

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2022.06.024

邓茜, 方红艳, 张元媛, 等. 四川盆地耕地土壤 pH 空间变异特征及影响因素. 土壤, 2022, 54(6): 1283–1290.

四川盆地耕地土壤 pH 空间变异特征及影响因素^①

邓茜¹, 方红艳¹, 张元媛¹, 李呈吉¹, 宋靓颖¹, 冉敏¹, 代天飞², 王昌全¹, 李启权^{1*}

(1 四川农业大学资源学院, 成都 611130; 2 四川省绿色食品发展中心, 成都 610041)

摘要: 基于四川盆地 4 362 个耕地表层土壤(0 ~ 20 cm)采样点数据, 采用地统计学法、方差分析和回归分析法分析了该区域耕地表层土壤 pH 的空间分布特征及不同影响因素对土壤 pH 空间变异的影响程度。结果表明: 研究区土壤 pH 介于 3.53 ~ 8.76, 平均为 6.54, 以微酸性至中性为主; 变异系数为 18.89%, 属于中等程度的空间变异。半方差分析表明, 指数模型为该区域土壤 pH 变异的最佳拟合模型, 块金效应为 49.97%, 属于中等程度的空间自相关性, 受结构性因素和随机性因素共同影响。空间分布上, 整体呈现北高南低、西高东低、中间高四周低的空间分布格局。回归分析结果表明, 土壤 pH 的空间变异主要受到土壤类型、降水量、地形和耕地利用方式的影响。其中, 土壤类型和降雨量分别能独立解释 14.6% 和 11.6% 的土壤 pH 空间变异, 是该区域土壤 pH 空间变异的主控因素。

关键词: 土壤 pH; 空间变异; 影响因素; 四川盆地

中图分类号: S153.4; X144 **文献标志码:** A

Spatial Variability of Cropland Soil pH and Its Influencing Factors in Sichuan Basin

DENG Qian¹, FANG Hongyan¹, ZHANG Yuanyuan¹, LI Chengji¹, SONG Liangying¹, RAN Min¹, DAI Tianfei², WANG Changquan¹, LI Qiquan^{1*}

(1 Resources College, Sichuan Agricultural University, Chengdu 611130, China; 2 Sichuan Green Food Development Center, Chengdu 610041, China)

Abstract: Based on 4 362 topsoil samples (0–20 cm) collected in the croplands, geostatistical methods, variance analysis and regression analysis were used to evaluate the spatial distribution characteristics of soil pH and its influencing factors in the Sichuan Basin, China. The results show that soil pH in the study area is ranged from 3.53 to 8.76, with an average of 6.54, mainly from slightly acidic to neutral; the coefficient of variation is 18.89%, suggesting moderate spatial variability. The semi-variogram analysis shows that the exponential model is the best fitting model for soil pH variation and the ratio of nugget to sill is 49.97%, which suggest that soil pH has moderate spatial dependence and its spatial distribution is determined by structural and random factors. Overall, soil pH shows a trend of high in the north and the west, low in the south and the east, and high in the middle and low in the surrounding area. Soil type, precipitation, topographical factors and cultivated land use pattern have significant impacts on the spatial variation of soil pH. Specifically, soil type and precipitation are the main controlling factors for the spatial variation of soil pH which can explain 14.6% and 11.6% of soil pH variability respectively.

Key words: Soil pH; Spatial variability; Influencing factors; Sichuan Basin

耕地是我国最为宝贵的自然资源之一,是人类赖以生存的基础和保障^[1]。随着我国社会经济的快速发展、人口的持续增长和城市化进程的加快,耕地的面积不断减少,粮食安全受到威胁^[2]。为保证我国粮食安全,稳定耕地面积,提升耕地质量,需开展严格的耕地保护工作^[1]。土壤 pH 是评价耕地质量和决定耕

地产能的重要指标,直接影响着土壤的肥力状况、养分有效性、微生物的活性和作物的生长发育^[3–5]。作为一个区域化变量,土壤 pH 的空间分布受到自然和人为因素的综合作用,表现出明显的空间变异性,且不同的研究区域,其空间变异特征存在差异^[6–7]。如,四川省仁寿县^[6]和湖北省十堰市^[7]土壤 pH 具有中等

①基金项目: 四川省自然科学基金项目(2022NSFSC0104)资助。

* 通讯作者(liqq@reis.ac.cn)

作者简介: 邓茜(1997—),女,四川遂宁人,硕士研究生,主要从事区域土壤质量研究。E-mail: dddq069@126.com

程度的空间变异性和空间自相关性;川西平原^[8]和关中平原^[9]土壤 pH 则表现为弱的空间变异性和中等程度的空间自相关性;延安市^[9]、徐州市^[10]土壤 pH 则表现出弱的空间变异性和强烈的空间自相关性。研究表明,土壤 pH 的空间变异主要受到区域内成土母质、土壤类型、气候和地形条件等结构性因素以及土地利用方式、施肥等随机性因素共同影响,但区域不同,其主控因素也不同^[9,11]。如,安徽省六安市^[11]、陕西省榆林市^[9]土壤 pH 空间变异的主控因素为土壤类型和成土母质,而山西省临汾市^[12]则主要受到土地利用方式的影响。已有的研究多集中在村级或县域等较小的空间尺度上,对更大尺度土壤 pH 空间变异性的研究相对较少。揭示大尺度耕地土壤 pH 空间变异特征及其影响因素,对于调控土壤酸碱度、提升耕地质量、开展农业生态地理区划和制定农业宏观决策具有重要意义。

四川盆地地处我国西南部,全区土壤肥沃,农业历史悠久,耕地面积广阔,在西南的粮食生产中占据着重要的地位。目前,针对该区域土壤性质空间变异特征的研究,多以局部地区土壤有机碳以及氮磷钾等养分为主^[13-14],而尚未有研究分析整个四川盆地土壤 pH 的空间分布特征及其影响因素。该研究选择整个四川盆地为研究区,采用地统计学方法分析当前该区域耕地表层土壤 pH 的空间分布特征,运用方差分析和回归分析等定量分析方法量化土壤类型、气候、地形因子和耕地利用方式等因素对土壤 pH 空间变异的影响程度,揭示控制土壤 pH 空间变异的主要影响因

素,以期为该区域土壤酸碱度的调控、耕地质量保护与提升以及农业区划提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

四川盆地是中国四大盆地之一,总面积约为 26 万多 km²,位于我国西南部内陆腹地,地理坐标 102°48′~109°16′E, 27°38′~32°54′N。四川盆地地域辽阔,海拔高差大,地貌多样,可分为盆地底部和边缘山地两个部分。底部地势低洼,海拔在 200~750 m,面积约 16 万多 km²。自西向东,分为川西成都平原、川中丘陵区 and 川东平行岭谷。边缘山地海拔多在 1 000~3 000 m,面积约为 10 万 km²。气候属于亚热带季风性气候,年均温 3~19℃,年降水量 700~1 700 mm。土壤类型包括紫色土、水稻土、黄壤、潮土、新积土和石灰(岩)土等。典型耕地利用方式包括旱地(以传统种植方式油菜-玉米/红薯/大豆或小麦-玉米/红薯/大豆为主)、水旱轮作地(以水稻-油菜或水稻-小麦)以及种植单季水稻的水田。

1.2 土壤样品采集与室内分析

2017—2019 年,在综合考虑研究区地形、土壤类型和典型耕地利用方式,兼顾样点的代表性及区域全覆盖的基础上进行布点(图 1),所有样点均分布在 3 种典型耕地利用方式上。全区共采集 4 362 个土壤样点,每个采样点采用多点混合法采集表层(0~20 cm)土壤样品约 1 kg。同时详细记录各样点的采集地点、采样时间、地形地貌、土壤类型、经纬度坐标

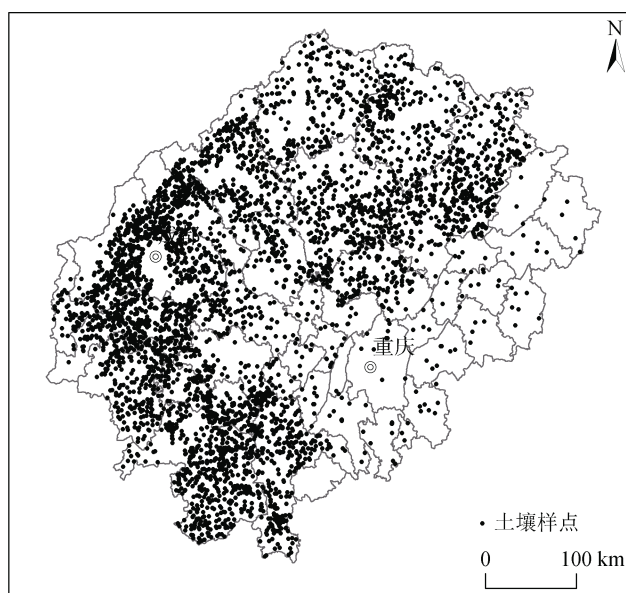
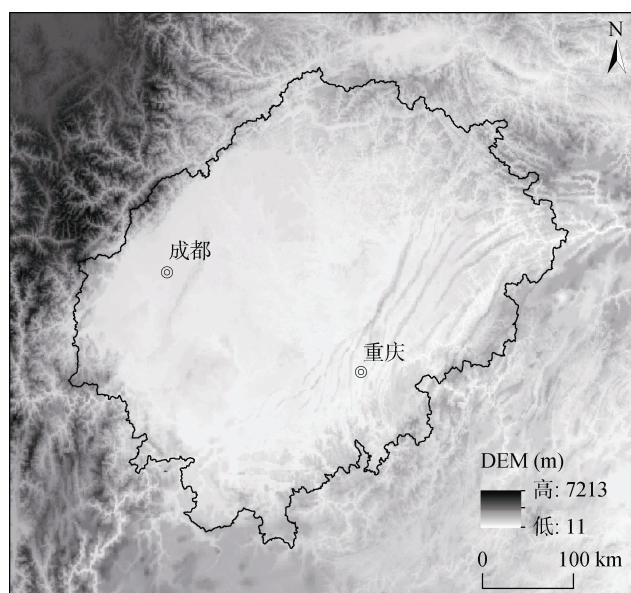


图 1 土壤采样点分布图
Fig. 1 Soil sampling locations

和海拔高度等信息。土壤样品带回实验室自然阴干，剔除杂质，碾磨过筛，采用 2.5 : 1 水土比($V:m$)浸提-pH 计法测定土壤样品的 pH。

1.3 环境数据来源与处理

气象数据来源于四川盆地及周边共 144 个县级气象站点 1981—2015 年的逐日气温数据和降水量数据。经剔除不完整记录的站点后，计算各站点 1981—2015 年平均气温和年降水量，采用普通克里格法插值得到研究区 30 m 空间分辨率的年平均气温和降水量空间分布栅格数据。高程数据为 ALOS 12.5m DEM 数据，来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(<https://www.resdc.cn/>)。基于该数据在软件 ArcGIS 10.2 中计算得到研究区坡度、汇流面积及地形湿度指数数据。

1.4 数据分析

利用地学统计软件 GS+9.0 对研究区耕地表层土壤 pH 进行半方差拟合,并根据决定系数(R^2)最大、残差(RSS)最小的原则,选择拟合精度最高的半方差模型;依据半方差模型参数,运用 ArcGIS 10.2 软件进行普通克里格插值,得到土壤 pH 空间分布图。采用交叉验证法来评估空间插值结果的不确定性。

采用方差分析、相关分析和回归分析探索土壤 pH 与各影响因素间的关系,揭示影响研究区土壤 pH 空间分布的主控因素。分析过程中常规统计、方差分析、相关分析和回归分析均在 SPSS 27.0 软件中进行。

2 结果与分析

2.1 研究区土壤 pH 的统计特征

统计结果(表 1)表明,研究区土壤 pH 的变幅为 3.53~8.76,均值为 6.54,变异系数为 18.89%,属于中等程度的空间变异。从不同的地貌分区来看,川中丘陵区土壤 pH 最高,其土壤 pH 分别高出成都平原区、盆周山地区与平行岭谷区 0.42、0.57 和 0.74 个单位;4 个地貌区土壤样点 pH 均为中等强度变异,其中川中丘陵区的变异系数最高,其余依次为盆周山地区、平行岭谷区和成都平原区。根据以往研究^[7],结合研究区实际,将研究区土壤 pH 划分为强酸性、酸性、微酸性、中性、弱碱性以及碱性 6 级(表 2)。其中以酸性土壤($\text{pH} \leq 6.5$)占比最大,占总样点数的 50.35%;其次为碱性土壤($\text{pH} > 7.5$),占总样点数的 31.96%;有 17.70% 的土壤样点呈中性。

表 1 研究区土壤样点 pH 描述性统计
Table 1 Descriptive statistics of soil pH in study area

地貌分区	样品数	平均值	标准差	最小值	最大值	峰度	偏度	变异系数(%)
成都平原区	508	6.37	0.96	3.90	8.49	-0.35	0.04	15.09
川中丘陵区	2 398	6.79	1.30	3.53	8.76	-1.24	-0.40	19.18
平行岭谷区	203	6.05	1.02	3.97	8.50	-0.53	0.52	16.88
盆周山区	1 253	6.22	1.13	3.95	8.50	-1.11	0.23	18.09
总计	4 362	6.54	1.24	3.53	8.76	-1.27	-0.09	18.89

表 2 研究区土壤样点酸碱度分级统计
Table 2 Classification statistics of soil pH in study area

级别	范围	样本数	频率(%)
强酸性	$\text{pH} \leq 4.5$	161	3.69
酸性	$4.5 < \text{pH} \leq 5.5$	956	21.92
微酸性	$5.5 < \text{pH} \leq 6.5$	1 079	24.74
中性	$6.5 < \text{pH} \leq 7.5$	772	17.70
弱碱性	$7.5 < \text{pH} \leq 8.5$	1 364	31.27
碱性	$\text{pH} > 8.5$	30	0.69

2.2 土壤 pH 的空间分布格局

2.2.1 空间结构特征 半方差拟合结果表明(表 3),土壤 pH 的最佳拟合模型为指数模型,模型的决定系数为 0.979,残差为 0.014,拟合精度最高,可以有效地反映四川盆地耕地表层土壤 pH 的空间结构特

征。从指数模型的参数来看,土壤 pH 的块金效应为 49.97%,介于 25%~75%,具有中等程度的空间自相关性,表明其空间变异主要是由结构性因素和随机性因素共同引起的。变程为 210 km,表明土壤 pH 空间自相关范围较大。

表 3 土壤 pH 的半方差模型
Table 3 Semi-variance function model of soil pH

模型	块金值	基台值	块金效应(%)	变程(km)	决定系数(R^2)	残差
指数	0.847	1.695	49.97	210	0.979	0.014
球状	0.074	1.540	4.81	30	0.449	0.318
高斯	0.241	1.541	15.64	25	0.463	0.310

2.2.2 空间分布特征 以指数模型的相关参数为基础,运用 ArcGIS 软件对研究区表层土壤 pH 进行

普通克里格插值, 得到其空间分布图(图 2)。交叉验证及预测方差分析结果表明, 土壤预测误差的平均值为 0.00 058, 均方根误差为 0.96 900, 除去部分采样

点较少的边界区域以外, 整个研究区的预测方差都相对较小(图 2B), 表明普通克里格插值法能够有效地预测出研究区土壤 pH 的空间分布格局。

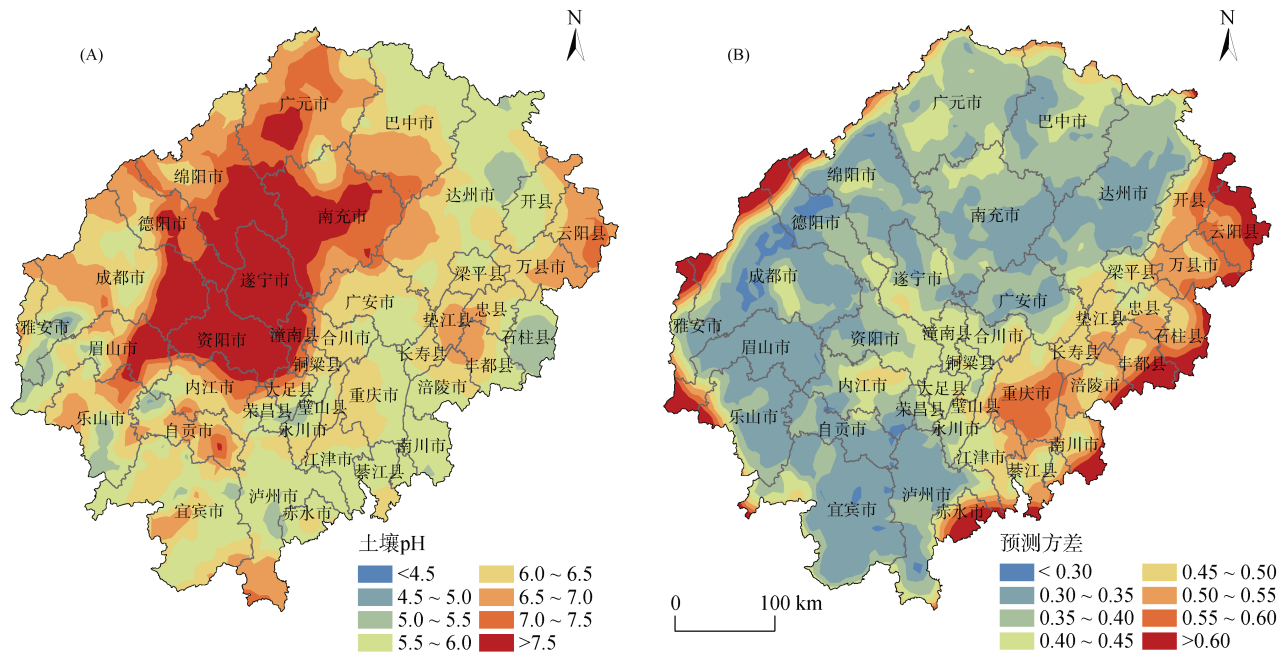


图 2 研究区土壤 pH 空间分布与预测方差
Fig. 2 Spatial distribution (A) and Kriging variance (B) of soil pH in study area

从插值结果来看(图 2A), 土壤 pH 空间分布具有明显的趋势, 总体呈现北高南低、西高东低、中间高四周低的分布格局。盆地大部分区域以微酸性和中性土壤分布为主, 其中, 微酸性土壤广泛分布于盆地西部、东部和南部, 如成都、乐山、泸州、宜宾、巴中、达州、重庆等地; 中性土壤主要分布在盆地中部丘陵区, 如绵阳、德阳、内江、广元、南充等地, 少部分零星分布于万县、乐山、宜宾等地; 碱性土壤集中分布在四川盆地的中部丘陵区, 如遂宁、南充、资阳等地区; 酸性至强酸性土壤呈团状零星分布在雅安市、石柱县等盆地边缘山地地区。

2.3 影响因素分析

2.3.1 土壤类型 方差结果(表 4)表明, 研究区不同土壤类型间土壤 pH 存在显著的差异($P<0.05$)。土壤 pH 从大到小依次为: 石灰(岩)土>新积土>潮土>紫色土>水稻土>黄棕壤>黄壤。其中, 石灰(岩)土、新积土和潮土土壤 pH 无显著差异, 但均显著高于紫色土、水稻土、黄棕壤和黄壤; 紫色土与水稻土土壤 pH 不存在统计学差异, 且与黄棕壤和黄壤差异显著; 黄棕壤土壤 pH 则显著高于黄壤。

2.3.2 耕地利用方式 研究区耕地利用方式对土壤 pH 存在显著影响(表 5), 表现为水田土壤 pH 显著小于旱地和水旱轮作地($P<0.05$), 而水旱轮作地和旱

地利用方式间土壤 pH 不存在显著差异。且水旱轮作地和旱地土壤总体上表现为中性, 而水田土壤则表现为微酸性。从变异程度来看, 各耕地利用方式下土壤

表 4 不同土壤类型土壤 pH 统计特征
Table 4 Statistical characteristics of soil pH under different soil types

土壤类型	样点数	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数(%)
石灰(岩)土	96	7.57 a	0.53	5.70	8.50	7.00
新积土	136	7.36 a	1.08	4.13	8.60	14.63
潮土	111	7.28 a	1.07	4.68	8.67	14.70
紫色土	1 154	6.81 b	1.33	4.04	8.76	19.47
水稻土	2 382	6.52 b	1.14	3.53	8.60	17.43
黄棕壤	18	5.89 c	0.95	4.30	7.37	16.08
黄壤	465	5.37 d	0.73	3.67	6.99	13.56

注: 同列数据小写字母不同表示差异显著($P<0.05$), 下同。

表 5 不同耕地利用方式土壤 pH 统计特征
Table 5 Statistical characteristics of soil pH under different cultivated land use patterns

土地利用类型	样点数	平均值	标准差	最小值	最大值	变异系数(%)
水旱轮作	1 335	6.59 a	1.10	3.53	8.50	16.66
旱地	1 980	6.57 a	1.35	3.67	8.76	20.50
水田	1 047	6.44 b	1.18	4.00	8.60	18.32

pH 的变异系数均大于 10%, 属中等程度的空间变异性。其中, 旱地土壤 pH 的变异系数最大, 水田次之, 水旱轮作地相对最小。

2.3.3 气温和降水 研究区表层土壤 pH 总体上随气温的上升呈先增加后降低的变化趋势, 但该关系并不显著; 与年平均降水量之间则呈现显著的负相关关系 ($P < 0.01$), 随着年均降水量的增加, 土壤 pH 呈明显降低趋势 (图 3B)。当年平均降水量 $< 1\,000\text{ mm}$ 时, 土壤 pH > 6.5 , 呈中性至碱性特征; 年平均降水量

$> 1\,000\text{ mm}$ 时, 土壤 pH < 6.5 , 呈微酸性至酸性。

2.3.4 地形 由图 4 可知, 研究区表层土壤 pH 与海拔、坡度、汇流面积对数和地形湿度指数密切相关。土壤 pH 与海拔和坡度呈显著的负相关关系 ($P < 0.05$), 随海拔和坡度增加而降低。汇流面积与地形湿度指数则对土壤 pH 产生显著的正向影响 ($P < 0.05$), 土壤 pH 随着汇流面积对数和地形湿度指数的增加呈逐渐增加的变化趋势, 表明在地势低洼的地区, 土壤 pH 相对较高。

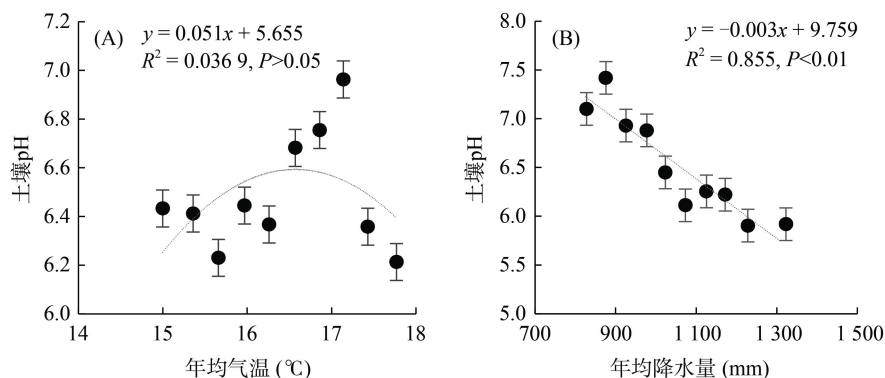


图 3 研究区土壤 pH 与气温和降水量的关系

Fig. 3 Relationships of soil pH with temperature and precipitation

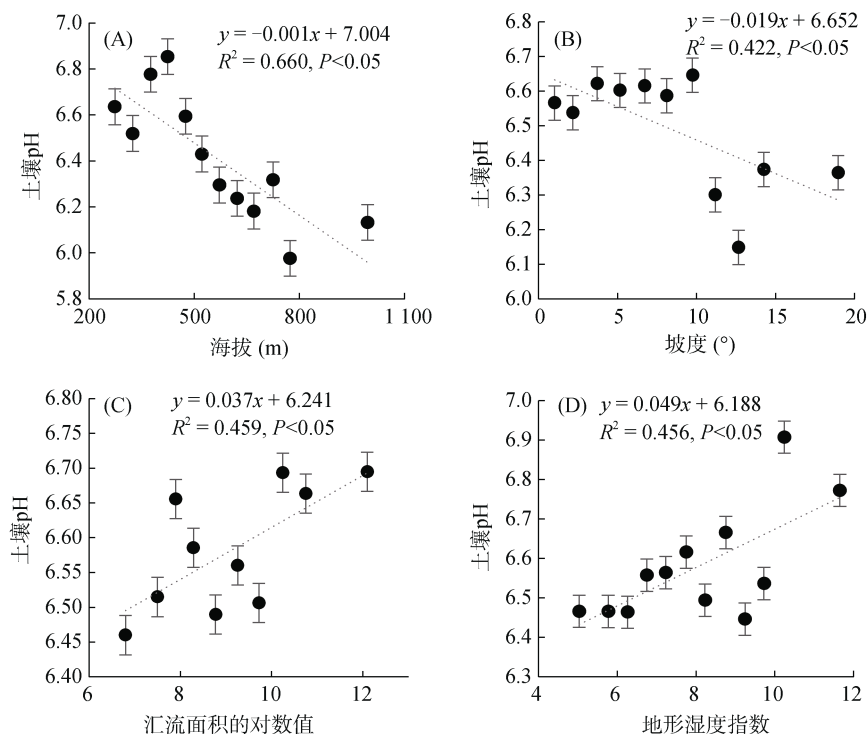


图 4 研究区土壤 pH 与不同地形因子的关系

Fig. 4 Relationships of soil pH with different terrain factors

2.4 主控影响因素分析

不同影响因素对土壤 pH 的回归分析结果表明 (表 6), 土壤类型、耕地利用方式、降水量和地形对

土壤 pH 的空间分布均有显著影响 ($P < 0.05$), 但各因素的影响程度有所差异。土壤类型对研究区土壤 pH 的空间分布的独立解释能力最强, 达到 14.6%; 其次

表 6 不同影响因素对土壤 pH 的回归分析结果
Table 6 Regression analysis of soil pH with different impacting factors

影响因素	<i>F</i>	决定系数 (<i>R</i> ²)	校正决定系数 (adjusted <i>R</i> ²)	<i>P</i>
土壤类型	125.62	0.148	0.146	<0.01
耕地利用方式	5.09	0.002	0.002	<0.05
降水量	571.77	0.116	0.116	<0.01
气温	1.49	0.000	0.000	>0.05
海拔	88.16	0.020	0.020	<0.01
坡度	11.28	0.003	0.002	<0.05
汇流面积	8.17	0.002	0.002	<0.05
地形湿度指数	13.99	0.003	0.003	<0.05

为降水量,其解释能力仅次于土壤类型,为 11.6%。地形因子可解释研究区 0.3%~2.0% 土壤 pH 空间变异。其中海拔对土壤 pH 空间分布的独立解释能力最大,为 2.0%;而坡度、汇流面积和地形湿度指数的解释能力较弱,分别为 0.2%、0.2% 和 0.3%。耕地利用方式对土壤 pH 的空间变异的解释能力仅为 0.2%,其独立解释能力较弱。

3 讨论

四川盆地表层土壤 pH 介于 3.35~8.76,平均为 6.54,以中性至微酸性为主,其平均水平显著高于同纬度贵州^[15]等黄壤广阔分布的地区。黄壤为我国中亚热带的地带性土壤,pH 多处于 4.5~5.5,呈酸性至强酸性反应^[16]。四川盆地具有温暖湿润的气候,钙质丰富且易破碎风化分解的紫色母岩,高低起伏易侵蚀的地形和高强度的农业利用活动等独特的成土综合条件,延缓了黄壤的发育,促进了紫色土的形成,故盆地底部多分布紫色土而黄壤较少,黄壤则作为基带土壤分布在盆地周边山地地区^[17]。近年来,众多学者围绕四川盆地不同区域土壤 pH 展开了研究,发现由于高强度的人为活动和多变的气候,盆地土壤发生了不同程度的酸化^[18-19]。有学者基于 1981 年和 2012 年的土壤数据,对盆地紫色丘陵区最大的仁寿县进行了研究,发现该区域土壤发生了显著的酸化,pH 减少了近 0.3 个单位^[18]。蒋欣焯^[19]对比了成都平原 1980 s 和 2010 s 的土壤数据,发现近 35 年间,研究区各层土壤均发生了明显的酸化,且表层土壤(0~20 cm)酸化幅度最大,下降了 1.2 个单位。以上研究充分地解释了该文的结果,虽然四川盆地内土壤多由中性和石灰性紫色母岩发育形成,但因发生了不同程度的酸化,整体上以微酸性至中性为主。

四川盆地表层耕地土壤 pH 整体呈北高南低、

西高东低、中间高四周低的空间分布趋势。综合人为和自然角度选择了 4 个方面的影响因素,分别探讨了各因素对研究区土壤 pH 空间分布的影响作用及其作用程度。各影响因素中,土壤类型对土壤 pH 的空间分布的独立解释能力最强,是影响其分布的主导因素。不同的土壤类型具有不同的成土条件和发育过程,其土壤特性也存在较大差异^[20]。紫色土是四川盆地分布最广的土壤类型,由盆地内出露的紫色砂、页、泥岩发育而成,在盆地内的分布具有明显的区域差异^[21]。盆地西北部和中部,紫色土发育程度相对较浅,土壤盐基含量丰富,pH 较高,多呈中性和碱性;盆地南部和西南部发育程度深,淋溶作用强,土壤酸性较高;由北到南,紫色土土壤 pH 总体呈现由高到低的分布趋势^[21]。黄壤的发育程度较深,淋溶作用剧烈,土壤酸度高,呈酸性至强酸性反应^[16],集中分布在盆地东部及其四周山地地区,盆地底部则相对较少。石灰(岩)土主要分布在盆地周边山区石灰岩出露的地方,其土体通常较薄并夹杂有石灰岩碎块,土壤 pH 较高^[21]。潮土和新积土主要分布在盆地的河谷平原,分别由河流冲积母质和新近冲积物、洪积物等沉积母质形成,性质深受母质的影响^[21]。水稻土是四川盆地最主要的耕地土壤类型,广泛地分布在盆地底部,主要由盆地内紫色土、黄壤、潮土等经过长期的水耕熟化形成,其土壤 pH 主要受到起源土壤的影响^[21]。

研究发现,随着降水量的增加,土壤 pH 呈明显减小趋势,这与其他的研究结果基本一致^[22-23]。这主要是因为随着降水量的增加,土壤的淋溶加剧,盐基离子被大量淋洗出土体,土壤的缓冲性能降低,造成土壤的酸化^[23]。此外,降水量的增加导致随雨水进入土壤的酸性物质的增加,是致使土壤 pH 变化的又一重要原因^[24]。四川盆地是我国主要的酸雨分布区,自然降水中含有大量 SO₂、SO₄²⁻ 和 NO₃⁻ 等制酸物质^[25]。这些制酸物质随降水进入土壤,引发土壤碱性物质的淋失,导致土壤 pH 下降^[26]。降水量对研究区土壤 pH 分布的影响表现为:pH 高值主要分布在盆地中部及西北部等年平均降水量相对较少的区域;而盆地东南、东北以及西南边缘等地区降水量相对较大(一般在 1 200 mm 以上),土壤的 pH 也较低^[21]。

地形作为成土的五大因素之一,支配着区域水热资源与成土物质的分布与再分配,与土壤性质的空间变异密切相关^[27]。地形因子对研究区土壤 pH 空间变异的解释能力为 0.3%~2.0%,其中海拔的解释能

力最强, 为 2.0%。海拔通过影响区域的小气候, 形成不同的水热条件, 导致土壤特性发生变化, 从而引起土壤酸碱性的变化^[7]。四川盆地地势总体四周高而底部低, 海拔对土壤 pH 的影响表现为: 土壤 pH 随着海拔高度的增加而降低; 在海拔较高、降水量较大的边缘山区, 土壤多呈酸性; 而在地势相对平缓、降水量较小的底部地区, 则以微酸性至中性土壤为主。

不同的耕地利用方式, 其耕作方式、灌排条件、轮作制度和施肥强度等均存在差异, 可以引起土壤的理化性质和土壤环境状况的改变, 从而导致土壤 pH 发生变化^[23,26,28]。研究区不同耕地利用方式下土壤 pH 的显著差异性表现为: 旱地和水旱轮作地土壤 pH 差异不显著, 但均显著高于水田土壤。这是因为研究区旱地土壤类型多为石灰性和中性紫色土为主, 土壤盐基含量丰富, pH 较高^[21]; 水旱轮作地以稻-麦和稻-油轮作为主, 作物根茬残留量大, 秸秆还田现象普遍, 再加之测土配方施肥项目的推广, 增加了土壤有机质含量, 提高了土壤的缓冲性能, 缓解了土壤酸化程度^[8-9]; 水田多位于地势低洼的地区, 长期处于淹水状态, 土壤水分含量大, 盐基离子容易发生淋溶作用被淋洗出土体, 土壤胶体上吸附着大量的 H^+ , 土壤 pH 通常较低^[23]。

4 结论

四川盆地耕地表层土壤 pH 的总变幅为 3.53 ~ 8.76, 平均为 6.54, 整体以微酸性至中性为主。从空间结构特征上看, 土壤 pH 具有中等程度的空间自相关性, 受结构性因素和随机性因素共同影响。空间分布上, 总体呈现北高南低、西高东低、中间高四周低的分布格局。从全区域的角度上, 土壤 pH 的空间变异受到土壤类型、降水量、耕地利用方式和地形条件的共同影响。在土地利用过程中可通过测土配方施肥、增加有机肥施用量、秸秆还田、施用碱性改良剂、调整种植制度、合理轮作等一系列措施来缓解土壤酸化过程。

参考文献:

- [1] Zhou Y, Li X H, Liu Y S. Cultivated land protection and rational use in China[J]. Land Use Policy, 2021, 106: 105454.
- [2] Yang Y Y, Liu Y S, Li Y R, et al. Quantifying spatio-temporal patterns of urban expansion in Beijing during 1985-2013 with rural-urban development transformation[J]. Land Use Policy, 2018, 74: 220-230.
- [3] Zhu Q C, Liu X J, Hao T X, et al. Modeling soil acidification in typical Chinese cropping systems[J].

- Science of the Total Environment, 2018, 613/614: 1339-1348.
- [4] Dai Z M, Zhang X J, Tang C, et al. Potential role of biochars in decreasing soil acidification - A critical review[J]. Science of the Total Environment, 2017, 581/582: 601-611.
- [5] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. Science, 2010, 327(5968): 1008-1010.
- [6] 张维, 李启权, 王昌全, 等. 川中丘陵县域土壤 pH 空间变异及影响因素分析——以四川仁寿县为例[J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1192-1199.
- [7] 吴正祥, 周勇, 木合塔尔·艾买提, 等. 鄂西北山区耕层土壤 pH 值空间变异特征及其影响因素研究[J]. 长江流域资源与环境, 2020, 29(2): 488-498.
- [8] 钟文挺, 李浩, 谢丽红, 等. 典型川西平原区耕地土壤养分与 pH 时空演变特征[J]. 土壤通报, 2020, 51(1): 63-70.
- [9] 王洪, 曹婧, 毋俊华, 等. 近 40 年来陕西省耕层土壤 pH 的时空变化特征[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1117-1126.
- [10] 毛应明, 桑树勋, 王学松, 等. 徐州市城区土壤 pH 值分布特征研究[J]. 环境科学与技术, 2013, 36(8): 77-80.
- [11] 向娇, 宋超, 石迎春, 等. 安徽省六安地区土壤 pH 空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤通报, 2021, 52(1): 34-41.
- [12] 冀晴, 张永清, 柴国丽, 等. 土地利用方式对晋南黄土高原村域范围内土壤 pH 值与养分的影响[J]. 江苏农业科学, 2017, 45(2): 229-232.
- [13] Gao X S, Xiao Y, Deng L J, 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.
- [14] Luo Y L, Shen J, Chen A F, et al. Loss of organic carbon in suburban soil upon urbanization of Chengdu megacity, China[J]. Science of the Total Environment, 2021, 785: 147209.
- [15] 秦松, 范成五, 孙锐锋. 贵州土壤资源的特点、问题及利用对策[J]. 贵州农业科学, 2009, 37(5): 94-98.
- [16] 熊顺贵. 基础土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001: 303-311.
- [17] 中国科学院成都分院土壤研究室. 中国紫色土——上篇[M]. 北京: 科学出版社, 1991: 15-24.
- [18] Li Q Q, Li S, Xiao Y, et al. Soil acidification and its influencing factors in the purple hilly area of southwest China from 1981 to 2012[J]. CATENA, 2019, 175: 278-285.
- [19] 蒋欣烨. 成都平原核心区土壤 pH 值时空变化特征及其影响因素研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2018: 40-42.
- [20] 吴德勇, 张新, 李启权, 等. 德阳旌阳区土壤氮素空间变异特征及影响因素分析[J]. 农业现代化研究, 2014, 35(6): 814-820.

- [21] 刘世全, 张明. 区域土壤地理[M]. 成都: 四川大学出版社, 1997.
- [22] Shen Y Y, Zhang Z Q, Xue Y. Study on the new dynamics and driving factors of soil pH in the red soil, hilly region of South China[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2021, 193(5): 304.
- [23] 杨树明, 余小芬, 邹炳礼, 等. 曲靖植烟土壤 pH 和主要养分空间变异特征及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1299–1308.
- [24] Duan L, Chen X, Ma X X, et al. Atmospheric S and N deposition relates to increasing riverine transport of S and N in southwest China: Implications for soil acidification[J]. Environmental Pollution, 2016, 218: 1191–1199.
- [25] Zhao S P, Yu Y, Yin D Y, et al. Spatial patterns and temporal variations of six criteria air pollutants during 2015 to 2017 in the city clusters of Sichuan Basin, China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 624: 540–557.
- [26] Li Q Q, Li A W, Yu X L, 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.
- [27] Qi L, Wang S, Zhuang Q L, et al. Spatial-temporal changes in soil organic carbon and pH in the Liaoning Province of China: A modeling analysis based on observational data[J]. Sustainability, 2019, 11(13): 3569.
- [28] Sun Y M, Guo G L, Shi H D, et al. Decadal shifts in soil pH and organic matter differ between land uses in contrasting regions in China[J]. Science of the Total Environment, 2020, 740: 139904.