

成都平原不同土地利用方式对土壤剖面钾素分布的影响

董 琴¹ 李启权¹ 王昌全^{1*} 李 冰¹ 徐 强¹ 李 萌¹ 黎国阳² 张露心¹

(¹四川农业大学资源环境学院, 成都 611130; ²四川农业大学农学院, 成都 611130)

摘 要 为探索快速城市化背景下土地利用方式变化对土壤剖面钾素变化的影响,本研究选取成都平原 4 种典型土地利用方式(稻-麦、稻-蔬、稻-油和园林),基于 187 个土壤剖面数据,分析了不同土地利用方式下土壤剖面速效钾、缓效钾、矿物钾和全钾 4 种不同形态钾的含量特征及相互关系.结果表明:从表层土壤来看,相较传统轮作(稻-麦、稻-油)而言,土地利用方式显著影响了土壤速效钾和缓效钾含量变化,稻-蔬轮作提高了表层土壤速效钾和缓效钾含量,园林用地则加剧了土壤速效钾和缓效钾的消耗.对于较为稳定的土壤矿物钾和全钾而言,其含量在不同土地利用方式间均无显著差异.从深层土壤来看,稻-蔬轮作方式下速效钾含量随土层加深下降最为明显,传统轮作土壤速效钾含量显著高于园林用地,缓效钾变化趋势与速效钾相反.不同土地利用方式土壤矿物钾和全钾含量差异较小.在 4 种土地利用方式中,稻-蔬轮作方式下表层土壤速效钾和缓效钾占全钾比例相对其他 3 种土地利用方式较高,20~40 cm 土层,不同土地利用方式下速效钾占全钾比例均显著下降,缓效钾随土层向下比例变化与速效钾变化趋势恰好相反.矿物钾占全钾比例在不同土地利用方式下无显著差异.可见,不同土地利用方式对成都平原土壤速效钾和缓效钾在剖面中的分布具有显著影响.

关键词 成都平原; 土地利用方式; 钾素; 土壤剖面

Effects of different land use patterns on soil potassium distribution in Chengdu Plain, China. DONG Qin¹, LI Qi-quan¹, WANG Chang-quan^{1*}, LI Bing¹, XU Qiang¹, LI Meng¹, LI Guo-yang², ZHANG Lu-xin¹ (¹College of Resources and Environment, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; ²College of Agriculture, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China).

Abstract: To explore the effects of land use change on the potassium in soil profile under the background of rapid urbanization, we collected data of 187 soil profiles from four typical land use patterns (rice-wheat, rice-vegetable, rice-oil and garden) in Chengdu Plain. The contents of available potassium (AP), slow-acting potassium (SP), mineral potassium (MP), and total potassium (TP) in soil profile under different land use patterns and their relationships were analyzed. Our results showed that compared with the traditional rotation (rice-wheat, rice-oil), soil AP and SP contents significantly varied among different land use patterns. Rice-vegetable rotation increased the contents of AP and SP in the surface soil, while garden land increased the consumption of AP and SP in the soil. For the more stable forms, soil MP and TP, there was no significant difference in their contents under different land use patterns. In the deep soil, the content of AP in the rice-vegetable rotation pattern was significantly decreased with deepening soil layer, and the AP in traditional rotation was significantly higher than that in garden land. The trend of SP was opposite to that of AP. The difference of MP and TP in different land use patterns was small. Among the four land use patterns, the ratio of AP to TP and SP to TP in the lower layer of rice-vegetable rotation was higher than that in other patterns, while the ratio of AP to TP decreased significantly under different land

本文由四川省教育厅科研项目(2017SZ0188)和国家重点研发计划项目(2017YFD0301701)资助 This work was supported by the Sichuan Provincial Department of Education Research Project (2017SZ0188) and National Key Research and Development Program of China (2017YFD0301701).

2018-11-26 Received, 2019-02-28 Accepted.

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: w.changquan@163.com

use patterns at 20–40 cm. The change of SP to TP with the downward ratio of soil layer was opposite to that of AP to TP. Additionally, the ratio of MP to TP was relatively stable under different land use patterns. Therefore, different land use patterns exerted significant effects on the distribution of AP and SP in the soil profile of Chengdu Plain.

Key words: Chengdu Plain; land use pattern; potassium; soil profile.

钾在土壤中以多种形态存在,各种形态钾之间始终处于动态平衡之中^[1–2],土壤供钾能力取决于土壤中钾的存在形态、分布状况及其在共同维持动态平衡的基础上各形态钾素向植物有效性的转化程度^[3–4].在同一气候和地理条件下,土地利用方式是影响土壤钾素含量及其有效性的直接因素^[5–6].不同土地利用方式的耕作制度、灌溉、施肥等管理方式不同,从而改变土壤的理化性质,影响土壤钾素的运移与转化^[7–9].

土壤利用过程中诱发的土壤肥力变化、土壤污染等现象一般在近地表附近甚为明显,因此,以往的相关研究更多关注土壤近地表部分的变化,研究内容也主要集中于土壤表层(0~20 cm)速效钾状况、供钾能力和施肥增产效果等方面^[10–14],而针对各形态钾素供钾状况的差异性、剖面变异性以及演变规律的研究甚少.土地利用的方式不同一方面导致进入土壤剖面中的肥料和植物残体的数量各异;另一方面耕作方式等农艺措施的差异影响钾素的转化、运输和植物的吸收利用,从而导致土壤剖面钾素的差异,引起土壤钾素肥力的不同^[15–16].目前,许多研究多从定性的角度对不同土地利用方式下土壤钾素剖面分布进行分析,关于土地利用方式的影响程度随土层深度的变化及对土壤钾素形态分布的影响还鲜见报道.

近年来,随着城市化进程不断推进,成都平原的土地利用方式由 20 世纪 80 年代单一的稻-麦和稻-油轮作转变为现在稻-麦/油轮作、稻-蔬轮作和农林复合(园林)等多种模式.已有研究表明,伴随着成都平原城市的建设和发展,耕地资源数量持续下降;与此同时,土壤质量和肥力水平相对下降^[17].作为我国主要的农业生产基地之一,在成都平原极度缺钾、快速城市化的背景下,其土地利用方式发生转变,这就迫切要求我们掌握土壤钾素运移、转化的空间分布特征,为土地资源的合理利用提供参考.因此,本研究以成都平原核心区为研究区,通过量化不同土地利用方式下不同形态钾在土壤剖面中的分布状况,探讨不同土地利用方式对不同层次土壤钾素含量、形态转化和分布的影响,为不同土地利用方式下

土壤肥力提升方向提供决策依据.

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川盆地西部,地势平坦,水、热条件充沛,土壤肥沃,灌溉便利,农业开发历史悠久,土地垦殖率高,是四川省重要的粮油生产基地.研究区地理位置 102°54′—104°53′ N, 30°05′—31°26′ E,总面积约 1.53 万 km²,属于亚热带季风气候区,年降水量 900~1300 mm,年平均温度 15.2~16.7 °C,年日照时数 1100~1400 h.研究区 pH 值介于 6.10~6.98,容重含量为 1.26~1.60 g·cm⁻³,土壤有机碳和全氮的含量范围分别为 5.18~19.39 g·kg⁻¹和 0.55~1.94 g·kg⁻¹.区内成土母质主要有灰色冲积物、灰棕冲积物、上更新统黄色黏土、中下更新统老冲积物、紫色冲积物等.土壤类型主要为水稻土,包括潜育水稻土、渗育水稻土、脱潜水稻土、潴育水稻土、新积土 5 个最主要的亚类.发育的土壤土层深厚,矿质养分丰富,土壤肥沃,水热协调,肥力水平较高,有利于发展农业.区内耕地和园地面积占全区土地面积的 70%以上,境内农作物种类多样,水稻、小麦、油菜、果苗和蔬菜等种植面积较大,产量分别达到 119.07、22.44、15.75、58.5 t 和 397.49 万 t.近几十年来,随着城市化的不断推进,工农业、第三产业发展迅速,农业结构调整,土地利用方式发生变化,导致土壤性质也发生了一定变化.

1.2 样品采集与处理

于 2016—2017 年根据研究区成土母质、土壤类型和典型农地利用方式等因素,兼顾样点具有均匀性和代表性原则进行布点采样,每个样点采用混合取样的方法采集 4 个层次的剖面土壤(0~20 cm、20~40 cm、40~60 cm 和 60~100 cm),全区共采集土壤样品 187 个(图 1a).每个样点均用 GPS 定位读取采样点坐标.同时详细记录每个采样点的地理坐标、海拔、成土母质、土地利用方式、土壤类型、种植制度等地表环境信息.

土壤样品经风干、研磨、去杂、过筛后,土壤全钾采用氢氧化钠熔融-火焰光度法测定;土壤速效钾采

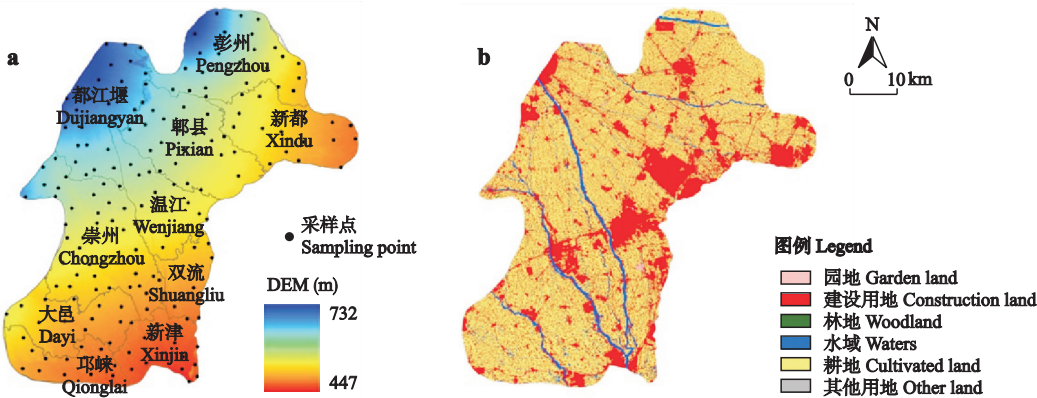


图 1 研究区基础信息

Fig.1 Basic geographic information of study area.

a) 数字高程模型 (DEM) 及采样点分布 Digital elevation model (DEM) and distribution of sampling points; b) 土地利用方式 Land use pattern.

用 NH_4OAC 浸提-火焰光度法测定;土壤缓效钾采用 $1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 热 HNO_3 浸提-火焰光度法测定;土壤矿物钾=土壤全钾-土壤速效钾-土壤缓效钾^[18].

1.3 数据处理

采用域值法处理异常值^[18-19],采用 Excel 2003 和 SPSS 13.0 软件对数据进行统计分析,采用单因素 (one-way ANOVA) 和 Duncan 法进行方差分析和多重比较 ($\alpha=0.05$),使用 Origin 8.5 进行图件的制作.图表中数据为平均值±标准差.

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式对表层土壤不同形态钾分布特征的影响

由表 1 可知,4 种不同土地利用方式下,表层土壤速效钾含量在 $40.02\sim75.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,根据全国第二次土壤普查养分分级标准^[20],属于缺乏至较缺乏水平,稻-蔬轮作方式下土壤速效钾含量显著高于其他 3 种土地利用方式,分别是稻-麦、稻-油和园林的 1.4、1.5 和 1.9 倍,其中传统轮作方式 (稻-麦和稻-油) 速效钾含量高于园林用地;4 种不同土地利用方式下表层土壤缓效钾含量在 $256.16\sim319.51\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,其中稻-蔬轮作方式最高,处于中等水平,

其他 3 种土地利用方式土壤缓效钾含量均处于低水平;表层土壤全钾和矿物钾含量接近,均表现为园林最高,稻-麦最低.

总体来看,相较传统农作 (稻-麦、稻-油) 而言,土地利用方式显著影响了土壤速效钾和缓效钾含量变化,稻-蔬轮作提高了表层土壤速效钾和缓效钾含量,这与其种植强度和施肥量大有关,园林用地则加剧了土壤速效钾和缓效钾的消耗,地力衰减较为严重.对于较为稳定的土壤矿物钾和全钾而言,其含量在不同土地利用方式间均无显著差异.

2.2 不同土地利用方式对土壤不同形态钾剖面分布特征的影响

由图 2 可知,不同土地利用方式对土壤剖面速效钾分布存在显著影响.4 种不同土地利用方式下,土壤速效钾主要集中在 $0\sim20\text{ cm}$ 土层,到 $20\sim40\text{ cm}$ 处,土壤中速效钾含量迅速下降,其中,稻-蔬轮作方式下土壤剖面速效钾含量下降最明显,与表层相比, $20\sim40\text{ cm}$ 、 $40\sim60\text{ cm}$ 和 $60\sim100\text{ cm}$ 土层速效钾含量分别下降了 60.5%、74.6% 和 74.7%.在 $0\sim100\text{ cm}$ 土层,传统轮作方式 (稻-麦和稻-油) 土壤剖面速效钾含量显著高于园林用地,以稻-麦轮作方式土壤剖面速效钾含量相对较高,园林用地最低.

表 1 不同土地利用方式表层土壤不同形态钾含量变化特征

Table 1 Variation characteristics of different forms of K in cultivated soils under different land use patterns

项目 Item	稻-麦 Rice-wheat		稻-油 Rice-oil		稻-蔬 Rice-vegetable		园林 Garden		平均值 Mean
	n	Mean±SD	n	Mean±SD	n	Mean±SD	n	Mean±SD	
速效钾 AK ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	28	54.05±31.57b	57	49.72±35.96b	42	75.51±40.19a	54	40.02±29.83b	54.83
缓效钾 SAK ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)	29	256.16±109.26b	56	268.65±107.86b	46	319.51±90.83a	53	262.20±105.04b	276.63
矿物钾 MK ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	29	17.69±3.19b	55	19.80±3.49a	47	20.30±2.93a	52	20.62±3.71a	19.60
全钾 TK ($\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$)	29	18.01±3.22b	55	20.13±3.51a	47	20.73±2.97a	52	20.93±3.70a	19.95

AK: Available K; SAK: Slow available K; MK: Mineral K; TK: Total K. 下同 The same below. 不同小写字母表示在相同深度下不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$) Different lowercase letters indicated significant difference among land use patterns at the same depth at 0.05 level.

土壤缓效钾含量随土壤深度的增加呈显著增加的趋势(图2)。0~40 cm 土层,土壤缓效钾含量显著低于下层土壤,其中稻-蔬轮作方式下土壤剖面缓效钾含量增加最显著,与表层相比,20~100 cm 土层缓效钾含量增加 14.2%~55.3%,稻-蔬轮作在整个土壤剖面缓效钾含量相对较高,稻-麦轮作最低。

在 0~60 cm 土层,稻-麦、稻-油和稻-蔬 3 种土地利用方式土壤矿物钾含量随土层深度的增加均呈先增加后降低的趋势,但总体变化不大;在 60~100 cm 处,4 种不同土地利用方式间矿物钾含量差

异不显著,但稻-蔬轮作方式土壤矿物钾含量相对表层下降较为显著,降低了 9.6%,这可能是稻-蔬轮作促进了土壤矿物钾的释放,耕层土壤速效钾和缓效钾较传统农作(稻-麦、稻-油)显著增加所致。土壤全钾在不同土地利用方式下剖面分布状况与矿物钾具有类似的变化规律(图2)。

2.3 不同土地利用方式对土壤不同形态钾含量比例变化的影响

由表 2 可知,不同土地利用方式对土壤速效钾占全钾比例在 0~100 cm 土壤剖面分布的影响显

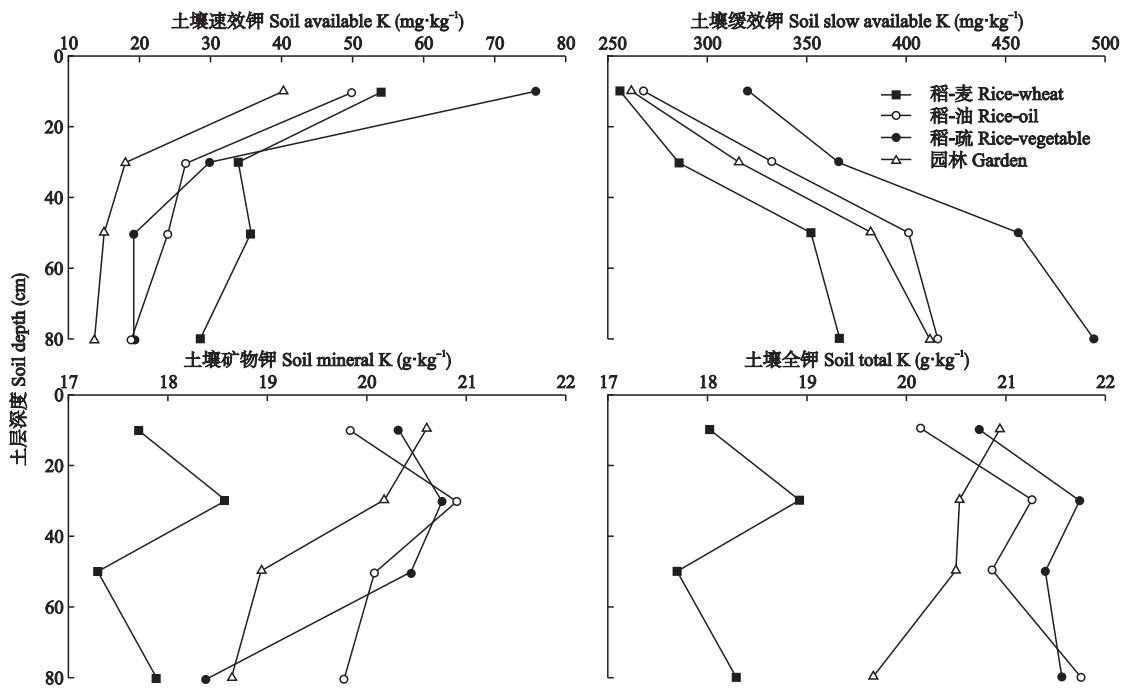


图2 不同土地利用方式土壤剖面速效钾、缓效钾、矿物钾和全钾含量的变化

Fig.2 Changes of soil available K, slow available K, mineral K, and total K contents in profile under different land use patterns.

表 2 不同土地利用方式土壤不同形态钾含量比例变化

Table 2 Changes of proportion of different forms of K in soils under different land use patterns

项目 Item	土地利用方式 Land use pattern	土层 Soil layer							
		0~20 cm		20~40 cm		40~60 cm		60~100 cm	
		n	比例	n	比例	n	比例	n	比例
		Proportion (%)		Proportion (%)		Proportion (%)		Proportion (%)	
速效钾 AK	稻-麦 Rice-wheat	28	0.3	27	0.2	27	0.2	26	0.2
	稻-油 Rice-oil	57	0.3	56	0.1	56	0.1	52	0.1
	稻-蔬 Rice-vegetable	42	0.4	46	0.1	44	0.1	41	0.1
	园林 Garden	54	0.2	54	0.1	51	0.1	48	0.1
缓效钾 SAK	稻-麦 Rice-wheat	29	1.4	28	1.5	29	2.0	29	2.0
	稻-油 Rice-oil	56	1.3	57	1.6	56	1.9	53	1.9
	稻-蔬 Rice-vegetable	46	1.5	46	1.7	45	2.1	41	2.3
	园林 Garden	53	1.3	54	1.5	51	1.9	48	2.1
矿物钾 MK	稻-麦 Rice-wheat	29	98.3	29	98.2	29	97.8	29	97.8
	稻-油 Rice-oil	55	98.4	54	98.3	56	96.2	55	90.9
	稻-蔬 Rice-vegetable	47	97.9	46	98.1	46	95.5	47	85.2
	园林 Garden	52	98.5	54	98.3	53	92.5	53	94.9

著,在0~20 cm土层,稻-蔬轮作方式下速效钾占全钾比例显著高于其他3种土地利用方式;20~40 cm处,4种不同土地利用方式下速效钾占全钾的比例均显著下降,稻-蔬下降比例最为显著,下降了0.3%;在整个0~100 cm土层,传统土地利用方式(稻-麦和稻-油)速效钾占全钾比例高于园林和稻-蔬.与速效钾变化趋势相反,4种不同土地利用方式下缓效钾占全钾比例随土壤深度的增加而增大,在0~20 cm土层,稻-蔬轮作方式下缓效钾占全钾比例最高;从整个土壤剖面来看,稻-蔬轮作方式下缓效钾占全钾的比例在整个土壤剖面均较高.4种不同土地利用方式下土壤剖面矿物钾占全钾的比例表现为表层最高,在20~60 cm土层,矿物钾占全钾比例主要介于92.5%~98.3%,无显著差异;60~100 cm处,稻-蔬和稻-油土壤剖面矿物钾占全钾的比例降低幅度较大,相对表层分别降低了12.7%和7.5%.

3 讨 论

3.1 不同土地利用方式对表层土壤不同形态钾含量变化的影响

不同土地利用方式对土壤中钾素形态之间的转化和供应能力有很大的影响^[18-23].已有研究证实,在不同土地利用方式下由于作物吸收和土壤钾素的吸附固定等因素,导致土壤中各形态钾含量出现显著差异^[24].秦川等^[25]指出,由耕地转变为林草地的土地利用模式能有效提高和改善土壤结构及土壤中钾素含量.同时,阿拉腾希胡日等^[26]通过28年的研究表明,不同土地利用方式下由于施肥结构和种类的不同,施肥量的增加大大提高了土壤中有效钾的含量.在本研究中,4种不同土地利用方式下,表层速效钾含量属于极缺~缺乏水平,与许多研究结果一致^[27-28],表层速效钾含量以稻-蔬轮作最高,一方面是因为成都平原种植蔬菜的习惯为稻草覆盖,另一方面主要是蔬菜为一年多熟,钾肥投入过量,导致土壤表层钾素含量偏高;其次,传统轮作方式(稻-麦和稻-油)速效钾含量较高,主要是因为稻-麦和稻-油两季田的秸秆产量达到了每年 2.10×10^7 t,约占农作物秸秆总量的50%以上,据估算每年四川省稻-麦和稻-油两季田秸秆含钾 1.30×10^5 t^[29],同时,成都平原属于重要农业种植区,按播种面积计算,成都平原区化肥使用量超过全省平均水平(228.86 kg·hm⁻²),达285.63 kg·hm⁻²^[30],因此,传统轮作方式(稻-麦和稻-油)速效钾含量均较高.根据土壤养分分级标准,土壤表层缓效钾处于低至中等水平,

其中稻-蔬模式最高,主要受施肥作用的影响.整体来看,该研究区表层速效钾含量偏低,缓效钾的补充速率又较低,反映出该区域缺钾严重,应根据不同土地利用方式下的作物种植种类,适当补充钾肥及有机肥配合施用,增产效果较好.

土壤表层全钾含量在18.01~20.93 g·kg⁻¹,平均值较低(19.95 g·kg⁻¹),主要是因为研究区土壤主要是由岷江冲积物发育而成,其全钾含量背景值较低(28.49 g·kg⁻¹^[27]).土壤表层矿物钾占全钾95%以上,全钾含量和矿物钾含量差别较小,说明这个区域矿物钾更多来源于母质,土地利用方式对它的影响不大.近年来,随着成都市经济发展、农业结构调整,部分区域农地利用方式发生变化,出现了种植花卉苗木的园林用地、农林复合用地和果园等多种用地方式.李珊等^[28]和张宏玲等^[29]的研究发现,轮作制度对成都典型轮作区0~20 cm土壤养分有显著影响.在本研究中,土壤全钾和矿物钾含量均以园林最高,但在底层土壤中含量逐渐降低,主要是因为园林作物在生长过程中根系需要吸收更多的养分来维持自身营养需求,另一方面是因为园林地收益较高,农户对园林地投入的钾肥和管理水平普遍较高.这一结果表明,园林这一土地利用方式可促进研究区土壤钾素转化、吸收,减缓钾素流失.

3.2 不同土地利用方式对土壤剖面不同形态钾含量变化的影响

土壤剖面不同钾素形态的垂直分布状况对于土地利用方式对土壤钾素剖面分布的影响、合理的利用土地、土壤施肥以及耕作等都有重要的参考意义^[30].由图2可以看出,4种不同土地利用方式下,传统种植方式下(稻-麦和稻-油)土壤剖面速效钾含量高于园林,主要是因为农业生产中的各种活动集中发生在耕层30 cm以内,人类活动及施肥作用导致表层速效钾含量较高,40~60 cm是细根系主要分布区^[31],一方面施肥作用和土壤深耕向深层土壤输入一定量的钾素,另一方面用于维持作物生长消耗一定量的钾素,而由于传统农作物(稻-麦和稻-油)都是一季作物,根系分布较浅,向上补充多且向下运移的钾素较少,导致土壤速效钾含量在整个土壤剖面上的分布较高.这与缓效钾的变化趋势恰好相反,这与赵欢等^[32]长期定位施肥土壤钾素变化的研究结果一致,因不同作物(稻-麦、果蔬等)的消耗,速效钾的减少反而促进了缓效钾向速效钾的转化.相关研究表明,土壤速效钾和缓效钾之间处于一种动态平衡^[33].本研究显示,4种不同土地利用方式中,稻-

蔬轮作方式下土壤速效钾含量随土层深度的增加下降最为显著,相比之下,该土地利用方式下土壤缓效钾含量在土壤剖面上增加最为显著,说明速效钾的丰缺状况能影响到缓效钾的释放。

由图 2 可知,不同土地利用方式下表层土壤全钾平均值为 $19.95\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 20 世纪 80 年代 ($17.71\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ ^[34]) 相比,增加了 12.7%.说明表层受施肥影响全钾含量有所增加.在 0~60 cm 土层,稻-麦、稻-蔬和稻-油 3 种不同土地利用方式下土壤矿物钾含量随土层深度的增加均呈先增加后降低的特点,但总体剖面变异性不大;土壤全钾在不同土地利用方式下剖面分布状况和矿物钾类似.60~100 cm,稻-蔬轮作方式土壤矿物钾含量相对表层下降较为显著,但整体来看,全钾和矿物钾在土壤剖面上变化不大,主要受研究区土壤母质来源中的含钾矿物的影响^[31-32].

3.3 不同土地利用方式对土壤不同形态钾比例变化的影响

在稻-蔬轮作方式下,表层土壤速效钾占全钾比例显著高于其他 3 种土地利用方式,沿剖面向下所占比逐渐降低,而缓效钾占全钾比例剖面变化趋势相反,主要是稻-蔬轮作方式下施肥量大,速效钾和缓效钾占全钾比例均较高,而深层土壤受蔬菜根系分布的影响,速效钾的消耗促进了缓效钾的释放.包耀贤等^[35]研究发现,在长期耕作的梯田里,其土壤中速效钾占全钾比例介于 0.3%~0.7%,缓效钾占全钾比例为 3.4%~5.9%.而本研究中不同土地利用方式下速效钾占全钾比例在 0.1~0.4%,缓效钾占全钾比例在 1.3%~2.3%,表明钾贮存量中绝大部分是无效钾素形态,缓效钾是速效钾的主要潜在来源.剖面土壤速效钾和缓效钾占全钾比例在园林轮作方式下均较低,而剖面矿物钾占全钾比例较高,主要是因为钾肥施用及耕作等人为因素对园林的影响较小.相关研究表明,矿物钾贮存在矿物结晶构造中难以释放,转化为缓效钾再转化为速效钾的过程十分漫长^[36-37].因此,它和全钾一样,受成土矿物的影响,土地利用方式对它的影响不大。

4 结 论

本研究对不同土地利用方式下成都平原土壤剖面速效钾、缓效钾、矿物钾和全钾 4 种不同形态钾的含量特征及相互关系进行了深入探讨,与传统轮作方式(稻-麦、稻-油)相比,土地利用方式显著影响了土壤速效钾和缓效钾在剖面上的含量变化及其占全

钾比例,稻-蔬轮作提高了表层土壤速效钾和缓效钾含量及占比,其次,传统轮作方式(稻-麦和稻-油)速效钾含量较高,但在深层土壤中,稻-蔬轮作方式下速效钾含量及占比随土层加深下降最为明显,与缓效钾含量及占比变化趋势相反;园林用地则是加剧了土壤在不同土层速效钾和缓效钾的消耗,其占全钾比例最低,对于较为稳定的土壤矿物钾和全钾而言,其含量在不同土地利用方式间均无显著差异,矿物钾占全钾比例在不同土层间无显著差异。

参考文献

[1] Sui N, Zhou Z, Yu C, *et al.* Yield and potassium use efficiency of cotton with wheat straw incorporation and potassium fertilization on soils with various conditions in the wheat-cotton rotation system. *Field Crops Research*, 2015, **172**: 132-144

[2] Meng L, Ding W, Cai Z. Long-term application of organic manure and nitrogen fertilizer on N₂O emissions, soil quality and crop production in a sandy loam soil. *Soil Biology and Biochemistry*, 2005, **37**: 2037-2045

[3] Pang JL, Qiu HY, Huang CC, *et al.* Comparison of micromorphological features of two agricultural cultivated soils in Guanzhong areas, Shaanxi Province, China. *Agricultural Sciences in China*, 2007, **6**: 1089-1098

[4] Sharma KL, Mandal UK, Srinivas K, *et al.* Long-term soil management effects on crop yields and soil quality in a dryland Alfisol. *Soil and Tillage Research*, 2005, **83**: 246-259

[5] Riley HCF, Bleken MA, Abrahamsen S, *et al.* Effects of alternative tillage systems on soil quality and yield of spring cereals on silty clay loam and sandy loam soils in the cool, wet climate of central Norway. *Soil and Tillage Research*, 2005, **80**: 79-93

[6] Yong X (游翔), Zhu B (朱波), Xie S-C (谢尚春), *et al.* Studies on forms transformation of potassium in purple soil. *Journal of Mountain Science* (山地学报), 2001, **19**(S1): 46-49 (in Chinese)

[7] Chen B-H (陈佰鸿), Li X-S (李新生), Cao Z-Y (曹孜义), *et al.* Studies on photosynthetic and respiratory characters of different leaf positions in grape plantlet *in vitro*. *Acta Horticulturae Sinica* (园艺学报), 2004, **34**(5): 637-640 (in Chinese)

[8] Qiu S, Xie J, Zhao S, *et al.* Long-term effects of potassium fertilization on yield, efficiency, and soil fertility status in a rain-fed maize system in northeast China. *Field Crops Research*, 2014, **163**: 1-9

[9] Jie W-Y (解文艳), Zhou H-P (周怀平), Yang Z-X (杨振兴), *et al.* Effect of different straw return modes on potassium balance and potassium pool in cinnamon soil. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2015, **21**(4): 936-942 (in Chinese)

[10] Liu F (刘枫), Wu C-Z (吴传洲), Zhu K-B (朱克保), *et al.* Study on potassium strategy to maintain crop high yield and potassium balance in cropland under rice-

- wheat rotation systems. *Soils* (土壤), 2014, **46**(2): 232–238 (in Chinese)
- [11] Zhang L (张 磊), Zhang W-L (张维乐), Lu J-W (鲁剑巍), *et al.* Study of optimum potassium reducing rate of rice, wheat and oilseed rape under different soil K supply levels with straw incorporation. *Scientia Agricultura Sinica* (中国农业科学), 2017, **50**(19): 3745–3756 (in Chinese)
- [12] Chen Y (陈 洋), Qi Y-B (齐雁冰), Wang Y-Y (王茵茵), *et al.* Spatial variability and factors affecting soil available potassium in the central Qinling-Daba mountain area. *Research of Environmental Sciences* (环境科学研究), 2017, **30**(2): 257–266 (in Chinese)
- [13] Hua K-K (花可可), Wang D-Z (王道中), Guo Z-B (郭志彬), *et al.* Effects of long-term fertilization on soil potassium utilization and budgeting in vertisol relative to application method. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2017, **54**(4): 978–988 (in Chinese)
- [14] Ji H-J (冀宏杰), Zhang H-Z (张怀志), Zhang W-L (张维理), *et al.* Farmland potassium balance in China: A review. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2017, **25**(6): 920–930 (in Chinese)
- [15] Luo W-J (罗为检), Wang K-L (王克林), Liu M (刘明), *et al.* Research progress on impact of land use and its patterns change on ecoenvironment. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (中国生态农业学报), 2003, **11**(2): 150–152 (in Chinese)
- [16] Li J (李 娟), Peng J-L (彭金灵), Kang J (康娟), *et al.* Effects of nitrogen-reduction on the soil profile nutrient distribution in paddy fields. *Chinese Journal of Tropical Crops* (热带作物学报), 2012, **33**(8): 1378–1383 (in Chinese)
- [17] Wu C, Huang J, Minasny B, *et al.* Two-dimensional empirical mode decomposition of heavy metal spatial variation in agricultural soils, Southeast China. *Environmental Science and Pollution Research International* 2017, **24**: 8302–8314
- [18] Lu D, Li C, Sokolwski E, *et al.* Crop yield and soil available potassium changes as affected by potassium rate in rice-wheat systems. *Field Crops Research*, 2017, **214**: 38–44
- [19] Li Q-Q (李启权), Wang C-Q (王昌全), Zhang W-J (张文江), *et al.* Prediction of soil nutrients spatial distribution based on neural network model combined with geostatistics. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2013, **24**(2): 459–466 (in Chinese)
- [20] Yin Z-Y (殷志遥), Huang L (黄 丽), Xue B (薛斌), *et al.* Effect of continuous straw incorporation on forms of potassium in the paddy soils. *Chinese Journal of Soil Science* (土壤通报), 2017, **48**(2): 351–358 (in Chinese)
- [21] Zhang H, Xu M, Ping Z, *et al.* Effect of 15-year-long fertilization on potassium quantity/intensity relationships in black soil in Northeastern China. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2011, **42**: 1289–1297
- [22] Wang F (王 飞), Lin C (林 诚), Li Q-H (李清华), *et al.* Increase effect of potassium supply and balance of yellow paddy soils through long-term different fertilization modes. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2017, **23**(3): 669–677 (in Chinese)
- [23] Liao Y-L (廖育林), Lu Y-H (鲁艳红), Xie J (谢坚), *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. *Acta Pedologica Sinica* (土壤学报), 2017, **54**(2): 456–467 (in Chinese)
- [24] He P, Yang L, Xu X, *et al.* Temporal and spatial variation of soil available potassium in China (1990–2012). *Field Crops Research*, 2015, **173**: 49–56
- [25] Qin C (秦 川), He B-H (何丙辉), Jiang X-J (蒋先军), *et al.* Soil nutrient characteristics of different land-use types in the Three Gorges Reservoir. *Acta Prataculturae Sinica* (草业学报), 2016, **25**(9): 10–19 (in Chinese)
- [26] Aa L-T (阿拉腾希胡日), Zeng X-B (曾希柏), Bai L-Y (白玲玉), *et al.* Effect of different land use on farmland soil nutrients. *Research of Agricultural Modernization* (农业现代化研究), 2010, **31**(4): 492–495 (in Chinese)
- [27] Zhao Z (赵 忠), Li P (李 鹏), Wang N-J (王乃江), *et al.* Distribution patterns of root systems of main planting tree species in Weibei Loess Plateau. *Chinese Journal of Applied Ecology* (应用生态学报), 2000, **11**(1): 38–40 (in Chinese)
- [28] Li S (李 珊), Li Q-Q (李启权), Wang C-Q (王昌全), *et al.* Profile distribution of paddy soil organic carbon and its influencing factors in Chengdu Plain. *Resources Science* (资源科学), 2018, **40**(7): 1397–1406 (in Chinese)
- [29] Zhang H-L (张宏玲), Yu D-S (于东升), Wang N (王 宁), *et al.* Comparative study of crop rotation systems and soil characteristic types influence on organic carbon density of the typical area in Chengdu. *Soils* (土壤), 2014, **46**(3): 419–425 (in Chinese)
- [30] Xu Y, Smith SE, Grunwald S, *et al.* Evaluating the effect of remote sensing image spatial resolution on soil exchangeable potassium prediction models in smallholder farm settings. *Journal of Environmental Management*, 2017, **200**: 423–433
- [31] Wang Q-A (王庆安), Tan T (谭 婷), Yang M (杨渺), *et al.* Macroscopical analysis of chemical fertilizer application as one of the factors affecting environment of agricultural production in Sichuan Province. *Sichuan Environment* (四川环境), 2008, **27**(6): 18–24 (in Chinese)
- [32] Zhao H (赵 欢), Gou J-L (苟久兰), Zhao L-X (赵伦学), *et al.* Analysis on status of soil potassium and the effects of potassium fertilizer in dryland soil in Guizhou. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer* (植物营养与肥料学报), 2016, **22**(1): 277–285 (in Chinese)
- [33] Wang H-T (王宏庭), Jin J-Y (金继运), Wang B

(王 斌), *et al.* Effect of long-term potassium application and wheat straw return to cinnamon soil on wheat yields and soil potassium balance in Shanxi. *Plant Nutrition and Fertilizer Science* (植物营养与肥料学报), 2010, **16**(4): 801–808 (in Chinese)

[34] Yuan D-G (袁大刚), Fu S (付 帅), Feng P (冯 丕), *et al.* Soil fertility characteristics of urban green space among different ring road districts in west Chengdu. *Soils* (土壤), 2015, **47**(1): 55–62 (in Chinese)

[35] Bao Y-X (包耀贤), Wu F-Q (吴发启), Liu L (刘 莉), *et al.* Analysis on status of soil potassium and its influencing factors for terrace in Weibei dryland. *Journal of Soil and Water Conservation* (水土保持学报), 2008, **22**(1): 78–82 (in Chinese)

[36] Liu Y-C (刘禹池), Feng W-Q (冯文强), Qin Y-S (秦鱼生), *et al.* Effects of long-term fertilization and

straw mulch on crop yields and soil fertility under rice-wheat rotation in Chengdu Plain. *Southwest China Journal of Agricultural Sciences* (西南农业学报), 2015, **28**(1): 240–247 (in Chinese)

[37] Pang J-L (庞奖励), Zhang W-Q (张卫青), Huang C-C (黄春长), *et al.* The influence of land use change on soil development and over the loess tablelands in the northern Weihe River Basin, China. *Acta Geographica Sinica* (地理学报), 2010, **65**(7): 789–800 (in Chinese)

作者简介 董 琴,女,1993 年生,硕士研究生. 主要从事土壤与环境可持续研究. E-mail: S20163019@ 163.com

责任编辑 张凤丽