

文章编号:1671-1637(2016)04-0096-08

青藏高原不同植被措施下公路边坡产流产沙特征

胡林^{1,2}, 王琦², 单永体², 陈瑞华², 郭文², 李占斌¹

(1. 西安理工大学 西北旱区生态水利工程国家重点实验室培育基地, 陕西 西安 710048;

2. 中交第一公路勘察设计研究院有限公司 高寒高海拔地区道路工程安全与健康国家重点实验室, 陕西 西安 710075)

摘要:为探究青藏高原公路边坡在不同植被防护措施下的侵蚀规律,提高公路边坡植被防护技术,采用野外冲刷试验研究了青藏高原公路边坡在裸坡、三维网植草、人工铺草皮等不同植被防护措施下的产流产沙特征,分析了不同措施下的防护效率与拦沙机理。试验结果表明:3、8 L·min⁻¹冲刷流量下的平均初始产流时间分别为225.50、163.27 s,初始产流时间与流量和植被盖度之间具有显著相关性;8 L·min⁻¹冲刷流量下的产流稳定时间较3 L·min⁻¹提前了约2 min;植被措施的拦沙效应主要体现在对粗颗粒泥沙的拦蓄上,边坡产流量和产沙量随植被盖度的增加而减小;植被措施拦截径流效率和拦截泥沙效率的平均值分别为55.7%、53.5%;综合防护效果从大到小依次为74%盖度三维网植草、37%盖度三维网植草、中部铺草皮、上部铺草皮、裸坡,建议采用以草皮为骨架配以三维网植草的边坡植被综合恢复技术。

关键词:公路边坡;植被防护;产流产沙;防护效率;青藏高原

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

Characteristics of runoff and sediment yields for highway slope under different vegetation measures in Qinghai-Tibet Plateau

HU Lin^{1,2}, WANG Qi², SHAN Yong-ti², CHEN Rui-hua², GUO Wen², LI Zhan-bin¹

(1. State Key Laboratory Cultivation Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China; 2. State Key Laboratory of Road Engineering Safety and Health in Cold and High-Altitude Regions, CCCC First Highway Consultants Co., Ltd., Xi'an 710075, Shaanxi, China)

Abstract: In order to explore the erosion law on highway slope with vegetation protection measures and improve highway slope vegetation protection technology in Qinghai-Tibet Plateau, field scouring tests were carried out to study the characteristics of runoff and sediment yields on highway slope in Qinghai-Tibet Plateau under different vegetation protection measures including bare slope, three dimensional network seeding and artificial turfing, and the protection efficiency and sediment interception mechanism under different measures were analyzed. Test result shows that when the scouring flow rates are 3 and 8 L·min⁻¹ in Qinghai-Tibet Plateau, the average initial producing times are 225.50 and 163.27 s respectively. There is significant correlation among the initial runoff producing time, the flow rate and the vegetation coverage. The runoff

收稿日期:2016-05-21

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B06)

作者简介:胡林(1986-),男,陕西西乡人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司工程师,西安理工大学工学博士研究生,从事公路环境保护与土壤侵蚀研究。

导师简介:李占斌(1962-),男,河南镇平人,西安理工大学教授,工学博士。

producing stably time under scouring flow rate of $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ advances by about 2 min compared to the scouring flow rate of $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$. The sediment interception effect of vegetation measures mainly embodies in interception of sediment with coarse particles. The slope runoff and sediment yields decrease with the increase of vegetation coverage. The average runoff and sediment interception efficiencies of vegetation measures are 55.7% and 53.5% respectively. The orders of comprehensive protection effects from big to small are three dimensional network seeding with 74% coverage, three dimensional network seeding with 37% coverage, artificial turfing in the middle, artificial turfing at the top, and bare slope. The comprehensive recovery technology of slope vegetation combining turf as frame and three dimensional network seeding is suggested. 4 tabs, 5 figs, 34 refs.

Key words: highway slope; vegetation protection; runoff and sediment yields; protection efficiency; Qinghai-Tibet Plateau

Author resumes: HU Lin(1986-), male, engineer, doctoral student, +86-29-88322888, hulin@nwsuaf.edu.cn; LI Zhan-bin(1962-), male, professor, PhD, +86-29-82312606, zhanbinli@126.com.

0 引言

受气候变化和人类活动影响,青藏高原已经成为中国水土流失较为严重的地区之一。近年来,随着青藏高原公路建设力度的增大,公路建设造成的水土流失问题应当引起高度重视。公路建设会形成大量的裸露边坡,不可避免地要对生态环境和土壤稳定产生影响,在降雨(融雪)及其形成路面汇水以及冻融等因素的作用下,坡面抗侵蚀能力极差,极易发生水土流失,影响生态环境。同时,公路尤其是高等级公路的建设是高原地区土地利用变化的重要因素,而土地利用变化是导致土壤侵蚀加速最为重要的诱因^[1]。伴随绿色公路理念的发展与植被防护等柔性防护在青藏高原冻土路基的广泛应用,对这一地区公路边坡坡面不同植被措施的适应性及坡面产流产沙规律亟需开展相关的研究。

针对公路边坡侵蚀,国内外学者做了许多研究。沈波等研究了黄土公路边坡坡面降雨冲刷侵蚀规律^[2];高德彬等通过降雨试验对黄土区路堑边坡的侵蚀机制进行了分析^[3];骆汉等研究了公路边坡绿化覆盖物水土保持效果^[4];田国行等对3种土壤类型边坡不同防护措施进行了研究,认为不同的生态防护措施对边坡土壤侵蚀影响不同^[5];Jordán-López等在西班牙选择多组路堑边坡、路堤边坡和路面进行人工模拟降雨试验,结果显示道路路面径流系数达到85.9%,土壤侵蚀率最高,路堑边坡径流系数为58.6%,路堤边坡径流系数仅为21.5%^[6];Raya等通过研究发现不同植被类型对土壤侵蚀的影响程度不同^[7]。

由于青藏高原高寒高海拔的特殊气候地理环

境,公路边坡植被防护效果研究鲜有报道,结合大规模公路边坡和植被措施建设的实际,本文选择该地区广泛运用的三维网植草、人工铺草皮等植被防护措施,开展公路边坡野外放水冲刷试验,研究不同植被防护措施下公路边坡的产流产沙特征,并对比了不同措施的防护效益,为青藏高原地区的道路坡面防护建设提供理论基础与科学依据。

1 试验方法与材料

1.1 研究区域概况

试验点位于青海省共和至玉树公路(共玉公路)D5标段,试验边坡位于K687~K689之间,试验中心点坐标为:北纬 $33^{\circ}38'4''$,东经 $97^{\circ}11'30''$,海拔为4380 m。该地区属典型的高原大陆性气候,四季分布特征较不明显,仅有冷暖季节之分,暖季(6~9月)较短,冷季(10~5月)较长。年平均气温为 -5.6°C ~ 3.5°C ,极端最高气温为 28°C ,极端最低气温为 -48°C ,温度年差较小,日差较为悬殊。日照充足,全年日照时间为2300~2900 h。多年平均降水量为438 mm,年际变化大,降水集中在6~9月,雨热同季。土壤类型为高山草甸土、高山灌丛草甸土及沼泽土。高寒条件使得土壤基质形成原始,大多厚度较薄,质地较粗,肥力较低,易被侵蚀,处于年轻发育阶段。试验点土壤为高山草甸土,对试验点边坡覆土的土壤机械组成进行测试,测试结果见表1。根据国际制土壤质地分级标准,土壤类型为粉砂质壤土。

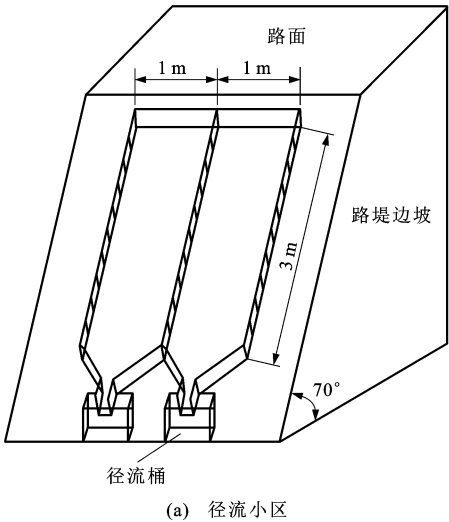
1.2 试验设计

共玉公路路基宽度为24.5 m,设计时速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,试验所选边坡为共玉公路二期工程完成绿化施工的高填方边坡,边坡坡角为 70° ,试验期

表 1 土壤机械组成

Tab. 1 Soil mechanical composition

颗粒直径/mm	占比/%
<0.002	0.42
0.002~0.050	64.82
0.050~0.010	20.37
0.010~0.250	8.35
0.250~0.500	3.35
0.500~1.000	2.21
1.000~2.000	0.48



间无车辆及人为活动扰动。在公路边坡进行冲刷试验,在填方边坡并排修建 2 个 1 m×3 m 的径流小区,径流小区由长度为 2 m、宽度为 45 cm、厚度为 1 mm 的镀锌钢板围成,钢板埋深为 30 cm,地表漏出 15 cm,以保证每个径流小区的水文状况独立,相互不受影响。本试验为野外边坡放水冲刷试验,径流小区与试验装置见图 1。选取裸坡、上部铺草皮、中部铺草皮、37% 盖度三维网植草、74% 盖度三维网植草 5 种边坡防护措施(编号分别为 A~E)进行试验,径流小区特性见表 2。

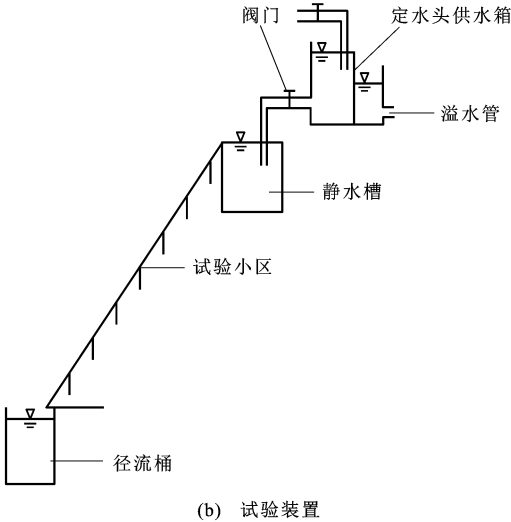


图 1 径流小区与试验装置

Fig. 1 Runoff plot and test equipment

表 2 径流小区特性

Tab. 2 Characteristics of runoff plot

编号	防护措施	含水量/%	容重/(g·cm ⁻³)	盖度/%	边坡修筑成型时间/年	草种	草种生长时间
A	裸坡	25.43	1.01	0	2015		
B	上部铺草皮	28.21	0.96	33	2015	高山嵩草	多年
C	中部铺草皮	28.21	0.96	33	2015	高山嵩草	多年
D	37% 盖度三维网植草	26.11	1.03	37	2014	披碱草	2 年
E	74% 盖度三维网植草	27.21	0.98	74	2014	披碱草	2 年

试验供水流量依据该地区暴雨产流在试验小区产生的单宽流量和前期预试验的结果确定,设计 2 个放水流量 3、8 L·min⁻¹;采用洒水车供水,同时安装流量控制阀保证试验过程中水头和流量稳定,在试验小区顶部设置一个长度为 100 cm、宽度为 20 cm、深度为 20 cm 的水槽,水槽水平放置,与径流小区坡面相平行,使水先经过水槽后漫流进入坡面以保证进入径流小区的初始水流均匀一致;将试验小区分为 3 个断面,每个断面长度为 1 m,用铁丝标记过水断面,在径流小区底部设置径流桶收集径流

泥沙样品。在试验开始阶段先对流量进行率定,每个流量率定 5 次以上以确保放水流量达到试验设计要求。随后进行试验,每种试验重复 2 次并记录产流时间。在试验过程中每 1 min 收集一次出水口处的全部径流泥沙样品,先用锥形瓶收集样品,然后用统一规格的塑料桶采集剩余所有泥沙样品。冲刷 20 min 后关闭供水装置,记录产流停止时间。野外试验时间为 2015 年 8 月,冲刷过程中无降水事件。采用烘干法测定泥沙含量,采用 Malvern MS2000 激光粒度仪测试泥沙样品颗粒组成。

2 初始产流时间

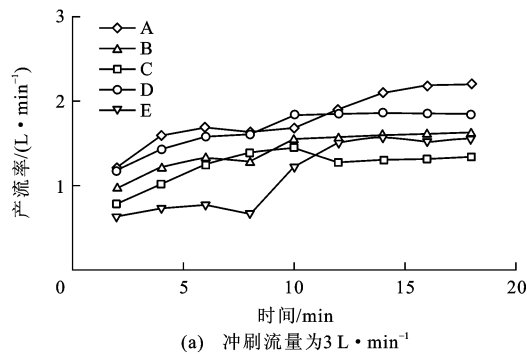
表3为不同防护措施下的初始产流时间。在不同冲刷流量下,初始产流时间从大到小的防护措施排序为E、D、C、B、A,但变化幅度有所差异。在 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,B、C、D、E的初始产流时间较A分别延长了13.39%、30.31%、73.55%、133.22%,在 $8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,B、C、D、E的初始产流时间较A分别延长了27.33%、57.59%、124.23%、218.50%。产流时间越长,说明冲刷开始时土壤入渗能力越强,保水效益相对越大。在 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下的平均初始产流时间分别为225.50、163.27 s,表明冲刷流量影响坡面初始产流时间。将B、C两种防护措施的植被盖度概化为33%与D进行比较,发现相近植被盖度下植被的分布情况会对初始产流时间产生影响。A~E五种植被防护措施下初始产流时间的对比结果表明,植被盖度越大,初始产流时间越长。植被的存在会显著影响坡面流水动力学特性,进而影响坡面侵蚀^[8-10]。

表3 不同防护措施及冲刷流量下的初始产流时间

Tab.3 Initial runoff producing times under different protection measures and scouring flow rates s

编号	流量为 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$	流量为 $8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$
A	150.24	88.00
B	170.35	112.05
C	195.78	138.68
D	260.74	197.32
E	350.39	280.28

通过显著性检验发现,初始产流时间与植被盖度呈显著性差异,应用SPSS 21.0软件对初始产流时间 t 、流量 Q 、植被盖度 c 之间的关系进行拟合,得到拟合方程为 $t=2.62c-12.45Q+167.89$,决定系数为0.87。



3 坡面产流产沙过程

3.1 产流特征

图2为不同防护措施和流量下的产流过程。产流率随着冲刷流量的增加而增加,随着植被盖度的增加而降低。在 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,当冲刷进行到10~12 min时产流基本稳定,稳定状况下A~E对应产流率分别为 2.16 、 1.62 、 1.32 、 1.85 、 $1.55\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,从大到小依次为A、D、B、E、C;但在 $8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,当冲刷进行到8~10 min时产流基本稳定,稳定状况下A、B、C、D、E对应产流率分别为 6.56 、 5.28 、 3.44 、 4.65 、 $3.91\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$,从大到小依次为A、B、D、E、C; $8\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 冲刷流量下的产流稳定时间较 $3\text{ L}\cdot\text{min}^{-1}$ 提前了约2 min。随着植被盖度的增加,产流率逐渐减小,原因是覆盖物增加了坡面的粗糙度,有效减小了坡面径流流速,从而降低了其对坡面土壤的侵蚀力,坡面粗糙度的增加还导致径流在局部范围的湍流和旋流增加^[11-12],使得径流在坡面上滞留的时间更长,从而增加了水分的渗透。比较D、E两个盖度条件后发现,D的稳定产流率大于E,原因在于零散分布的植被的盖度越大,对径流的阻拦作用越大。比较B、C两种植被格局后发现,B的稳定产流率大于C。对于坡中部植草皮的格局来说,坡上部产生的水流被坡中部的植被拦截,此时植被对坡中部及上部的径流都有拦蓄作用;对于坡上部植草皮的格局来说,尽管由于坡顶的植被减少了坡顶径流对裸地的冲刷,但是下部裸地产生的径流没有任何阻拦,植被仅对坡顶有植被的区域产生的径流起拦蓄作用,因此,坡上部植草皮产生的径流多于坡中部植草皮产生的径流。总的来说,植被覆盖能够有效减少径流,增加土壤入渗,从而达到保水的作用,但植被格局和盖度以及冲刷流量的差别使得保水效果不同。

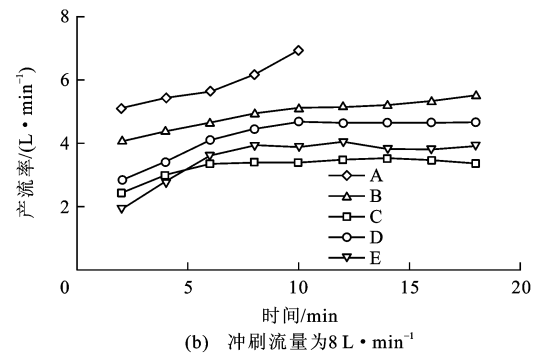


图2 不同防护措施与冲刷流量下的产流过程

Fig.2 Runoff producing processes under different protection measures and scouring flow rates

3.2 产沙特征

图 3 为不同防护措施和流量下的产沙过程。随着冲刷历时的增加,产沙量逐渐减小。裸坡的产沙量要大于其余 4 种措施的产沙量。裸坡产沙过程波动最大,含沙量在 $98.36 \sim 210.92 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间波动,且含沙量始终最大,原因是径流首先选择搬运细微颗粒,随着冲刷时间的延长细微颗粒含量逐渐减小,到冲刷后期土壤大团聚体受到径流侵蚀力剥离作用而剥离分散,土壤大团聚体被剥离的瞬间会有相对较多的泥沙随径流流失,故导致裸坡条件下产沙过程波动最大。在 $8 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,裸坡条件下的试验小区在第 10 min 时被破坏,无法观测到后续现象,其余防护措施下的产沙过程波动较

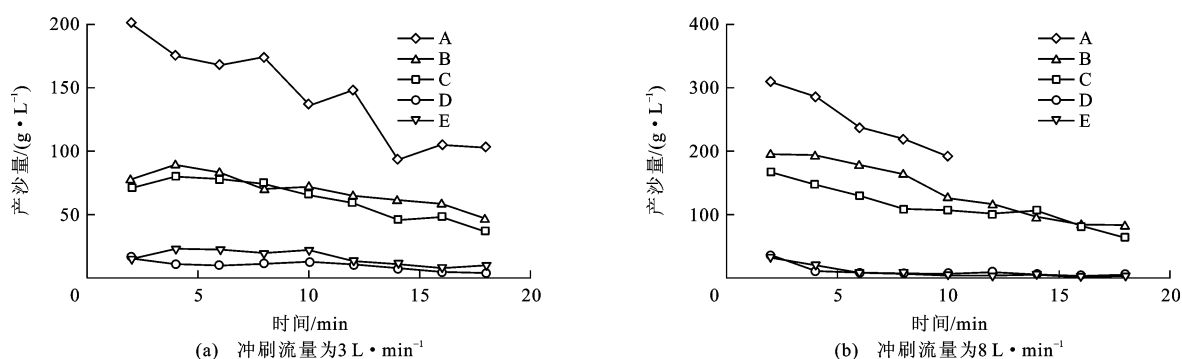


图 3 不同防护措施及冲刷流量下的产沙过程

Fig. 3 Sediment producing processes under different protection measures and scouring flow rates

3.3 泥沙颗粒特征

图 4 为不同防护措施下出流泥沙的中值粒径。在冲刷流量不变的情况下,A~E 对应出流泥沙的中值粒径依次减小,出流泥沙中细颗粒增加,大颗粒减小,表明植被的存在能够有效拦截大颗粒。比较 B、C 两种植被格局后发现,C 的中值粒径比 B 减小了 $6.4\% \sim 11.1\%$,表明草皮位于坡中部的拦沙效果优于草皮位于坡上部;比较 A、D、E 三种不同植被盖度后发现,D 的中值粒径比 A 减小了 $23.2\% \sim$

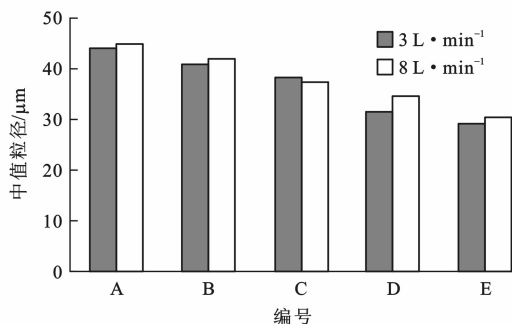


图 4 不同防护措施下出流泥沙的中值粒径

Fig. 4 Median grain sizes of outflow sediment under different protection measures

小,原因是植被的存在能够有效拦截泥沙。比较 B、C 两种植被格局后发现,B 的产沙量基本上始终大于 C 的产沙量,表明中部铺草皮的拦沙效果要好于上部铺草皮。当草皮位于坡上部时,植被仅拦截坡上部产生的泥沙,对坡面其余位置无拦截作用;当草皮位于坡中部时,对坡上部及中部产生的泥沙都有拦截作用,拦沙效果明显,位于坡中部的植被对坡面的减沙作用大于坡上部的植被,且位于坡中部的草皮不但通过自身机械作用阻挡泥沙流失,还可以通过泥沙沉积改变坡面地貌形态,减缓坡度从而减少土壤侵蚀^[13]。总的来说,植被防护措施的使用能够有效减少坡面的土壤侵蚀,水土保持功效十分明显。

28.9%,E 的中值粒径比 A 减小了 $32.2\% \sim 34.2\%$,表明植被盖度越大,泥沙拦截效益越高。土壤颗粒受到径流夹沙力及重力的双重作用向下移动,同时受到植被的拦挡作用力,使部分大颗粒变成小颗粒随水流流失。但总体来说,边坡坡面植被防护措施的拦沙效应主要体现在对粗颗粒泥沙的拦蓄上,大颗粒会被拦截继续留在坡面上,坡面侵蚀量减小,且随着植被的恢复与演替,植被对边坡土壤的控制能力逐渐增强,边坡土壤侵蚀将进一步得到控制。

4 措施防护效率

图 5 为不同防护措施和流量下的累积产流量与累积产沙量。在冲刷过程中,A 措施的累积产流量和累积产沙量的增长较快,增长幅度较大,而 E 措施下累积产流量和累积产沙量的增长最慢,增长幅度最小。总体来说,累积产沙量从大到小依次为 A、B、C、D、E。在 $3 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ 冲刷流量下,A 措施的产流量分别为 B、C、D、E 措施的 1.27、1.46、1.08、1.59 倍;A 措施的产沙量分别为 B、C、D、E 措施的 2.69、3.45、10.72、15.57 倍,表明不同防护措施在

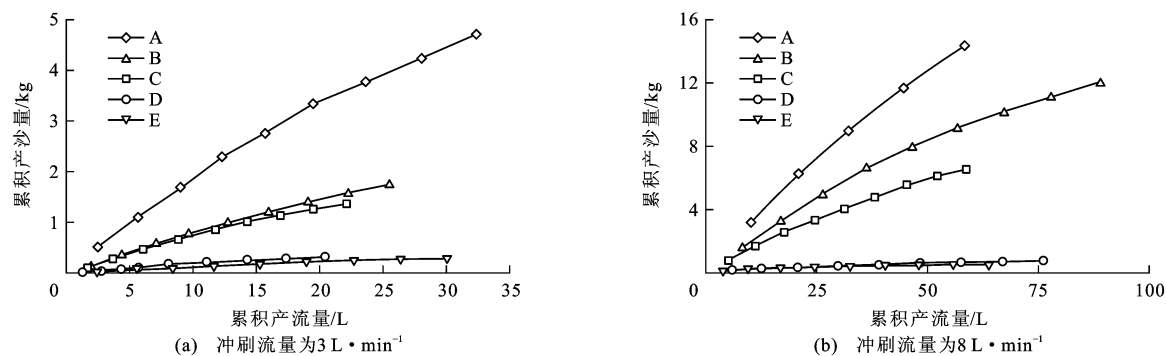


图 5 累积产流量与累积产沙量
Fig. 5 Accumulative runoff yields and accumulative sediment yields

不同植被条件下的减水减沙效果不同。引入拦截径流效率和拦截泥沙效率对不同植被防护措施进行评价,不同防护措施下的拦截效率见表 4。不同流量条件下的减水减沙效益不同,草皮位于坡中部的减水减沙效益要好于草皮位于坡上部,植被盖度越高,减水减沙效益越好。综合防护效果从大到小依次为 E、D、C、B、A,即 74% 盖度三维网植草、37% 盖度三维网植草、中部铺草皮、上部铺草皮与裸坡。

表 4 不同防护措施及冲刷流量下的拦截效率

Tab. 4 Interception efficiencies under different protection measures and scouring flow rates %

编号	拦截径流效率		拦截泥沙效率	
	3 L·min ⁻¹	8 L·min ⁻¹	3 L·min ⁻¹	8 L·min ⁻¹
B	21.11	63.46	15.54	52.26
C	31.39	71.15	23.14	74.91
D	34.72	94.23	27.75	96.86
E	36.94	92.31	39.54	97.91

公路边坡在许多研究区域都是重要的泥沙来源,降雨产流和产沙都很高^[14]。青藏高原地区分布着大量的冻土,冻土区公路的修建不可避免地要破坏地表能量平衡,引起冻土退化,影响公路的稳定性^[15],且青藏高原地区具有冻融频繁的特点^[16],冻融作用使土壤结构和性质发生改变^[17-19],土壤更易成为其他侵蚀类型的侵蚀物质来源^[20]。青藏高原地区冷季气温极低,形成冻土,暖季表层土开始解冻,且暖季多有降雨发生,在降雨及路面径流双重冲刷作用之下边坡坡面发生土壤侵蚀,形成大量的侵蚀沟而发生沟蚀,如此往复,侵蚀沟的发育及冻融作用一方面产生大量的水体流失,另一方面影响公路边坡及道路工程的稳定性^[21]。而在中国其他地区,侵蚀类型往往比较单一^[22]。本文试验所得拦截径流效率和拦截泥沙效率的平均值分别为 55.7%、53.5%,而刘窑军等以三峡库区道路边坡为对象通

过模拟降雨试验研究了土质道路边坡在降雨侵蚀作用下的规律^[23-24],发现草本措施可显著降低道路边坡产流和产沙量,拦截径流效率和拦截泥沙效率分别为 97%、99%,远优于本试验结果。这是因为三峡库区自然条件较青藏高原地区优越,植被生长较好;三峡库区只受到水蚀影响,青藏高原地区侵蚀类型多样,使得土壤侵蚀极易发生,导致边坡植被恢复较为困难。

以植物措施防护为主的边坡侵蚀与植被恢复初期边坡植物盖度有显著的相关性,青藏高原地区以自然或人工植被为主的边坡防护均面临植被恢复初期盖度较差的问题。Bochet 等对 71 组公路边坡进行了调查^[25],发现经过 10 年自然恢复期在坡角大于 45° 的挖方边坡无植被,填方边坡植被盖度达 44%~78%,但以一年生的草本为主,公路路域下经自然恢复从裸露状态演替到草、灌丛植物等复杂群落结构需要的时间更长;马世震等对青藏公路取土场植被恢复进行了研究^[26],因受到高寒高海拔气候的影响,取土场植被恢复期长达 20 年。从这一地区已经开展的坡面植物防护如铺草皮、三维网植草、CF 网等实际防护效果来看,单一植被防护措施往往达不到预期效果,在防护初期极易诱发大量水土流失,产生土壤侵蚀^[27-34]。铺草皮路段上因措施不当而出现草皮死亡,从而失去了坡面防护效果,也造成宝贵草皮资源的极大浪费,因此,基于本文试验结果,针对青藏高原特殊的自然地理条件,结合三维网植草技术的减水减沙能力、草皮根系的固持土壤效果、覆盖措施的保温和促进发芽功能,辅以科学的养护措施,提出草皮骨架边坡植草综合生态防护技术,以块状草皮为骨架,填充公路建设时剥离保存的表土,辅以三维网植草及覆盖措施,并在施工期间进行养护,以期青藏高原地区公路边坡植被恢复提供新的参考。

5 结 语

(1)青藏高原公路边坡初始产流时间 t 与流量 Q 以及植被盖度 c 的关系为 $t = 2.62c - 12.45Q + 167.89$, 决定系数为 0.87。

(2)青藏高原公路边坡坡面植被措施的拦沙效应主要体现在对粗颗粒泥沙的拦蓄上, 边坡产流量和产沙量随植被盖度的增加而减小。

(3)不同铺草皮格局条件下, 草皮位于边坡中部的效果优于草皮位于边坡上部。

(4)综合防护效果从大到小依次为 74% 盖度三维网植草、37% 盖度三维网植草、中部铺草皮、上部铺草皮、裸坡, 结合不同植被措施的边坡防护效率排序提出以草皮为骨架配以三维网植草的边坡植被综合恢复技术。

参 考 文 献 :

References :

- [1] MOHAMMADKHAN S, AHMADI H, JAFARI M. Relationship between soil erosion, slope, parent material, and distance to road (case study: Latian Watershed, Iran)[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2010, 4(1): 331-338.
- [2] 沈 波, 艾翠玲, 徐 岳, 等. 公路路基压实黄土坡面人工降雨侵蚀试验[J]. 长安大学学报: 自然科学版, 2004, 24(6): 11-14.
SHEN Bo, AI Cui-ling, XU Yue, et al. Corrode test of highway impact loess roadbed slope surface with man-made rainfall[J]. *Journal of Chang'an University: Natural Science Edition*, 2004, 24(6): 11-14. (in Chinese)
- [3] 高德彬, 倪万魁, 杨泓全. 高速公路黄土路堑高边坡现场冲刷试验研究[J]. 中外公路, 2007, 27(3): 199-201.
GAO De-bin, NI Wan-kui, YANG Hong-quan. Field scouring test research of high slope in highway loess cutting[J]. *Journal of China and Foreign Highway*, 2007, 27(3): 199-201. (in Chinese)
- [4] 骆 汉, 赵廷宁, 彭贤锋, 等. 公路边坡绿化覆盖物水土保持效果试验研究[J]. 农业工程学报, 2013, 29(5): 63-70.
LUO Han, ZHAO Ting-ning, PENG Xian-feng, et al. Effectiveness of soil and water conservation of greening mulch of roadside slope[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(5): 63-70. (in Chinese)
- [5] 田国行, 杨 春, 杨晓明, 等. 路基边坡草灌植被消减降雨侵蚀作用机理探讨[J]. 中南林业科技大学学报: 自然科学版, 2010, 30(7): 32-37.
TIAN Guo-xing, YANG Chun, YANG Xiao-ming, et al. Discussion on action mechanism that rainfall erosivity R value was decreased by grass-shrub vegetation on subgrade slope[J]. *Journal of Central South University of Forestry and Technology*, 2010, 30(7): 32-37. (in Chinese)
- [6] JORDÁN-LÓPEZ A, MARTÍNEZ-ZAVALA L, BELLINFANTE N. Impact of different parts of unpaved forest roads on runoff and sediment yield in a Mediterranean area[J]. *Science of the Total Environment*, 2009, 407(2): 937-944.
- [7] RAYA A M, ZUAZO V H D, MARTÍNEZ J R F. Soil erosion and runoff response to plant-cover strips on semiarid slopes (SE Spain)[J]. *Land Degradation and Development*, 2006, 17(1): 1-11.
- [8] 田 凯, 李小青, 鲁 帆, 等. 坡面流侵蚀水动力学特性研究综述[J]. 中国水土保持, 2010(4): 44-47.
TIAN Kai, LI Xiao-qing, LU Fan, et al. Summary of hydrodynamic characteristics of overland flow erosion[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2010(4): 44-47. (in Chinese)
- [9] 王协康, 刘同宣, 叶 龙, 等. 坡面柔性植被阻水效应及其局部水头损失特性试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2013, 45(2): 22-27.
WANG Xie-kang, LIU Tong-huan, YE Long, et al. Experimental study on the effects of flexible vegetation on hydraulic characteristics and local head losses of overland flow[J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2013, 45(2): 22-27. (in Chinese)
- [10] 闫旭峰, 周苏芬, 黄 尔, 等. 植被条件下坡面薄层水流动力学特性试验研究[J]. 四川大学学报: 工程科学版, 2012, 44(2): 26-30.
YAN Xu-feng, ZHOU Su-fen, HUANG Er, et al. Experimental study on the effects of vegetation on hydraulic characteristics of overland flow [J]. *Journal of Sichuan University: Engineering Science Edition*, 2012, 44(2): 26-30. (in Chinese)
- [11] RICKSON R J. Controlling sediment at source: an evaluation of erosion control geotextiles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.
- [12] BHATTACHARYYA R, FULLEN M A, BOOTH C A. Using palm-mat geotextiles on an arable soil for water erosion control in the UK[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(7): 933-945.
- [13] 刘纪根, 张昕川, 李 力, 等. 紫色土坡面植被格局对水土流失的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 1-6, 18.
LIU Ji-gen, ZHANG Xin-chuan, LI Li, et al. Effects of vegetation patterns on soil and water loss in purple soil slopeland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28(6): 1-6, 18. (in Chinese)
- [14] XU Xian-li, ZHANG Ke-li, KONG Ya-ping, et al. Effectiveness of erosion control measures along the Qinghai-Tibet Highway, Tibetan Plateau, China[J]. *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, 2006, 11(4): 302-309.
- [15] NELSON F E, ANISIMOV O A, SHIKLOMANOV N I. Climate change and hazard zonation in the circum-Arctic permafrost regions[J]. *Natural Hazards*, 2002, 26(3): 203-225.
- [16] 赵会林, 鲁新蕊, 樊祥船. 西藏地区水土流失现状及防治对策[J]. 中国水土保持科学, 2012, 10(3): 120-122.

- ZHAO Hui-lin, LU Xin-rui, FAN Xiang-chuan. Current situation of soil erosion and its countermeasures in Tibet[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2012, 10(3): 120-122. (in Chinese)
- [17] SAHIN U, ANGIN I, KIZILOGLU F M. Effect of freezing and thawing processes on some physical properties of saline-sodic soils mixed with sewage sludge or fly ash[J]. Soil and Tillage Research, 2008, 99(2): 254-260.
- [18] OZTAS T, FAYETORBAY F. Effect of freezing and thawing processes on soil aggregate stability[J]. Catena, 2003, 52(1): 1-8.
- [19] KVÆRNØ S H, ØYGARDEN L. The influence of freeze-thaw cycles and soil moisture on aggregate stability of three soils in Norway[J]. Catena, 2006, 67(3): 175-182.
- [20] LI Gui-yuan, FAN Hao-ming. Effect of freeze-thaw on water stability of aggregates in a black soil of Northeast China[J]. Pedosphere, 2014, 24(2): 285-290.
- [21] NYSSSEN J, POESEN J, MOEYERSONS J, et al. Impact of road building on gully erosion risk: a case study from the Northern Ethiopian Highlands[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2002, 27(12): 1267-1283.
- [22] 杨勤科. 中国水土保持的迫切性评价与制图[J]. 水土保持学报, 1993, 7(2): 81-88.
- YANG Qin-ke. Evaluation and mapping of soil and water conservation in China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1993, 7(2): 81-88. (in Chinese)
- [23] 刘窑军, 王天巍, 李朝霞, 等. 不同植被防护措施对三峡库区土质道路边坡侵蚀的影响[J]. 应用生态学报, 2012, 23(4): 896-902.
- LIU Yao-jun, WANG Tian-wei, LI Zhao-xia, et al. Effects of different vegetation protection measures on erosion prevention of unpaved roadside slopes in Three Gorges Reservoir Area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(4): 896-902. (in Chinese)
- [24] 刘窑军, 王天巍, 华忠光, 等. 拟降雨试验下3种植被恢复模式对土质道路边坡侵蚀的影响[J]. 水土保持学报, 2014, 28(6): 13-18.
- LIU Yao-jun, WANG Tian-wei, HUA Zhong-guang, et al. Effects of three vegetation restoration modes on unpaved roadside slopes erosion under the rainfall simulation test[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2014, 28(6): 13-18. (in Chinese)
- [25] BOCHET E, GARCÍA-FAYOS P. Factors controlling vegetation establishment and water erosion on motorway slopes in Valencia, Spain[J]. Restoration Ecology, 2004, 12(2): 166-174.
- [26] 马世震, 陈桂琛, 彭敏, 等. 青藏公路取土场高寒草原植被的恢复进程[J]. 中国环境科学, 2004, 24(2): 188-191.
- MA Shi-zhen, CHEN Gui-chen, PENG Min, et al. The alpine steppe vegetation restoration process of fountainhead region of Qinghai-Tibet Highway [J]. China Environmental Science, 2004, 24(2): 188-191. (in Chinese)
- [27] 李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等. 雅鲁藏布江源区土壤侵蚀特征[J]. 生态与农村环境学报, 2010, 26(1): 25-30.
- LI Hai-dong, SHEN Wei-shou, ZOU Chang-xin, et al. Soil erosion in the source area of the Yarlung Zangbo in China[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2010, 26(1): 25-30. (in Chinese)
- [28] 李勇. 高寒牧区公路边坡与退化草地植被恢复治理研究[D]. 雅安: 四川农业大学, 2015.
- LI Yong. Research on vegetation restoration of highway slope and degraded grassland in alpine pastoral area [D]. Yaan: Sichuan Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [29] 邹长新, 沈渭寿, 张慧. 新建青藏铁路施工期土壤侵蚀预测[J]. 水土保持通报, 2003, 23(6): 15-18.
- ZOU Chang-xin, SHEN Wei-shou, ZHANG Hui. Soil erosion prediction for construction of Qinghai-Tibetan Railway[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(6): 15-18. (in Chinese)
- [30] 钱登峰, 庄晓晖, 张博. 高寒区冻融侵蚀类型及驱动力分析[J]. 中国水土保持, 2014(6): 16-17.
- QIAN Deng-feng, ZHUANG Xiao-hui, ZHANG Bo. Analysis on freeze-thaw erosion type in alpine area and driving force[J]. Soil and Water Conservation in China, 2014(6): 16-17. (in Chinese)
- [31] 肖桐, 邵全琴, 孙文义, 等. 三江源高寒草甸典型坡面草地退化特征综合分析[J]. 草地学报, 2013, 21(3): 452-459.
- XIAO Tong, SHAO Quan-qin, SUN Wen-yi, et al. Grassland degradation characteristics of typical alpine meadow slopes in the Three-River Source Region of Qinghai Province[J]. Acta Agrestia Sinica, 2013, 21(3): 452-459. (in Chinese)
- [32] 王钊齐. 江河源区高寒草甸退化序列上放牧侵蚀研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
- WANG Zhao-qi. Research on grazing erosion in alpine meadow degradation sequence in source area of rivers [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012. (in Chinese)
- [33] 陈显春, 董正威, 盛国俊. 山区公路岩质边坡冻融破坏机理及对策研究[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(2): 53-56.
- CHEN Xian-chun, DONG Zheng-wei, SHENG Guo-jun. Research on freezing-thawing damage mechanism and countermeasure of mountainous highway rock slope[J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(2): 53-56. (in Chinese)
- [34] 章玉全, 方显华. SNS在山区公路边坡地质灾害防护中的应用[J]. 筑路机械与施工机械化, 2011, 28(1): 55-58.
- ZHANG Yu-quan, FANG Xian-hua. Application of safety netting system in geological disaster protection of side slope in mountainous areas [J]. Road Machinery and Construction Mechanization, 2011, 28(1): 55-58. (in Chinese)