

金沙江流域林地土壤 pH 空间变异性的 影响因素研究

李超¹, 常新霞², 彭文忆³, 胡晓², 李影芝², 李文峰^{2*}

(1. 云南省气象台, 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 云南昆明 650034; 2. 云南省教育厅作物模拟与智能调控重点实验室, 云南昆明 650201; 3. 德宏州经济作物技术推广站, 云南德宏 678499)

摘要:【目的】云南金沙江流域是长江中下游地区生态环境的重要屏障, 在分析该区域土壤 pH 的空间分布基础上, 探究气候、土壤类型和地形因素对土壤 pH 的影响, 可为土壤酸化的防控及土壤改良提供参考。【方法】对云南金沙江流域林地采集土壤样品 19071 份, 应用 GIS 技术和 R 语言, 统计分析土壤 pH 值的空间变异特征以及气候带、土壤、地形等因素对土壤 pH 值的影响效应。【结果】研究区土壤 pH 平均值为 6.37, 符合正态分布, 变异系数为 14.9%, 属中等程度变异性, 金沙江上游土壤 pH 总体趋势高于下游。气候带间土壤 pH 值差异最大, 亚热带和暖温带的 pH 值最低, 土壤类型和成土母质对土壤 pH 的影响效应也达到极显著水平, 土壤类型以黄壤、红壤、紫色土 3 种的酸性较强, 成土母质以酸性结晶岩、玄武岩和泥质岩 3 种酸性较强。海拔、坡度和坡向等地形因子对土壤 pH 值的影响相对较小。【结论】研究区土壤 pH 值的空间变异主要由结构性因素引起, 其中气候、土壤类型和成土母质的影响显著, 气候的差异是造成空间大尺度上土壤 pH 差异的重要因素。地形因素的影响不显著, 但可通过与其他因素的交互作用对土壤 pH 值产生影响。

关键词: 金沙江流域; 林地; 土壤 pH 值; 空间变异

中图分类号: S153.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 0564-3945(2024)06-1524-10

DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2023060401

李超, 常新霞, 彭文忆, 胡晓, 李影芝, 李文峰. 金沙江流域林地土壤 pH 空间变异性的影响因素研究 [J]. 土壤通报, 2024, 55(6): 1524-1533

LI Chao, CHANG Xin-xia, PENG Wen-yi, HU Xiao, LI Ying-zhi, LI Wen-feng. Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Woodland Soil pH in the Jinsha River Basin[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2024, 55(6): 1524-1533

【研究意义】土壤 pH 值是土壤重要的化学性质之一, 能够影响土壤重金属元素在土壤-植物系统的迁移转化过程^[1]以及土壤细菌群落结构^[2-3]、土壤酶的活性^[4], 进而影响作物生长、农田生态环境。研究土壤 pH 值的空间异质性及其驱动因素对揭示生态系统功能, 保护生物多样性具有重要意义。【前人研究进展】研究表明, 在不同的空间尺度上, 土壤 pH 值空间分布有明显的区域差异和空间变异特征^[5-6]。人类活动如施肥方式、土地利用、耕种模式等随机因素可引起土壤 pH 值变异, 但其很大程度上表现出的空间自相关性变异, 说明成土母质、气候、海拔、地形等结构性因素对土壤 pH 值有显著影响^[7-10]。例如刘璐、张娜^[11-12]等研究发现在中小尺度上, 土壤性质的空间变异较明显的受海拔、凹凸度、坡度等

地形因子的影响。在对林地土壤的研究中, 马云波^[13]发现林分、林龄以及凋落物均会显著影响冀北山区华北落叶松人工林土壤 pH 的变异。在华北山地寒温性云杉次生林中, 地形是土壤空间变异的重要因素, 海拔对土壤 pH 值空间变异的影响最大^[14]。这些研究都在一定程度上揭示土壤 pH 值和影响因子间的相互关系, 有助于我们进一步认识土壤的空间变异机制。【本研究的切入点】在受人类活动或人为干扰相对较小的林地系统中, 结构性因素对土壤空间变异的影响不可忽视。云南金沙江流域林地的生态平衡和水土保持是长江中下游地区生态环境的重要屏障。目前对该区域的研究主要集中在水文及植被状况上^[15-17], 对于土壤性质的研究较少, 尤其是土壤 pH 的空间变化规律和效应分析未见报道。【拟解

收稿日期: 2023-07-11; 修订日期: 2024-05-17

基金项目: 国家自然科学基金(32160420)和云南省重大科技专项(202202AE090021)

作者简介: 李超(1983-), 女, 高级工程师, 从事农业 GIS 和农业气象研究。E-mail: lichaoynnan@163.com

*通讯作者: E-mail: liwf83@126.com

决的问题】以云南金沙江流域的林地范围为研究对象,在土壤理化数据分析的基础上,采用 ArcGIS 和 R 语言分析研究土壤 pH 的空间分布特征,并进一步定量探究林地土壤和地形因素对土壤 pH 的影响,可为该区调控土壤酸碱度、有针对性的改善土壤肥力状况以及保护流域生态环境和促进流域生态可持续发展提供参考。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

研究区为位于云南省北部的金沙江流域(24°30'~29°15' N, 98°40'~105°15' E),流经迪庆、丽江、楚雄等 7 个州(市),干流全长 1560 km,流域总面积达 $10.9 \times 10^4 \text{ km}^2$, 占全省总面积近 30%,流域境内地理环境及气候条件复杂多样,导致水、光、热等资源空间差异明显,各地年平均气温在 3~17 °C 之间,年平均降水量在 850~1300 mm 之间,两者在空间上均表现出从东向西逐渐减少的趋势。云南省金沙江流域林地面积占流域总面积的 40.2%,其中上游地区林地面积最广,占流域上游总面积一半以上。

1.2 数据来源

本文分析数据包括土地利用类型、土壤类型、

成土母质、土壤质地、土壤 pH 值以及地形数据。地形数据均基于该区域的数字高程模型分析获得(<http://www.gscloud.cn/>),其它土地利用和土壤理化性状的属性数据来源于课题组参与农业部 2007 年云南地区土壤调查和分析工作,空间数据是利用 ArcGIS 软件,根据采样点的经纬度信息将采样点与金沙江流域、土地利用现状做叠加分析,研究区共涵盖县区 44 个,内有旱地、水田、林地、草地、园地等类型,本研究提取研究区内林地类型,共计采样点 19071 个。80% 的采样点处于海拔 1264~2556 m 之间,50% 的处于 1738~2256 m 间,平均海拔为 2000 m。采样点多处于坡地上,85% 的坡度超过 5°,55% 超过 15°,平均坡度为 13.63°。根据国际地理学联合会 对坡度的划分,以小于 5° 为平坡地,大于 5° 的区域分为 8 个朝向,各方向采样点的数据点分布均匀,各朝向样本量分别为:平地 2833 个、东向 2735 个、东南 2323 个、南 1688 个、西南 1459 个、西 1658 个、西北 1822 个、北 2047 个、东北 2506 个,由此可见采样点数据的海拔、坡度跨度大,坡向分布均匀,可以支撑地形因子影响土壤 pH 值的分析(图 1)。

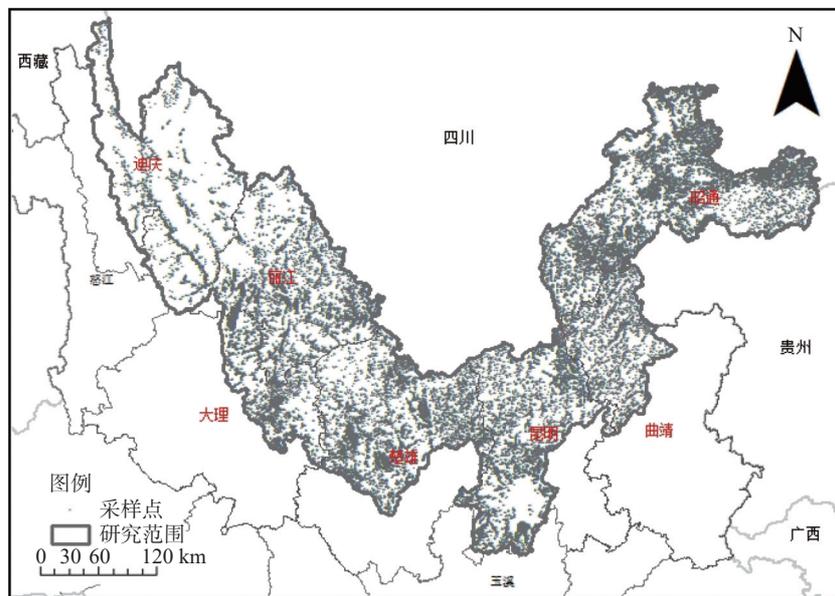


图 1 研究区域位置及样本点分布图

Fig.1 Maps for the location and distribution of soil sampling sites in the study area

1.3 分析方法

数据处理分析包括了地统计分析和传统统计学分析两种,其中地统计分析通过 GS+ 软件进行半方差分析,利用块金值(C_0)、基台值(C)、结构比 $[C/(C_0 + C)]$ 、变程(A)等参数来定量分析空

间异质性程度、组成、尺度与格局,选择最优的半方差函数模型,从而获得克里格法插值的最优参数。再采用 ArcGIS 软件的 Geostatistic Analyst 模块进行空间插值,得到研究区土壤 pH 值的空间分布格局图。

传统统计学分析和制图通过 R 语言 R-4.3.3 版本和 R studio 平台实现, 首先对数据做频度分析和正态性检验 (图 2), 估算金沙江流域 pH 值的整体均值和变异情况。通过 R 语言的 gls 函数和 nlme (表 1, 模型 M0 ~ M14) 拟合 pH 数据, gls 是 R 语言中常用的基于最小二乘法研究多元影响效应的性回归分析函数。其中考虑的自变量有土壤类型 (Grp)、土

壤质地 (Txt)、成土母质 (Prt)、海拔 (Alt)、坡度 (Grd)、坡向 (Aso)、气候区 (Clm) 共 7 个, 模型拟合效果的差异及各因子的影响作用, 通过 anova 函数做方差分析, 根据 AIC 和 BIC 值判断模型对 pH 值的拟合效果, 分析 pH 值与气候区、海拔、土壤类型等的相关关系, 揭示影响研究区土壤 pH 的空间分布的规律和机制。

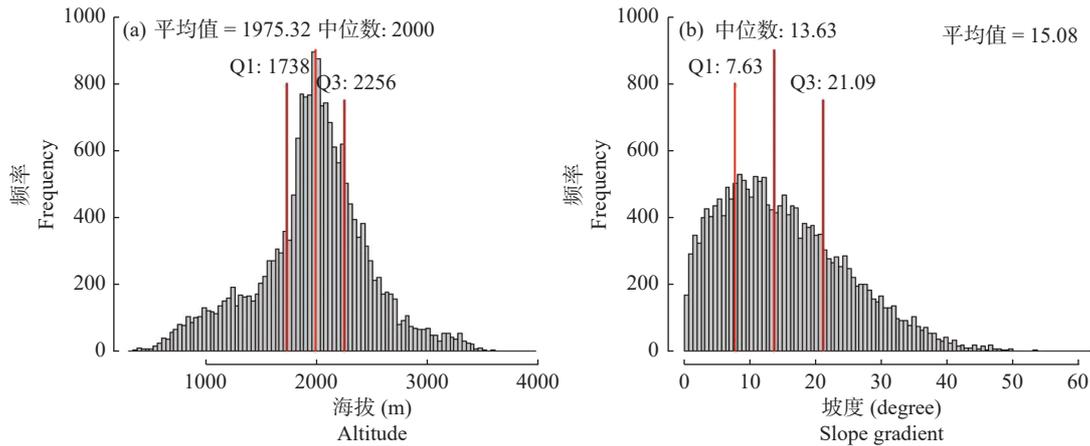


图 2 采样点的海拔、坡度的频度分布图

Fig.2 Frequency distribution map of altitude and slope of sampling points.

表 1 数据拟合的混合效应模型

Table 1 Specification of the mixed effect models fitted to the data

模型 Model	公式 Equation	参数 Parameter	AIC	BIC
M0	$pH_{ij} = \beta_0 + \varepsilon_{ij}$	$\beta_0 = 6.37 \pm 0.01, P < 0.001$	51935	51950
M1	$pH_{ij} = \beta_c (county) + \varepsilon_{ij}$	图4	48437	48789
M2	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_{ij}) + \varepsilon_{ij}$	图6	51513	51583
M3	$pH_{ij} = \beta_{Prt} (Prt_{ij}) + \varepsilon_{ij}$	图6	51435	51514
M4	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_{ij}) + \beta_{Prt} (Prt_{ij}) + \varepsilon_{ij}$		51086	51266
M5	$pH_{ij} = \beta_{Txt} (Txt_{ij}) + \varepsilon_{ij}$	图7	51923	51962
M6	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_{ij}) + \beta_{Prt} (Prt_{ij}) + \beta_{Txt} (Txt_{ij}) + \varepsilon_{ij}$		51072	51276
M7	$pH_{ij} = \beta_{Clm} (Clm_i) + \varepsilon_{ij}$	图7	50786	50833
M8	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_i) + \beta_{Prt} (Prt_i) + \beta_{Txt} (Txt_i) + \beta_{Clm} (Clm_i) + \varepsilon_{ij}$		50418	50654
M9	$pH_{ij} = \beta_{Asp} (Asp_i) + \varepsilon_{ij}$	图8	51907	51985
M10	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_i) + \beta_{Prt} (Prt_i) + \beta_{Txt} (Txt_i) + \beta_{Clm} (Clm_i) + \beta_{Asp} (Asp_i) + \varepsilon_{ij}$		50388	50686
M11	$pH_{ij} = \beta_0 + \beta_{alt} \times Alt_i + \varepsilon_{ij}$	$\beta_0 = 6.13 \pm 0.03, P < 0.001;$ $\beta_{alt} = -1.25 \times 10^{-4} \pm 1.37 \times 10^{-5}, P < 0.001$	51854	51878
M12	$pH_{ij} = \beta_0 + \beta_{grd} \times Grd_i + \varepsilon_{ij}$	$\beta_0 = 6.26 \pm 0.01, P < 0.001;$ $\beta_{grd} = -7.79 \times 10^{-3} \pm 7.22 \times 10^{-4}, P < 0.001$	51821	51844
M13	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_i) + \beta_{Prt} (Prt_i) + \beta_{Txt} (Txt_i) + \beta_{Clm} (Clm_i) + \beta_{Alt} \times Alt_i + \varepsilon_{ij}$		50378	50684
M14	$pH_{ij} = \beta_{Grp} (Grp_{ij}) + \beta_{Prt} (Prt_{ij}) + \beta_{Txt} (Txt_{ij}) + \beta_{Clm} (Clm_{ij}) + \beta_{Grd} \times Grd_i + \varepsilon_{ij}$		50330	50636

注: i 表示采集土壤样本的县区, j 表示样本 ID, ε 表示残差。Grp_{*ij*} 表示土壤类型, Prt 表示成土母质, Txt 表示土壤质地, Clm 表示气候类型; Alt 表示海拔/km, Asp 表示坡向, Grd 表示坡度。

2 结果与分析

2.1 土壤 pH 值的描述性分析

经频度分析和 K-S 非参数检验, pH 值总体符合

正态分布 (图 3), 满足地统计学分析的要求。总体平均值为 6.37 ± 0.01 (表 1, 模型 M0, $P < 0.001$), 模型 M1 显示对各县估计值 $\beta_c (county)$ 达到极显著水平。研究区以酸性土壤为主, 但土壤 pH 值变幅较大,

最大值和最小值分别为 8.8 和 3.7, 方差为 0.91, 采样点中处于弱酸性的样本占 55%, 处于酸性的样本占 18%, 处于弱碱性 (> 7.5) 及以上的土壤仅有 13.5%。全区域的土壤 pH 值的变异系数为 14.84%, 属于中等程度变异性。从区域分布来看 pH 值在不同县之间变化较大, 各县 pH 平均值在 5.6 ~ 7.5 之间, 整体呈现出由上游到中下游, 土壤总体呈现酸性逐

渐增强的趋势。最大值多出现在金沙江上游海拔较高的县, 如德钦、香格里拉、丽江, 最小值多出现在中段下部, 如寻甸、南华、盐津等。其中 20 个县的土壤 pH 平均值高于全区土壤 pH 平均值, 24 个县的土壤 pH 平均值低于全区原生土壤 pH 平均值。迪庆的土壤 pH 平均值最高, 比寻甸土壤 pH 平均值高 1.88 (图 4)。

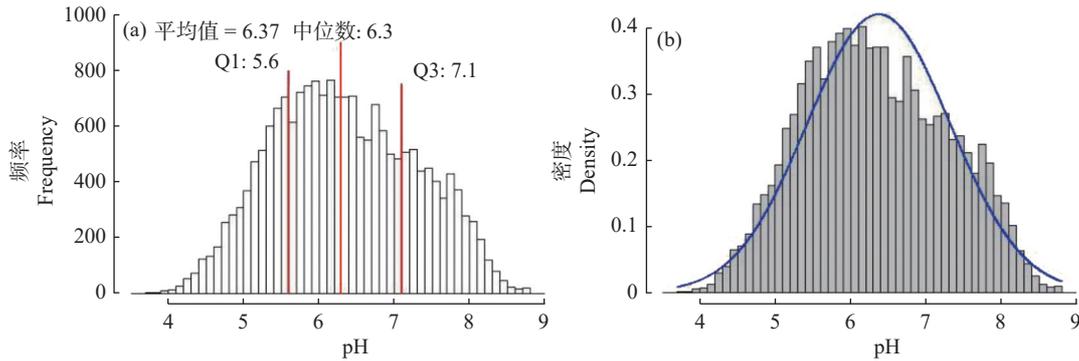
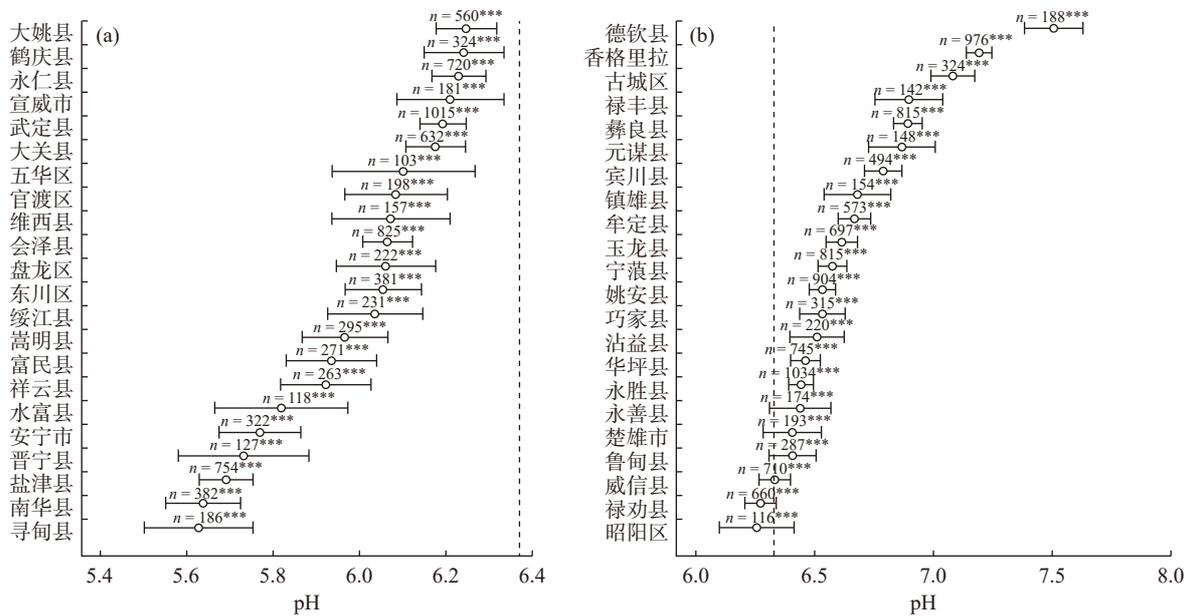


图 3 金沙江流域林地土壤 pH 值的频度分布图和正态分布检验图

Fig.3 Frequency distribution and normal distribution test of soil pH in Jinsha river basin



注:虚线是整个区域的平均值 pH 值。“n”表示该县的样本量。“***”表示线性模型 M1 中各县 β_C (county)参数估计值的显著性水平 ($P < 0.001$)。

图 4 金沙江流域 44 个县区林地土壤 pH 值

Fig.4 Soil pH values in 44 counties in Jinsha river basin

2.2 土壤 pH 值的空间分布特征

在 GS + 软件中分别以球面模型、指数模型、高斯模型对 pH 值进行半方差函数拟合 (表 2), 从模型的参数可以看出, 指数模型的 R^2 最大 (0.408) 并且残差最小 (0.0134), 因此选择指数模型的拟合结果来反映研究区土壤 pH 值的空间变异结构特征。从

模型参数来看, 变程为 6400 m, 表明土壤 pH 值得空间自相关范围较小, $C / (C_0 + C)$ 为 6.10% (小于 25%), 表明研究区土壤 pH 具有强烈的空间自相关性, 空间变异可能主要由结构性因素 (成土母质、气候、海拔等) 引起, 因此采用 R 语言 gls 函数进行回归分析, 以 ANOVA 函数比较不同因子回归模

表 2 研究区土壤 pH 值的半方差函数理论模型及其相关参数

Table 2 Theoretical model of semi-variance function of soil pH in study area and its parameters

模型 Model	块金值 Nugget	基台值 Sill	块金值/基台值 Nugget/sill	变程 Range	R^2	RSS
指数模型	0.056	0.920	0.061	6400	0.408	0.0134
球面模型	0.001	0.864	0.001	18600	0.395	0.0137
高斯模型	0.102	0.965	0.101	9200	0.395	0.0137

型的效应，以明确各因子对土壤 pH 值的影响情况。

为了直观反映土壤 pH 的空间分布特征，采用半方差分析所得到的指数模型的参数在 ArcGIS 软件中利用普通克里格法完成插值，绘制土壤 pH 值的空间分布图（图 5）。从图中可以看出，pH 值在 5.5 ~ 6.5、6.5 ~ 7.5 之间的区域面积最广，这与常规统计分析的结果一致。各市州的土壤 pH 均值大小总体呈现流域上游的 pH 普遍高于下游。高值区主要分布在香格里拉县、德钦县，低值区主要分布在盐津县、

大关县。这一规律在海拔落差较大的迪庆到昆明段比较明显，但从昆明到昭通段则不明显。

2.3 不同土类、成土母质和质地的土壤 pH 差异分析

研究区土壤类型 14 种含 15 种亚类，63 种土属，其中超过 1000 个样点的有黄棕壤、棕壤、水稻土、紫色土、红壤、黄壤等 6 种，超过总样点的 95%。其中红壤和紫色土占总样本量的 54.1%，水稻土不作为林地土壤，在后文中不再单独分析。按照国际土壤科学协会 IUSS 制定的分类标准研究不同土类 pH 值的差异，结果显示差异达到极显著水平，采用方差分析对比模型 M2 显著优于 M0，其 P 值小于 0.001，残差标准误差由 M0 的 0.95 下降到 0.94。不同土壤类型的平均 pH 值如图 6 所示，对其中样本量超过 100 的 8 种土壤类型分析显示，其平均 pH 值均处于中性和弱酸性区域，分别为黄壤 6.28 ± 0.04 、红壤 6.29 ± 0.02 、紫色土 6.32 ± 0.03 、棕壤 6.48 ± 0.05 、石灰土 6.53 ± 0.06 、黄棕壤 6.54 ± 0.03 、燥红土 6.93 ± 0.14 （表 1，模型 M2），模型 M2 显示各土壤类型 β_{Grp} 参数估计值均达到极显著水平。其中燥红土的 pH 值最高，极显著高于其它 7 种类型，同时其变异性也最大，黄壤、红壤、紫色土的酸性最强，pH 值低于平均值，也显著低于其它 4 种类型。各土壤类型 pH 的变异系数处在 13.27%-16.72% 间，表现为中等程度变异性。

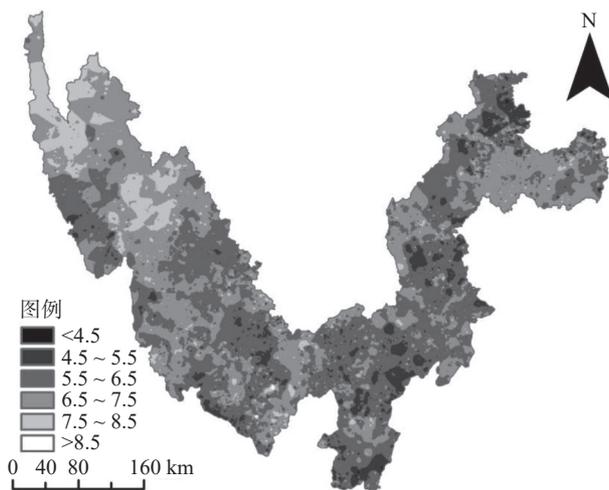
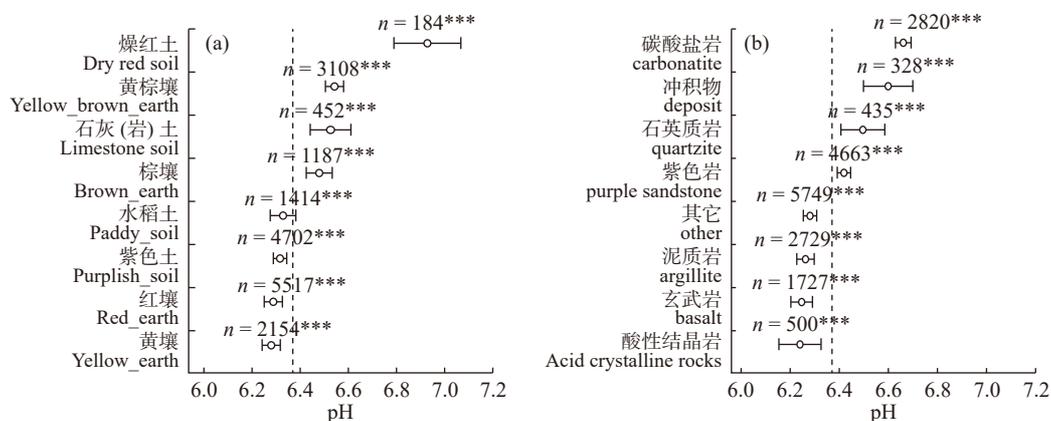


图 5 研究区土壤 pH 空间分布图

Fig.5 Spatial distribution of soil pH in the study area



注:图中星号表示模型 M2 中各土壤类型 β_{Grp} 参数 (左图) 和 M3 中各成土母质 β_{Pri} 参数 (右图) 估计值的显著性水平。

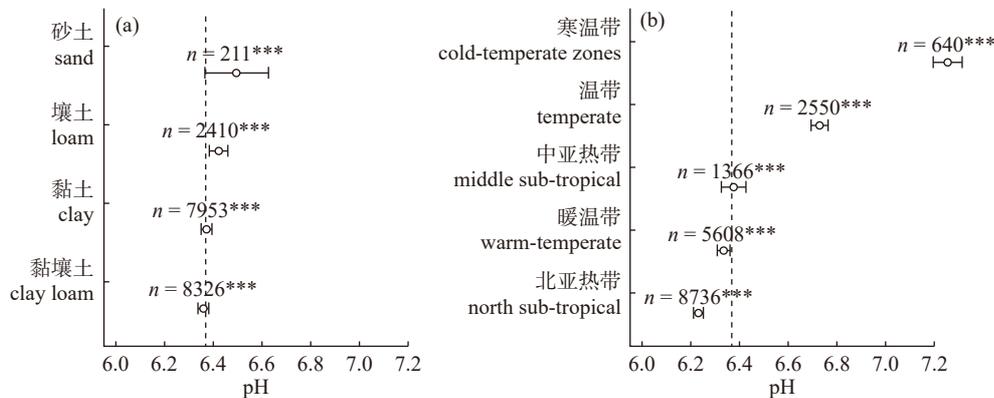
图 6 不同土壤类型、成土母质的 pH 估计均值

Fig.6 Estimated mean of pH value for different soil types and parent materials

按照国际土壤成土母质划分标准, 研究区共有 8 种成土母质, 分析显示其显著影响土壤 pH 值, 即使在考虑土壤类型影响情况下, 成土母质的影响作用仍然得到极显著水平, 采用方差分析分别对比 M3 与 M0 以及 M4 与 M2, 其差异性 P 值小于 0.001, 残差标准误与 M0 相比下降了 0.01。而且成土母质对土壤 pH 值的影响作用比土壤类型更明显, 模型 M3 的拟合效果优于模型 M2, 残差标准误下降至 0.93。9 种成土母质中冲积物母质的 pH 值最高, 极显著高于其它类型。而酸性结晶岩, 玄武岩和泥质岩三种母质的 pH 值最低, 且极显著低于其它母质。综合土壤类型和成土母质的分析模型, β_{pm} 的变化从 0 至 0.67, 变幅较大, 从变异系数来看, 不同成土母质条件下 pH 的变异系数范围在 13.42% ~ 16.51%, 均表现为中等程度变异性。各成土母质的平均 pH 值模型估计值分别为酸性结晶岩 6.24 ± 0.04 、玄武岩 6.25 ± 0.02 、泥质岩 6.26 ± 0.02 、紫色岩 6.42 ± 0.01 、石英质岩 6.50 ± 0.05 、冲击物 6.60 ± 0.05 、碳酸盐岩 6.66 ± 0.02 (图 1, 模型 M3), 模型 M3 显示各成土母质 β_{pm} 参数估计值均达到极显著水平。由此可见, 所有成土母质的 pH 均值均低于 7.0, 其中酸性结晶岩、玄武岩、泥质岩三种土壤的酸性最强, pH

极显著低于其它类型, 但此三种类型相互间无显著差异。

进一步研究土壤质地对 pH 值的影响, 研究区一共存在 4 种土壤质地, 其中黏壤土和黏土占总样本数的 80.93%。结果显示, 土壤质地同样显著影响土壤 pH 值 (模型 M5), 模型对 4 种土壤质地估计的参数 β_{Tst} 均达到极显著水平, 但从结果看由于组内方差较大, 尤其是砂壤和壤土两种质地, 其变异性均较强, 因此组间两两比较的差异没有全部达到显著水平, 其中只有 pH 值最低的黏壤土与其它 3 种质地土壤 pH 的差异全部达到显著或极显著水平 (图 7), 平均值达到 6.36。砂壤 pH 虽然最高, 但是样本量仅有 211 个且变异较大, 从源数据看, 砂壤样本有 20% 来自于 pH 最高的寒温带, 因此砂壤与其它质地土壤 pH 的差异, 还需要进一步探索。模型 M5 显著优于 M0, 但拟合效果落后于 M2 和 M3, 说明土壤质地虽然造成 pH 的差异, 但是并不像土壤类型和成土母质那么明显。在考虑土壤类型和成土母质的前提下, 模型 M6 虽然显著优于 M4, 然而其残差标准误下降不足 0.001, 模型收敛程度有限, 也说明了土壤质地的贡献有限。



注:图中星号表示模型 M5 中各土壤质地 β_{Tst} 参数估计值的显著性水平。

图 7 不同土壤质地(左)和所处气候区(右)的土壤 pH 估计均值

Fig.7 Estimated mean of pH value for different soil textures (left) and climate zones (right)

2.4 不同气候区对土壤 pH 值的影响

研究区共有 5 种气候区, 气候区对土壤 pH 值的影响达到极显著水平 (AOV (M7, M0), $P < 0.001$), 5 个气候带的分别估计其平均 pH 值由小到大依次为北方亚热带 6.23 ± 0.02 、暖温带 6.33 ± 0.02 、中部亚热带 6.38 ± 0.05 、温带 6.73 ± 0.04 和寒温带 7.27 ± 0.07 , 模型对各气候带的估计参数 β_{cm} 均达到了极显著水平 (表 1, 模型 M7, 图 7)。从图 7 看

气候区间土壤 pH 的差异较大, 模型 M7 和 M6 的方差分析 ($P < 0.001$) 和残差标准误看出, 模型 M7 的 AIC 值和 BIC 远低于 M6, 通过函数 Anova (M7, M6) 显示, 模型 M7 拟合效果极显著优于模型 M6, 说明考虑气候带单因素的模型预测效果, 甚至远超过综合考虑土壤类型、成土母质和土壤质地三者的模型预测效果。

从前文分析显示气候类型、土壤类型、成土母

质、土壤质地均造成了土壤 pH 的差异, 为确定相互之间的交互作用, 研究进一步构建了模型 M8, 从 M8 与 M6 的对比分析显示, M8 极显著优于模型 M6, 残差标准误下降至 0.91, 降幅达到 0.02, 说明在考虑土壤因素的前提下, 气候区仍然显著影响土壤 pH 值, 这意味着长期的气候作用, 较大幅度地改变了土壤的酸性。对比模型 M8 与 M7 同样显示, 在考虑气候区影响前提下, 土壤类型、成土母质、土壤质地三者也同样产生显著影响, 说明了气候区与土壤因素虽然存在交互, 但是其作用均不容忽视。

不同气候区的对比分析显示, 研究区内总体呈现出温度越高的地区土壤酸性越强趋势 (图 7 右), 亚热带和暖温带土壤呈现明显的酸性, 占比最高的北方亚热带区, 土壤酸性最强, 温带和寒温带 pH 值偏高。M7 中 β_{Cm} 的变幅达到 0.99。在 5 个气候区中, 除暖温带和中部亚热带的差异不显著外, 其余任意两个气候区间土壤 pH 值差异均达到极显著。

2.5 地形对土壤 pH 值的影响

通过 GIS 对 DEM 数据进行地形分析, 提取并划分为包括平地在内的 9 个坡向, 结果显示, 坡向同样显著影响土壤 pH 值, 西向土壤 pH 值极显著高于其它除西南外的 6 个方向, 但该规律性并不是特别明显 (图 8), 这可能与其它影响因素的干扰有关。综合考虑气候区和土壤因素后, 坡向对土壤 pH 的影响仍然达到极显著, 而且体现出一定程度越偏向西方, 土壤 pH 值高的规律 (M9: 其 β_{Asp} 按照从小到大排列为南 < 平地 < 东南 < 北 < 西北 < 东北 < 东 < 西南 < 西, 其值变幅为 0.18), 但是在考虑气候类型、土壤类型、成土母质等因素后, 增加考虑坡向, 模型的残差标准误降低了 0.001, 所以相对而言, 该因子对模型的收敛效果有限。

研究区海拔在 319 m 到 3966 m 之间, 海拔跨度较大, 模型 M11 显示, 土壤 pH 值与海拔呈显著正相关 (M11: $\beta_0 = 6.13 \pm 0.03$, $\beta_{alt} = 1.25 \times 10^{-4}$, $P < 0.001$), 海拔每升高 1 km, pH 平均增加 0.13。在考虑土壤和气候因素之后, 海拔的影响作用大幅下降, 且呈现出完全相反的趋势, 模型显示 $\beta_{alt} = 0.7 \times 10^{-4}$ 这意味着海拔每变化 10 km 所导致的 pH 值变化不足 1, 该影响可以忽略。

分析显示坡度与 pH 其呈现显著正相关关系, 斜率每增加 10° , pH 值仅增加 0.08 (M12: $\beta_0 = 6.26 \pm 0.01$, $\beta_{grad} = 0.008$, $P < 0.001$)。这意味着本研究中从平地到 60° 的最大坡地, 其产生的 pH 值变化也不足

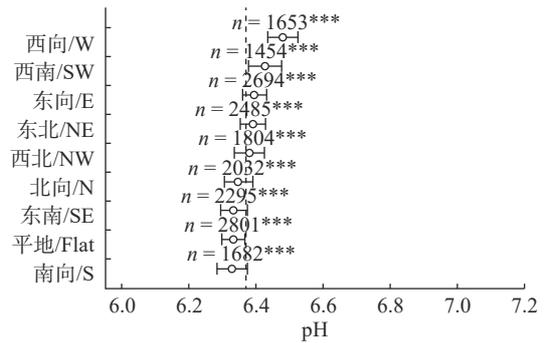


图 8 不同坡向的土壤 pH 估计均值

Fig.8 Estimated mean of soil pH value for different slope aspects.

0.5。由此可以看出, 海拔和坡度对土壤 pH 值的影响较小。而且当综合考虑气候和土壤因素后, 海拔和坡向的影响变得更小 (M13, M14), 尤其是海拔, 由正相关变为负相关, 每增加 1 km pH 值仅减小 0.05, 几乎可以忽略不记。

3 讨论

3.1 林地土壤 pH 的基本特征

研究区土壤 pH 平均值为 6.37, 表明研究区以酸性土壤为主, 但不同区域差异极大。自然条件下, 土壤酸化是一个缓慢的过程。但近几十年来, 人为活动在一定程度上加速了土壤酸化。高值区主要分布在金沙江上游的德钦、香格里拉、丽江古城等滇西北高海拔地区, 这些地区生态环境恶劣, 人口少, 人类活动踪迹有限, 对土壤性质影响较小。低值区主要分布在盐津、大关等人口大县, 人多地少导致有限的可利用土地人为干预较多, 于是呈现出金沙江下游土壤酸性更强的趋势。全区土壤 pH 值的变异系数为 14.84%, 属于中等程度变异, 在空间分布上呈斑块状分布格局。同时土壤 pH 的 $C/(C_0 + C)$ 为 6.10%, 土壤 pH 具有强烈的空间自相关性, 空间变异主要由结构性因素造成, 这与谢红花^[18]、李超^[19]等人对云南乌蒙山区、保山隆阳区土壤 pH 值的研究结论一致, 说明金沙江流域土壤 pH 值的空间变异特征明显, 这可能是由于流域内地形复杂, 地势起伏导致太阳辐射不均匀, 不同区域水热条件下土壤 pH 呈现明显的空间差异。

3.2 林地土壤 pH 与影响因子的关系

土壤 pH 值很大程度上继承了母岩的特性, 石灰岩与冲积、湖积、洪积物发育的土壤 pH 值明显高于其他成土母质类型发育的土壤, 与何腾兵^[20]、赵凯丽^[21]的研究结论一致。由于这两类成土母质发育的

土壤中含有丰富的钙离子,在土壤风化过程中能够减缓土壤的酸化,进而土壤表现为碱性。其中玄武岩 pH 低于石英岩,可能与本研究样本所属气候区影响有关,玄武岩总共 1727 个样本 93.11% 来自 pH 最低的北亚热带和暖温带,而石英岩则仅有 46.11%。黏土的土壤 pH 低于壤土和砂土,这与已有研究得到的结论相似^[22]。黏土由硅酸盐矿物风化而成,通透性较差,氧气往往供应不足,土壤有机质在嫌气条件下分解速度减缓且不完全,易累积乙酸、丁酸等一系列有机酸,造成土壤 pH 下降。砂土 pH 偏高,这一方面与土壤疏松,通气性较好,酸化后恢复能力较强有关^[23],另一方面由于其样本量相对不足,仅有 221 个,且有 20% 来自于土壤 pH 较高的寒温带,而黏壤土在此气候带只有 1.1%,因此本研究中砂土 pH 较高的结果可能与气候带影响有关,土壤质地本身对 pH 值的影响还需要进一步探索。不同类型的土壤酸碱性及缓冲能力差异有关,本研究土壤 pH 值以红壤和黄壤最低,这与全国范围内酸化土壤的土壤类型^[8]以及邓小华^[7]、温皓天^[24]对湘西和河南南阳的研究结果一致。红壤和黄壤是云南高原的基带土壤,受气候和植被的影响较大,在中亚热带高原季风气候作用及亚热带生物气候条件下,风化淋溶较为强烈,盐基饱和度降低,土壤呈酸化趋势^[25]。

研究区北方亚热带区土壤酸性最强,温带和寒温带 pH 值偏高。从模型分析可知,气候对土壤 pH 的影响程度高于成土母质、质地和土壤类型,这与孔德莉^[26]对于鄂西南地区耕地土壤的研究结论一致。在大尺度区域下,不同气候带的太阳辐射、气温、降雨量差异,影响土壤中微生物的活动以及土壤易溶物质流失的数量和速率,间接影响土壤有机质含量、矿物质形态特征,进而对土壤理化性质产生影响^[27]。随着气候带由北向南演变,降水增加,地表淋溶作用进一步增强,盐基离子容易淋出;同时温度升高,成土过程中的生物及化学作用增强,微生物的分解活动加速,促进土壤向酸性发育,反之则向碱性发育^[28-30]。

坡向对土壤 pH 值影响较小,与黄平^[31]、李超^[19]等的研究结果一致。主要与研究区贯穿青藏高原西侧—金沙江河谷—乌蒙山,日照时间长,太阳辐射强,受光热资源影响较小有关。坡度和海拔作为单因素因子与土壤 pH 呈正相关关系,但综合考虑土壤类型、成土母质、气候类型后,pH 值与海拔呈负相关,海拔越高降雨量越大,造成盐基离子淋失,

土壤缓冲能力下降。海拔升高后受光照、温度、热量等因素影响,造成土壤 pH 值下降^[25]。在大空间尺度上,气候和土壤母质有明显差异,地形因素对土壤 pH 值的影响主要通过气候、土壤母质等因素来产生。整体而言,金沙江流域影响土壤 pH 的因素中,气候是 pH 变化的重要因子,其次是成土母质和土壤类型。但土壤 pH 是自然因素和人为因素共同影响的结果,单一因素对土壤 pH 的贡献率需要进一步深入讨论。

4 结论

云南省金沙江流域林地土壤总体以酸性和弱酸性为主,pH 值平均为 6.37 ± 0.01 ,具有中等程度变异性和强烈的空间自相关性,滇西北高海拔地区的土壤 pH 较高。本研究显示在金沙江流域,气候、成土母质、土壤类型与造成土壤 pH 值差异的最关键因素。气候带间土壤 pH 值差异最大,土壤 pH 值由低到高依次为北亚热带、暖温带、中亚热带、温带、寒温带,基本呈现为随温度升高酸性增强的趋势。成土母质和土壤类型也极显著影响 pH 值,紫色土、红壤和黄壤 3 种土壤类型酸性显著强于其它类型,酸性结晶岩、玄武岩、泥质岩 3 种母质土壤的酸性显著强于其它土壤类型。土壤质地也有显著影响,其中黏壤土酸性最强。地形因子中海拔、坡度和坡向与土壤 pH 相关,但从模型分析看贡献较小,规律性不强。

参考文献:

- [1] Lu X, Zhang D, Ugurlu A, et al. Bioaccumulation of Cadmium in *Nicotiana tabacum* L. (Tobacco) Characterized by Soil Properties: A Case Study in the Sichuan Basin, China[J]. *Analytical Letters*, 2021, 54(18): 2883 – 2894.
- [2] Queiroz MEFd, Monteiro JS, Viana-Junior AB, et al. Litter thickness and soil pH influence the diversity of saprotrophic fungi in primary forest fragments in the Amazon[J]. *Pedobiologia*, 2021, 89: 150771.
- [3] Zhang Q, Han Y, Chen W, et al. Soil type and pH mediated arable soil bacterial compositional variation across geographic distance in North China Plain[J]. *Applied Soil Ecology* 2022; 169.
- [4] 王 涵,王 果,黄颖颖,等. pH 变化对酸性土壤酶活性的影响 [J]. *生态环境*, 2008, 17(06): 2401 – 2406.
- [5] Isabel P, Filip H, Christina B, et al. How vegetation patches drive soil development and organic matter formation on polar islands[J]. *Geoderma Regional*, 2021, 27: e00429.
- [6] 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(01): 34 – 41.

- [7] 邓小华, 蔡 兴, 张明发, 等. 喀斯特地区湘西州植烟土壤 pH 分布特征及其影响因素 [J]. 水土保持学报, 2016, 30(06): 308 – 313.
- [8] Asaduzzaman K M, Aktar S S, Baktear H M. Effects of Irrigation, Fertilizer and Manure on Pore-Water Nutrient Availability, Yield and Change of Soil Chemical Properties with Rice-Rice Cropping[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 2021, 52(20): 2597 – 2608.
- [9] Guo J H, Liu X J, Zhang Y, et al. Significant acidification in major Chinese croplands[J]. *Science*, 2010, 327(5968): 1008 – 1010.
- [10] 郭治兴, 王 静, 柴 敏, 等. 近 30 年来广东省土壤 pH 值的时空变化 [J]. 应用生态学报, 2011, 22(02): 425 – 430.
- [11] 刘 璐, 曾馥平, 宋同清, 等. 喀斯特木论自然保护区土壤养分的空间变异特征 [J]. 应用生态学报, 2010, 21(7): 1667 – 1673.
- [12] 张 娜, 王希华, 郑泽梅, 等. 浙江天童常绿阔叶林土壤的空间异质性及其与地形的关系 [J]. 应用生态学报, 2012, 23(9): 2361 – 2369.
- [13] 马云波. 冀北山区华北落叶松人土土壤酸碱度与养分含量的变化 [D]. 河北农业大学, 2015.
- [14] 杨秀清, 史 婵, 王旭刚, 等. 关帝山云杉次生林土壤的空间异质性及其与地形相关性 [J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(4): 16 – 24.
- [15] 王东升, 袁树堂, 杨 祺. 金沙江流域云南片水文极小值演变及生态基流保障分析 [J]. 水资源保护, 2019, 35(04): 35 – 41.
- [16] 秦 瑞, 周瑞伍, 彭明春, 等. CASA 模型在金沙江流域 (云南部分)NPP 研究中的应用 [J]. 山地学报, 2014, 32(06): 698 – 705.
- [17] 王学锋, 吉文娟, 张茂松, 等. 近 53 年来云南干热河谷热量资源变化的比较性特征 [J]. 长江流域资源与环境, 2015, 24(S1): 92 – 97.
- [18] 谢红花, 李 超, 钱 晔, 等. 云南乌蒙山区土壤养分空间变异及海拔梯度分布规律 [J]. 中国农学通报, 2019, 35(08): 52 – 59.
- [19] 李 超, 李文峰. 高原耕地土壤养分空间分布与影响因子相关性研究 [J]. 土壤通报, 2014, 45(5): 1113 – 1118.
- [20] 何腾兵, 董玲玲, 刘元生, 等. 贵阳市乌当区不同母质发育的土壤理化性质和重金属含量差异研究 [J]. 水土保持学报, 2006, 20(6): 157 – 162.
- [21] 赵凯丽, 王伯仁, 徐明岗, 等. 我国南方不同母质土壤 pH 剖面特征及酸化因素分析 [J]. 植物营养与肥料学报, 2019, 25(08): 1308 – 1315.
- [22] 胡向丹, 邓小华, 王 丰, 等. 黔西南州植烟土壤 pH 分布特征及其与土壤养分的关系 [J]. 安徽农业大学学报, 2014, 41(06): 1070 – 1074.
- [23] 汪 沛. 滇西典型甘蔗种植区土壤 pH 时空演变特征及影响因素研究 [D]. 昆明理工大学, 2022.
- [24] 温皓天, 董秋瑶, 王 攀, 等. 桐柏山北麓土壤 pH 值空间分布特征及其影响因素 [J]. 土壤通报, 2023, 54(2): 295 – 305.
- [25] 程 金, 张思文, 黄文卿, 等. 福建省耕地土壤 pH 空间分布及影响因素分析 [J]. 中国农业大学学报, 2022, 27(12): 90 – 101.
- [26] 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 [J]. 土壤, 2021, 53(04): 809 – 816.
- [27] Slessarev E W, Lin Y, Bingham N L, et al. Water balance creates a threshold in soil pH at the global scale[J]. *Nature*, 2016, 540(7634): 567 – 569.
- [28] 李伟峰, 叶英聪, 朱安繁, 等. 近 30a 江西省农田土时空变化及其与酸雨和施肥量间关系 [J]. 自然资源学报, 2017, 32(11): 1942 – 1953.
- [29] 李 涛, 于 蕾, 万广华, 等. 近 30a 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素研究 [J]. 土壤学报, 58(1): 180-190.
- [30] 林跃胜, 马 康, 周 浩, 等. 基于地貌单元的安徽省耕地土空间变异及其驱动因子分析 [J]. 环境科学学报, 2023, 43(7): 318 – 330.
- [31] 黄 平, 李廷轩, 张佳宝, 等. 坡度和坡向对低山茶园土壤有机质空间变异的影响 [J]. 土壤, 2009, 41(2): 264 – 268.

Spatial Variation Characteristics and Influencing Factors of Woodland Soil pH in the Jinsha River Basin

LI Chao¹, CHANG Xin-xia², PENG Wen-yi³, HU Xiao², LI Ying-zhi², LI Wen-feng^{2*}

(1. *Yunnan Meteorological Observatory, Research Center for Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming 650034, China*; 2. *Key Laboratory of Yunnan Education Department for Crop Simulation and Smart Control Technology, Kunming 650201, China*; 3. *Dehong Prefecture Cash Crop Technology Extension Station, Dehong 678499, China*)

Abstract: [Objective] The aim was to investigate spatial variation characteristics of woodland soil pH and to find the main influencing factors on soil pH in the Jinsha River Basin in Yunnan Province. [Method] A total of 19071 soil samples were collected from woodland in Jinsha River Basin, Yunnan Province. The GIS technology and R language were used to analyze the spatial variation characteristics of soil pH value and the effects of climate, soil and topographic factors on soil pH value. [Result] The results showed that the mean of soil pH in the study area was 6.37, showing a normal distribution. The coefficient of variation was 14.9%, showing a moderate degree of variability. The multiple regression analysis and variance analysis showed that the spatial difference of soil pH was mainly influenced by climate, soil type and soil parent material. The difference of soil pH among climate zones was the most obvious, showing soil pH was the lowest in subtropical climate and warm-temperate climate zones. Both soil types and parent materials influenced soil pH significantly. The pH values of yellow soil, red soil, and purple soil were lower than those of other soil types. Moreover, the soil pH values of acidic crystalline rocks, basalts, and argillaceous rocks were lower than those of other parent materials. Compared to climate, the topographic factors had relatively small influence. [Conclusion] Comparative analysis showed that the influence of altitude on soil pH was more caused by climatic zone, soil type, texture and other factors. These results had suitable guides on the development, protection and ecological management of soil resources in the Jinsha River Basin of Yunnan Province.

Key words: Jinsha River Basin; Woodland; Soil pH; Spatial variation

[责任编辑: 裴久渤]