



农业资源与环境学报

CSCD 核心期刊
中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

成都平原农地利用方式转变下表层土壤速效钾变化特征

宋靛颖, 冉敏, 李呈吉, 李文丹, 董琴, 李一丁, 李启权

引用本文:

宋靛颖, 冉敏, 李呈吉, 李文丹, 董琴, 李一丁, 李启权. 成都平原农地利用方式转变下表层土壤速效钾变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1435–1442.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2022.0834>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

余江县水稻土剖面酸缓冲性能与酸化速率

唐贤, 蔡泽江, 徐明岗, 文石林, 高强, 姚晨, 陈玲英

农业资源与环境学报. 2019, 36(6): 774–782 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0220>

潮土区菜田土壤肥力现状评价

王倩姿, 王书聪, 张书贵, 张静芝, 孙志梅, 马文奇, 薛澄

农业资源与环境学报. 2020, 37(5): 645–653 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0233>

典型岩溶流域不同土地利用类型土壤腐植酸与钙的关系

吴丽芳, 倪大伟, 王妍, 刘云根, 王艳霞

农业资源与环境学报. 2021, 38(2): 259–267 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2020.0217>

广东省增城区不同耕地利用类型下赤红壤酸度变化

蔡泽江, 余强毅, 吴文斌, 文石林

农业资源与环境学报. 2021, 38(6): 980–988 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0508>

新疆奴拉赛铜矿周边土壤理化特征和重金属污染生态风险评价

迪娜·吐尔生江, 李典鹏, 胡毅, 杨磊, 徐晓龙, 贾宏涛

农业资源与环境学报. 2018, 35(1): 17–23 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0159>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

宋靛颖, 冉敏, 李呈吉, 等. 成都平原农地利用方式转变下表层土壤速效钾变化特征[J]. 农业资源与环境学报, 2023, 40(6): 1435–1442.

SONG L Y, RAN M, LI C J, et al. Variation characteristics of soil available potassium in topsoil under changes in agricultural land use in the Chengdu Plain [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2023, 40(6): 1435–1442.

成都平原农地利用方式转变下表层土壤速效钾变化特征

宋靛颖, 冉敏, 李呈吉, 李文丹, 董琴, 李一丁, 李启权*

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要:为了掌握区域土壤速效钾含量变化特征及其影响因素,本研究在成都平原选择184个20世纪80年代第二次土壤普查时采集的样点数据和176个2016—2017年获得的样点数据,采用一般统计和单因素方差分析法(ANOVA)探究了近40年成都平原农地表层(0~20 cm)土壤速效钾含量变化特征及其与农地利用方式转变和母质类型的关系。结果表明:研究区农地表层土壤速效钾含量从44.44 mg·kg⁻¹增加至57.24 mg·kg⁻¹,增幅为28.80% ($P<0.05$)。与20世纪80年代传统稻-麦/油轮作相比,2016—2017年稻-蔬轮作和稻-麦/油轮作表层土壤速效钾含量分别增加了103.83% ($P<0.05$)和17.64%,而园林地表层土壤速效钾含量则减少了11.95%。不同母质类型上,灰棕冲积物发育的土壤表层速效钾含量增幅最高,为82.08% ($P<0.05$),其次是更新统老冲积物(25.48%)和灰色冲积物(9.82%)。与传统稻-麦/油轮作相比,稻-蔬轮作下灰棕冲积物发育的土壤速效钾含量增幅(135.97%, $P<0.05$)远高于更新统老冲积物(116.03%, $P<0.05$)和灰色冲积物(79.31%, $P<0.05$),而园林地灰棕冲积物和更新统老冲积物发育土壤的速效钾含量增加,灰色冲积物发育土壤的速效钾含量降低。研究表明,农地利用方式的转变改变了研究区表层土壤速效钾累积特征,但其对累积规律的影响依赖于成土母质类型。

关键词:速效钾;农地利用方式转变;土壤母质;成都平原

中图分类号:S153.6

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2023)06-1435-08

doi: 10.13254/j.jare.2022.0834

Variation characteristics of soil available potassium in topsoil under changes in agricultural land use in the Chengdu Plain

SONG Liangying, RAN Min, LI Chengji, LI Wendan, DONG Qin, LI Yiding, LI Qiquan*

(College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China)

Abstract: To grasp the characteristics of changes in regional soil available potassium (AK) content and its influencing factors, 184 points sampled during the second national soil survey in the 1980s and 176 points sampled during 2016—2017 were selected in the Chengdu Plain. The characteristics of soil available K content changes in the surface layer (0–20 cm) of agricultural land in the Chengdu Plain and its relationship with the transformation of agricultural land use mode and parent material type in the past 40 years were explored by general statistics and one-way analysis of variance (ANOVA). The results showed that the available K content in the surface soil of agricultural land increased from 44.44 mg·kg⁻¹ to 57.24 mg·kg⁻¹ in the study area, and the increase was significant (28.80%, $P<0.05$). Compared with the traditional rice–wheat/oil rotation in the 1980s, the available K content of the topsoil of rice–vegetable and rice–wheat/oil rotations increased by 103.83% ($P<0.05$) and 17.64%, respectively, while the available K in the surface soil of garden land decreased by 11.95%. In different parent material types, the available K content in the soil surface layer developed by gray–brown alluvium was the highest, at 82.08% ($P<0.05$), followed by Pleistocene old alluvium (25.48%) and gray alluvium (9.82%). Compared with the traditional rice–wheat/oil rotation, the increase in soil available K accumulation in gray–brown alluvial development under rice–vegetable rotation (135.96%, $P<0.05$) was much higher than that of Pleistocene old alluvium (116.04%, $P<0.05$) and gray alluvium (79.30%, $P<0.05$). Additionally, garden land only increased the available K accumulation in gray–brown alluvium and Pleistocene old alluvial soil, and reduced available K

收稿日期:2022-11-22 录用日期:2023-01-16

作者简介:宋靛颖(2000—),女,四川南部人,硕士研究生,主要从事土壤质量演变研究。E-mail:songorintell@163.com

*通信作者:李启权 E-mail:liqq@lreis.ac.cn

基金项目:四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0104)

Project supported: The Natural Science Foundation in Sichuan Province of China(2022NSFSC0104)

<http://www.aed.org.cn>

accumulation in gray alluvial soil. This shows that changes in farmland use mode change the characteristics of available K accumulation in the surface soil in the study area, but their influence on the accumulation depends on the type of parent material.

Keywords: available potassium; agricultural land-use change; parent material type; Chengdu Plain

土壤钾素是植物生长必需的三大营养元素之一,在作物生长、产量、质量和抗逆等生理过程中发挥着不可替代的作用^[1-3]。植物可以直接从土壤中吸收利用的钾素形态为速效钾^[4],因此其含量通常被视为判断土壤肥力高低和植物生长状况的有效指标之一^[5-6]。土壤速效钾主要来源于矿物分解和人为施肥,作物吸收和淋溶下渗作用是土壤速效钾减少的重要途径^[7-8]。近几十年来,人口快速增长伴随着农业资源需求量上升^[9],农地利用强度不断加大,致使钾素供应亏缺^[10]。研究表明,土壤钾素的消耗是导致现代集约化农业中作物产量停滞和养分效率低的主要原因之一^[11]。因此,掌握区域速效钾含量变化特征及其影响因素对于指导农业生产、提升耕地土壤质量具有重要意义^[6]。

长期以来,许多学者通过实验或统计分析研究了气候、地形、成土母质、土壤理化性质等自然特征及钾肥施用、秸秆还田等人为活动与土壤钾素循环转化的关系^[12-15]。其中,农地利用类型被认为对土壤养分,尤其是表层(0~20 cm)土壤养分变化的影响较大^[16-18]。不同农地利用方式下,灌溉、施肥等管理措施及种植制度均存在差异,影响土壤结构及理化性质^[19-20]。近年来,从传统农田到果园或蔬菜农田的土地利用转换在我国广泛进行^[21],如由稻-麦/油轮作地转变为稻-蔬轮作地或蔬菜地以提高城镇蔬菜供给^[22]。农地利用方式改变时,复杂的种植制度通过耕地利用强度及作物生长等影响土壤速效钾含量在时空上的变化^[8]。此外,母岩中的含钾矿物是钾素的主要贮源^[23],其矿物分解是土壤钾素的基本来源,不同成土母质类型中的矿物成分差异较大,进而影响土壤中速效钾的初始含量^[8]。同时,不同的成土母质发育形成的土壤质地存在差异,对土壤速效钾的吸附能力也有所不同^[24]。揭示不同母质类型上农地利用方式转换对土壤速效钾含量变化的影响将有助于集约利用条件下农业精准施肥和作物生产管理。

成都平原土壤肥沃、水系发达,是我国西南最大的粮油生产基地,其土壤质量一直是各界关注的热点^[25]。近年来快速的人口增长与经济发展导致该区域农地利用集约化程度不断增强,农地利用方式发生

转变,土壤理化性质剧烈变化^[26-27]。目前针对农地利用方式转变背景下该区域土壤性质变化的研究主要集中于土壤有机碳、土壤氮素和酸碱度等^[22,28-30]。有研究分析了该区域土壤剖面速效钾分布特征及其主控因素^[31],但没有涉及不同母质形成的土壤其速效钾含量在时间上的变化规律。因此,目前该区域农地表层土壤速效钾含量变化特征及其与农地利用方式转变的关系尚不明确。本研究基于20世纪80年代的第二次土壤普查数据和2016—2017年采集的土壤样点数据,对比2016—2017年3种典型用地方式(稻-麦/油轮作、稻-蔬轮作和园林地)与20世纪80年代的传统稻-麦/油轮作条件下土壤速效钾含量的差异及其在不同母质类型上的变化,旨在探明近40年成都平原农地表层土壤速效钾含量的变化特征,揭示农地利用方式转变条件下该区域表层土壤速效钾含量的总体状况和变化规律,为高强度农业利用背景下进行合理的种植管理及提升土壤质量提供理论参考和科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

成都平原位于四川盆地西部(30°23'~31°50' N, 103°27'~104°14' E),面积约为3 173 km²,包括温江、郫县、新津、都江堰、大邑、邛崃、彭州和崇州等区县(图1)。该区域地势平坦,海拔高度447~732 m,呈由西北向东南倾斜的态势。该地区属亚热带湿润季风气候,年平均气温约16℃,年平均降水量约1 000 mm。第四纪更新世的古冲积物(Q3更新统老冲积物)、第四纪全新世的灰色冲积物和灰棕色冲积物(Q4灰色冲积物、Q4灰棕色冲积物)是该研究区的主要成土母质。其中Q4灰色和灰棕色冲积物发育形成的土壤通透性较好,黏粒含量和容重相对较低^[32],而Q3老冲积物发育形成的土壤风化程度较深,黏粒含量高,质地黏重。研究区主要土壤类型为水稻土,占土地面积的95%以上^[28]。近20年来,快速的城市化导致农地利用方式和相关管理实践发生了巨大变化,研究区内大量传统稻-麦/油轮作地转变为稻-蔬轮作地和园林地(种植园林植物的耕地)以满足经济及观赏

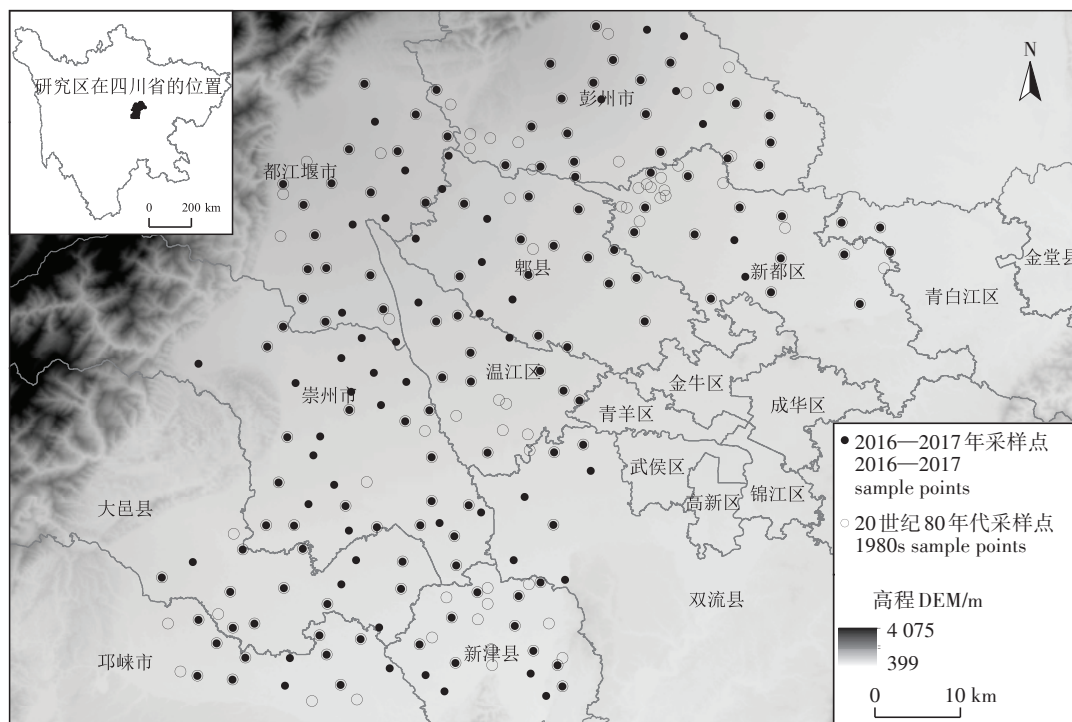


图1 研究区位置及样点分布

Figure 1 Location of the study area and distribution of sample points

需求。2016年,成都平原中部园林面积达到108.90 km²,用于种植桂花、银杏等观赏树木^[29]。此外,据《四川统计年鉴》的农业统计数据显示,2017年成都市稻-蔬轮作土地面积增加到1 596.66 km²,用于种植大蒜和叶菜(白菜、卷心菜、茼蒿等)^[29]。农地利用方式的转变可能对土壤性质及养分含量的变化产生重大影响。

1.2 样品采集与处理

20世纪80年代的土壤速效钾含量数据来源于第二次土壤普查时获得的典型土壤剖面资料,共187个表层土壤(0~20 cm)采样点。2016—2017年在上述样点分布位置或附近结合3种成土母质及3种典型农地利用方式,在样点具有均匀性和代表性原则上,以3 km为间隔布点,采用混合取样的方法采集表层土壤(0~20 cm)样品180个。样品采集过程中,使用手持GPS定位读取采样点坐标,并调查各样点成土母质、土地利用方式、土壤类型和种植制度等地表环境信息。20世纪80年代、2016—2017两个时期土壤样品均经风干研磨、过1 mm筛后,采用NH₄OAc浸提-火焰光度法^[33]测定土壤速效钾含量。测定过程中进行3次重复,并用国家标准物质进行数据质量控制。

1.3 数据处理

为保证分析结果的可靠性,用“平均值±3倍标准

差法”剔除异常值,两个时期最终样点数分别为184个和176个(2016—2017年稻-麦/油轮作、稻-蔬轮作和园林地土壤样点数各为82、41个和53个)。在Excel 2019软件中进行常规统计分析,运用IBM Statistics SPSS 25软件进行正态检验和单因素方差分析(ANOVA),以揭示不同时期表层土壤速效钾含量的统计特征,以及不同时期不同农地利用方式和不同母质类型间表层土壤速效钾含量在0.05水平上的差异显著性。使用Origin 2021软件绘图。

2 结果与分析

2.1 农地表层土壤速效钾含量总体变化特征

统计结果显示,近40年来研究区农地表层土壤速效钾含量发生显著变化(表1)。20世纪80年代及2016—2017年研究区表层土壤速效钾含量均呈偏态分布,经对数变换后符合正态分布。20世纪80年代农地表层土壤速效钾含量的平均值为44.44 mg·kg⁻¹,2016—2017年农地表层土壤速效钾含量的平均值为57.24 mg·kg⁻¹,增幅为28.80%($P<0.05$)。根据全国第二次土壤普查土壤养分分级标准可知,20世纪80年代以及2016—2017年研究区表层土壤平均速效钾含量均属于较缺乏水平。从变异系数来看,20世纪80年代至2016—2017年研究区表层土壤速效钾变异系

表1 两个时期研究区表层土壤速效钾含量数据统计特征

Table 1 Statistical characteristics of available K contents in topsoil in the studied area in two periods

时期 Period	样本数 Number	范围 Range/(mg·kg ⁻¹)	均值±标准差 Mean±SD/(mg·kg ⁻¹)	偏度 Skewness	峰度 Kurtosis	变异系数 CV/%	数据分布类型 Data distribution type
20世纪80年代	184	8.00~120.00	44.44±20.36b	1.11	1.74	45.82	对数正态
2016—2017	176	3.70~268.40	57.24±45.36a	1.95	5.37	79.24	对数正态

注:不同小写字母代表不同年份土壤速效钾含量差异显著($P<0.05$)。

Note: Different lowercase letters indicate significant differences of soil available K content between different periods ($P<0.05$).

数从45.82%上升至79.24%,提高了33.42个百分点,均属中等变异。综上,20世纪80年代至2016—2017年研究区表层土壤速效钾含量显著上升,且空间异质性变大。

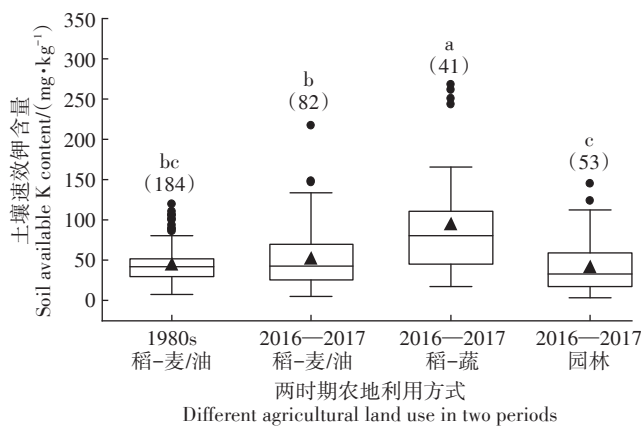
2.2 不同农地利用方式下表层土壤速效钾含量变化特征

方差分析结果(图2)表明,近40年不同农地利用方式下表层土壤速效钾含量具有显著差异。与20世纪80年代传统稻-麦/油轮作地相比,2016—2017年稻-蔬轮作地表层土壤速效钾含量增加至90.58 mg·kg⁻¹,增幅为103.83%($P<0.05$);稻-麦/油轮作地表层土壤速效钾含量增加至52.28 mg·kg⁻¹,增幅为17.64%,但差异不显著($P>0.05$);而园林地表层土壤速效钾则减少至39.13 mg·kg⁻¹,降幅为11.95%($P>0.05$)。2016—2017年稻-蔬轮作地表层土壤速效钾

含量显著高于其他两种用地方式,分别是园林用地和稻-麦/油轮作地的2.3倍和1.7倍($P<0.05$);稻-麦/油轮作地表层土壤速效钾含量显著高于园林用地,是园林用地的1.3倍($P<0.05$)。综上,农地利用方式转变对表层土壤速效钾累积量产生了显著影响,相较于传统稻-麦/油轮作地,转变为稻-蔬轮作地显著增加了表层土壤速效钾累积量,园林用地则在一定程度上导致研究区表层土壤速效钾含量下降。

2.3 不同母质类型下表层土壤速效钾含量变化特征

母质类型对研究区表层土壤速效钾含量变化有显著影响($P<0.05$),不同母质发育的土壤速效钾含量增幅差异较大。其中,灰棕冲积物发育的土壤速效钾含量显著上升(图3),与20世纪80年代相比,2016—2017年速效钾含量由44.71 mg·kg⁻¹大幅上升至81.41 mg·kg⁻¹,增幅为82.08%($P<0.05$);其次是更新统老冲积物发育的土壤,速效钾含量由51.53 mg·kg⁻¹上升至64.66 mg·kg⁻¹,增幅为25.48%,但差异不显著($P>0.05$);增幅最小的是灰色冲积物发育的土壤,速效钾含量由41.66 mg·kg⁻¹增加至45.75 mg·kg⁻¹,增幅为9.82%($P>0.05$)。综上,表层土壤速效钾累积受到

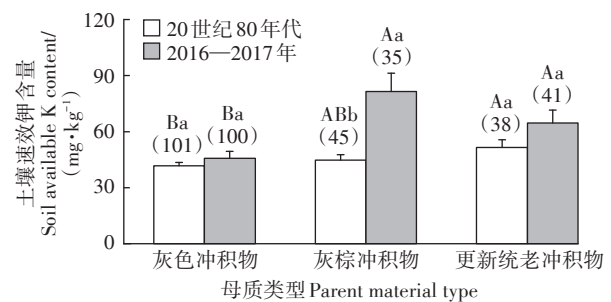


实心圆圈●为离群值,中间实线代表中位数,▲代表平均值;上下两条线分别代表75%和25%的置信区间;上下两个短线分别代表97.5%和2.5%的置信区间。小写字母代表不同农地利用方式下土壤速效钾含量差异显著($P<0.05$)。括号内数字表示样本数。下同。

The solid circle ● is an outlier, the middle solid line represents the median, and ▲ represents the average; The upper and lower lines represent the confidence intervals of 75% and 25%, respectively; The upper and lower short lines represent the confidence intervals of 97.5% and 2.5%, respectively. Lowercase letters indicate significant differences of soil available K content among different agricultural land use modes ($P<0.05$). The numbers in parentheses indicate the number of samples. The same below.

图2 两个时期不同农地利用方式表层土壤速效钾含量

Figure 2 Available K contents of topsoil in different agricultural land uses in two periods



图中不同大写字母代表同一年份不同母质间土壤速效钾含量差异显著($P<0.05$);不同小写字母代表同一母质不同年份间土壤速效钾含量差异显著($P<0.05$)。下同。

Different capital letters indicate significant differences of soil available K content among different parent materials in the same period ($P<0.05$). Different lowercase letters indicate significant differences of soil available K content between different periods for the same parent material type ($P<0.05$). The same below.

图3 两个时期不同母质类型表层土壤速效钾含量

Figure 3 Available K contents of topsoil in different parent material types in two periods

了成土母质类型的影响。

2.4 不同母质类型各农地利用方式表层土壤速效钾含量变化特征

各农地利用方式下,不同成土母质发育的土壤表层速效钾含量变化幅度存在差异(图4)。3种用地方式中,表层土壤速效钾含量最高增幅均发生于灰棕冲积物发育的土壤上。灰棕冲积物发育的土壤上,20世纪80年代传统稻-麦/油轮作地表层土壤速效钾含量为 $44.71 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,2016—2017年稻-蔬轮作地、稻-麦/油轮作地和园林地表层土壤速效钾含量分别增加至 105.50 、 68.04 、 $53.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,相应增幅为 135.97% ($P<0.05$)、 52.18% ($P<0.05$)和 20.49% ($P>0.05$)。更新统老冲积物发育的土壤上,2016—2017年稻-蔬轮作地、稻-麦/油轮作地和园林地表层土壤速效钾含量由20世纪80年代的 $51.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加至 111.32 、 $57.43 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $54.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,分别增加了 116.03% ($P<0.05$)、 11.45% ($P>0.05$)和 4.89% ($P>0.05$)。灰色冲积物发育的土壤上,2016—2017年稻-蔬轮作地表层土壤速效钾含量由20世纪80年代的 $41.66 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 上升至 $74.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,增幅为 79.31% ($P<0.05$),而2016—2017年园林地表层土壤速效钾含量则下降至 $34.78 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,降幅为 16.51% ($P>0.05$)。与20世纪80年代稻-麦/油轮作相比,2016—2017年稻-蔬轮作下灰棕冲积物、更新统老冲积物和灰色冲积物发育土壤的速效钾含量分别增加了 1.36 、 1.16 倍和 79.31% ($P<0.05$);而园林地灰色冲积物发育土壤的速效钾含量降低(降幅为 16.51% , $P>0.05$),灰棕冲积物和更新统

老冲积物发育土壤的速效钾含量略有上升(增幅分别为 20.49% 和 4.89% , $P>0.05$)。综上,农地利用方式转换对表层土壤速效钾含量变化的影响受控于土壤成土母质。

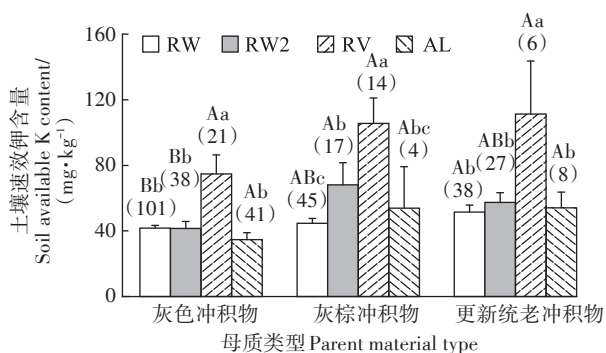
3 讨论

3.1 研究区表层土壤速效钾含量变化的影响因素

近40年来成都平原地区农地表层土壤速效钾含量显著增加,增幅为 28.80% ($P<0.05$)。已有研究表明,1980年以来全国尺度农地土壤速效钾含量明显提升^[34-35],本研究区表层土壤速效钾含量变化与全国趋势一致。研究区表层土壤速效钾含量显著增加主要与施肥量、秸秆还田和气温等因素有关。首先,高频率、过量的钾肥投入是研究区农地表层土壤速效钾含量变化的主要原因^[36],钾肥施用不仅能直接补充土壤速效钾,还能促进缓效钾向速效钾的转化^[37]。成都平原地区快速的人口增长和城镇化建设导致农业产量和作物质量需求不断增大,使得农业生产活动中钾肥的投入量大幅提高。根据《四川统计年鉴》(1989—2017)的统计数据,1989—2017年成都市耕地钾肥总投入量由 0.140 万t增加至 1.970 万t,长期较高的钾施用量致使土壤速效钾逐渐积累。其次,农作物秸秆中含有大量的水溶性钾,其施入土壤分解后会显著提高土壤速效钾的含量^[38]。同时,农作物秸秆在分解过程中可以吸收大量的水溶液,通过物理或化学吸附作用直接保存钾离子^[39]。因此,秸秆常被作为钾肥的重要替代资源,用以保持土壤肥力的稳定性^[40-41]。根据《四川省秸秆综合利用规划(2016—2020年)》统计,近20年通过大力推进秸秆综合利用,四川省农地秸秆还田量逐年上升,2017年成都平原秸秆还田量达 479.09 万t,在一定程度上提高了钾素累积量。此外,有研究表明,在 $0\sim 40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 范围内,年均气温和土壤温度的升高可促进土壤缓效钾的释放,提高土壤的供钾能力^[4,42-44]。20世纪80年代至2017年,成都地区年均气温呈上升趋势^[45],温度的升高除了能使土壤钾素含量上升外,还能使土壤水分黏滞度降低,粒子动能增加,钾的扩散系数增大。在上述因素的共同驱动下,成都平原地区农地表层土壤速效钾含量在近40年内显著增加。

3.2 农地利用方式转变对表层土壤速效钾累积的影响

农地利用方式转变改变了研究区表层土壤速效钾的累积规律。传统稻-麦/油轮作地转变为稻-蔬轮作地使得研究区表层土壤速效钾含量显著升高,园林



RW, RW2, RV 及 AL 分别代表 20 世纪 80 年代稻-麦/油轮作地、2016—2017 年稻-麦/油轮作地、2016—2017 年稻-蔬轮作地及 2016—2017 年园林地。
RW, RW2, RV and AL represent 1980s rice-wheat/oil rotation land, 2016—2017 rice-wheat/oil rotation land, 2016—2017 rice-vegetable rotation land and 2016—2017 garden land, respectively.

图 4 不同母质和农地利用方式表层土壤速效钾含量

Figure 4 Available K contents of topsoil in different parent materials and agricultural land uses

用地则在一定程度上导致了土壤速效钾的消耗,这与此前多数研究结果一致^[31,34]。造成这一结果的主要原因是蔬菜收益高且一年多熟,而钾是品质元素,在经济效益的驱动下,农户对稻-蔬轮作地的利用强度和钾肥投入量远高于其他用地类型^[46]。有研究表明,成都平原稻-蔬轮作地种植蔬菜时,氮、磷、钾肥的施用量均为 $300 \text{ kg} \cdot \text{hm}^{-2}$,是稻-麦/油轮作地施用氮、磷、钾肥的2.4倍和3倍^[29],这使得研究区稻-蔬轮作地土壤表层的钾素持续累积。而研究区园林地大多在2005年以后由传统稻-麦/油轮作地转变而来,相较于传统稻-麦/油轮作,转变后的园林几乎无外源肥料投入^[29],表层土壤中的速效钾主要来源于用地类型转变前投入的钾肥。值得注意的是,钾素移动性高、易流失,造成钾养分亏缺或耗竭^[47],而园林树木根系生长在一定程度上提高了土体通透性^[30],由此加剧了研究区园林地表层土壤速效钾的消耗。由于传统稻-麦/油轮作地种植历史长,施肥补充土壤钾素与作物吸收消耗钾素相互作用导致表层土壤速效钾含量并无较大变化,这与浙江省耕地土壤速效钾的变化情况相同^[48]。

农地利用方式转变对研究区表层土壤速效钾累积规律的影响随母质类型的不同而存在明显差异。成土母质的矿物分解是速效钾的基本来源^[10,49-50],此外,不同的成土母质发育形成的土壤质地存在差异,对钾素的吸附能力也有所不同^[24]。研究区灰棕冲积物包括紫色冲积物,含数量较多的云母和水云母,全土含钾矿物云母和钾长石的含量为 $40.80 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[23,51],由此发育的土壤钾素初始值较高,且灰棕冲积物主要分布在彭州、大邑等区县,该地区是成都平原主要的现代农业蔬菜生产基地,近40年来土壤耕作强度大,农业投入水平高^[52],因此由灰棕冲积物发育形成的土壤表层速效钾含量经农地利用方式转变后增幅最高。更新统老冲积物发育的土壤颗粒组成较细,质地黏重^[28],对钾素的吸附能力较强,能够更好地固定施入土壤的钾素,减少下渗损失。因此,经农地利用方式转变后表层土壤速效钾含量均上升。灰色冲积物发育形成的土壤颗粒组成相对较粗,养分易随水分向下层土壤迁移^[53]。此外有研究表明,成都平原由灰色冲积物形成的土壤在20世纪80年代至21世纪10年代经农地利用方式转变后,表层土壤明显酸化^[22],在酸性条件下土壤钾的选择结合位点易被铝或氢氧化铝及其聚合物占据,土壤固持钾的能力降低,钾素易淋溶流失^[54]。因此,灰色冲积物发育形成的土壤由传统稻-麦/油轮作转变为稻-蔬轮作后,表层土壤速效钾

含量增幅最低,且稻-麦/油轮作地和园林地的表层土壤速效钾含量下降。综上,农地利用方式转变导致不同母质发育形成的土壤表层速效钾含量发生明显改变,这种变化也体现了不同农地利用方式下土壤环境的演化特点,有助于为高强度农业利用背景下合理的植被种植和人为施肥活动提供科学依据。

4 结论

(1)20世纪80年代以来,成都平原地区农地表层土壤速效钾累积明显,至2017年速效钾含量增加了28.80% ($P < 0.05$)。农地利用方式转变对表层土壤速效钾累积产生了明显的影响。与传统稻-麦/油轮作相比,稻-蔬轮作使得表层土壤速效钾累积量显著升高,园林地则在一定程度上导致表层土壤速效钾的消耗,传统稻-麦/油轮作地由于种植历史长,钾素补充与消耗相互作用导致表层土壤速效钾含量上升不显著。

(2)不同农地利用方式转变下表层土壤速效钾累积量同时还受成土母质类型的影响。与20世纪80年代传统稻-麦/油轮作相比,2016—2017年灰棕冲积物发育的土壤在不同农地利用方式下,速效钾含量增幅均远高于更新统老冲积物和灰色冲积物发育土壤;由更新统老冲积物发育的土壤在不同农地利用方式下表层土壤速效钾含量均上升,但仅稻-蔬轮作地增幅显著;而由灰色冲积物发育形成的土壤在园林地利用方式下表层土壤速效钾含量下降。

参考文献:

- [1] CHRISTIAN Z, MEHMET S, EDGAR P, et al. Potassium in agriculture—status and perspectives[J]. *Journal of Plant Physiology*, 2014, 171(9): 656–669.
- [2] DAS D, DWIVEDI B S, DATTA S P, et al. Long-term differences in nutrient management under intensive cultivation alter potassium supplying ability of soils[J]. *Geoderma*, 2021, 393: 114983.
- [3] 李强, 张一扬, 程昌新, 等. 曲靖烤烟钾含量特征及其与主要生态因子关系研究[J]. 核农学报, 2017, 31(5): 918–926. LI Q, ZHANG Y Y, CHENG C X, et al. Characteristics of potassium content in flue-cured tobacco and its relationship with main ecological factor in Qujing, China[J]. *Journal of Nuclear Agricultural Sciences*, 2017, 31(5): 918–926.
- [4] 曹婧, 陈怡平, 江瑶, 等. 陕西省农田土壤速效钾时空变化及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(5): 296–302. CAO J, CHEN Y P, JIANG Y, et al. Spatial and temporal variation of soil available potassium and its influencing factors in Shaanxi Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2021, 35(5): 296–302.
- [5] QIU K Y, XIE Y Z, XU D M, et al. Ecosystem functions including soil organic carbon, total nitrogen and available potassium are crucial for

- vegetation recovery[J]. *Scientific Reports*, 2018, 8(1):7607.
- [6] TIAN H Y, QIAO J B, ZHU Y J, et al. Vertical distribution of soil available phosphorus and soil available potassium in the critical zone on the Loess Plateau, China[J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1):3159.
- [7] 徐晓燕, 马毅杰, 张瑞平. 土壤中钾的转化及其与外源钾的相互关系的研究进展[J]. 土壤通报, 2003(5):489-492. XU X Y, MA Y J, ZHANG R P. Research progress in transformation of soil potassium in relation to pottash application[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2003(5):489-492.
- [8] 陈洋, 齐雁冰, 王茵茵, 等. 秦巴中部山区耕地土壤速效钾空间变异及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2017, 30(2):257-266. CHEN Y, QI Y B, WANG Y Y, et al. Spatial variability and factors affecting soil available potassium in the central Qinling-Daba Mountain area[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2017, 30(2):257-266.
- [9] SHAHPARI S, ALLISON J, HARRISON M, et al. An integrated economic, environmental and social approach to agricultural land-use planning[J]. *Land*, 2021, 10(4):364.
- [10] 江叶枫, 郭熙. 基于协同克里格的耕层土壤速效钾空间异质性研究[J]. 浙江农业学报, 2019, 31(1):139-148. JIANG Y F, GUO X. Spatial heterogeneity of available potassium in topsoil based on co-Kriging[J]. *Acta Agriculturae Zhejiangensis*, 2019, 31(1):139-148.
- [11] REGMI A, LADHA J, PASUQUIN 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(3):240-247.
- [12] LI T, LIANG J, CHEN X, et al. The interacting roles and relative importance of climate, topography, soil properties and mineralogical composition on soil potassium variations at a national scale in China[J]. *Catena*, 2021, 196:104875.
- [13] 李春林, 陈敏旺, 王寅, 等. 吉林省农田耕层土壤速效磷、钾养分的时空变化特征[J]. 中国土壤与肥料, 2019(4):16-23. LI C L, CHEN M W, WANG Y, et al. Temporal and spatial variability of available phosphorus and potassium in cropland topsoil of Jilin Province[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2019(4):16-23.
- [14] 张子璐, 左昕弘, 刘峰, 等. 渝西丘陵区土壤速效钾空间异质性及影响因素[J]. 土壤学报, 2020, 57(2):307-315. ZHANG Z L, ZUO X H, LIU F, et al. Spatial heterogeneity of soil readily available potassium and its influencing factors in western Chongqing hilly area[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(2):307-315.
- [15] 谢佳贵, 侯云鹏, 尹彩侠, 等. 施钾和秸秆还田对春玉米产量、养分吸收及土壤钾素平衡的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5):1110-1118. XIE J G, HOU Y P, YIN C X, et al. Effect of potassium application and straw returning on spring maize yield, nutrient absorption and soil potassium balance[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(5):1110-1118.
- [16] 董琴, 王昌全, 李启权, 等. 成都平原西部土壤速效钾含量剖面分布特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2019, 33(2):176-182. DONG Q, WANG C Q, LI Q Q, et al. Profile distribution characteristics of soil available potassium and its influencing factors in the western Chengdu Plain[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(2):176-182.
- [17] YU P, LIU S, XU Q, et al. Response of soil nutrients and stoichiometric ratios to short-term land use conversions in a salt-affected region, northeastern China[J]. *Ecological Engineering*, 2019, 129:22-28.
- [18] WANG L, TANG L, WANG X, et al. Effects of alley crop planting on soil and nutrient losses in the citrus orchards of the Three Gorges region[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 110(2):243-250.
- [19] 李泽霞, 董彦丽, 马涛. 黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J]. 水土保持通报, 2020, 40(3):43-49. LI Z X, DONG Y L, MA T. Effects of land use types on soil physical and chemical properties in terraced sloping land of loses areas[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2020, 40(3):43-49.
- [20] 刘艳丽, 李成亮, 高明秀, 等. 不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J]. 生态学报, 2015, 35(15):5183-5190. LIU Y L, LI C L, GAO M X, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(15):5183-5190.
- [21] CHEN L, QI X, ZHANG X, et al. Effect of agricultural land use changes on soil nutrient use efficiency in an agricultural area, Beijing, China[J]. *Chinese Geographical Science*, 2011, 21(4):392-402.
- [22] LI Q, LI A, YU X, et al. Soil acidification of the soil profile across Chengdu Plain of China from the 1980s to 2010s[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 698:134320.
- [23] 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. 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.
- [24] 钟晓兰, 周生路, 李江涛, 等. 长江三角洲地区土壤重金属污染的空间变异特征:以江苏省太仓市为例[J]. 土壤学报, 2007, 44(1):33-40. ZHONG X L, ZHOU S L, LI J T, et al. Spatial variability of soil heavy metals contamination in the Yangtze River delta: a case study of Taicang City in Jiangsu Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(1):33-40.
- [25] 马伟龙, 任平, 曾雨晴. 成都平原经济区耕地生态系统涵养水源价值时空演变特征[J]. 中国土地科学, 2015, 29(10):85-94. MA W L, REN P, ZENG Y Q. The characteristics for the spatial-temporal evolution of water conservation value in farmland ecosystem in Chengdu Plain economic zone[J]. *China Land Sciences*, 2015, 29(10):85-94.
- [26] ALEXANDER P, ROUNSEVELL M D A, DISLICH C, et al. Drivers for global agricultural land use change: the nexus of diet, population, yield and bioenergy[J]. *Global Environmental Change*, 2015, 35:138-147.
- [27] 余世鹏, 杨劲松, 刘广明, 等. 我国不同水热梯度带农田土壤速效钾含量的时空变异特征[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(2):1-4. YU S P, YANG J S, LIU G M, et al. Temporal-spatial variability of soil available potassium along gradients of precipitation and temperature in China[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2011, 30(2):1-4.
- [28] LI Q, LI A, DAI T, et al. Depthdependent soil organic carbon dynamics of croplands across the Chengdu Plain of China from the 1980s to the 2010s[J]. *Global Change Biology*, 2020, 26(7):4134-4146.
- [29] LUO Y, LI Q, SHEN J, et al. Effects of agricultural land use change on organic carbon and its labile fractions in the soil profile in an urban agricultural area[J]. *Land Degradation & Development*, 2019, 30(15):1875-1885.
- [30] LI Q, LUO Y, WANG C, et al. Spatiotemporal variations and factors affecting soil nitrogen in the purple hilly area of southwest China during the 1980s and the 2010s[J]. *Science of the Total Environment*,

- 2016, 547:173–181.
- [31] 董琴, 李启权, 王昌全, 等. 成都平原不同土地利用方式对土壤剖面钾素分布的影响[J]. 应用生态学报, 2019, 30(4):1389–1396. DONG Q, LI Q Q, WANG C Q, et al. Effects of different land use patterns on soil potassium distribution in Chengdu Plain, China[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(4):1389–1396.
- [32] ZHANG H, YANG R, WANG Y, et al. The evaluation and prediction of agriculture-related nitrate contamination in groundwater in Chengdu Plain, southwestern China[J]. *Hydrogeology Journal*, 2019, 27(2):785–799.
- [33] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京:中国农业出版社, 2000. LU R K. Chemical analysis methods of soil agriculture[M]. Beijing:China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [34] HE P, YANG L, XU X, et al. Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012)[J]. *Field Crops Research*, 2015, 173:49–56.
- [35] ZHU D, ZHANG J, WANG Z, et al. Soil available potassium affected by rice straw incorporation and potassium fertilizer application under a rice–oilseed rape rotation system[J]. *Soil Use and Management*, 2019, 35(3):503–510.
- [36] 全思懋, 管晓进, 王绪奎, 等. 江苏省域农田土壤速效钾含量变化及其影响因子研究[J]. 土壤, 2019, 51(2):257–262. QUAN S M, GUAN X J, WANG X K, et al. Changes of soil available potassium content in farmland in Jiangsu Province and its influential factors[J]. *Soils*, 2019, 51(2):257–262.
- [37] SONG X, LIU F, WU H, CAO Q, et al. Effects of long-term K fertilization on soil available potassium in east China[J]. *Catena*, 2020, 188:104412.
- [38] 闻来祥. 秸秆还田对农田生态系统及作物生长的影响[J]. 现代农业科技, 2020(15):190–191. WEN L X. Effects of straw return on farmland ecosystem and crop growth[J]. *Modern Agricultural Sciences*, 2020(15):190–191.
- [39] LI J, LU J, LI X, et al. Dynamics of potassium release and adsorption on rice straw residue[J]. *PLoS One*, 2014, 9(2):e90440.
- [40] 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. 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.
- [41] ZHU D, LU J, CONG R, et al. Potassium management effects on quantity/intensity relationship of soil potassium under rice–oilseed rape rotation system[J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2020, 66(9):1274–1287.
- [42] 吴利杰, 于娟, 王成敏, 等. 长尺度气候变化下土壤钾素演变规律的研究:以泾河中游将军村黄土剖面为例[J]. 上海交通大学学报(农业科学版), 2016, 34(1):69–73. WU L J, YU J, WANG C M, et al. Study on the evolution law of potassium with long time scale climate change in Jiangjun loess section of the middle reaches of Jinghe River[J]. *Journal of Shanghai Jiaotong University (Philosophy and Social Sciences)*, 2016, 34(1):69–73.
- [43] 金继运, 高广领, 王泽良, 等. 温度对土壤钾素容量和强度(Q/I)关系的影响[J]. 土壤学报, 1992, 29(2):137–141. JIN J Y, GAO G L, WANG Z L, et al. Temperature effects on quantity and intensity (Q/I) relationship of potassium in selected soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1992, 29(2):137–141.
- [44] 王文忠, 徐生瑞. 施钾对两种土壤钾素动态变化影响的研究[J]. 土壤通报, 2001, 32(3):120–122. WANG W Z, XU S R. Study on the effect of potassium application on the dynamic changes of potassium in two soils[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2001, 32(3):120–122.
- [45] 张小玲, 刘梦娜, 青泉, 等. 1960–2018年成都地区极端气温变化及城市化贡献分析[J]. 高原山地气象研究, 2022, 42(1):10–17. ZHANG X L, LIU M N, QING Q, et al. Extreme temperature change and urbanization contribution in Chengdu from 1960 to 2018[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2022, 42(1):10–17.
- [46] 张元媛, 李呈吉, 方红艳, 等. 成都平原农地利用方式转变对不同母质土壤剖面磁化率的影响[J]. 土壤通报, 2022, 53(1):89–96. ZHANG Y Y, LI C J, FANG H Y, et al. Effects of agricultural land-use change on magnetic susceptibility of different parent soil profile in Chengdu Plain[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2022, 53(1):89–96.
- [47] 李盟军, 艾绍英, 宁建凤, 等. 不同养分管理措施下常年菜地磷、钾养分径流流失特征[J]. 农业资源与环境学报, 2019, 36(1):33–42. LI M J, AI S Y, NING J F, et al. Runoff characteristics of phosphorus and potassium from a perennial vegetable field under different nutrition managements[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2019, 36(1):33–42.
- [48] 张丽君, 麻万诺, 项佳敏, 等. 浙江省耕地土壤速效钾状况及影响因素分析[J]. 浙江农业科学, 2020, 61(4):607–611. ZHANG L J, MA W Z, XIANG J M, et al. Analysis of soil available potassium status and influencing factors in cultivated land in Zhejiang Province[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2020, 61(4):607–611.
- [49] 朱福斌, 丁世伟, 甘晓玉, 等. 基于三种空间预测方法的安庆市耕地土壤速效钾空间分布预测[J]. 中国土壤与肥料, 2021(1):1–8. ZHU F B, DING S W, GAN X Y, et al. Prediction of spatial distribution of available potassium in cultivated soil of Anqing City based on three spatial prediction methods[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 2021(1):1–8.
- [50] GAO X, XIAO Y, DENG L, et al. Spatial variability of soil total nitrogen, phosphorus and potassium in Renshou County of Sichuan Basin, China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2019, 18(2):279–289.
- [51] LI Q, DENG Q, FANG H, et al. Factors affecting cadmium accumulation in the soil profiles in an urban agricultural area[J]. *Science of the Total Environment*, 2022, 807:151027.
- [52] 董琴. 近35年成都平原核心区土壤钾素时空变化特征及影响因素研究[D]. 成都:四川农业大学, 2019. DONG Q. Analysis on the spatial and temporal variations of soil potassium and its influencing factors in the core area of Chengdu Plain in recent 35 years[D]. Chengdu:Sichuan Agricultural University, 2019.
- [53] GE N, WEI X, WANG X, et al. Soil texture determines the distribution of aggregate-associated carbon, nitrogen and phosphorus under two contrasting land use types in the Loess Plateau[J]. *Catena*, 2019, 172:148–157.
- [54] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4):548–553. ZHAN L P, LI X K, LU J W, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement [J]. *Soils*, 2012, 44(4):548–553.