

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2024.06.042.

王静怡, 吴霜, 翟晓萌, 等. 输电线路工程不同类型塔基边坡径流产沙特征[J]. 水土保持研究, 2024, 31(6): 29-36.

Wang Jingyi, Wu Shuang, Zhai Xiaomeng, et al. Study on Characteristics of Runoff and Sediment Production Process in Slopes of Different Texture Tower Foundations in Power Transmission Line Engineering[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2024, 31(6): 29-36.

输电线路工程不同类型塔基边坡径流产沙特征

王静怡¹, 吴霜¹, 翟晓萌¹, 程曦¹, 吴智洋², 李小朴²

(1. 国网江苏省电力有限公司经济技术研究院, 南京 210008;

2. 中国电力工程顾问集团华东电力设计院有限公司, 上海 200063)

摘要: [目的] 探究输电线路工程塔基边坡水土流失特征, 为输电线路工程水土流失治理提供理论依据。[方法] 以黄土丘陵区输电线路工程为研究对象, 通过野外调查及模拟降雨试验, 分析输电线路工程各侵蚀单元水土流失特征及不同类型塔基边坡径流的产沙特征。[结果] (1) 输电线路工程各侵蚀单元水土流失量占项目总水土流失量的大小依次为塔基区 > 施工便道 > 牵张场区 > 跨越施工场地。塔基区水土流失量占项目总水土流失量的 60% 以上; (2) 与原地面相比, 修建塔基边坡增加了地表产流, 各类型塔基边坡径流率是原地面的 1.8~8.7 倍。与偏土质塔基边坡相比, 偏石质塔基边坡径流率下降 4%~35%, 植草的塔基边坡减少 20%~48% 的径流率; (3) 与原地面相比, 修建塔基边坡下垫面的径流含沙量增大了 0.5~345 倍, 偏土质塔基边坡增加最大。偏石质比偏土质塔基边坡减少 39%~92% 径流含沙量, 植草可减少 83%~98% 的含沙量。[结论] 输电线路工程建设过程中塔基区是水土流失最大的侵蚀单元, 种植植被可以显著减少塔基边坡产沙量, 塔基边坡修建后应及时进行植被恢复。

关键词: 含沙量; 径流率; 水土流失; 塔基边坡; 输电线路工程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2024)06-0029-08

Characteristics of Runoff and Sediment Production Process in Slopes of Different Texture Tower Foundations in Power Transmission Line Engineering

Wang Jingyi¹, Wu Shuang¹, Zhai Xiaomeng¹, Cheng Xi¹, Wu Zhiyang², Li Xiaopiao²

(1. State Grid Jiangsu Electric Power CO., LTD. Economic Research Institute, Nanjing 210008, China; 2. East China Electric Power Design Institute Co., Ltd. of China Power Engineering Consulting Group, Shanghai 200063, China)

Abstract: [Objective] The aims of this study are to explore the characteristics of soil and water loss on the foundation slope of power transmission line engineering, and to provide theoretical basis for soil and water loss control of power transmission line engineering. [Methods] The power transmission line engineering in loess hilly area was taken as the research object. The characteristics of soil and water loss in each erosion unit of the transmission line engineering and the characteristics of runoff and sediment production in different types of tower foundation slopes were analyzed through field investigation and simulated rainfall test. [Results] (1) The proportion of soil and water loss of each erosion unit in the total soil and water loss of the project is shown in the order: tower foundation area > construction road > stretch field area > spanning construction site. The soil and water loss in the tower foundation area accounts for more than 60% of the total soil and water loss in the project. (2) Compared with the original ground, the construction of the tower foundation slope increases the surface runoff. The runoff rate of each type of tower foundation slope is 1.8 to 8.7 times of that in the original ground. Compared with more soil tower foundation slope, more stone tower

收稿日期: 2023-09-08

修回日期: 2023-10-08

资助项目: 国网江苏省电力有限公司科技项目“输变电工程水土保持智能管控系统研究”(J2021072)

第一作者: 王静怡(1973—), 女, 陕西西安人, 学士, 高级经济师, 主要从事输变电工程环保研究和投资分析。E-mail: wjy_js@tom.com

通信作者: 李小朴(1987—), 男, 陕西宝鸡人, 硕士, 高级工程师, 主要从事输变电工程水土保持技术研究。E-mail: 2988@ecpepd.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

foundation slope can reduce 4% to 35% of runoff rate. Planting grass can reduce runoff rate by 20% to 48%. (3) Compared with the original ground, the sediment content increases by 0.5 to 345 times after the construction of the tower foundation slope, and the more soil tower foundation slope increases the most. The more stone tower foundation slope can reduce the sediment content of runoff by 39%~92%. The grass tower foundation slope can reduce the sediment content by 83%~98%. [Conclusion] In the process of power transmission line construction, the tower foundation area is the biggest erosion unit of soil and water loss. Planting grass cover can significantly reduce the sediment yield of the tower foundation area. Vegetation restoration should be carried out in time after the construction of the tower foundation area.

Keywords: sediment content; runoff rate; soil erosion; tower foundation slope; power transmission line engineering

随着国民经济的快速发展,输变电工程项目持续增多,造成了严重的水土流失问题,影响区域环境和人民生产生活环境。输电线路工程作为一种线型生产建设项目工程,具有空间跨度大,扰动点分散,局部点状水土流失强烈等特点^[1-2]。输电线路建设过程中场地修建和平整对地表环境造成扰动,势必导致严重的水土流失,使项目区周边生态环境更加严酷。已有研究表明,输电线路工程产生的水土流失强度是自然侵蚀强度的 4~9 倍^[3]。虽然区域性水土保持综合治理技术已经较为完善,但对输变电工程典型局部水土流失问题的指导性不强。因此,开展输电线路工程水土流失特征研究,可为输电线路工程水土流失治理提供理论依据,对输电线路工程生态环境修复与整治具有重要的现实意义。

输电线路工程是输变电工程重要的组成部分,作为典型“点一线”式分布项目,其主要分为塔基区、牵张场区、跨越施工场地和施工便道 4 个侵蚀单元^[3-4]。对于输变电线路工程水土流失的防治分区而言,其水土流失主要来源及特征具有显著差异。与公路、铁路、管道等线型建设项目不同,输电线路工程具有历时短、总体水土流失强度相对较小,但局部水土流失强的特点^[2]。同时,输变电线路工程水土流失具有明显的不均衡性^[5],塔基区和施工便道是水土流失强度最大的侵蚀单元,属强度侵蚀。此外,研究表明塔基开挖产生的弃土弃渣体,如不采取防护措施,最终甚至可能全部流失^[6],塔基区作为重点侵蚀单元应进行水土保持措施重点布设^[7]。塔基修建过程中,对原地面进行开挖形成大量结构性差、形态复杂的堆积体,随后又将这些堆积体回填形成塔基。土壤与砾石则是塔基边坡的重要组成部分,土石比对土壤侵蚀的影响十分复杂^[8]。砾石的存在可显著抑制堆积体产沙,最大减沙效益可达 84.2%^[9]。康宏亮等^[10]发现在试验开始后 6 min 内,砾石对工程堆积体径流流动具有促进作用,在 12 min 后,砾石对径流流动具有阻碍作

用。植被措施可显著降低生产建设项目堆积体坡面的产流产沙,并且在植被修复 1~2 a 后,草本的水土保持效果最优^[11]。

目前关于输电线路研究多侧重于单一的水土流失状况分析,未能反映出区域范围内的输电线路工程水土流失特点,因此迫切需要明确输电线路工程的水土流失特征。目前针对一般生产建设项目水土流失特点研究较多,而针对输变电类生产建设项目的研究相对较少,特别是其水土流失预防、治理的研究不深入。本文选取 5 条特高压直流输电线路工程的 15 个子线段进行水土流失特征野外调查,并利用人工模拟降雨试验,以原地面为对照,研究不同质地及植草条件下塔基边坡径流产沙变化规律,以期对输电线路工程塔基边坡水土流失防治及治理提供科学依据。

1 材料方法

1.1 研究区概况

黄土丘陵区分布广泛,位于太行山西侧,乌鞘岭东侧,长城南侧,秦岭北侧区域,属于温带季风气候,平均降水量 558.4 mm,其中,6—9 月份降水量占全年降水量的 70%以上^[12]。主要土壤类型为黄土,地貌单元以黄土梁、峁为主,梁峁高程一般为 700~1 250 m,一般相对切割深度为 80~150 m,梁多峁少,沟壑发育,冲沟多呈“U”型或“V”型。区域内水土流失严重,生态环境脆弱,以水力侵蚀和风力侵蚀为主,多年平均土壤侵蚀模数 1 000~3 000 t/km²。针对黄土丘陵区输电线路工程,本研究选取了 4 条±800 kV 特高压直流输电线路工程和 1 条±1 100 kV 特高压直流输电线路工程,共计 15 个子线段进行水土流失特征野外调查。

1.2 试验设计及过程

根据野外调查,被调查塔基边坡 90%以上砾石质量含量小于 40%,平均坡度在 35°左右,因此选取具有代表性塔基土壤质地,按砾石所占土石体比重配

置2种土石体类型:偏土质(10%)、偏石质(30%),坡度为35°,并以原地面对照(坡度为10°),修建试验小区。小区设计为长3.0 m,宽1.0 m,用2 mm钢板进行围挡,埋入地下30 cm深。种草小区采用移植的方法,人工移植两年生冰草,挑选健康长势良好的冰草,将其植入塔基边坡20~30 cm深处,以30 cm株行距布设。所有小区修建完成后放置3个月,待冰草扎根且正常生长后开始模拟降雨试验。

降雨强度根据当地多年短历时侵蚀性典型暴雨特性^[13-14],设计为1.0 mm/min和1.5 mm/min,试验时长设计为24 min(产流后开始计时)。模拟降雨设备采用人工模拟降雨棚,降雨器喷头高度为3.0 m,喷头间距1.0 m,雨滴终速接近天然降雨,均匀度在90%以上。试验前,用遮雨布对试验小区进行遮挡,率定雨强使误差在±5%以内,达到设计雨强后,快速揭开遮雨布,待塔基边坡产流后开始计时,并在试验小区集流槽出口处用径流桶接取径流泥沙样,同时记录接样时间。塔基边坡产流初期0~3 min,每1 min取1次径流泥沙样品,3 min后每3 min取1次径流泥沙样品。采用烘干法确定接取样品中的泥沙重量。

1.3 数据处理

(1) 降雨均匀度(K):采用均匀性公式计算,计算式为:

$$K = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n \frac{x_i - \bar{x}}{n\bar{x}}}{n} \quad (1)$$

式中: K 为降雨均匀度; x_i 为测点降雨量; \bar{x} 为测量点平均降雨量; n 为测量点数。

(2) 径流率(Q):单位时间内试验小区内径流泥沙样品重量减去烘干后泥沙质量(L/min),计算式为:

$$Q = \frac{0.06(m_2 - m_1)}{\rho t} \quad (2)$$

式中: Q 为径流率(L/min); m_1, m_2 分别为接样 t 时间内烘干泥沙重量和 t 时间内采集浑水重量; ρ 为水的密度(1.0 g/cm³); t 为接样时间(s)。

(3) 径流含沙量(S):单位时间内试验小区内烘干后泥沙质量比上径流量(g/L),计算式为:

$$S = \frac{m_1}{m_2 - m_1} \quad (3)$$

(4) 次降雨总产沙量(S_T):次降雨后试验小区总产沙量,利用产沙率计算得到,计算式为:

$$S_T = \sum_{i=1}^{n_1} s_1 \cdot t_1 + \sum_{i=4}^{n_2} s_2 \cdot t_2 \quad (4)$$

式中: S_T 为次降雨下试验小区总产沙量(g); s_1, s_2 分别为前3 min每分钟的产沙率和3 min后每3 min测定的产沙速率(g/min); t_1 取值为1 min, t_2 取值为3 min。

2 结果与分析

2.1 输电线路工程各侵蚀单元水土流失特征

塔基区、施工道路及牵张场等是输电线路工程主要的侵蚀单元,其水土流失特征具有不均衡性且存在显著差异^[3,5,15]。输电线路工程各侵蚀单元在施工期和自然恢复期水土流失所占比例如图1所示。由图1可知,不同时期输电线路工程各侵蚀单元水土流失特征存在明显差异。其中,塔基区、牵张场区、跨越施工场地和施工便道在施工期和自然恢复期水土流失所占比例分别为31%~79%,0.2%~29%,0.4%~15%,12%~46%(施工期)和37%~76%,0.2%~29%,1%~15%,14%~43%(自然恢复期)之间变化。此外,施工期和自然恢复期各侵蚀单元水土流失占项目总水土流失比例表现为相同的变化规律,其大小均依次表现为塔基区>施工便道>牵张场区>跨越施工场地,两个时期塔基区水土流失量占总水土流失量的平均值均在60%以上。由此可知,施工期和自然恢复期塔基区均为水土流失最大的侵蚀单元。这主要是因为塔基区在施工期的开挖会形成大量结构性差且松散的堆积体,建成后运行期塔基边坡极易发生水土流失等方面原因导致^[3]。因此,在输电线路工程水土流失防治过程中应重点对塔基区进行防护。

2.2 输电线路工程塔基边坡产流特征

降雨径流是塔基边坡发生侵蚀的原始动力,研究降雨过程中径流率变化特征具有重要意义^[16]。图2为1.0 mm/min和1.5 mm/min降雨强度条件下各塔基边坡径流率随时间变化过程及其平均径流率特征。由图可知,不同塔基边坡径流率存在明显差异,两种降雨强度条件下,各塔基边坡径流率均随时间变化呈先缓慢增大后平稳的变化趋势。整体上,两种降雨强度下,各塔基边坡径流率均在产流9 min后趋于稳定。与原地面对比,塔基边坡均增加了地表产流。1.0 mm/min雨强下,各塔基边坡径流率依次表现为偏土质边坡>偏土质种草边坡>偏石质边坡>偏石质种草边坡>原地面对,分别在1.96~2.80 L/min,1.50~2.18 L/min,1.01~2.02 L/min,0.90~1.69 L/min,0.17~0.40 L/min之间变化。1.5 mm/min雨强下,各塔基边坡径流率大小则依次表现为偏石质边坡>偏土质边坡>偏土质种草边坡>偏石质种草边坡>原地面对,分别在1.31~4.41 L/min,2.76~4.32 L/min,1.44~2.82 L/min,1.29~2.01 L/min之间变化。对平均径流率而言,1.0 mm/min和1.5 mm/min雨强下,偏土质边坡、偏石质边坡、偏土质种草边坡、偏石质种草边坡分别是原地面对

的 4.5~8.7 倍和 1.8~3.6 倍。此外,偏土质边坡径流率均大于偏石质边坡径流率,1.0 mm/min 和 1.5 mm/min 雨强下,偏石质边坡可减少 29%~35%和 4%~22%径流率,在相同质地塔基边坡,种植草被可

分别减少 20%~26%和 36%~48%径流率。由此可见,输电线路工程修建塔基后塔基边坡相比原地面可以显著增加地表产流,偏石质和种草均可以减少塔基边坡地表径流的产生。

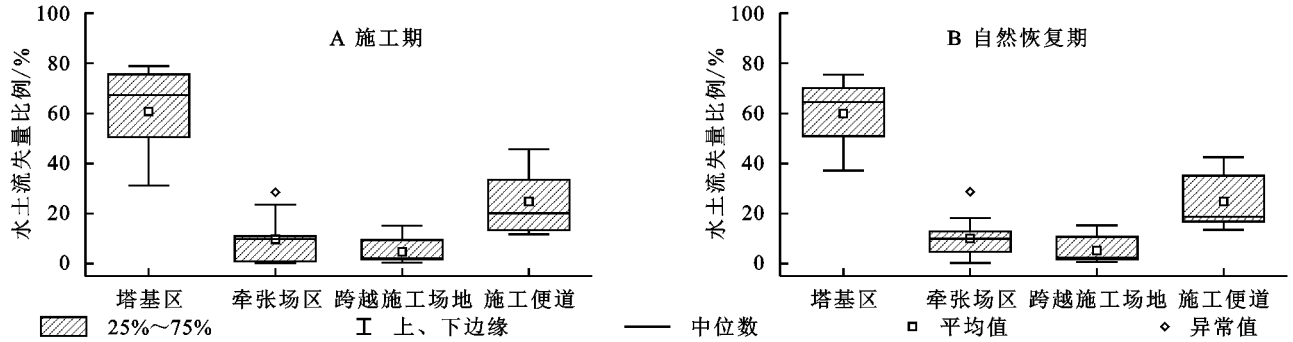


图 1 不同时期输电线路工程各侵蚀单元水土流失所占比例

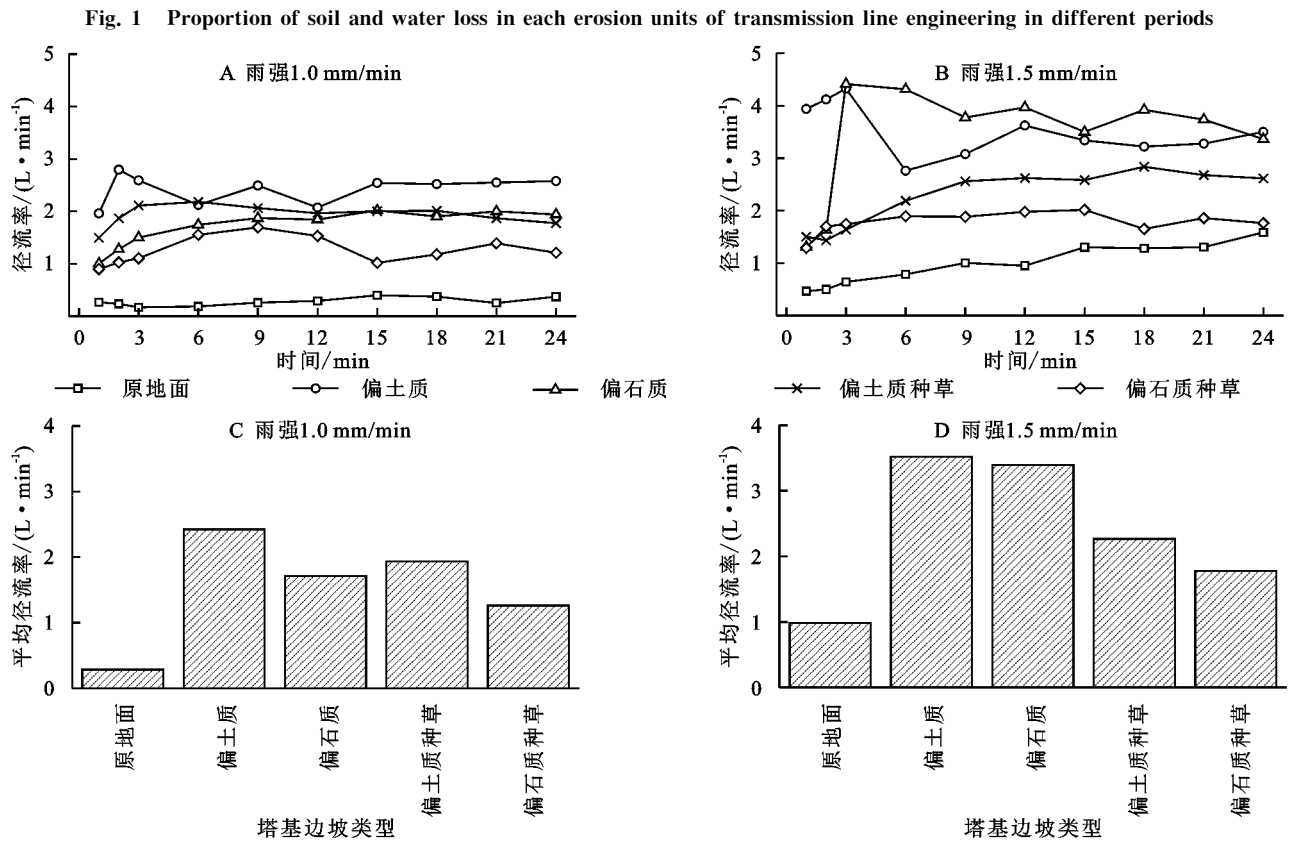


图 2 两种降雨条件下不同塔基边坡径流率随时间变化及其平均值特征

Fig. 2 Variation and average characteristics of runoff rate of different tower foundation slopes over time under two rainfall conditions

2.3 输电线路工程塔基边坡产沙特征

径流含沙量变化是反映土壤侵蚀过程水沙关系演变的重要指标^[17]。两种降雨强度条件下,不同塔基边坡径流含沙量随时间变化及其平均值特征如图 3 所示。由图可知,在降雨前期偏土质塔基边坡径流含沙量显著高于其他类型塔基边坡以及原地面,在产流后 12 min(1.0 mm/min)和 9 min(1.5 mm/min)后,各类型塔基边坡及原地面径流含沙量趋于稳定的变化趋势。对于偏土质的塔基边坡,两种降雨强度条

件下,径流含沙量在试验前期均呈先增大后减小,随后趋于稳定的变化,偏土质初期(前 3 min)径流含沙量是其他类型边坡的 9~1 027 倍。对于偏石质塔基边坡、偏土质种草塔基边坡和偏石质种草边坡径流含沙量在 1.0 mm/min 雨强下随时间变化呈先减小后趋于稳定的变化趋势;在 1.5 mm/min 雨强下,则基本上呈先增大后减小,再趋于稳定的变化趋势。1.0 mm/min 和 1.5 mm/min 雨强下,原地面、偏土质、偏石质、偏土质种草和偏石质种草边坡最终稳定后平均

值分别为 2.05 g/L, 9.22 g/L, 1.27 g/L, 13.42 g/L, 2.34 g/L 和 1.74 g/L, 4.78 g/L, 5.04 g/L, 11.75 g/L, 2.09 g/L。对于平均含沙量而言, 1.0 mm/min 和 1.5 mm/min 雨强下, 偏土质塔基边坡径流含沙量分别是原地面的 116 倍、13 倍、61 倍、101 倍和 102 倍、11 倍、6 倍、70 倍。相对原地面, 修建塔基边坡后径流含沙量显著增

加, 增加了 0.5~345 倍, 其中偏土质边坡增加最大。相同植被条件下, 偏石质比偏土质塔基边坡可减少 39%~92% 径流含沙量。在相同质地塔基边坡条件下, 植草可以显著减少 83%~98% 的径流含沙量。这表明塔基边坡的修建会显著增加地表土壤侵蚀, 而种植植被则可以有效减少土壤侵蚀, 因此在塔基边坡修建后应及时进行植被恢复。

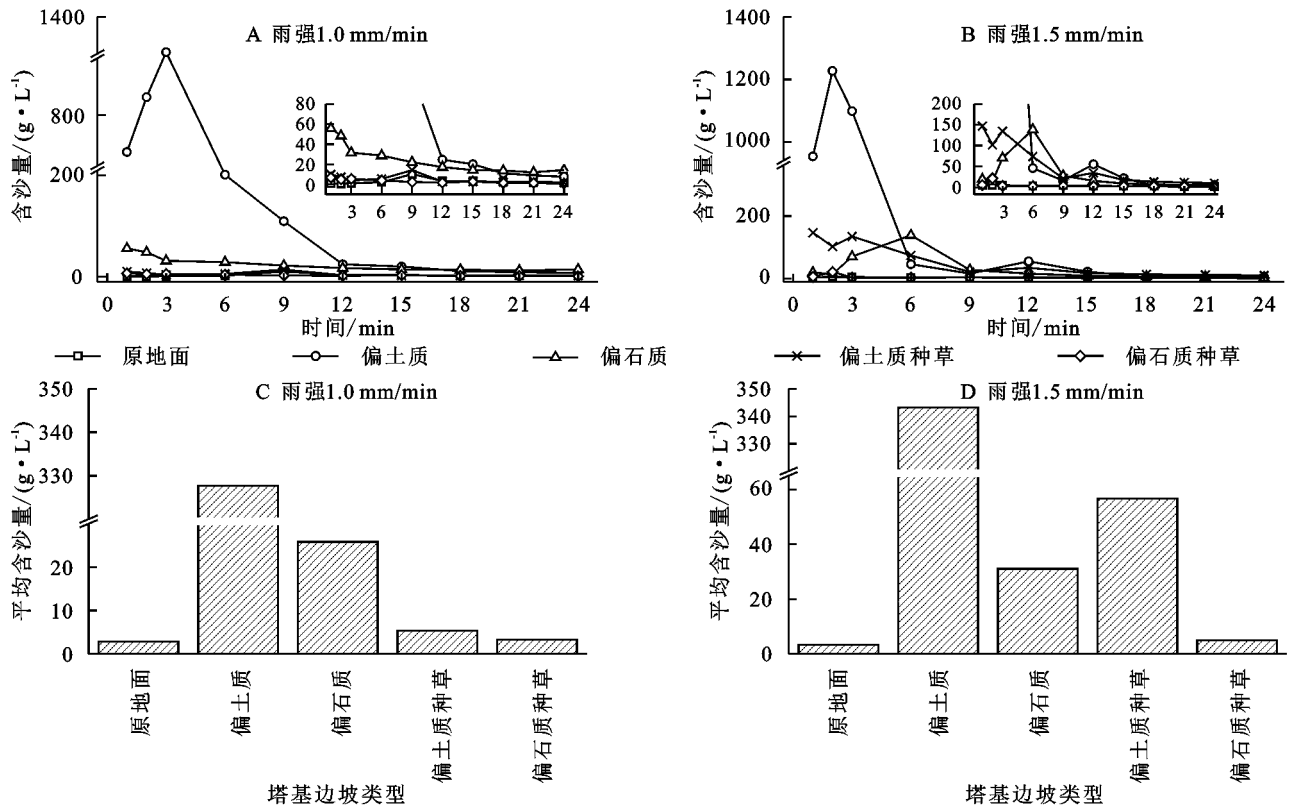


图3 两种降雨条件下不同塔基边坡径流含沙量随时间变化及其平均值特征

Fig. 3 Variation and average characteristics of runoff sediment content of different tower foundation slopes over time under two rainfall conditions

由图4可知, 塔基边坡总产沙量明显大于原地面, 同时不同塔基边坡总产沙量存在显著差异。相同降雨强度下, 偏土质塔基边坡总产沙量远大于其他质地塔基边坡, 这主要是因为试验过程中偏土质塔基边坡土体失稳下滑, 发生泥石流现象使其产沙量大量增加。各塔基边坡总产沙量大小依次表现为偏土质>偏石质>偏土质种草>偏石质种草>原地面。相同质地条件下, 植草塔基边坡可减少89%~99%的总产沙量。由此可见, 植草可以显著减少塔基边坡总侵蚀量。

2.4 塔基边坡径流对产沙的影响

图5为不同塔基边坡的含沙量与径流率的关系特征。回归分析表明, 原地面径流含沙量与径流率关系不显著($p=0.228$), 偏土质塔基边坡含沙量随径流率增大呈显著的对数函数关系($p<0.01$)。偏石质塔基边坡含沙量随径流率增大呈显著的指数函数关系。而植草条件下偏土质边坡和偏石质边坡含沙量均随径流率增大呈显著的幂函数减小关系($p<0.01$)。

3 讨论

砾石含量是影响坡面径流侵蚀的关键内在因素^[18]。研究表明, 对于径流率, 偏石质塔基边坡相比偏土质边坡可减少4%~35%(图2); 对于径流含沙量, 偏石质塔基边坡比偏土质塔基边坡可减少39%~92%(图3), 表明砾石对坡面径流和侵蚀产沙存在显著影响。土壤中掺杂砾石, 可以改变土壤的入渗路径、速率、坡面流速以及土壤抗蚀性, 从而影响侵蚀过程中的径流、泥沙的产生^[19]。偏石质塔基边坡径流率小于土质坡面, 主要是砾石增加坡面土壤入渗的结果。对于砾石增加坡面土壤的入渗速率主要是因为砾石存在可以增加土壤中的孔隙度, 有利于增加土壤入渗的结果^[20]。但是也有研究认为砾石作为难透水介质混在土壤中会增加土壤入渗路径, 进而减小土壤入渗速率^[21]。总之, 砾石对入渗的影响与砾石大小、形状、含量等因素具有密切的相关

性^[22]。此外,随着坡面表层土壤被侵蚀输移,土壤中的砾石逐渐裸露形成地表砾石覆盖,在土壤表面形成一层保护层,减少了土壤侵蚀^[23-24]。砾石可以增加地表粗糙度,具有减缓水流的作用,从而减弱地表径流的挟沙能力,减少坡面侵蚀^[25]。此外,在相同质地塔基边坡条件下,植草后可分别减少 20%~48% 径流率,减少 83%~98% 的径流含沙量,减少 89%~99% 的总产沙量(图 2,图 3,图 4),主要是植被在坡面水土流失防治中发挥着积极作用,植被可通过截留降雨,降低雨滴动能,削弱径流搬运泥沙能力,从根本上减少坡面

水土流失^[26]。植被还可以通过根系在土壤中穿插网络将土壤缠绕固结在一起,也可以通过促进团聚体形成,稳定土壤结构,提高土壤抗侵蚀能力。植物措施作为水土保持三大措施之一,在减少土壤侵蚀、改良土壤性状等方面都有着不可替代的作用,并且植物措施还有着工程措施无法比拟的优势^[27]。根据生态优先原则,在有条件的情况下,塔基边坡水土流失治理应优先考虑植物措施。因此,在输电线路工程的塔基水土流失治理过程中,应根据因地制宜、适地适树的原则,选择乡土植被进行布设和恢复。

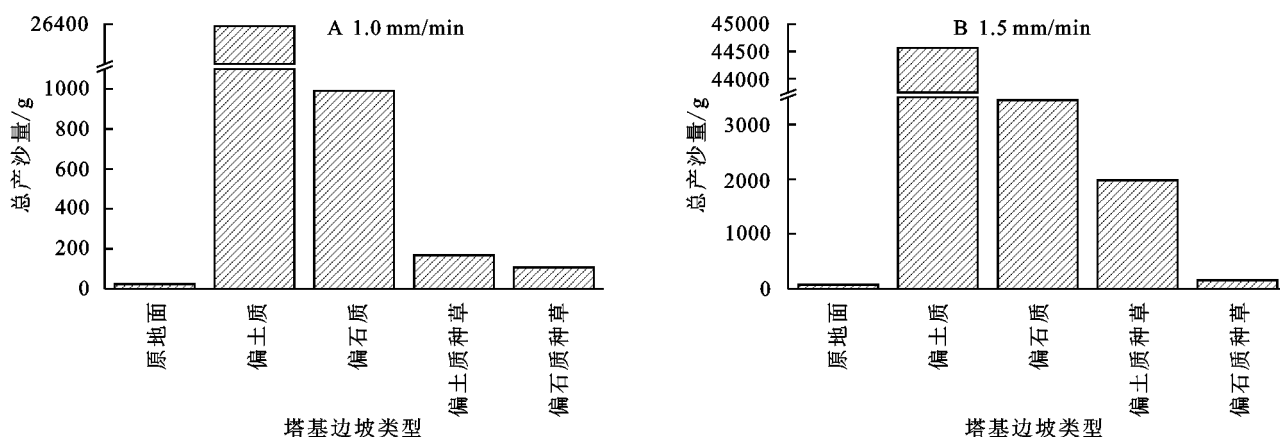


图 4 不同塔基边坡总产沙量变化特征

Fig. 4 Variation characteristics of total sediment yield of different tower foundation slopes

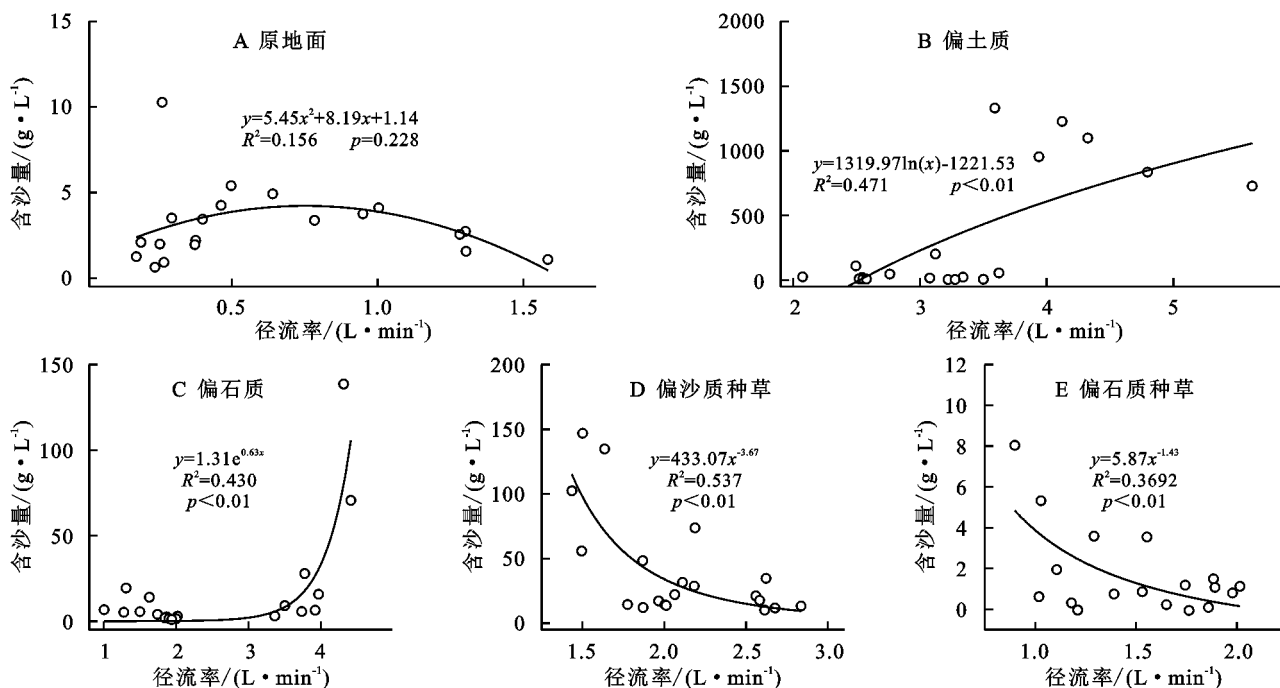


图 5 不同塔基边坡含沙量与径流率的关系特征

Fig. 5 Relationship between runoff and sediment yield of different tower foundation slopes

4 结论

(1) 不同时期输电线路工程各侵蚀单元水土流失特征存在明显差异。各侵蚀单元水土流失占项目

总水土流失比例大小依次表现为塔基区>施工便道>牵张场区>跨越施工场地。塔基区是输电线路工程水土流失最大的侵蚀单元,均占输电线路工程总水土流失量的 60% 以上。

(2) 不同塔基边坡径流率存在明显差异,各塔基边坡径流率均在产流 9 min 后趋于稳定变化趋势。与原地面相比,修建塔基边坡增加了地表产流。塔基边坡径流率是原地面的 1.8~8.7 倍。相比土质塔基边坡,偏石质边坡可减少 4%~35%;在相同质地塔基边坡,种植草被可分别减少 20%~26% 和 36%~48% 径流率。

(3) 相对原地面,修建塔基边坡后增加了 0.5~345 倍径流含沙量,其中偏土质增加最大。偏石质比偏土质塔基边坡可减少 39%~92% 含沙量。在相同质地塔基边坡条件下,种植草被可以显著减少 83%~98% 含沙量。偏土质和偏石质塔基边坡含沙量与径流率分别呈对数函数和指数函数关系。植草条件下的偏土质和偏石质塔基边坡含沙量与径流率呈幂函数关系。塔基边坡修建后应及时进行植被恢复。

参考文献(References):

- [1] 刘卉芳,徐永年,池春青,等.云南省输变电工程水土流失特点浅析[J].水土保持研究,2008,15(2):133-135,138.
Liu H F, Xu Y N, Chi C Q, et al. Water and soil loss of power transmission engineering in Yunnan Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15 (2):133-135,138.
- [2] 闫超,张娜娜,赵言文.江苏省输变电类生产建设项目水土流失特点分析[J].江西农业学报,2013,25(10):114-117.
Yan C, Zhang N N, Zhao Y W. Characteristics of water and soil loss in power transmission engineering in Jiangsu Province [J]. Acta Agriculturae Jiangxi, 2013, 25 (10):114-117.
- [3] 潘明九,丰佳,王文龙,等.山丘区输电线路工程水土流失特征及治理技术对比研究[J].水土保持研究,2023,30 (1):47-53.
Pan M J, Feng J, Wang W L, et al. Comparative study on soil and water loss characteristics and control technology of transmission line engineering in hilly area [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(1):47-53.
- [4] 彭瑶,付丽,汤建熙,等.江苏省输变电类开发建设项目水土流失特点及防治管理措施[J].中国水土保持,2013 (2):5-8.
Peng Y, Fu L, Tang J X, et al. Characteristics of soil and water loss in development and construction projects of power transmission and transformation in Jiangsu Province and its prevention and management measures [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(2):5-8.
- [5] 陈卓鑫,李魁,王文龙,等.不同类型山丘区输变电线路工程水土流失的来源、影响因素及措施体系配置[J].水土保持通报,2021,41(4):151-157,240.
Chen Z X, Li K, Wang W W, et al. Sources, influen-
- cing factors, and controlling measures configuration of soil and water loss in power transmission line projects in different hilly and mountainous regions [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(4):151-157, 240.
- [6] 张贞,刘国东,贺亮.康定 500kV 输变电工程水土流失防治措施及生态恢复对策[J].亚热带水土保持,2008,20 (2):60-63.
Zhang Z, Liu G D, He L. Prevention and control measures of soil erosion and ecological restoration countermeasures of Kangding 500kV power transmission and transformation project [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2008, 20(2):60-63.
- [7] 许佩瑶,楚秀杰,翟雅,等.输变电工程水土保持技术探讨[J].亚热带水土保持,2013,25(1):54-56.
Xu P Y, Chu X J, Zhai Y, et al. Discussion on soil and water conservation technology of power transmission and transformation project [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2013, 25(1):54-56.
- [8] 吕佼容,张文博,胡锦昇,等.连续降雨下不同砾石含量工程堆积体土壤侵蚀[J].水科学进展,2019,30(2):210-219.
Lyu J R, Zhang W B, Hu J S, et al. Effects of rock fragment content on erosion characteristics of spoil heaps under multiple rainfall events [J]. Advances in Water Science, 2019, 30(2):210-219.
- [9] 李瑞栋,王文龙,娄义宝,等.模拟降雨条件下砾石含量对壤土工程堆积体坡面产流产沙的影响[J].应用生态学报,2022,33(11):3027-3036.
Li R D, Wang W L, Lou Y B, et al. Effects of gravel content on runoff and sediment yield on Lou soil engineering accumulation slopes under simulated rainfall conditions [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(11):3027-3036.
- [10] 康宏亮,王文龙,薛智德,等.北方风沙区砾石对堆积体坡面径流及侵蚀特征的影响[J].农业工程学报,2016, 32(3):125-134.
Kang H L, Wang W L, Xue Z D, et al. Effect of gravel on runoff and erosion characteristics on engineering accumulation slope in windy and sandy area, Northern China [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(3):125-134.
- [11] 周涛,苏正安,刘刚才,等.工程堆积体典型生态修复措施对土壤侵蚀水动力过程的影响[J].农业工程学报, 2022, 38(9):91-100.
Zhou T, Su Z A, Liu G C, et al. Effects of typical ecological restoration measures for engineering accumulation on sediment yield and hydrodynamic process [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2022, 38(9):91-100.
- [12] 徐学选,张北赢,踞桐军.黄土丘陵区降雨、径流、土壤

- 水分的时空分布与利用对策[J].生态环境,2005,14(6):890-893.
- Xu X X, Zhang B Y, Ju T J. The Spatial-temporal distribution of rainfall, runoff, and soil water in small watershed and its utilization[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2005,14(6):890-893.
- [13] 陈翠红,郑世清,田风霞,等.黄土丘陵区土质裸露路面冲刷过程模拟试验研究[J].水土保持研究,2010,17(2):45-48,53.
- Chen C H, Zheng S Q, Tian F X, et al. Comparative stimulation research of the erosion process on earth covered roads in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2010,17(2):45-48,53.
- [14] 王雪松,谢永生.模拟降雨条件下锥状工程堆积体侵蚀水动力特征[J].农业工程学报,2015,31(1):117-124.
- Wang X S, Xie Y S. Hydrodynamic characteristics of tapered spoilbank under simulated rainfall condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015,31(1):117-124.
- [15] 聂慧莹,冯华,王文龙,等.山丘区输变电工程侵蚀环境及水土流失特征[J].水土保持研究,2022,29(2):50-56.
- Nie H Y, Feng H, Wang W L, et al. Characteristics of erosion environment and soil and water losses induced by power transmission and transformation project in hilly area[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(2):50-56.
- [16] 李建明,王文龙,王贞,等.神府东胜煤田弃土弃渣体径流产沙过程的野外试验[J].应用生态学报,2013,24(12):3537-3545.
- Li J M, Wang W L, Wang Z, et al. A field experiment of runoff and sediment yielding processes from residues in Shenfu-Dongsheng Coalfield[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2013,24(12):3537-3545.
- [17] 王贞,王文龙,金剑,等.神东煤田扰动地面与原地面产流产沙及水动力学参数对比[J].中国水土保持科学,2010,8(6):69-74.
- Wang Z, Wang W L, Jin J, et al. Comparison of runoff generation, sediment yield and hydrodynamic parameters on the undisturbed and the disturbed land surface in the Shenfu-Dongsheng Coalfield[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2010,8(6):69-74.
- [18] 史倩华,王文龙,郭明明,等.模拟降雨条件下含砾石红壤工程堆积体产流产沙过程[J].应用生态学报,2015,26(9):2673-2680.
- Shi Q H, Wang W L, Guo M M, et al. Runoff and sediment yielding processes on red soil engineering accumulation containing gravels by a simulated rainfall experiment[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015,26(9):2673-2680.
- [19] 王雪松,谢永生,陈曦,等.砾石对赣北红土工程锥状堆积体侵蚀规律的影响[J].泥沙研究,2015(1):67-74.
- Wang X S, Xie Y S, Chen X, et al. Effects of rock fragment on soil erosion rule of engineering pyramidal accumulation in Northern Jiangxi[J]. Journal of Sediment Research, 2015(1):67-74.
- [20] 符素华,路炳军,叶芝菡.地表砾石对降雨径流及土壤侵蚀的影响[J].水土保持学报,2010,24(2):15-18,34.
- Fu S H, Lu B J, Ye Z H. Effects of rock fragments on runoff and soil erosion[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010,24(2):15-18,34.
- [21] 牛耀彬.降雨和上方来水条件下工程堆积体土壤侵蚀特征研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- Niu Y B. Study on Characteristics of Soil Erosion of Engineering Accumulation under the Conditions of Rainfall and Inflow[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2019.
- [22] 甘凤玲,何丙辉,王涛.人工模拟降雨下汶川震区滑坡堆积体产沙规律[J].农业工程学报,2016,32(12):158-164.
- Gan F L, He B H, Wang T. Sediment characteristic of landslide accumulation body in earthquake zone of Wenchuan under artificial rainfall simulation condition[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016,32(12):158-164.
- [23] Smets T, López-Vicente M, Poesen J. Impact of subsurface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2011,36(14):1929-1937.
- [24] Wang X Y, Li Z X, Cai C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. Geomorphology, 2012,151/152:234-242.
- [25] Foster G R, Johnson C B, Moldenhauer W C. Hydraulics of failure of unanchored cornstalk and wheat straw mulches for erosion control[J]. Transactions of the ASAE, 1982,25(4):940-947.
- [26] 聂慧莹.苜蓿种植密度对工程堆积体坡面侵蚀的影响[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2021.
- Nie H Y. Effect of Medicago Sativa Planting Density on Slope Erosion of Engineering Accumulation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2021.
- [27] 赵永军,陈吉虎,王云璋.开发建设项目水土保持方案中植物措施的配置[J].中国水土保持,2007(8):17-20,60.
- Zhao Y J, Chen J H, Wang Y Z. Configuration of plant measures prepared in a soil and water conservation plan of development and construction projects[J]. Soil and Water Conservation in China, 2007(8):17-20,60.