

# 输变电线路塔基区不同植被模式下边坡水土流失特征

吕铭<sup>1</sup>, 王振浩<sup>2</sup>, 张琦<sup>1</sup>, 焦勇<sup>2</sup>, 许志勇<sup>2</sup>, 张吉<sup>1</sup>, 计霖<sup>1</sup>

(1. 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院, 沈阳 110015; 2. 国网辽宁省电力有限公司, 沈阳 110015)

**摘要:** [目的] 明确山地丘陵区输变电工程塔基区水土流失特征及水沙关系, 减少水土流失对地区生态环境的影响。[方法] 以辽西山丘区输变电线路工程中侵蚀最为严重的塔基区为研究对象, 采用模拟放水试验以裸坡(CK)为对照, 分别设计流量为5, 10, 15, 20 L/min, 研究冰草、鹅绒藤、冰草+沙棘坡面(BC, ER, BG)的径流产沙特征及水沙关系。[结果] (1) 不同放水流量条件下径流率均呈先快速增大后呈稳定波动的变化趋势, 其中BG坡面对于塔基区径流的阻滞效果最好。(2) 放水流量在5~15 L/min时坡面侵蚀速率相对稳定, 波动变化并不明显, 随放水流量增大, 塔基区坡面侵蚀速率明显提高, 总体呈“多峰多谷”的变化趋势, 其中BC, BG对坡面的减蚀效果最显著。(3) 除CK坡面外, 植被配置坡面侵蚀速率与径流率之间呈幂函数的变化关系( $R^2=0.60\sim0.84$ ,  $N=76$ )。总体上, 塔基坡面有无植被防护措施, 都表现为水大沙大的变化趋势。[结论] 冰草与沙棘混种(BG)能有效阻滞径流并显著减少侵蚀, 且植被坡面侵蚀速率与径流率呈幂函数关系, 表明植被措施能有效调控塔基区水沙关系。

**关键词:** 辽西山丘区; 塔基边坡; 原位放水冲刷; 输变电线路工程

中图分类号: S157.1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0035-07

## Soil erosion characteristics of slopes under different vegetation patterns in tower foundation areas of power transmission and transformation lines

Lyu Ming<sup>1</sup>, Wang Zhenhao<sup>2</sup>, Zhang Qi<sup>1</sup>, Jiao Yong<sup>2</sup>, Xu Zhiyong<sup>2</sup>, Zhang Ji<sup>1</sup>, Ji Lin<sup>1</sup>

(1. Economic and Technical Research Institute, State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110015, China; 2. State Grid Liaoning Electric Power Supply Co., Ltd., Shenyang 110015, China)

**Abstract:** [Objective] This study aims to clarify the characteristics of soil erosion and the water-sediment relationship in the tower foundation areas of power transmission and transformation projects in hilly regions, and to mitigate the impact of soil erosion on the regional ecological environment. [Methods] The tower foundation area with the most severe erosion in the power transmission and transformation line project in the hilly region of western Liaoning was taken as the research object. Simulated runoff experiments were conducted using bare slopes (CK) as the control. Flow rates were set at 5, 10, 15 and 20 L/min to investigate the runoff-sediment yield characteristics and water-sediment relationship of slopes vegetated with *Agropyron cristatum* (BC), *Cynanchum chinense* (ER), and *Agropyron cristatum* + *Hippophae rhamnoides* (BG). [Results] (1) Under different flow conditions, the runoff rate initially increased rapidly and then stabilized with fluctuations, with the BG slope showing the best blocking effect on runoff in the tower foundation area. (2) When the flow rate was 5~15 L/min, the slope erosion rate remained relatively stable with minor fluctuations. As the flow rate increased, the slope erosion rate in the tower foundation area significantly increased, showing an overall “multi-peak and multi-valley” trend. The BC and BG slopes demonstrated the most significant erosion reduction effects. (3) Except for the CK slope, there was a power function relationship between erosion rate and runoff rate on vegetated slopes ( $R^2 =$

收稿日期: 2024-09-19

修回日期: 2025-05-20

接受日期: 2025-05-29

资助项目: 国网辽宁省电力有限公司经济技术研究院“山丘区输变电工程侵蚀环境及水土流失特征研究”(SGLNLY00SJS2310050)

第一作者: 吕铭(1982—), 男, 辽宁盘锦市人, 学士, 高级工程师, 主要从事输变电工程水土保持研究。E-mail: 79593189@qq.com

<https://stbcjy.publish.founderss.cn>

0.60~0.84,  $N = 76$ ). In general, irrespective of vegetation protection measures on the tower foundation slopes, an overall trend of higher runoff leading to higher sediment yield was observed. [Conclusion] The *Agropyron cristatum* + *Hippophae rhamnoides* (BG) can effectively block runoff and significantly reduce erosion. Furthermore, the erosion rate on vegetated slopes shows a power function relationship with runoff rate, indicating that vegetation measures can effectively regulate the water-sediment relationship in the tower foundation areas.

**Keywords:** hilly region of western Liaoning; tower foundation slope; in-situ flow scouring; power transmission and transformation line project

改革开放以来,随着国民经济的发展,输变电线路工程日益增多,一方面促进了地区经济的快速发展<sup>[1]</sup>。另一方面,输变电线路工程也造成了严峻的水土流失问题,严重影响区域环境和人民生活环境<sup>[2]</sup>。在输变电线路建设过程中,不可避免地增加对地表的破坏,并对原始植被产生影响<sup>[3-4]</sup>。有研究表明,输变电线路工程产生的水土流失强度是自然侵蚀强度的49倍,尤其是在山丘区,因其特殊的地形地质条件侵蚀更为明显<sup>[5]</sup>。

当前,关于输变电工程水土流失特点的研究较为充分<sup>[67]</sup>。其中,汪黎东等<sup>[8]</sup>指出,输变电项目建设与当地气候、土壤、植被、地形地貌等自然环境要素密切相关。其中,气候和地形地貌对输变电线路水土流失影响更为显著。同时,不同侵蚀类型区输变电线路工程具有不同的侵蚀区域性特征,同时,由于我国山丘区面积广阔,占到全国总面积的70%<sup>[9]</sup>。因山丘区地形起伏较大等特殊的侵蚀特点,输变电项目施工过程中往往容易造成严重的水土流失,土壤侵蚀模数可达平原区的1.7倍之多<sup>[10]</sup>。加之我国山地丘陵区大多生态环境脆弱,社会经济发展较为落后,修建过程中不可避免地跨越山地<sup>[11]</sup>,在交通不便的地区坡面上修建塔基区不仅利于径流的流动,加剧了侵蚀<sup>[12]</sup>,而且由于不断下切土壤形成宽而深的切沟,也不同程度地增加坡面不稳定事件的发生<sup>[13]</sup>。近年来,输变电线路工程水土流失治理防护受到学术界的广泛关注<sup>[14]</sup>。由于山丘区输变电线路主要由塔基区和输变电线路两部分组成<sup>[15]</sup>,加之侵蚀过程与传统生产建设项目有所不同,其主要以点、线的侵蚀形式为主。此外,输变电线路往往经过我国的山地丘陵区,由于气候、土壤、地质条件对侵蚀产生极大的不稳定性<sup>[16]</sup>,若缺乏正确的生态恢复及治理措施将对周边生态环境造成巨大影响,因此,对于输变电线路建设过程中水土流失特征的研究不仅有利于地区生态治理,而且对于输变电线路的安全运行至关重要<sup>[17]</sup>。

综上所述,目前对于输变电线路水土流失的研究多停留在水土流失特征的分析上,并未针对不同区域

范围内的水土流失特点制定相应的防治措施。并且,目前国内研究主要针对生产建设项目水土流失的研究<sup>[17]</sup>,而对于新型输变电线路的研究明显不足,特别是针对辽西山地丘陵区的研究则更为鲜见。此外,有研究表明,植被可以改变坡面水文效应,起到改良土壤、增加土壤有机质,减少侵蚀的作用<sup>[18]</sup>。鉴于此,本文以辽西山丘区输变电线路中侵蚀最为严重的塔基区为研究对象,采用坡面放水冲刷的方法,研究不同植被(直根系、须根系、直+须根系)边坡径流产沙过程及对水沙关系的影响,为区域输变电线路水土流失的治理以及生态恢复提供科学理论依据。

## 1 研究区域与研究方法

### 1.1 研究区概况及野外调查

本试验以辽西山地丘陵区为研究区域,选择辽西山丘区4条800 kV直流输电工程以及1条110 kV特高压直流输电线路工程为研究对象。通过野外调查统计其中15条子线段中塔基的调查数据,据此设计试验小区的坡长、坡宽等试验参数,试验区平均海拔400 m以上,地貌类型以山地丘陵为主,丘陵顶部风化严重,高陡边坡为径流侵蚀与冲刷提供了天然条件。此外,该区域气候为典型半干旱大陆性气候,年降水多集中在夏季占到全年降雨量的60%,降雨量为379~500 mm,年蒸发量在1600 mm以上,区域土壤主要以棕壤土、草甸土为主,质地黏重,透水透气性差<sup>[19]</sup>,受特殊的气候、地形以及人为活动的影响,该区域侵蚀类型主要以水蚀为主并伴有风蚀,在春季和夏季坡面水土流失严重。

因此,通过资料收集和野外调查,综合考虑植被高度、盖度、丰富度,选择地区常见乡土植物,如冰草(*Agropyron cristatum*, BC)、鹅绒藤(*Cynanchum chinense*, ER)、冰草+沙棘(*Agropyron cristatum*+*Hippophae rhamnoides*, BG)的植被配置方式作为试验研究坡面植被物种组成,具体植物种及土壤性质见表1。

### 1.2 试验设计

本研究选择3种典型植被配置坡面以及未扰动



面平均径流率分别为12.78,12.69,10.74,10.11 L/min, 植被坡面较CK坡面降低0.70%,16.00%,21.00%,

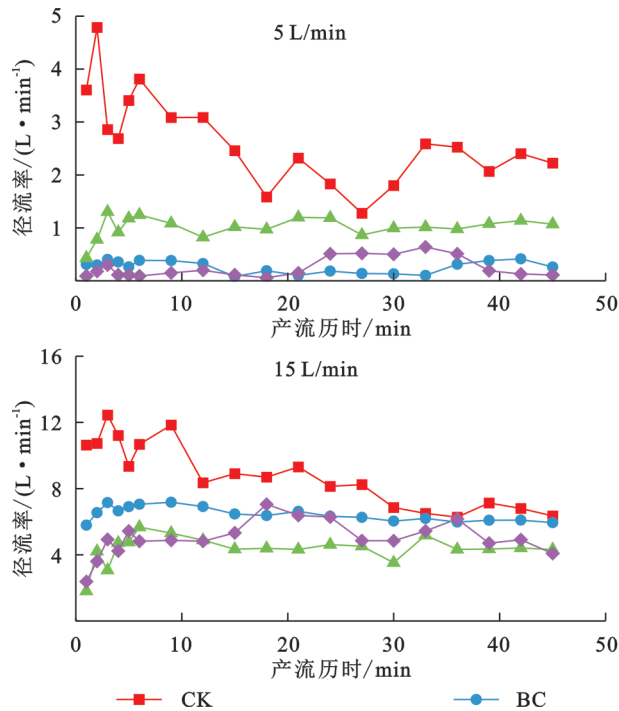


图2 不同植被塔基边坡径流率随产流历时的变化过程

Fig. 2 Variation process of runoff rate with runoff duration on tower foundation slopes under different vegetation types

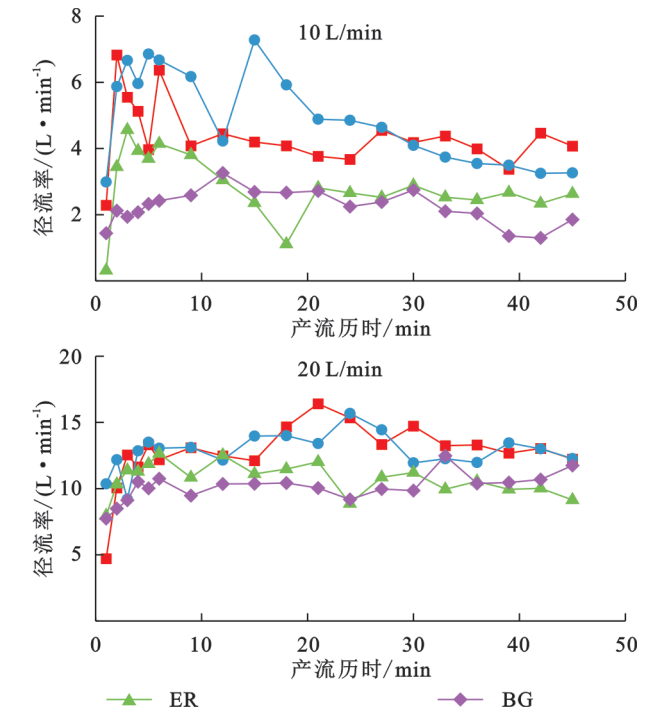
## 2.2 塔基边坡侵蚀速率变化过程

图3为不同植被塔基边坡侵蚀速率随产流历时的变化过程,由图3可以看出,各植被塔基边坡在放水流量小于20 L/min时,各坡面侵蚀速率总体上呈波动变化并逐渐递减的变化趋势,其中CK坡面侵蚀速率在产流前期波动变化剧烈,而草被坡面在整个产流过程中波动变化并不明显;当流量为5 L/min时,植被坡面侵蚀速率明显小于裸坡,CK,BC,ER,BG坡面侵蚀速率分别在318.85~2 657.48,1.97~72.74,419.15~941.72,4.17~162.18 g/min,相较于CK坡面,BC,ER,BG植被配置坡面侵蚀速率分别降低97.6%,34%,92.76%。其中,冰草坡面和冰草+沙棘灌草坡面具有较好的减蚀作用。当放水流量增大至20 L/min时,各个坡面侵蚀速率均明显提高,总体上呈“多峰多谷”的变化趋势,这也表明流量的增加对塔基边坡侵蚀速率的影响较大。其中,裸坡的侵蚀速率在389.73~6 516.00 g/min变化,侵蚀速率为2 787.21 g/min,植被坡面BC,ER,BG侵蚀速率分别为160.5~1 789.25,235.27~4 947.69,507.69~3 454.49 g/min,植被坡面侵蚀速率较CK坡面分别降低71.6%,68.9%,43.8%。这与径流率的变化过程相一致。

## 2.3 不同植被配置条件下塔基边坡水沙关系

图4为输变电路塔基边坡侵蚀速率与径流率的回归拟合分析,由图4可以看出,CK,BC,ER和BG坡

这表明随放水流量的增大各植被配置坡面与CK坡面间差异性逐渐减小。



面侵蚀速率与径流率均呈显著相关( $R^2=0.40\sim 0.84$ ,  $N=76$ ),其中除CK坡面外,其余各坡面拟合结果均为幂函数关系,冰草+沙棘所组成的灌草坡面拟合效果最好( $R^2=0.84$ ,  $p<0.01$ ),而冰草和鹅绒藤坡面拟合关系则相对较弱。此外,无论坡面有无防护措施,随着放水流量的增大坡面径流率增大,径流率的增大也一定程度上进一步促使坡面侵蚀产沙增大。总体上,输变电路塔基边坡水沙关系表现为水大沙大的趋势,而植被的存在一方面由于植被地上部分的存在,减少了降雨打击以及径流对塔基坡面的直接破坏作用;另一方面由于植物地下根系的存在改良了土壤性质,增加土壤毛管孔隙,有利于降雨及坡面径流入渗,进而减少侵蚀搬运的泥沙质量,起到一定减蚀作用。

## 3 讨论

由于输变电路施工具有线路长、跨区域广、扰动点分散以及项目区地形地貌和水土流失类型复杂等综合特点,其水土流失与传统侵蚀存在明显的不同<sup>[21]</sup>。本研究通过对4种不同配置下的坡面放水冲刷试验表明,随放水流量的增大,CK坡面与BC,ER,BG坡面径流率之间的差异逐渐减小,这是因为一方面,在5 L/min时,径流在坡面上漫流冲刷后已经形成了较为明显的径流路径,随放水流量的增大,径流

率波动变化幅度减弱,但总体上仍随放水流量的增大而增大;另一方面,在前期放水过程中,一部分径流逐渐入渗损失,随放水流量的增大,坡面土体水分

逐渐饱和,下渗速率维持稳定,导致CK坡面径流率与有植被措施坡面径流率间差距逐渐缩小。且随流量递增,趋势越发明显。

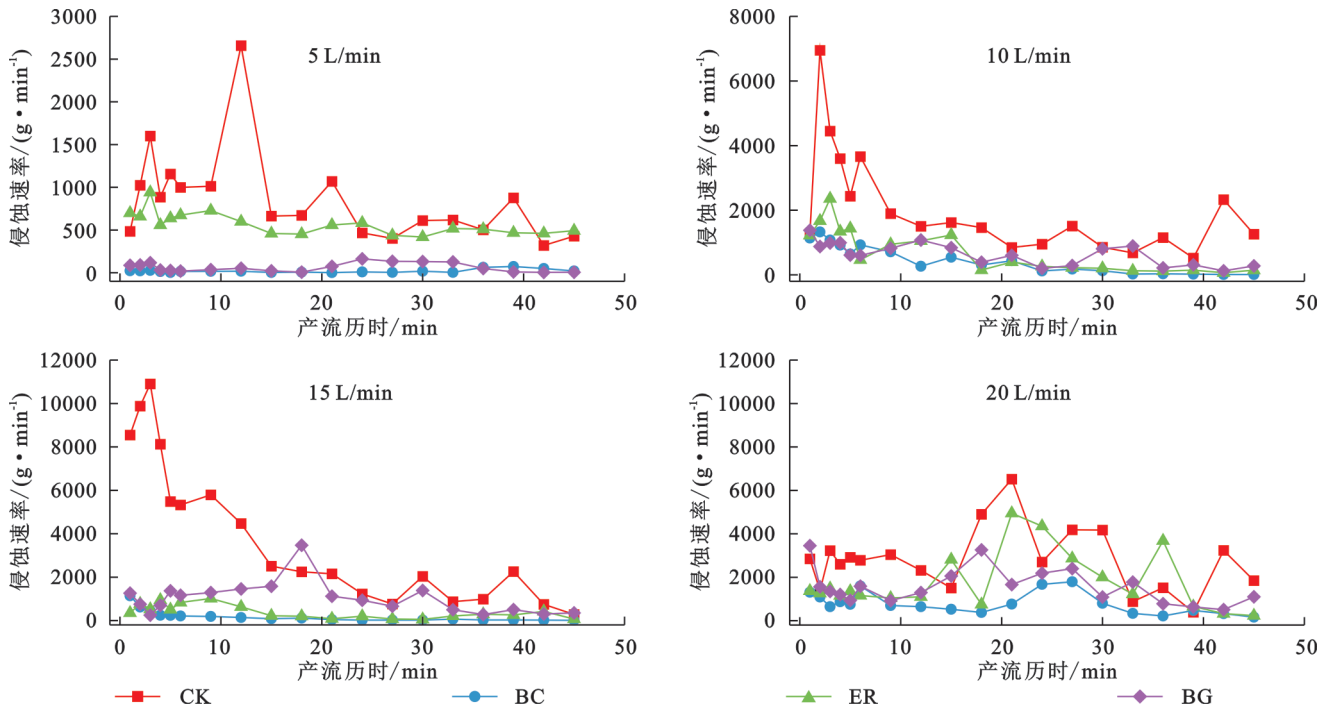


图 3 不同植被塔基边坡侵蚀速率随产流历时的变化过程

Fig. 3 Variation process of erosion rate with runoff duration on tower foundation slopes under different vegetation types

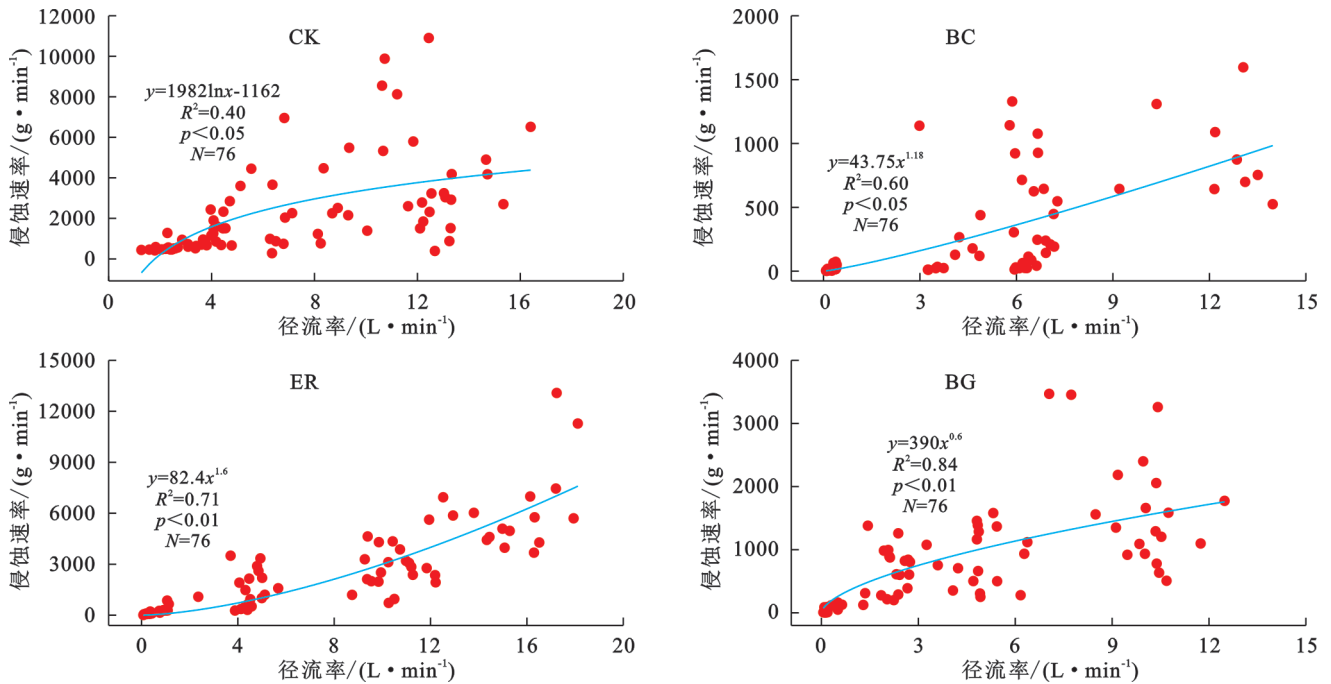


图 4 不同植被塔基边坡侵蚀速率与径流率之间的关系

Fig. 4 Relationship between erosion rate and runoff rate on tower foundation slopes under different vegetation types

坡面侵蚀速率表现为,塔基裸露坡面侵蚀速率波动变化剧烈,这主要是由于辽西山地丘陵区地形坡度较陡修建电网塔基时,高陡边坡更容易汇集径流,促进了坡面细沟的发育。此外,侵蚀速率在 5 L/min 时在产流前期突增,随产流历时逐渐下降,呈明显“多峰

多谷”变化。这是因为,塔基区土壤结构性差,抗蚀抗冲能力差,在坡面产流初期其表面拥有大量可蚀性颗粒,随着径流在坡面漫流,侵蚀速率在单位时间内剥蚀土壤颗粒的量显著增大,因此侵蚀速率呈突变增大。但随产流历时,坡面可蚀性颗粒被搬运完

成,土体接近饱和,水分下渗基本稳定,因而侵蚀速率呈缓慢下降的趋势变化。后随放水流量的增大坡面沟道发育,在径流的侵蚀下切作用下形成较浅的沟壑,随产流历时,沟边土体逐渐崩塌,使得沟道径流暂时被阻滞,侵蚀速率有所下降,崩积物在径流剪切作用下抗剪强度逐渐降低,崩积物被冲散,径流含沙量短时间内迅速提高,侵蚀速率达到又一个峰值,在沟道形成过程中,这种现象不断循环发生,导致坡面侵蚀速率总体上呈现剧烈波动的变化过程<sup>[22]</sup>。与此同时,植被的存在显著降低了塔基坡面径流产沙,在 5 L/min 条件下相较于 CK 坡面,BC,ER,BG 平均侵蚀速率分别降低了 97.60%,34.00%,92.76%(图 3),其中冰草坡面(须根系)和冰草+沙棘坡面(须+直根系)减幅最大。这主要是与植被在水土流失治理中发挥的积极作用有关。一方面,水流冲刷过程中,植被可以增加地表糙率,延长径流路径,延缓水分下渗,起到改变坡面水文条件的作用。其次,植物茎秆在坡面径流流动过程中起到阻滞径流的作用,降低径流搬运泥沙的能力。另一方面,植被地下部分穿插、缠绕,固结土体增加了坡面土壤结构的稳定性,提高了土体抵抗径流分散土体的能力,并通过促进土壤水稳性团聚体的形成改善土体结构,强化水分入渗。作为水土保持三大措施中的一种,在水土流失治理过程中发挥着不可替代的作用,相较于工程措施,植物措施可以减少动土面积,最大限度地减少人为对地表的扰动<sup>[23]</sup>。尤其在辽西山地丘陵沟壑区,生态环境脆弱,塔基区边坡治理应该首先考虑植被恢复等生物措施。其中,本研究发现须根系的冰草以及须根系和直根系混生的灌草坡面在对塔基区域侵蚀的防治过程中效果相较单一直根系更为明显。这是因为须根可以有效增加土壤阻力,以保护土壤免受径流冲刷,阻止径流下切。此外,须根系与直根系的配置则大大提高了根系与土壤的接触面积,增加了土体稳定性,一定程度上有效减少土壤剥离比。因此,在输变电路塔基区生态修复过程中,要按照当地气候、地形地貌等条件综合考虑生态恢复配置措施,选择须根系或灌草搭配的形式进行水土流失防治。

## 4 结论

塔基区边坡 4 种坡面径流率总体上在产流初期快速增大,后呈波动变化的趋势,BG 坡面相较于各坡面对于径流的阻滞效果最好,随流量增大各坡面间径流率差异逐渐减小。塔基区坡面侵蚀速率整体上随放水流量增大波动性显著提高,当放水流量为 20 L/min 时侵蚀速率显著提高,呈明显“多峰多谷”

的波动变化趋势。其中,BC,BG 坡面减蚀作用明显,较 CK 分别减少了 97.60%,92.76%。除 CK 坡面外各植被配置坡面侵蚀速率与径流率间均呈幂函数正相关关系( $R^2=0.40\sim 0.84$ , $N=76$ )。塔基区坡面水沙关系则总体表现为水大沙大的侵蚀特征。

### 参考文献(References):

- [1] 陈晓刚,丰佳,王文龙,等.黄土和红壤丘陵区输变电线路工程水土流失影响因素及特征[J].水土保持研究,2022,29(4):192-197,206.  
Chen X G, Feng J, Wang W L, et al. Influencing factors and soil erosion characteristics for transmission line engineering in loess and red soil hilly region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2022,29(4):192-197,206.
- [2] 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 erosion and prevention management measures of power transmission and transformation development and construction projects in Jiangsu Province [J]. Soil and Water Conservation in China, 2013(2):5-8.
- [3] 刘承佳,郑树海,李莉,等.特高压直流输电线路工程建设过程中临时占地范围探讨[J].中国水土保持,2020(4):24-27.  
Liu C J, Zheng S H, Li L, et al. Temporary land occupation during the construction of UHVDC transmission line project [J]. Soil and Water Conservation in China, 2020(4):24-27.
- [4] 杨敏.输电线路建设中的环境保护与水土保持[J].四川建材,2020,46(1):18-19.  
Yang M. Environmental protection and soil and water conservation in transmission line construction [J]. Sichuan Building Materials, 2020,46(1):18-19.
- [5] Jaiswal R K, Mukherjee S, Raju K D, et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS [J]. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2002,4(1):1-10.
- [6] 张贞,刘国东,贺亮.康定 500 kV 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 500 kV power transmission and transformation project [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2008,20(2):60-63.
- [7] 杨文姬,孙中峰,乔锋,等.对华北地区 500 kV 输变电工程水土保持的认识与建议[J].中国水土保持科学,2011,9(6):79-82.  
Yang W J, Sun Z F, Qiao F, et al. Understanding and

- recommendation for soil and water conservation of 500 kV power transmission engineering in North China [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2011, 9(6):79-82.
- [8] 汪黎东,张天赢,顿小宝,等.水土流失模型在山西省输变电路建设工程中的应用探讨[J].*亚热带水土保持*, 2012, 24(2):38-39, 60.  
Wang L D, Zhang T Y, Dun X B, et al. Discussion on application of soil erosion model in transmission line construction project in Shanxi Province [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2012, 24(2):38-39, 60.
- [9] 陈卓鑫,李魁,王文龙,等.不同类型山丘区输变电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 L, et al. Sources, influencing 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.
- [10] 武文一,史玉柱,裴华,等.西南土石山区500 kV架空输变电路工程水土保持措施研究[J].*水土保持通报*, 2011, 31(6):108-112.  
Wu W Y, Shi Y Z, Pei H, et al. Soil and water conservation measures of 500 kV overhead power transmission lines in earth-rocky mountainous area of southwestern China [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2011, 31(6):108-112.
- [11] 张宇,易仲强,张习传,等.西藏输变电路工程水土流失特点及防治措施分析[J].*中国水土保持*, 2015(6):65-67.  
Zhang Y, Yi Z Q, Zhang X C, et al. Analysis of soil erosion characteristics and prevention measures of Tibet power transmission and transformation project [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2015(6):65-67.
- [12] 郭晓俊.输变电路工程山区塔基水保措施经验总结[J].*机电工程技术*, 2019, 48(4):193-196.  
Guo X J. Summary of water protection measures for tower foundation in mountain area of power transmission line project [J]. *Mechanical & Electrical Engineering Technology*, 2019, 48(4):193-196.
- [13] Zhang Y B, Cao N, Xu X H, et al. Relationship between soil and water conservation practices and soil conditions in low mountain and hilly region of Northeast China [J]. *Chinese Geographical Science*, 2014, 24(2):147-162.
- [14] Castro R D. Overview of the transmission line construction process [J]. *Electric Power Systems Research*, 1995, 35(2):119-125.
- [15] 贺亮,李光伟,刘国东,等.500 kV输变电路工程水土流失及综合防治[J].*亚热带水土保持*, 2007, 19(4):48-51.  
He L, Li G W, Liu G D, et al. Soil erosion and comprehensive prevention of 500 kV power transmission and transformation project [J]. *Subtropical Soil and Water Conservation*, 2007, 19(4):48-51.
- [16] 夏卫平.电力输变电路工程建设水土保持方案设计[J].*福建水土保持*, 2002, 14(3):53-55, 60.  
Xia W P. Design of soil conservation scheme in the construction of power transmitting line project [J]. *Fujian Soil and Water Conservation*, 2002, 14(3):53-55, 60.
- [17] 汪黎东,张天赢,顿小宝,等.水土流失模型在山西省输变电路的预测研究[J].*北方环境*, 2012, 24(2):97-99.  
Wang L D, Zhang T Y, Dun X B, et al. The prediction research of the loss of soil and water in Shanxi transmission lines using USLE [J]. *Northern Environment*, 2012, 24(2):97-99.
- [18] 肖培青,姚文艺,申震洲,等.苜蓿草地侵蚀产沙过程及其水动力学机理试验研究[J].*水利学报*, 2011, 42(2):232-237.  
Xiao P Q, Yao W Y, Shen Z Z, et al. Experimental study on erosion process and hydrodynamics mechanism of alfalfa grassland [J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2011, 42(2):232-237.
- [19] 王辅强.辽西北低山丘陵区水土流失特点及主要影响因素分析[J].*中国水土保持*, 2017(9):64-66.  
Wang F Q. Characteristics and main influencing factors of soil and water loss in hilly areas of northwest Liaoning Province [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2017(9):64-66.
- [20] 贺亮,刘国东,张新宁,等.西南地区输变电路工程建设中的土壤侵蚀及其防治[J].*中国水土保持*, 2007(12):46-48.  
He L, Liu G D, Zhang X N, et al. Soil erosion and its prevention in the construction of power transmission and transformation projects in southwest China [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(12):46-48.
- [21] 闫超.输变电类生产建设项目水土流失特点及水土保持综合效益评价研究[D].南京:南京农业大学, 2013.  
Yan C. A study on soil erosion characteristics [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [22] 黄俊,吴普特,赵西宁.坡面生物调控措施对土壤水分入渗的影响[J].*农业工程学报*, 2010, 26(10):29-37.  
Huang J, Wu P T, Zhao X N. Impact of slope biological regulated measures on soil water infiltration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(10):29-37.
- [23] 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.