

文章编号:1671-1637(2016)04-0088-08

径流冲刷对高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀的影响

单永体¹, 胡林^{1,2}, 王琦¹, 陈瑞华¹, 郭文¹

(1. 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; 2. 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)

摘要:为阐明高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀规律,为防治公路边坡水土流失提供理论依据,以青海省共和至玉树公路路基裸露边坡为研究对象,采用野外径流冲刷试验分析了汇流对高寒高海拔地区公路边坡的侵蚀规律与防护策略。分析结果表明:6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下产流时间较3.5 L·min⁻¹流量下产流时间分别提前了23.83、107.63、108.13 s,冲刷流量越大,产流时间越短;3.5、6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下总产沙量分别为14.65、20.42、43.61、32.20 kg,产沙量先增大后减小;累积产流量与累积产沙量的关系满足幂函数形式;冲刷流量与侵蚀产沙量呈显著正相关。可见有效减少路面径流是减少高速公路边坡侵蚀量的关键,配套排水措施应具有迅速将路面汇流汇集排出的功能;高寒高海拔地区边坡防护应减少圪工防护措施,在边坡植被恢复时应采用合理的覆盖措施及固土措施。

关键词:公路边坡;冲刷试验;土壤侵蚀;产流产沙;高寒高海拔

中图分类号:U416.14

文献标志码:A

Impacts of runoff scouring on high-grade highway slope erosion in alpine and high-altitude regions

SHAN Yong-ti¹, HU Lin^{1,2}, WANG Qi¹, CHEN Rui-hua¹, GUO Wen¹

(1. 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; 2. State Key Laboratory Cultivation Base of Eco-Hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, Shaanxi, China)

Abstract: In order to expound the erosion laws on high-grade highway slope in alpine and high-altitude regions and provide theoretical basis for the prevention and treatment of water and soil loss for highway slope, subgrade bare slope of Gonghe-Yushu Highway in Qinghai Province was chosen as research object, field runoff scouring experiments were carried out to analyze the erosion laws of sink flow on high-grade highway slope in alpine and high-altitude regions, and protection strategy was expounded. Analysis result shows that runoff produce times with flow rates of 6.0, 10.0, 14.5 L·min⁻¹ respectively advance by 23.83, 107.63, 108.13 s compared to runoff producing time with flow rate of 3.5 L·min⁻¹. The bigger scouring flow rate is, the shorter runoff producing time is. Total sediment yields with flow rates of 3.5, 6.0, 10.0, 14.5 L·min⁻¹ are 14.65, 20.42, 43.61, 32.20 kg respectively, so the sediment yield first increases then decreases.

收稿日期:2016-05-01

基金项目:国家科技支撑计划项目(2014BAG05B06)

作者简介:单永体(1980-),男,安徽蚌埠人,中交第一公路勘察设计研究院有限公司高级工程师,从事交通环境保护与景观绿化研究。

The relationship between accumulative runoff yield and accumulative sediment yield meets power function form. Scouring flow rate and erosion sediment yield show significant positive correlation. Obviously reducing pavement runoff effectively is the key to decrease highway slope erosion amount, the supporting drainage measures should have the function of collecting and discharging pavement sink flow quickly, masonry protection measures should be reduced in slope protection in alpine and high-altitude regions, and reasonable covering and soil fixing measures should be taken when slope vegetation is in recovery. 3 tabs, 7 figs, 32 refs.

Key words: highway slope; scouring experiment; soil erosion; runoff and sediment yield; alpine and high-altitude

Author resume: SHAN Yong-ti(1980-), male, senior engineer, +86-29-88322888, 27430166@qq.com.

0 引言

土壤侵蚀是世界上最严重的生态环境问题之一^[1-2],高寒高海拔地理条件及气候因素使这类地区公路的建设过程中水土保持面临极大挑战,建设过程中保护措施不当极易诱发大面积的水土流失,引发严重的生态问题^[3]。同时,青藏高原广泛分布多年冻土,国家级自然保护区众多^[4],属典型的高寒生态系统,生态环境脆弱,植被生长缓慢,植被破坏后极难恢复^[5],由于公路建设,大量的填挖方工程使得路域内地表植被遭到破坏,土壤层受到扰动,小气候、土壤条件和植被组成都发生了改变^[6],导致这一地区植被恢复更加困难。程国栋等指出受高寒、干旱、多风等因素限制,植物生长期很短,植被一旦被破坏,恢复十分困难^[7];马世震等通过研究青藏公路取土场高寒草原植被的恢复过程,认为人为破坏影响比较明显,植被的自然恢复需要20年左右的时间^[8];陈济丁等对青藏高原多年冻土地区公路边坡植被生长进行了观测与研究^[9]。伴随绿色公路的发展理念以及以植物防护为主的柔性护坡措施在这一地区的广泛应用,边坡在路面汇流和降水(融雪)冲刷的双重作用下极易产生水土流失,尤其是在公路边坡植被恢复初期,由于植被生长缓慢,公路建设完成后边坡植被恢复措施及施工区的植被恢复面临极大的挑战。伴随高寒高海拔地区高等级公路的建设强度逐年加大,亟需阐明该地区公路边坡侵蚀规律,提出可行的防治坡面水土流失措施。

目前,公路边坡植被恢复措施主要有三维网植草、CF网、铺草皮等^[10],但是在高寒高海拔冻土区,自然环境恶劣,边坡覆土土壤表层松散,土壤结构体缺失,有机质匮乏,植被生长缓慢。在边坡植被恢复初期,根系较浅,降雨冲刷及路面汇水对公路边坡的

冲刷侵蚀作用,边坡保水保土能力极差,是路域水土流失的重要原因,并且影响公路边坡的稳定性。许多学者针对公路边坡冲刷做了大量的研究,刘窑军等将模拟降雨试验和冲刷试验相结合,研究了三峡库区土质道路植被措施与路面汇水对三峡库区土质道路边坡侵蚀特征^[11];张乐涛等对高速公路沿线典型堆积体陡坡进行了野外冲刷试验^[12];江长通等采用放水冲刷试验,分析了黄土边坡冲刷规律^[13]。

由于高寒高海拔地区特殊的气候地理环境,针对该地区的公路边坡产流产沙及侵蚀规律鲜有报道,缺乏总结和一定的基础试验数据,因此,本文在公路边坡进行了野外放水冲刷试验,模拟路面汇水及径流对边坡的冲刷作用,分析边坡产流产沙特征,为开展高寒高海拔地区公路边坡坡面冲刷理论研究提供一定的科研基础,并为高寒高海拔多年冻土区公路边坡植被防护及恢复提供理论依据及技术支撑。

1 试验方法与材料

1.1 研究区概况

试验点位于青海省共和至玉树公路D5标段,试验边坡位于K687~K688之间,试验中心点坐标为北纬33°38'4"、东经97°11'30",海拔为4380 m。该地区属于典型的高原大陆性气候,四季分布特征不明显,仅有冷暖季节之分,暖季(6~9月)短暂,冷季(10~5月)较长。年平均气温为-5.6℃~3.5℃,极端最高气温达28℃,极端最低气温为-48℃,温度年差较小,但日差较为悬殊,太阳辐射强烈,日照充足,全年日照时间达2300~2900 h。年降水量为438 mm,年际变化大,多集中在6~9月,雨热同季。土壤类型主要是高山草甸土、高山灌丛草甸土及沼泽土。受高寒条件影响,土壤基质形成原始,大

多厚度薄、质地粗、肥力低、易侵蚀,处于年轻发育阶段。试验点地质条件为岩土体,以卵砾石为主,沿扎曲河谷布设,大部分路段地下水埋深浅,水草地较发育,地面表层土壤属于强冻胀土,冻胀作用强烈,属于季节性冻土段,在冻融及径流冲刷双重作用下,公路边坡土壤侵蚀极易发生,植被恢复受到了极大的挑战,选取该点进行野外冲刷试验,以期阐明季节性冻土段公路边坡土壤侵蚀规律。试验点土壤为高山草甸土,高山草甸土是高原亚寒带蒿草草甸植被下形成的灰棕色根系盘结的草毡层,粗岩石碎屑与细土物质混杂的土壤,此类土壤由于颗粒结构较为松散,故极易发生土壤侵蚀。对试验点边坡覆土土壤颗粒性质进行测试,结果见表1,土壤密度为 $1.01 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,根据国际制土壤质地分级标准,土壤类型为粉砂质壤土。

表1 试验土壤组成

Tab. 1 Composition of experimental soil

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

1.2 试验设计

共玉公路为高等级公路,路基宽度为 24.5 m,设计时速为 $80 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$,边坡坡角度为 70° ,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,试验期间无车辆及人为活动扰动。边坡防护方式为三维网植草护坡,铺设方式为:先覆土 20 cm,然后铺设三维网,完成后再覆土 10 cm,总厚度为 30 cm,试验时无植物覆盖或出苗,可认定为裸坡。在填方边坡并排修建 2 个 $1 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的径流小区,径流小区由厚度为 1 mm、长度为 2 m、宽度为 45 cm 的镀锌钢板围成,钢板埋深为 30 cm,地表露出 15 cm,保证每个径流小区的水文状况独立,相互不受影响。径流小区见图 1,野外边坡放水冲刷试验装置见图 2。根据当地降水数据,年平均降水量为 262.2~772.8 mm,结合路面汇水情况及破坏流量综合考虑放水流量,共设计 3.5、6.0、10.0、14.5 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$ 共计 4 个放水流量水平。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,与径流小区坡面平行,使水先经水槽稳流、消能后漫流进入坡面,保证进入径流小区的初始水流均匀一致且尽可能使水流在坡面上均匀分散。将小区分成 10 个断面,每个断面长度为 1 m,用铁丝标记过水断面,小区底部设置径流桶,用于收集径流泥沙样品。

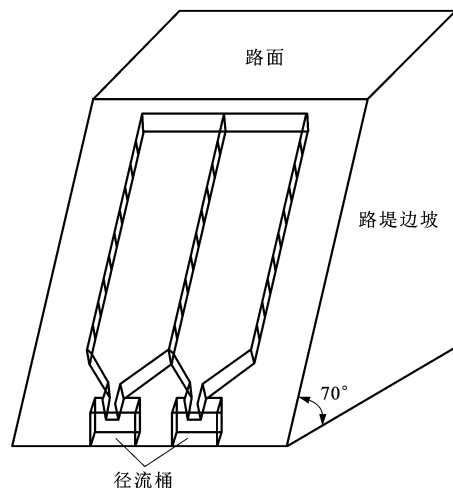


图1 径流小区

Fig. 1 Runoff plot

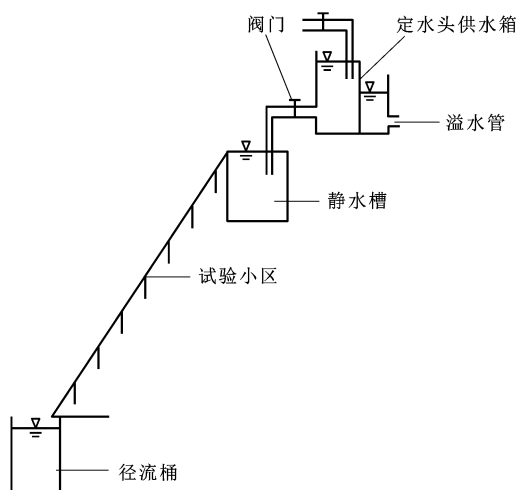


图2 冲刷试验装置

Fig. 2 Equipment of scouring experiment

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,确保放水流量达到试验设计要求;在流量达到试验设计要求后进行试验,记录坡面水流从坡顶到达坡底所经历时间,即产流时间;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,用以记录产沙量,然后用统一规格的塑料桶采集剩余所有样品,以记录产流量;冲刷 20 min 后关闭供水装置,记录产流停止时间。

前一次试验开始前将坡面用齿耙平整,试验结

束后将试验小区覆土耙平,晾晒至含水量与前一次试验小区含水量相同,随后用齿耙平整坡面,以保证每次试验的下垫面条件以及含水量条件相同,以确保相邻2次试验之间不受影响,保证试验结果的客观性。重复试验,相互印证,确保试验的准确性。野外试验时间为2015年6月~2015年7月,冲刷试验过程中无降水事件。

2 产流产沙特征

2.1 不同冲刷流量下产流特征

不同冲刷流量下试验小区的初始产流时间、峰

表2 径流量时间特征

Tab. 2 Time characteristics of runoff yields

冲刷流量/(L·min ⁻¹)	产流时间/s	峰值径流量/(L·min ⁻¹)	峰值径流量出现时间/min	总产流量/L	总产沙量/kg
3.5	203.88	4.44	19	67.87	14.65
6.0	180.05	4.87	10	76.74	20.42
10.0	96.25	9.62	17	162.46	43.61
14.5	95.75	13.41	9	94.53	32.20

图3为不同冲刷流量下产流量随时间的变化。对不同冲刷流量下的产流过程进行分析可知:产流量均先增大而后趋于稳定,在停水后产流量急剧减小。这是因为产流开始后,随着土壤含水量的增加,土壤入渗率降低,故径流量增加,进而趋于稳定;在3.5 L·min⁻¹流量下,产流量最小,产流过程波动较小,6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下产流过程的产流量和波动程度均大于3.5 L·min⁻¹流量。随着放水流量增加,产流量也随之明显增加。3.5、6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下产流量的变异系数分别为19%、20%、12%、7%,属弱变异。

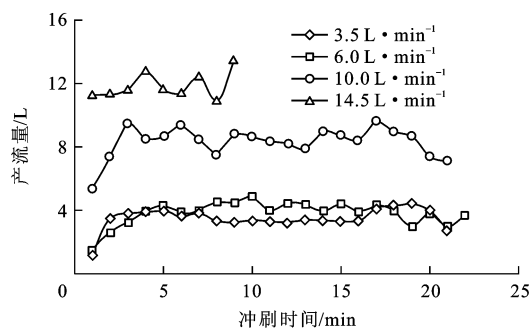


图3 产流量随时间的变化曲线

Fig. 3 Variation curves of runoff yield with time

2.2 不同冲刷流量下含沙量特征

为分析产沙规律的变化,不同冲刷流量下含沙量随时间的变化情况见图4。可以看出:不同冲刷流量下,含沙量均随冲刷时间的延长而逐渐递减,最后达到稳定;3.5、6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下

值径流量及其出现时间见表2。可以看出,随着冲刷流量增加,坡面产流时间提前,峰值径流量、总产流量和总产沙量呈现增加趋势,总体表现出水大沙大的特征;6.0、10.0、14.5 L·min⁻¹流量下产流时间较3.5 L·min⁻¹流量下产流时间分别提前了23.83、107.63、108.13 s。原因在于,冲刷水流进入到坡面之后,径流首先入渗,流量较小时,入渗时间较长;土层湿润后形成径流,随着流量的增加,入渗时间缩短,产流时间相应提前。在满足入渗的同时,多余的水量形成坡面径流。14.5 L·min⁻¹流量下,在第9 min时试验小区被径流冲毁。

侵蚀含沙量分别在第2、4、3、4 min达到峰值,冲刷流量越大,侵蚀量也越大;随着冲刷时间的延长,坡面侵蚀含沙量随之减小,在第10 min之后均趋于稳定。结合高速公路路面紧实、不透水的特点,在降雨量极小的情况下也能形成较大的路面汇流,对边坡产生冲刷作用,从而发生侵蚀,因此,对路面产汇流的调控措施显得尤为重要。

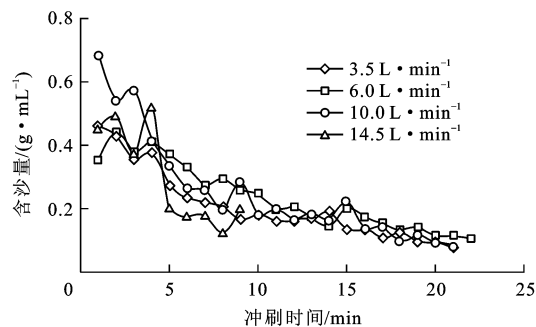


图4 含沙量随时间的变化曲线

Fig. 4 Variation curves of sediment concentration with time

坡面侵蚀输沙过程是一个非饱和和非平衡的输沙过程,在这个过程中产沙量取决于径流侵蚀力的大小和地面物质补给能力,故在坡面侵蚀过程中这两方面因素的相互作用决定了产沙量的变化特征。径流侵蚀力的大小由径流切应力决定,而径流切应力的大小又由径流量和水力坡度决定。在试验中,水力坡度与地面坡度基本一致,故径流切应力的大小只由径流量的大小来决定。地面物质的补给能力主要由土壤本身性质以及泥沙颗粒本身的运动特性来

决定。在试验开始的最初阶段,土壤表面的浮土疏松,在径流侵蚀力的作用下易被径流带走,地面物质补给能力较强,产沙量主要决定于径流侵蚀力大小。随着冲刷试验时间的延长,公路边坡中下部开始出现侵蚀沟。侵蚀沟水流冲刷分散土壤的能力随流量的增加而增大,含沙量也就随流量的增大而不断增大。在侵蚀沟形成后的发展阶段,由于沟槽形成,地面物质补给减少,与径流侵蚀力相比,此时含沙量大小主要受到地面物质补给能力大小的影响。当侵蚀沟发育持续一段时间后,其形态基本接近稳定状态,地面物质补给能力减弱,尽管较大放水流量条件下的径流侵蚀力比较小放水流量下的径流侵蚀力大,但是径流产沙量却变得更小。故减少公路边坡侵蚀产沙,应该从两方面入手:减小边坡的冲刷流量,以降低径流侵蚀力;提升坡面土壤固结能力,以降低坡面物质的供应补给来源。

2.3 累积产流量与累积产沙量

累积产流量和产沙量是指随着瞬时产流量和产沙量在一定时间内的累积值,累积产流量和累积产沙量能反映出试验过程中产流与产沙之间的动态变化规律。图 5、6 分别为不同冲刷流量下累积产流量与产沙量的变化规律。不同冲刷流量下,累积产流量随着时间的延长增加速度平稳,呈直线形变化;累积产流量与冲刷时间之间关系曲线的斜率不同,斜率从大到小对应的流量依次为 14.5、10.0、6.0、3.5 $\text{L} \cdot \text{min}^{-1}$;不同冲刷流量下,累积产沙量随冲刷时间的变化呈凸线形变化,即呈先逐渐增大而后趋于稳定的态势。

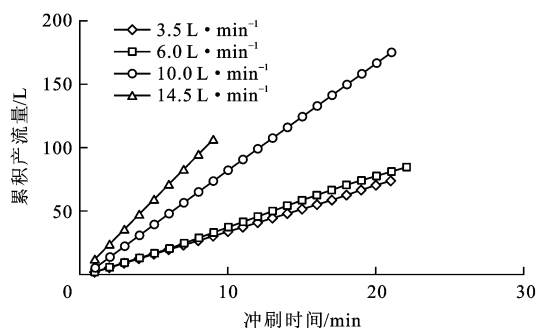


图 5 累积产流量随时间的变化曲线

Fig. 5 Variation curves of accumulative runoff yield with time

对所有冲刷试验的累积产流量与累积产沙量进行函数拟合,发现累积产流量与累积产沙量的关系均满足函数 $y = Ax^B$ 形式,因变量 y 为累积产沙量,自变量 x 为累积产流量, A 、 B 为系数,拟合关系式见表 3,拟合优度均在 0.97 以上。图 7 为基于实测值的不同冲刷流量下累积产沙量与累积产流量之间

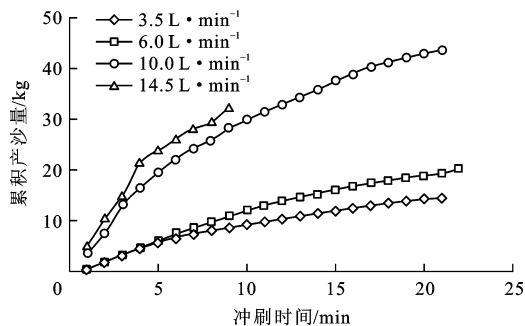


图 6 累积产沙量随时间的变化曲线

Fig. 6 Variation curves of accumulative sediment yield with time 的关系曲线。可见,累积产沙量随着累积产流量的增加而增加,呈幂函数正相关关系。根据数学概念以及坡面产流产沙的基本概念,定义系数 A 为产沙基准系数,表征了该流量下产沙的能力,取决于边坡覆土的土壤性状;定义系数 B 为产沙速率,取决于径流侵蚀力的大小。

表 3 累积产沙量与累积产流量的函数关系

Tab. 3 Functional relationships between accumulative sediment yield and accumulative runoff yield

冲刷流量/ $(\text{L} \cdot \text{min}^{-1})$	函数关系	拟合优度
3.5	$y = 0.73x^{0.74}$	0.98
6.0	$y = 0.59x^{0.84}$	0.98
10.0	$y = 1.78x^{0.65}$	0.98
14.5	$y = 1.04x^{0.78}$	0.97

3 边坡侵蚀控制与植物防护减蚀

3.1 公路边坡侵蚀控制策略

公路为带状建筑物,会对周边环境产生扰动,改变地形地貌和流域水文过程。Jones 等通过研究表明占国土面积 1% 的道路影响区域面积可达到 25%^[14]。公路路面一般都是经过筑路材料处理的硬化路面,土壤的自然结构发生改变,植被覆盖度为零,集流能力显著增强,降水-径流转化率高,产流能力远大于自然地面,小强度短历时的降水就可能形成较大径流,形成冲刷,造成侵蚀^[15-16]。

公路边坡侵蚀驱动力主要为降雨和路面汇水。通过冲刷试验,从坡面防护角度而言,减少公路边坡侵蚀产沙的主要策略为减小边坡的冲刷流量以降低径流侵蚀力,提升坡面土壤固结能力以降低坡面物质的供应补给来源,工程实践中可以通过排水系统和合理的边坡防护形式加以实现。

公路排水系统会改变径流流动方式^[17],诱发大量的水土资源流失^[18],影响公路边坡稳定性。路面汇水以及降雨径流的调控措施直接影响到公路边坡

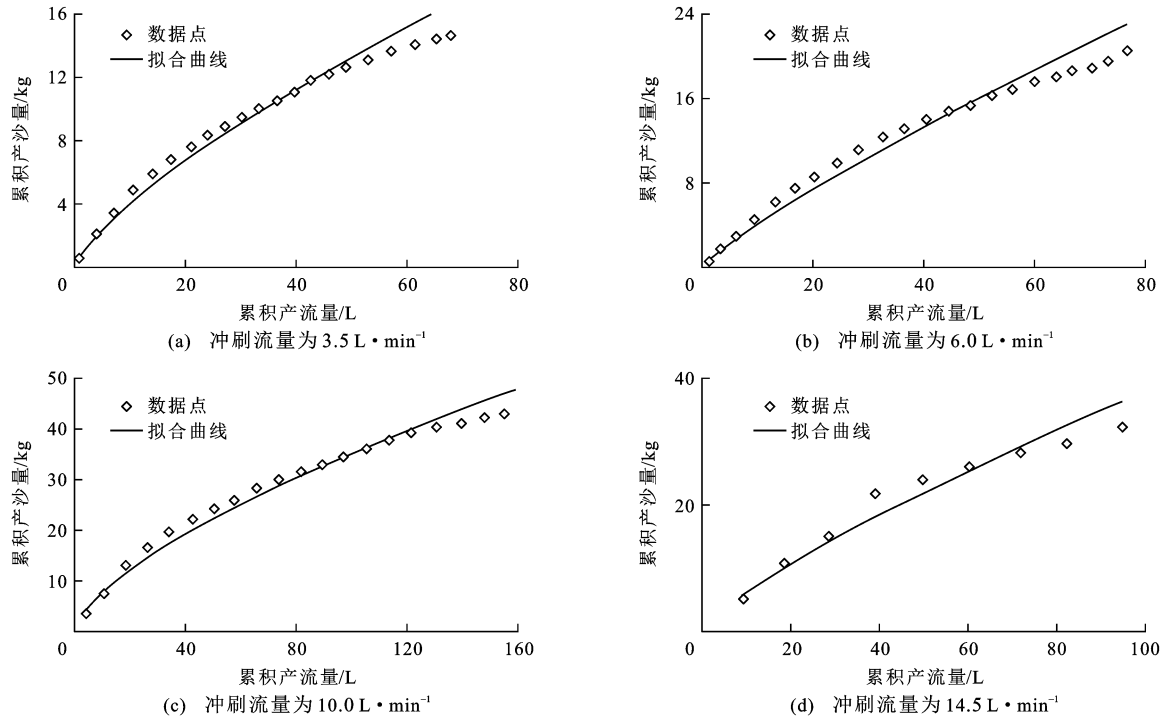


图7 累积产沙量与累积产流量的关系曲线

Fig. 7 Relationship curves between accumulative sediment yield and accumulative runoff yield

的侵蚀发展,配套排水措施应具有将路面汇水以及降雨径流迅速汇集排出的功能,形成公路综合排水系统,避免对公路边坡产生冲刷。

道路建设过程中形成大量的裸露边坡和路面,边坡坡度大,持水能力差,种子很难在坡面固定和萌发。在高寒高海拔地区,土壤肥力极低,在公路修建过程中,表土频繁搬运,土壤养分含量非常低,植被自然恢复极其困难,土壤侵蚀严重,土壤结构疏松,抗侵蚀能力差,在降雨及路面汇水的影响下,容易造成土壤侵蚀^[19-20]。故在对公路进行边坡覆土时,应控制其土壤容重,提高土壤的抗冲性^[21],减少土壤侵蚀,并且严格控制路面汇水通过沟渠和涵洞以集中水流方式对边坡产生的冲刷,并减少圪工防护措施。

3.2 高寒地区公路植物防护减蚀分析

在高寒高海拔地区,由于冻土路基的存在使得圪工防护极易发生破坏,目前,越来越多的公路边坡采用了以植物措施为主的综合防护措施,从该地区广泛开展的公路边坡植被恢复措施及效果看,植物措施成败的关键在于施工期以及恢复初期的侵蚀调控,建议在减少圪工防护的同时,在边坡植被恢复时采用合理的覆盖措施及固土措施可以有效保障植被恢复效果,采用草帘、CF网等措施进行覆盖,采用三维网或草皮骨架进行固土,可以降低降雨消能和降低路

面汇水对边坡的冲刷侵蚀,草帘、CF网腐烂后可以增加土壤肥力,改良土壤性质,给植被在坡面的生长和发展提供了一个较为稳定的环境^[22],有助于植被的生长。

对于侵蚀泥沙来源控制而言,植被控制可以有效实现这一目标,原因是植被能够起到截阻径流,增加土壤入渗,固结土层,防止土壤结皮。但在植被的不同生长发育时期,土壤侵蚀的强度有所不同,随着植被的生长发育,对边坡侵蚀的控制能力逐渐加强,侵蚀量随时间的推移逐渐降低,但在植物生长初期,不可避免地发生土壤侵蚀^[23-32]。高寒高海拔地区自然环境恶劣,植被生长极其缓慢,恢复期长达20多年,而在降雨及路面汇水的双重冲刷作用下,土壤侵蚀极易发生,造成边坡覆土养分和土壤的极大流失,使植被无法生长,边坡植被恢复措施徒劳无功,所以公路边坡植被恢复时采用植被覆盖措施,而植被覆盖措施的选择需要考虑到边坡稳定性,并满足降雨消能、截留和增加土壤入渗能力的要求。

公路边坡土壤侵蚀是一个复杂的物理过程,受制于高原地区缺氧环境及公路建设现实试验条件和体力等因素,本文仅对单一坡度的公路边坡开展了冲刷试验,在后续研究中,需重点开展不同容重、不同坡度坡长和不同植被格局等条件的试验,以期进一步揭示高寒高海拔地区高等级公路

边坡侵蚀规律。

4 结 语

(1)冲刷流量越大,产流时间越早,峰值径流量越大,产流量与产沙量便越大,表现出水大沙大的特征。随着放水流量增加,产流量也随之明显增加。产沙量先增大后减小,产沙过程剧烈。

(2)累积产流量与累积产沙量的关系满足幂函数形式。当冲刷流量增大时,侵蚀产沙量也随之增大。在高寒高海拔地区,控制施工完成初期边坡侵蚀是植物恢复措施成败的关键,建议在减少圪工防护措施的同时,在边坡植被恢复时采用合理的覆盖措施及固土措施。

参考文献:

References:

- [1] WU Shu-fang, WU Pu-te, FENG Hao, et al. Effects of alfalfa coverage on runoff, erosion and hydraulic characteristics of overland flow on loess slope plots[J]. *Frontiers of Environmental Science and Engineering in China*, 2011, 5(1): 76-83.
- [2] SHI X Z, WANG K, WARNER E D, et al. Relationship between soil erosion and distance to roadways in undeveloped areas of China[J]. *Catena*, 2008, 72(2): 305-313.
- [3] 刘春霞,韩烈保. 高速公路边坡植被恢复研究进展[J]. *生态学报*, 2007, 27(5): 2090-2098.
LIU Chun-xia, HAN Lie-bao. Review of researches in vegetation restoration of freeway slopes[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2007, 27(5): 2090-2098. (in Chinese)
- [4] 吴青柏,牛富俊. 青藏高原多年冻土变化与工程稳定性[J]. *科学通报*, 2013, 58(2): 115-130.
WU Qing-bai, NIU Fu-jun. Permafrost changes and engineering stability in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2013, 58(2): 115-130. (in Chinese)
- [5] 王根绪,李元首,吴青柏,等. 青藏高原冻土区冻土与植被的关系及其对高寒生态系统的影响[J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2006, 36(8): 743-754.
WANG Gen-xu, LI Yuan-shou, WU Qing-bai, et al. The relationship between frozen soil and vegetation in permafrost regions of Qinghai-Tibet Plateau and its impact on the alpine ecosystem[J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 2006, 36(8): 743-754. (in Chinese)
- [6] COFFIN A W. From roadkill to road ecology: a review of the ecological effects of roads[J]. *Journal of Transport Geography*, 2007, 15(5): 396-406.
- [7] 程国栋,马巍. 青藏铁路建设中冻土工程问题[J]. *自然杂志*, 2006, 28(6): 315-320.
CHENG Guo-dong, MA Wei. Frozen soil engineering problems in construction of the Qinghai-Tibet Railway[J]. *Chinese Journal of Nature*, 2006, 28(6): 315-320. (in Chinese)
- [8] 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)
- [9] 陈济丁,孔亚平,何子文. 青藏高原多年冻土地区公路边坡植被生长的观测与研究[J]. *冰川冻土*, 2008, 30(4): 704-709.
CHEN Ji-ding, KONG Ya-ping, HE Zi-wen. Observation and research of artificial vegetation growth on roadside slopes in the permafrost regions of Tibetan Plateau[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2008, 30(4): 704-709. (in Chinese)
- [10] 程晔,方靓,赵俊锋,等. 高速公路边坡 CF 网防护抗冲刷室内模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2010, 29(增 1): 2935-2942.
CHENG Ye, FANG Liang, ZHAO Jun-feng, et al. Indoor scour model test of expressway slope ecology protection using coconut fibre nets[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2010, 29(S1): 2935-2942. (in Chinese)
- [11] 刘窑军,王天巍,蔡崇法,等. 植被措施与路面汇水对三峡库区土质道路边坡侵蚀影响[J]. *水科学进展*, 2014, 25(1): 98-105.
LIU Yao-jun, WANG Tian-wei, CAI Chong-fa, et al. Impacts of vegetation and pavement runoff concentration on rural roadside slope erosions in Three Gorge Reservoir area[J]. *Advance in Water Science*, 2014, 25(1): 98-105. (in Chinese)
- [12] 张乐涛,高照良,李永红,等. 模拟径流条件下工程堆积体陡坡土壤侵蚀过程[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(8): 145-153.
ZHANG Le-tao, GAO Zhao-liang, LI Yong-hong, et al. Soil erosion process of engineering accumulation in steep slope under simulated runoff conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(8): 145-153. (in Chinese)
- [13] 江长通,王银梅,胡乾亮,等. 黄土边坡冲刷过程及影响因素分析[J]. *水土保持学报*, 2015, 29(4): 14-17, 47.
JIANG Chang-tong, WANG Yin-mei, HU Qian-liang, et al. Analysis of erosion process of loess slope and its influencing factors[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2015, 29(4): 14-17, 47. (in Chinese)
- [14] JONES J A, SWANSON F J, WEMPLE B C. Effects of roads on hydrology, geomorphology, and disturbance patches in stream networks[J]. *Conservation Biology*, 2000, 14(1): 76-85.
- [15] WEMPLE B C, SWANSON F J, JONES J A. Forest roads and geomorphic process intersections, Cascade Range, Oregon[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2001, 26(2): 191-204.
- [16] LUCE C H, BLACK T A. Sediment production from forest roads in western Oregon[J]. *Water Resources Research*, 1999, 35(8): 2561-2570.
- [17] CROKE J, MOCKLER S. Gully initiation and road-to-stream

- linkage in a forested catchment, southeastern Australia[J]. *Earth Surface Process and Landforms*, 2001, 26(2): 205-217.
- [18] 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.
- [19] 刘小勇,吴普特. 硬地面侵蚀产沙模拟试验研究[J]. *水土保持学报*, 2000, 14(1): 33-37.
- LIU Xiao-yong, WU Pu-te. Simulated study on erosion and sediment yield on hard ground surface[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2000, 14(1): 33-37. (in Chinese)
- [20] 蒲玉琳,谢德体,林超文,等. 植物篱-农作模式坡耕地土壤综合抗蚀性特征[J]. *农业工程学报*, 2013, 29(18): 125-135.
- PU Yu-lin, XIE De-ti, LIN Chao-wen, et al. Characteristics of soil comprehensive anti-erodibility under sloped cropland with hedgerows[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(18): 125-135. (in Chinese)
- [21] FORMAN R T T, ALEXANDER L E. Roads and their major ecological effects[J]. *Annual Review of Ecology Evolution and Systematics*, 1998, 29(4): 207-231.
- [22] SMETS T, POESEN J, BHATTACHARYYA R, et al. Evaluation of biological geotextiles for reducing runoff and soil loss under various environmental conditions using laboratory and field plot data[J]. *Land Degradation and Development*, 2011, 22(5): 480-494.
- [23] BOCHET E, GARCÍA-FAYOS P, TORMO J. How can we control erosion of roadslopes in semiarid Mediterranean areas? Soil improvement and native plant establishment[J]. *Land Degradation and Development*, 2010, 21(2): 110-121.
- [24] ZHOU Zheng-chao, SHANGGUAN Zhou-ping. Effect of ryegrasses on soil runoff and sediment control[J]. *Pedosphere*, 2008, 18(1): 131-136.
- [25] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P, ZHAO D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau Area of China[J]. *Ecological Modelling*, 2006, 198(1/2): 263-268.
- [26] 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)
- [27] 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)
- [28] 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)
- [29] 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)
- [30] 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)
- [31] 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)
- [32] 魏卫东,李希来. 三江源区高寒草甸退化草地土壤侵蚀模型与模拟研究[J]. *环境科学与管理*, 2013, 38(7): 26-30.
- WEI Wei-dong, LI Xi-lai. Soil erosion model and simulation of degraded grassland of alpine meadow in Sanjiangyuan Region[J]. *Environmental Science and Management*, 2013, 38(7): 26-30. (in Chinese)