of China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60 (3): 673–684.

中国主要旱作粮食耕地土壤钾素的时空演变特征*

柳开楼^{1, 2}, 都江雪², 马常宝³, 曲潇琳³, 韩天富², 刘淑军^{2, 4}, 黄晶^{2, 4},
李亚贞¹, 申哲², 张璐^{2, 3}, 李冬初^{2, 4}, 张会民^{2, 4†}

(1. 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; 2. 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; 3. 农业农村部耕地质量监测保护中心, 北京 100125; 4. 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)

摘要: 以小麦和玉米等旱作粮食为主的旱地是我国重要的耕地类型, 其对国家粮食安全和稳定发挥着极其重要的作用。基于全国耕地质量监测数据库, 分析了 1988—2007 年和 2008—2018 年间全国及不同区域主要旱作粮食耕地的钾肥投入量、土壤速效钾和缓效钾的时空演变规律, 并探讨了土壤速效钾与缓效钾的量化关系。结果表明, 1988—2018 年全国主要旱作粮食耕地的化肥钾、秸秆钾和总钾的年均投入量 (K_2O) 均保持在较为稳定的水平, 年均投入量分别为 $125 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 、 $148 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 和 $273 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$ 。在不同区域间均呈现出华北和东北的钾肥投入量显著高于其他区域的趋势。与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年东北、华北、华东和西南的总钾年均投入量增加了 4.22%~23.8%, 而西北则略有降低。在 1988—2018 年, 全国主要旱作粮食耕地土壤速效钾和缓效钾分别为 $139 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $665 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年的土壤速效钾和缓效钾分别提高了 15.1% 和 6.72%。在不同区域间, 土壤速效钾以西北和东北较高 (大于 $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 而华北和华东较低 ($136\sim 149 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 西南最低 ($116 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年华北、华东、西北和西南的土壤速效钾分别提高了 15.7%、17.7%、4.16% 和 34.5%, 土壤缓效钾分别增加了 8.95%、2.15%、5.71% 和 4.19%, 而东北则略有降低。线性方程表明, 随着土壤速效钾的提高, 2008—2018 年土壤缓效钾的增加量 ($14.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) 明显高于 1988—2007 年 ($7.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 同时, 不同区域间的拟合方程也表明, 随着土壤速效钾的增加, 1988—2018 年东北、华东和西北的土壤缓效钾增加量明显高于华北。因此, 在全国耕地质量监测平台上, 与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年全国和大部分区域主要旱作粮食耕地的土壤速效钾和缓效钾均显著增加。土壤速效钾与缓效钾的线性关系为快速估算缓效钾含量提供了技术参考, 但不同试验阶段和区域内拟合方程存在差异, 建议不同区域因地制宜, 综合土壤速效钾和缓效钾含量精准划分土壤供钾能力等级, 从而为实现藏钾于地的目标奠定基础。

关键词: 旱作粮食; 钾肥投入; 速效钾; 缓效钾; 不同区域

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

* 国家自然科学基金项目 (41671301)、国家红壤改良工程技术研究中心开放基金项目 (2020NETRCRSI-9) 和国家重点研发计划项目 (2016YFD0300901) 资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 41671301), the Open Funds in National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement of China (No. 2020NETRCRSI-9), and the National Key Research and Development Program of China (No. 2016YFD0300901)

† 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, 副研究员, 主要从事土壤培肥与改良研究。E-mail: liukailou@163.com

收稿日期: 2021-09-08; 收到修改稿日期: 2021-12-10; 网络首发日期 (www.cnki.net): 2022-03-08

Spatio-temporal Evolution Characteristics of Soil Potassium in Main Dry-farming Grain Arable Land of China

LIU Kailou^{1, 2}, DU Jiangxue², MA Changbao³, QU Xiaolin³, HAN Tianfu², LIU Shujun^{2, 4}, HUANG Jing^{2, 4}, LI Yazhen¹, SHEN Zhe², ZHANG Lu^{2, 3}, LI Dongchu^{2, 4}, ZHANG Huimin^{2, 4†}

(1. Jiangxi Institute of Red Soil/National Engineering and Technology Research Center for Red Soil Improvement, Nanchang 330046, China; 2. Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences/National Engineering Laboratory for Improving Quality of Arable Land, Beijing 100081, China; 3. Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs, Beijing 100125, China; 4. National Observation Station of Qiyang Agri-ecology System, Institute of Agricultural Resources and Regional Planning, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Qiyang, Hunan 426182, China)

Abstract: 【Objective】 Upland soil, as an important type of arable land in China, plays an extremely important role in national food security and stability. Since the reform and opening of China, there were many great changes in farmers' fertilization patterns and planting habits because of soil testing formula fertilization, straw returning and fertilizer reduction to increase efficiency. However, there is still a lack of systematic research on the effects of these changes on the input of potassium (K) fertilizer and soil K in the main dry-farming grain of China. Therefore, the objective of this study was to evaluate the evolution characteristics of K input and fertility in major wheat and/or maize production regions of the whole country, which will clarify the present situation of K fertility and provide certain theoretical guidance for rational application of K fertilizer in different regions. 【Method】 This study was based on the National Cultivated Land Quality Monitoring database, which was from the Center of Cultivated Land Quality Monitoring and Protection, Ministry of Agricultural and Rural Affairs. Then, the K fertilizer input, soil available K (AK) and slowly available K (SAK) contents were analyzed in five regions of China, which included Northeast of China (NEC), North of China (NC), East of China (EC), Northwest of China (NWC), Southwest of China (SWC) during 1988–2007 and 2008–2018. Meanwhile, the effects of soil AK on SAK were also discussed. 【Result】 There was a relatively stable chemical K, straw K, and total K fertilizers (K_2O) input in the whole country during 1988–2018, with $125 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, $148 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, and $273 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, respectively. There was no significant change for K input during 1988–2007 and 2008–2018. In different regions, it was observed that K input in NC and NEC regions was significantly higher than that in other regions. Compared with those of 1988–2007, the total K input in NEC, NC, EC, and SWC regions was increased during 2008–2018 by 4.22%–23.8%, while it was decreased slightly in the NWC region. The AK and SAK of the whole country were $139 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ and $665 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, respectively. Compared with 1988–2007, the AK and SAK during 2008–2018 increased by 15.1% and 6.72%, respectively. The order of soil AK in the different regions was higher in NWC and NEC regions (more than $150 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), lower for NC and EC regions ($136\text{--}149 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), and lowest for SWC region ($116 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). During 2008–2018, soil AK in NC, EC, NWC and SWC regions were increased more than during 1988–2007 by 15.7%, 17.7%, 4.16% and 34.5%, respectively. Also, the soil SAK was increased by 8.95%, 2.15%, 5.71% and 4.19%, respectively. In the main dry-farming food soils of the whole country, the relationship between soil AK and SAK could be fitted by a linear equation. With the increase in soil AK, the growth rate of soil SAK in 2008–2018 ($14.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) was significantly higher than 1988–2007 ($7.23 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). Meanwhile, the fitting equations among different regions in 1988–2018 also showed that the growth rate of soil SAK in NEC, EC and NWC regions was significantly higher than that in the NC region. 【Conclusion】 On the long-term monitoring platform of farmlands in China, compared with 1988–2007, the AK and SAK of main dry-farming grain soil were increased significantly during 2008–2018, and there was an increasing trend in most regions. Also, there was a significant linear relationship between soil AK and SAK. These results should provide a technical reference for the rapid estimation of SAK content even though there were differences in the fitting equations during different experimental periods and regions. Thus, it is recommended that different areas should accurately classify soil K supply capacity through AK and SAK by local conditions since it would establish the foundation for realizing the goal of storing K in the soil.

Key words: Dry-farming grain; Potassium fertilizer input; Available potassium; Slowly available potassium; Different regions

中国幅员辽阔，南北尺度上跨越了热带、亚热带、暖温带、中温带和寒温带等气候区域，东西尺度上跨越了干旱区、半干旱区、半湿润区和湿润区^[1]。受海拔、温度和降水等条件的影响，我国耕地土壤类型多样^[2]，旱地因其可种植除水稻之外的大部分旱作物（比如小麦、玉米等），在保障粮食安全与稳定方面发挥着重要作用。钾素是作物的品质元素^[3]，随着社会经济水平的提高，为满足人们对高品质农产品的要求，外源钾素投入在农业生产中越来越受到重视。前人研究^[4-5]表明，外源钾肥的肥效与土壤钾素肥力水平和作物钾素需求密切相关，但是，由于对土壤钾素肥力缺乏系统评估，从而导致全国的旱作粮食耕地钾肥施用存在盲目性，也不利于作物品质提升。

在我国，除红壤外，主要旱作粮食耕地土壤的速效钾含量普遍高于水田^[6]。但是，随着高产作物品种的大力推广，小麦和玉米等作物较高的钾素吸收量加剧了旱作粮食耕地土壤的速效钾耗竭。在东北、西北和华北的旱作粮食耕地土壤上，谭德水等^[4, 7-8]研究表明，连续 13 年施用钾肥或配合秸秆还田均可显著提高土壤的供钾能力，从而满足作物的吸钾需求，但不同区域间钾肥对作物的增产效果差异较大。占丽平等^[9]研究表明，在长江流域的水旱轮作土壤上，钾肥施用能提高土壤水溶性钾和速效钾含量，并向缓效钾方向转化，从而有效维持和提高土壤供钾水平。同时，秸秆还田条件下油菜及小麦可在减少 18.3%~66.7%钾肥用量的同时保证作物产量^[5]。张会民等^[10]基于 1980 年左右开始的长期试验发现，连续 15 年施钾肥显著提高了土壤钾素容量和强度，进而改善了土壤供钾能力。结合室内模拟法和 X 射线衍射分析技术发现，长期施钾延缓或阻止了水云母向云母-蒙脱石混层层间矿物的转化，使土壤对外源钾的固定能力降低^[11]。He 等^[12]研究发现，全国土壤速效钾含量从 1990 年的 79.8 mg·kg⁻¹ 提高至 2012 年的 93.4 mg·kg⁻¹。Liu 等^[13]使用农业统计年鉴的数据库研究表明，1980—2010 年，钾肥的施用导致全国土壤钾素表现平衡发生了从匮乏到盈余的转变，其中东南和中部的钾素盈余量较高。结合土壤钾素生物有效性分级标准和体系，Chen 等^[14]基于改进的四苯硼钠化学浸提法，明确了我国农田土壤有效钾库西北高东南低的分布状况。这些研究均在区域尺度上明确了土壤钾素肥力的状况，证明了合理施用

钾肥对于土壤钾素资源可持续利用和作物高产优质的重要性。然而，由于改革开放以来我国农业生产方式发生了巨大变化，除了不断变化的作物品种和钾肥用量之外，施肥措施和作物秸秆利用方式也发生了巨大变化^[15]，尤其是 2000 年以来，随着测土配方施肥和秸秆还田等技术的推广，以及 2015 年以来的化肥减施增效行动，导致土壤的钾素肥力变化较大，比如潮土区土壤速效钾从监测初期（1988—1997 年）到中期（1998—2003 年）略有下降，监测中期到后期（2004—2016 年）显著提升了 30.4%^[16]；黑土区，2012—2016 年速效钾的平均含量（224 mg·kg⁻¹）较监测初期（1988—1997 年，172 mg·kg⁻¹）提高 44.9%^[17]。全国尺度的水稻土结果已经证明，1988—2017 年，全国水稻土速效钾年均增幅为 0.81 mg·kg⁻¹，且不同区域间增幅存在较大变异^[18]。但是，前人研究主要集中在北方旱作粮食耕地土壤或水稻土的钾素肥力时空变化，虽然也有部分研究明确了全国尺度上土壤钾素肥力演变，但由于施肥方式和用量与实际生产脱节^[10]、研究时限并不能反映 2010—2018 年的变化^[12]。此外，土壤钾素肥力的评价方法较为复杂^[14]，土壤速效钾和缓效钾均可有效表征土壤的供钾能力，但是，与土壤速效钾的测定方法相比，土壤缓效钾的测定方法较为繁琐，导致人们一般用速效钾衡量土壤钾素肥力，进而影响土壤钾素肥力的精准评估，不利于有效指导当前的钾肥合理施用。因此，为指导和优化当前和未来农业的钾肥合理施用，探讨在常规施肥管理措施下，全国主要旱作粮食耕地土壤钾素肥力的时空变化特征就显得十分迫切。本研究利用 1988—2018 年全国耕地质量监测数据库，分析不同区域和时间阶段内钾肥投入量、土壤速效钾和缓效钾的时空演变规律，并尝试量化土壤速效钾与缓效钾的相关关系，以期构建基于土壤速效钾快速估算缓效钾的方法，为不同区域土壤钾素的可持续利用提供理论依据，进而为优化钾肥资源分配提供技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验设计

基于农业农村部耕地质量监测保护中心于 1988 年开始建立的全国耕地质量监测平台，具体介绍见韩天富等^[15]，平台上各监测点的种植制度、施肥习

惯、土壤类型和肥力等级及产量水平均在当地具有较高的代表性,然而,需要说明的是,由于具有稳定的经费和技术支持,各监测点位的管理水平一般高于当地普通农户,且施肥用量主要采用当地农技推广部门的施肥建议。每年的 11 月份采集土壤样品,并进行土壤理化性质分析。其中土壤速效钾和缓效钾的分析方法分别为醋酸铵浸提和热硝酸浸提,然后用火焰光度计法测定,具体步骤参考史瑞和等^[19]。此外,通过调研发现,各监测点均为秸秆全量粉碎还田。

1.2 数据采集和统计分析

选择以小麦和玉米等旱作物为主的监测点位,结合种植制度因素,将全部的监测区域划分为东北(黑龙江、吉林和辽宁)、华北(北京、天津、河北、河南、山东和山西)、华东(上海、安徽、江苏、浙江、江西、湖北和湖南)、西北(陕西、宁夏、甘肃、青海、新疆和内蒙古)、西南(云南、四川、重庆、贵州和西藏),其中华南(广东、广西、海南和福建)区域主要为水稻种植区,玉米等旱作物较少,因此

本研究不考虑。提取各区域的钾肥投入量、土壤速效钾和缓效钾等数据,删除数据不全的点位,形成初步的数据库。随后,为探讨各区域的时间变化,并结合监测前期点位少、监测后期点位多的特点,本研究将各区域的样本数进一步划分了两个时间段,分别为 1988—2007 年和 2008—2018 年。最后,对照 1988—2007 年的点位,进一步梳理了 2008—2018 年的点位数,从而保持 1988—2007 年和 2008—2018 年的监测点位数量基本一致。具体各区域的样本数见表 1。

所有数据均用 Excel 2010 进行整理,采用 SAS 9.1 进行单因素方差分析。土壤缓效钾和速效钾的相关关系采用线性拟合方程分析,用 Origin 8.5 作图。

2 结果

2.1 化肥钾和秸秆钾投入时空变化特征

在全国尺度,1988—2018 年化肥钾、秸秆钾和总钾的年均投入量(K_2O)均保持在较为稳定的水

表 1 不同区域钾肥、土壤速效钾和缓效钾等指标的样本数

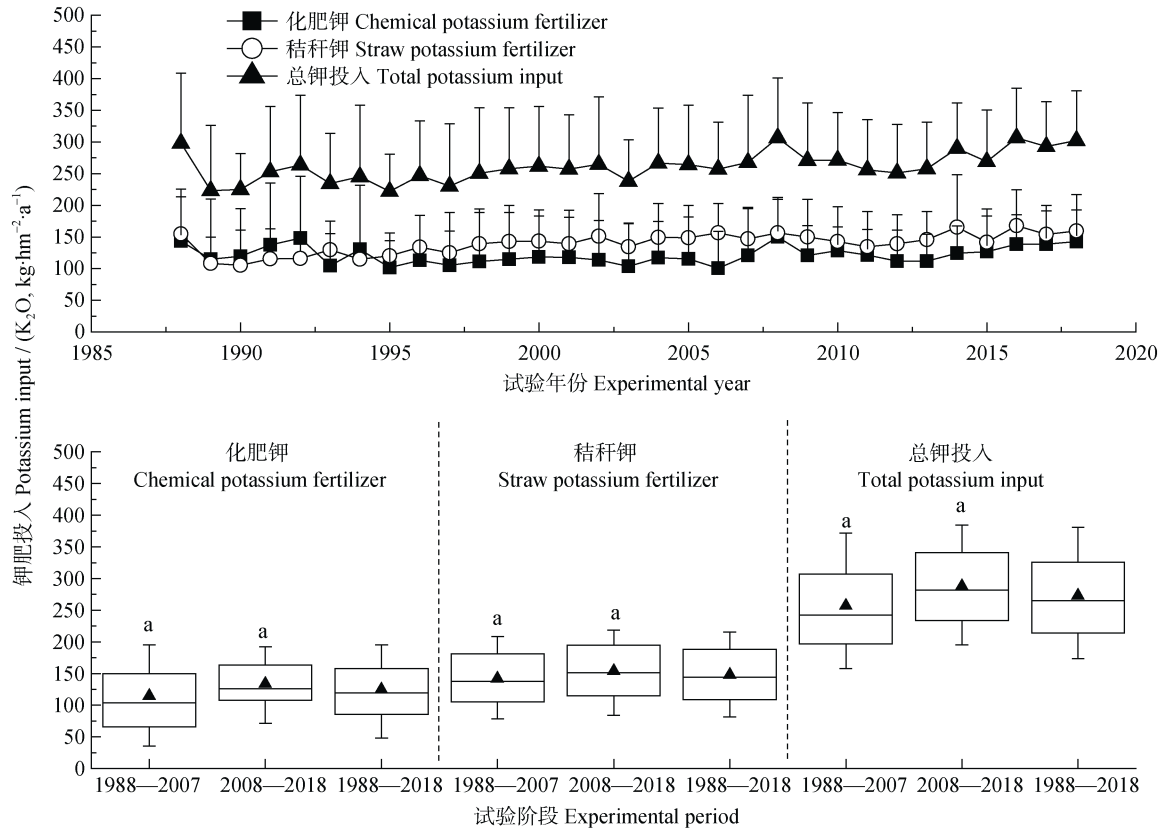
Table 1 The sample number of indexes including potassium fertilizer, soil available potassium and slowly available potassium in different regions

| 试验阶段 Experimental period | 指标 Indexes | 样本数 Number of samples | | | | | 合计 Total |
|-----------------------------|-----------------------------------|-----------------------|-----|-----|-----|-----|----------|
| | | NEC | NC | EC | NWC | SWC | |
| 1988—2007 | 化肥钾 Chemical potassium fertilizer | 44 | 170 | 89 | 40 | 118 | 461 |
| | 秸秆钾 Straw potassium fertilizer | 44 | 170 | 89 | 40 | 118 | 461 |
| | 总钾投入 Total potassium input | 44 | 170 | 89 | 40 | 118 | 461 |
| | 速效钾 Available potassium | 44 | 170 | 89 | 40 | 118 | 461 |
| | 缓效钾 Slowly available potassium | 26 | 70 | 88 | 39 | 54 | 277 |
| 2008—2018 | 化肥钾 Chemical potassium fertilizer | 60 | 178 | 80 | 53 | 127 | 498 |
| | 秸秆钾 Straw potassium fertilizer | 60 | 178 | 80 | 53 | 127 | 498 |
| | 总钾投入 Total potassium input | 60 | 178 | 80 | 53 | 127 | 498 |
| | 速效钾 Available potassium | 60 | 178 | 80 | 53 | 127 | 498 |
| | 缓效钾 Slowly available potassium | 60 | 176 | 74 | 53 | 110 | 473 |
| 1988—2018 | 化肥钾 Chemical potassium fertilizer | 104 | 348 | 169 | 93 | 245 | 959 |
| | 秸秆钾 Straw potassium fertilizer | 104 | 348 | 169 | 93 | 245 | 959 |
| | 总钾投入 Total potassium input | 104 | 348 | 169 | 93 | 245 | 959 |
| | 速效钾 Available potassium | 104 | 348 | 169 | 93 | 245 | 959 |
| | 缓效钾 Slowly available potassium | 86 | 246 | 162 | 92 | 164 | 750 |

注: NEC: 东北; NC: 华北; EC: 华东; NWC: 西北; SWC: 西南, 下同。Note: NEC stands for Northeast of China; NC for North of China; EC for East of China; NWC for Northwest of China; SWC for Southwest of China. The same as below.

平, 分别为 125 ± 60.4 、 148 ± 53.1 和 $273 \pm 86.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 年际间波动较小 (图 1)。在试验初期 (1988—1995 年), 化肥钾的年均投入量高于秸秆钾, 但在试验中后期 (1995—2018 年), 则表

现出秸秆钾的年均投入量明显高于化肥钾。与 1988—2007 相比, 2008—2018 年的化肥钾、秸秆钾和总钾的年均投入量均有所增加, 但未达到显著水平 ($P > 0.05$)。



注：不同的小写字母表示相同指标在不同时间阶段存在显著差异 ($P < 0.05$)，下同。Note: The different lowercase letters indicate significant difference under the same experimental period for one index ($P < 0.05$). The same as below.

图 1 全国主要旱作粮食耕地的钾肥年均投入量

Fig. 1 The potassium input in main dry-farming grain arable land of the whole country

在不同区域内, 化肥钾、秸秆钾和总钾的年均投入量变异较大 (表 2)。不同时间阶段内均呈现出华东的化肥钾年均投入量最高, 其中 1988—2007 年东北最低, 2008—2018 年西北最低; 秸秆钾的年均投入量则表现出 1988—2007 年以华北最高, 2008—2018 年以华东最高, 但不同时间阶段均以西南最低; 总钾的年均投入量也呈现出华北和华东显著高于其他区域。1988—2018 年间, 华东的化肥钾年均投入量为 $145 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 而东北和西北则为 94.3 和 $99.6 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 其他区域为 $125 \sim 133 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$; 秸秆钾的年均投入量则以华北和华东最高 (175 和 $168 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 其次为西北和东北 (147 和 $141 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$), 西南最低 ($100 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$)。

与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年间, 东北、华北、华东和西南的化肥钾年均投入量分别提高了 41.9% 、 35.9% 、 13.9% 和 4.57% , 西北则略有降低; 2008—2018 年间, 除了华东的秸秆钾年均投入量较 1988—2007 年增加了 33.1% , 其他区域基本保持不变; 同时, 除了西北略有降低之外, 所有地区的总钾年均投入均表现出 2008—2018 年高于 1988—2007 年, 增幅为 $4.22\% \sim 23.8\%$, 其中华北和华东的增幅 (18.7% 和 23.8%) 明显高于西南和东北 (4.22% 和 8.26%)。

2.2 土壤速效钾和缓效钾的时空变化特征

在全国主要旱作粮食耕地上, 1988—2018 年土壤速效钾和缓效钾平均为 $(139 \pm 63) \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $(665 \pm$

表 2 不同区域钾肥 (K_2O) 年均投入量Table 2 The potassium input in different regions/ ($kg \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)

| 指标 Indexes | 区域 Region | 试验阶段 Experimental period | | |
|---|--------------|--------------------------|-------------|--------------|
| | | 1988—2007 | 2008—2018 | 1988—2018 |
| 化肥钾 Chemical potassium fertilizer | NEC | 76.0±39.5c | 108.0±33.2c | 94.3±39.2b |
| | NC | 106.0±70.6b | 144.0±29.1a | 125.0±56.8ab |
| | EC | 136.0±62.2a | 155.0±60.0a | 145.0±61.6a |
| | NWC | 106.0±38.7b | 95.0±57.0c | 99.6±50.0b |
| | SWC | 130.0±75.9a | 136.0±58.4b | 133.0±67.3a |
| 秸秆钾 Straw potassium fertilizer | NEC | 149.0±40.8b | 135.0±19.6b | 141.0±31.0b |
| | NC | 168.0±43.7a | 181.0±43.0a | 175.0±43.8a |
| | EC | 146.0±59.0b | 194.0±44.5a | 168.0±57.8a |
| | NWC | 147.0±44.1b | 147.0±57.6b | 147.0±51.9b |
| | SWC | 98.1±32.8c | 102.0±29.1c | 100.0±30.9c |
| 总钾投入 Total potassium input | NEC | 225.0±67.1b | 243.0±46.1b | 235.0±56.4b |
| | NC | 274.0±91.6a | 325.0±50.2a | 300.0±77.7a |
| | EC | 282.0±102.0a | 349.0±87.2a | 313.0±101.0a |
| | NWC | 253.0±55.4ab | 243.0±74.2b | 247.0±66.7b |
| | SWC | 228.0±91.4b | 238.0±64.9b | 233.0±78.8b |

注：不同的小写字母表示不同区域的相同指标在相同时间内存在显著差异 ($P < 0.05$)，下同。Note: The different lowercase letters indicate significant difference under different regions in same experimental time for one index ($P < 0.05$). The same as below.

315) $mg \cdot kg^{-1}$ ，且随着试验年限的延长而逐渐增加 (图 2)。与 1988—2007 年相比，2008—2018 年的土壤速效钾和缓效钾均显著提高，增幅分别为 15.1% 和 6.72%。

表 3 显示，在不同区域间，1988—2018 年土壤速效钾以西北和东北较高 (大于 150 $mg \cdot kg^{-1}$)，而华北和华东较低 (136~149 $mg \cdot kg^{-1}$)，西南最低 (116 $mg \cdot kg^{-1}$)。且不同时间段均呈现出西南的土壤速效钾最低。与 1988—2007 年相比，2008—2018 年间，华北、华东、西北和西南的土壤速效钾分别提高了 15.7%、17.7%、4.16% 和 34.5%，而东北则降低了 11.8%。

不同区域内土壤缓效钾变异较大 (表 3)。1988—2018 年间，西北和华北的土壤缓效钾含量较高 (大于 800 $mg \cdot kg^{-1}$)，其次为东北和华东 (595~688 $mg \cdot kg^{-1}$)，西南最低 (308 $mg \cdot kg^{-1}$)。与 1988—2007 年相比，2008—2018 年间，华北、华东、西北和西南的土壤缓效钾分别提高了 8.95%、

2.15%、5.71% 和 4.19%，而东北则略有降低。

2.3 土壤速效钾与缓效钾的相关关系

土壤速效钾和缓效钾含量存在显著的正相关关系 (图 3)，这说明，随着土壤速效钾的增加，土壤缓效钾也呈现出显著的增加趋势。在不同时间阶段内，全国主要旱作粮食耕地土壤速效钾与缓效钾含量均可用线性方程进行拟合 ($P < 0.05$)。根据拟合方程的斜率发现，当土壤速效钾增加时，1988—2018 年土壤缓效钾的增加量为 10.2 $mg \cdot kg^{-1}$ 。同时，与 1988—2007 年土壤缓效钾的增加量 (7.23 $mg \cdot kg^{-1}$) 相比，2008—2018 年的增加量明显较高 (14.2 $mg \cdot kg^{-1}$)。

不同区域内土壤速效钾与缓效钾关系差异较大 (表 4)。在 1988—2007 年华东和西北土壤速效钾和缓效钾的关系达显著水平，拟合方程的斜率显示，随着土壤速效钾的增加，华东和西北土壤缓效钾的增加量分别为 1.26 和 1.76 $mg \cdot kg^{-1}$ ，而其他区域的拟合方程均不显著 ($P > 0.05$)。在 2008—2018 年，除西南外，其他区域的拟合方程均为显著水平

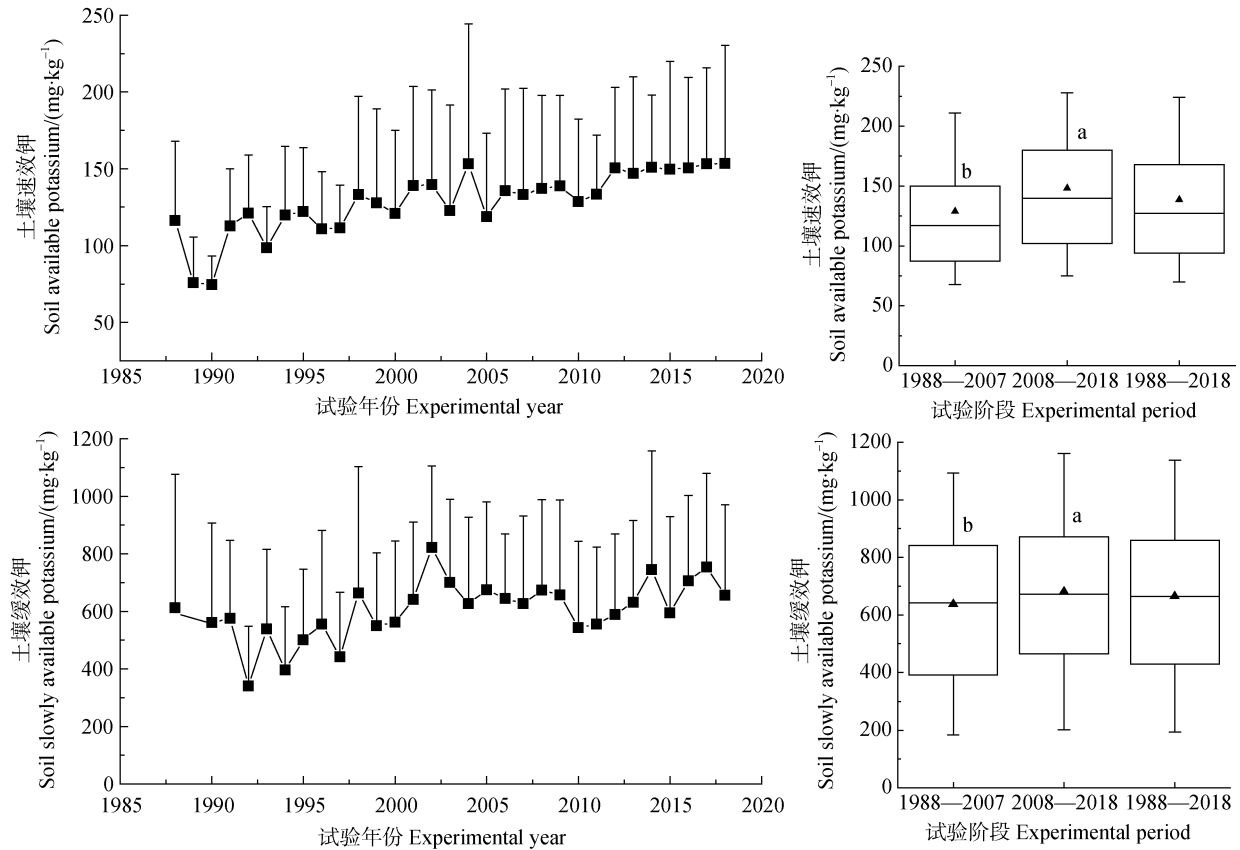


图2 全国主要旱作粮食耕地土壤速效钾和缓效钾含量

Fig. 2 Soil available and slowly available potassium contents in main dry-farming grain arable land of the whole country

表3 不同区域土壤速效钾和缓效钾含量

Table 3 Soil available and slowly available potassium content in different regions/ ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

| 区域 Region | 土壤速效钾 Soil available potassium | | | 土壤缓效钾 Soil slowly available potassium | | |
|-----------|--------------------------------|--------------|-------------|---------------------------------------|-----------|-----------|
| | 1988—2007 | 2008—2018 | 1988—2018 | 1988—2007 | 2008—2018 | 1988—2018 |
| NEC | 173.0±82.1a | 153.0±63.3ab | 161.0±72.2a | 701±260b | 683±245b | 688±248b |
| NC | 126.0±61.8b | 146.0±56.6ab | 136.0±59.9b | 792±242b | 863±221a | 843±229a |
| EC | 138.0±55.2b | 162.0±55.6a | 149.0±56.6b | 589±262c | 602±235b | 595±249b |
| NWC | 160.0±60.3a | 167.0±72.0a | 164.0±66.9a | 900±211a | 951±305a | 929±269a |
| SWC | 98.2±42.7c | 132.0±67.0b | 116.0±59.0c | 300±148d | 312±149c | 308±148c |

($P<0.05$), 在东北、华北、华东和西北, 当土壤速效钾提高时, 土壤缓效钾的增加量分别为 1.91、0.89、1.93 和 1.79 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。与 1988—2007 年相比, 2018—2018 年华东土壤缓效钾的增加量明显较高; 而西北则基本维持不变。同时, 与 2008—2018 年的结果相似, 1988—2018 年的拟合方程显示, 随着土壤速效钾的增加, 东北、华北、华东和西北的土壤缓效钾增加量分别为 1.49、0.62、1.51 和 1.67 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

3 讨论

3.1 全国和不同区域主要旱作粮食耕地钾肥投入变化

在作物的生长发育中, 除了从土壤中直接吸收钾素之外, 合理补充外源钾肥也是调控作物钾素需求的重要手段^[3]。何萍等^[20]研究表明, 施钾在提高产量的同时, 也增加了籽粒中脂肪和蛋白质及其组分含量。本研究基于全国耕地质量监测平台的结果

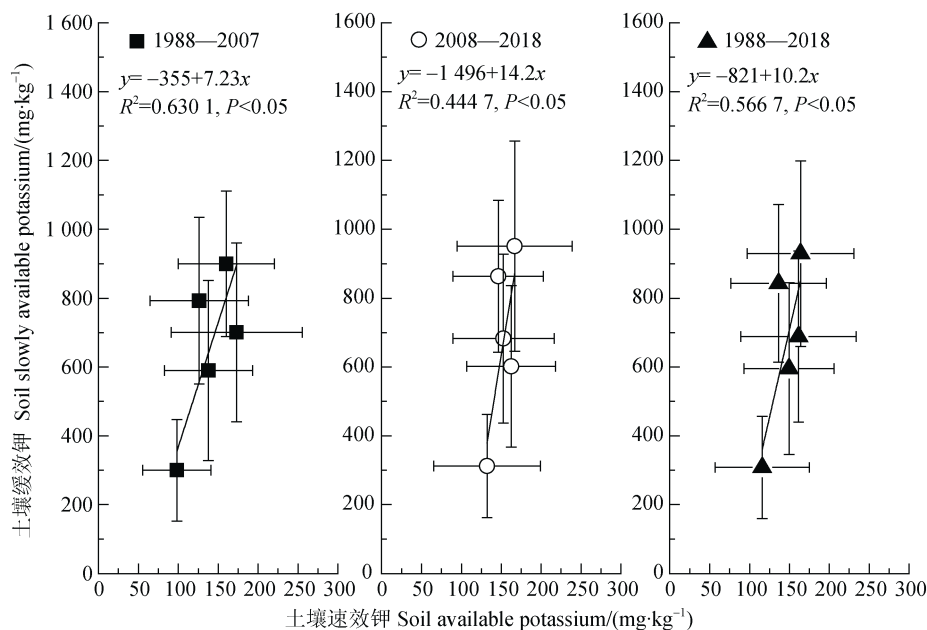


图3 土壤速效钾与缓效钾的相关关系

Fig. 3 The relationship between soil available and slowly available potassium

表4 不同区域内土壤速效钾与缓效钾的拟合方程

Table 4 The fitted equation between soil available and slowly available potassium in different regions

| 试验阶段 Experimental period | 区域 Region | 拟合方程 Fitted equation | R^2 | P |
|-----------------------------|--------------|-------------------------|---------|----------|
| 1988—2007 | NEC | $y=586+0.67x$ | 0.096 7 | 0.391 8 |
| | NC | $y=793+0.39x$ | 0.014 7 | 0.999 4 |
| | EC | $y=416+1.26x$ | 0.160 5 | 0.011 9 |
| | NWC | $y=615+1.76x$ | 0.237 6 | 0.001 0 |
| | SWC | $y=265+0.34x$ | 0.011 2 | 0.523 4 |
| 2008—2018 | NEC | $y=391+1.91x$ | 0.329 4 | <0.001 0 |
| | NC | $y=733+0.89x$ | 0.247 3 | 0.002 2 |
| | EC | $y=284+1.93x$ | 0.307 3 | <0.001 0 |
| | NWC | $y=685+1.79x$ | 0.124 6 | 0.005 5 |
| | SWC | $y=279+0.24x$ | 0.003 4 | 0.244 3 |
| 1988—2018 | NEC | $y=452+1.49x$ | 0.242 0 | <0.001 0 |
| | NC | $y=753+0.62x$ | 0.120 2 | 0.014 7 |
| | EC | $y=368+1.51x$ | 0.216 4 | <0.001 0 |
| | NWC | $y=656+1.67x$ | 0.263 4 | <0.001 0 |
| | SWC | $y=275+0.26x$ | 0.006 2 | 0.157 2 |

显示, 与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年全国主要旱作粮食耕地的总钾年均投入量(包括化肥钾和秸秆钾)呈现微弱增加趋势, 但未达到显著水平

($P>0.05$)(图 1), 这与 Liu 等^[13]基于国家农业统计报告的研究结果相似, 但增幅差异较大, 原因主要与研究平台和试验年限的阶段划分有关。在本研究

中，从 1988—2007 年到 2008—2018 年，虽然快速发展的经济水平导致农民逐渐重视钾肥施用^[21]，再加上国家推行的测土配方施肥、秸秆还田及化肥减施增效等相关农业技术和政策的相互影响，但本研究长期监测平台的钾肥施用量主要由当地农技部门推荐，其钾肥用量一般高于普通农户，尤其是监测前期，从而减少了全国耕地质量监测平台总钾年均用量的大幅增加现象。

由于不同监测点的作物类型、种植模式和施肥习惯等存在明显差异，再加上农户对耕地的管理规模也显著影响其施肥量^[22]，从而导致各个监测点的钾肥用量变异较大。在 1988—2018 年间，不同区域以华北和华东的总钾投入量显著较高（表 2）。这主要与种植制度有关，华北地区主要是小麦玉米为主的一年两熟，华东地区则主要为小麦水稻轮作，且华北和华东均为全国的粮食高产区域，其较高的集约化程度和高产驱动的高量秸秆还田量导致总钾投入量显著高于其他区域。与全国尺度的时间变化不同，2008—2018 年，东北、华北、华东和西南的总钾投入量较 1988—2007 年提高了 4.22%~23.8%，其中华北和华东的增幅较高（18.7%和 23.8%），而西南和东北（4.22%和 8.26%）较低（表 2）。这说明，华北和华东是未来钾肥减施增效的重点地区，前人研究也表明，华北和华东地区秸秆还田带来的钾肥归还量普遍较高^[23]，且钾素盈余量较高^[13]。谭德水等^[4]研究表明，长期进行秸秆还田可有效补充土壤钾素，然而，由于华北和华东地区秸秆还田量较高，如何在高度集约化下提高秸秆腐解效果来培肥土壤尚有待进一步研究。也有研究表明，钾肥配合秸秆还田方案不但促进作物增产，还能提高增产的持续稳定性^[24]。与 1988—2007 年相比，2008—2018 年西北的总钾年均投入变化幅度较小，这可能与西北地区土壤钾素供给能力较高有关^[6, 11]。但是，随着高产作物的大力推广，西北地区的土壤钾素肥力也存在耗竭的风险，因此，建议后续结合钾素盈余指标进一步科学指导该地区的钾肥施用策略。

3.2 全国和不同区域主要旱作粮食耕地土壤速效钾和缓效钾变化

在全国尺度上，由于秸秆还田等措施的大力推广，2008—2018 年的主要旱作粮食耕地土壤速效钾和缓效钾均显著高于 1988—2007 年（图 2）。且土壤速效钾的平均值（139 mg·kg⁻¹）呈较丰富状况（大

于 110 mg·kg⁻¹）^[25]。同时，本研究的主要旱作粮食耕地土壤速效钾含量明显高于 He 等^[12]的研究（全国土壤速效钾含量从 1990 年的 79.8 mg·kg⁻¹ 提高至 2012 年的 93.4 mg·kg⁻¹），原因一方面与试验样本数量和时间尺度有关，土壤钾素肥力较低的华南等地区未在本研究中分析^[2]；另一方面，本研究基于的长期监测平台管理较为规范，且长期进行秸秆还田归还了较多的钾素。黄晓萌等^[26]研究表明，对于长江流域的冬小麦，当土壤速效钾低于 90.0 mg·kg⁻¹ 时，施钾增产效应最显著。前人研究也表明，我国土壤钾素表现平衡已经从 1980 年代的匮乏状态转变为盈余状态^[13]。但是，钾素除了作为营养元素之外，其对作物品质提升和抵抗病虫害等抗逆能力也具有重要作用^[27]，而土壤中较为丰富的速效钾含量可在一定程度上提升作物优质特性和抗逆功能，Chen 等^[14]研究表明，在秸秆不还田和还田条件下，土壤高效钾库可利用的年限分别为 1.9~10.5 年和 7.6~38.8 年。因此，如何调控钾肥施用措施，从而保证在不浪费钾肥资源的基础上，进一步改善作物品质和抗逆性能就成为后续研究的重点和热点。

受成土母质和含钾矿物含量的影响^[6]，不同区域间土壤速效钾以西北和东北较高（大于 150 mg·kg⁻¹），华北和华东地区也较高（130~150 mg·kg⁻¹），而西南最低，但也大于 100 mg·kg⁻¹（表 3）。与全国尺度的结果相似，各区域的土壤速效钾含量也明显高于其他的研究结果^[12]。这主要是由于本研究监测平台中施肥等管理水平较为规范，再加上长期秸秆还田带来的土壤肥力提升，导致土壤速效钾含量较高，水稻土的监测数据^[18]显示，华东地区的水稻土速效钾平均为 82.5 mg·kg⁻¹，这主要与本研究的华东区域包括了安徽和江苏北部的潮土和砂姜黑土等钾素肥力较高的旱作土壤有关。土壤缓效钾的区域差异也呈现出与速效钾相似的趋势，这与前人在区域尺度上的研究结果^[6, 12, 14]一致。因此，在后续的钾肥资源分配中，建议重点向西南等地区供给和调配。同时，随着秸秆还田的大力推广，除东北外，2008—2018 年各区域的土壤速效钾较 1988—2017 年提高了 4.16%~34.5%（图 2）。这与 He 等^[12]的研究结果相似。王乐等^[16]的研究也表明，1988—2016 年间华北潮土区的土壤速效钾含量显著升高。但是，武红亮等^[17]研究则认为，东北黑土的土壤速效钾也呈现出显著的增加趋势，原因可能与样本数的选择原则和

试验阶段划分有关, He 等^[12]研究也表明, 东北的土壤速效钾无显著增加趋势。此外, 虽然逐渐增加的土壤速效钾含量在一定程度上保障了土壤钾素供给能力, 但如果土壤速效钾不能及时被作物根系吸收利用, 就会向缓效钾转化或向下淋失^[28], 因此, 如何提升土壤钾素的生物有效性有待深入探讨。

3.3 主要旱作粮食耕地土壤速效钾与缓效钾的量化关系

在全国的主要旱作粮食耕地土壤上, 当土壤速效钾含量较高时, 土壤缓效钾也呈现出显著的增加趋势。结合线性方程发现, 随着土壤速效钾的增加, 1988—2018 年全国主要旱作粮食耕地土壤缓效钾的增加量为 $10.2 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 且随着监测年限的增加, 增加量逐渐提升 (图 3)。原因主要与 1988—2018 年间土壤肥力质量提升有关^[29], 一方面, 较高的土壤速效钾在满足作物生长需求之外, 剩余的土壤速效钾不断向缓效钾转化^[11], 从而实现藏钾于地的目标; 另一方面, 全国不断提升的土壤有机质和逐渐降低的 pH 也可能通过影响土壤钾素吸附解析、解钾菌群落组成等进一步促进矿物钾向缓效钾的转化过程^[6, 29-31]。这说明, 在未来的土壤钾素肥力评估中, 可根据土壤速效钾的含量较为准确地估算土壤缓效钾含量, 这也进一步节省了缓效钾测定时间和成本。Chen 等^[14]研究也表明, 单独基于土壤速效钾含量不能有效评估土壤钾素的生物有效性。因此, 在后续的研究和应用中, 可在土壤速效钾的基础上, 结合土壤缓效钾这一潜在的植物可利用性钾^[32], 以期精准划分土壤的供钾能力等级。

由于不同区域的土壤类型和理化性质差异较大, 1988—2018 年不同区域内土壤速效钾与缓效钾的量化关系差异较大 (随着土壤速效钾的提高, 东北、华北、华东和西北的缓效钾增加量分别为 1.91、0.89、1.93 和 $1.79 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$); 且不同地区在不同时间阶段内增加量也存在明显不同, 2008—2018 年华东地区土壤缓效钾的增加量明显高于 1988—2007 年; 而西北地区则基本维持不变 (表 4), 这可能与土壤钾库容量对不同气候条件的响应有关, Guo 等^[33]研究已经证明, 由于降水等因素的影响, 南方湿润区和北方半湿润、半干旱地区的土壤类型对施肥的响应存在显著差异。在华东地区, 较高的钾素盈余量和不断提高的土壤有机质含量^[13, 29]可能是速效钾向缓效钾转化较多的主要原因, 但具体机制仍有待

进一步解析。然而, 由于土壤中钾素的周转过程较为复杂, 除了速效钾与缓效钾相互转化之外, 谢建昌和杜承林^[32]研究表明, 缓效钾作为土壤重要的钾库资源, 当速效钾不能满足作物钾素需求时, 缓效钾也会再次向速效钾转化。再加上含钾矿物的钾素释放和固定过程^[11], 本研究获得的土壤速效钾与缓效钾的量化关系尚有进一步验证。

4 结论

在全国耕地质量监测平台上, 1988—2018 年全国主要旱作粮食耕地的总钾年均投入量 (包括化肥和秸秆) 为 $273 \text{ kg}\cdot\text{hm}^{-2}\cdot\text{a}^{-1}$, 其中华北和华东显著高于其他区域。除了西北略有降低之外, 其他区域的总钾年均投入均表现出 2008—2018 年高于 1988—2007 年。与 1988—2007 年相比, 2008—2018 年全国主要旱作粮食耕地的土壤速效钾和缓效钾分别提高了 15.1% 和 6.72%, 其中土壤速效钾以西北和东北显著高于其他区域。土壤速效钾与缓效钾存在显著的正相关关系, 且可用线性方程进行拟合, 但不同试验阶段和区域间的拟合方程差异较大。因此, 在根据土壤速效钾估算缓效钾时, 建议考虑钾肥施用时间和不同区域的差异。

参考文献 (References)

- [1] Liang Y L, Han M C, Bai L, et al. Spatial-temporal distribution and variation characteristics of the agricultural climate resources over recent 30 years in China[J]. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2015, 33 (4): 259—267. [梁玉莲, 韩明臣, 白龙, 等. 中国近 30 年农业气候资源时空变化特征[J]. *干旱地区农业研究*, 2015, 33 (4): 259—267.]
- [2] Xu M G, Zhang W J, Huang S M. Evolution of soil fertility in China[M]. 2nd ed. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2015. [徐明岗, 张文菊, 黄绍敏. 中国土壤肥力演变[M]. 2 版. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2015.]
- [3] Gu H H, Li J, Zhang Y Y, et al. Meta-analysis of the relationship between potassium fertilizer and the quality of main crops in China[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (10): 1749—1757. [谷贺贺, 李静, 张洋洋, 等. 钾肥与我国主要作物品质关系的整合分析[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (10): 1749—1757.]
- [4] 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.]
- [5] Zhang L, Zhang W L, Lu J W, et al. Study of optimum potassium reducing rate of rice, wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50 (19): 3745—3756. [张磊, 张维乐, 鲁剑巍, 等. 秸秆还田条件下不同供钾能力土壤水稻、油菜、小麦钾肥减量研究[J]. *中国农业科学*, 2017, 50 (19): 3745—3756.]
- [6] Zhang H M, Xu M G, et al. Evolution of potassium in soils of China under long-term fertilization[M]. Beijing: China Agriculture Press, 2008. [张会民, 徐明岗, 等. 长期施肥土壤钾素演变[M]. 北京: 中国农业出版社, 2008.]
- [7] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term K fertilizer application and returning wheat straw to soil on crop yield and soil K under different planting systems in northwestern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2008, 14 (5): 886—893. [谭德水, 金继运, 黄绍文. 长期施钾与秸秆还田对西北区不同种植制度下作物产量及土壤钾素的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2008, 14 (5): 886—893.]
- [8] Tan D S, Jin J Y, Huang S W, et al. Effect of long-term K application on corn yield and potassium forms in plough layer of black soil and meadow soil in northeast of China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2007, 13 (5): 850—855. [谭德水, 金继运, 黄绍文, 等. 东北地区黑土、草甸土长期施钾对玉米产量及耕层土钾素形态的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2007, 13 (5): 850—855.]
- [9] Zhan L P, Li X K, Lu J W, et al. Potassium supply capacity of and potassium dynamics in different types of soils under paddy rice-ryegrass rotation[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2013, 50 (3): 591—599. [占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 水旱轮作条件下不同类型土壤供钾能力及钾素动态变化研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50 (3): 591—599.]
- [10] Zhang H M, Xu M G, Wang B R, et al. Effects of long-term potassium application on Q/I relationship of potassium in soil under wheat-corn cropping system[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Science*, 2009, 15 (4): 843—849. [张会民, 徐明岗, 王伯仁, 等. 小麦-玉米种植制度下长期施钾对土壤钾素 Q/I 关系的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2009, 15 (4): 843—849.]
- [11] Zhang H M, Xu M G, Lü J L, et al. Effects of long-term potassium fertilization on potassium fixation in soils under different ecological conditions: A mechanism study[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2007, 18 (5): 1009—1014. [张会民, 徐明岗, 吕家珑, 等. 不同生态条件下长期施钾对土壤钾素固定影响的机理[J]. *应用生态学报*, 2007, 18 (5): 1009—1014.]
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Chen X, Li T, Lu D, et al. Estimation of soil available potassium in Chinese agricultural fields using a modified sodium tetraphenyl boron method[J]. *Land Degradation Development*, 2020; 31: 1737—1748.
- [15] Han T F, Liu K L, Huang J, et al. Spatio-temporal evolution of soil pH and its driving factors in the main Chinese farmland during past 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2020, 26 (12): 2137—2149. [韩天富, 柳开楼, 黄晶, 等. 近 30 年中国主要农田土壤 pH 时空演变及其驱动因素[J]. *植物营养与肥料学报*, 2020, 26 (12): 2137—2149.]
- [16] Wang L, Zhang S X, Ma C B, et al. Characteristics of soil fertility and crop yield evolution in fluvo-aquic soil area in the past 29 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (6): 1435—1444. [王乐, 张淑香, 马常宝, 等. 潮土区 29 年来土壤肥力和作物产量演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1435—1444.]
- [17] Wu H L, Wang S C, Huai S C, et al. Evolutionary characteristics of fertility and productivity of typical black soil in recent 30 years[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2018, 24 (6): 1456—1464. [武红亮, 王士超, 槐圣昌, 等. 近 30 年来典型黑土肥力和生产力演变特征[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24 (6): 1456—1464.]
- [18] Liu K L, Han T F, Huang J, et al. 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. [柳开楼, 韩天富, 黄晶, 等. 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.]
- [19] Shi R H, Bao S D, Qin H Y, et al. Analysis for soil and agrochemistry[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 99—110. [史瑞和, 鲍士旦, 秦怀英, 等. *土壤农化分析*[M]. 3 版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 99—110.]
- [20] He P, Jin J Y, Li W J, et al. Comparison of potassium absorption, yield and quality between high-oil and common corn affected by potassium application[J]. *Plant*

- Nutrition and Fertilizer Science, 2005, 11(5): 620—626. [何萍, 金继运, 李文娟, 等. 施钾对高油玉米和普通玉米吸钾特性及子粒产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2005, 11(5): 620—626.]
- [21] Huang Q N, Dang H Y, Huang T M, et al. Evaluation of farmers' fertilizer application and fertilizer reduction potentials in major wheat production regions of China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2020, 53(23): 4816—4834. [黄倩楠, 党海燕, 黄婷苗, 等. 我国主要麦区农户施肥评价及减肥潜力分析[J]. 中国农业科学, 2020, 53(23): 4816—4834.]
- [22] Wu Y Y, Xi X C, Tang X, et al. Policy distortions, farm size, and the overuse of agricultural chemicals in China[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2018, 115(27): 7010—7015.
- [23] 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.]
- [24] Xing S L, Liu M C, He P. Evaluating stability of durative yield-increasing effect of potassium (K) fertilization and straw recycling on crop yields by yield increase stability coefficient (YISC) [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(5): 47—51. [邢素丽, 刘孟朝, 何萍. 用增稳系数评价钾肥配合秸秆还田对作物的增产稳定性效应[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(5): 47—51.]
- [25] Cao Z H, Zhou J M. Soil quality of China[M]. Beijing: Science Press, 2008. [曹志洪, 周健民. 中国土壤质量[M]. 北京: 科学出版社, 2008.]
- [26] Huang X M, Xu X P, He P, et al. Yield response to NPK fertilization and the main impacts in production of winter wheat in Yangtze River catchments of China[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2020, 26(6): 1059—1068. [黄晓萌, 徐新朋, 何萍, 等. 长江流域冬小麦氮磷钾肥增产效应及其影响因素[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(6): 1059—1068.]
- [27] Wang Y, Wu W H. Regulation of potassium transport and signaling in plants[J]. Current Opinion in Plant Biology, 2017, 39: 123—128.
- [28] Zhou L H, Huang J, Wang B R, et al. Response of acidifying red soil to liming in potassium leaching in South China[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(2): 457—467. [周玲红, 黄晶, 王伯仁, 等. 南方酸化红壤钾素淋溶对施石灰的响应[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 457—467.]
- [29] 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.
- [30] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008—1010.
- [31] Liu K L, Huang J, Han T F, et al. Variation of potassium-solubilizing bacteria in red soil under long-term fertilization and its driving factors[J]. Acta Pedologica Sinica, 2020, 57(1): 183—194. [柳开楼, 黄晶, 韩天富, 等. 长期施肥下红壤旱地解钾菌变化及其驱动因子[J]. 土壤学报, 2020, 57(1): 183—194.]
- [32] Xie J C, Du C L. Studies on availability of potassium in soils and its evaluating methods[J]. Acta Pedologica Sinica, 1988, 25(3): 269—280. [谢建昌, 杜承林. 土壤钾素的有效性及其评定方法的研究[J]. 土壤学报, 1988, 25(3): 269—280.]
- [33] Guo Z C, Zhang J B, Fan J, et al. Does animal manure application improve soil aggregation? Insights from nine long-term fertilization experiments[J]. Science of the Total Environment, 2019, 660: 1029—1037.

(责任编辑: 陈荣府)