

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

董琴, 王昌全, 李启权, 李冰, 黎国阳, 徐强, 李萌, 曾杰熙

(四川农业大学资源学院, 成都 611130)

摘要: 为了准确获取土壤钾素剖面分布信息, 掌握区域钾素运移和合理精准施肥的需要, 基于 134 个剖面 (0—100 cm) 采样数据, 运用经典统计学和地统计学方法探讨了成都平原西部土壤速效钾剖面分布特征, 并对比分析了成土母质、土壤类型和土地利用方式对土壤速效钾剖面分布的影响。结果表明: 土壤速效钾含量在水平方向上具有一定的规律性, 其高值密集在金马河以南的崇州、邛崃和大邑区域, 而低值出现在都江堰—郫县—温江一带, 低值区面积占研究区面积 50% 以上, 总体呈现由西南部向东北部显著降低趋势。垂直方向上 0—100 cm 随土层逐渐降低, 表层土壤显著高于下层土壤 ($P < 0.05$), 下层土壤变幅 (最大值与最小值之差) 随土壤深度的增加逐渐减小。0—100 cm 不同土层块金系数均为 25%~75%, 表现为中等程度空间自相关性, 受结构性因素和随机因素共同影响。表层土壤速效钾空间分布受成土母质、土壤类型和土地利用方式共同影响, 土壤类型的解释能力最高, 分别是成土母质和土地利用方式的 1.97、2.58 倍; 下层土壤主要受成土母质和土地利用方式的影响, 影响程度均随着土层深度的增加而增加, 相较之下, 母质的影响程度增加更为显著。总体来看, 成土母质和土地利用方式是影响研究区土壤速效钾剖面分布的主控因素。

关键词: 土壤速效钾; 空间变异; 影响因素; 成都平原

中图分类号: S153.6

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2019)02-0176-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2019.02.028

Profile Distribution Characteristics of Soil Available Potassium and Its Influencing Factors in the Western Chengdu Plain

DONG Qin, WANG Changquan, LI Qiquan, LI Bing, LI Guoyang, XU Qiang, LI Men, ZENG Jiexi

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

Abstract: In order to accurately obtain the distribution information of soil potassium in the soil profile, and know well the regional migration of potassium and the need of reasonable precision fertilization, 134 soil profile (0—100 cm) samples were collected. Based on the sampling data, the distribution characteristics of soil available potassium in soil profiles of the western part of Chengdu Plain were studied through classical statistical and geostatistical methods, and the effects of parent material, soil type and land use on the available potassium distribution were compared and analyzed. The results found that the soil available potassium content had certain regularity in the horizontal direction, and its high value was concentrated in the Chongzhou, Qionglai and Dayi areas, which were south parts of the Jinma River, while the low value appeared in the Dujiangyan-Pixian-Wenjiang area. The area of the low-value-area accounted for more than 50% of the study area, and the overall showed a significant downward trend from the southwest to the northeast. In the vertical direction, the content of soil available potassium decreased with the increasing of soil depth in the range of 0 to 100 cm, and the available potassium content in top soil was significantly higher than that in the lower soil layer ($P < 0.05$). The amplitude of soil available potassium content (the difference between the maximum and the minimum) in the lower soil gradually decreased with the increasing of soil depth. The nugget coefficients of different soil layers within 0 to 100 cm were between 25% and 75%, showing moderate spatial autocorrelation, which were affected by structural and random factors. The spatial distribution of available potassium in surface soil was affected by soil parent material, soil type and land use pattern, and the explanatory ability of soil type was the highest, which was 1.97 and 2.58 times that of soil parent material and land use pattern, respectively. The spatial distribution of available potassium in lower layer soil was

收稿日期: 2018-10-05

资助项目: 国家科技支撑计划项目 (SQ2018YFD080041); 四川省教育厅科研项目 (2017SZ0188)

第一作者: 董琴 (1993—), 女, 硕士研究生, 主要从事土壤与环境可持续研究。E-mail: S20163019@163.com

通信作者: 王昌全 (1961—), 男, 博士, 教授, 主要从事土壤 (土地) 质量与环境可持续研究。E-mail: w.changquan@163.com

mainly affected by the parent material and land use pattern, and the impact extents both increased with the increasing of soil depth, however the influence of parent material was more significant. The results showed that the parent material and land use pattern were the main controlling factors, which affecting the profile distribution of soil available potassium in the study area.

Keywords: soil available potassium; spatial variation; influencing factors; Chengdu Plain

钾是作物生长发育所必需的营养元素之一,土壤速效钾是反映土壤钾素供应能力的重要指标,直接影响着农作物的产量和品质,而其供应与作物养分需求在空间上不协调一直以来是限制肥料高效利用的关键因素之一^[1-2]。一定区域内,由于地表自然环境和人为活动的影响,土壤速效钾含量在水平和垂直空间上均存在着明显的差异^[3]。在我国钾资源仍十分缺乏的情况下,城市化进程不断加快,土地利用程度进一步增加,土壤性质发生剧烈改变^[4-5],势必改变区域土壤钾素空间分布格局。因此,掌握土壤剖面速效钾的空间变异规律及影响分布的人为和环境因素,不仅为合理精准施肥提供基础,也可以为土地资源优化利用及环境保护提供数据支撑和科学依据^[6-8]。

成都平原位于四川盆地西部,全区地势平坦,水系遍布,土地垦殖率高,是四川省粮、油的重要生产基地^[9]。已有研究探讨了成都平原表层土壤速效钾含量水平,如欧勇胜^[10]研究表明,成都平原表层土壤速效钾含量收支失衡,钾素亏缺面积在日益扩大;何鑫等^[11]研究发现,成都平原表层土壤速效钾含量呈不断下降趋势,且分布不均;当前关于成都平原土壤钾素研究多集中于表层(0—20 cm)土壤,而作物根系分布可达 50—60 cm 深^[12],深层土壤养分也会对作物生长及产量产生显著影响^[13];许多研究^[12-14]表明,土壤速效钾分布状况与成土母质、土壤类型和土地利用方式等因素有关,但这些研究多从定性的角度解释单一因素对土壤速效钾的影响,并未揭示不同影响因素随土层深度的变化的影响程度。进一步开展不同土层速效钾含量特征研究,明确不同因素对土壤速效钾含量立体空间分布规律的影响,对指导农业生产和促进农业可持续发展等有重要意义。因此,本研究以成都市西部的金马河—西河流域为研究区,通过野外实地采样探究成都平原西部土壤水平和垂直 2 个方向上速效钾的含量特征,并采用定量分析方法揭示成土母质、土壤类型和土地利用方式等因素对其立体空间变异的影响,以期深化对研究区土壤钾素空间分布格局的认识,为掌握该区域土壤钾素运移、优化钾肥施肥方法和提高区域土壤钾素供给提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于成都平原西部(30°57′—31°01′N,

103°37′—104°88′E)(图 1a),总面积约 2 600 km²。共涉及 8 个县区,分别是都江堰、温江、郫县、崇州、大邑、邛崃、新津、双流。属于亚热带季风气候区,年平均气温 15.2~1.67 ℃,年日照时间 1 100~1 400 h,年降水量 900~1 300 mm,有利于发展农业。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和紫色冲积物等(图 1b)。土壤类型主要为水稻土,包括潜育水稻土、渗育水稻土、脱潜水稻土和潜育水稻土以及新积土 5 个亚类(图 1c)。区内主要农地利用方式有以种植园艺植物为主的园地、以稻—油、稻—麦和稻—蔬为主的耕地,还包括建设用地和草地等土地利用方式(图 1d)。

1.2 样品采集与分析

于 2016 年 4 月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上,以 3 km 为间隔进行布点采样,每个样点位采用混合取样的方法采集剖面土壤(0—20, 20—40, 40—60, 60—100 cm),全区共采集土壤样品 134 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。土壤样品经风干、研磨、去杂和过筛后,采用乙酸铵浸提—原子吸收分光光度法测定速效钾含量。

1.3 数据处理与分析方法

半方差函数是地统计学中研究土壤变异性的重要函数,反映了不同距离观测值之间的变化,是用来描述区域化变量结构性和随机性并存这一空间特征而提出的,其中块金值、基台值、块金效应和变程作为半方差函数的重要参数,可用来定量表示区域化变量在一定尺度上的空间变异和相关程度^[15]。计算公式为:

$$\gamma(h)=[1/2N(h)]\sum[Z_i-Z_{i+h}]^2$$

克里格插值方法是一个基于区域化理论的多元回归过程,是在变差函数分析基础上进行的一种线性、无偏、最优内插估计法,包括普通克里格、泛克里格法、指示克里格法和简单克里格法等。本研究主要采用普通克里格插值方法,它能给出最优估计,并充分考虑到土壤性质的空间变异。

采用域值法处理异常值^[16],土壤速效钾常规统计分析、方差分析和回归分析均在 SPSS 19.0 软件中完成。地统计分析首先采用 GS+7.0 软件进行半方

差分析,以获取土壤速效钾的最优理论半方差模型和参数,在半方差拟合模型的基础上利用 Arc GIS 10.0 软件的地统计模块进行空间插值,得到研究区土壤速效钾的空间分布图。

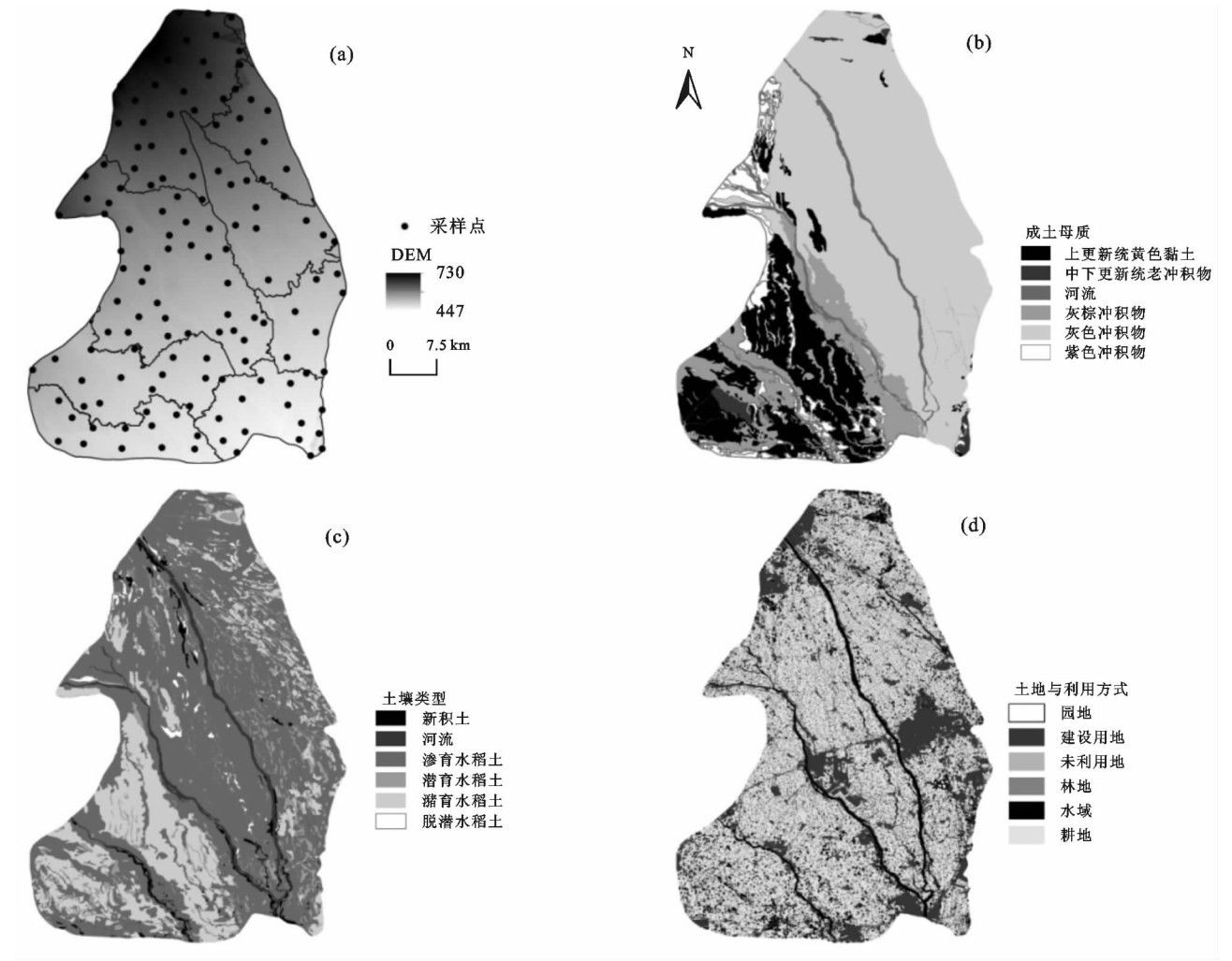


图 1 研究区位及相关信息

2 结果与分析

2.1 土壤钾素含量变化特征

2.1.1 总体统计特征 成都平原西部地区土壤速效钾含量整体偏低,总体处于缺乏或极缺乏水平^[17],且随土层深度增加而下降,表层速效钾含量分别是 20—40,40—60,60—100 cm 的 1.93,2.26,2.61 倍,表层与 20 cm 以下土层间差异达显著水平($P<0.05$),20 cm 以下各土层间差异不显著($P>0.05$)(表 1);土壤速效钾表聚现象十分明显,但与 1980 年(53

mg/kg^[10])数据对比,下降了 12.08%。从土壤速效钾含量变幅(最小值与最大值之差)来看,随着土层深度增大而减小,从变异系数来看,随着土层深度增大而增大,20 cm 以下土层变异系数达到 75% 以上,这说明表层土壤(0—20 cm)速效钾受到人为活动,如施肥、耕作措施等影响作用更大,而深层以下土壤可能受到成土母质等自然因素影响更甚。研究区内土壤速效钾含量统计参数中的偏度、峰度小,整体呈现对数正态分布特征。

表 1 研究区土壤速效钾含量统计特征

土层深度/cm	最小值/(mg·kg ⁻¹)	最大值/(mg·kg ⁻¹)	平均值/(mg·kg ⁻¹)	标准差	变异系数/%	偏度	峰度	数据分布类型
0—20	3.70	182.36	46.60a	33.94	72.83	−0.519*	0.080*	对数正态
20—40	2.84	102.43	24.13b	19.19	79.53	−0.131*	−0.507*	对数正态
40—60	0.35	81.10	20.62b	18.40	89.23	−0.657*	0.746*	对数正态
60—100	0.35	77.12	17.88b	17.25	96.48	−0.831*	0.551*	对数正态

注: * 表示对数转换后的偏度和峰度。同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。

2.1.2 空间结构分析 从表 2 和图 2 可以看出,4 个土层速效钾的半方差理论模型分别为高斯、指数、指数和球状模型; R^2 分别为 0.857,0.941,0.763 和 0.791,能较准确地反映成都平原西部土壤速效钾的空间变异结

构特征;变程分别为 4.24,29.4,41.7,23.19 km,说明不同土层土壤速效钾的空间自相关范围不同;块金值/基台值($C_0/(C_0+C)$)是用于判定区域化变量空间异质性

程度的重要参数^[17],不同土层块金系数均为 25%~75%,表现为中等程度空间自相关性,表明土壤剖面速效钾空间变异性受到结构性因素和随机因素共同影响。

表 2 研究区土壤速效钾半方差函数模型参数

土层深度/cm	模型	块金值	基台值	块金系数	变程	决定系数	残差
0—20	高斯	0.151	0.602	25.08	4.24	0.857	0.0319
20—40	指数	0.339	0.688	49.27	29.40	0.941	0.0054
40—60	指数	0.537	1.123	47.84	41.70	0.763	0.0847
60—100	球状	0.721	1.443	49.97	23.19	0.791	0.0842

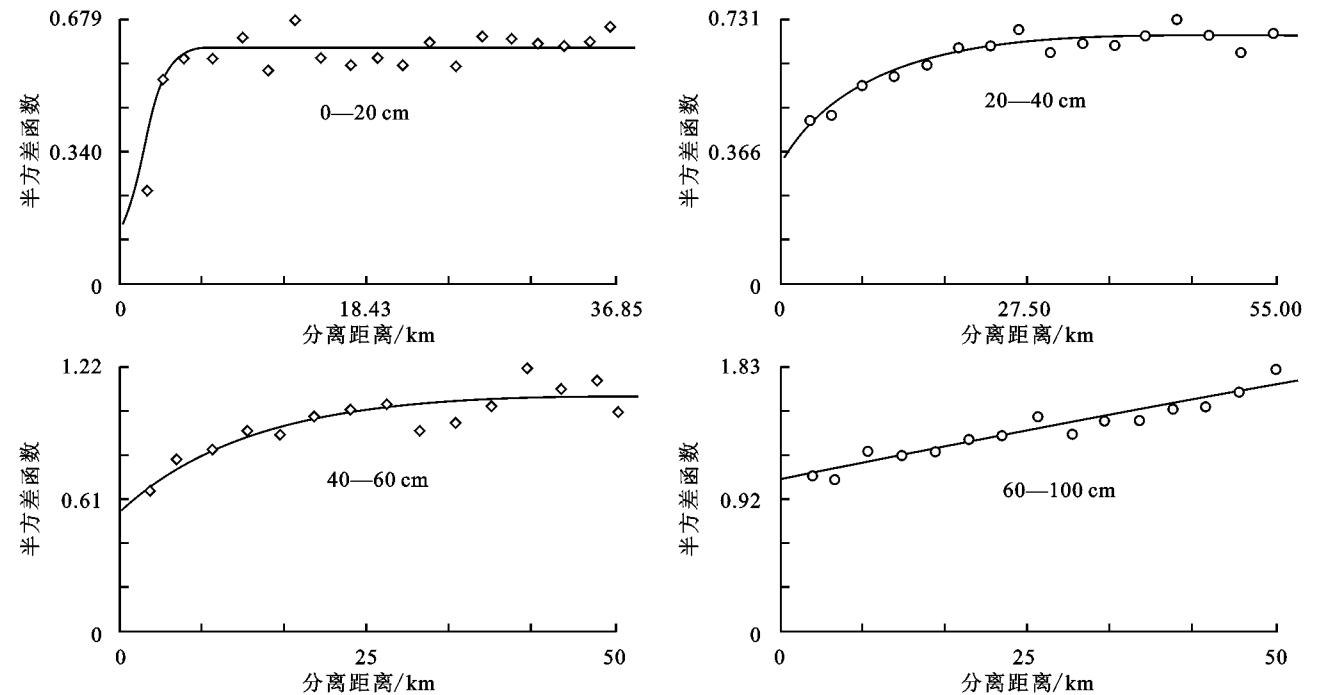


图 2 研究区土壤速效钾半方差函数

2.1.3 空间分布特征 从图 3 可以看出,0—20, 20—40,40—60,60—100 cm 土壤速效钾空间变异规律具有一致性,即西南部区域>东北部区域,整体处于缺乏~较缺乏水平。表层土壤高值区主要分布在郫县、崇州、大邑、邛崃、新津和双流的一个小团块区域,低值区主要分布在都江堰—郫县—温江一带,低值区分布面积较大,占研究区总面积的 50%以上,可见研究区表层大部分区域的土壤速效钾处于亏缺状态;20—40 cm 土壤速效钾含量相对表层土壤显著下降,土壤速效钾含量主要为 13~67 mg/kg,低值面积进一步扩大;40—100 cm 分布趋势与 0—40 cm 土层具有一致性,但随土层深度的加深,由西南部向东北部显著减少。造成这种区域差异的主要原因是都江堰—郫县—温江一带农业土地利用率高及复耕指数都较高,作物对养分的需求量大;同时近年来大量施用化学氮肥,而作物生长过程中吸收肥料是按一定比例吸收的,当氮肥被大量吸收过程中也必然加速对钾等元素的吸收,促使土壤中分解的速效钾消耗量增大,因而导致该地区速效钾在土壤中的含量明显偏低^[18-19]。

2.2 土壤速效钾含量影响因素

2.2.1 成土母质 母岩中的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,进而影响着土壤中钾素的分布^[20]。总体来看,灰色冲积物形成的土壤速效钾含量偏低,在 0—100 cm 土层范围内,均处于较低水平,其平均含量为 10.36~38.59 mg/kg;灰棕色冲积物形成的耕作层土壤速效钾含量最高(68.95 mg/kg),20—100 cm 范围内则下降至 29.19~34.10 mg/kg,呈现明显的下降趋势,这可能与灰棕冲积物区域土壤耕作强度大,农业投入水平高等有关^[21];上更新统黄色黏土和中下更新统老冲积物,主要分布于研究区的西南部区域,2 种成土母质形成的土壤速效钾含量仅在 60—100 cm 土层表现出显著差异($P<0.05$),其余土层彼此间差异不显著(图 4)。造成这种差异的原因:一方面与其母质来源中的含钾矿物有关;另一方面主要与土壤母质的分布区域与质地差异,导致土壤理化性质不同^[22]。相关研究^[23]表明,灰色冲积母质由岷江发源至成都平原,冲积距离较其他母质冲积物更远,黏粒含量更高,有利于土壤养分保持。这与本研究结果不同,主要是

由于其发育成的土壤土层较厚,土壤颗粒组成相对较粗,多为泥质沙土,养分易随水分向下层土壤迁移,造成土壤速效钾均值含量在整个土壤剖面偏低;上更新统黄色黏土和中下更新统老冲积物主要分布在大

邑—邛崃区域,该区域速效钾含量整体较高,同时,2种成土母质颗粒组成较细,质地黏重,导致其土壤速效钾易出现明显表聚现象,而底部为含泥砂粒石层,不利于养分保持。

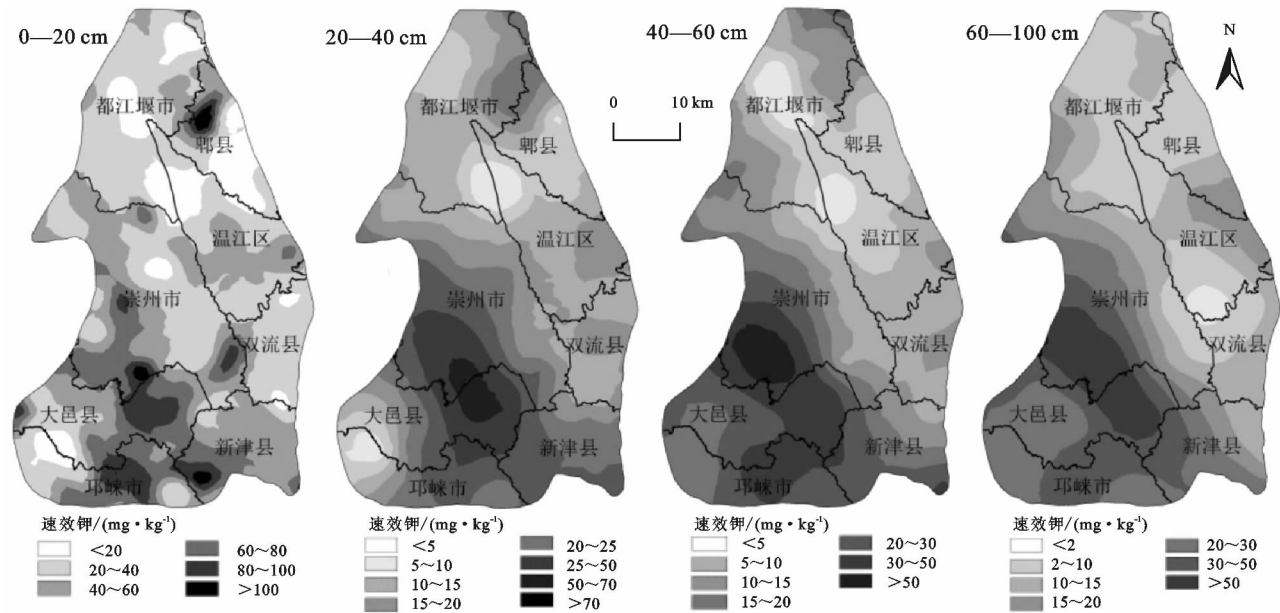
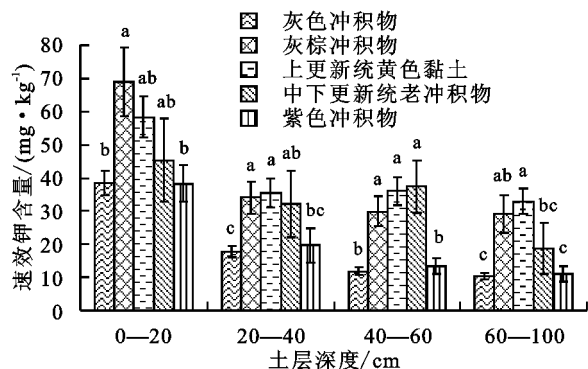


图 3 研究区土壤速效钾空间分布



注:同一钾素指标具有相同小写字母表示该平均值无显著差异 ($P>0.05$)。下同。

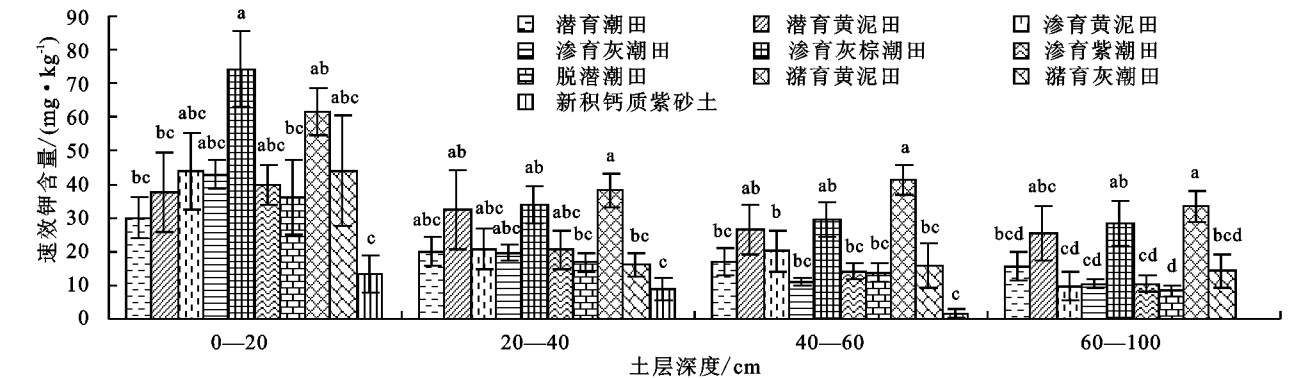
图 4 不同母质类型土壤速效钾含量统计特征

2.2.2 土壤类型 不同土壤类型具有不同的成土过程,因此土壤类型不同,其土壤钾素含量也有所差异^[24]。研究结果(图 5)表明,不同土壤类型速效钾含量总体随土层深度的增加呈降低趋势,且表层显著高于下层土壤 ($P<0.05$)。渗育型水稻土发育的 4 个土壤亚类在 0—40 cm 土层均无显著差异,在 40—100 cm 则下降至 29.38~9.75 mg/kg;潜育型水稻土发育的 2 个土壤亚类仅在表层无显著差异,在 20—100 cm 土层均表现为潜育黄泥田显著高于潜育灰潮田。这主要与母质来源有关,相关研究^[25]表明,不同土壤类型之间存在显著差异,主要原因是在形成各种土壤类型的基岩和成土母质类型不同。黄泥田主要分布在西河流域,成土母质以上更新统黄色黏土和中下更新统老冲积物为主,土壤速效钾含量较高;潮田主要分布在金马河流域,成土母质主

要以速效钾含量较低灰色冲积物为主。渗育灰棕潮田和潜育黄泥田速效钾均值含量较高,在整个土壤剖面无显著差异 ($P>0.05$),这主要因为渗育型和潜育型水稻土的土壤亚类质地黏重,对养分的吸持能力较强,提高了土壤保钾性能^[26]。而新积钙质土颗粒粗糙,保水性能差,吸收性能差,保肥能力较弱^[27],导致其表层和深层土壤速效钾含量均不高,应当结合当地生产实际经验,注意钾肥的补充和施肥时机的把握。

2.2.3 土地利用方式 土地利用方式不同,其地表覆盖及人为干扰影响程度不同,影响土壤钾素养分的输入和输出,进而影响土壤中的钾素养分贮量和有效性^[28]。有研究^[29]表明,土地利用方式不同对表层速效钾含量具有直接影响,其中对典型耕地和果园较为显著。从不同土地利用方式来看(图 6),表层速效钾含量显著高于下层土壤,其中,稻—麦、稻—蔬和稻—油 3 种轮作方式下,仅表层无显著差异,20—100 cm 土层都表现为稻—麦高于稻—蔬和稻—油,这主要与根系分布有关,蔬菜为一年多熟,蔬菜吸收较快,吸收量也较大,但其根系分布较浅,向下运移的钾素较少,而稻—麦根系分布较深,有利于钾素向下运移。从整个土壤剖面来看,均以果园土壤速效钾含量最高(76.25~30.98 mg/kg),以农林土壤最低(23.32~13.02 mg/kg),表层均值差达 52.93 mg/kg,这一结果与欧勇胜^[10]在同一区域的研究结果类似,土地利用方式不同,农户的投入和管理措施及水平也就不同。主要是因为近年来成都平原大力发展花卉和果业^[30],由于果园收益较高,农户对果园钾肥施用量

大,所以果园表层速效钾含量显著高于其他地类;同时,果树根系较粗且分布较深,利于钾素向下运移,导致其土壤剖面速效钾含量整体较高。而园林地一般较少施用钾肥,其表层和深层土壤钾含量均不高。



注:由于新积钙质紫砂土土层薄,该类型只有 3 层。
图 5 不同土壤类型土壤速效钾含量统计特征

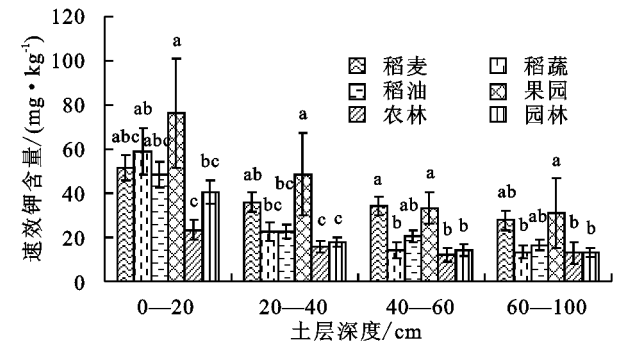


图 6 不同土地利用方式土壤速效钾含量统计特征

2.3 土壤速效钾含量影响因素的回归分析

分别以成土母质、土壤类型和土地利用方式为自变量进行回归分析,以定量揭示不同因素对区域不同土层速效钾空间变异的影响程度。从表 3 可以看出,成土母质、土壤类型和土地利用方式对土壤速效钾均有显著影响,但各因素的影响程度随土层深度的变化有所差异。从整个土壤剖面来看,土壤类型能独立地解释研究区 5.6%~18.3% 的土壤速效钾空间变异,土地利用方式的解释能力为 7.1%~14.6%,成土母质的解释能力最高,可独立解释土壤速效钾剖面分布 9.3%~29.3% 的变异。从不同土层来看,表层土壤

受成土母质、土壤类型和土地利用方式共同影响,土壤类型的解释能力最高,分别是成土母质和土地利用方式的 1.97、2.58 倍,主要是由于土壤类型的独立解释能力与土壤的分类级别有关,相关研究^[31]表明,土壤分类级别越低,对土壤速效钾空间变异的反应能力越大。因为土属是在考虑成土条件、主要成土过程和附加成土过程差异的基础上以母质特性为依据划分的分类单元,所以本研究土壤类型以土属划分,在一定程度上揭示区域结构影响的综合影响,因此,土壤类型对表层土壤速效钾独立解释能力最高。成土母质对不同土层速效钾均具有显著影响($P<0.05$),影响程度随土层深度的增加而增大,相关研究^[32]表明,黏土矿物是土壤钾素供应的初始来源,母质遗传了基岩矿物的特性,构成了土壤钾素有效性的载体。本研究表明,成土母质是土壤速效钾剖面变异重要的单因子。土地利用方式对 0—60 cm 土层都具有显著影响,影响程度随土层深度增加而增大,表明人为耕作施肥活动对研究区土壤速效钾的影响到 60 cm 深。研究结果表明,成土母质和土地利用方式是影响研究区土壤速效钾剖面分布的主控因素。

表 3 不同因素对土壤速效钾的回归分析结果

影响因素	0—20 cm		20—40 cm		40—60 cm		60—100 cm	
	Sig	校正决定系数 R^2	Sig	校正决定系数 R^2	Sig	校正决定系数 R^2	Sig	校正决定系数 R^2
成土母质	<0.01	0.093	<0.01	0.149	<0.01	0.293	<0.01	0.199
土壤类型	<0.01	0.183	>0.05	0.040	<0.01	0.056	>0.05	0.020
土地利用方式	<0.01	0.071	<0.01	0.107	<0.01	0.146	>0.05	0.050

3 结论

(1)土壤速效钾含量在水平方向上具有一定的规律性,其高值密集在金马河以南的崇州、邛崃、大邑区域,而低值出现在都江堰—郫县—温江一带,低值区面积占研究区面积 50% 以上,土壤速效钾剖面分布总体呈现由西南部向东北部显著降低趋势;垂直方向

上,表层速效钾含量范围为 3.70~182.36 mg/kg,平均含量为 46.60 mg/kg,属于缺乏水平,相对 1980 年速效钾含量降低了 12.08%。下层土壤速效钾含量逐渐降低。不同土层块金系数均为 25%~75%,表明土壤剖面速效钾空间变异性受到结构性因素和随机因素共同影响。

(2)各因素对不同土层速效钾的影响程度随土层深度变化有所不同,表层土壤受成土母质、土壤类型和土地利用方式共同影响,土壤类型独立解释能力最高,分别是成土母质和土地利用方式的 1.97,2.58 倍;下层土壤主要受成土母质和土地利用方式共同影响,成土母质和土地利用方式的影响程度均随土层深度的增加而增大,母质的影响程度增加更为显著。因此,在探讨成都平原速效钾剖面分布时,应重点考虑成土母质和土地利用方式的影响作用。

参考文献:

- [1] Du H, Wang K, Peng W, et al. Spatial heterogeneity of soil mineral oxide components in depression between karst hills, Southwest China[J]. Chinese Geographical Science, 2014, 24(2): 163-179.
- [2] 刘淑娟,张伟,王克林,等. 桂西北喀斯特峰丛洼地表层土壤养分时空分异特征[J]. 生态学报, 2011, 31(11): 3036-3043.
- [3] 徐剑波,宋立生,彭磊,等. 土壤养分空间估测方法研究综述[J]. 生态环境学报, 2011, 20(8): 1379-1386.
- [4] Ouyang W, Huang H, Hao F, et al. Synergistic impacts of land-use change and soil property variation on non-point source nitrogen pollution in a freeze-thaw area[J]. Journal of Hydrology, 2013, 495(495): 126-134.
- [5] 田晓飞,李成亮,张民,等. 钾肥用量对大蒜-棉花套作体系产量和土壤钾素有效性的影响[J]. 水土保持学报, 2017, 31(3): 277-282.
- [6] Dent D. Soil as world heritage[M]. Berlin, Germany: Springer Netherlands, 2014.
- [7] Sardans J, Peñuelas J. Potassium: Aneglected nutrient in global change[J]. Global Ecology and Biogeography, 2015, 24(3): 261-275.
- [8] 徐莉,闫俊杰,陈晨,等. 新疆察布查尔县农耕层土壤养分空间特征及其与地形因子的关系[J]. 水土保持通报, 2018, 38(4): 38-45.
- [9] 张玲娥,双文元,云安萍,等. 30 年间河北省曲周县土壤速效钾的时空变异特征及其影响因素[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 923-933.
- [10] 欧勇胜. 成都平原土壤钾素空间变异及其模拟研究[D]. 四川 雅安: 四川农业大学, 2006.
- [11] 何鑫,王昌全,高成凤,等. 成都平原大尺度下土壤质量空间变异研究[J]. 安全与环境学报, 2009, 9(4): 85-91.
- [12] Blanchet G, Libohova Z, Joost S, et al. Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland[J]. Geoderma, 2017, 290: 107-121.
- [13] Taghizadeh-Toosi A, Olesen J E, Kristensen K, et al. Changes in carbon stocks of Danish agricultural mineral soils between 1986 and 2009[J]. European Journal of Soil Science, 2014, 65(5): 730-740.
- [14] Antwi M, Duker A A, Fosu M, et al. Geospatial approach to study the spatial distribution of major soil nutrients in the Northern region of Ghana[J]. Cogent Geoscience, 2016, 2(1): 1-13.
- [15] 李龙,姚云峰,秦富仓. 黄花甸子流域土壤全氮、速效磷、速效钾的空间变异[J]. 生态学杂志, 2015, 34(2): 373-379.
- [16] 陈涛,常庆瑞,刘京,等. 黄土高原南麓县域耕地土壤速效养分时空变异[J]. 生态学报, 2013, 33(2): 554-564.
- [17] 四川省土壤普查办公室. 四川省第二次土壤普查数据资料汇编[M]. 成都: 四川省农牧厅, 1992.
- [18] 古翼瑞. 成都平原以水稻为核心的种植模式综合效益分析与评价[D]. 成都: 四川农业大学, 2016.
- [19] 刘英华. 成都平原区土壤质量时空变异研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2004.
- [20] 陈印军,王晋臣,肖碧林,等. 我国耕地质量变化态势分析[J]. 中国农业资源与区划, 2011, 32(2): 1-5.
- [21] 刘禹池,冯文强,秦鱼生,等. 长期秸秆还田与施肥对成都平原稻-麦轮作下作物产量和土壤肥力的影响[J]. 西南农业学报, 2015, 28(1): 240-247.
- [22] 艾尤尔·亥热提,王勇辉,海米提·依米提. 艾比湖湿地土壤速效钾空间变异性分析[J]. 土壤通报, 2015, 46(2): 375-381.
- [23] 吴若玉. 环溪河流域土壤钾素空间分布及影响因素研究[D]. 成都: 四川农业大学, 2007.
- [24] 师江澜,李秀双,王淑娟,等. 长期浅耕与秸秆还田对关中平原冬小麦-夏玉米轮作土壤钾素含量及层化比率的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(11): 3322-3328.
- [25] 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.
- [26] 闫良. 不同母质发育的砖红壤中氮、钾垂直运移特征初步研究[D]. 海口: 海南大学, 2011.
- [27] 王婷,周海燕,李利利,等. 长期不施化学钾肥对陇东旱塬作物产量及土壤速效钾含量的影响[J]. 中国土壤与肥料, 2015(5): 44-49.
- [28] 庞奖励,张卫青,黄春长,等. 渭北高原土地利用变化对土壤剖面发育的影响: 以洛川—长武塬区耕地转为苹果园为例[J]. 地理学报, 2010, 65(7): 789-800.
- [29] Blanchet G, Libohova Z, Joost S, et al. Spatial variability of potassium in agricultural soils of the canton of Fribourg, Switzerland[J]. Geoderma, 2017, 290: 107-121.
- [30] 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.
- [31] 周晓阳,周世伟,徐明岗,等. 中国南方水稻土酸化演变特征及影响因素[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4811-4817.
- [32] Guan F, Xia M, Tang X, et al. Spatial variability of soil nitrogen, phosphorus and potassium contents in Moso bamboo forests in Yong'an City, China[J]. Cate-na, 2017, 150: 161-172.