

# 泥石流流域气候与区段对坡面土壤 pH 值的影响

## ——以云南蒋家沟流域为例

杨柳生<sup>1,2,3</sup>, 林静远<sup>1</sup>, 木力迪尔·艾尔肯<sup>1</sup>, 高若允<sup>1,2,3</sup>,

余杭<sup>1,2,3</sup>, 林勇明<sup>1,2,3</sup>, 王道杰<sup>2,4</sup>, 李键<sup>1,3</sup>

(1.福建农林大学 林学院, 福州 350002; 2.中国科学院 山地灾害与地表过程重点实验室, 成都 610041;

3.福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室, 福州 350002;

4.中国科学院 水利部 成都山地灾害与环境研究所, 成都 610041)

**摘 要:**为了探讨泥石流频发流域的不同气候与区段对失稳性坡面土壤 pH 值的影响,掌握土壤 pH 值的空间变异规律,以蒋家沟流域温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区、亚热带干热河谷区的典型失稳性坡面不同区段(堆积区、失稳区、稳定区)土壤为研究对象,采用随机取样法共采集 0—20 cm 的土壤样本 135 个,结合中国科学院东川泥石流观测研究站多年的气象资料,分析了不同气候和失稳性坡面区段与土壤 pH 值的相关性。结果表明:温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区失稳性坡面土壤 pH 值总体偏酸性( $\text{pH} < 6.5$ ),与总体偏碱性( $\text{pH} > 7.5$ )的亚热带干热河谷区之间差异显著( $p < 0.05$ )。亚热带干热河谷区的堆积区、失稳区、稳定区土壤 pH 值均大于亚热带和暖温带半湿润区及温带湿润山岭区且差异显著( $p < 0.05$ )。失稳性坡面土壤 pH 值与气温存在显著的正相关关系( $p < 0.05$ ),与降水量存在极显著的负相关关系( $p < 0.001$ ),与土壤含水量呈极显著负相关关系( $p < 0.001$ )。气候、区段及两者的交互作用对失稳性坡面土壤 pH 值均存在极显著影响( $p < 0.001$ )。除大巴子沟阴坡和查菁沟阳坡两个样地外,大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡的失稳性坡面区段 pH 值均表现为堆积区  $>$  稳定区。蒋家沟流域失稳性坡面土壤 pH 受气候和区段的共同影响,气温、降水及土壤含水量是主要影响因子,同时还受到灾害扰动的影响。

**关键词:**泥石流; 失稳性坡面; 土壤 pH 值; 气候; 区段

中图分类号: S153.4

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2022)01-0105-08

## Effects of Climate Types and Slope Sections on the pH of Soil in the Unstable Slope with High-Frequency Debris Flow in Jiangjiagou Watershed of Yunnan Province

YANG Liusheng<sup>1,2,3</sup>, LIN Jingyuan<sup>1</sup>, Molder Erken<sup>1</sup>, GAO Ruoyun<sup>1,2,3</sup>,

YU Hang<sup>1,2,3</sup>, LIN Yongming<sup>1,2,3</sup>, WANG Daojie<sup>2,4</sup>, LI Jian<sup>1,3</sup>

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China; 2.Key Laboratory of Mountain Hazards and Surface Processes, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041, China; 3.Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002, China; 4.Institute of Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Chengdu 610041, China)

**Abstract:** To explore the effects of climate types and slope sections on the soil pH in the unstable slope with high-frequency debris flow of Jiangjiagou Watershed, and to grasp the spatial variation of soil pH, soils in the sections (deposition area, instability area, stable area) of typical unstable slopes in the temperate humid mountainous area, subtropical and warm temperate semi-humid area, and subtropical dry-hot valley area of the basin were taken as the research objects. We collected a total of 135 soil samples of 0—20 cm, combined with the meteorological data of the Dongchuan Debris Flow Observation and Research Station of the Chinese

收稿日期: 2020-12-19

修回日期: 2021-01-19

资助项目: 国家自然科学基金项目(42071132, 41790434); 中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放研究基金资助项目“生态脆弱区植被对滑坡体的适应策略与调控作用(2019)”；福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)

第一作者: 杨柳生(1995—), 男, 贵州三都人, 在读硕士研究生, 主要从事森林资源经营管理方面研究。E-mail: 1329275818@qq.com

通信作者: 林勇明(1982—), 男, 福建福安人, 博士, 副教授, 主要从事区域资源管理、生态学方面研究。E-mail: monkey1422@163.com

Academy of Sciences for 13 years, and analyzed the correlation between different climate and unstable slope sections and the soil pH value. The results showed that: there were significant differences between the soils of unstable slopes in humid temperate mountainous and subtropical and warm temperate semi-humid areas ( $\text{pH} < 6.5$ ) and in subtropical dry-hot valleys ( $\text{pH} > 7.5$ ) ( $p < 0.05$ ); the soil pH values of deposition zone, instability zone and stable zone in subtropical dry and hot valley area were higher than those in subtropical, warm temperate semi-humid area and temperate humid mountainous area ( $p < 0.05$ ); there was a significant positive correlation between soil pH on unstable slopes and temperature ( $p < 0.05$ ), and a very significant negative correlation with precipitation ( $p < 0.001$ ) and soil water content ( $p < 0.001$ ); climate, zone and their interaction had extremely significant effects on the soil pH value of unstable slope surface ( $p < 0.001$ ); except the two sample plots of Daouzigou Shady Slope and Chajinggou Sunny Slope, the pH values of the unstable slopes of Dadi Shady Slope, Xiaojianfengyang Slope and Duozaogou sunny slope showed deposition zone  $>$  stable zone. The soil pH of the unstable slope surface in the Jiangjiagou watershed was affected by both climate and section, and its main influencing factors included temperature, precipitation, soil water content, and disaster disturbances.

**Keywords:** debris flow; unstable slope; soil pH; climate; zone

土壤 pH 值表示土壤的酸碱程度,作为土壤最重要的化学指标之一,它与土壤有机质含量、土壤微生物群落以及土壤重金属离子等密切相关<sup>[1-2]</sup>。土壤 pH 值在生态系统演替过程中具有良好的指示作用,在生态修复和环境治理方面也具有十分重要的意义<sup>[3]</sup>。当前,在自然因素和人为因素的共同影响下,气候变化、生态系统退化等导致土壤 pH 值发生了改变<sup>[1]</sup>,土壤 pH 值变化又影响着土壤元素的生物地球化学循环,制约植物的正常生长,进而影响陆地生态系统的结构和功能<sup>[4]</sup>。因此,准确掌握土壤 pH 值的分布及变化趋势,成为生态系统可持续发展的重要依据,受到各国学者的高度关注。

近年来,国内外学者开展了大量土壤 pH 值变化及其影响因子的研究。在全球大尺度研究发现,许多国家和地区的土壤 pH 值有明显的下降趋势<sup>[5]</sup>: 1982—1988 年,英国约有 19% 的耕地土壤发生了酸化现象<sup>[6]</sup>;近年来,我国多个省份的土壤酸化程度加大<sup>[7]</sup>。其中,人工施氮、大气氮沉降和酸雨等是土壤 pH 值降低的主要影响因子<sup>[1,8-9]</sup>。在区域尺度研究中,学者们发现土壤含水量及降水雨的多寡影响土壤 pH 值的大小,如干旱地区的土壤 pH 值通常大于湿润地区<sup>[10-11]</sup>;丰沛的降雨可带走土壤中各种盐基离子,同时刺激土壤微生物的硝化反应导致土壤 pH 值减小<sup>[10]</sup>。灾害干扰同样也影响 pH 值,如汶川地震后滑坡区土壤呈碱性而未受损区为弱酸性<sup>[12]</sup>,一般情况下,土壤 pH 值随土层深度增加而升高<sup>[12-13]</sup>,由于灾害滑坡迹地的底层土壤结构翻转变为表层,导致其土壤 pH 值显著高于未受损区段。在各地不同气候和土壤条件下,植物种类的不同也会导致土壤

pH 值的差异性:如云杉林和冷杉林同为针叶林,冷杉可使土壤 pH 值变小,云杉则相反<sup>[6]</sup>;板栗、柑橘、花生等作物能维持或提升红壤表层土壤 pH 值,杨梅、茶树则导致红壤表层土壤酸化<sup>[14-15]</sup>。植被在生长过程中向土壤中释放  $\text{H}^+$ ,导致土壤酸化<sup>[3]</sup>,虽然其凋落物分解过程中会产生阳离子,可对土壤中酸性物质起到一定的缓冲作用,但该过程也产生腐殖质酸等酸性物质<sup>[16]</sup>;植被还通过与固氮菌等的共生作用影响土壤中活性 N 的浓度,同时截留大气沉降过程中  $\text{SO}_2$ ,  $\text{NH}_x$ ,  $\text{NO}_x$  等酸性物质从而改变土壤酸碱度<sup>[17-18]</sup>。当土壤 pH 发生改变,反过来又会影响植被的生长,研究表明土壤 pH 值下降到 3.8~4.2 以下时,土壤中大量的固定的铝会被溶解并释放为游离态从而危害树木根系的正常生长<sup>[19]</sup>。此外,不同的施肥方式、化肥的长期使用或过量使用、有机肥的使用不足等都会加剧土壤酸化<sup>[20]</sup>。总体而言,土壤 pH 值受到多种自然和人为因素,如气候条件、土壤母质、植被、人工施氮等因素共同影响的<sup>[21]</sup>。然而,在灾害频发区,滑坡等灾害严重扰动土壤结构,不同海拔气候带造成的长期降雨量差异及多年灾害干扰对土壤酸碱性的影响特征尚不明,无法确定失稳性坡面的土壤改良措施并选择适宜的植物种类,亟待深入研究。

蒋家沟流域作为典型的泥石流多发区<sup>[22]</sup>,其生态系统退化、生境破碎化严重、植被覆盖率低,除了温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区失稳坡面稳定区外,其他区段植被群落均以草本植物占优势<sup>[23]</sup>。该流域每年都会发生不同程度的山体滑坡、泥石流等自然灾害,给当地造成巨大损失。因此,科研人员、当地政府以该流域作为典型区,开展了一系列生态修复

和环境治理工作<sup>[24]</sup>。目前,蒋家沟流域土壤的研究主要集中在土壤化学计量特征、土壤养分以及土壤入渗等理化性质方面的研究<sup>[23,25-27]</sup>,而土壤酸碱性方面的研究少有报道,无法准确把握灾害干扰后植被恢复对土壤盐基状况变化(即土壤 pH 值)的响应机制。因此,本研究拟以蒋家沟流域各气候区的典型失稳性坡面为研究对象,分析气候、失稳性坡面区段以及两者的交互作用对土壤 pH 值的影响特征,并探究土壤含水量、植被盖度与 pH 值的关系,以期为泥石流频发流域及灾害体的生态修复提供参考依据和数据支撑。

# 1 材料与方法

## 1.1 研究区概况

蒋家沟流域是著名的泥石流多发地区,位于云南省昆明市东川区北端,距离东川约 23.7 km,地处 26°13′—26°17′N,103°06′—103°13′E。该流域发源于会

泽县大海乡,查菁沟、老蒋家沟、多照沟、大凹子沟、门前沟为其主要支沟,下游流经东川区铜都镇绿茂村最终汇入小江,流域面积约 48.52 km<sup>2</sup>。蒋家沟流域地处世界深大断裂带,地质侵蚀强烈,山高谷深且地势陡峭,平均坡度为 43°,流域内最低海拔为 1 041 m,最高海拔为 3 269 m。蒋家沟流域属于典型的亚热带干热气候区,干湿季节分明,降雨集中于夏季,超过半年多的时间(当年 11 月到第二年 4 月)为早期,年均降水量与年蒸发量之比为 691 mm/3 752 mm,年均温度为 20.2℃,极端高温为 40.9℃,极端低温为 -6.2℃。由于独特的地理位置和复杂的地形,其气候类型产生了多样化,从河谷到分水岭可分为植被稀疏的亚热带干热河谷区、泥石流固体物质主要源区的亚热带和暖温带半湿润区、植被覆盖率较高的温带湿润山岭区。3 个气候区具体样地概况见表 1 和表 2 所示<sup>[23,27]</sup>。

表 1 研究区样地基本概况

气候类型	失稳性坡面	经度	纬度	区段	海拔/m	坡度/(°)	坡向	植被盖度/%
温带湿润山岭区	大地阴坡	103°11′49″E	26°16′32″N	稳定区	3100~3200	27	NE	75
				失稳区	3050~3100	35	NE	57
				堆积区	2900~3000	45	NE	36
	小尖风阳坡	103°10′55″E	26°16′46″N	稳定区	3150~3250	30	SE	65
				失稳区	3000~3050	38	SE	38
				堆积区	2900~3000	50	SE	20
亚热带和暖温带半湿润区	多照沟阳坡	103°11′02″E	26°14′29″N	稳定区	2200~2250	20	E	70
				失稳区	2150~2200	37	E	25
				堆积区	2000~2100	45	E	54
亚热带干热河谷区	大凹子沟阴坡	103°8′30″E	26°14′38″N	稳定区	1550~1600	16	NE	92
				失稳区	1500~1550	25	NE	62
				堆积区	1450~1500	30	NE	28
	查菁沟阳坡	103°8′01″E	26°15′06″N	稳定区	1500~1600	25	S	92
				失稳区	1400~1500	30	S	63
				堆积区	1300~1400	40	S	32

注: NE 代表东北,SE 代表东南,E 代表东,S 代表南。

## 1.2 样品采集、处理与分析

1.2.1 样地设置 蒋家沟流域内地形复杂,海拔变化较大,降水和温度的差异使得该区域形成了不同的小气候区。为保证在各气候区选取的样地尽可能的具有代表性,应尽量避免选取的样地受过人类活动或其他动物的干扰,同时,参考了宋永昌<sup>[28]</sup>、McRoberts<sup>[29]</sup>等的样地选择标准,依据坡面整体是否处于失稳状态、失稳的坡面上沿是否受过滑坡影响、下沿是否有明显的堆积区、以及坡面不同区段的面积是否达到森林群落调查的最小面积标准(500 m<sup>2</sup>)等指标,在蒋家沟不同气候区内,选取形成历史在 40 a 左右、

由侵蚀引起沟道两侧坡面下滑的典型失稳性坡面。温带湿润山岭区内选取大地阴坡和小尖风阳坡、亚热带和暖温带半湿润区内选取多照沟阳坡、亚热带干热河谷气候区内选取大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡共计 5 个 50 m × 400 m 标准样地。因为亚热带和暖温带半湿润区村落聚集,人类活动频繁,未发现合适的样地,故只选择了受干扰程度较少的多照沟阳坡。

综合考虑每个样地内坡面稳定程度、地形地貌、植被类型等将失稳性坡面从上部到下部分别划分为稳定区、失稳区和堆积区,每个区段之间的相对高程大于 50 m,实际面积均大于 500 m<sup>2</sup>。

3 个区段中,稳定区稳定程度高,坡度小,地势较为平坦,植被覆盖度高但多以草本植物为主,具有一定的水土保持作用;失稳区稳定程度低,侵蚀作用强

烈,土壤结构疏松,植被较少,为滑坡启动区域;堆积区位于谷底,由松散堆积物构成,坡度大,稳定程度低,植被稀疏。

表 2 各失稳性坡面区段土壤类型和植被类型

失稳性坡面	区段	土壤类型	植被类型
大地阴坡	稳定区	山地棕黄壤、 山地棕壤	鹅绒委陵菜( <i>Potentilla anserine</i> )、黄独( <i>Dioscorea bulbifera</i> )、画眉草( <i>Eragrostis pilosa</i> )
	失稳区		鹅绒委陵菜、香薷( <i>Elsholtzia ciliata</i> )、紫苑( <i>Aster tataricus</i> )
	堆积区		野棉花( <i>Elsholtzia ciliata</i> )、东方草莓( <i>Fragaria orientalis</i> )、景天( <i>Androsace bulleyana</i> )
小尖风阳坡	稳定区	山地棕黄壤、 山地棕壤	东方草莓、老鹳草( <i>Geranium wilfordii</i> )、广布野豌豆( <i>Vicia cracca</i> )
	失稳区		毛马唐( <i>Digitaria chrysoblephara</i> )、广布野豌豆、牛至( <i>Origanum vulgare</i> )
	堆积区		牛筋草( <i>Eleusine indica</i> )、牛至、香薷
多照沟阳坡	稳定区	山地红壤	云南松( <i>Pinus yunnanensis</i> )
	失稳区		艾纳香( <i>Blumea balsamifera</i> )、茅( <i>Imperata cylindrica</i> )、艾( <i>Artemisia argyi</i> )
	堆积区		铁苋菜( <i>Acalypha australis</i> )、艾、菊叶香藜( <i>Chenopodium foetidum</i> )
大四子沟阴坡	稳定区	山地燥红壤	扭黄茅( <i>Heteropogon contortus</i> )、拟金茅( <i>Eulaliopsis binata</i> )
	失稳区		扭黄茅
	堆积区		鬼针草( <i>Bidens pilosa</i> )
查菁沟阳坡	稳定区	山地燥红壤	扭黄茅、黄背草( <i>Themeda triandra</i> )、田菁( <i>Sesbania cannabina</i> )
	失稳区		田菁、苎草( <i>Arthraxon hispidus</i> )、扭黄茅
	堆积区		扭黄茅、苎草、铁苋菜

1.2.2 样品采集与处理与分析 笔者于 2017 年 7—9 月在云南省昆明市东川区蒋家沟流域的 5 个样地中,在不同失稳性坡面的 3 个区段内进行土壤样品的采集工作。将各区段进行 5 m×5 m 的方格分割,随后在签条上对各个方格进行编号置于纸盒内摇匀,连抽 3 次,获得各区段的随机采样点。根据已布置好的采样点,在确保自身安全的情况下,采取土壤样品,同时用手持 GPS 仪和罗盘仪等仪器做好每个样地的地理坐标及坡度、坡向等信息,共收集 135 个土壤样本。采样时,首先去除土壤表层的腐殖质层和杂物,然后用体积为 100 cm<sup>3</sup> 的环刀进行 0—5 cm,5—10 cm,10—20 cm 不同深度的土壤采集,每个深度取 3 个样品并均匀混合后装入自封袋中,然后做好记录,采集完成后回填土坑,防止因挖掘土壤造成的水土流失。

完成外业后,将采集到的新鲜土壤样本带回实验室进行处理,土壤含水量测定采用烘干法<sup>[30]</sup>,即在 105 ℃ 烘箱中烘干至恒重(约 48 h)。将剩余土壤摆在干净的牛皮纸上自然风干后,用镊子去除其中的动植物碎屑以及较大的石块,研磨、过 0.25 mm 筛后进行土壤 pH 值的测定。

采用纯水浸提 pH 计法<sup>[31]</sup>(型号 Starter 3100C)对土壤 pH 值进行测定。首先,将处理好的土壤称取 3 g 放入干净的烧杯中,然后加入适量的去离子水,水土混合比例为 2.5 : 1,温度 25 ℃,用干净的玻璃棒

搅拌,静置 30 min。调试好设备后测量土壤 pH 值,每个样品重复测量三次,取平均值。

1.3 气候数据

气候数据由中国科学院东川泥石流观测研究站提供。蒋家沟流域各气候区设有多个气象观测点,但研究区内部分站点的气象资料从 2003 年才开始收集,由于各气候区在气候条件、地理因素等方面存在差异,随着海拔的升高从亚热带干热河谷区到温带湿润山岭区,气候条件表现为气温逐渐降低、降水量不断增加的趋势,而蒋家沟流域的降水主要集中于夏季(7—9 月),此时各气候区的气候差异最明显,所以选择在该时段进行野外采样,以地理空间差异来替代时间差异,因此未进行季节性采样。为保证数据具有合理的比较性,亚热带干热河谷区采用蒋家沟观测站、上凹子站的气象资料,亚热带和暖温带半湿润区采用陈家梁子站、弯房子站、背阴山站的气象资料,温带湿润山岭区采用蚂蚁坪站、阴家凹站、李家垭口站的气象资料,各气候区的气象观测站点与样地位于同一雨区,具有一定的代表性。利用各个站点 2003—2015 年共 13 a 的气象资料来分析土壤 pH 值与多年平均气温和降水之间的相关性,气候数据的详细分析见同课题组另文报道内容<sup>[23]</sup>。

1.4 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行基本处理和制图,



ArcGIS 10.2 进行地图绘制,采用 R-studio 软件对不同气候区失稳性坡面的气温、降水、土壤含水量、植被盖度以及不同区段的土壤 pH 值进行单因素方差分析、Pearson 相关性分析、回归分析,运用 SPSS 25.0 软件分析气候和区段对失稳性坡面 pH 的影响及其交互作用,差异水平设为 0.05。

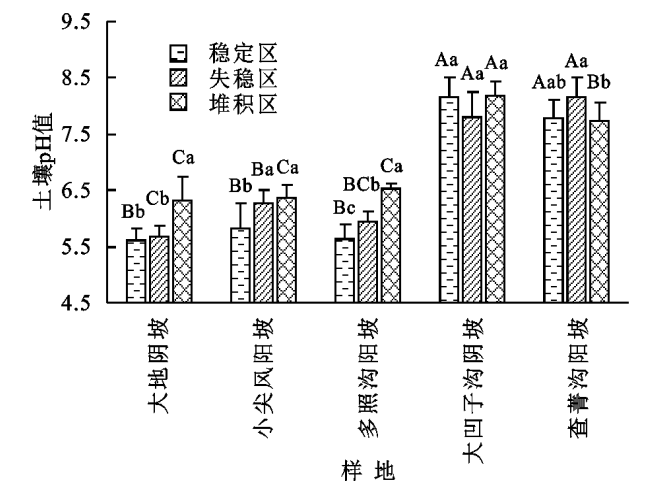
## 2 结果与分析

### 2.1 不同气候区失稳性坡面的土壤 pH 值和土壤含水量

将家沟流域不同气候区土壤 pH 值见图 1。温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区样地土壤 pH 值总体偏酸性( $pH < 6.5$ ),亚热带干热河谷区样地土壤 pH 值总体偏碱性( $pH > 7.5$ )。土壤 pH 值总体表现为亚热带干热河谷区显著高于亚热带和暖温带半湿润区和温带湿润山岭区( $p < 0.05$ )。就不同失稳性坡面区段而言,大地阴坡的堆积区和失稳区显著大于稳定区的土壤 pH 值( $p < 0.05$ );小尖风阳坡的堆积区、失稳区与稳定区土壤 pH 值差异显著( $p < 0.05$ );多照沟阳坡各个区段的土壤 pH 值两两之间差异显著( $p < 0.05$ );查菁沟阳坡的堆积区与失稳区土壤 pH 值差异显著( $p < 0.05$ )。从不同气候区相同区段来看,温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区 3 个样地稳定区的土壤 pH 值与亚热带干热河谷区的稳定区土壤 pH 值差异显著( $p < 0.05$ );从失稳区来看,除样地大地阴坡和多照沟阳坡外,其余气候区的失稳区土壤 pH 值之间差异显著( $p < 0.05$ );从堆积区来看,温带湿润山岭区与亚热带和暖温带半湿润区土壤 pH 值与亚热带干热河谷区土壤 pH 值差异显著( $p < 0.05$ )。

不同气候区失稳性坡面各区段土壤含水量存在显著差异(图 2),从同一失稳坡面不同区段来看,土壤含水量在大地阴坡和小尖风阳坡表现为稳定区和失稳区均显著高于堆积区( $p < 0.05$ ),在亚热带和暖温带半湿润区的多照沟阳坡表现为稳定区和失稳区均显著高于堆积区( $p < 0.05$ ),在亚热带干热河谷区的大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡表现为稳定区 $>$ 失稳区 $>$ 堆积区,各区段间差异显著( $p < 0.05$ )。不同气候区失稳性坡面土壤含水量变化趋势与土壤 pH 相反,总体表现为温带湿润山岭区 $>$ 亚热带和暖温带半湿润区 $>$ 亚热带干热河谷区。从相同区段的稳定区来看,大地阴坡和小尖风阳坡土壤含水量显著高于多照沟阳坡、大凹子阴沟坡和查菁沟阳坡且后三者间

差异显著( $p < 0.05$ );大地阴坡失稳区土壤含水量最高(29.23%),查菁沟阳坡失稳区最低(9.58%),各失稳坡面间差异显著( $p < 0.05$ );土壤含水量在堆积区同样表现为大地阴坡最高(22.06%),查菁沟最低(7.01%),除大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡外,各失稳性坡面堆积区间土壤含水量均存在显著差异( $p < 0.05$ )。



注:不同大写字母表示同样地相同区段之间差异显著( $p < 0.05$ );不同小写字母表示同样地不同区段之间差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

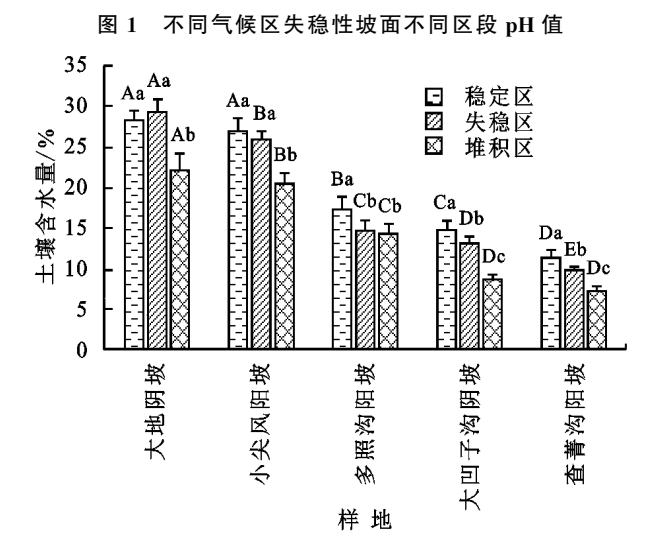


图 2 不同气候区失稳性坡面不同区段土壤含水量

### 2.2 气候、土壤含水量、植被盖度和失稳性坡面区段对土壤 pH 值的影响

对各样地失稳性坡面土壤 pH 值与季节、年均气温及降水量进行回归分析(表 3),土壤 pH 值与春季平均气温具有显著的正相关关系( $p < 0.05$ ),与夏季、秋季、年平均气温具有极显著正相关关系( $p < 0.01$ ),与夏季、秋季、冬季和年降水量都具有显著负相关关系( $p < 0.01$ ),与土壤含水量存在极显著的负相关关系( $p < 0.01$ ),与植被盖度无显著相关关系。方差分析表明,气候、失稳性坡面区段以及两者的交互作用对失稳性坡面土壤 pH 值有极显著影响( $p < 0.001$ )。

表 3 各指标与土壤 pH 值的函数拟合以及气候、  
区段对土壤 pH 的影响

指标	F	回归方程	p	df
气温	春	10.002 $y=0.180x+4.113(R^2=0.835)$	<0.05	14
	夏	18.671 $y=0.144x+3.973(R^2=0.722)$	<0.01	14
	秋	16.117 $y=0.179x+3.774(R^2=0.787)$	<0.01	14
	冬	0.044	0.526	14
	年	12.512 $y=0.193x+3.928(R^2=0.753)$	<0.01	14
降水	春	1.801	0.203	14
	夏	37.938 $y=-0.007x+8.893(R^2=0.745)$	<0.001	14
	秋	9.922 $y=-0.028x+8.966(R^2=0.433)$	<0.01	14
	冬	9.326 $y=-0.122x+9.727(R^2=0.418)$	<0.01	14
	年	34.305 $y=-0.005x+9.484(R^2=0.725)$	<0.001	14
土壤含水量	168.14	$y=-5.279x+53.387(R^2=0.558)$	<0.001	134
植被盖度	0.332		0.575	14
气候	26.76		<0.001	2
区段	21.043		<0.001	2
气候×区段	7.621		<0.001	4

3 讨论

前人研究发现,气候条件和地理环境差异会对土壤 pH 值产生影响,导致其分布具有一定的复杂性和空间变异性<sup>[32]</sup>。回归分析表明土壤 pH 值与春季、夏季、秋季平均气温存在显著正相关关系( $p<0.05$ ),这是因为春、夏、秋季节气温较高,适宜范围内温度的升高能明显提高土壤微生物活性,导致土壤有机质矿化强度的增大和土壤有机质积累速率的下降,从而提高土壤 pH 值<sup>[32-33]</sup>。土壤 pH 值与夏季、秋季、冬季平均降水量均呈显著负相关关系( $p<0.01$ ),其与夏季降水量的函数拟合( $R^2=0.745$ )优于秋季( $R^2=0.433$ )和冬季( $R^2=0.418$ )。当降水量增加时,土壤硝化作用、淋溶作用增强,土壤中  $\text{Na}^+$ 、 $\text{K}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$  等各类盐基离子随地表径流迁移,导致土壤发生碱度流失,从而引起土壤 pH 值的降低<sup>[34-36]</sup>。此外,温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区虽然植被盖度低于亚热带干热河谷区,但其具有多层次的冠层结构及一定厚度的枯枝落叶层,可有效减少土壤的淋溶损失从而抑制酸化作用<sup>[37]</sup>,这也造成植被盖度与土壤 pH 值间不存在显著相关性;另一方面亚热带干热河谷区平均温度高,土壤水分蒸发快,导致土壤盐分随毛管水的移动大量聚集在地表,造成土壤 pH 值升高<sup>[38]</sup>。因此,亚热带干热河谷区土壤 pH 值显著高于亚热带和暖温带半湿润区以及温带湿润山岭区( $p<0.05$ ),这与该区温度高于但降水量低于另两个区有关。

本研究区温带湿润山岭区与亚热带和暖温带半湿润区堆积区的土壤 pH 值显著高于稳定区,这主要

是因为:(1) 稳定区坡度较小且具有较为完善的乔灌草群落结构,植被覆盖度高且土壤结构良好,导致区内凋落物增多,其腐化后产生大量有机质和腐殖酸,同时植物中有机氮加入土壤后发生矿化和硝化作用从而降低了土壤 pH 值<sup>[37]</sup>;(2) 堆积区坡度大、距离长且植被覆盖率低,坡面土壤径流侵蚀作用强,土壤中有有机质、腐殖酸组分流失严重<sup>[39-40]</sup>,由于两气候区堆积区形成时间长,长期的冲刷作用使堆积物细颗粒随坡面径流迁移,原有堆积体中的有机质、腐殖酸等物质消失殆尽,而新的凋落物少且易被坡面径流带走,表层仅残留粗粒堆积物,导致其土壤 pH 值高于稳定区。此外,人类活动对土壤 pH 值的影响也不可忽略。多照沟阳坡稳定区村落聚集,当地居民从事农业活动过程中由于不合理的耕作方式如秸秆还田、化肥特别是氮肥的过量使用等加剧了土壤酸化<sup>[13,32]</sup>,导致稳定区土壤 pH 值显著低于失稳区和堆积区。土壤 pH 值在大凹子阴沟坡的各区段以及查菁沟阳坡稳定区与堆积区和失稳区之间均未表现出显著差异,这主要是因为两个失稳性坡面均位于亚热带干热河谷区,该区生态系统脆弱,植被群落长期处于草本植物群落阶段且分布稀疏,固土能力较弱,加之区内崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,对坡面区段土壤的扰动频繁,导致失稳区以及堆积区表层土壤还未及时被植被固定而深层土壤翻至土表或上坡位土壤滑落又将其覆盖,土壤层序紊乱且长期处于这种更新状态,从而导致各区段土壤 pH 值差异不显著。

本研究发现气候和区段以及二者的交互作用均对失稳性坡面土壤 pH 值造成显著影响( $p<0.001$ )。一方面,不同的气候区内降水、蒸发量和温度的差异影响着土壤硝化作用、淋溶作用导致盐基离子的迁移,从而导致不同气候区土壤 pH 值产生较大差异。但植被类型对土壤 pH 值的影响也不能忽略<sup>[40]</sup>,例如,亚热带和暖温带半湿润区多照沟阳坡的春、夏、冬季温度显著高于温带湿润山岭区大地阴坡,但多照沟阳坡各区段的土壤 pH 值与大地阴坡无显著差异,这主要是因为这两个气候区内均植有大量云南松人工林,其凋落物及植物残体被微生物分解后产生了酸性物质<sup>[31]</sup>,导致其土壤 pH 值下降,这说明植被类型对亚热带和暖温带半湿润区土壤 pH 值的影响程度可能高于气候。另一方面,各失稳性坡面区段土壤紧实度、坡面稳定程度、植被覆盖度等具有较大差异,加上滑坡、崩塌等地质灾害对土壤的扰动作用,使得各区段土壤 pH 值分布复杂化。此外,气候条件和微地貌

会影响土壤含水量,进一步影响土壤酸碱度<sup>[37]</sup>,本研究发现,土壤含水量从亚热带干热河谷区到温带湿润山岭区随着降雨量增加呈逐渐增加的趋势,与土壤 pH 值变化规律相反,与高海峰等<sup>[41]</sup>提出的土壤 pH 值与土壤含水量呈显著负相关关系的结果保持一致。通常土壤具有一定的调节其酸碱度的能力,所以土壤 pH 值不会发生太大的变化<sup>[42]</sup>,但在干旱或半干旱地区,降水量、区段微地貌因素以及灾害对土壤扰动的影响,使土壤含水量发生了改变,导致土壤中缓冲溶液浓度发生变化,从而对土壤 pH 值产生影响<sup>[41]</sup>,最终导致各气候区失稳坡面及区段土壤 pH 值产生分异。

本研究着重分析了气候和区段因素对失稳性坡面土壤 pH 值的影响,但观测时间较短,难以准确认识植被类型、凋落物分解特征、土壤养分含量等因子与气候、区段间的交互作用对 pH 值的影响效应,还需后续开展更全面的研究。

## 4 结 论

(1) 蒋家沟流域不同气候区失稳性坡面土壤 pH 受气温和降水条件的交互影响,表现为土壤 pH 值随平均气温上升而增加( $p < 0.05$ ),随降水量的增大而减少( $p < 0.001$ )。

(2) 土壤 pH 值与土壤含水量存在极显著的负相关关系( $p < 0.001$ ),表现为从亚热带干热河谷区到温带湿润山岭区,土壤 pH 值随着土壤含水量增加呈逐渐下降的趋势。

(3) 大地阴坡、小尖风阳坡和多照沟阳坡的失稳性坡面区段 pH 值均表现为在植被覆盖度高、乔灌草群落结构较为完善、土壤结构良好的稳定区土壤 pH 值显著低于植被覆盖率低、稳定程度差且易受侵蚀作用影响的堆积区( $p < 0.05$ )。

(4) 大凹子沟阴坡和查菁沟阳坡两个失稳性坡面各区段受滑坡、泥石流等地质灾害影响,对土壤的扰动频繁,土壤层序紊乱且长期处于更新状态,导致各区段土壤 pH 值差异不显著。

以上结果为泥石流频发流域失稳坡面及灾害体的土壤改良以及生态修复提供参考依据和数据支撑。

### 参考文献:

[1] 李婷婷,张西美.全球变化背景下内蒙古草原土壤微生物多样性维持机制研究进展[J].生物多样性,2020,28(6):749-758.

[2] Curtin D, Trolove S. Predicting pH buffering capacity of New Zealand soils from organic matter content and mineral characteristics[J]. Soil Research, 2013,51(6):

494-502.

- [3] 杨欢,尹春英,唐波,等.川西亚高山针叶林树种云杉和冷杉土壤酸碱性差异及其机制[J].生态学报,2018,38(14):5017-5026.
- [4] Carly J S, Nancy B D J, Owen M, et al. Impact of Nitrogen Deposition on the Species Richness of Grasslands[J]. Science, 2004,303(5665):1876-1879.
- [5] 李涛,于蕾,万广华,等.近 30 年山东省耕地土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J].土壤学报,2021,58(1):180-190.
- [6] Goulding K W T, Blake L. Land use, liming and the mobilization of potentially toxic metals[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 1998,67(2):137-144.
- [7] 徐仁扣.土壤酸化及其调控研究进展[J].土壤,2015,47(2):238-244.
- [8] Zhou Z G, Wang C K, Zheng M H, et al. Patterns and mechanisms of responses by soil microbial communities to nitrogen addition[J]. Soil Biology and Biochemistry, 2017,115:433-441.
- [9] 张瀚曰,胡斌,包维楷,等.攀枝花地区芒果园土壤 pH 现状及变化趋势[J].应用与环境生物学报,2020,26(1):63-73.
- [10] 张亚峰,王新平,虎瑞,等.荒漠灌丛降雨再分配对土壤 pH 值的影响[J].中国沙漠,2013,33(5):1400-1405.
- [11] 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.
- [12] 孙丽文.5.12 地震后北川不同滑坡治理措施效果研究[D].北京:北京林业大学,2016.
- [13] 雷泽勇,白津宁,周风艳,等.辽宁章古台地区不同年龄樟子松固沙林对土壤 pH 值的影响[J].生态学杂志,2019,38(11):3264-3272.
- [14] 张群.不同利用方式下第四纪红壤酸化特征及趋势[D].长春:吉林农业大学,2018.
- [15] 姬钢.不同土地利用方式下红壤酸化特征及趋势[D].北京:中国农业科学院,2015.
- [16] De Vries W, Breeuwsma A. Relative importance of natural and anthropogenic proton sources in soils in the Netherlands[J]. Water, Air, and Soil Pollution, 1986,28(1/2):173-184.
- [17] 杜春艳,曾光明,张龚,等.韶山针阔叶混交林凋落物层的淋溶及缓冲作用[J].生态学报,2008,28(2):508-516.
- [18] Augusto L, Ranger J, Binkley D, et al. Impact of several common tree species of European temperate forests on soil fertility[J]. Annals of Forest Science, 2002,59(3):233-253.
- [19] Nowotny I, Dhne J, Klingelhfer D, et al. Effect of artificial soil acidification and liming on growth and nu-



- trient status of mycorrhizal roots of Norway spruce (*Picea abies* L Karst.) [J]. Plant and Soil, 1998, 199 (1): 29-40.
- [20] 王见月, 刘庆花, 李俊良, 等. 胶东果园土壤酸度特征及酸化原因分析[J]. 中国农学通报, 2010, 26(16): 164-169.
- [21] 黄昌勇. 土壤学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 171-178.
- [22] 崔鹏. 我国泥石流防治进展[J]. 中国水土保持科学, 2009, 7(5): 7-13, 31.
- [23] 余杭, 孙凡, 李松阳, 等. 不同区段金沙江下游山地失稳性坡面土壤有机碳含量特征[J]. 应用与环境生物学报, 2020, 26(5): 1192-1199.
- [24] 李强. 金沙江干热河谷生态环境特征与植被恢复关键技术研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2008.
- [25] 张广帅, 邓浩俊, 杜锟, 等. 泥石流频发区山地不同海拔土壤化学计量特征: 以云南省小江流域为例[J]. 生态学报, 2016, 36(3): 675-687.
- [26] 郭晓军, 崔鹏, 朱兴华. 泥石流多发区蒋家沟流域的下渗与产流特点[J]. 山地学报, 2012, 30(5): 585-591.
- [27] 吴建召, 孙凡, 崔羽, 等. 不同气候区失稳性坡面植被生物量与土壤密度的关系: 以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为例[J]. 北京林业大学学报, 2020, 42(3): 24-35.
- [28] 宋永昌. 植被生态学[M]. 上海: 华东师范大学出版社, 2001.
- [29] McRoberts R E, Tomppo E O, Czaplewski R L. Sampling designs for national forest assessments[R]. Italy: Rome, Knowledge Reference for National Forest Assessments, 2015.
- [30] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000: 11-13.
- [31] 张敏, 谢运球, 冯英梅, 等. 浸提用水对测定土壤 pH 值的影响[J]. 河南农业科学, 2008, 37(6): 58-60.
- [32] 黄至颖, 刘鸿雁, 冉晓追, 等. 贵州省土壤 pH 时空变化趋势分析[J]. 山地农业生物学报, 2020, 39(4): 21-29.
- [33] 熊佰炼, 张进忠, 彭韬, 等. 喀斯特红壤盐基离子及硅铝铁随径流流失研究[J]. 水土保持研究, 2018, 25(3): 68-74.
- [34] Kutzbach J, Bonan G, Foley J, et al. Vegetation and soil feedbacks on the response of the African monsoon to orbital forcing in the early to middle Holocene[J]. Nature, 1996, 384(6610): 623-626.
- [35] 赵旭, 蔡思源, 邢光熹, 等. 热带亚热带酸性土壤硝化作用与氮淋溶特征[J]. 土壤, 2020, 52(1): 1-9.
- [36] 张驭航, 李玲, 王秀丽, 等. 河南省土壤 pH 值时空变化特征分析[J]. 土壤通报, 2019, 50(5): 1091-1100.
- [37] 张忠华, 胡刚. 南亚热带次生林土壤 pH 值与含水量的空间异质性[J]. 生态科学, 2014, 33(1): 148-153.
- [38] 马波, 吴发启, 李占斌, 等. 作物与坡度交互作用对坡面径流侵蚀产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(3): 33-38.
- [39] 张健瑜. 龙川江流域土壤腐植酸流失影响因子特征分析[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2019.
- [40] Yang Y H, Li P, He H G, et al. Long - term changes in soil pH across major forest ecosystems in China[J]. Geophysical Research Letters, 2015, 42(3): 933-940.
- [41] 高海峰, 白军红, 王庆改, 等. 霍林河下游典型洪泛区湿地土壤 pH 值和土壤含水量分布特征[J]. 水土保持研究, 2011, 18(1): 268-271.
- [42] 朱小琴, 孙维侠, 黄标, 等. 长江三角洲城乡交错区农业土壤 pH 特征及影响因素探讨: 以江苏省无锡市为例[J]. 土壤学报, 2009, 46(4): 594-602.

(上接第 104 页)

- [13] 王愿昌, 吴永红, 寇权, 等. 砒砂岩分布范围界定与类型区划分[J]. 中国水土保持科学, 2007, 5(1): 14-18.
- [14] 张汉雄. 黄土高原的暴雨特性及其分布规律[J]. 地理学报, 1983, 83(4): 416-425.
- [15] 谢云, 刘宝元, 章文波. 侵蚀性降雨标准研究[J]. 水土保持学报, 2000, 14(4): 6-11.
- [16] 王万忠, 焦菊英. 中国的土壤侵蚀因子定量评价研究[J]. 水土保持通报, 1996, 16(5): 1-20.
- [17] 杨振奇, 秦富仓, 李旻宇, 等. 砒砂岩区不同土地利用类型土壤入渗性能及其影响因素研究[J]. 生态环境学报, 2020, 29(4): 733-739.
- [18] 杨振奇, 秦富仓, 李龙, 等. 砒砂岩区小流域土壤有机质空间分布特征及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2019, 35(17): 154-161.
- [19] 高光耀, 傅伯杰, 吕一河, 等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, 33(1): 12-22.
- [20] 于国强, 李占斌, 李鹏, 等. 不同植被类型的坡面径流侵蚀产沙试验研究[J]. 水科学进展, 2010, 21(5): 593-599.
- [21] 余新晓, 张晓明, 武思宏, 等. 黄土区林草植被与降水对坡面径流和侵蚀产沙的影响[J]. 山地学报, 2006, 24(1): 19-26.
- [22] 陈丽华, 张艺, 余新晓, 等. 北京山区典型森林植被林冠截留特征及模拟[J]. 应用基础与工程科学学报, 2013, 21(3): 423-431.
- [23] 王改玲, 王青杵, 石生新. 晋北黄土区降雨特征及其对坡地土壤侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2013, 27(1): 1-5.