

不同坡度条件下的全风化花岗岩回填土边坡生态防护措施

张慧敏^{1,2}, 李燕清³, 燕永锋¹, 孔志岗^{1,2}, 葛华⁴, 刘振国⁵, 袁庆飞⁶

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;

2.自然资源部高原山地地质灾害预报预警与生态保护修复重点实验室,昆明 650093;

3.云南省交通运输厅,云南省交通安全统筹中心,昆明 650031;4.国家管网集团西南管道有限责任公司,成都 610041;5.中国水电基础局有限公司,天津 武清 301700;6.中国电建集团昆明勘察设计研究院有限公司,昆明 650051)

摘要:生态防护措施是治理全风化花岗岩回填土边坡坡面侵蚀的有效手段,以中缅油气管道龙陵段全风化花岗岩回填土边坡为研究对象,通过室内人工模拟降雨试验,在坡长相同的情况下,选择不同坡度(10°,20°,30°和40°),相同雨强(220 mm/h)的4种水土保持措施(工程措施、植物措施、工程+植物措施和工程+耕作措施)来分析坡面土壤侵蚀的变化规律并计算产流率和产沙率,评价其防治效果。结果表明:(1)不同坡度所设置的防护措施均能起到减流减沙的效果,最佳水土保持措施为工程+植物措施。(2)≤10°边坡在裸坡条件下坡体基本稳定,不需要任何防护措施;10°~20°,20°~30°边坡分别在植草(覆盖率100%)和植草+坡面截排水措施下的护坡措施效果较好,>30°边坡必须在有固坡措施的基础上,坡面设置生物措施方能有效治理坡面侵蚀问题。(3)坡度的阈值不是固定不变的,坡面防护措施越复杂,阈值越大;且在不同的防护措施条件下,坡度对坡面累积产沙量影响最大。

关键词:全风化花岗岩回填土;防护措施;产流率;产沙率;坡面侵蚀

中图分类号:TU457

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2022)06-0156-07

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2022.06.020

Ecological Protection Measures of Completely Weathered Granite Backfill Slope Under Different Slope Conditions

ZHANG Huimin^{1,2}, LI Yanqing³, YAN Yongfeng¹,

KONG Zhigang^{1,2}, GE Hua⁴, LIU Zhenguo⁵, YUAN Qingfei⁶

(1.Faculty of Land Resources Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650093;

2.MNR Key Laboratory of Geohazard Forecast and Geocological Restoration in Plateau Mountainous Area, Kunming 650093; 3.Yunnan Provincial Traffic Safety Coordination Center, Department of Transport of Yunnan Province, Kunming 650031; 4.Pipe China of Southwest Pipe Company, Chengdu 610041; 5.Sinohydro Foundation Engineering Co., LTD., Wuqing, Tianjin 301700; 6.Kunming Engineering Corporation Limited, Kunming 650051)

Abstract: Ecological protection measures are effective means to control the slope erosion of completely weathered granite backfill slope. Taking the completely weathered granite backfill slope of Longling section of China-Myanmar oil and gas pipeline as the research object, through the indoor artificial simulated rainfall test, under the same slope length, four soil and water conservation measures (engineering measures, plant measures, engineering + plant measures and engineering + tillage measures) with different slopes (10°, 20°, 30° and 40°) and the same rainfall intensity (220 mm/h) were selected to analyze the change law of soil erosion on slope surface and calculate the flow yield rate and sediment yield rate to evaluate its control effect. The results showed that: (1) The protective measures set up in different slopes could reduce flow and sediment, and the best water and soil conservation measure was engineering+plant measure. (2) The slope ≤10° was basically stable under the condition of bare slope, and no protective measure was required. For 10°~20° and 20°~30° slopes, the slope protection measures of grass planting (coverage rate 100%) and

收稿日期:2022-04-29

资助项目:国家管网集团西南管道有限责任公司科技开发项目“油气管道通过全风化花岗岩地区水工保护与水土保持研究”(2018016);云南省重点研究计划项目(202203AC100003)

第一作者:张慧敏(1993—),女,硕士研究生,主要从事环境地质研究。E-mail:15516943305@163.com

通信作者:孔志岗(1980—),男,博士,副教授,硕士生导师,主要从事环境地质、工程地质研究。E-mail:zhigangkong@kust.edu.cn

grass planting+slope interception and drainage measures are effective. For slopes $>30^\circ$, biological measures must be set on the slope surface on the basis of slope consolidation measures to effectively control slope erosion. (3) The threshold of slope was not fixed. The more complex the slope protection measures were, the greater the threshold was. Under different protective measures, the slope had the greatest impact on the cumulative sediment yield.

Keywords: completely weathered granite; protective measures; yield rate; sediment yield; slope erosion

土壤侵蚀类型主要有水力侵蚀、风力侵蚀、重力侵蚀、冰川侵蚀、植物侵蚀等,而水力侵蚀破坏能力最甚。水力侵蚀强度主要与雨量、坡度、植被覆盖率等有关^[1-4]。已有研究^[5]表明,坡面土壤侵蚀强度与降雨量呈正相关,与植被覆盖率呈负相关;而在坡度方面,坡面侵蚀强度在一定坡度范围内,随坡度的增大而增大;也有研究^[6]结果表明,坡面侵蚀在坡度方面存在阈值,当坡度大于该值时,坡面侵蚀强度随坡度的增大反而减小。而近几十年来,国内外众多学者通过野外及室内试验对不同坡度条件下边坡防治措施进行了大量的研究^[7-13],但这些研究多以小流域或区域为单元开展综合治理,对单个坡面的水土保持研究较少;且多数研究集中在黄土地区,针对全风化花岗岩回填土坡面的坡面侵蚀研究较少。Tian等^[14]和Wang等^[15]通过对黄河流域径流和输沙量的研究认为,其出现显著变化的原因很大程度上归因于其对土壤保持措施的强烈响应;张乐涛等^[16]通过对不同工程措施条件下的黄土区工程堆积体研究也表明,不同工程措施均能较好地调控坡面径流侵蚀过程;张杰等^[17]和陈若等^[18]分别采用野外标准径流小区试验人工模拟降雨试验对不同坡度下的水土保持措施进行研究指出,2种措施相结合的减沙效益远远优于单一措施,而对于减流,前者则指出植物措施效果最佳;王学强等^[19]则认为坡度对于不同的耕作、植物措施的蓄水保土效益都有一定的限制作用,随着坡度的增大,不同措施的减流减沙效益会随之减小;戴金梅等^[20]和邓景成^[21]指出,坡面产流产沙量均随植被覆盖率的增大而减小,分别呈线性负相关,二次项相关关系,且当植被覆盖率为50%时,对涵养水源、保持水土起到至关重要的作用;戴矜君等^[22]认为,在不同植被覆盖度下,坡面阻力系数变化过程由下渗过程和坡面侵蚀过程共同决定,且赵璐等^[23]则认为坡面粗糙率系数并非随密度增大而增大,在植被阻水方面存在一个最理想的密度范围;祁玉超等^[24]针对暴雨条件下不同灌木种植模式对不同坡度边坡的固坡效应开展研究表明,在 35° 以下的边坡上种植灌木能够增强抗侵蚀能力,减少坍塌量;而在 50° 以上边坡上种植灌木则会增大坍塌量,故得出灌木固坡与坡度密切相关的结论。不同类型的土体在其性质方面具有明

显的差异,这种差异性对全风化花岗岩回填土的侵蚀性影响显著。

滇西龙陵县东北部为花岗岩分布区,由于管沟的开挖,地表植被遭受严重破坏。全风化花岗岩及回填土结构松散,抗蚀能力差,肥力低,物理力学性质差,在流水的作用下,极易发生坡面侵蚀。管沟作业边坡坡面滑塌、地表水土流失以及冲蚀沟剧烈发育,对管道运营形成较大的安全隐患。而中缅油气管道是我国能源进口的西南大通道,坡面侵蚀造成的露管、悬管对管道安全运营造成威胁。但常规的治理措施经常失效,因此开展针对性的防治措施研究成为全风化花岗岩分布区油气管道安全运营亟待解决的安全问题。本文在野外调查的基础上,通过室内人工模拟降雨试验,探索不同坡度条件下有效的坡面防护措施组合,为全风化花岗岩分布区建设工程边坡坡面侵蚀治理提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

本试验用土取自云南省保山市龙陵县黄草坝村中缅输油气管道管沟回填土,取样时间为2020年7月,试验时间为2020年8—10月。该地区属于南亚热带气候区和北热带区。降雨充沛,年平均降水量可达2 112.6 mm,主要集中在5—10月,最大日降雨量可达163 mm。根据龙陵地区降雨数据分析,在极端情况下,该区单点暴雨雨强可能达到220 mm/h。

1.2 试验装置

人工模拟降雨试验在昆明理工大学水土保持实验室进行,采用下喷式的中仪ZYJY-DZ02型人工模拟降雨系统。降雨高度为5 m,均匀度在85%以上,通过压力泵和喷头组合控制雨量和降雨时长,能够达到本试验所需要的要求。

试验所用土槽为自行设计的可调坡钢槽,规格为3 m(长) $\times$ 2 m(总宽) $\times$ 0.5 m(高),从左到右依次分为A、B、C 3个槽,其对应钢槽宽分别为0.5、1.0、0.5 m;可调坡钢槽尾部设置“V”形收集口,用于收集模拟降雨试验产生的径流泥沙样品,试验装置见图1。

1.3 试验设计

本试验中,裸坡作为对照LP区,分析工程措施、

植物措施、工程+植物措施、工程+耕作措施 4 种水土保持措施。工程措施 GC 设置排水沟+土工格栅+木排,采用长 3 m、直径为 110 mm 的半圆形 PVC 管模拟排水沟,用木排模拟浅埋挡土墙。工程+耕作措施 GG 设置 3 个区,分别为:最表层铺设 10 cm 厚耕植土+排水沟+截水沟的 GG1 区、最表层铺设 10 cm 厚的耕植土+排水沟+截水沟+土工格室的 GG2 区、最表层铺设 10cm 厚的耕植土+排水沟+截水沟+土工格栅+木排的 GG3 区。植物措施 ZW 为铺设植草,共设置 3 个区,分别为:覆盖率为 60%的 ZW1 区、覆盖率为 70%的 ZW2 区、覆盖率为 100%的 ZW3 区。工程+植物措施 GZ 共设置 5 个区,分别为:植草(覆盖率 100%)+排水沟的 GZ1 区、植草(覆盖率 100%)+排水沟+截水沟的 GZ2 区、植草(覆盖率 100%)+排水沟+木排的 GZ3 区、植草(覆盖率 100%)+排水沟+截水沟+木排的 GZ4 区、植草(覆盖率 100%)+土工格室 GZ5 区。以上试验均在可变坡矩形钢槽中进行试验。斜坡的设计和处理见表 1(由于不同冲刷槽宽度下对坡体产流产沙有一定的影响^[25],本文对 B 槽、A 和 C 槽防治措施分别做对比研究)。

填土前用烘干法测得试验土壤含水率和容重,并在自然风干后过 10 mm 筛以去除石块和杂草。填土时将土壤干密度控制在 1.3~1.5 g/cm³,控制土壤含水率在 10%左右。装土采用分层填土法,每次装土 5 cm,填土总厚度为 50 cm,并铺平、压实以减少边坡效

应的影响。装土结束后用环刀法来测定坡面土壤容重,以检验是否达到试验设计水平。降雨强度设置为 220mm/h,以模拟龙陵地区极端暴雨情况,坡度设置为 10°,20°,30°和 40°。每场试验历时 1 h。

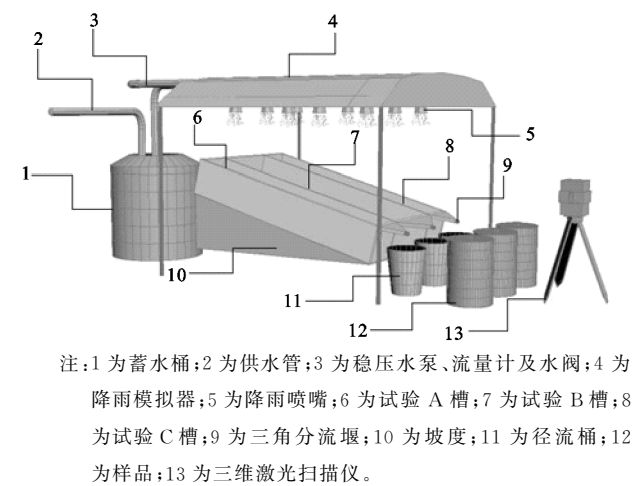


图 1 室内模拟试验装置示意

正式降雨开始后,记录各坡面径流、渗流出现的时间及结束时间,同时观察坡面的侵蚀情况。坡面流产生后,每隔 2 min 用体积为 1 L 的容器收集各个槽出口处冲刷径流的泥沙水,当 30 s 后收集的泥沙水仍不够 1 L 的,停止收集,记录 30 s 时间收集的泥沙水体积;当 30 s 内收集的泥沙水超过 1 L 时,收集泥沙水到 1 L,记录所用的时长。静置 24 h 后,倒掉上层液,将剩余泥沙样移至一次性纸杯内,置于 105 ℃ 条件下的烘干箱中烘干 24 h 后测定泥沙量。

表 1 试验斜坡的设计与处理

小区编号	水土保持措施		防治措施说明	应用坡度及钢槽
LP	无措施对照组		裸坡	10°,20°,30°,40°(B 槽);30°(A 槽)
GC	工程措施		排水沟+土工格栅+木排	10°(A 槽)
GG1	工程+耕作措施		耕植土+排水沟+截水沟	10°(C 槽)
GG2			耕植土+排水沟+截水沟+土工格室	40°(C 槽)
GG3			耕植土+排水沟+截水沟+土工格栅+木排	40°(A 槽)
ZW1	植物措施	植草(覆盖率 60%,分别铺设在坡顶和坡脚,各占 20%和 40%)		20°(A 槽)
ZW2		植草(覆盖率 70%,分别铺设在坡顶和坡脚,各占 25%和 45%)		20°(C 槽)
ZW3		植草(覆盖率 100%)		10°,20°,30°,40°(A 槽)
GZ1	工程+植物措施	植草(覆盖率 100%)+排水沟		10°,20°,30°,40°
(C 槽)GZ2		植草(覆盖率 100%)+排水沟+截水沟		10°,20°,30°,40°
(B 槽)GZ3		植草(覆盖率 100%)+排水沟+木排		40°
(C 槽)GZ4		植草(覆盖率 100%)+排水沟+截水沟+木排		40°
(B 槽)GZ5		植草(覆盖率 100%)+格室		40°(A 槽)

1.4 数据计算

(1)产流率计算:

$$N=\frac{q}{t}$$
(1)

式中: N 为单位时间内的径流量(mL/s); q 为单次接

样时间内的径流量(mL); t 为单次接样时间(s)。

(2)产沙率计算:

$$M=\frac{M'}{t}$$
(2)

式中: M 为单位时间内的产沙量(g/s); M' 为单次接

样时间内的产沙量(g); t 为单次接样时间(s)。

2 结果与分析

2.1 10°坡条件下产流产沙对比

由图 2a 和图 2c 可知,除 GC 区和 GG1 区以外,其他试验区的产流率均呈先增大后趋于稳定状态。LP 区平均产流率、产沙率分别为 GZ2 区的 1.35,66.79 倍,产流

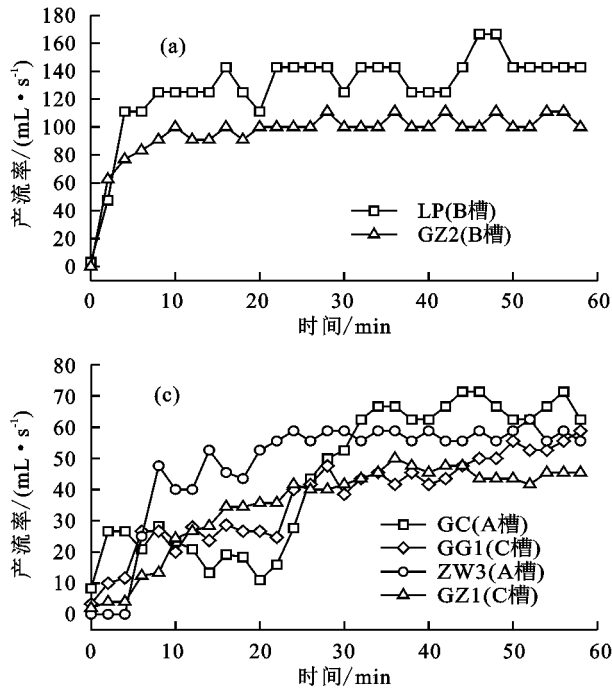


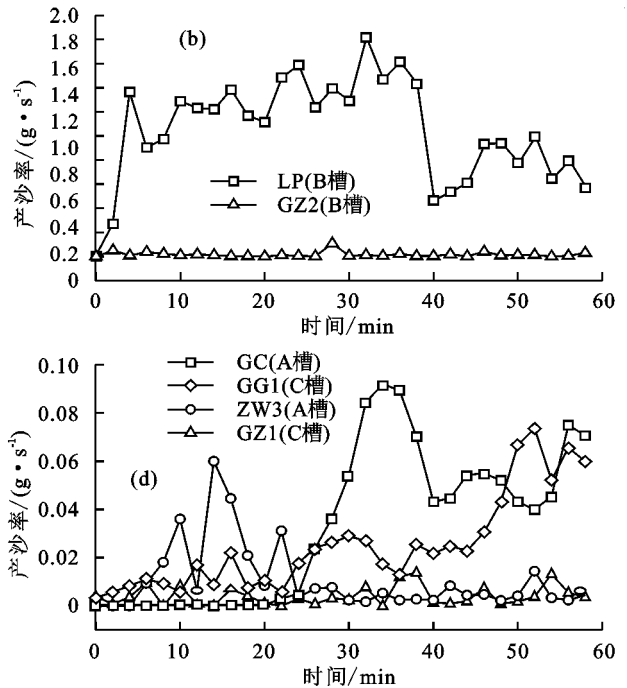
图 2 10°条件下不同防护措施产流率和产沙率对比

对比 GZ1、ZW3 区可知,GZ1 区相比于 ZW3 区增设排水沟,但其产流产沙均低于 ZW3 区,平均产流率、产沙率仅为 ZW3 区的 73.29%,44.74%,说明在极端暴雨情况下,在设有植被覆盖率为 100%的 10°边坡,单独设置排水沟对坡面径流排水作用并不明显,但能起到良好的减沙作用。

GC、GG1 区的产流率分别呈先增大后减小再增大最后趋于稳定,先增大后稳定再增大趋势,产沙率均在降雨 25 min 前相对稳定,25 min 后急剧增大,且 GC 区的产流产沙率最大分别可达 71.4 mL/s,0.092 g/s。其主要原因为 GC 区内所设有的木排在前期对径流和泥沙起到阻挡作用,但随着降雨对坡面的冲刷,坡面逐渐形成沟蚀,并在坡脚形成积水,木排失效;而 GG1 区在降雨初期,坡面铺设的耕植土有效地增加地表粗糙度,但随着雨水的冲刷,耕植土逐渐变薄起到的作用逐渐降低,故在后期雨水挟沙能力变强。

而在该坡度下所设置的试验区,没有设置植被的 LP、GC、GG1 区坡面虽均出现冲刷、变形现象,且 LP 区出现不均匀沉降裂缝,但坡体稳定性良好;故在 $\leq 10^\circ$ 坡面条件下可不需要设置任何防护措施,必要的时候仅需在坡脚设置排水系统。

率达到稳定状态的时间比 GZ2 区提前 2 min,且产沙率出现类似“M”形的变化过程。这主要是由于坡面侵蚀发生改变,由原来的坡面侵蚀转变为细沟侵蚀,使得产沙量出现随机波动;且 GZ2 区所设置的植被能够截留雨水,增加地表粗糙度,加大坡面入渗,减少坡面流,进而削弱坡面流速和水流动能,降低水流侵蚀搬运能力。



2.2 20°坡条件下产流产沙对比

在 20°坡度条件下,各试验区的产流率均呈先增大后趋于稳定状态。由图 3a 和图 3b 可知,GZ2 区的产流率大于 LP 区,其平均产流率是 LP 区的 1.29 倍,但平均产沙率仅为 LP 区的 7.76%;且 GZ2 区在降雨前 4 min 内其产流率迅速增加,随后达到稳定状态,比 LP 区达到稳定状态的时间提前 4 min。该现象则可说明,在该坡度条件下所设置的截排水工程可有效地防止降雨汇入坡体,能够引导降雨汇水,使雨水快速排出,并有效降低产沙量,从而保证边坡的稳定性。

对比 ZW1、ZW2、ZW3 区的产流产沙可知,其平均产流率分别为 50.86,49.74,53.46 mL/s,平均产沙率分别为 0.040,0.034,0.005 g/s。ZW2 区较于 ZW1、ZW3 区的产流率分别下降 2%,7%,则可知坡面植被覆盖率为 70%的对坡面径流拦截能力最佳。而当植被覆盖率为 100%时,其平均产沙率仅为 ZW1、ZW2 区的 12.5%,14.7%,土壤侵蚀程度微乎其微。故坡面产沙量随植被覆盖率的增大而减小,与其呈负相关关系。

结合现场试验情况分析,GZ1、GZ2、ZW3 区未发生任何土壤侵蚀现象。LP 区中间位置出现深沟,在坡体底部有泥沙沉积,ZW1、ZW2 区分别在植被的上

部出现明显的侵蚀现象和底部有大量泥沙堆积,在其他位置均未看到变形或土壤侵蚀现象;但是,可以预见的是,如果降雨量更大或者坡度更陡的时候,当坡

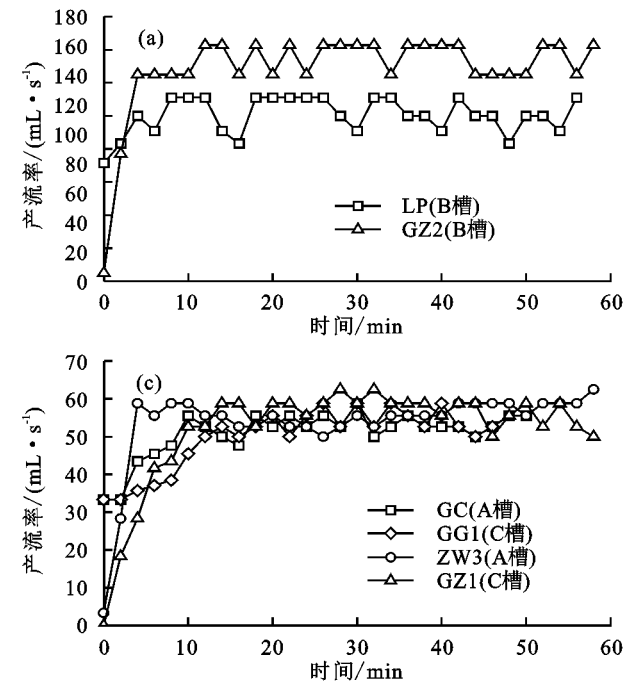
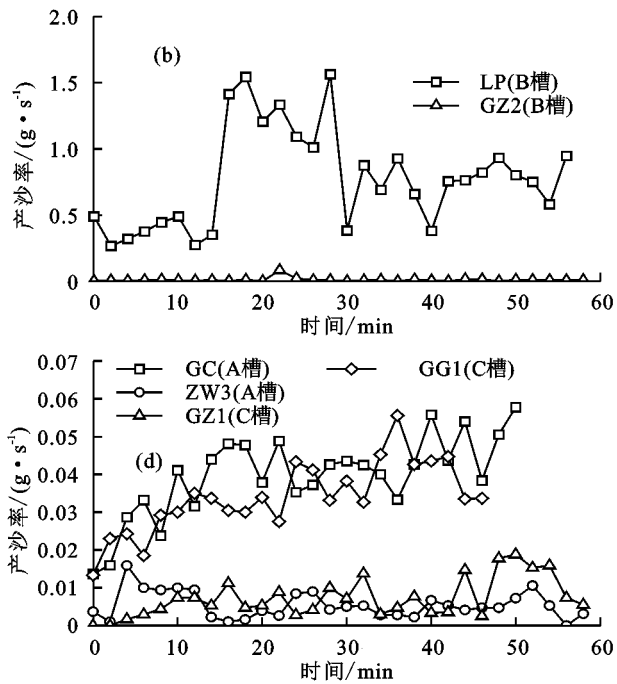


图 3 20°条件下不同防护措施产流率和产沙率对比

2.3 30°坡条件下产流产沙对比

相比于 10°和 20°坡面产流情况,LP 区与 GZ2 区的坡面产流随坡度的增大其差距逐渐减小。在 30°条件下,GZ2 区的平均产流率较于 LP 区仅减少 10.29%,但其产沙率远小于 LP 区,仅为 LP 区的 0.17%(图 4)。而在 A、C 槽内所设置的试验小区,LP(A)、GZ2(C)、ZW3、GZ1 区的平均产流率分别为 60.09,50.47,44.83,32.47 mL/s,平均产沙率分别为 9.773,0.044,0.006,0.021 g/s。相较于 LP 区,GZ2(C)、ZW3 和 GZ1 区的平均产流率分别减少 16.02%,25.40%,45.97%,平均产沙率仅为 LP 区的 0.45%,0.04%,0.22%。故可知坡面所设置的所有的防护措施均能达到减流减沙效果,且在植被覆盖率为 100%的条件下,坡面侵蚀量接近于 0。而 GZ1 区的产流率总体小于 ZW3 区,但产沙率却大于 ZW3 区,其主要原因为植被的铺设。在试验过程中,A 槽的植被明显比 C 槽植被茂盛,而坡面植被存在最优种植密度,可使阻水效果最佳,这一结论与赵璐等^[23]的研究结果一致。而 GZ2 区产沙率在降雨 36 min 之后,突然增大,这主要是受到植被的影响。某一时段坡面径流容易发生水流的拥堵,泥沙有一定的沉积,此时含沙量较小,当聚集的水流规模较大时,足够冲破植被的拦截,有大量泥沙产生,此时含沙量也较大,进而出现产沙量波动变化的趋势。而又由于试验降雨量较大,坡面较陡,坡面

面仅仅只设置植草覆盖率为 70%,60%的植物措施,坡面将可能发生失稳。故在 10°~20°坡面设置植草覆盖率为 100%的植物措施水土保持效果最佳。



流速较快,从而造成截水沟两侧泥沙的流失,故使 GZ2 区的产沙率大于 ZW3 区。

结合现场试验情况分析,A、B 槽的 LP 区整片区域水土流失严重,坡面被冲出深沟,发生强烈变形,且 B 槽的中间位置管道裸露;ZW3、GZ1、GZ2(B)、GZ2(C)区虽未看到明显的变形,但是可以看到试验区有明显的冲刷现象,土层明显变薄,且 GZ2(B)区出现地皮裸露。结合产流率、产沙率特征可以总结出,当边坡为 20°~30°时,在有植被全覆盖的前提下做好截排水措施。

2.4 40°坡条件下防护措施对比

在该坡度条件下,未设置植被措施的 LP、GG3、GG2 区都有严重的土壤侵蚀现象。LP 区坡面在后缘出现宽 20 cm、深 40 cm 的拉张裂缝,坡顶、坡中、坡脚分别沉降 8,3,3 cm,坡面右侧及中间位置分别发育有长、宽、深分别为 9,20,20 cm 和 22,40,30 cm 的冲沟;GG3、GG2 区坡面后缘分别出现宽、深分别为 9,40 cm 和 6,30 cm 的拉张裂缝,坡顶、坡中、坡脚分别沉降 4,2,2 cm 和 7,9,5 cm,分别在坡中、坡脚发育长、宽、深 10,11,42 cm 和 8,20,10 cm 的冲沟,设有植被措施但无固坡措施的 ZW3、GZ2、GZ1 区都发生从坡顶开始的滑坡现象,发生滑坡的原因为^[26]: (1)坡面所设置的植被措施和工程措施能够减小坡面流,增加雨水的入渗,雨水不仅能增大坡面自身的重量,还起着润滑作用,从而减少松散物质颗粒之间的

黏结力,以及整个物体和基底之间的摩擦力;(2)随着坡度的增加,平行于坡面的下滑力逐渐增大,当下滑力大于摩擦阻力时,便发生下滑。而设置固坡措施坡

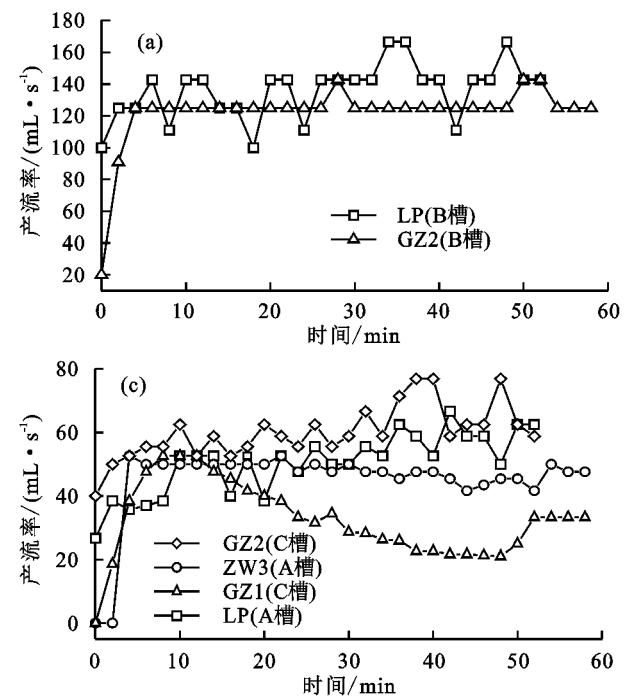
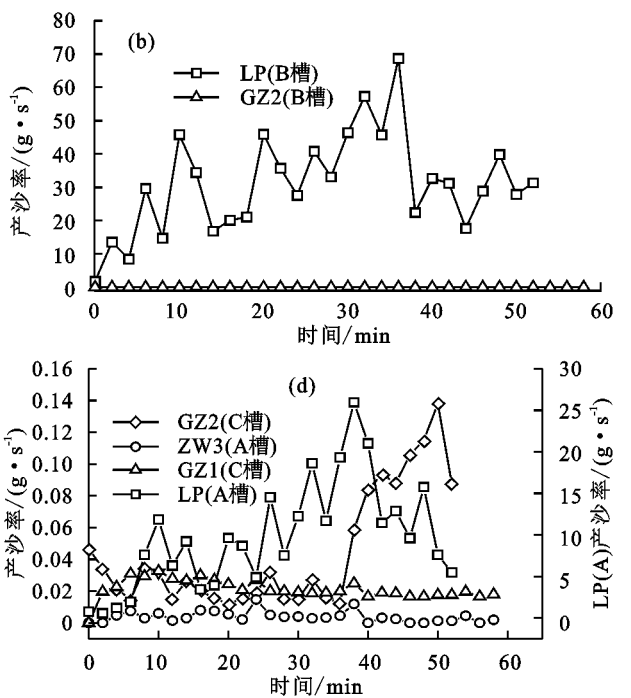


图4 30°条件下不同防护措施产流率和产沙率对比

2.5 相同防治措施不同坡度条件下产流产沙对比

坡面径流泥沙量主要由降雨过程的侵蚀产沙量和径流量所决定。由表2可知,不同坡度、不同防护措施下的坡面产流产沙量存在差异。在B槽中,LP区的累积产流量大小为 $30^{\circ}>10^{\circ}>20^{\circ}$,累积产沙量与GZ2区的累积产流、产沙量变化趋势相同,大小为 $30^{\circ}>20^{\circ}>10^{\circ}$ 。且LP、GZ2区的累积产沙量均在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时增幅较缓,分别为20.13%和16.32%;而在 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时猛增,分别增加21.5,5.54倍。而A槽中ZW3区的累积产流、产沙量大小为 $20^{\circ}>30^{\circ}>10^{\circ}$,累积产流、产沙量在 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 时分别增加18.70%,165.67%,而从 $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 时分别减小8.85%,46.05%。这主要是由于坡度的增加导致坡面盛雨量减小,但能加快坡面径流的势能向动能转化,使得径流流速有所增加,从而带起更多的泥沙量。而这2方面原因使得坡面冲刷量存在临界坡度,当边坡坡度小于临界坡度范围时,坡面冲刷量随着坡度的增加而增大,而超过该坡度时,冲刷量则随坡度的增加而减小。在本文中,由于试验次数有限,虽不能准确判断出在降雨量为220 mm/h条件下,坡面侵蚀的坡度阈值的具体值,但根据对以上3个试验区的坡面产流产沙情况分析可知:3个试验区的坡度阈值大小为LP区<ZW3区<GZ2区。故在一定的条件下,坡度的阈值不是固定不变的,而是随着坡面防护措施的改变而改变,且防护措施越复

面保持稳定,且无明显冲刷痕迹。故可以得出结论:当边坡坡度 $>30^{\circ}$ 时,必须在有固坡措施的前提下设置覆盖率为100%的植物措施。



杂,其阈值越大;并在不同的防护措施条件下,坡度对坡面累积产沙量的影响更大。

表2 不同防护措施、坡度条件下的累积径流量和含沙量			
试验区	坡度/(°)	累积 径流量/L	累积 产沙量/g
LP区(B槽)	10	447.1	3923.17
	20	433.2	4713.07
	30	480.0	106021.14
GZ2区(B槽)	10	328.8	26.11
	20	436.0	30.37
	30	446.8	198.61
ZW3区(A槽)	10	161.8	11.68
	20	192.0	31.03
	30	175.0	16.74

3 结论

- (1)不同坡度下的不同水土保持措施均能有效减少侵蚀量,最佳水土保持措施为工程+植物措施。
- (2) $\leq 10^{\circ}$ 边坡,坡体在不设任何防治措施条件下能够保持稳定。 $10^{\circ}\sim 20^{\circ}$ 边坡,植被覆盖度为100%的植物措施的水土保持效果最佳; $20^{\circ}\sim 30^{\circ}$ 边坡,在植被覆盖度为100%的条件下,需做好截排水措施; $>30^{\circ}$ 边坡,在有工程固坡措施的前提下,设置植被全覆盖的植物措施。
- (3)在一定的情况下,坡度的阈值不是固定不变

的,而是随着坡面防护措施的改变而改变,且防护措施越复杂,其阈值越大;在不同的防护措施条件下,坡度对坡面累积产沙量的影响更大。

参考文献:

- [1] Fraser A I, Harrod T R, Haygarth P M. The effect of rainfall intensity on soil erosion and particulate phosphorus transfer from arable soils[J]. *Water Science and Technology*, 1999, 39(12): 41-45.
- [2] 常松涛,黄少燕,查轩,等.雨强和植被覆盖度对红壤坡面产流产沙的影响[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 58-63.
- [3] 邓龙洲,张丽萍,范晓娟,等.不同雨强和坡度下侵蚀性风化花岗岩母质坡地产生流产沙特征[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(17): 143-150.
- [4] 孙丽丽,查轩,黄少燕,等.不同降雨强度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(5): 18-23.
- [5] Kateb H E, Zhang H, Zhang P, et al. Soil erosion and surface runoff on different vegetation covers and slope gradients: A field experiment in Southern Shaanxi Province, China[J]. *Catena*, 2013, 105: 1-10.
- [6] 晋文娟.坡度对黑土坡面产流产沙影响效应的实验室模拟研究[D].吉林:东北师范大学, 2015.
- [7] Guo H L, Zhang B B, Hill R, et al. Fish-scale pit effects on erosion and water runoff dynamics when positioned on a soil slope in the Loess Plateau region, China [J]. *Land Degradation and Development*, 2019, 30 (3): 1813-1827.
- [8] Wu W M, He Z G. Effects of vegetation on flow conveyance and sediment transport capacity[J]. *International Journal of Sediment Research*, 2009, 24(3): 247-259.
- [9] Zhao X N, Chen X L, Huang J, et al. Effects of vegetation cover of natural grassland on runoff and sediment yield in loess hilly region of China[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2014, 94(3): 497-503.
- [10] 曹媛,孙鹏,姚蕊,等.不同雨强条件下工程措施对坡地产生流产沙影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6): 1-7.
- [11] 吴蕾,穆兴民,高鹏,等.黄土高原地区植被盖度对产生流产沙的影响[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(6): 133-138, 144.
- [12] 张志华,聂文婷,许文盛,等.不同水土保持临时措施下工程堆积体坡面减流减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2022, 38(1): 141-150.
- [13] 张丽萍.鱼鳞坑工程措施下不同坡度坡面土壤侵蚀过程研究[J]. *中国水土保持*, 2020(8): 37-39.
- [14] Tian P, Liu L K, Tian X J, et al. Sediment yields variation and response to the controlling factors in the Wei River Basin, China[J]. *Catena*, 2022, 213: e106181.
- [15] Wang Z J, Xu M Z, Liu X, et al. Quantifying the impact of climate change and anthropogenic activities on runoff and sediment load reduction in a typical Loess Plateau watershed[J]. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 2022, 39: e100992.
- [16] 张乐涛,董俊武,袁琳,等.黄土区工程堆积体陡坡坡面径流调控工程措施的减沙效应[J]. *农业工程学报*, 2019, 35(15): 101-109.
- [17] 张杰,陈晓安,汤崇军,等.典型水土保持措施对红壤坡地柑橘园水土保持效益的影响[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(24): 165-173.
- [18] 陈若,夏永华,杨明龙,等.基于 TLS 的全风化花岗岩地区水土保持措施减沙效益研究[J/OL]. *激光与光电子学进展*: 1-14 [2022-04-19]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/31.1690.TN.20210915.1130.012.html>.
- [19] 王学强,蔡强国,继军.红壤丘陵区水保措施在不同坡度坡耕地上优化配置的探讨[J]. *资源科学*, 2007, 29(6): 68-74.
- [20] 戴金梅,查轩,黄少燕,等.不同植被覆盖度对紫色土坡面侵蚀过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(3): 33-38.
- [21] 邓景成.灌草植被盖度对产生流产沙影响的模拟降雨实验研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学.
- [22] 戴矜君,程金花,张洪江,等.植被覆盖下坡面流阻力变化规律[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(2): 44-49.
- [23] 赵璐,孙菊英,张璐,等.不同黑麦草种植密度对坡面流的阻力特性影响研究[J]. *灌溉排水学报*, 2017, 36(2): 101-105.
- [24] 祁玉超,兰惠娟,王道杰,等.暴雨条件下灌木对边坡稳定性的影响模拟试验[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(4): 61-68.
- [25] 李学增,黄炎和,林金石,等.不同宽度冲刷槽对崩岗崩积体产生流产沙的影响[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(9): 136-141.
- [26] 张洪江,程金花.土壤侵蚀原理[M]. 4 版.北京:科学出版社, 2019: 106-107.