

西南干暖河谷土壤细沟可蚀性垂直地带性差异

周涛^{1,2}, 苏正安¹, 何周窈^{1,3}, 张小波⁴, 杨鸿琨^{1,5}, 王俊杰^{1,2}, 王晓艺^{1,6}

(1.中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所,中国科学院山地灾害与地表过程重点实验室,成都 610041;
2.中国科学院大学,北京 100049;3.四川农业大学林学院,成都 611130;4.成都市水务技术服务中心,成都 610031;
5.成都理工大学环境与土木工程学院,成都 610059;6.四川农业大学水利水电学院,四川 雅安 625014)

摘要:为探究以干暖河谷为基带的西南山地土壤细沟可蚀性垂直地带性差异,选择该区不同垂直带典型土地利用类型(林草地和耕地)下不同土壤类型(红壤、黄壤、棕壤和暗棕壤)为研究对象,利用室内“V”形细沟模拟装置,分别进行6种流量(150,300,450,600,750,900 mL/min)和3种水文状态(排水状态、饱和状态和渗流状态)的模拟冲刷试验。结果表明:(1)该区土壤颗粒组成无明显的垂直地带性,林草地的砂粒含量偏高,各土壤的颗粒含量差异在9%以内,所有土壤均为粉质壤土,但有机质差异较大,且随着海拔增加而增加;(2)土壤的细沟可蚀性具有明显的垂直地带性,随海拔升高,林草地土壤可蚀性 K_r 值逐渐减小,相比于红壤,暗棕壤的 K_r 值减小幅度平均为47.74%,耕地土壤中黄壤略大于红壤,可能与人为活动强度和土壤熟化程度有关;(3)不同土地利用方式下,林草地土壤 K_r 值显著大于耕地土壤 K_r 值,平均增幅为22.63%,这可能与有机质促进土壤抗侵蚀性能的提高有关;(4)不同近地表水文状态下,土壤的细沟可蚀性表现为渗流状态>饱和状态>排水状态,表明随着近地表水文状态变化,尤其是垂直水力梯度的增加会显著导致土壤的细沟可蚀性增大;试验还发现,土壤的临界剪切力仅在不同的水文状态下具有渗流状态>饱和状态>排水状态的规律性,而在不同海拔和土地利用类型之间没有明显的规律性。

关键词:细沟可蚀性;垂直地带性;细沟侵蚀;水文条件;土地利用

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)02-0056-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2020.02.009

Variation in the Vertical Zonality of Rill Erodibility in Southwest Dry-warm Valley of China

ZHOU Tao^{1,2}, SU Zheng'an¹, HE Zhouyao^{1,3},

ZHANG Xiaobo⁴, YANG Hongkun^{1,5}, WANG Junjie^{1,2}, WANG Xiaoyi^{1,6}

(1.Key Laboratory of Mountain Hazards and Earth Surface Processes, Institute of

Mountain Hazards and Environment, Chinese Academy of Sciences, Chengdu 610041;

2.University of Chinese Academy of Science, Beijing 100049; 3. Forestry College, Sichuan

Agricultural University, Chengdu 611130; 4. Chengdu Water Technical Service Center, Chengdu 610031;

5.College of Environment and Civil Engineering, Chengdu University of Technology, Chengdu 610059;

6.College of Water Conservancy and Hydropower Engineering, Sichuan Agricultural University, Ya'an, Sichuan 625014)

Abstract: Typical soils (i.e., red soil, yellow soil, brown soil and dark brown soil) under different elevations and typical land use types (cultivated land and forestland) were selected to investigate the variations in the vertical zonality of soil erodibility in dry-warm valley of China. AV-shape simulation flume was used to estimate rill erodibility in the erosion process. A series of rill erosion-based scour experiments were conducted, using water discharge of 150, 300, 450, 600, 750, 900 mL/min and hydrological conditions of drainage, saturation and seepage conditions. Results showed that the composition of soil particle composition had no obvious vertical zonality. The content of sand in forestland soil was relatively high, and the difference of particle composition in each soil was within 9%. All soils were silt loam. However, an obvious difference in

收稿日期:2019-08-13

资助项目:国家重点研发计划项目(2017YFC0505102);国家重大基础研究项目(973项目)(2015CB452704);四川省应用基础研究科技计划项目(2018JY0034);四川省重大科技专项(2018SZDX0034)

第一作者:周涛(1996—),男,河南卢氏人,在读硕士研究生,主要从事水土保持与生态修复研究。E-mail:1712815401@qq.com

通信作者:苏正安(1980—),男,四川江油人,副研究员,博士,硕导,主要从事土壤侵蚀和水土保持研究。E-mail:suzhengan@imde.ac.cn

soil organic matter appeared among different vertical zones. A vertical zonality of the rill erodibility (K_r , value) could be find. As the elevation increased, K_r value of forestland soil decreased, and K_r value of dark brown soil was 47.74% less than that of red soil for forestland. For cultivated land, K_r value of yellow soil was slightly larger than that of the red soil, which could be ascribe to different human activities and soil maturity. Soil K_r of forestland was significantly higher than that of cultivated land with an average increase of 22.63%, which might be relate to the improved anti-erosion ability by soil organic matter. Soil erodibility was highest under seepage condition among different hydrological conditions, and soil erodibility was higher under saturation condition than that under drainage treatment. This result indicated that the difference of hydraulic gradients would also affect soil erodibility. Meanwhile, the critical shear stress was also highest under seepage condition among different hydrological conditions, and the critical shear stress was higher under saturation condition than that under drainage treatment. No obvious variation trend appeared among different vertical zonalitys and land use types.

Keywords: rill erodibility; vertical zonality; rill erosion; hydrological condition; land use types

干暖河谷区山地面积大,气候垂直带分异明显,且由于河谷焚风效应和人为活动剧烈,造成该地区沟蚀发育剧烈,土壤极易流失,生态环境退化严重,亟需进行水土流失防治和生态修复^[1]。目前,关于地带性的研究较多,但多数研究均集中在水平地带性上,而关于垂直地带性的研究则相对较少,与此同时,有关垂直地带性的研究^[2-4]也多集中于植被分布和土壤基本理化性质等,而针对干暖河谷为基带的西南山地土壤可蚀性垂直地带性的研究则较少。

土壤可蚀性是反映土壤抗侵蚀能力的一个重要指标,表征土壤自身性质对侵蚀的敏感程度。土壤可蚀性的研究始于 30 年代,Middleton^[5]在土壤水力侵蚀的研究中首先提出土壤可蚀性的概念,随后科学家们对土壤可蚀性进行了大量研究,并提出土壤入渗能力^[6]、水稳性团聚体^[7]、细沟可蚀性 K_r 值^[8]等指标作为评价土壤可蚀性的定量指标。土壤可蚀性 K 值因其可定量表示土壤被侵蚀的难易程度,被广泛应用于土壤侵蚀预报模型中,如 USLE、RUSLE 和 WEPP 模型等。WEPP(water erosion prediction project)模型是反映坡面细沟侵蚀和细沟间侵蚀的物理模型。细沟侵蚀作为坡面侵蚀的重要部分,发生于坡面侵蚀的初始阶段,也是泥沙的输移通道,而 WEPP 模型中的细沟可蚀性 K_r 值和土壤临界剪切力 τ_c 是描述细沟侵蚀的定量指标,能够很好的表征土壤的抗侵蚀能力^[9-10]。郁耀闯等^[11]通过对黄土高原丘陵区退耕还草水土保持效应的研究,发现冰草和柳枝稷植被下土壤的细沟可蚀性 K_r 值均呈现出明显的季节性变化;孙龙等^[12]通过 WEPP 模型研究黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力,结果表明土壤的细沟可蚀性 K_r 值随退耕年限的增加呈现出减小的趋势,且与土壤分离能力变化趋势相似,可以很好地表征土壤

的抗侵蚀能力。

本研究以干暖河谷为基带的西南山地不同垂直带典型土地利用方式下(林草地和耕地)不同土壤(红壤、黄壤、棕壤和暗棕壤)为研究对象,利用室内细沟模拟装置,分别进行了 6 种流量(150,300,450,600,750,900 mL/min)和 3 种水文状态(排水状态、饱和状态和渗流状态)的模拟冲刷试验,查明该区不同垂直带的土壤可蚀性及其影响因素,以期为该区的土壤侵蚀预报和水土保持规划治理提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于四川省凉山彝族自治州普格县(27°13′—27°30′N,102°26′—102°46′E)。普格县位于四川省西南部,属云贵高原横断山脉,县境地貌为“三山两谷”所形成的高山峡谷地貌,海拔 1 040~4 359 m,形态包括侵蚀堆积的河谷平原和山间盆地、侵蚀构造的高中山等,地貌以中山为主,较为平缓的丘陵平坝地貌仅分布在河谷地带^[13]。气候受西南季风和印度北部干燥大陆性气团交替控制,属亚热带湿润性季风气候,年均降水量 1 176.3 mm,干湿季分明,雨季集中在 5—9 月,占全年降雨量的 90%;年均气温 16.8℃,最低气温 -1.9℃,最高气温 33.3℃,无霜期 301 d,冬季仅 1 个月,是典型的干暖河谷。县内山高坡陡,土壤呈现明显的地带性,随海拔升高,土壤类型依次为红壤、黄壤、棕壤和暗棕壤等,母质岩性主要为砾岩、砂岩、泥岩、页岩、灰岩、泥灰岩、白云岩和玄武岩等^[13],土壤受地形、地质和降水的影响,侵蚀较为严重,年侵蚀模数为 4 844 t/km²^[14]。区域内由于山高坡陡、人迹罕至,保存有许多珍稀物种,如云南松、高山栎、冷杉、云杉、铁杉等,农作物以烟草和玉米为主。

1.2 研究方法

在 2018 年 8 月,按照该区土壤的垂直地带性和典型土地利用类型,分别采集红壤、黄壤、棕壤和暗棕壤 4 种土壤,同时兼顾每种土壤的主要土地利用类型(林草地和耕地),取多个点位的表层 0—20 cm 土样,去除土壤中动植物残体和较大的石块,混合均匀,带回实验室进行自然风干,过 2 mm 筛,进行冲刷试验并测定土壤机械组成和有机质。机械组成测定采用吸管法(过氧化氢去除有机质,六偏磷酸钠分散土壤颗粒),有机质测定采用重铬酸钾湿氧化法,冲刷试验采用自制的冲刷槽法^[8]。

室内冲刷试验装置为自制的“V”形冲刷槽,长×宽×高为 0.50 m×0.05 m×0.15 m,底部有用于排水和控制土壤初始含水量的进排水孔,试验坡度为 5°。试验前期,进行土样的人工装填,先用海绵等透水物填充到进排水孔,在冲刷槽内填充砾石约 5 cm,砾石表面覆盖 1 层纱布,防止上层土壤颗粒堵塞进排水孔,上层土壤的装填依据土壤自然容重进行分层压实装填至冲刷槽出水口的最低水位处,并将表层土壤用楔形木块压至“V”形,以模拟细沟侵蚀的初始状态。冲刷试验设计 6 种流量(150,300,450,600,750,900 mL/min),使用 MicroFlow 系列数字式低流量桨轮流量计(FS1—200—5V,精度 1 mL/min)进行流量控制。试验设计 3 种近地表水文状态:排水状态、饱和状态和渗流状态。排水状态即风干土直接进行冲刷试验,径流可自由入渗并排出;饱和状态时将进排水孔和马氏瓶连接,使试验槽土壤从底部开始被浸润至呈现饱和状态,控制水压恒定进行冲刷试验;渗流状态和饱和状态类似,但需进一步抬高马氏瓶水头,土壤被浸润至饱和状态并呈现地表漫流时进行冲刷试验。试验过程中,控制冲刷流量稳定,待产沙率稳定时在冲刷槽底部采集径流泥沙样,150,300,450 mL/min 流量时采集时长为 60 s;600,750,900 mL/min 流量时采集时长为 30 s。

每次试验至少重复 3 次。

1.3 数据处理

采用 WEPP 水蚀预报模型(water erosion prediction project)的细沟预测模型探究土壤的抗蚀性能,模型中通过径流剪切力和土壤剥蚀率之间的关系,表明土壤的细沟可蚀性和土壤的临界剪切力,具体公式为^[15]:

$$D_r = K_r (\tau - \tau_c)^m$$

式中: D_r 为土壤剥蚀率(kg/(s·m²)); K_r 为土壤细沟可蚀性(s/m),表示土壤抵抗细沟侵蚀的能力; τ 为作用在土壤颗粒上的径流剪切力(Pa); τ_c 为土壤临界剪切力(Pa); m 为无量纲常数。

数据剔除异常值后将径流剪切力 τ 和土壤剥蚀率 D_r 进行非线性回归分析,拟合分析和图表制作均采用 Origin 8.0 软件进行。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质变化特征

从表 1 可以看出,所有土壤按土地利用类型可分为耕地土壤和林草地土壤,按垂直地带性由高到低分为暗棕壤、棕壤、黄壤和红壤。土壤有机质含量随海拔的降低呈现出一定的规律性,耕地土壤有机质含量表现为暗棕壤>棕壤>红壤>黄壤;林草地土壤有机质含量表现为暗棕壤>棕壤>黄壤>红壤。同时暗棕壤、棕壤、红壤的土壤有机质含量表现为耕地土壤高于林草地土壤,增幅为 6.40%~21.10%。不同土壤机械组成的垂直地带性差异并不明显,随着海拔的降低,耕地土壤的颗粒组成并没有发生明显的变化,所有土壤均表现为粉粒含量高,砂粒含量次之,黏粒含量最低。林草地土壤的机械组成与耕地土壤相似,均表现为粉粒含量高,砂粒含量次之,黏粒含量最低。与此同时,所有类型土壤的黏粒含量均表现为耕地土壤大于林草地土壤。虽然不同土壤机械组成存在一定差异,但按照美国农业部制土壤质地分类,该区土壤均属于粉质壤土。

表 1 土壤基本理化性质

土地利用 类型	土壤 类型	海拔/ m	有机质含量/ (g·kg ⁻¹)	土壤 质地	土壤机械组成/%		
					砂粒	粉粒	黏粒
耕地	暗棕壤	2221	50.22	粉质壤土	22.27	72.84	4.89
	棕壤	1937	48.67	粉质壤土	20.15	74.85	5.00
	黄壤	1560	12.88	粉质壤土	27.92	66.16	5.92
	红壤	1150	28.86	粉质壤土	23.02	72.76	4.22
林草地	暗棕壤	2326	47.22	粉质壤土	29.91	67.19	2.90
	棕壤	1969	40.19	粉质壤土	25.64	69.82	4.54
	黄壤	1764	32.81	粉质壤土	24.92	72.60	2.49
	红壤	1149	27.72	粉质壤土	24.69	71.62	3.69

2.2 干暖河谷土壤细沟可蚀性的垂直地带性

各土壤的细沟可蚀性 K_r 值(s/m)和临界剪切力 (τ_c , Pa)的垂直地带性差异见表 2 和图 1~图 3。随海拔的增加,土壤的 K_r 值总体上呈逐渐减少的趋势,而土体临界抗剪力的变化趋势不显著。在排水状态下,不同垂直带林草地土壤可蚀性差异显著。不同垂直带林草地土壤 K_r 值表现为红壤(0.019 0)>黄壤(0.018 3)>棕壤(0.012 9)>暗棕壤(0.010 8); τ_c 表现为暗棕壤(0.712 8)<红壤(0.795 4)<棕壤(0.890 0)<黄壤(0.940 0)(图 1、表 2)。不同垂直带耕地土壤 K_r 值表现为黄壤(0.017 0)>红壤(0.012 3)>棕壤(0.010 2)>暗棕壤(0.008 0); τ_c 表现为棕壤(0.738 8)<暗棕壤(0.826 4)<黄壤(0.845 8)<红壤(0.890 0)。总体而言,入渗状态下,林草地的土壤细沟可蚀性与海拔呈现显著的负相关关系,即干暖河谷地带红壤(林草地)的土壤细沟可蚀性高,土壤极易被侵蚀,而高海拔暗棕壤区域人为活动少,地表枯落物多,土壤结构性好,土壤细沟可蚀性低;耕地土壤则是黄壤的细沟可蚀性略大于红壤,但整体趋势仍然是随着海拔升高,土壤细沟可蚀性呈逐渐降低的趋势;此外,海拔与土壤临界剪切力之间没有显著的相关关系。

在饱和状态下,不同垂直带林草地的土壤细沟可蚀性差异显著。不同垂直带林草地土壤 K_r 值表现为红壤(0.025 9)>黄壤(0.025 4)>棕壤(0.025 1)>暗棕壤(0.016 0); τ_c 表现为红壤(0.945 8)<黄壤(1.000 0)<暗棕壤(1.010 0)<棕壤(1.060 0)。不同垂直带耕地土壤 K_r 值表现为黄壤(0.025 3)>红壤(0.024 6)>棕壤(0.017 1)>暗棕壤(0.015 0); τ_c 表现为黄壤(0.901 9)<红壤(1.030 0)<棕壤(1.040 0)<暗棕壤(1.090 0)(图 2、表 2)。由此可见,林草地土壤在饱和状态下,土壤细沟可蚀性仍与海拔呈显著的负相关关系,这与不同垂直带土壤的结构及其抗蚀能力不同有关;在耕地上,黄壤的可蚀性略大于红壤,但整体趋势为随着海拔升高,土壤细沟可蚀性呈逐渐降低的趋势;与此同时,在饱和状态下,海拔与土壤临界剪切力之间没有显著的相关关系。

在渗流状态下,不同垂直带林草地的土壤细沟可蚀性差异显著。不同垂直带林草地土壤 K_r 值表现为红壤(0.051 1)>黄壤(0.050 7)>棕壤(0.028 8)>暗棕壤(0.019 5); τ_c 表现为暗棕壤(1.040 0)<红壤(1.110 0)<棕壤(1.120 0)<黄壤(1.167 3)。不同垂直带耕地土壤 K_r 值表现为黄壤(0.047 4)>红壤(0.034 3)>棕壤(0.022 4)>暗棕壤(0.018 7); τ_c 表现为黄壤(0.890 0)<棕壤(1.002 8)<红壤(1.100 0)<暗棕壤(1.160 0)

(图 3、表 2)。由此可见,与排水、饱和状态类似,渗流状态下林草地土壤细沟可蚀性与海拔呈显著的负相关关系;在耕地上,黄壤的细沟可蚀性略大于红壤,但整体趋势为随着海拔升高,土壤细沟可蚀性呈逐渐降低的趋势;与此同时,在渗流状态下,海拔与土壤临界剪切力之间没有显著的相关关系。

2.3 不同土地利用类型下土壤细沟可蚀性

耕地土壤 K_r 值在垂直水力梯度上表现出一定的差异性。暗棕壤 K_r 值表现为渗流(0.018 7)>饱和(0.015 0)>排水(0.008 0);棕壤 K_r 值表现为渗流(0.022 4)>饱和(0.017 1)>排水(0.010 2);黄壤的 K_r 值在不同水文状态之间的差异最大,渗流状态下最大,为 0.047 4,分别为饱和状态和排水状态的 1.87,2.79 倍;红壤的 K_r 值在渗流状态下达到最大,为 0.034 3,相较于饱和状态和排水状态,增加幅度为 39.43%,178.86%。不同水文状态下 τ_c 的变化与 K_r 值变化类似,暗棕壤、棕壤和红壤均表现为渗流>饱和和>排水,黄壤表现为饱和>渗流>排水。

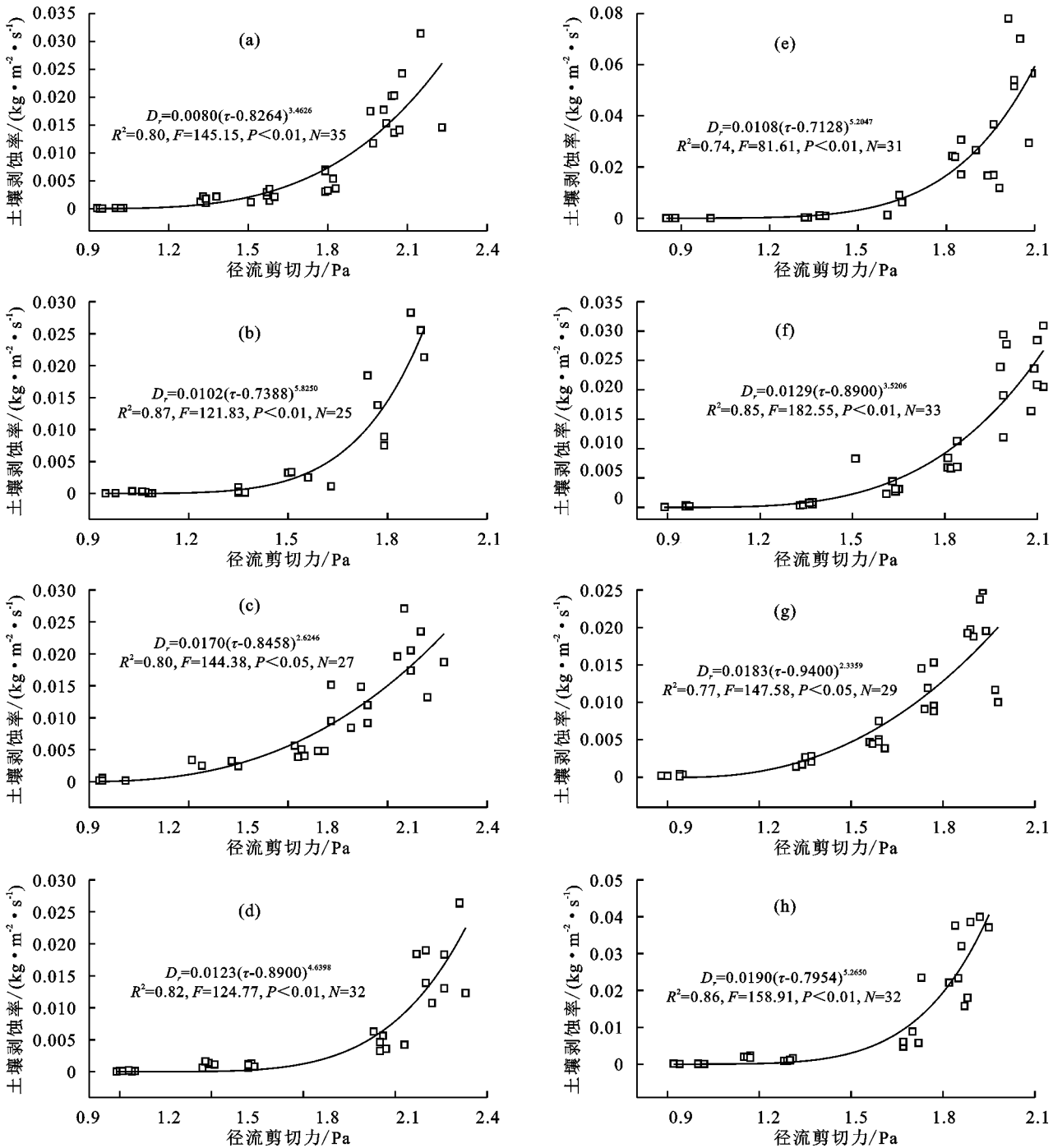
在林草地景观内,暗棕壤 K_r 值在渗流状态下达到最大(0.019 5),饱和状态次之(0.016 0),排水状态下最小(0.010 8);棕壤 K_r 值表现为渗流(0.028 8)>饱和(0.025 1)>排水(0.012 9);黄壤 K_r 值在 3 种近地表水文状态中所表现的差异最大,渗流状态下土壤 K_r 值最大,为 0.050 7,分别为饱和状态和排水状态的 2.00,2.77 倍;红壤 K_r 值在渗流状态下达到最大,为 0.051 1,相较于饱和状态和排水状态,增加幅度分别为 97.30%,168.95%。不同水文状态下 τ_c 与 K_r 值表现出相同的趋势,暗棕壤、棕壤、黄壤和红壤均表现为渗流状态>饱和状态>排水状态。

2.4 不同近地表水文状态下土壤细沟可蚀性

在排水状态下,林草地土壤 K_r 值均大于耕地土壤 K_r 值,其中暗棕壤表现为林草地土壤 K_r 值是耕地土壤的 1.35 倍,棕壤表现为林草地土壤 K_r 值是耕地土壤的 1.26 倍,黄壤表现为林草地 K_r 值是耕地土壤的 1.08 倍,红壤表现为林草地 K_r 值是耕地的 1.54 倍。在饱和状态下,土壤 K_r 值在耕地和林草地上的差异与排水状态相似,相比于暗棕壤、棕壤、黄壤和红壤耕地,相应土壤类型的林草地土壤 K_r 值增加幅度分别为 6.67%,46.78%,0.40%,5.28%。在渗流状态下,耕地和林草地土壤 K_r 值与排水、渗流状态类似,其中红壤差异最大,林草地土壤 K_r 值是耕地的 1.49 倍,黄壤的差异最小,林草地的土壤 K_r 值是耕地的 1.07 倍。与土壤 K_r 值不同,耕地和林草地土壤 τ_c 没有出现明显的规律性变化趋势。

表 2 土壤细沟可蚀性 K_r 值与临界剪切力 τ_c 的垂直地带性差异

土地利用类型	土壤类型	海拔/m	K_r —排水	K_r —饱和	K_r —渗流	τ_c —排水	τ_c —饱和	τ_c —渗流
耕地	暗棕壤	2221	0.0080	0.0150	0.0187	0.8264	1.0900	1.1600
	棕壤	1937	0.0102	0.0171	0.0224	0.7388	1.0400	1.0028
	黄壤	1560	0.0170	0.0253	0.0474	0.8458	0.9019	0.8900
	红壤	1150	0.0123	0.0246	0.0343	0.8900	1.0300	1.1000
林草地	暗棕壤	2326	0.0108	0.0160	0.0195	0.7128	1.0100	1.0400
	棕壤	1969	0.0129	0.0251	0.0288	0.8900	1.0600	1.1200
	黄壤	1764	0.0183	0.0254	0.0507	0.9400	1.0000	1.1673
	红壤	1149	0.0190	0.0259	0.0511	0.7954	0.9458	1.1100



注:a为耕地暗棕壤;b为耕地棕壤;c为耕地黄壤;d为耕地红壤;e为林草地暗棕壤;f为林草地棕壤;g为林草地黄壤;h为林草地红壤。下同。

图 1 排水状态下不同垂直带土壤剥蚀率与径流剪切力之间的相关关系

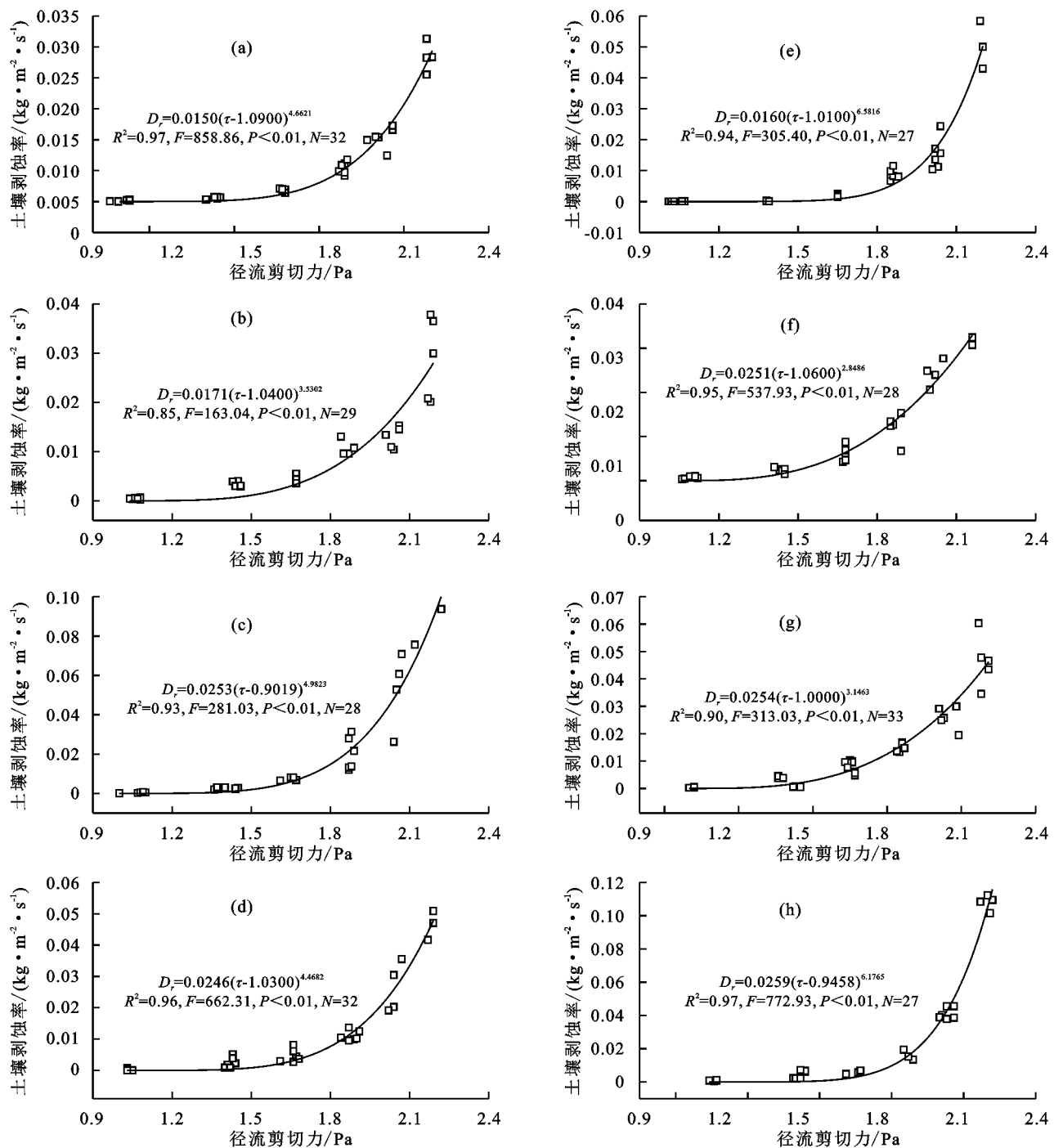


图 2 饱和状态下不同垂直带土壤剥蚀率与径流剪切力之间的相关关系

3 讨论

3.1 海拔梯度对土壤细沟可蚀性的影响

土壤可蚀性可表征土壤颗粒在水动力的作用下被分散、搬运的难易程度,一定程度上可定量表示土壤的抗侵蚀能力,与土壤本身的性质息息相关。本研究中,土壤细沟可蚀性在不同的海拔高度上具有差异性,林草地土壤 K_r 值具有很好的垂直地带性,随海拔的升高,土壤 K_r 值逐渐减小,土壤的抗侵蚀能力增加,这与 Su 等^[8]关于土壤侵蚀的垂直地带性研究相似。通过分析该区不同垂直带的土壤机械组成可知,土壤颗粒组成在海拔升高的过程中变化不大,且土壤质地均为粉质壤

土。由此可见,该区土壤的颗粒组成不具有显著的垂直地带性差异,土壤可蚀性的差异主要是土壤有机质含量的差异所造成的。这是因为随着海拔升高,气温逐渐降低,植被枯枝落叶层能更好地保存,土壤有机质含量逐渐增加,这有利于促进土壤团粒结构的形成,从而降低土壤的细沟可蚀性。王晶等^[16]关于高黎贡山土壤特征的研究表明,土壤腐殖质的组成及含量具有明显的垂直地带性,且胡敏酸的含量是影响土壤可蚀性的重要因素;乔锋等^[17]关于色季拉山垂直气候带的土壤可蚀性研究也表明,土壤可蚀性的地带性规律与气候差异、有机质含量、人为活动等有关。

耕地土壤 K_r 值表现为黄壤略大于红壤,这可能是由

于黄壤区人为活动更强,土壤结构被破坏所造成的。

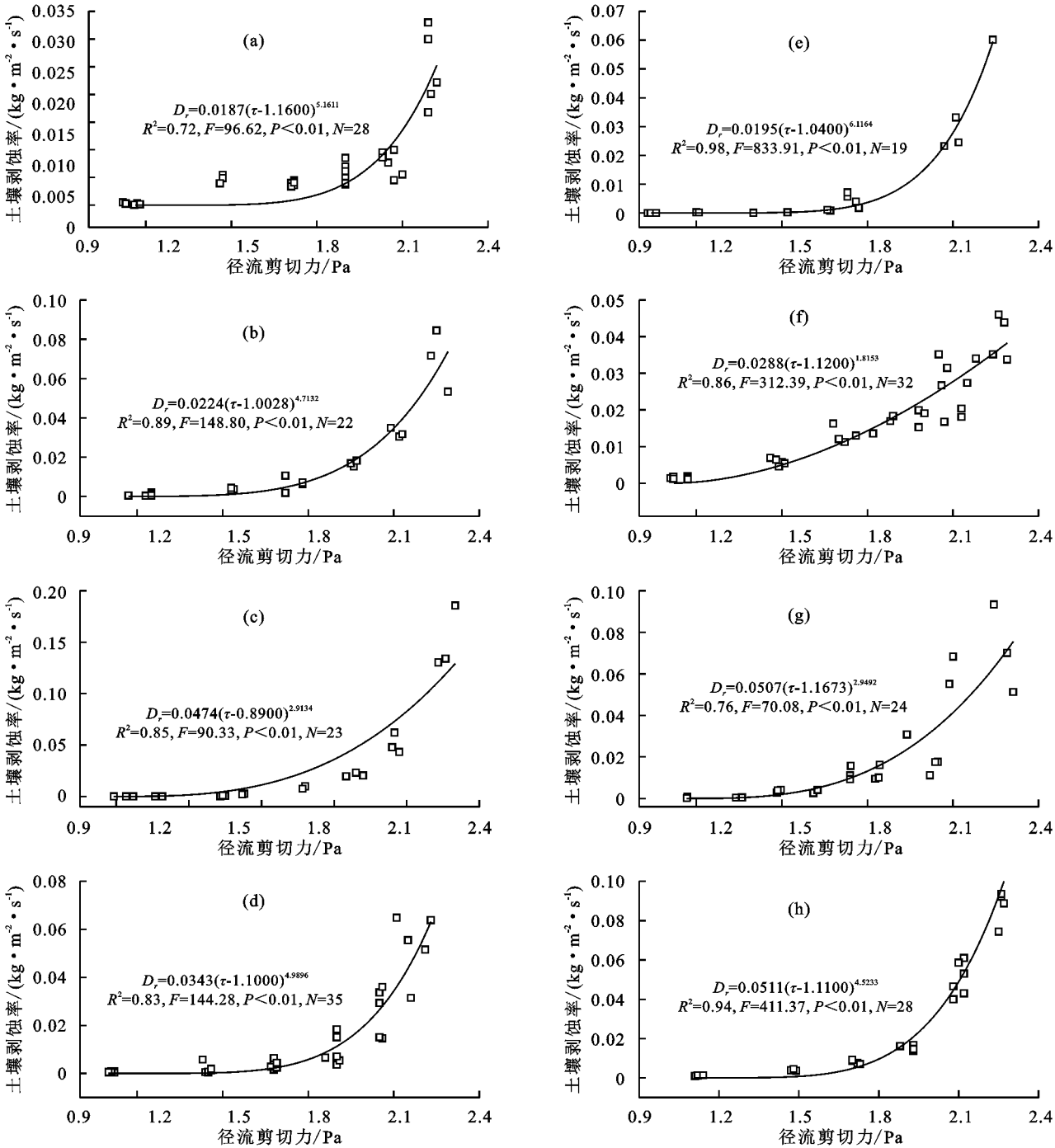


图 3 渗流状态下不同垂直带土壤剥蚀率与径流剪切力之间的相关关系

3.2 土地利用类型对土壤细沟可蚀性的影响

土地利用类型是影响土壤特性变化的重要原因之一。土地利用类型对土壤特性的影响表现在多个方面,如植被盖度低、人为活动强大和坡度大的地区会导致土壤侵蚀强度增加,长期的侵蚀作用会导致土壤结构被破坏,更易被侵蚀。本研究结果表明,在不同的海拔带,相较于耕地土壤,林草地土壤 K_r 值均偏大,即耕地的抗侵蚀能力反而略强于林草地土壤,这与李子君等^[18]、黄晓强等^[19]关于不同土地利用类型土壤的可蚀性研究结果有所不同。一般情况下,耕地受人为活动的影响,对土壤颗粒破坏比较大,且疏松

的孔隙结构增大了土壤颗粒被水流侵蚀的风险,故抗蚀性比植被覆盖度高的林草地弱。而本研究中,耕地经过长期人为使用有机肥和熟化过程,土壤的抗侵蚀能力反而比林草地强,同时也表明,除黄壤外,其他土壤类型的耕地有机质含量反而更高。这种现象的发生与耕作熟化过程中肥力的补充息息相关,在土壤机械组成相差不大的情况下,有机质是土壤团粒形成的决定性因素,人工施加有机肥有利于增加土壤团聚体的形成,从而降低土壤的细沟可蚀性。

3.3 不同近地表水文条件对土壤细沟可蚀性的影响

本研究中排水、饱和和渗流状态分别模拟了次降

雨过程中不同时段土壤近地表的水文状态,即排水状态代表降雨初期土壤水分尚处于从地表向下入渗状态;饱和状态则是代表降雨一定时间之后,土壤已经处于饱和状态,但尚未有壤中流渗出;渗流状态则是降雨一段时间之后,壤中流逐渐向地表渗出的情形。本研究结果表明,土壤在不同的近地表水文条件下的细沟可蚀性存在显著差异,均表现为渗流 $>$ 饱和 $>$ 排水,这与 Su 等^[8]、杨超等^[20]的研究结果类似。土壤细沟可蚀性在不同近地表水文条件下存在显著差异,主要原因为:一是由于侵蚀力的差异,即渗流状态下,土壤中存在向上的水力梯度,从而破坏土体的稳定结构,土壤抗蚀性会显著降低,而在排水状态下,土壤含水量较小,地表径流可以自由入渗,土壤的抗侵蚀能力相对较强;二是由于土壤水分影响土壤颗粒的稳定性所致,土壤中分子、离子和土壤颗粒之间的相互作用极大程度地影响土壤颗粒间的连结力^[21],土壤中的水分子与土壤中的原子和离子相互作用,影响它们之间的连结作用,随着土壤水分含量的增大,土壤颗粒之间原子和离子之间的连结力逐渐变小,非水稳性胶结键断裂,并且土壤颗粒结构在水的浸润下发生膨胀破坏^[22-23],最终造成土壤的细沟可蚀性增大,抗侵蚀能力减弱。

4 结论

(1)在不同海拔梯度下,土壤 K_r 值具有明显的垂直分异性。随着海拔增加,林草地土壤 K_r 值呈现逐渐减小的趋势;除黄壤外,耕地土壤 K_r 值总体上仍表现为随海拔升高而呈逐渐降低趋势,这与海拔越高土壤有机质分解越慢有关;土壤 τ_c 在不同海拔梯度上具有明显差异,但没有出现显著的规律性。

(2)土地利用方式对土壤的细沟可蚀性具有显著影响,主要表现为林草地土壤 K_r 值显著大于耕地土壤 K_r 值,平均增幅为 22.63%;林草地和耕地土壤 τ_c 值之间则没有明显的规律性。

(3)不同水文状态下土壤抗蚀能力不同,土壤的 K_r 值和 τ_c 值均表现为渗流 $>$ 饱和 $>$ 排水。这是由于随着水力梯度的增大,土壤结构稳定性被破坏,抗蚀能力减弱。

参考文献:

[1] Xu X L, Ma K M, Fu B J, et al. Relationships between vegetation and soil and topography in a dry warm river valley, SW China[J]. Catena, 2008, 75(2): 138-145.

[2] 胡实,赵茹欣,贾仰文,等.中国典型山地植被垂直地带性特征及其影响要素[J].自然杂志,2018,40(1):12-16.

[3] 王献溥,于顺利,汤大友.中国温带荒漠山地垂直地带性的遗产价值[J].干旱区研究,2009,26(5):694-701.

[4] Bojko O, Kabala C. Transformation of physicochemical soil properties along a mountain slope due to land management and climate changes: A case study from the Karkonosze

Mountains, SW Poland[J]. Catena, 2016, 140: 43-54.

[5] Middleton H E. Properties of soils which influence soil erosion[J]. Technical Bulletins, 1930(178).

[6] 黄义端,田积莹,雍绍萍.土壤内在性质对侵蚀影响的研究[J].水土保持学报,1989(3):9-14.

[7] 曾全超,董扬红,李鑫,等.基于 Le Bissonnais 法对黄土高原森林植被带土壤团聚体及土壤可蚀性特征研究[J].中国生态农业学报,2014,22(9):1093-1101.

[8] Su Z A, Xiong D H, Zhang J H, et al. Variation in the vertical zonality of erodibility and critical shear stress of rill erosion in China's Hengduan Mountains[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2019, 44(1): 88-97.

[9] 王晨沆,马超,王玉杰,等.水力梯度影响下 WEPP 模型估计细沟侵蚀参数的可行性分析[J].农业工程学报,2017,33(8):126-133.

[10] Liu J E, Zhang X, Zhou Z. Quantifying effects of root systems of planted and natural vegetation on rill detachment and erodibility of a loessial soil[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 195: 104420.

[11] 郁耀闯,王长燕.黄土高原丘陵区冰草和柳枝稷土壤细沟可蚀性季节动态[J].草业科学,2017,34(5):950-957.

[12] 孙龙,张光辉,王兵,等.黄土高原不同退耕年限刺槐林地土壤侵蚀阻力[J].农业工程学报,2017,33(10):199-205.

[13] 姜恩三,任光明,陈锦涛.四川省普格县地质灾害发育的分形特征[J].中国地质灾害与防治学报,2016,27(3):122-126.

[14] 吴海蓉.四川省普格县水土流失综合治理对策探讨[J].水利水电快报,2009,30(8):23-25.

[15] Patheniades E. Erosion and deposition of cohesive soils[J]. Journal of the Hydraulics Division, 1965, 9(1): 105-139.

[16] 王晶,何忠俊,王立东,等.高黎贡山土壤腐殖质特性与团聚体数量特征研究[J].土壤学报,2010,47(4):723-733.

[17] 乔锋,王明刚,李晶,等.色季拉山垂直气候带土壤可蚀性研究[J].西南林业大学学报(自然科学版),2018,38(6):121-126.

[18] 李子君,王硕,林锦阔,等.沂河流域土壤可蚀性空间变异研究[J].土壤通报,2019,50(1):45-51.

[19] 黄晓强,赵云杰,信忠保,等.北京山区典型土地利用方式对土壤理化性质及可蚀性的影响[J].水土保持研究,2015,22(1):5-10.

[20] 杨超,苏正安,马菁,等.不同近地表水文条件下矿山弃土对土壤细沟可蚀性的影响:以攀枝花盐边县龙麟矿山为例[J].水土保持学报,2016,30(6):67-72.

[21] Graber E R, Fine P, Levy G J. Soil stabilization in semiarid and arid land agriculture[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2006, 18(2): 190-205.

[22] 夏振尧,张伦,牛鹏辉,等.干密度初始含水率坡度对紫色土崩解特性的影响[J].中国水土保持科学,2017,15(1):121-127.

[23] 张晓媛,范昊明,杨晓珍,等.容重与含水率对砂质黏壤土静水崩解速率影响研究[J].土壤学报,2013,50(1): 214-218.