

泥石流流域失稳性坡面土壤抗蚀性评价

俞陈辉^{1,2}, 田雪^{1,2}, 刘鑫铭¹, 虞西尔¹, 林勇明^{1,2}

(1.福建农林大学林学院,福州 350002;2.福建省高校森林生态系统过程与经营重点实验室,福州 350002)

摘要:为探究失稳性坡面不同区段对土壤抗蚀性的影响效应,加深滑坡对坡面土壤结构作用机制的认识,以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为研究区,选取区内3个气候区(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)共5个样地(大地阴坡、小尖风阳坡、多照沟阳坡、查菁沟阳坡、大巴子沟阴坡),分析土壤样品的理化性质,并运用主成分分析法对5个样地失稳性坡面土壤抗蚀性进行综合研究。结果表明:(1)5个样地的土壤持水量、孔隙结构、有机质含量、水解氮含量、速效钾含量、土壤团聚体粒径 ≥ 0.25 mm占比、土壤团聚体平均重量直径在稳定区显著大于堆积区,呈现稳定区 $>$ 失稳区 $>$ 堆积区趋势;而土壤容重、有效磷含量、全磷含量、土壤团聚体粒径 < 0.25 mm占比则在稳定区显著小于堆积区。(2)5个样地的土壤抗蚀性综合得分(F)均表现出稳定区(2.401) $>$ 失稳区(0.017) $>$ 堆积区的规律(-2.417),且3个坡面区段间差异显著($p < 0.05$)。3个坡面区段土壤抗冲指数大小依次为稳定区(45.873 L/(s·g)) $>$ 失稳区(33.245 L/(s·g)) $>$ 堆积区(15.723 L/(s·g)),稳定区与堆积区差异显著($p < 0.05$)。抗冲指数与抗蚀性具有极显著正相关关系。(3)土壤持水性、孔隙度、有机质含量、氮钾含量、粒径 ≥ 0.25 mm团聚体含量和团聚体平均重量直径与土壤抗蚀性综合得分呈显著正相关;而土壤容重、有效磷含量、粒径 < 0.25 mm的微团聚体含量则与土壤抗蚀性综合得分呈显著负相关。研究结果阐明了泥石流流域土壤抗蚀性对失稳性坡面的响应机制,促进了灾害对土壤结构影响效应的认识,为总结提升失稳性坡面土壤抗蚀性的综合措施提供参考依据。

关键词:土壤抗蚀性;蒋家沟;失稳性坡面;主成分分析

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)04-0013-09

DOI:10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.003

Evaluation of Soil Anti-Erodibility of Unstable Slope in Debris Flow Basin

YU Chenhui^{1,2}, TIAN Xue^{1,2}, LIU Xinming¹, YU Xier¹, LIN Yongming^{1,2}

(1.College of Forestry, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002;

2.Key Laboratory for Forest Ecosystem Process and Management of Fujian Province, Fuzhou 350002)

Abstract: This paper aims to investigate the effect of different sections of unstable slope on soil anti-erodibility and deepen the understanding of the action mechanism of landslide on slope soil structure. Totally five sample plots (including Dadi shady slope, Xiaojianfeng sunny slope, Duo Zhao gully sunny slope, Chajing gully sunny slope and Daaози gully shady slope) in three climate regions (including temperate humid mountain ridge region, subtropical and warm temperate sub-humid region, subtropical dry-hot valley region) were selected as a research area in the Jiangjia gully watershed, Dongchuan district, Kunming, Yunnan Province. We analyzed the physical and chemical properties of soil samples and used principal component analysis (PCA) to study the soil erosion resistance of unstable slopes in the study plots. The results showed that: (1) The soil water-holding capacity, porosity structure, organic matter content, hydrolyzed nitrogen, available potassium, the proportion of particle size ≥ 0.25 mm, mean weight diameter of soil aggregate in the stable area were significantly larger than those in the accumulation area. The above indicators showed the trend of stable area $>$ unstable area $>$ accumulation area, while the soil bulk density, available phosphorus, total phosphorus, and the proportion of particle size < 0.25 mm in the stable area were significantly smaller than those in the accumulation area. (2) The comprehensive index of soil anti-erodibility (F) of the 5 sample plots

收稿日期:2021-11-29

资助项目:国家自然科学基金项目(42071132);中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室开放基金项目(2019);福建农林大学杰出青年科研人才计划项目(xjq2017016)

第一作者:俞陈辉(1997—),男,在读硕士研究生,主要从事土壤侵蚀与生态恢复方面的研究。E-mail: ychenhui@fafu.edu.cn

通信作者:林勇明(1982—),男,博士,副教授,主要从事自然地理学、恢复生态学领域的研究。E-mail: monkey1422@163.com

ranged as: stable area (2.401) > unstable area (0.017) > accumulation area (−2.417), and the difference among 3 slope sections was significant ($p < 0.05$). The indexes of soil anti-scourability followed the rule as stable area (45.873 L/(s · g)) > unstable area (33.245 L/(s · g)) > accumulation area (15.723 L/(s · g)). There were significant differences between the stable zone and the accumulation zone ($p < 0.05$). There was a significantly positive relationship between the comprehensive index of soil anti-erodibility and the indexes of soil anti-scourability. (3) The soil water-holding capacity, porosity, organic matter content, nitrogen and potassium content, the proportion of particle size ≥ 0.25 mm and mean weight diameter in the study area were significantly positively correlated with the comprehensive scores of soil anti-erodibility, while the soil bulk density, available phosphorus content, and particle size < 0.25 mm were significantly negatively correlated with the comprehensive scores of soil anti-erodibility. This study clarifies the corresponding mechanism of soil erosion resistance in debris flow basin on landslide induced unstable slope, promotes the understanding of the impact of disasters on soil structure, and has reference value for comprehensive measures to improve soil erosion resistance on unstable slope.

Keywords: soil anti-erodibility; Jiangjia gully; unstable slope; principal component analysis

随着人类社会的发展,不断出现环境污染和植被破坏等生态问题,土壤侵蚀加剧,生态环境恶化日益凸显^[1],不仅破坏农业生产,引起泥石流、滑坡等地质灾害,还造成区域生态治理投入增大,加剧区域经济负担^[2]。因此,针对性地进行土壤侵蚀治理,提高区域土壤的整体抗蚀性,对于区域生态恢复和可持续发展具有重要意义。

土壤抗蚀性是指土壤抵抗降水、径流对其分散与悬浮的能力,其强弱取决于土粒间的胶结力及土粒和水的亲和力,是评价土壤抵抗侵蚀营力分离和搬运能力的重要参数之一^[3]。土壤抗蚀性评价作为研究土壤侵蚀的重要内容,受到国内外学者的普遍重视^[4-5]。目前学界普遍认同土壤理化性质是影响土壤抗蚀性的最主要因素^[6-9]。王春燕等^[10]研究发现,南方红壤的土壤团聚体与土壤抗蚀性之间存在显著正相关;骆东奇等^[11]研究认为,紫色土的有机质含量越大,土壤抗蚀性越高。然而,土壤抗蚀性为多因子综合指标,无法直接测定,在不同研究区域可适用指标存在分歧,因此在特定区域筛选出合适的评价指标,是正确认识区域土壤抗蚀性的重要依据。

蒋家沟流域位于金沙江下游,由于地质活动和降雨频繁,新老构造复杂,活动强烈,滑坡、崩塌和泥石流等地质灾害频发^[12],形成大量包含稳定区、失稳区、堆积区的失稳性坡面,坡面土壤受降雨和径流的冲刷,进一步加剧土壤侵蚀,生态环境问题日趋严重。近年来,学者们针对蒋家沟泥石流频发区开展相关研究,但主要集中于土壤粒径特征^[13-14]、泥石流成因^[15]及特征^[16-17]、不同植被类型间土壤理化性质的差异^[18]、流域群落特征^[19-20]等,关于该区域土壤抗蚀性综合评价方面的研究较少。仅廖超林等^[21]和陈爱民等^[3]对蒋家沟流域源地和单一植被类型的土壤抗蚀

性进行综合分析,缺乏土壤抗蚀性主要影响因子的界定和抗侵蚀能力的充分认识,亟待加强。了解失稳性坡面不同区段(稳定区、失稳区、堆积区)的土壤理化性质差异是研究蒋家沟流域土壤抗蚀性评价的重要内容,有助于加快蒋家沟流域泥石流频发区的生态恢复进程。因此,本研究依托中科院东川泥石流观测研究站,以云南省昆明市东川区蒋家沟流域为研究区,通过对失稳性坡面的稳定区、失稳区、堆积区 3 个不同区段的土壤理化性质进行分析,采用主成分分析法,综合评价其土壤抗蚀性,以期为金沙江下游生态脆弱区的水土流失防治、土壤质量改善及生态系统的恢复提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为金沙江下游蒋家沟流域(103°06′—103°13′E, 26°13′—26°17′N),海拔 1 042~3 269 m^[22],海拔高差大,流域内气候、植被及土壤垂直分异明显。按照研究区的海拔高度,从分水岭到河谷可分为温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区、亚热带干热河谷区 3 个气候区^[23](图 1)。温带湿润山岭区位于流域上游,年平均降水量 1 200 mm,年平均蒸发量 1 350 mm,年平均气温 7 °C;原生植被为温带针阔混交林,地表基带土壤为山地棕黄壤。亚热带和暖温带半湿润区位于流域中游,年平均降水量为 700~850 mm,年平均蒸发量 1 700 mm,年平均气温 13 °C;植被为亚热带阔叶林和半干旱稀树草原带,基带土壤为山地红壤。亚热带干热河谷区位于流域中下游,干湿季节明显,5—10 月降水充沛,其他季节较为干旱。年平均降水量约为 693 mm,年平均蒸发量为 3 638 mm,年平均气温为 20 °C,最高温达 40.9 °C,最低温为 −6.2 °C,温差大^[24]。

根据坡面地形特征和稳定程度,将失稳性坡面划分为3个不同区段:(1)位于坡面上坡位的稳定区,地势较缓,主要植被为原生草丛或云南松(*Pinus yunnanensis*)人工林,植被覆盖率为90%~95%,坡面侵蚀程度低;(2)位于坡面中坡位的失稳区,分布着大面积由滑坡作用形成的裸露地表,土壤结构松散;(3)位于坡面下坡位的堆积区,主要由滑坡的松散固体物质在谷底淤积形成的滑坡堆积体组成,堆积体表面主要为粗粒堆积物,内部主要为细粒堆积物。

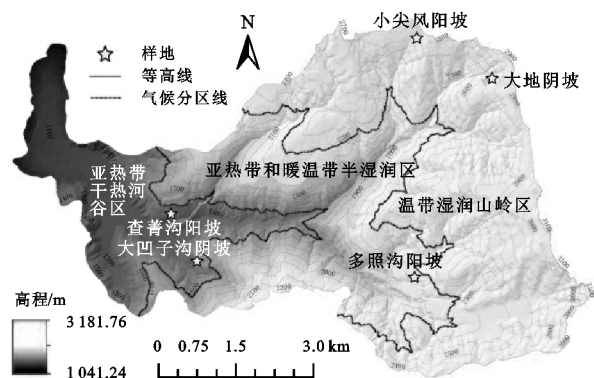


图1 研究区地理位置

1.2 研究方法

1.2.1 样地设置 根据蒋家沟流域实地考察情况,在课题组前期调查和研究^[25]的基础上,在研究区域3个不同的气候区共选择5块范围为50 m×400 m的失稳性坡面作为样地,每个坡面都包括稳定区、失稳区、堆积区3个区段。在温带湿润山岭区选择大地阴坡和小尖风阳坡,在暖温带半湿润区选择多照沟阳坡,在亚热带干热河谷区选择查菁沟阳坡和大巴子沟阴坡。样地基本信息见参考文献^[25]。

1.2.2 土壤样品采集 为减少土壤样品采集过程中的空间异质性,2019年7月在样方内随机选点,确保连续7天无降雨后,采用5点取样法,采集去除地表杂质的表层土(0—20 cm),用以测定土壤的理化性质。使用100 cm³环刀在不同深度土层(0—5,5—10,10—20 cm)分别采集原状土,用以测定土壤团聚体含量、容重和孔隙度等,并计算其在不同深度土层的平均值作为原始指标。

1.2.3 土壤样品测定 采用环刀法测定土壤容重、孔隙度、含水率等土壤基本指标^[26];采用沙维诺夫干筛法测定土壤团聚体含量,计算各粒径土壤团聚体质量百分比^[26]和土壤团聚体平均重量直径。土壤营养元素测定:重铬酸钾外加热法测定土壤有机质含量^[26];采用硫酸—半微量凯氏定氮法(ATN-300全自动定氮仪)测定全氮含量^[26];采用碱熔—钼锑抗比色法测定全磷含量^[26];采用碱解—扩散法测定水解氮含量^[26];采用钼锑抗比色法测定有效磷含量^[26];采用原子吸收分光光度计测定速效钾含量^[27]。

1.2.4 土壤抗冲指数测定方法 采用原状土冲刷槽法,调整冲刷槽坡度为5°,将5个样地的原状土样(3 cm×3 cm×10 cm)放入装样室后,打开水阀开始计时,接取不同时刻的流体以测定含沙量随时间的变化。土壤抗冲性用抗冲系数(k)(L/(s·g))表示。 k 越大,土壤抗冲性越强^[28]。

$$k = \frac{q \times t}{m}$$

式中: q 为一次冲刷所需水量(L); t 为冲刷时间(s); m 为水流冲刷产生的泥沙质量(g)。

1.2.5 土壤抗蚀性评价方法 综合陈爱民等^[3]和王针针等^[29]的研究结果,结合研究区环境状况,选取3大类20个指标作为土壤抗蚀性指标进行分析。

物理性质类包含土壤容重(X_1)、土壤含水率(X_2)、最大持水量(X_3)、毛管持水量(X_4)、田间持水量(X_5)、总孔隙度(X_6)、毛管孔隙度(X_7)和非毛管孔隙度(X_8);营养元素类包含有机质含量(X_9)、全氮含量TN(X_{10})、全磷含量TP(X_{11})、水解氮含量HN(X_{12})、有效磷含量AP(X_{13})和速效钾含量AK(X_{14});团聚体类包含粒径<0.25 mm的微团聚体含量(X_{15})、粒径0.25~0.5 mm的团聚体含量(X_{16})、粒径0.5~1 mm的团聚体含量(X_{17})、>1 mm团聚体含量(X_{18})、≥0.25 mm团聚体含量(X_{19})、团聚体平均重量直径(MWD)(X_{20})。对以上20个指标进行主成分分析,通过对得出的因子得分系数和方差贡献率进行相关计算得到综合得分,并以综合得分作为土壤抗蚀性综合指数。

1.2.6 数据处理与统计 利用Excel 2016整理数据,进行基本运算;利用SPSS 19.0软件对土壤原始理化性质数据进行标准化处理;利用R语言4.1.1对不同区段土壤理化性质数据进行ANOVA方差分析和多重比较(Duncan, $p < 0.05$),并且对土壤抗蚀性指标进行主成分分析及绘制Pearson相关性分析表。

2 结果与分析

2.1 失稳性坡面土壤理化性质特征

2.1.1 土壤物理性质分析 本研究分析5个样地中稳定区、失稳区、堆积区3个区段的土壤理化性质。从图2可以看出,不同样地的土壤容重呈现稳定区小于堆积区的趋势,其中大地阴坡、多照沟阳坡、大巴子沟阴坡的稳定区与堆积区土壤容重差异显著($p < 0.05$)。5个样地稳定区的土壤总孔隙度、毛管孔隙度和非毛管孔隙度均显著高于堆积区($p < 0.05$),样地的孔隙度基本呈现出稳定区>失稳区>堆积区的趋势。从图3可以看出,土壤含水率、土壤最大持水量、土壤毛管持水量和土壤田间持水量总体呈现稳定区>失稳区>堆积区,稳定区的土壤持水量均显著高

于堆积区($p<0.05$)。5 个样地持水量变化趋势与土壤孔隙度近似。就同一坡面区段而言,温带湿润山岭区显著大于亚热带干热河谷区($p<0.05$);且从同一坡面区段来看,同位于温带湿润山岭区,大地阴坡持水量显著高于小尖风阳坡($p<0.05$)。

2.1.2 土壤养分特征分析 由表 1 可知,除多照沟阳坡外,稳定区土壤有机质均显著高于堆积区($p<0.05$),小尖风阳坡和大凹子沟阴坡 3 个区段之间存在显著差异($p<0.05$),表现为稳定区>失稳区>堆积区;5 个样地土壤全氮和水解氮含量总体呈现稳定区大于堆积区的趋势,其中小尖风阳坡稳定区与堆积区之间差异显著($p<0.05$)。除大凹子沟阴坡无明显变化规律外,其余 4 个样地全磷和有效磷含量均呈现堆积区>失稳区>稳定区的趋势。除查菁沟阳坡外,4 个样地堆积区有效磷含量显著大于稳定区($p<0.05$);大凹子沟阴坡速效钾含量呈现堆积区>失稳区>稳定区趋势,堆积区与稳定区差异显著($p<0.05$),其余 4 个样地速效钾含量变化趋势相反。5 个样地的各养分含量普遍在多照沟阳坡时表现出最低值。

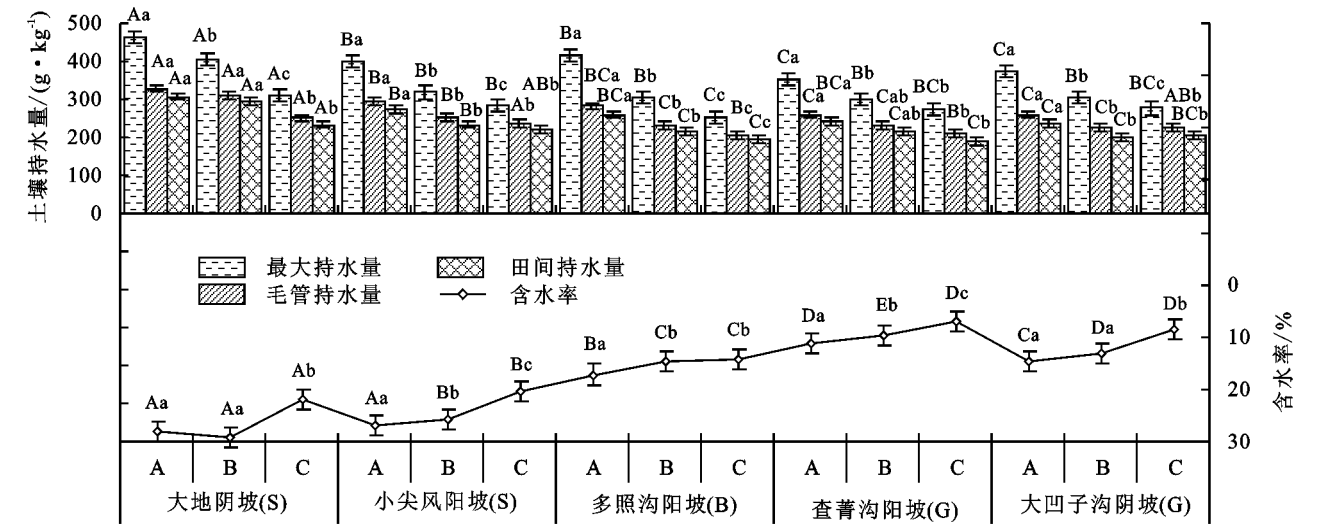


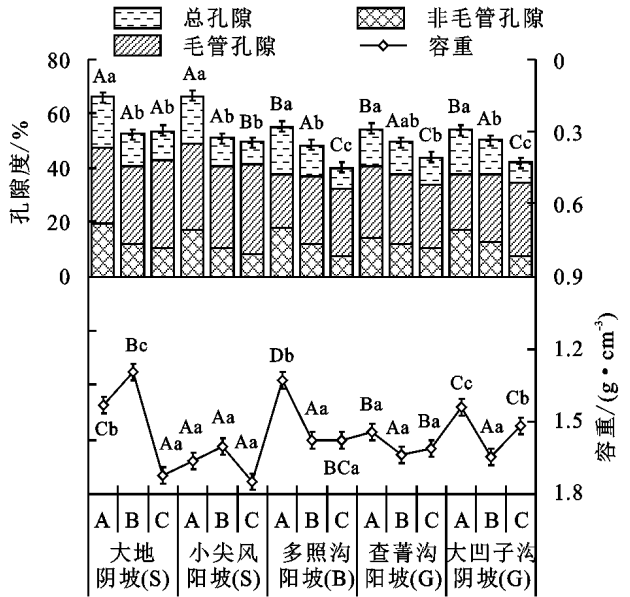
图 3 各样地失稳性坡面土壤持水性

2.1.3 土壤团聚体分析 由图 4 可知,总体上各样地的土壤团聚体质量百分比从稳定区到堆积区普遍呈现出微团聚体(粒径 $<0.25\text{ mm}$)增大、大团聚体(粒径 $0.25\sim0.5, 0.5\sim1, >1\text{ mm}$)减小的趋势。除小尖风阳坡外,其他样地的土壤团聚体平均重量直径(MWD)均呈现出稳定区>失稳区>堆积区的规律,其中稳定区与堆积区差异显著($p<0.05$)。

2.2 抗蚀性指标的主成分分析

本研究对各样地失稳性坡面不同区段的土壤进行分析,共选用 20 个指标进行抗蚀性评价。采用主成分分析法对 20 个指标进行简化,减少数据冗余的同时综合分析土壤抗蚀性^[5]。

由表 2 可知,前 4 个主成分累积方差贡献率为 $88.778\%>85.00\%$,且 4 个主成分特征值均大于 1,



注: A 为稳定区;B 为失稳区;C 为堆积区;不同大写字母表示同一坡面区段不同样地之间差异显著($p<0.05$);不同小写字母表示同一样地不同坡面区段之间差异显著($p<0.05$);S 为温带湿润山岭区;B 为亚热带和暖温带半湿润区;G 为亚热带干热河谷区。下同。

图 2 各样地失稳性坡面土壤孔隙度与容重

可以反映原来 20 个指标的整体信息,因此选取这 4 个因子作为主成分进行后续分析。

利用最大方差法,得到因子旋转载荷矩阵(表 3),由表 3 可分别得出 4 个主成分的线性表达式:
$$F_1 = -0.165X_1 + 0.202X_2 + 0.283X_3 + 0.276X_4 + 0.270X_5 + 0.257X_6 + 0.208X_7 + 0.253X_8 + 0.236X_9 + 0.093X_{10} - 0.103X_{11} + 0.216X_{12} - 0.191X_{13} + 0.227X_{14} - 0.247X_{15} - 0.158X_{16} + 0.210X_{17} + 0.251X_{18} + 0.247X_{19} + 0.257X_{20}$$

$$F_2 = -0.254X_1 - 0.323X_2 - 0.030X_3 - 0.147X_4 - 0.168X_5 - 0.181X_6 - 0.355X_7 + 0.077X_8 - 0.085X_9 + 0.186X_{10} - 0.106X_{11} - 0.188X_{12} - 0.277X_{13} - 0.042X_{14} - 0.281X_{15} + 0.41X_{16} +$$

$$0.042X_{17}+0.244X_{18}+0.281X_{19}+0.249X_{20}$$
$$F_3=-0.017X_1-0.057X_2+0.075X_3+0.018X_4+$$
$$0.019X_5+0.073X_6+0.010X_7+0.132X_8-$$
$$0.348X_9-0.543X_{10}-0.560X_{11}-0.336X_{12}-$$
$$0.013X_{13}+0.295X_{14}+0.021X_{15}-0.04X_{16}+$$
$$0.164X_{17}-0.082X_{18}-0.02X_{19}-0.037X_{20}$$
$$F_4=-0.616X_1+0.068X_2+0.100X_3+0.15X_4+$$
$$0.163X_5-0.274X_6-0.323X_7-0.144X_8+$$

$$0.101X_9+0.055X_{10}-0.07X_{11}+0.063X_{12}-$$
$$0.296X_{13}+0.146X_{14}+0.221X_{15}-0.21X_{16}-$$
$$0.106X_{17}-0.186X_{18}-0.222X_{19}-0.193X_{20}$$

由表 2 可知,主成分 1,2,3,4 的累积方差贡献率

为 88.778%,各主成分方差贡献率占累积方差贡献率

比重依次为 65.50%,15.56%,12.59%,6.35%,结合

表 3 推算出土壤抗蚀性综合得分计算公式为: $F =$

$$0.655F_1+0.1556F_2+0.1259F_3+0.0635F_4。$$

表 1 各样地失稳性坡面土壤养分特征

土壤养分特征	区段	大地阴坡(S)	小尖风阳坡(S)	多照沟阳坡(B)	查菁沟阳坡(G)	大凹子沟阴坡(G)
有机质/(g·kg ⁻¹)	A	34.63±4.27Aa	33.07±1.21Aa	12.61±3.95Ba	21.81±11.77Ba	34.73±2.12Aa
	B	45.90±7.79Aa	26.35±0.35Bb	14.41±3.07Ca	13.92±2.20Cab	20.44±2.75BCb
	C	19.16±6.46Ab	15.43±0.80Ac	14.43±5.89Aa	6.03±3.97Bb	11.60±0.73ABc
TN/(g·kg ⁻¹)	A	1.15±0.52BCa	1.87±0.10ABa	0.92±0.23Ca	1.63±0.83ABCa	2.32±0.19Aa
	B	1.96±0.40Aba	1.50±0.15ABb	1.09±0.33Ba	1.33±0.35ABa	1.62±0.62ABa
	C	1.34±0.34ABa	0.80±0.02Bc	1.57±0.40Aa	0.87±0.10Ba	1.80±0.46Aa
TP/(g·kg ⁻¹)	A	0.74±0.02ABa	0.74±0.02ABa	0.47±0.01Bc	0.71±0.34ABa	0.92±0.03Aa
	B	0.80±0.06Aa	0.69±0.07ABa	0.60±0.04Bb	0.72±0.03Aa	0.79±0.08Aa
	C	0.90±0.12Aa	0.79±0.14Aa	0.90±0.04Aa	0.83±0.20Aa	0.88±0.11Aa
HN/(mg·kg ⁻¹)	A	18.07±4.08Aab	17.61±6.69Aa	1.86±1.13Ba	14.24±7.27Aa	12.79±1.48Aa
	B	24.74±4.30Aa	6.94±1.09Cb	1.72±0.80Da	4.76±0.42CDb	11.54±3.00Ba
	C	12.21±3.31Ab	4.08±0.24Bb	1.64±0.26Ba	3.18±0.85Bb	2.74±0.16Bb
AP/(mg·kg ⁻¹)	A	7.55±1.83Bb	8.76±2.50Bb	6.24±0.99Bb	55.50±38.95Aa	17.69±7.71Bb
	B	5.35±0.81Bb	12.21±4.63Bb	5.74±0.71Bb	74.49±8.75Aa	11.26±1.70Bab
	C	105.70±47.66ABa	128.31±18.39Aa	77.50±23.61Ba	79.82±7.48Ba	21.44±2.69Ca
AK/(mg·kg ⁻¹)	A	49.33±10.58ABa	58.70±13.53ABa	61.40±4.94Aa	44.09±7.45Ba	12.02±2.01Ca
	B	37.06±2.43Aab	18.55±8.92ABa	36.62±14.60Ab	10.03±0.53Bb	13.51±7.08Ba
	C	17.30±13.84Ab	9.28±2.09ABb	6.88±2.31ABc	3.69±1.80Bb	14.32±2.34ABa

注:表中数据为平均值±标准差;A 为稳定区;B 为失稳区;C 为堆积区;不同大写字母表示同一坡面区段不同样地之间差异显著($p<0.05$),不同小写字母表示同一样地不同坡面区段之间差异显著($p<0.05$);S 为温带湿润山岭区;B 为亚热带和暖温带半湿润区;G 为亚热带干旱河谷区。

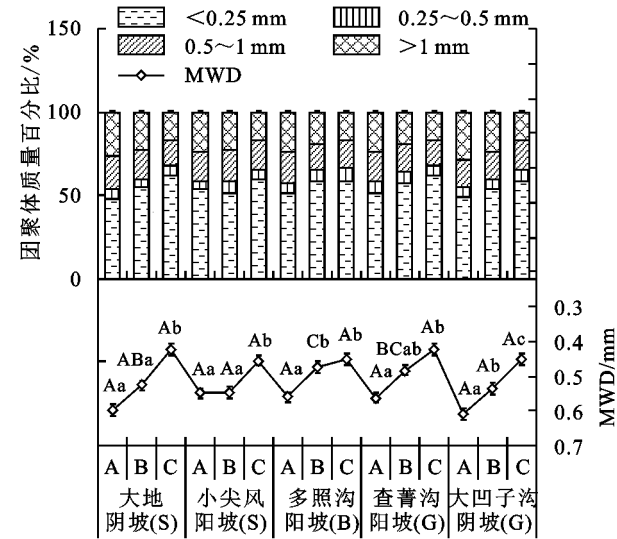


图 4 土壤团聚体质量百分比

2.3 土壤抗蚀性综合得分、抗冲指数及相关性分析

本研究以主成分分析的综合得分作为土壤抗蚀

性综合得分(F)来表征土壤抗蚀性能的强弱, F 值越

大,抗蚀性越强。通过将因子原始数据的标准化结果

依次序分别代入主成分线性表达式,计算求得各样地

及坡面区段的土壤抗蚀性综合得分(F)。从表 4 可

以看出,土壤抗蚀性综合得分最高为大地阴坡的稳定

区(4.117),最低为查菁沟阳坡的堆积区(-3.075)。

对不同坡面区段土壤抗蚀性进行综合评价(平均主成

分综合得分)可知稳定区(2.401)>失稳区(0.017)>

堆积区(-2.417),且区段间差异显著($p<0.05$)(图

5a)。土壤抗冲性是评价土壤结构稳定性的重要指

标^[30],从图 5b 可知,3 个坡面区段土壤抗冲指数大小

依次为稳定区(45.873 L/(s·g))>失稳区(33.245

L/(s·g))>堆积区(15.723 L/(s·g)),稳定区与堆

积区差异显著($p<0.05$)。

表 2 各主成分旋转后的方差解释

主成分	特征值	方差贡献率/%	累积方差贡献率/%
1	3.410	58.150	58.150
2	1.662	13.810	71.960
3	1.496	11.180	83.140
4	1.062	5.636	88.778

表 3 因子旋转载荷矩阵

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	指标	PC1	PC2	PC3	PC4
X_1	-0.165	-0.254	-0.017	-0.616	X_{11}	-0.103	-0.106	-0.560	-0.070
X_2	0.202	-0.323	-0.057	0.068	X_{12}	0.216	-0.188	-0.336	0.063
X_3	0.283	-0.030	0.075	0.100	X_{13}	-0.191	-0.277	-0.013	-0.296
X_4	0.276	-0.147	0.018	0.150	X_{14}	0.227	-0.042	0.295	0.146
X_5	0.270	-0.168	0.019	0.163	X_{15}	-0.247	-0.281	0.021	0.221
X_6	0.257	-0.181	0.073	-0.274	X_{16}	-0.158	0.410	-0.040	-0.210
X_7	0.208	-0.355	0.010	-0.323	X_{17}	0.210	0.042	0.164	-0.106
X_8	0.253	0.077	0.132	-0.144	X_{18}	0.251	0.244	-0.082	-0.186
X_9	0.236	-0.085	-0.348	0.101	X_{19}	0.247	0.281	-0.020	-0.222
X_{10}	0.093	0.186	-0.543	0.055	X_{20}	0.257	0.249	-0.037	-0.193

表 4 主成分得分

样地	区段	主成分得分				综合得分 (F)	排名
		F_1	F_2	F_3	F_4		
大地阴坡(S)	A	6.357	-0.719	0.741	-0.447	4.117	1
	B	3.705	-1.283	-1.971	2.724	2.152	4
	C	-2.131	-3.417	-0.762	-0.153	-2.033	12
小尖风阳坡(S)	A	4.332	-2.040	-0.222	-0.856	2.438	3
	B	1.021	0.765	0.104	-0.731	0.754	7
	C	-2.749	-2.293	0.719	-1.111	-2.137	13
多照沟阳坡(B)	A	2.850	1.392	3.646	1.039	2.608	2
	B	-1.919	0.500	1.687	0.810	-0.916	9
	C	-4.347	0.936	-0.943	0.295	-2.802	14
查菁沟阳坡(G)	A	1.324	1.318	0.057	-0.970	1.018	6
	B	-2.268	0.534	0.461	-0.785	-1.395	10
	C	-4.728	-0.625	0.650	0.586	-3.075	15
大凹子沟阴坡(G)	A	2.409	2.482	-2.667	-0.573	1.592	5
	B	-0.606	1.222	-0.812	-0.805	-0.360	8
	C	-3.251	1.228	-0.686	0.978	-1.963	11

注: F 为土壤抗蚀性综合得分。

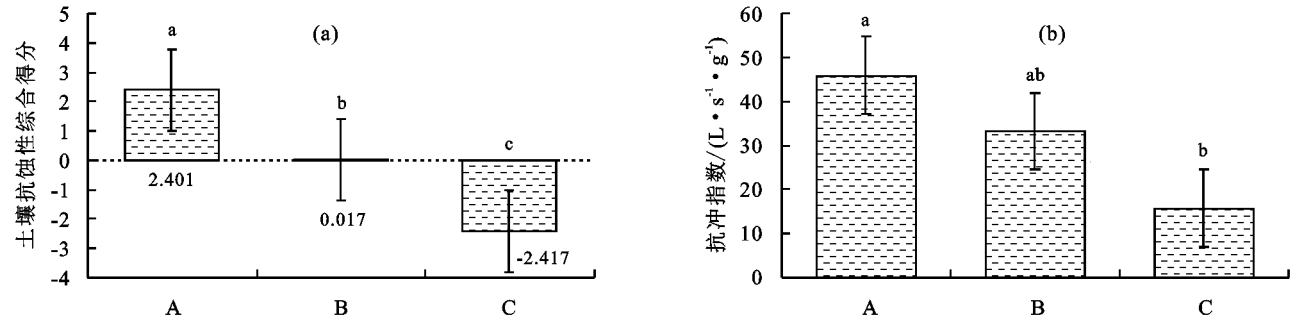


图 5 不同坡面区段土壤抗蚀抗冲性综合指标

由图 6 可知,土壤抗冲指数与抗蚀性得分呈线性关系($R^2=0.5416$),根据相关性分析结果显示 Pearson 相关系数为 0.736^{**} , $p=0.002$,抗冲指数与抗蚀性具有极显著正相关关系,土壤抗冲指数随着抗蚀性综合得分的增大而增大。

Pearson 相关性分析(图 7)显示,土壤含水率(X_2)、最大持水量(X_3)、毛管持水量(X_4)、田间持水量(X_5)、总孔隙度(X_6)、毛管孔隙度(X_7)、非毛管孔隙(X_8)、有机质含量(X_9)、水解氮含量(X_{12})、速效钾含量(X_{14})、粒

径 $0.5\sim1\text{ mm}$ 的团聚体含量(X_{17})、 $>1\text{ mm}$ 团聚体含量(X_{18})、 $\geq 0.25\text{ mm}$ 团聚体含量(X_{19})、团聚体平均重量直径(MWD)(X_{20})与土壤抗蚀性综合指数(F)呈显著正相关。表明研究区土壤抗蚀性随着土壤透水性持水性、土壤孔隙度、有机质含量、氮钾含量、粒径 $\geq 0.25\text{ mm}$ 团聚体含量和团聚体平均重量直径的增大而增强;土壤容重(X_1)、有效磷含量(X_{13})、粒径 $<0.25\text{ mm}$ 的微团聚体含量(X_{15})均与土壤抗蚀性综合指数(F)呈显著负相关。表明土壤抗蚀性随土壤容重、土壤有效磷含量、

粒径<0.25 mm 的土壤团聚体含量的增大而减弱。

3 讨论

3.1 失稳性坡面土壤理化性质变化及其对土壤抗蚀性的影响

在侵蚀外因一定的情况下,土壤抗蚀性可反映土壤潜在水土流失特征,与土壤理化性质关系密切^[5]。本研究表明,土壤孔隙度、土壤持水性、土壤有机质含量、土壤水解氮含量、土壤速效钾含量、土壤粒径>0.5 mm 的大团聚体含量以及土壤团聚体平均重量直径均与土壤抗蚀性综合指数呈正相关,其余指标则与土壤抗蚀性综合指数呈负相关。土壤容重是评价土壤松紧程度的重要参数,其值越大,土壤越紧实,

紧实的土壤会加快土壤表面径流流速,降低土壤入渗速率和土壤蓄水量,加剧土壤侵蚀的程度^[31]。反之,土壤容重越小,土壤持水量和孔隙度越高^[32]。

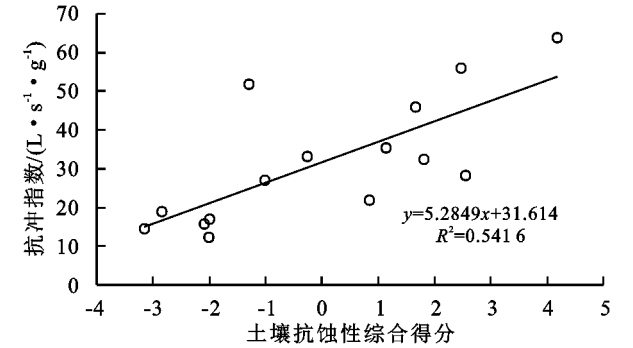
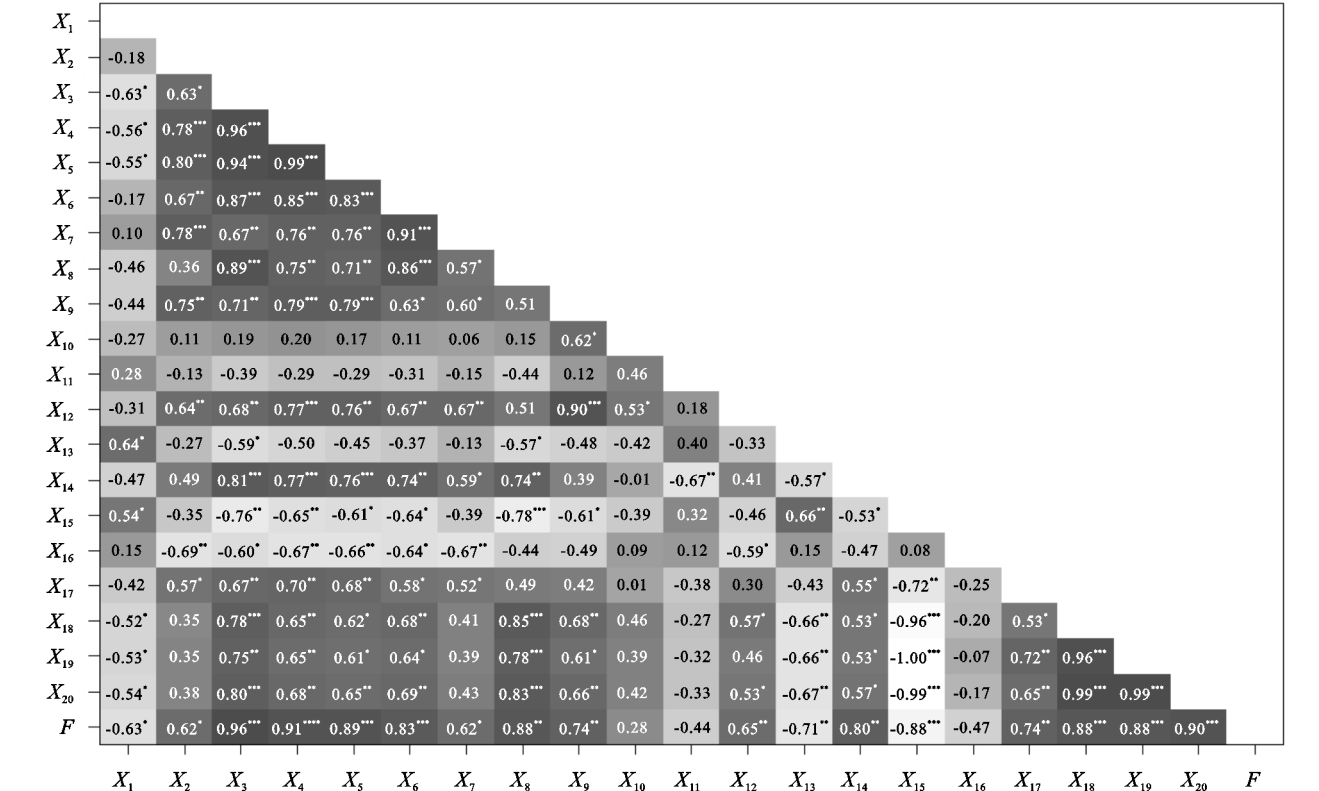


图 6 样地土壤抗冲指数和抗蚀性的关系



注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$; *** 表示 $p < 0.001$; F 为土壤抗蚀性综合指数; 深色表示正相关, 浅色表示负相关。

图 7 Pearson 相关性分析结果

土壤可贮存的水分越多,在降水过程中土壤能够通过入渗保留更多的有效水,土壤越不容易被水流冲刷侵蚀搬运,即抗蚀性越强。本研究发现,土壤抗蚀性综合指数与粒径在 0.5~1, >1.0 mm 的土壤团聚体含量以及团聚体平均重量直径之间呈极显著正相关($p < 0.01$),与张建辉等^[33]的研究结果较一致,说明土壤抗蚀性与土壤大团聚体的关系密切。土壤中水稳性大团聚体含量越高,土壤团聚体分形维数越小,表明单位质量土粒表面积越大,土粒对水分子的吸附力则越强,土壤结构与土壤颗粒稳定性越好,从而土壤抗蚀性越强^[34-35]。前人^[35]通过对土壤团聚体与土壤肥力进行研究发现与本研究相似的现象,即随着土壤肥力的提升,有机质含量的增多,大团聚体含量

增加,且增幅达到 2% 至 5%。本文研究发现,稳定区的土壤大团聚体质量百分比数值均大于失稳区和堆积区的大团聚体占比,稳定区土壤全氮和水解氮含量总体高于失稳区和堆积区,表现出土壤大团聚体含量占比与氮含量呈正相关关系,与 Felipe 等^[36]和严方晨等^[37]的研究结论一致。蒋家沟流域分布着大量银合欢(*Leucaena Leucocephala*)和大叶相思(*Acacia auriculi-formis*)等豆科植物,坡面稳定区坡度较小,土层结构稳定,植被覆盖度高具有较完善的灌草群落结构,相比失稳区和堆积区更适合豆科植物生长,豆科植物根系结瘤固氮^[38],提升土壤氮含量,增强根际土壤微生物活性和促进真菌菌丝生长,微生物产生的分泌物促进土壤团聚体胶结形成大团聚体^[39]。

在本研究中,土壤容重、土壤全磷含量、有效磷含量、粒径 0.25~0.5 mm 团聚体含量和粒径<0.25 mm 的土壤微团聚体含量均与土壤抗蚀性之间为负相关,其中容重、有效磷和粒径<0.25 mm 微团聚体含量与抗蚀性差异显著($p<0.05$),土壤抗蚀性随这些因子的增大而减弱,这与 Sonal 等^[40]和张履勤等^[41]的研究结论一致。土壤容重越大,质地越细^[42],就同一气候区来说,坡面稳定区土壤容重显著小于堆积区($p<0.05$)。堆积区植被群落长期以初生草本植物群落为主,受流域内滑坡、崩塌等影响,对土层扰动频繁,堆积区表层土壤尚未稳定,植被易受上坡位滑落的土壤覆盖,长期处于先锋演替阶段。堆积区作为植被覆盖度低的坡面,由于缺少根际微生物分泌物的胶结作用,无法顺利形成大团聚体,土壤微团聚体占比增大,土壤紧实,水分入渗减少,磷素通过地表径流和淋溶渗透的方式进入水体,水土流失造成大量磷损失^[43],因此总磷和有效磷并非决定土壤抗蚀性的直接因素,其是在土壤容重、土壤微团聚体等因素作用下产生的响应变化,进一步验证了土壤容重和微团聚体质量百分比是降低土壤抗蚀性的主要因素。

3.2 失稳性坡面区段分布与土壤抗蚀性的关系

根据主成分分析结果,土壤抗蚀性综合得分表明稳定区>失稳区>堆积区,差异显著($p<0.05$)。土壤抗蚀性影响因素中,大孔隙较多,其透水性就强,在相同的降雨量条件下,产生地表径流的时间推迟,流量减少,从而减缓土壤侵蚀强度。丁文峰等^[44]也认为,土壤团聚体分形维数越小,土壤容重越小,土壤对水分的吸持和保持水土的功能越强。本文研究结果发现,稳定区植被丰富,有机质多,土层发育良好,土壤孔隙度高,团聚体稳定性高,土壤团聚体分形维数小于堆积区,持水量高于堆积区,土壤抗蚀性最好,这与丁文峰等^[44]的观点一致。堆积区土壤孔隙度低,其持水性能较差,降雨发生时,堆积区的土壤更容易产生径流;此外,堆积区土壤大团聚体含量较低,团聚体稳定性差,更易被水流裹挟搬运^[33]。失稳区坡面稳定性差,降雨发生时,地表在雨水冲刷下容易发生滑坡,坡面植物的生长发育一直在遭受干扰。失稳区无法形成稳定的群落结构,但根系发达、分蘖能力强的拟金茅(*Eulaliopsis binata*)和扭黄茅(*Heteropogon contortus*)占据明显优势生态位^[45],禾本科植物根系微生物促进失稳区土壤大团聚体的形成。因此 5 个样地土壤抗蚀性综合指数大小均为稳定区>失稳区>堆积区。

土壤团聚体与有机质之间存在反馈调节机制,土壤有机质含量提高能够促进土壤团聚体的形成^[40]。土壤有机质含量越高,说明土壤侵蚀程度越低,即土

壤抗蚀性越强;反之,土壤有机质含量越低则土壤抗蚀性越弱。本文研究结果显示,堆积区的土壤水解氮含量和速效钾含量与稳定区和失稳区相比显著下降($p<0.05$),速效钾的下降幅度大于水解氮的下降幅度,与李泽霞等^[46]的研究结果一致。稳定区植被覆盖度高,植物根系对土壤性质的改善和调控发挥重要作用,蓄水保肥能力较强,因此稳定区土壤有机质含量丰富,有利于营养元素的积累。而失稳区与堆积区大多是由滑坡作用形成的裸露地表,其土体长期处于不稳定的扰动状态。土壤破碎化严重,植物生长环境不稳定,土壤中原有的有机质及营养元素含量较少。3 个气候区中亚热带干热河谷区气候干燥炎热,地质活动强烈而频繁,土壤侵蚀发生频率较高,加上该地区的“焚风效应”加剧土壤有机质损失,导致亚热带干热河谷区的各样地土壤养分呈现不同程度的贫瘠化^[47],与温带湿润山岭区、亚热带和暖温带半湿润区相比,干热河谷区生态环境极其脆弱。此外,阳坡相较于阴坡,太阳直射时间更长,气温更高,土壤含水率更低,植被覆盖度更低,有机质含量更低,因此处于亚热带干热河谷区的查菁沟阳坡的堆积区土壤抗蚀性在 5 个样地中最低,处于温带湿润山岭区大地阴坡的稳定区土壤抗蚀性在 5 个样地中最高。

3.3 不同坡面区段土壤抗冲性与土壤抗蚀性的关系

本研究表明,3 个坡面区段土壤抗冲性中,稳定区土壤抗冲性最好,失稳区次之,堆积区抗冲性相对最差,稳定区与堆积区差异显著($p<0.05$),抗冲指数在 3 个坡面区段的变化趋势与土壤抗蚀性综合得分相近,土壤抗冲指数与抗蚀性呈现极显著正相关关系。土壤抗冲指数与土壤抗蚀性是评价土壤抵抗侵蚀能力的重要指标,土壤抗冲性可以表征土壤抗冲刷能力,抗冲能力取决于土壤团聚体的胶结力以及土壤结构体抵抗离散的能力^[48]。蒋家沟流域稳定区相对丰富的植被覆盖度促进了大团聚体形成以及土壤质地的改善,豆科乔灌木发达的根系在土体中交错缠绕,根系分泌物和根体死亡后产生的腐殖质成为形成稳定团粒结构的胶结剂,固持土壤,提高土壤抗蚀性。抗蚀性强的土壤,遇到降雨土壤结构不易被破坏分散,提高雨水渗透率,延缓径流的形成和增长,显著增强土壤抗冲能力^[49]。因此,研究区土壤抗冲性与抗蚀性均随着坡面稳定性和植被盖度的增加而增强。

4 结论

(1)研究区 5 个样地的土壤抗蚀性综合得分大小顺序为稳定区(2.401)>失稳区(0.017)>堆积区(-2.417),3 个区段间差异显著($p<0.05$)。

(2)3 个坡面区段土壤抗冲指数大小依次为稳定区(45.873 L/(s·g))>失稳区(33.245 L/(s·g))>

堆积区(15.723 L/(s·g)),稳定区与堆积区差异显著($p<0.05$)。土壤抗冲性指数与抗蚀性综合得分呈线性递增函数关系($R^2=0.5416$),抗冲性与抗蚀性具有极显著正相关关系,土壤抗冲指数随着抗蚀性综合得分的增大而增大。

(3)研究区土壤持水性、孔隙度、有机质含量、氮钾含量、粒径 ≥ 0.25 mm 团聚体含量和团聚体平均重量直径与土壤抗蚀性综合得分呈显著正相关;而土壤容重、有效磷含量、粒径 < 0.25 mm 的微团聚体含量则与土壤抗蚀性综合得分呈显著负相关。本次试验数据采样时间集中于夏季,冬夏 2 季土壤抗蚀性的生物学指标可能有所差别,因此在流域失稳坡面关于土壤抗蚀性的后续研究中,可增加不同季节的土壤酶活性、微生物碳氮等指标。

参考文献:

[1] 马芊红,张科利.西南喀斯特地区土壤侵蚀研究进展与展望[J].地球科学进展,2018,33(11):1130-1141.

[2] 李菊艳.基于 CSLE 模型全覆盖和抽样调查法的天山北坡县域尺度土壤侵蚀计算方法的比较[J/OL].农业资源与环境学报: 1-13 [2021-11-24]. <https://doi.org/10.13254/j.jare.2021.0213>.

[3] 陈爱民,严思维,林勇明,等.泥石流频发区不同林龄新银合欢土壤抗蚀性评价[J].北京林业大学学报,2016,38(9):62-70.

[4] Frank B, Jasper V R, Eelke J, et al. Loss of plant species diversity reduces soil erosion resistance[J].Ecosystems,2015,18(5):881-888.

[5] 吴丽丽,张仁陟,康立军.紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤抗蚀性综合评价[J].中国生态农业学报,2014,22(11):1310-1317.

[6] 谢贤健,李永飞.不同巨桉林下紫色土壤抗蚀性与土壤因子的耦合关系分析[J].水土保持学报,2017,31(1):97-102.

[7] 邱陆旸,张丽萍,陆芳春,等.基于熵权法的林下土壤抗蚀性评价及影响因素分析[J].水土保持学报,2016,30(4):74-79.

[8] 姜爱国,万福绪,胡菲.南京紫金山灵谷寺不同林地土壤抗蚀性研究[J].水土保持研究,2018,25(1):12-16.

[9] 任改.重庆四面山主要植物群落土壤抗侵蚀性研究[D].北京:北京林业大学,2010.

[10] 王春燕,黄丽,谭文峰,等.几种侵蚀红壤中有机质和团聚体的关系[J].水土保持学报,2007,21(3):52-56.

[11] 骆东奇,侯春霞,魏朝富,等.紫色土团聚体抗蚀特征研究[J].水土保持学报,2003,17(2):20-23,27.

[12] 方迎潮,王道杰,何松膛,等.云南东川蒋家沟泥石流 2003—2014 年冲淤演变特征[J].山地学报,2018,36(6):907-916.

[13] 谢贤健,韦方强.泥石流频发区不同盖度草地土壤颗粒的分形特征[J].水土保持学报,2011,25(4):202-206.

[14] 李松阳,林静远,潘佳虹,等.泥石流频发区不同土地利用类型土壤粒径分布多重分形特征[J].应用与环境生物学报,2021,27(4):893-900.

[15] 陈中学,汪稔,胡明鉴,等.云南东川蒋家沟泥石流形成内因初探[J].岩土力学,2009,30(10):3053-3056,3070.

[16] 郭晓军,崔鹏,苏凤环,等.蒋家沟流域非泥石流活动期的输沙特征[J].长江科学院院报,2013,30(5):27-33.

[17] 黄英,丁明涛,庙成,等.云南蒋家沟泥石流运动特征及其发展趋势[J].长江流域资源与环境,2015,24(8):1434-1442.

[18] 陈爱民,邓浩俊,严思维,等.蒋家沟 5 种植被土壤分形特征与养分关系[J].山地学报,2016,34(3):290-296.

[19] 贺静雯,刘颖,李松阳,等.蒋家沟流域不同海拔灌草层群落特征与土壤关系的研究[J].广西植物,2020,40(8):1092-1100.

[20] 刘颖,贺静雯,李松阳,等.蒋家沟流域不同海拔梯度的土壤种子库与地上植被的关系[J].西南林业大学学报,2021,41(2):54-67.

[21] 廖超林,何毓蓉,徐佩.泥石流源地土壤团聚体抗蚀特征研究:以蒋家沟为例[J].地球与环境,2005,33(4):69-73.

[22] 张有富.云南蒋家沟泥石流区干热退化山地引种拟金茅的技术与效果[J].山地学报,2000,18(6):563-567.

[23] 郭晓军,崔鹏,朱兴华.典型泥石流流域蒋家沟的降雨—径流模拟[J].水土保持通报,2011,31(1):175-179.

[24] 崔鹏,王道杰,韦方强.干热河谷生态修复模式及其效应:以中国科学院东川泥石流观测研究站为例[J].中国水土保持科学,2005,3(3):60-64.

[25] 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.

[26] 中国科学院南京土壤研究所.土壤理化分析[M].上海:上海科学技术出版社,1978:132-502.

[27] 国家质量监督检验检疫总局.JJG 694—2009 原子吸收分光光度计检定规程[S].北京:中国计量出版社,2009:1-7.

[28] 陈舜,王道杰,梅永丽,等.泥石流源区崩滑土体粒度特征及其产沙特性[J].山地学报,2014,32(1):66-73.

[29] 王针针,刘泉宏,湛芸,等.紫色土区植物篱篱前淤积带与篱下土坎土壤抗蚀性研究[J].水土保持学报,2020,34(5):61-67.

[30] De Baets S, Poesen J, Knapen A, et al. Impact of root architecture on the erosion-reducing potential of roots during concentrated flow[J].Earth Surface Processes and Landforms,2007,32(9):1323-1345.

[31] 张学权.不同植被恢复土壤容重和孔隙度特征分析[J].成都大学学报(自然科学版),2017,36(3):325-327.

[32] 陈国靖,蔡进军,马璠,等.宁夏黄土丘陵区典型林草植被类型对土壤水稳性团聚体的影响[J].水土保持研究,2018,25(5):49-53,60.

170-176.

[14] 宇涛,张霞,李占斌,等.不同草带覆盖位置条件下坡沟系统侵蚀产沙差异性[J].水土保持学报,2018,32(6):22-27.

[15] 于国强,贾莲莲,朱冰冰,等.不同坡位的植被缓冲带对坡面侵蚀产沙来源的影响[J].水土保持研究,2020,27(6):9-13.

[16] Ludwig J A, Eager R W, Bastin G N, et al. A leakiness index for assessing landscape function using remote sensing[J].Landscape Ecology,2002,17(2):157-171.

[17] 朱冰冰,霍云需,周正朝.黄土高原坡沟系统植被格局对土壤侵蚀影响研究进展[J].中国水土保持科学(中英文),2021,19(4):149-156.

[18] Sun R X, Ma L, Zhang S H, et al. Study on landscape patches influencing hillslope erosion processes and flow hydrodynamics in the Loess Plateau of Western Shanxi Province, China[J].Water,2020,12:e3201.

[19] 刘俊娥,王占礼,高素娟等.黄土坡面片流产流过程模拟研究[J].土壤学报,2013,50(2):268-274.

[20] 刘斌,郭星,朱宇恩.基于随机森林模型的土壤重金属源解析,以晋中盆地为例[J].干旱区资源与环境,2019,33(1):106-111.

[21] 杨汉宏,张勇,郑海峰,等.不同人工植物配置对排土场边坡水土流失的影响[J].水土保持通报,2017,37(4):6-11.

[22] Kavian A, Saleh I, Habibnejad M, et al. Effectiveness of vegetative buffer strips at reducing runoff, soil erosion, and nitrate transport during degraded hillslope restoration in northern Iran[J].Land Degradation and Development,2018,29:3194-3203.

[23] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.

[24] 孙佳美,樊登星,梁洪儒,等.黑麦草调控坡面水沙输出过程研究[J].水土保持学报,2014,28(2):36-39.

[25] Du J, Niu J Z, Gao Z L, et al. Effects of rainfall intensity and slope on interception and precipitation partitioning by forest litter layer[J].Catena,2019,172:711-718.

[26] Yang X N, Sun W Y, Li P F, et al. Reduced sediment transport in the Chinese Loess Plateau due to climate change and human activities[J].Science of the Total Environment,2018,642:591-600.

[27] Curran J C, Hession W C. Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system[J].Journal of Hydrology Amsterdam,2013,13:364-376.

[28] Yang S, Gao Z L, Li Y H, et al. Erosion control of hedgerows under soils affected by disturbed soil accumulation in the slopes of loess plateau, China[J].Catena,2019,181:e104079.

(上接第 21 页)

[33] 张建辉,刘刚才,倪师军,等.紫色土不同土地利用条件下的土壤抗冲性研究[J].中国科学 E 辑:科学技术,2003,33(增刊 1):61-68.

[34] 戴全厚,刘国彬,薛莲,等.侵蚀环境退耕撂荒地水稳性团聚体演变特征及土壤养分效应[J].水土保持学报,2007,21(2):61-64,77.

[35] 王清奎,汪思龙.土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J].土壤通报,2005,36(3):415-421.

[36] Felipe G, Robert L S, Eugene K. Effects of slash-and-burn management on soil aggregate organic C and N in a tropical deciduous forest[J].Geoderma,1999,88(1/2):1-12.

[37] 严方晨,焦菊英,曹斌挺,等.黄土丘陵沟壑区撂荒地不同演替阶段植物群落的土壤抗蚀性:以坊塌流域为例[J].应用生态学报,2016,27(1):64-72.

[38] 唐国勇,李昆,孙永玉,等.干热河谷 4 种固氮植物根瘤固氮潜力及其影响因素[J].林业科学研究,2012,25(4):432-437.

[39] 李新悦,李冰,莫太相,等.长期秸秆还田对水稻土团聚体及氮磷钾分配的影响[J].应用生态学报,2021,32(9):3257-3266.

[40] Sonal S, Jamuna S S. Water-stable aggregates and associated organic matter in forest, savanna, and cropland soils of a seasonally dry tropical region, India[J].Biology and Fertility of Soils,1996,22(1/2):76-82.

[41] 张履勤,章明奎.林地与农地转换过程中红壤有机碳、氮和磷库的演变[J].浙江林学院学报,2006,23(1):75-79.

[42] 胡钟胜,解燕,刘国庆,等.云南宣威市烟田耕作层土壤颗粒分形特征研究[J].土壤通报,2014,45(5):1038-1041.

[43] Andre E, Kyungsoo Y, Peter C A, et al. Does soil erosion rejuvenate the soil phosphorus inventory[J].Geoderma,2018,332:45-59.

[44] 丁文峰,丁登山.黄土高原植被破坏前后土壤团粒结构分形特征[J].地理研究,2002,21(6):700-706.

[45] 罗清虎,孙凡,崔羽,等.泥石流频发流域失稳性坡面主要植物种间关联性[J].应用与环境生物学报,2018,24(4):689-696.

[46] 李泽霞,董彦丽,马涛.黄土区梯化坡地不同土地利用方式对土壤理化性质的影响[J].水土保持通报,2020,40(3):43-49.

[47] 袁勇,熊东红,校亮,等.元谋干热河谷冲沟不同部位土壤质量评价[J].西南农业学报,2018,31(10):2165-2172.

[48] 肖鹏.海州露天煤矿排土场不同复垦模式土壤抗蚀性抗冲性研究[D].辽宁 阜新:辽宁工程技术大学,2019.

[49] 黎建强,张洪江,陈奇伯,等.长江上游不同植物篱系统土壤抗冲、抗蚀特征[J].生态环境学报,2012,21(7):1223-1228.