

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.019

孔德莉, 张海涛, 何迅, 等. 基于 PLSPM 模型的鄂西南部分区域耕地土壤 pH 影响因素研究. 土壤, 2021, 53(4): 809–816.

基于 PLSPM 模型的鄂西南部分区域耕地土壤 pH 影响因素研究^①

孔德莉¹, 张海涛^{1*}, 何迅², 任文海², 胡群中², 肖斯予¹, 武学妍¹

(1 华中农业大学资源与环境学院, 武汉 43007; 2 湖北省耕地质量与肥料工作站, 武汉 430070)

摘要: 选用鄂西南部分区域采集的土壤 pH 数据, 进行其影响因素研究。结果表明: 研究区耕地土壤 pH 呈现东北向西南降低的趋势, 整体属于酸性土壤; 不同耕地类型土壤 pH 大小分别是: 水浇地>旱地>水田; 不同成土母质发育的土壤 pH 有所差异, 碳酸盐岩发育的土壤 pH 较高, 结晶岩和泥质岩发育的土壤 pH 较低; 耕地土壤 pH 多因素综合模型显示, 人为活动是该区耕地土壤 pH 的主要影响因素, 其后依次是气候、作物和地形; 不同土壤酸碱性的耕地对影响因素的响应程度存在差异, 中性和弱碱性土壤对人为活动表现为正向响应, 强酸性及弱酸性土壤对作物长势和地形同样表现为正向响应, 极强酸性土壤对人为活动的响应程度最低, 弱碱性土壤对气候的响应程度最强。

关键词: 偏最小二乘路径模型 (PLSPM); 土壤 pH; 影响因素; 耕地土壤; 耕地表层

中图分类号: S153 **文献标志码:** A

Influencing Factors of Farmland Soil pH in Southwest Hubei Based on PLSPM Model

KONG Deli¹, ZHANG Haitao^{1*}, HE Xun², REN Wenhai², HU Qunzhong², XIAO Siyu¹, WU Xueyan¹

(1 College of Resources and Environment, Huazhong Agricultural University, Wuhan 430070, China; 2 Hubei Provincial General Station of Cultivated Land Quality and Fertilizer, Wuhan 430070, China)

Abstract: In this paper the influencing factors of farmland soil pH in southwest Hubei Province were studied based on 1 757 Samples of 0–20 cm soil layer collected and measured in 2017. The results showed that pH decreased from northeast to southwest in the study region, and farmland soils were generally acidic. pH values of different farmland types were in the order of irrigated farmland > dry farmland > paddy field. pH values were different in soils derived from different parent materials, it was higher in soil derived from carbonate rock while lower in soil derived from crystalline and argillaceous rocks. Multi-factor integrated model of farmland soil pH showed that human activities were the main influencing factors of soil pH, followed by climate, crops and terrain. Farmland soils with different acidity and alkalinity responded differently to influencing factors, neutral and weakly alkaline soils positively responded to anthropogenic activities, strongly acidic and weakly acidic soils positively responded to crop growth and topography, very strongly acidic soils responded minimally to human activities, and weakly alkaline soils responded maximally to climate.

Key words: PLSPM model; Soil pH; Influencing factors; Cultivated soil; Topsoil of cultivated land

土壤 pH 作为土壤重要属性之一, 在土壤形成过程中受多种因子共同作用。据统计, 全世界耕地土壤约有 30% 呈现酸性^[1], 其中, 我国有近 1/5 的耕地土壤属于酸性土壤。土壤酸化会改变土壤理化、生化性质^[2]。因此, 揭示土壤 pH 空间特征及与影响因素的相关关系, 精准定量土壤 pH 的影响因素及影响程度, 有助于掌握区域土壤质量状况, 并为因地制宜地调控土壤 pH、提升耕地质量提供理论依据。

国内外学者对土壤 pH 变化及时空分异特征等方面有了较为深入的研究^[3-7], 而对于土壤 pH 影响因素的研究主要聚焦于利用常规数理统计法和回归拟合法来探究各因子与土壤 pH 的关系^[8-10]。这些方法使用简单, 能够较为快速地得到土壤 pH 与各因子的变化关系, 但缺少对影响因素共线性、复杂性以及各因素与土壤属性间交互作用等方面的深入讨论, 算法中忽略了区域内土壤 pH 是受多因素综合作用的结果,

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41371227)和农业农村部耕地质量专项(21190069)资助。

* 通讯作者(zht@mail.hzau.edu.cn)

作者简介: 孔德莉 (1995—), 女, 陕西宝鸡人, 硕士研究生, 主要从事土壤环境与生态模拟研究。E-mail: kongdeli923@163.com

且不同因素对土壤 pH 的影响方式存在差异,这将导致无法准确地融合多个辅助变量的解释作用。就此问题,近些年部分学者探讨性地将结构方程模型引入其中,较好地挖掘出多个土壤属性与多个影响因素的关系结构及交互作用的程度^[11-12]。目前,结构方程模型(structural equation model, SEM)主要包括基于极大似然估计的结构方程模型和基于偏最小二乘估计的结构方程模型,后者代表模型为偏最小二乘路径模型(partial least square path model, PLSPM),重点在于挖掘样本信息,对样本的要求较低,更适合对新构建的某一结构进行综合分析^[13]。鉴于此,本文以鄂西南部分区域采集到的 1 757 个耕地土壤样点数据为基础,分别分析不同耕地利用类型和成土母质下土壤 pH 的差异,并选取 PLSPM 模型对土壤 pH 和相关影响因素进行建模,测度土壤 pH 众多影响因素的主次关系、交互作用和影响程度。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

鄂西南部分区域,即湖北省西南部(29°07'10" ~ 31°24'13" N、108°23'12" ~ 110°38'08" E),东连荆楚,南接潇湘,西临渝黔,北靠神农架,总面积为 2.4×10⁴ km²。全境群山层叠,高低参差,呈现北部、西北部和东南部高,逐渐向中、南倾斜而相对低下的状态。该区属亚热带季风和季风性湿润气候,年平均降水量 1 600 mm;土壤类型多样,主要为水稻土、红壤、黄

壤和黄棕壤,耕地面积为 0.51 万 km²,熟制主要为一年一熟和一年两熟。

1.2 数据来源

研究区样品主要采集于 2017 年 0 ~ 20 cm 耕地土壤,共 1 757 个。其中水田、旱地和水浇地 3 种耕地类型的样点数分别为 352、1 277 和 128;第四纪黏土、河湖冲(沉)积物、红砂岩、结晶岩、泥质岩、砂岩、碳酸盐岩、紫色岩 8 种成土母质的样点数分别是 340、75、40、68、293、162、580 和 199 个。每个样点均使用 GPS 定位,土壤 pH 在水土质量比 2.5 : 1 下用 pH 计测定^[14]。使用 3 倍标准差法剔除异常值,经检验,本研究数据未存在异常值。

另外,从统计局、气象站和 NASA 等网站收集研究所需其他数据,包括:①数字高程模型数据库;②研究区 2017 年归一化植被指数和地表温度数据库;③气象站 2017 年月均降雨、湿度和日照时长数据库;④各县市 2017 年常用耕地面积、粮食总产量、氮肥数据库。

1.3 PLSPM 模型

PLSPM 模型由结构模型和测量模型组成,是一种分析多变量间复杂因果关系的综合分析模型,该模型不仅能够解决指标间存在的多重共线性问题,还可以计算不同变量对响应变量的直接效应和间接效应^[15]。本研究选取了分别表征土壤酸碱度、作物因素、气候因素、地形因素、人为活动的 33 个观测变量构建 PLSPM 模型,具体指标体系如表 1 所示。

表 1 指标体系
Table 1 Index system

潜变量	显变量	单位	潜变量	显变量	单位
土壤酸碱度(cidity-alkalinity)	土壤 pH(pH)	-	气候因素(climate)	地表温度_春(LST_spri)	℃
作物因素(crop)	归一化植被指数_春(NDVI_spri)	-		地表温度_夏(LST_sum)	℃
	归一化植被指数_夏(NDVI_sum)	-		地表温度_秋(LST_aut)	℃
	归一化植被指数_秋(NDVI_aut)	-		地表温度_冬(LST_win)	℃
	归一化植被指数_冬(NDVI_win)	-	地形因素(terrain)	高程(DEM)	m
气候因素(climate)	降雨_春(pre_spri)	mm		坡度(Slope)	°
	降雨_夏(pre_sum)	mm		坡向(Aspect)	°
	降雨_秋(pre_aut)	mm		曲率(Curvate)	-
	降雨_冬(pre_win)	mm		地形起伏度(RF)	-
	相对湿度_春(humi_spri)	%		地表粗糙度(R)	-
	相对湿度_夏(humi_sum)	%		地表切割深度(D)	-
	相对湿度_秋(humi_aut)	%		地形位置指数(TPI)	-
	相对湿度_冬(humi_win)	%		地形湿度指数(TWI)	-
	日照时长_春(sun_spri)	h	人为活动(human)	常用耕地面积(CCLA)	hm ²
	日照时长_夏(sun_sum)	h		粮食总产量(TGO)	t
	日照时长_秋(sun_aut)	h		氮肥(NF)	t
	日照时长_冬(sun_win)	h			

2 结果与分析

2.1 鄂西南部分区域耕地土壤 pH 空间分布

根据研究区耕地土壤 pH 数据范围, 可将其分为 5 级, 即极强酸性: $pH \leq 4.5$, 强酸性: $4.5 < pH \leq 5.5$, 弱酸性: $5.5 < pH \leq 6.5$, 中性: $6.5 < pH \leq 7.5$, 弱碱性: $7.5 < pH \leq 8.5$ 。如图 1 所示, 全境耕地土壤 pH 的空间分布具有明显的块状结构特征, 高值区主要分布在东北部, 如巴东县, 其中性及弱碱性耕地土壤样点所占比例最大, 约 50%, 说明该县的土壤酸性相对较轻; 低值区主要分布在西部及西南地区, 如来凤县、咸丰县和利川市, 50% 以上的耕地土壤样点 pH 处于极强酸性至强酸性状态, 弱碱性土壤样点占比不足 5%, 土壤酸性较强。总体上, 全区耕地土壤 pH 空间分布呈现东北高西南低的趋势, 大部分土壤 $pH < 6.5$, 整体酸性较高。

2.2 不同耕地利用类型和成土母质下土壤 pH 的差异

由表 2 可以看出, 3 种耕地利用类型中, 水田的

pH 平均值最小, 为 5.70, 旱地次之, 为 5.73, 水浇地 pH 平均值最大, 为 5.79。变异系数大小分别为: 水浇地(16.58%)>水田(15.79%)>旱地(15.18%)。从酸碱性样点占比统计看, 水浇地、旱地和水田 pH 多位于 4.5 ~ 6.5, 其样点占比分别为 71.09%、75.33%、74.72%。

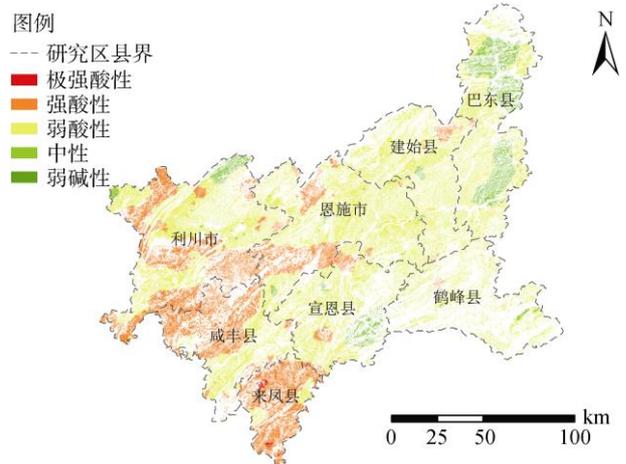


图 1 研究区耕地土壤 pH 空间分布

Fig. 1 Spatial distribution of farmland soil pH in southwest Hubei

表 2 不同耕地利用类型土壤 pH 描述

Table 2 pH description under different farmland types

利用类型	pH	变异系数(%)	酸碱性样点占比(%)				
			极强酸性	强酸性	弱酸性	中性	弱碱性
水浇地	5.79	16.58	6.25	39.84	31.25	14.06	8.60
旱地	5.73	15.18	4.39	40.80	34.53	16.52	3.76
水田	5.70	15.79	6.82	40.91	33.81	13.64	4.83

表 3 不同成土母质土壤 pH 描述

Table 3 pH description under different parent materials

成土母质	pH	变异系数(%)	酸碱性样点占比(%)				
			极强酸性	强酸性	弱酸性	中性	弱碱性
碳酸盐岩	5.92	14.36	2.07	31.72	41.38	19.31	5.52
紫色岩	5.87	15.67	3.52	37.69	33.67	18.59	6.53
河湖冲(沉)积物	5.81	15.32	6.67	33.33	41.33	10.67	8.00
红砂岩	5.77	17.68	10.00	37.50	32.50	10.00	10.00
砂岩	5.72	13.81	1.85	45.68	32.72	18.52	1.23
第四纪黏土	5.60	15.18	6.47	45.88	31.76	12.35	3.53
结晶岩	5.49	15.48	2.94	60.29	25.00	5.88	5.88
泥质岩	5.42	16.05	11.26	49.83	24.23	13.65	1.02

如表 3 所示, 不同成土母质 pH 平均值由高到低依次为碳酸盐岩、紫色岩、河湖冲(沉)积物、红砂岩、砂岩、第四纪黏土、结晶岩和泥质岩。酸碱性样点占比结果显示, 各母质发育的土壤超过 70% 的样点为强酸性和弱酸性。从各类成土母质发育的土壤 pH 的变异系数看, 红砂岩最高, 砂岩最低, 总体呈现成土

母质发育的土壤 pH 越低, 其变异系数越大的趋势。

2.3 耕地土壤 pH 多因素综合模型分析

图 2 显示了各潜变量与其对应显变量的相关关系, 其中显变量由起始 33 个筛选至 16 个, 包括地形因素中的地表粗糙度(R)、地表切割深度(D)、地形起伏度(RF)和坡度(Slope); 气候因素国的春、夏、秋

湿度(humi_spri、humi_sum、humi_aut)以及春、秋、冬的降雨(pre_spri、pre_aut、pre_win); 人为活动中的常用耕地面积(CCLA)、粮食总产量(TGO)及氮肥(NF); 作物因素中的春、冬归一化植被指数(NDVI_spri, NDVI_win); 土壤酸碱度中的土壤 pH(pH)。所有显变量的负载因子绝对值都大于 0.7, 说明其 50% 以上的变化都能被与之对应的潜变量所捕捉, 较好地描述了对应潜变量的特征。

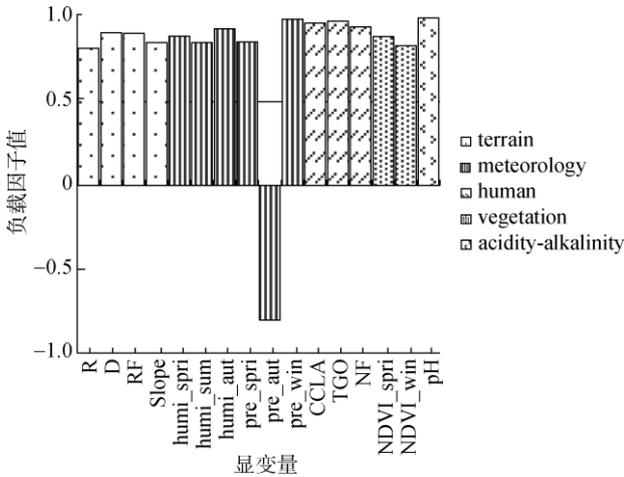


图 2 测量模型结果

Fig. 2 Results of measurement model

PLSPM 结果显示(图 3), 气候、地形和人为活动对作物的直接影响均为正向, 并通过影响作物进一步负向影响土壤 pH。气候对人为活动有较为强烈的负向直接影响, 并通过影响人为活动间接影响土壤 pH。气候、作物和人为活动对土壤 pH 均表示为负向直接影响。

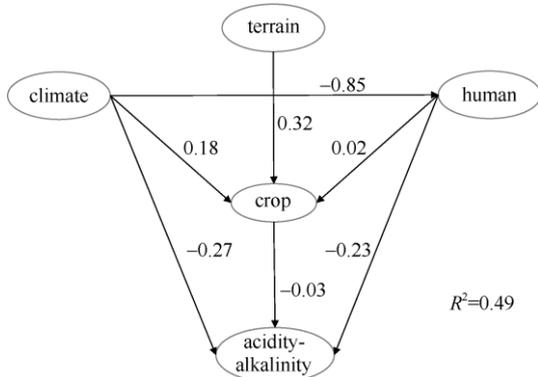


图 3 结构模型结果

Fig. 3 Results of structural model

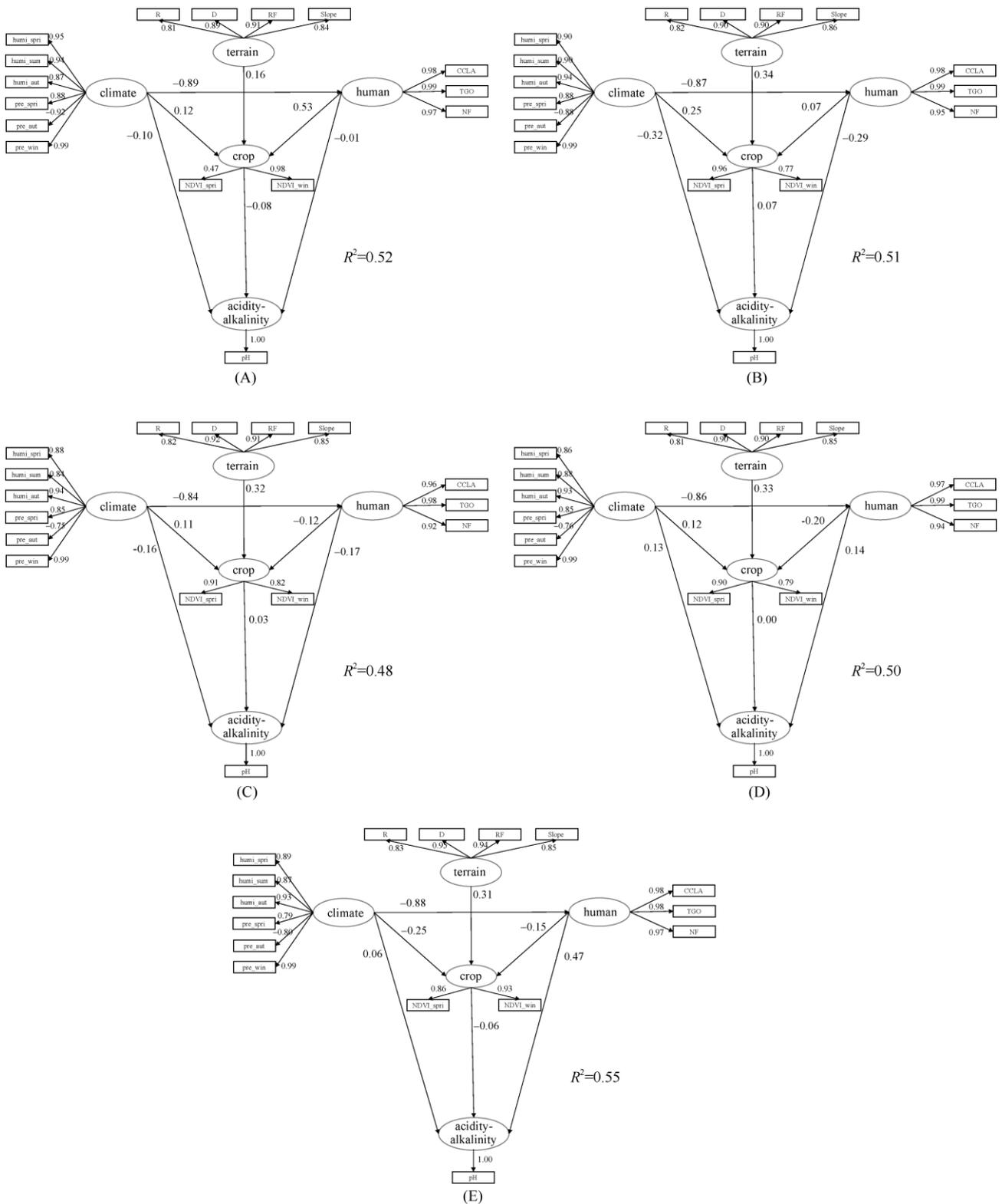
通过分解潜变量之间的直接效应、间接效应和总效应, 对各潜变量之间的关系以及对土壤 pH 的主要影响程度进行分析, 发现人为活动对土壤酸碱度作用

最大, 总效应为 -0.23 , 说明区域内人为活动较强的地方土壤 pH 相对较低。间接效应(human→crop→acidity-alkalinity)在总效应中的占比约 0.26%, 表明人为活动在增强对作物的作用后, 会进而导致土壤 pH 降低, 但是这条路径所起的作用相对于总效应很微弱; 气候是影响土壤酸碱度的第二大因素, 直接效应为 -0.27 , 间接效应为 0.19, 总效应为 -0.08 , 即气候作用较强时, 会直接导致土壤 pH 有降低的趋势, 但由于存在多条间接路径, 使得这一趋势有较大程度减缓, 其中主要表现在气候通过削弱人为活动强度进一步缓解土壤 pH 降低的趋势; 作物对土壤酸碱度的总效应为 -0.03 , 表明区域内作物长势好的地方, 土壤 pH 较低; 土壤酸碱度受地形的影响最小, 总效应为 -0.01 , 体现在间接路径上(terrain→crop→acidity-alkalinity), 可知随着地形变得陡峭, 作物长势会更加茂盛, 并进一步影响土壤 pH 向酸性发展。

2.4 不同酸碱性耕地土壤的影响因素差异性

不同酸碱性耕地受到影响因素的强弱存在一定差异, 即总体土壤 pH 存在异质性。图 4 为不同酸碱性土壤 PLSPM 结果, 其中潜变量到显变量的标准化因子负载系数估计值代表了前者对后者的解释程度, 数值的正负性则表明解释的方向差异。而潜变量之间的标准化路径系数则代表影响程度, 数值正负表明影响的方向差异。将土壤 pH 多群组的显变量进行比较, 可发现作物中 NDVI_spri 指标在土壤为极强酸性时, 负载值相对较小(0.47), 说明区域内极强酸性土壤 pH 的空间变化主要受冬天作物长势的影响。

不同酸碱性的耕地土壤中, 人为活动对土壤 pH 展现了一定的异质性特征。当土壤为中性和弱碱性时, 人为活动对土壤 pH 的总效应均是正值, 分别为 0.14 和 0.48, 即对中性和弱碱性土壤, 区域内人为活动干扰越强烈的地方, 土壤 pH 相对越高; 而对极强酸性、强酸性和弱酸性土壤, 结果则相反, 其中, 极强酸性耕地土壤 pH 对人为活动的响应相对最弱, 总效应为 -0.03 。气候对土壤 pH 的影响在不同酸碱性土壤上表现出了更明显的差异性。当土壤为极强酸性时, 气候对土壤 pH 的直接和间接影响强度有较大减弱, 分别为 -0.09 和 0.02; 当土壤为强酸性时, 气候对土壤 pH 的直接和间接效应分别为 -0.32 和 0.26, 即强酸性土壤 pH 变化对气候的直接和间接响应更加敏感; 当土壤为中性时, 气候对土壤 pH 的直接和间接作用方向与总体土壤 pH 群组的作用方向相反, 分别为 0.13、 -0.12 , 表明气候对中性土壤 pH 有直接的正向作用, 但同时由于气候减弱了人为活动的影响,



(图 A、B、C、D、E 分别为极强酸性、强酸性、弱酸性、中性和弱碱性土壤样点构建的 PLSM 模型)

图 4 不同酸碱性耕地土壤 PLSM 结果比较

Fig. 4 Comparison of PLSM results of farmland soils with different acidity and alkalinity

并进一步抑制了土壤 pH 升高的趋势，使得最后的总效应为 0.01，即中性土壤 pH 对气候的总响应程度有所下降；当土壤为弱碱性时，气候对土壤 pH 总效应

(-0.35)的绝对值最大，说明区域内气候作用强烈的地方，土壤 pH 相对较低，其中间接效应在总效应中的占比约 87.23%，主要是由于人为活动的影响在其中

起到了重要的中介作用。不同酸碱性土壤,作物对土壤 pH 的作用有所区别,当土壤为强酸性和弱酸性时,作物对土壤 pH 的总效应均为正值,分别是 0.07 和 0.04,即当 $4.5 < \text{pH} \leq 6.5$ 时,区域内作物长势越好,土壤 pH 相对越高;当土壤为极强酸性和弱碱性时,总效应分别为 -0.08 和 -0.07,表明极强酸性和弱碱性土壤上 pH 对作物作用的响应更敏感,而对于中性土壤,结果则相反。地形通过影响作物,间接影响土壤 pH,在土壤为极强酸性、强酸性、弱酸性、中性和弱碱性水平下,其总效应分别为 -0.01、0.02、0.01、0.00 和 -0.02,即强酸性和弱碱性土壤 pH 对地形的响应更明显。

3 讨论

土壤 pH 是衡量耕地质量的重要指标之一。研究区约 80% 的耕地土壤呈酸性($\text{pH} < 6.5$),土壤 pH 表现为从东北向西南逐渐降低的趋势,耕地质量整体情况较为严峻。研究发现,土壤 pH 变化主要是受到多变量共同与交互作用的影响。

3.1 鄂西南部分区域耕地土壤 pH 的影响因素

耕地是人类对自然环境下土地改造的一种具体表现形式,其中水田的土壤酸性最强,这可能是由于该区水田土壤复种指数高、施肥方式多偏化肥而不重视有机肥^[16],导致水田的土壤 pH 趋于更低。

成土母质是土壤形成的物质基础,泥质岩和结晶岩类风化物中硅酸盐含量较高,受强烈分解时,硅和盐基不断淋失,土壤溶液中 H^+ 浓度逐渐增加,因此,这两种母质发育的土壤 pH 相对较低。而具有抗酸性的母岩(碳酸盐岩)发育的土壤 pH 相对较高。

人为活动是影响鄂西南部分区域耕地土壤 pH 变化的重要方面,主要体现在直接作用上。区域内常用耕地面积大,对土壤的扰动会在一定程度上破坏土壤生态环境和土壤结构,造成土壤 pH 降低。而粮食的高产量主要来源于作物根系对土壤养分的吸收,大量盐基离子被吸收从而导致土壤酸缓冲容量下降。同时,过量氮肥的施用,会在土壤中产生大量的酸,加剧土壤中 H^+ 的不平衡^[17]。

研究区春夏秋相对湿度和春冬的降雨主要表现为自北向南逐步增高的趋势,降雨的淋溶作用会导致土壤中的碱性物质淋失,降低土壤对酸的缓冲性,逐渐形成土壤交换性酸^[18]。此外潮湿多雨的气候对植物的结构维持、营养物质输送等过程起着关键作用,利于作物的长势,并进一步间接影响土壤 pH 变化,同时也会引起水土流失而导致大量黏粒淋失,并

通过影响人为活动而对土壤 pH 产生间接影响。秋天降雨较为强烈,表现为由东南向西北逐渐增多的趋势,其对气候的负载为 -0.81,可能是由于研究区西北部,如利川市化肥施用量较高,秋季降雨量的增大会使得残留在土壤中的氮肥流失一部分,以缓解其对土壤的酸化程度。大气酸沉降也是影响土壤 pH 的一个因素。解淑艳等^[19]研究发现,2018 年湖北省的平均酸雨频率不到 5%。2017 年研究区环境质量状况报告指出,该区酸雨的检出率为 0.6%,显示研究区降雨中酸性物质含量少,土壤 pH 变化受降雨的淋溶作用更大。

研究区春冬两季的 NDVI 分别为 0.19 ~ 0.79、0.06 ~ 0.71,相较于北部,南部地区作物长势普遍较好,其下的动植物种类丰富且生长较快,这些生物死亡后,残体会分泌很多酸性物质,打破土壤中的酸碱平衡^[20]。另外,作物生长也会从土壤中移除盐基离子,降低土壤的酸缓冲性能,最终耕地土壤将呈现 pH 相对较低的趋势。

地形能够对物质和热能进行重新分配来调节耕地中作物的长势和分布^[21],并间接影响耕地土壤 pH 的变化。研究区耕地的地表粗糙度、地表切割深度、地形起伏度和坡度多处于其自身范围的中低区间,有利于耕地的连续性,易于耕种。其中,这些要素值越低的地区,地势越平坦,更容易受到人口、工业和交通等分布的影响,会对作物长势造成不良影响。反之,在这些要素值稍高的地区,作物受到的热量、光照等条件会更加充足,长势更茂盛。因此,可以发现地形因子相互作用,共同影响着作物长势进而影响土壤 pH 变化。

3.2 不同酸碱性耕地土壤影响因素的异质性

不同酸碱性耕地土壤对影响因子的响应情况存在一定的异质性。对于极强酸性土壤,人为活动对土壤 pH 的直接效应(0.01)为正值,这可能是由于 2012 年和 2015 年,研究区政府先后下发了耕地土壤酸化治理的相关文件,包括多施有机肥、少施氮肥等^[22],这些人为干扰对于极强酸性土壤 pH 降低趋势产生了较为明显的缓解作用,同时这些措施的实践使得作物长势茂盛进而削弱了部分直接影响,使得总效应(-0.03)为负值,但总体上人为活动对极强酸性土壤 pH 降低的作用程度大幅度减小。极强酸性土壤饱度和度较高且本身理化性状不良,良好的水热条件并没有对植物的长势起到促进作用,进而减弱中介效应,故气候对极强酸性土壤 pH 的直接和间接作用都有较大减弱。极强酸性土壤上的作物还易受铝毒害,进而

影响其微域的微生态系统, 加快动植物的死亡, 产生更多的酸性分泌物, 因此土壤 pH 对极强酸性土壤上的作物响应更加强烈。

强酸性和弱酸性土壤上作物对土壤 pH 的路径系数为正值, 可能是由于高作物覆盖区根系的有效分布截留了部分可溶性矿物养分, 有利于盐基离子和有机质的积累, 进而提高了酸缓冲容量, 故作物长势好的区域土壤 pH 相对较高。由于地形是通过作物的中介效应对土壤 pH 产生影响, 故地形亦对强酸性和弱酸性土壤 pH 产生正向影响。

中性和弱碱性土壤主要处于碳酸盐缓冲体系, 土壤矿物中的碳酸盐与酸物质发生反应、溶解, 产生的水溶性盐通过淋洗向下移除土壤。有研究表明, 理论上耕层土壤中若含有 1% 的 CaCO_3 , 土壤酸缓冲容量可达 $1\ 000 \sim 1\ 500 \text{ keq/hm}^2$, 百余年才可消耗殆尽^[23], 故此时土壤 pH 更为稳定。人为活动对中性及弱碱性土壤 pH 表现为正向影响, 一是由于该土壤本身酸缓冲能力较大, 二是由于相应的治理措施起到了更显著的效果。但值得注意的是, 对于弱碱性土壤, 由于对人为活动的响应更加强烈, 因此需要防止土壤盐碱化。气候对中性及碱性土壤 pH 的直接作用表现为正向影响, 可能是潮湿空气中降雨带来的盐基离子沉降量可能大于其淋失量, 提高了土壤酸缓冲容量, 但由于中介效应的负向影响, 最终气候对中性土壤 pH 的总效应显著降低, 而由于弱碱性土壤 pH 的中间效应较为强烈, 故气候对弱碱性土壤 pH 的总效应为负值, 且绝对值最大。由于弱碱性土壤更加适宜土壤微生物群体的生存^[24], 因此弱碱性土壤上作物长势越好, 其下存活的动植物就会越多, 残体分泌的酸性物质也更容易富集, 故弱碱性土壤 pH 对作物的响应更加明显。

4 结论

本文运用数理统计和 PLSPM 构建的耕地土壤 pH 多因素综合模型, 分析鄂西南耕地土壤 pH 现状及影响因素, 研究发现: 鄂西南耕地土壤 pH 呈现东北高西南低的格局, 整体酸化程度较为严峻; 不同耕地利用类型中, 水浇地 pH 最高, 其后依次是旱地、水田; 不同成土母质中, 结晶岩和泥质岩发育的土壤 pH 较低, 碳酸岩发育的土壤 pH 较高; 影响鄂西南总体耕地土壤 pH 变化的因素绝对值大小为: 人为活动(-0.23)>气候(-0.08)>作物(-0.03)>地形(-0.01); 不同酸碱性土壤下, 因子的影响程度及主次关系有较为明显的差异, 强酸性土壤上作物>气候>人为活动>地形, 酸性土壤上人为活动>作物>气候>地形, 弱酸性

土壤上人为活动>作物>气候>地形, 中性土壤上人为活动>气候>地形>作物弱碱性土壤上人为活动>气候>作物>地形。

参考文献:

- [1] Kochian L V, Hoekenga O A, Piñeros M A. How do crop plants tolerate acid soils? mechanisms of aluminum tolerance and phosphorous efficiency[J]. *Annual Review of Plant Biology*, 2004, 55(1): 459–493.
- [2] 郑超, 郭治兴, 袁宇志, 等. 广东省不同区域农田土壤酸化时空变化及其影响因素[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(2): 593–601.
- [3] Miller D E, Watmough S A. Soil acidification and foliar nutrient status of Ontario's deciduous forest in 1986 and 2005[J]. *Environmental Pollution*, 2009, 157(2): 664–672.
- [4] Canini F, Geml J, D'Acqui L P, et al. Exchangeable cations and pH drive diversity and functionality of fungal communities in biological soil crusts from coastal sites of Victoria Land, Antarctica[J]. *Fungal Ecology*, 2020, 45: 100923.
- [5] Desie E, Vancampenhout K, Nyssen B, et al. Litter quality and the law of the most limiting: Opportunities for restoring nutrient cycles in acidified forest soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 699: 134383.
- [6] 高凤杰, 鞠铁男, 吴啸, 等. 黑土耕作层土壤 pH 空间变异及自相关分析[J]. *土壤*, 2018, 50(3): 566–573.
- [7] 袁宇志, 郭颖, 张育灿, 等. 亚热带典型小流域景观格局对耕地土壤酸化的影响[J]. *土壤*, 2019, 51(1): 90–99.
- [8] 张桃林, 潘剑君, 刘绍贵, 等. 集约农业利用下红壤地区土壤肥力与环境质量变化及调控——江西省南昌市郊区和余江县案例研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(4): 584–591.
- [9] 徐仁扣. 土壤酸化及其调控研究进展[J]. *土壤*, 2015, 47(2): 238–244.
- [10] Owusu-Twum M Y, Loick N, Cardenas L M, et al. Nitrogen dynamics in soils amended with slurry treated by acid or DMPP addition[J]. *Biology and Fertility of Soils*, 2017, 53(3): 339–347.
- [11] Angelini M E, Heuvelink G B M. Including spatial correlation in structural equation modelling of soil properties[J]. *Spatial Statistics*, 2018, 25: 35–51.
- [12] Angelini M E, Heuvelink G B M, Kempen B. Multivariate mapping of soil with structural equation modelling[J]. *European Journal of Soil Science*, 2017, 68(5): 575–591.
- [13] 祝志川, 张国超, 王静敏. 基于 PLSPM-GRA 测度的区域“五化”协调发展研究[J]. *经济问题探索*, 2017(12): 116–125.
- [14] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [15] 吴明隆. 结构方程模型: AMOS 的操作与应用[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2010.
- [16] 胡敏, 向永生, 张智, 等. 恩施州耕地土壤 pH 近 30 年变化特征[J]. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1289–1297.

- [17] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008–1010.
- [18] 周洁莹, 张黎明, 杨文浩, 等. 福建省耕地土壤潜性酸动态变化及其驱动因素[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(3): 913–922.
- [19] 解淑艳, 王胜杰, 于洋, 等. 2003—2018 年全国酸雨状况变化趋势研究[J]. *中国环境监测*, 2020, 36(4): 80–88.
- [20] 尹辉, 李晖, 蒋忠诚. 果化示范区土壤 pH 值的空间自相关及其主导因子[J]. *水土保持通报*, 2015, 35(5): 183–188.
- [21] Zuo X A, Zhao X Y, Zhao H L, et al. Scale dependent effects of environmental factors on vegetation pattern and composition in Horqin Sandy Land, Northern China[J]. *Geoderma*, 2012, 173/174: 1–9.
- [22] 向永生. 恩施州耕地资源评价与利用[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2013.
- [23] Zhu Q C, de Vries W, Liu X J, et al. Enhanced acidification in Chinese croplands as derived from element budgets in the period 1980–2010[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 618: 1497–1505.
- [24] Kim J M, Roh A S, Choi S C, et al. Soil pH and electrical conductivity are key edaphic factors shaping bacterial communities of greenhouse soils in Korea[J]. *Journal of Microbiology*, 2016, 54(12): 838–845.