

全风化花岗岩管沟回填土坡面侵蚀影响因素及交互作用

张 凯^{1,2}, 孔志岗^{1,2}, 李燕清³, 周 剑⁴, 贾福聚^{1,2}, 张 垚⁵

(1.昆明理工大学国土资源工程学院,昆明 650093;

2.昆明理工大学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.北京工业大学城市建设学部,北京 100124;5.中国有色金属工业昆明勘察设计院有限公司,昆明 650093)

摘要: 为了查明全风化花岗岩地区输油气管道作业边坡坡面水土流失问题,通过野外典型边坡边界条件测量、坡面侵蚀特征冲沟沟深、冲沟截面积数据采集、岩土体取样测试,并结合室内模型降雨试验等方法。结果表明:降雨、坡长、坡度、汇水面积、岩土体特性 5 种因素均影响全风化花岗岩管沟回填土坡面侵蚀。产沙率和产流率随着降雨强度的增大而增大。坡长、坡度、汇水面积与冲沟沟深和冲沟截面积呈正相关关系,且随着坡长、坡度、汇水面积的增大,冲沟沟深和冲沟截面积也在增大。通过取样测试发现,原状土与回填土的颗粒组成相对含量具有较大差异,初始回填土粒度级配为良好土。降雨冲刷初期回填土坡面径流主要携带粉粒和黏粒。5 年回填土相对于原状土,孔隙率增加到原来的 1.13 倍,土体渗透系数增大 1 个数量级,饱和状态下黏聚力降低为原状土的 67.6%,内摩擦角降低为原状土的 87.5%。通过查明全风化花岗岩管沟回填土坡面侵蚀影响因素及其作用,为后续的边坡治理提供依据。

关键词: 管沟回填土; 边界条件; 岩土体特性; 坡面侵蚀; 交互作用

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2023)01-0052-07

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2023.01.008

Influence Factors and Interaction of Slope Erosion of Completely Weathered Granite Pipe Trench Backfill

ZHANG Kai^{1,2}, KONG Zhigang^{1,2}, LI Yanqing³, ZHOU Jian⁴, JIA Fujun^{1,2}, ZHANG Yao⁵

(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 University of Science and Technology, Kunming 650093;

3.Yunnan Provincial Traffic Safety Coordination Center, Department of Transport of Yunnan Province,

Kunming 650031; 4.Faculty of Urban Construction, Beijing University of Technology, Beijing 100124;

5.Kunming Survey, Design and Research Institute of China Nonferrous Metals Industry Co., LTD., Kunming 650093)

Abstract: In order to find out the problem of soil and water loss on the slope side of oil and gas pipeline operation in fully weathered granite area, this paper adopted the methods of measuring the boundary conditions of typical slopes in the field, collecting the data of gully depth and gully sectional area of slope erosion characteristics, sampling and testing rock and soil mass, and the indoor model rainfall test. The results showed that rainfall, slope length, slope, catchment area and geotechnical characteristics all affected the slope erosion of backfill soil in fully weathered granite pipe trench. Sediment yield and flow yield increased with the increase of rainfall intensity. The slope length, slope and catchment area were positively correlated with gully depth and gully cross-sectional area, and the gully depth and gully cross-sectional area increased with the increase of slope length, slope and catchment area. Through sampling, it was found that the relative content of particle composition of undisturbed soil was different from that of backfill soil, and the particle size distribution of the initial backfill soil was good. At the initial stage of rainfall scouring, the runoff of backfill slope mainly carried away silt and clay particles. Compared with the original soil, the porosity of the backfill soil in five years increased to 1.13 times, the soil permeability coefficient increased by one order of magnitude, and the

收稿日期:2022-06-19

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(2018016);云南省重点研发计划项目(202203AC100003)

第一作者:张凯(1993—),男,硕士研究生,主要从事环境地质与工程地质研究。E-mail:zhangkaizj@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

cohesion in saturated state and internal friction angle decreased to 67.6% and 87.5% of that of the original soil, respectively. By finding out the influencing factors and their effects on slope erosion of backfill soil in fully weathered granite pipe trench, it could provide a basis for the subsequent slope treatment.

Keywords: pipe trench backfill soil; boundary conditions; geotechnical characteristics; slope erosion; interaction

输油气管道穿过全风化花岗岩地区,由于管沟的开挖,地表植被遭受破坏,斜坡表层的红土层遭受破坏,下部的全风化花岗岩裸露,改变全风化花岗岩的岩土体特性和原始边坡的力学平衡,全风化花岗岩管沟作业带边坡回填土结构松散,物理力学性质差,抗蚀性差,并具有崩解性和软化性,在持续的降雨情况下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,造成比较严重的坡面侵蚀现象,对管道安全运营形成较大安全隐患。

降雨条件下,坡面土体侵蚀受到多种因素的影响,国内外许多学者^[1-9]对于黄土、红土地区土壤侵蚀的类型、侵蚀作用及影响因素等有较成熟的定性和定量认识。通过大量的野外和室内试验,深入探讨坡面产流和产沙过程的基本特征,对侵蚀沟的演变规律、侵蚀泥沙的特征、侵蚀的动力学机理等方面的研究也取得一定的研究成果。认为降雨强度和边坡坡度影响水动力强度,降雨强度、坡度越大,边坡侵蚀越强烈。边坡土体本身的物理力学性质在很大程度上决定土体分离的难易程度^[10]。土体级配越好,边坡越容易发生侵蚀,经过改良后的土体或有植被防护的土体通常具有较强的抗冲刷能力。通过人工模拟降雨试验^[11-13],研究坡度、降雨强度和地表覆盖等因素对坡面侵蚀过程的影响,认为坡面径流率随着降雨强度和坡度的增大而增大;随着降雨强度的增大,产沙率明显增大,且降雨强度越大,坡度对产沙率的影响越明显。前人^[14-17]针对全风化花岗岩的研究主要以崩岗为主要研究对象,对花岗岩崩岗的发育规律、侵蚀特征、影响因素等有一定的研究。通过对典型崩岗区崩壁土壤为研究对象,对崩壁垂直(红土层、砂土层和碎屑层)和水平(表层和内部)2个方向不同深度土壤理化性质和抗剪强度的差异进行分析,进一步量化两者之间的定量关系^[14]。然而针对全风化花岗岩管沟回填土边坡的研究还很少,全风化花岗岩及其回填土因自身结构的特殊性、结构组成的非均质性和异向性、软化和崩解性及扰动性,导致花岗岩风化岩管沟回填土边坡的土壤侵蚀特征和稳定性特征与一般土体不同,其土体破坏方式也不同于一般的地质灾害问题。本文通过查明全风化花岗岩管沟回填土坡面侵蚀影响因素及其作用,为全风化花岗岩地区管道作业边坡安全、经济、有效的水工保护与水土流失治理方案提供依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区域

中缅油气管道进入云南境内后呈线状自西向东分别穿越滇西横断山脉、滇中红色高原两大地貌格局,沿线属于“三高四活跃”的不良地质作用发育地区。区域上,管道穿越区最高点位于保山市隆阳区水寨乡天井铺国有林场境内的老光山,高程 2 518.55 m,最低点为怒江坝怒江水面,高程 640 m,全区最大高差 1 878.55 m。研究区位于滇西的龙陵地区,年平均降水量为 1 400~2 100 mm。属于亚热带气候区和北热带区,地质复杂,降雨充沛,立体气候明显。其中中缅输油气管道龙陵段 K152 桩~K170 桩穿越花岗岩岩体,该区花岗岩风化程度很高,风化带厚度较大,全风化层厚度一般>3 m,局部可达 10 m 以上,且风化较均一,结构松散,呈散体状结构,岩芯呈砂土、角砾、碎石状,覆盖层较薄。依据前期资料,该段管沟回填后早期阶段,管沟作业边坡坡面侵蚀十分严重,局部地段出现漏管、悬管现象。本文选择中缅输油气管道穿越全风化花岗岩地区坡面侵蚀最典型的 K153~K159 段为重点研究对象,开展坡面侵蚀影响因素及其交互作用研究。

1.2 研究方法

1.2.1 边界条件获取 本次研究调查时间 2019 年 5 月 12 日至 2020 年 1 月 16 日,调查方式为沿管线方向前进,对管线所经典型边坡的坡体边界条件进行调查,调查边坡形态、坡度、坡长、后缘汇水等因素与水毁发育特征的关系,详细查明研究区各管沟作业边坡坡面侵蚀(水毁)发育的特征,测量冲沟的几何形态和边界条件等。

(1)使用皮尺测量管沟作业带边坡坡顶到坡脚的距离作为坡长;(2)使用皮尺测量管沟作业带边坡上中下 3 个坡宽,取平均值作为坡宽;(3)使用全站仪测量边坡的坡度;(4)使用皮尺测量冲沟的多个位置的沟深和沟宽,去除极值,取平均值。利用三角形面积对冲沟截面面积进行计算。

1.2.2 样品采集 本文样品主要采集于中缅油气管道龙陵段全风化花岗岩分布区的探槽剖面 and 剥土剖面之上,试样样品包括全风化花岗岩原状土和管沟回填土。用环刀和样皮原位采集样品,环刀大小为 61.8 mm×20.0 mm,样皮大小为 Φ108,每层土上采集 6 个环刀样品和 1 个样皮大样,分别用于基本物理参数、渗透试验、直剪试验等,测定土体的基本物理力学参数^[18],土体物理性质见表 1。

表 1 土体物理性质

土体	天然密度/ (g·cm ⁻³)	比重	天然 孔隙比	渗透系数 (×10 ⁻³)	天然状态下		饱和状态下	
					黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)
全风化花岗岩原状土	1.86	2.65	0.715	0.30	20.0	28	17.00	24
5 年回填土	1.83	2.67	0.733	5.36	15.5	25	11.50	21
初始回填土	1.78	2.64	0.810	9.03	—	—	—	—

1.2.3 降雨数据统计 本文收集龙陵地区气象资料 2009—2019 年单点降雨峰值(图 1),龙陵地区 2009—2019 年小时峰值降雨量为 20.0~56.9 mm/h,出现 50 mm/h 降雨的次数 3 次。最大单点暴雨出现在 2009 年 8 月,1 h 降雨量达 56.9 mm,达到大暴雨级别。

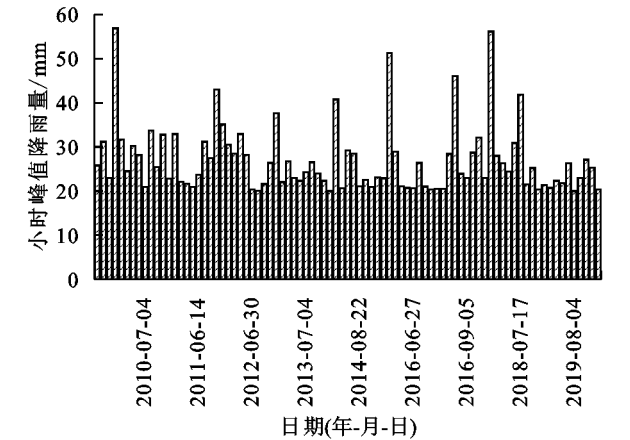


图 1 云南省龙陵县 2009—2019 年小时降雨

1.2.4 室内降雨试验 室内模型降雨试验于 2020 年 10—12 月于昆明理工大学水工保护与水土保持实验室进行。根据龙陵地区过去 10 年最大单小时降雨量值计算获取试验的降雨强度,降雨雨强设定为 4 个等级,分别为 50,80,110,220 mm/h。坡度依据龙陵全风化花岗岩地区管道作业边坡坡度区间范围,选择代表性 10°,20°,30°,40°坡度作为试验坡度,坡长 3.0 m,坡宽 2.0 m。

降雨时长为 1 h,降雨开始后每隔 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,泥水静置 24 h 以上,而后抽离上层清水,将底部泥沙烘干称重,记录泥沙量值。

2 结果与分析

2.1 降雨对坡面侵蚀程度的影响

引发边坡坡面冲刷破坏的各因素中,降雨是最主要的动力因素。当降雨强度大于坡面的入渗强度时,径流发生。坡面流形成后,坡面侵蚀的强度取决于地表径流势能和土壤的抗蚀能力^[19]。根据室内人工模拟降雨试验,选取 20°边坡,220,110,80,50 mm/h 降雨工况下试验结果。由图 2 可知,在试验条件下产流率在 10 min 后基本达到稳定状态,产沙率随着降雨历时的延续呈现 2 个

不同发展阶段,50,80 mm/h 降雨工况下,0~5 min 快速增大阶段,5~60 min 基本保持平稳阶段。而在雨强为 110,220 mm/h 条件下,产沙率基本随降雨时间快速增大,而后呈现剧烈波动状态。其原因主要是试验刚开始,坡面表层存在大量浮土,浮土很快被径流裹挟全部搬运,而进一步对表层土壤颗粒的剥蚀相对困难,因此在产流初期出现产沙率先增大后减小现象,随着降雨历时进行,坡面侵蚀方式在一段时间内基本维持在面蚀范畴,径流剥蚀土壤的过程比较缓慢,产沙率变化相对稳定,而在产流后期,雨强为 50,80 mm/h 的条件下,由于侵蚀动能不足,侵蚀方式未能转变,所以产沙率保持平稳。110 mm/h 的条件下随着降雨强度的增加,地表径流明显增加,但随着雨强的进一步增大将形成地表物理结皮,阻碍侵蚀的产生^[20],然而在雨强为 220 mm/h 条件下具有较大的侵蚀能量,致使侵蚀方式发生显著转变,由面蚀为主转变为沟蚀为主,甚至引发局部滑坡和滑塌,从而在降雨初期其产沙率表现出成倍陡增,而在降雨后期表现出下降趋势,最终导致产沙率剧烈波动变化。

2.2 坡长对坡面侵蚀程度的影响

本次共调查典型边坡 37 个,分别获得坡长、坡度、坡面汇水面积、外来汇水面积、冲沟沟深和冲沟截面积边界条件(表 2)。依据野外统计资料(图 3)可知,中缅油气管道龙陵段花岗岩分布区管道作业边坡坡长大多在 10~120 m。主要集中在 20~80 m,冲沟沟深大多在 0.25~1.20 m,冲沟截面积集中在 0.1~0.5 m²。随着坡长的增加,坡面径流形成的流速越大,冲刷能力越大,形成的冲沟沟深和截面积也越大,表现为坡长与冲沟沟深及截面积呈正相关关系。结合表 2 和图 3 发现,当坡长一定时冲沟沟深和冲沟截面积的大小与坡度存在一定的关系。根据 5 号、9 号、15 号、30 号坡与 7 号、25 号、37 号、33 号坡 2 组边坡侵蚀程度对比发现,在坡长基本相等的情况下,坡度较小的 30 号和 7 号坡相对坡度较大的其余边坡发育的冲沟较小,说明坡长一定时,坡面径流搬运泥沙的能力度受坡度的影响,随着坡度的增大坡面径流携带颗粒的能力增强。依据调查结果,在坡长较长的坡体顶部,坡体以细沟为主,冲沟的发育往往浅而窄,冲沟的形态呈“V”形;而在坡脚位置,随着坡长的增加,在微地貌作用下,往下汇聚为大冲沟的可能性越大,水流冲力逐渐增大,侵蚀强度越强。坡脚位置发育的冲沟往往宽而深,冲沟的形态大多呈“U”形。

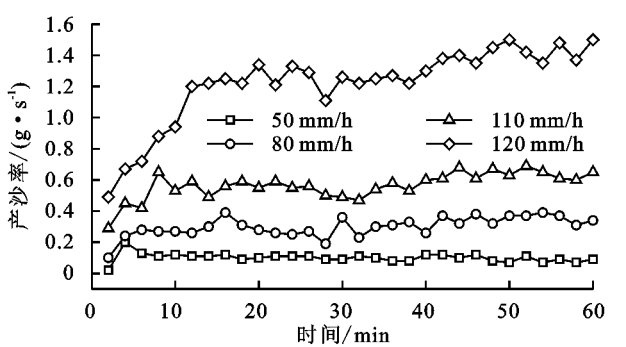
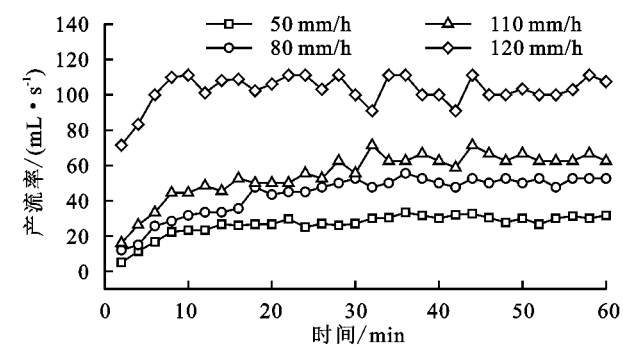


图2 20°边坡下产流率和产沙率随时间的变化

表2 边坡与水毁状况关系

边坡 编号	坡长/ m	坡度/ (°)	坡面汇水 面积/m ²	外来汇水 面积/m ²	总汇水 面积/m ²	冲沟 沟深/m	冲沟截 面积/m ²
1	10	3	50	1500	1550	0.50	0.42
2	50	27	1990	1890	3880	1.15	0.98
3	100	22	2480	1350	3830	1.00	0.75
4	15	15	1630	436	2066	0.40	0.35
5	70	20	1650	3850	5500	1.00	1.10
7	80	18	5750	1000	6750	0.80	0.76
8	100	23	2030	3850	5880	1.70	1.92
9	70	23	3550		3550	1.10	1.09
10	20	10	930	1360	2290	0.25	0.30
11	25	21	1630	3900	5530	0.60	0.68
12	65	23	1520	1980	3500	1.00	0.95
14	30	28	2350	3050	5400	1.10	1.12
15	70	27	1150	3600	4750	1.20	1.08
16	60	25	1550		1550	0.75	0.68
17	22	20	600	1000	1600	0.90	0.76
18	23	20	1250	700	1950	0.80	0.76
19	43	13	1150	950	2100	0.60	0.75
20	52	30	1850	5750	7600	0.70	0.88
21	60	33	1080	1350	2430	0.95	1.05
22	72	20	1380	5400	6780	1.20	0.90
23	25	13	1160	950	2110	0.80	1.08
24	60	16	1520		1520	0.70	0.65
25	80	33	3350		3350	1.40	1.26
26	10	11	700	1700	2400	0.45	0.35
27	45	11	2050		2050	0.40	0.50
28	38	19	1680		1680	0.40	0.38
29	50	14	3300	800	4100	0.70	0.68
30	65	5	1920	1190	3110	0.40	0.35
31	40	20	1900		1900	0.70	0.65
32	27	21	1330	4500	5830	0.90	0.85
33	85	24	3000	5600	8600	1.60	2.10
34	50	25	1560		1560	0.88	0.72
35	9.6	12	1170	260	1430	0.50	0.60
36	44	26	3350		3350	1.20	1.10
37	80	23	7200		7200	1.30	1.50

注:表中统计数据为坡面主要冲沟特征的结果,冲沟沟深、截面积数据为单条冲沟的数据。

2.3 坡度对坡面侵蚀程度的影响

由图4可知,中缅油气管道龙陵段全风化花岗岩作业带管沟回填土的边坡坡度主要集中在5°~35°。

当边坡坡度在10°~20°时,冲沟沟深集中在0.3~0.7 m,冲沟截面积集中在0.3~0.7 m²,边坡坡度在20°~30°时,冲沟沟深集中在0.6~1.2 m,冲沟截面积集中在0.6~1.1 m²。随着坡度的增加,水力梯度增大,水流扰动性强,坡面径流带动颗粒的能力成倍增加,管沟作业带边坡坡面侵蚀强度随着坡度增大而强烈,其结果表现为坡度与冲沟沟深和冲沟截面积呈正比关系。由表2和图4可知,水土流失不仅与坡度有关,还与坡长存在关系,37号、8号坡与34号、16号相比,在坡度基本相等的情况下,37号和8号坡在坡长和坡度的降雨共同作用下坡面径流流速达到最大,坡面径流携带颗粒的能力增加,存在冲沟截面积与冲沟沟深都大幅增加的现象。结合5号坡和22号坡发现,存在坡长和坡度基本相等,22号坡汇水面积较大导致形成的冲沟较深的现象。由此可知,坡度、坡长及汇水面积是影响坡面侵蚀的重要因素,随着坡度、坡长的增大,全风化花岗岩回填土边坡坡面侵蚀强度显著增强。

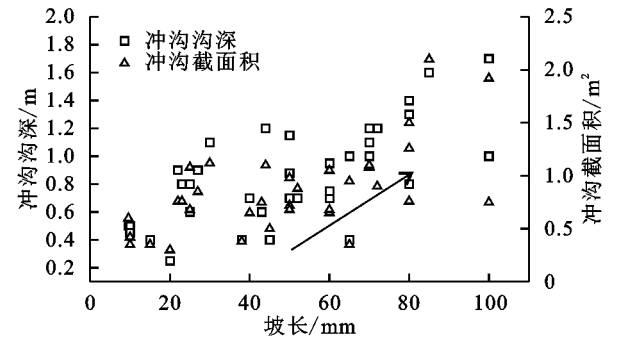


图3 坡长与冲沟沟深及冲沟截面积关系

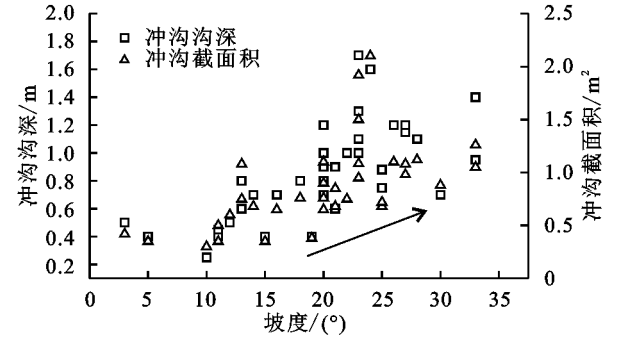


图4 坡度与冲沟沟深及冲沟截面积关系

2.4 汇水面积对坡面侵蚀程度的影响

汇水面积由外来汇水面积和坡面汇水面积组成。中缅甸油气管道顺山势而建,横坡敷设和山沟敷设等都可能存在自然斜坡外来汇水,外来汇水若直接在管沟上部边坡形成径流,管沟浅表层土体在水的冲刷下,极易形成大的冲沟。33 号坡,边坡坡度 24°,该边坡后缘为一汇水平台,西侧自然山坡汇水都最终往该汇水平台汇聚,外来汇水面积 5 600 m²,坡面汇水面积 3 000 m²。管沟回填后,未设置截排水措施,外来汇水流经汇水平台后从 33 号坡往坡下径流,由于汇水面积较大,最终造成 33 号边坡形成宽 2.6 m、深 1.6 m 的大冲沟(表 2)。由图 5 可知,边坡汇水面积对坡面侵蚀强度具有明显影响,上方汇水增加坡下方径流量及其增加径流的挟沙能力来增加坡下方侵蚀产沙量。总体上,汇水面积越大的管道作业带边坡地,降雨时坡面汇流后的径流量越大,对坡面的冲刷作用越强烈,冲沟越发育,表现为汇水面积与冲沟沟深和冲沟截面积呈正相关关系。5 号、11 号、32 号坡显示,在近似相等坡面汇水面积和坡度情况下,由于坡长不同,造成冲沟沟深和冲沟截面积不同,主要原因是当坡面接受上方汇水后各侵蚀方式演变速度明显加快,侵蚀产沙量迅速增大,且坡面侵蚀产沙增加幅度随上方汇水流量的增加而增大^[21]。

2.5 岩土体特性对坡面侵蚀影响

花岗岩由于本身成因的复杂性、结晶时矿物颗粒大小的多样性、矿物排列的非定向性、风化速率的不均一性等,造成全风化花岗岩物理力学性质的不均一性和各向异性,而龙陵段油气管道穿越全风化花岗岩地区,管沟开挖铺设管道后,往往直接进行回填或就地取材回填形成的回填土,进一步破坏土体的结构,加剧其物理力学性质的多样性。由图 6 和表 3 可知,

与全风化花岗原状土相比,回填土粒度构成多具有粗细混杂的特点,全风化花岗原状土主要由砾石和砂砾组成,占比达 77%,初始回填土中混入原表层的红壤,砾石的相对含量较少,是原状土的 0.21 倍。粉粒和黏粒相对含量较多,分别是原状土的 2.27,30.00 倍。而经过降雨冲刷,5 年后回填土中粉粒和黏粒相对含量降低,砂粒和砾石的相对含量增大,更接近全风化花岗岩原状土颗粒级配(图 6)。说明回填后初期水土流失的过程中,坡面径流主要携带的为粉粒和黏粒,对于较大颗粒砂粒和砾石的搬运能力较弱。表 3 中不均系数和曲率系数只有初始回填土满足级配良好土,土体级配越好,边坡越容易发生侵蚀。相对于全风化花岗岩原状土,输油气管沟作业带回填土无法压实,造成结构松散,不均匀沉降增大,连通性孔隙占比较高。由表 1 可知,孔隙率增高到原来的 1.13 倍,导致贯通性孔隙(空隙)增多,土体渗透系数增大 1 个数量级,更有利于水分下渗。相对于全风化花岗岩原状土,5 年回填土天然状态下黏聚力降低为原状土的 77.5%,内摩擦角降低为原状土的 89.2%,饱和状态下黏聚力降低为原状土的 67.6%,内摩擦角降低为原状土的 87.5%,抗冲刷能力降低。

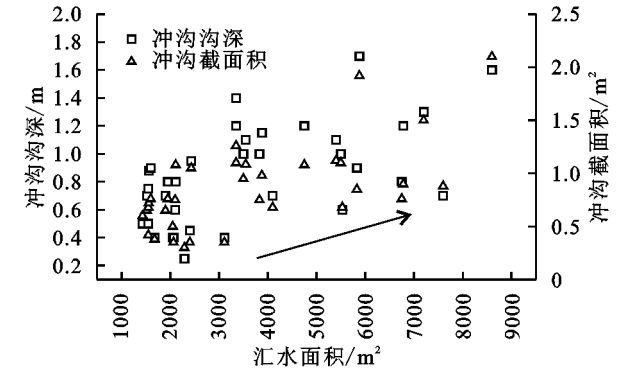


图 5 汇水面积与冲沟沟深及冲沟截面积关系

表 3 土体颗粒级配

土体	卵石 (20~10 mm)/%	砾石 (10.0~5.00 mm)/%	粗砂 (5.00~2.00 mm)/%	中砂 (2.00~1.00 mm)/%	细砂 (1.00~0.50 mm)/%	粉砂 (0.50~0.25 mm)/%	粉粒粗 (0.25~0.10 mm)/%	粉粒细 (0.10~0.075 mm)/%	黏粒 (<0.075 mm)/%	不均匀度 系数(C _u)	曲率 系数(C _c)
全风化花岗岩原状土	6.57	12.47	21.92	8.58	11.64	23.03	14.36	1.04	0.39	14.78	0.58
5 年回填土	2.43	6.93	19.47	9.18	14.14	17.46	18.86	7.2	4.33	16.86	0.57
初始回填土	1.36	4.43	12.96	5.14	12.82	16.68	19.88	15.15	11.58	26.56	1.95

2.6 坡面侵蚀影响因素分析

全风化花岗岩管沟回填土坡面土壤侵蚀并非受单一因素的影响,而是多种影响因素交互作用的结果。降雨、坡长、坡度和汇水面积对坡面侵蚀过程都起到促进作用。坡面流形成后,坡面侵蚀的强度取决于地表径流势能和土壤的抗蚀能力^[17-18]。根据坡面势能计算公式:

$$E=\rho gQL\sin\theta$$
 (1)

式中: E 为单位面积的径流势能(J/m²); Q 为单位面积的径流量(m³/s); L 为斜坡坡长(m); θ 为坡度(°); ρ 为水密度(kg/m³); g 为重力加速度(m/s²)。

地表径流势能与径流量和坡长有密切关系,结合室内模型降雨试验,在坡面流分析的过程中,平均产流率、平均产沙率一般与雨强和坡度呈幂函数关系。由图 7 可知,同一坡度下,平均产流率、平均产沙率随雨强的增加呈现上升的趋势,同一流量下,平均产流

率、平均产沙率随坡度的增加有增加,也有减少趋势。通过用 MATLAB R2016a 软件进行拟合,平均产流率、平均产沙率与雨强和坡度的关系为:

$$u=0.3901 * \theta^{0.03062} * Q^{1.5} \qquad R^2=0.960 \ 0$$

(2)

$$\sigma=(3.588e-11) * \theta^{2.167} * Q^{3.423} \qquad R^2=0.969 \ 7$$

(3)

式中: u 为产流率(mL/s); σ 为产沙率(g/s); Q 为雨强(mm/h); θ 为坡度($^\circ$)。从关系式来看,坡度对平均产流率、平均产沙率的影响小于雨强的影响,坡度对平均产沙率的影响大于其对平均产流率的影响。而坡面土体抗侵蚀性可用库仑抗剪强度进行简单示意性分析: $\tau=c+\tan \varphi$ 。由表 1 可知,回填土的黏聚

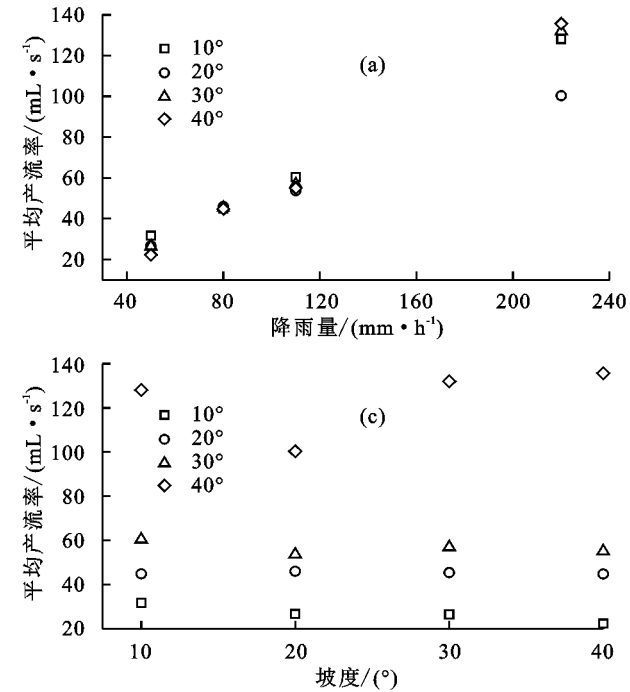


图 7 平均产流率、平均产沙率与雨强和坡度的变化关系

3 讨论

由于输油管道的特殊性,与其他类型边坡相比,管沟回填土边坡无法对其压实。而易产生的不均匀沉降裂缝导致入渗量增加,侵蚀率增加,降雨和地表径流表面裂缝入渗,在回填土与原状土接触面上汇流贯通,形成滞水,降低土体的力学性质。同时雨水不断充填裂缝和软弱结构面,使裂缝扩大,加剧回填土边坡的变形,加剧不均匀沉降。同时不均匀沉降形成的裂缝使得地表水下渗后易在坡内形成富水带,从而在横向和纵向上都容易形成潜流,细颗粒容易带往深部和坡下,造成坡体变形,进而进一步加剧坡体冲刷。坡面水流属于典型的薄层流,在流动过程中沿坡面梯度方向产生径流剪切力,坡面上的土壤在径流剪切力的作用下先发生剪切破坏,后被水流搬运,进而发生侵蚀,形成

力和内摩擦角均有不同程度的降低。随着抗剪强度的降低,雨滴的击溅和径流的冲刷更容易破坏、损伤土壤结构,使得土壤的剥离、分散、输移更为容易,导致坡面土体的抗侵蚀能力持续下降^[22]。

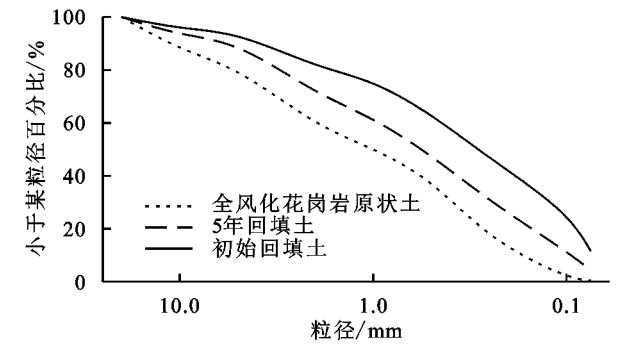
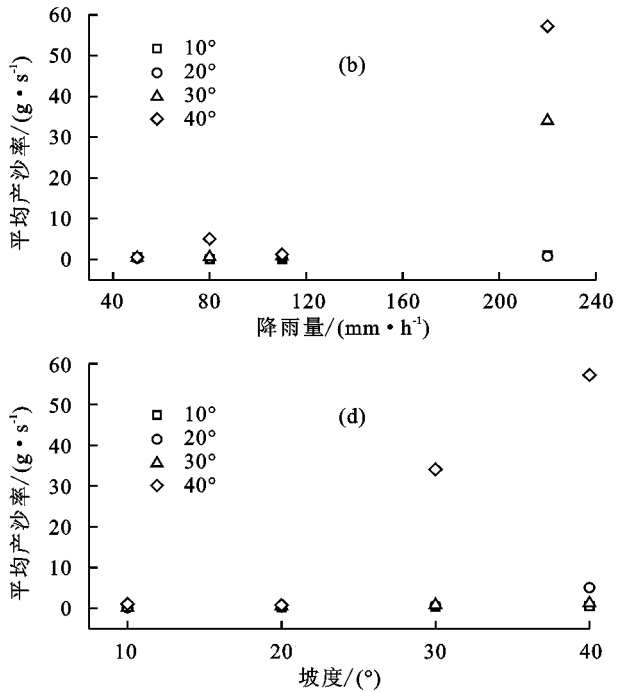


图 6 土体颗粒级配曲线



坡面冲刷和细沟,最后逐步演化为冲沟。

降雨通过打击地表引起土壤分离,产生细沟间侵蚀,以及径流冲刷作用影响泥沙颗粒的输移。当坡长一定时,随着坡度增大,导致坡面的直接承雨面积(垂直投影面积)减小^[23],汇水面积减小;而坡度一定时,坡长的增加导致坡面的直接承雨面积增大,两者对承雨面积产生消长作用。在野外调查中发现,随着坡长的增加,直接承雨面积增加,径流量增加,径流能量进一步增加。在沿程侵蚀过程中,径流携带的泥沙量不断增大,消耗的径流能量亦不断增大,且径流深的增加减少雨滴对径流的扰动,使进一步用于侵蚀的径流能量减少,因此坡长的增加抑制雨强在侵蚀中的影响能力^[24]。同理,当坡长一定时,随着坡度的增加,坡面开始侵蚀时间提前,重力分力增加,而坡度增加导

致坡面的直接承雨面积(垂直投影面积)减小^[23],且减小的幅度不断增加,使得径流量减小,进一步导致径流带动土壤侵蚀能量减少,使侵蚀率减弱。雨强在细沟间侵蚀过程中的影响能力对坡度的依赖性存在拐点,前人^[24]研究认为,坡度 20%为坡度对坡长和雨强交互作用方向变化的拐点。

4 结论

(1)降雨、坡长、坡度和汇水面积对坡面侵蚀过程均起到促进作用。在降雨的情况下,产沙率和产流率随着降雨强度的增大而增大。坡长、坡度和汇水面积与冲沟沟深及截面积呈正相关关系,随着坡长增加、坡度增大,坡面汇水面积的增大,坡面侵蚀越大。坡长与坡度之间存在交互关系,两者中任意一个因素数值不变,另一个因素数值改变,都引起汇水面积和坡面径流强度的改变,进而导致坡面侵蚀强度的改变。

(2)原状土与回填土的颗粒组成相对含量具有较大差异。初始回填土粒度级配为良好土,颗粒构成多具有粗细混杂的特点,降雨冲刷 5 年后回填土颗粒组成相对含量接近于原状土。5 年回填土相对于原状土孔隙率增加 1.13 倍,渗透系数增大 1 个数量级,饱和状态下黏聚力降低为原状土的 67.6%,内摩擦角降低为原状土的 87.5%。

参考文献:

[1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.

[2] 王文静.陕北黄土高原地区水土流失敏感性评价[D].西安:西北大学,2016.

[3] Kouselou M, Hashemi S, Eskandari I, et al. Quantifying soil displacement and tillage erosion rate by different tillage systems in dryland northwestern Iran[J]. Soil Use and Management, 2018, 34(1): 48-59.

[4] Chen J, Xiao H B, Li Z W, et al. How effective are soil and water conservation measures (SWCMs) in reducing soil and water losses in the red soil hilly region of China: A meta-analysis of field plot data[J]. Science of the Total Environment, 2020, 735: e139517.

[5] 谢永生,李占斌,王继军,等.黄土高原水土流失治理模式的层次结构及其演变[J].水土保持学报,2011,25(3): 211-214.

[6] 索安宁,赵文喆,王天明,等.近 50 年来黄土高原中部水土流失的时空演化特征[J].北京林业大学学报,2007,29(1):90-97.

[7] 白皓.红土工程堆积体坡面水蚀过程及泥沙颗粒分布特

性研究[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2018.

[8] 汤珊珊.覆沙坡面水蚀产沙动力过程与微地貌变化的响应研究[D].西安:西安理工大学,2018.

[9] Liu H L, Wang X D, Guo Q L. Field testing study on the rainfall thresholds and prone areas of sandstone slope erosion at Mogao Grottoes, Dunhuang[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2019, 191(12): 1-9.

[10] 杨春霞,姚文艺,肖培青,等.坡面径流剪切力分布及其与土壤剥蚀率关系的试验研究[J].中国水土保持科学,2010,8(6):53-57.

[11] 冯秀,查轩,黄少燕.人工模拟降雨条件下花岗岩红壤坡面侵蚀过程与特征分析[J].中国水土保持科学,2014,12(1):19-23.

[12] 杜婷婷,李志清,王晓明,等.黄土边坡降雨冲刷模型试验研究[J].工程地质学报,2018,26(3):732-740.

[13] Liang Y, Jiao J Y, Dang W Q, et al. The thresholds of sediment-generating rainfall from hillslope to watershed scales in the Loess Plateau, China[J]. Water, 2019, 11(11): e2392.

[14] 郑勤敏,王祖梅,黄奕铭,等.东南崩岗侵蚀区崩壁土壤岩土特性的空间分异特征[J].森林与环境学报,2022, 42(1):53-62.

[15] 刘洪鸽.崩岗侵蚀发育机理与风险防控关键技术[D].武汉:长江科学院,2021.

[16] 王娜,王佳妮,张晓明,等.控制厚度条件下崩岗土体的裂隙演化特征[J].水土保持学报,2021,35(6):175-182.

[17] 周小生,张海亮.风化花岗岩矿物演化机理及工程特性研究[J].公路交通科技(应用技术版),2018,14(4):43-47.

[18] 中华人民共和国住房和城乡建设部.GB/T 50123-2019 土工试验方法标准[S].北京:中国计划出版社,2019.

[19] 王龙生,蔡强国,蔡崇法,等.黄土坡面细沟形态变化及其与流速之间的关系[J].农业工程学报,2014,30(11): 110-117.

[20] 李裕元,邵明安.降雨条件下坡地水分转化特征实验研究[J].水利学报,2004,35(4):48-53.

[21] 张新和,郑粉莉,汪晓勇,等.上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2008,36(3):105-110.

[22] 张祖莲,洪斌,黄英,等.降雨作用下云南省红土抗剪强度与坡面侵蚀模数的关系[J].水土保持通报,2017,37(1):1-8.

[23] 李君兰,蔡强国,孙莉英,等.降雨强度、坡度及坡长对细沟侵蚀的交互效应分析[J].中国水土保持科学,2011,9(6):8-13.

[24] 周春红,张风宝,刘宝元,等.细沟间侵蚀影响因子交互作用定量分析[J].土壤学报,2022,59(2):420-429.