

青藏公路都兰—格尔木段边坡侵蚀沟调查

郭小雪¹, 田鹏², 刘文民¹, 韩剑桥^{1,3}, 赵广举^{1,3}

(1.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 2.西北农林科技大学
资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100)

摘要:为了探究高寒地区道路边坡沟谷侵蚀特征及其影响因子,以青藏公路都兰至格尔木段为研究对象,通过野外实地测量获取 16 个 60 m 样区公路边坡侵蚀沟的沟长、沟宽、沟深等数据,分析了侵蚀沟密度、深度、细沟体积等空间分布特征。结果表明:(1)细沟体积、平均深度、最大深度在空间上呈现出相似的规律,在靠近格尔木的 S2711—S2595 样区 3 个指标数值均较大,中间部分 S2575—S2465 样区数值均较小,靠近都兰的 S2437—S2395 样区 3 个指标数值呈现出逐渐上升的趋势。(2)通过系统聚类分析将 16 个样区分为了两大类,第一类样区包括格尔木至都兰沿线中间路段的 8 个样区,为弱侵蚀路段;第二类样区包括靠近格尔木的 6 个样区和靠近都兰的 2 个样区,为强烈侵蚀路段。(3)分析样区侵蚀沟指标与其影响因子的相关性,发现研究区公路边坡细沟侵蚀与降雨强度具有一定的相关性,降雨强度越大,产生的细沟侵蚀量越高。根据高寒地区公路边坡侵蚀特点,提出从降低边坡坡度、完善坡面排水、开展坡面防护 3 个方面对边坡进行防护。

关键词:道路边坡; 细沟侵蚀; 影响因子; 青藏公路

中图分类号:S157

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)04-0042-06

Assessing Eroded Gully on Embankment of Highway in Dulan-Geermu Section of Qinghai-Tibet

GUO Xiaoxue¹, TIAN Peng², LIU Wenmin¹, HAN Jianqiao^{1,3}, ZHAO Guangju^{1,3}

(1.*Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 2.*College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*; 3.*Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: In order to probe into the spatial features of gullies along the highway and the influence factors in alpine and high-altitude regions, the 16 samples of Qinghai-Tibet highway from Dulan to Geermu were selected as research objects. For each segment, the gully length, density and depth were measured for each segment with 60 m. The spatial variations of these variables were analyzed to understand the changes in the characteristics of the gullies along the highway. (1) Gully volume, average depth and maximum depth showed similar spatial pattern. The values of the three indicators in the S2711 to S2595 samples near Geermu were relatively large, the values of the middle part of S2575 to S2465 samples were relatively small, an upward trends were detected among S2437 to S2395 samples near Dulan. (2) The 16 samples were divided into two categories by clustering analysis. The first category included 8 samples along the middle road from Geermu to Dulan, which were weakly eroded sections. The second category included 6 samples near Geermu and 2 samples near Dulan, which were highly eroded sections. (3) The correlation analysis was undertaken between eroded gully indices and the influence factors in the study area. The results showed that a good correlation existed between volume of eroded gully and rainfall intensity. The higher the rainfall intensity was, more gully erosion yielded. According to the characteristics of erosion on slope of highway in alpine region, three conservation measures such as reducing slope, improving drainage and conserving the embankment of the highway are proposed.

收稿日期:2020-07-27

修回日期:2020-08-09

资助项目:中国科学院 A 类战略性先导科技专项“泛第三极环境变化与绿色丝绸之路建设”(XDA20040202)

第一作者:郭小雪(1996—),女,山西大同人,硕士研究生,研究方向为土壤侵蚀与水土保持。E-mail:nwafugxx@163.com

通信作者:田鹏(1982—),女,黑龙江佳木斯人,博士,副教授,主要从事流域水文过程研究。E-mail:pengtian@nwsuaf.edu.cn

Keywords: embankment; rill erosion; influencing factors; Qinghai-Tibet highway

青藏公路东起青海省省会西宁,西经格尔木,向南至西藏自治区首府拉萨,是我国G109国道的重要组成部分,全长约1 937 km。其中格尔木至都兰段是青藏公路青海湖以西路段,是连接西宁与青海中西部地区的重要通道。青藏公路对于开发柴达木盆地资源、推动沿线城镇化进程和旅游业发展、支撑青海省社会和谐发展具有非常重要的作用^[1]。然而,受青藏高原高寒气候影响,公路边坡长期受到冻融、风蚀影响,加之降雨冲刷,形成大量的侵蚀沟,其发生发展影响路基的稳定性,导致道路破坏,威胁交通安全^[2]。

目前国内的众多学者在南方红壤区、季节性冰冻地区,尤其是黄土高原地区的公路边坡侵蚀开展了大量的研究^[3-6]。钟立昌等^[3]通过分析降雨对自然边坡破坏的机理,结合黄土地区公路边坡侵蚀特点分析了侵蚀的原因,提出防治黄土公路边坡降雨侵蚀的对策。严超群等^[5]针对黄土地区公路边坡普遍受降雨侵蚀灾害的情况,分析其破坏机理,提出易损性评价方法。大部分研究基于人工降雨试验,缺少自然条件下道路侵蚀规律的研究^[7]。张洪江等^[8]通过野外布设试验小区,采用人工模拟降雨试验的方法研究不同降雨及不同防护措施条件下边坡侵蚀沟的发生、发展规律。部分学者对路堤边坡开展冲刷试验,评估道路边坡的稳定性^[9-10]。单永体等^[9]通过野外放水冲刷试验,研究了高寒高海拔地区公路边坡产流产沙的特征,总结了边坡侵蚀规律与防治策略。相比我国其他区域,青藏高原的公路边坡侵蚀研究相对薄弱^[11],本文选择青藏高原都兰至格尔木段公路作为研究区段,通过野外实地调查,分析公路边坡细沟侵蚀特征,探讨自然条件下形成公路边坡侵蚀沟的原因,提出针对青藏地区公路边坡侵蚀的防治对策。

1 研究区概况

青藏公路都兰至格尔木段,位于青海省格尔木市和都兰县境内^[12],全长约353 km,海拔2 780~3 276 m。研究路段属高原大陆性气候,冬季寒冷漫长,夏季凉爽短暂^[13],年均气温为4.7℃。气候干旱,降雨量少,蒸发量大,降雨多集中在6—8月份,多年平均降雨量42.4 mm,多年平均蒸发量1 495 mm^[14-15]。地貌类型以山前平原为主,还包括带状河谷、风积沙丘两种地貌类型。研究路段沿线土壤类型主要分为灰棕漠土、棕钙土、风沙土,灰棕漠土。受气候因素影响,研究路段植被类型变化较大,沿线主要以无植被覆盖的裸露戈壁区域为主^[12],有植被覆盖路段的植被类型主要有小半灌木荒漠、灌木荒漠、盐生草甸等^[16-17]。

2 数据来源与研究方法

2.1 侵蚀沟测量及计算

道路边坡侵蚀沟调查于2019年7月末开展,以青海省格尔木市G109国道公路桩号2711(S2711)为起点,每隔20 km选取60 m的样方,至公路桩号2395(S2395),共16个样区(图1)。实地考察测量公路边坡侵蚀沟特征,见图2。主要测量并记录侵蚀沟的深度、宽度、坡度等侵蚀沟的基本属性特征。在实地测量时,考虑到细沟断面的不规则性,为了便于计算,所有细沟断面均按矩形断面考虑。用GPS工具测量每个样区坡面的坡度,用皮尺沿细沟中心线测量细沟沟长,以通过中心线垂直地表的深度作为细沟深,以水平垂直中心线的宽度作为细沟宽。以此方法分别测量每条细沟的上部、中部、下部的深度与宽度,计算出每条细沟密度、平均深度及细沟体积^[18-19]。S2465由于边坡采用六棱砖防护措施并没有发生沟蚀,所以该样区没有测量数据(第13个样区,图1灰色样点所示)。

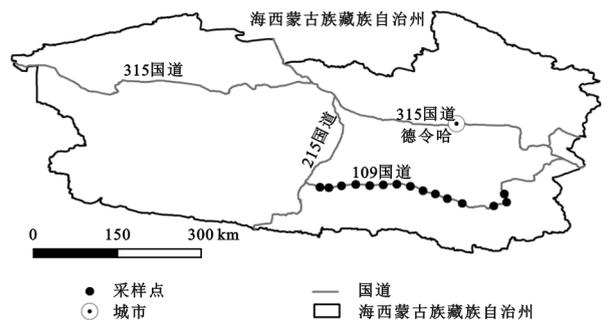


图1 研究区地理位置及采样点

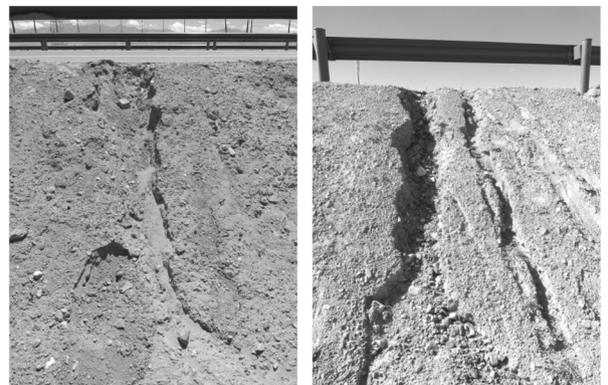


图2 侵蚀沟形态特征

细沟密度(D)指每个样区(60 m)内细沟的总条数与样区长度的比值,计算公式如下:

$$D = \frac{n}{l} \quad (1)$$

式中: n 为每个样区内细沟的总条数; l 为每个样区的长度。

细沟平均深度(H)采用每个样区内所有细沟深度的加权平均值,其表达式为:

$$H = \frac{\sum_{i=1}^n h_i A_i}{\sum_{i=1}^n A_i} \quad (2)$$

式中: A_i 为样区内所有细沟的平面面积,其对应的细沟深度为 h_i , $i=1,2,3,\dots,n$; i 为自然数; n 为样区内所有细沟的总条数。

细沟体积(R_{vi})采用每条细沟的平均宽度(R_{wi})、平均深度(R_{hi})和细沟长度(R_l)的乘积,计算公式如下:

$$R_{vi} = R_{wi} \cdot R_{hi} \cdot R_l \quad (3)$$

每个样区内的细沟体积为所有细沟体积的加和,即

$$R_v = \sum_{i=1}^n R_{vi} \quad (4)$$

式中: R_v 为每个样区内所有细沟体积之和; R_{vi} 为样区内

每条细沟的体积; n 为每个样区内细沟的总条数。

2.2 数据来源

所选取的遥感数据为美国陆地卫星 Landsat8 OLI 遥感影像,空间分辨率为 30 m,影像过境时间为研究区植被生长期 2019 年 7 月,云量覆盖率小于 10%。利用 ENVI 5.1 遥感软件对遥感影像进行预处理,包括裁剪、辐射定标、大气校正和波段计算后在 ArcGIS 中提取每个采样点的 NDVI 值。DEM 数据来源于美国国家航空航天局(NASA),分辨率为 30 m。根据研究区域的地理位置,选取沿线附近的大柴旦、德令哈、刚察、格尔木和诺木洪 5 个具有代表性的雨量站 1957—2015 年的日降雨量数据(来源于国家气象局)。计算得到多年平均降雨量、降水集中指数(PCI),并在 ArcGIS 中使用 Kriging 空间插值方法得到每个采样点的降雨量和 PCI(表 1)。

表 1 采样点数据信息

| 样方位置 | 细沟密度/ (条·m ⁻¹) | 平均 深度/cm | 最大 深度/cm | 细沟 体积/cm ³ | 坡度/ (°) | NDVI | 海拔/m | 降雨量/ mm | PCI |
|-------|-------------------------------|-------------|-------------|--------------------------|------------|------|------|------------|------|
| S2711 | 0.56 | 6.47 | 20.67 | 2.14 | 31 | 0.06 | 2909 | 44.03 | 2.90 |
| S2695 | 0.42 | 14.93 | 29.67 | 4.49 | 33 | 0.05 | 2983 | 45.10 | 2.88 |
| S2676 | 0.18 | 35.07 | 47.00 | 14.74 | 27 | 0.05 | 2850 | 47.32 | 2.85 |
| S2656 | 0.12 | 23.68 | 32.00 | 3.25 | 33 | 0.07 | 2858 | 50.46 | 2.79 |
| S2635 | 0.13 | 11.33 | 15.33 | 0.95 | 25 | 0.06 | 2864 | 54.31 | 2.73 |
| S2615 | 0.17 | 20.47 | 28.33 | 3.97 | 28 | 0.07 | 2779 | 58.71 | 2.66 |
| S2595 | 0.57 | 12.28 | 25.00 | 4.13 | 27 | 0.06 | 2863 | 69.96 | 2.48 |
| S2575 | 0.13 | 7.09 | 10.00 | 0.24 | 38 | 0.06 | 2801 | 85.45 | 2.23 |
| S2555 | 0.50 | 6.88 | 12.00 | 0.76 | 33 | 0.05 | 2807 | 101.41 | 1.97 |
| S2535 | 0.25 | 7.96 | 11.00 | 0.82 | 23 | 0.05 | 2869 | 117.02 | 1.73 |
| S2515 | 0.33 | 7.58 | 9.67 | 0.86 | 30 | 0.06 | 2907 | 131.94 | 1.49 |
| S2495 | 0.32 | 4.46 | 8.00 | 0.30 | 30 | 0.06 | 2960 | 149.86 | 1.20 |
| S2437 | 0.23 | 6.90 | 10.33 | 0.92 | 31 | 0.24 | 3138 | 182.76 | 0.68 |
| S2415 | 0.32 | 9.88 | 23.00 | 1.41 | 32 | 0.33 | 3491 | 188.56 | 0.59 |
| S2395 | 0.13 | 11.54 | 18.33 | 1.37 | 29 | 0.19 | 3271 | 190.35 | 0.56 |

2.3 系统聚类分析

系统聚类法是目前最常用的一种聚类方法,也称为层次聚类法。该方法首先将 n 个样本各自看成一类,并规定样本与样本之间的距离和类与类之间的距离是相等的,然后选择距离最小的两类并成一个新类,重新计算新类和其他类之间的距离,再将距离最近的两类进行合并,直至所有的样本都成一类为止^[20]。

2.4 相关性分析

采用皮尔逊相关系数法度量细沟体积与各影响因素之间的相关性程度。相关系数 r ($-1 < r < 1$) 的大小可以用来判断两个变量之间的线性相关性大小,两组变量 $X = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$ 和 $Y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 之间相关系数的计算公式为:

$$r_{xy} = \frac{n \sum XY - \sum X \sum Y}{\sqrt{[n \sum X^2 - (\sum X)^2] [n \sum Y^2 - (\sum Y)^2]}} \quad (5)$$

式中:相关性系数 r 的范围为 $-1 \sim 1$,若 $r > 0$,则 X, Y 呈正相关;反之; X, Y 呈负相关。 $|r|$ 大小表示两个变量间线性相关程度; $|r|$ 越大表示变量间相关性越强。

3 结果与分析

3.1 格尔木至都兰段边坡侵蚀沟特征

分析格尔木至都兰 16 个样区的道路边坡细沟特征指标可知(图 3),细沟密度与坡度在空间上并没有呈现出规律性的变化,而细沟体积、平均深度、最大深度在空间上呈现出相似的规律。在靠近格尔木的

S2711—S2595 样区细沟体积、平均深度、最大深度 3 个指标数值均较大,中间部分 S2575—S2465 样区 3 个指标数值均较小,靠近都兰的 S2437—S2395 样区 3 个指标数值呈现出逐渐上升的趋势。

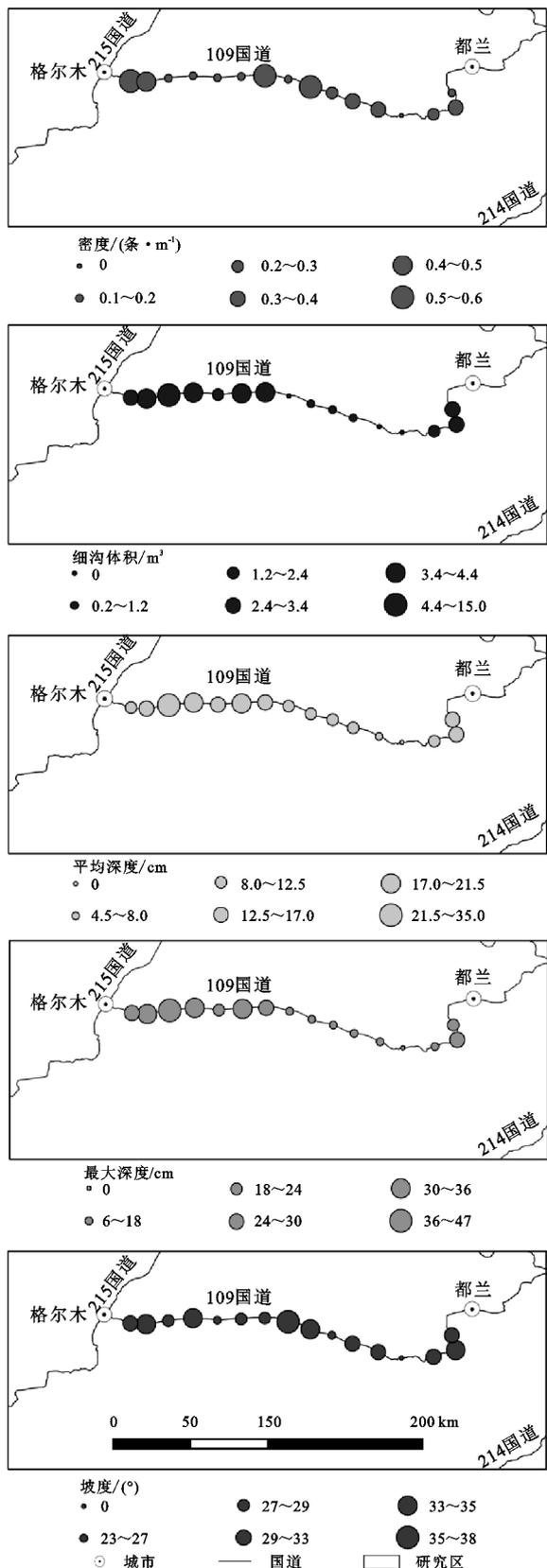


图 3 都兰—格尔木段道路边坡侵蚀沟分布特征

选取细沟体积、平均深度和最大深度作为分析指标对其进行标准化处理,以消除量纲的影响,对标准化后的数据进行聚类分析,得到 16 个样区聚类分析的谱系图。从图 4 的树状结构可以看出,16 个样区可分为两大类。第一类包括沿线中间路段 S2676, S2575, S2555, S2535, S2515, S2495, S2465 和 S2437 共 8 个样区,第二类包括靠近格尔木的 S2711, S2695, S2656, S2635, S2615, S2595 和靠近都兰的 S2415, S2395 共 8 个样区。对每一类样区的平均深度、最大深度、细沟体积和密度进行简单的算术平均,在第一类样区 4 个指标数值均较小,平均值分别 9.49 cm, 13.50 cm, 2.33 m³, 0.24 条/m。第二类样区 4 个指标的数值均较大,平均值分别为 13.82 cm, 24.04 cm, 2.71 m³, 0.30 条/m。由于青藏公路在修建时,考虑到冻土影响,多采取提高路基高度的措施,所以沿线形成的高边坡都是人工堆砌,整个研究路段坡度大多在 23°~38°,平均值为 30°。

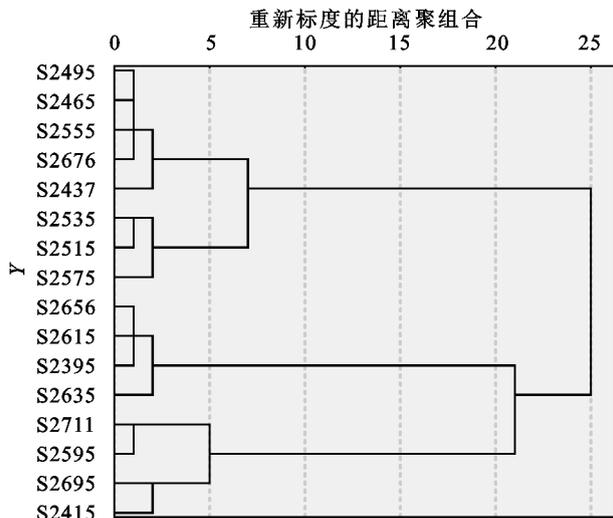


图 4 都兰—格尔木段道路边坡侵蚀沟样区聚类分析

3.2 边坡侵蚀沟体积与影响因子的相关性

为分析道路边坡细沟侵蚀发生的驱动因素,本研究根据现有资料,选取边坡侵蚀沟密度、平均深度、最大深度、细沟体积、坡度、NDVI、海拔、降雨量、降水集中指数(PCI)9 个指标进行皮尔逊相关性分析。结果表明(表 2),细沟体积与平均深度、最大深度均呈现出高度正相关,相关系数均为 0.89。第一类样区的细沟体积、平均深度和最大深度 3 个指标的数值均较小,细沟侵蚀量较低,为弱侵蚀路段。第二类样区 3 个指标的数值均较大,细沟侵蚀量较高,为强烈侵蚀路段。细沟体积与坡度、植被状况、海拔及降雨量未表现出显著的相关性,这可能是由于研究区地处十分干旱的砾石荒漠区,降雨较少,空间分异不显

著,植被覆盖整体较差。同时由于地处高寒高海拔区,边坡公路的侵蚀更易受到冻、融过程的影响。相关研究表明,公路边坡细沟侵蚀与降雨量并没有显

著的相关关系(这与本研究结论一致),但是与降雨强度具有一定的相关性,降雨强度越大,产生的细沟侵蚀量越高^[8,21]。

表 2 采样区侵蚀沟指标与潜在影响因子相关性分析

| 影响因子 | 细沟体积 | 密度 | 平均深度 | 最大深度 | 坡度 | NDVI | 海拔 | 降雨量 | PCI |
|------|--------|-------|--------|--------|-------|---------|--------|---------|------|
| 细沟体积 | 1.00 | | | | | | | | |
| 密度 | -0.08 | 1.00 | | | | | | | |
| 平均深度 | 0.89** | -0.36 | 1.00 | | | | | | |
| 最大深度 | 0.89** | -0.08 | 0.92** | 1.00 | | | | | |
| 坡度 | -0.23 | 0.06 | -0.19 | -0.12 | 1.00 | | | | |
| NDVI | -0.20 | -0.15 | -0.17 | -0.08 | 0.13 | 1.00 | | | |
| 海拔 | -0.20 | -0.05 | -0.21 | -0.07 | 0.10 | 0.93** | 1.00 | | |
| 降雨量 | -0.46 | -0.13 | -0.49 | -0.53* | 0.04 | 0.76** | 0.76* | 1.00 | |
| PCI | 0.46 | 0.13 | 0.49 | 0.53* | -0.04 | -0.76** | -0.76* | -1.00** | 1.00 |

注:**表示在 0.01 水平(双侧)上极显著相关;*表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关。

细沟体积与 PCI 的相关系数为 0.46,没有表现出显著的相关性,但由于公路两边填方坡的土壤主要是通过机械堆砌,松散的结构组成导致抗蚀能力较弱,加上公路路面的汇水作用,极易导致边坡发生细沟侵蚀。一般情况下,坡面汇水区域越大,造成边坡侵蚀程度也越大^[22]。

4 青藏高原道路边坡侵蚀防护对策

(1) 降低边坡坡度。通过实地考察发现格尔木—都兰段公路边坡平均坡度为 30°,有研究表明,当坡度在 30°~57°时公路边坡容易产生沟蚀^[4],故在公路边坡进行覆土时使坡度尽量小于 30°,并且在公路进行边坡覆土时,应提高土壤容重,通过增加压实的方法增加土体的最大干密度,提高土壤抗蚀性,减少边坡土壤侵蚀^[23]。

(2) 完善坡面排水。排水系统可将汇集在坡面的水流排走,在一定程度上防止水流冲刷对土体造成破坏。对于路堤边坡,采用拦水带和集流槽组合的方式引排坡面径流可有效地减弱路堤坡面冲刷。对于青藏高原高寒高海拔地区,还应采取防冻、防渗措施,以防水流冲刷引起滑塌^[24]。

(3) 进行坡面防护。坡面侵蚀细沟对边坡稳定性有一定的影响,侵蚀细沟发展越严重,其对边坡的危害越大。为防止坡面产生细沟侵蚀,采用六棱砖防护措施进行边坡防护,不仅改变坡面水流的流动途径,同时可以分散坡面径流,减缓坡面流速,控制侵蚀沟深度,使水流侵蚀作用相对减弱^[3]。

5 结论

格尔木—都兰段 16 个样区的边坡侵蚀沟的细沟

体积、平均深度、最大深度在空间上呈现出相似的规律。在靠近格尔木 S271—S2595 样区细沟体积、平均深度、最大深度 3 个指标数值均较大,中间部分 S2575—S2465 样区 3 个指标数值均较小,靠近都兰 S2437—S2395 样区 3 个指标数值呈现出逐渐上升的趋势。通过聚类分析将 16 个样区分为了两大类:第一类样区平均深度、最大深度、细沟体积和密度 4 个指标的数值均较小,为弱侵蚀路段。第二类样区为 4 个指标的数值均较大,为强烈侵蚀路段。

通过对边坡侵蚀沟分布密度、平均深度、最大深度、细沟体积、坡度、NDVI、海拔、降雨量、降水集中指数(PCI)9 个指标的相关性分析表明,沟蚀量与降雨量并没有显著的相关关系,而与降雨强度具有一定的相关性,降雨强度越大,产生的沟蚀量越高。

本文分析了青藏公路格尔木—都兰段边坡侵蚀沟特点,提出了针对公路边坡侵蚀的防治对策,青藏公路边坡细沟侵蚀防治可以从降低边坡坡度、完善坡面排水、开展坡面防护 3 个方面入手,有效避免公路边坡产生细沟侵蚀。

参考文献:

- [1] 郑乐琴.青藏公路茶卡至诺木洪段路域生态环境现状研究[J].青海交通科技,2010,23(5):13-15,17.
- [2] 陈同德,焦菊英,王颖霖,等.青藏高原土壤侵蚀研究进展[J].土壤学报,2020,57(3):547-564.
- [3] 钟立昌,檀军,单保良,等.黄土地区公路边坡降雨侵蚀及防治对策[J].华东公路,2014(2):37-39.
- [4] 尹超,田伟平,李俊,等.黄土公路边坡冲刷破坏影响因素和防治对策[J].交通企业管理,2012,27(3):52-54.
- [5] 严超群,郭宝安,雷叶.黄土地区公路边坡降雨侵蚀灾害易损性评价[J].水资源与水工程学报,2014,25(3):120-124.

- [6] 赵龙山,侯瑞,吴发启.黄土坡面细沟侵蚀研究进展与展望[J].中国水土保持,2017(9):47-51,67.
- [7] 徐宪立,张科利,庞玲,等.青藏公路路堤边坡产流产沙规律及影响因素分析[J].地理科学,2006,26(2):2211-2216.
- [8] 张洪江,李猛,江玉林,等.高速公路边坡侵蚀沟特性初步研究:以银武高速公路同心至固原段为例[J].北京林业大学学报,2007,29(6):143-147.
- [9] 单永体,胡林,王琦,等.径流冲刷对高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀的影响[J].交通运输工程学报,2016,16(4):88-95.
- [10] 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.
- [11] 赵春敬,焦菊英,税军锋,等.西藏中南部侵蚀沟形态无人机航测与传统地面测量的对比分析[J].水土保持通报,2019,39(5):120-127.
- [12] 周存秀.京藏高速公路诺木洪至格尔木段路域生态环境现状研究[J].青海环境,2011,21(2):86-90.
- [13] 吴双桂,韩廷芳,都占良.1961—2017年格尔木气温和降水变化特征分析[J].青海气象,2019(3):62-66.
- [14] 马志昂,盖艾鸿,孙林军.格尔木市盆地地区土地利用/覆盖变化时空演变[J].水土保持通报,2015,35(5):268-273.
- [15] 张京,金晓媚,张绪财,等.格尔木河流域土壤湿度时空变化及其影响因素研究[J].水文地质工程地质,2019,46(2):66-73.
- [16] 张懿锂,刘林山,摆万奇,等.青藏公路对区域土地利用和景观格局的影响:以格尔木至唐古拉山段为例[J].地理学报,2002,57(3):253-266.
- [17] 阎建忠,张懿锂,刘林山,等.高原交通干线对土地利用和景观格局的影响:以兰州至格尔木段为例[J].地理学报,2003,58(1):34-44.
- [18] 郑粉莉.细沟侵蚀量测算方法的探讨[J].水土保持通报,1989,9(4):41-45,49.
- [19] 吴普特,周佩华,武春龙,等.坡面细沟侵蚀垂直分布特征研究[J].水土保持研究,1997,4(2):47-56.
- [20] 鲍艳,胡振琪,柏玉,等.主成分聚类分析在土地利用生态安全评价中的应用[J].农业工程学报,2006,22(8):87-90.
- [21] Nyssen 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, 2010,27(12):1267-1283.
- [22] 王天伟,单永体,王斌.青藏高原地区公路侵蚀情况研究及边坡防护分析[J].交通建设与管理,2014,51(22):38-43.
- [23] 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.
- [24] 李俊,李家春,马保成,等.黄土公路边坡侵蚀防治对策[J].交通企业管理,2012,27(5):45-47.

(上接第41页)

- [22] 胡文敏,周卫军,余宇航,等.基于RS和USLE的红壤丘陵区小流域水土流失量估算[J].国土资源遥感,2013,25(3):171-177.
- [23] 姬翠翠,李晓松,曾源,等.基于遥感和GIS的宣化县水土流失定量空间特征分析[J].国土资源遥感,2010(2):107-112.
- [24] 李亚平,卢小平,张航,等.基于GIS和RUSLE的淮河流域土壤侵蚀研究:以信阳市商城县为例[J].国土资源遥感,2019,31(4):243-249.
- [25] Bouyoucos G J. The clay ratio as a criterion of susceptibility of soils to erosion[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1935,27(9):738-741.
- [26] 刘宝元,张科利,焦菊英.土壤可蚀性及其在侵蚀预报中的应用[J].自然资源学报,1999,14(4):345-350.
- [27] 方广玲,香宝,赵卫,等.基于GIS和RUSLE的拉萨河流域土壤侵蚀研究[J].水土保持学报,2015,29(3):6-12.
- [28] 张元.基于3S和USLE的内蒙古达拉特旗黄土丘陵区土壤侵蚀研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [29] 冯强,赵文武. USLE/RUSLE中植被覆盖与管理因子研究进展[J].生态学报,2014,34(16):4461-4472.
- [30] Renard K G, Foster G R, Weesies G A, et al. Predicting soil erosion by water: A guide to conservation planning with the revised Universal Soil Loss Equation (RUSLE)U. S[J]. Department of Agriculture, Agric Handbook,1997,703:404.
- [31] 管文轲,韦红,钟家骅,等.塔里木河流域植被覆盖变化的遥感监测[J].水土保持通报,2018,38(5):244-248,260.