

DOI:10.13869/j.cnki.rswc.2026.01.045; CSTR:32311.14.rswc.2026.01.045.

金子惠, 耿文婷, 安宁, 等. 输变电工程土壤侵蚀及阻控技术研究:以准东-华东特高压工程(±1100kV)甘肃段为例[J]. 水土保持研究, 2026, 33(1):435-444.

Jin Zihui, Geng Wenting, An Ning, et al. Research on soil erosion and control technologies in power transmission and transformation projects: a case study on the Gansu Segment of the Zhundong-East China ±1100 kV UHVDC Transmission Project[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2026, 33(1):435-444.

输变电工程土壤侵蚀及阻控技术研究

——以准东-华东特高压工程(±1100kV)甘肃段为例

金子惠¹, 耿文婷¹, 安宁¹, 徐宁¹, 李正发¹, 刘晓菊¹, 成晓杰¹, 李永红²

(1. 国网甘肃省电力公司建设分公司, 兰州 730000;

2. 西北农林科技大学水土保持科学与工程学院, 陕西杨凌 712100)

摘要: [目的] 针对准东至华东(皖南)1100 kV特高压直流输电工程甘肃段建设引发的生态退化与水土流失问题, 研究并提出适用于不同地貌类型的生态恢复模式, 旨在为推动工程建设与生态保护之间协同发展提供科学依据。[方法] 基于“保护优先、减少扰动”理念, 采用实地调查与数据分析相结合的方法, 识别沿线区域的水文、土壤与植被特征, 构建以预防保护为基础、工程与植被措施协同的差异化恢复技术体系。[结果] 针对不同的地貌类型区, 构建了河西走廊荒漠戈壁区、河西走廊荒漠草原区、黄土高原干旱草原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区、陇东黄土高原沟壑区5种生态恢复模式, 形成了“一地一策”的解决方案, 最大限度地减轻工程建设对生态环境的负面影响。[结论] 经过水土保持设施的验收检验, 这些生态恢复模式均展现出了显著成效, 有效推动了线路沿线区域的生态修复与环境改善, 为解决生态脆弱地区的开发与保护难题提供了宝贵的经验。

关键词: 输变电工程; 土壤侵蚀; 生态恢复; 防治策略

中图分类号: S344; S157.1

文献标识码: B

文章编号: 1005-3409(2026)01-0435-10

Research on soil erosion and control technologies in power transmission and transformation projects

— a case study on the Gansu Segment of the Zhundong-East China ±1100 kV UHVDC Transmission Project

Jin Zihui¹, Geng Wenting¹, An Ning¹, Xu Ning¹, Li Zhengfa¹, Liu Xiaojie¹, Cheng Xiaojie¹, Li Yonghong²

(1. State Grid Gansu Electric Power Company Construction Branch, Lanzhou 730000, China; 2. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: [Objective] This study aims to address the ecological degradation and soil erosion caused by the construction of the Zhundong-East China (Southern Anhui) ±1100 kV ultra-high-voltage direct current (UHVDC) transmission project in the Gansu section. It investigates and proposes ecological restoration models suitable for different geomorphological types, thereby providing a scientific basis for promoting the coordinated development of engineering construction and ecological protection. [Methods] Based on the principle of “protection priority and disturbance minimization”, this study employed an integrated approach of field investigation and data analysis to identify the hydrological, soil, and vegetation characteristics along the route, and constructed a differentiated restoration technology system based on preventive protection and coordinated

收稿日期: 2025-05-22

修回日期: 2025-07-15

接受日期: 2025-09-25

资助项目: 国家电网甘肃省电力公司项目“甘肃省不同地貌类型下输变电工程水土保持恢复措施植被种类特性研究”(GWTGY-012)

第一作者: 金子惠(1984—), 女, 甘肃省兰州市人, 硕士, 工程师, 研究方向: 长期从事输变电工程植被恢复及环境效应评价工作。

E-mail: gengwt214@163.com

通信作者: 李永红(1971—), 男, 陕西省永寿县人, 博士, 高级工程师, 研究方向: 长期从事生产建设项目水土保持工程技术科研工作。

E-mail: lyh712100@163.com

<http://stbcyj.paperonce.org>

integration of engineering and vegetation measures. [Results] For different geomorphological types, five ecological restoration models were established: Gobi desert region of the Hexi Corridor, desert steppe region of the Hexi Corridor, arid steppe region of the Loess Plateau, hilly-gully region of the Loess Plateau in central Gansu, and gully region of the Loess Plateau in eastern Gansu. A “one strategy for one place” solution was formed to minimize the negative impact of engineering construction on the ecological environment. [Conclusion] Through the acceptance and inspection of soil and water conservation facilities, these ecological restoration models have demonstrated significant effectiveness, effectively promoting ecological restoration and environmental improvement along the transmission line. The findings provide valuable experience for addressing the challenges of development and protection in ecologically fragile areas.

Keywords: power transmission and transformation project; soil erosion; ecological restoration; prevention and control strategy

特高压直流输电工程作为国家能源战略的重要组成部分,是实现区域电力资源优化配置、保障能源安全的关键基础设施^[1]。随着“西电东送”等国家战略的深入推进,输电线路不可避免地需要穿越各类复杂的地理单元与生态脆弱区^[2]。工程建设过程中的土方开挖、场地平整及施工道路建设等人类活动会显著改变地表结构、破坏原生植被,加剧区域水土流失,并可能诱发边坡失稳等地质灾害,对沿线生态系统构成严重威胁,同时也直接关系到输电线路自身的长期运营安全^[3]。

准东-华东(皖南)±1 100 kV特高压直流输电工程是目前中国输送距离最远、环境最复杂的输电工程,全长3 324.1 km,穿越6省,甘肃段长1 282.5 km^[4]。其中,甘肃段地貌自西向东为荒漠戈壁、荒漠草原、黄土高原干旱草原、黄土高原丘陵沟壑、黄土高塬沟壑,海拔1 300~2 000 m,生态极其脆弱^[5]。传统的、单一的生态恢复技术往往难以满足不同地貌条件的精准修复需求。当前,相关研究多集中于特定植物物种的筛选或局部边坡的治理技术,尚缺乏一套从“预防—治理—恢复”全链条贯通,能够系统指导不同地貌单元生态恢复的综合性技术体系与模式。

输电线路沿线的生态破坏与恢复是一个复杂问题,须秉持“预防保护优先、综合治理并重”的原则^[6]。本研究旨在增强输电线路沿线的生态恢复力,优化周边环境,解决生态脆弱区的开发与保护冲突,保障线路安全运行。当前研究多聚焦于植物筛选、边坡及弃土恢复技术,但缺乏预防与治理并重的综合技术体系和模式。因此,本研究从生态恢复模式入手,通过实地调研,分析沿线水文、土壤及植被条件,厘清水土流失的主因,明确生态脆弱环节及恢复难点。结合工程技术措施,构建预防与治理相结合的技术体系。在此基础上,提出以预防为核心的生态恢复模式,评估生态敏感性,确定恢复重点,并研发本土化的恢复策略,

涵盖施工前预防、植物选择、土壤改良及水分管理。该研究对于构建绿色输电走廊、推动区域生态保护与高质量发展具有重要的理论价值和实践指导意义。

1 研究区概况

1.1 气象因素

甘肃段沿线所处区域的气候差异大,以干旱、半干旱、半湿润气候为主。年降水量从东到西呈锐减趋势,干旱经常发生,春旱、秋旱最为显著;大风、风沙天气相对较多,造成危害大。甘肃段工程沿线各主要行政区气象基本要素统计见表1。

1.2 土壤条件

甘肃段沿线土壤以西北半干旱地区的草原土壤群系为主,境内以灰棕漠土、栗钙土、灌淤土、风沙土、黄绵土、灰褐土、黑垆土为主^[7]。线路西部区域土质特点为差、浅薄且松散,虽然钙、钾含量高,但是先天缺乏有机质及磷,石质成分高,易发生以风蚀为主的侵蚀;而线路东部区域土层厚,土壤理化性质和侵蚀性与西部差别不大,但以水蚀为主,某些区域重力侵蚀等地质灾害易发。自西向东线路沿线主要土壤特性情况见表2。

1.3 植被状况

庆阳市以西为温带草原植被,以荒漠草原和沙生植被为主,覆盖度低,主要由小灌木和一年生草本植物构成,根系浅,保水固沙能力差,易水土流失;庆阳至平凉段为干旱草原与荒漠化草原过渡带,植被以草本植物为主,覆盖度向南递增;平凉市以旱生草灌为主,伴生杜梨、辽东栎等乔木,植物种类多样,包括白蒿、铁杆蒿等,少量分布白草、山桃等。植被组成详见表3。

2 甘肃段输变电线路生态破坏与恢复模式

2.1 河西走廊荒漠戈壁区生态恢复模式

该区在国家生态安全战略格局中的地位非常重

要,因为该区是河西内陆河流域的生态安全屏障,是我国“青藏高原生态屏障”和“北方防风固沙带”的主要组成部分^[8]。该区气候恶劣,土壤贫瘠,水土流失和沙漠化严重,生态非常脆弱,一旦扰动,恢复难度极高。因此集成该区生态恢复模式应当基

本立足于预防保护和减少扰动措施,另外需关注线路扰动片区除砾石压盖之外的其他沙漠化防治措施,除有灌溉水源区外基本不用考虑人工植被恢复措施,最终形成以预防保护为核心的戈壁荒漠生态恢复体系(图1)。

表 1 甘肃段各主要行政区气象基本要素统计表

Table 1 Statistics of basic meteorological elements for major administrative regions in Gansu section

行政区划	多年平均气温/℃	极端最高气温/℃	极端最低气温/℃	≥10℃积温	多年平均蒸发量/mm	多年平均降水量/mm	无霜期/d	全年主导风向	年平均风速/(m·s ⁻¹)	年平均相对湿度/%	24h最大降水量/mm	1h最大降水量/mm	最大冻土深度/cm	大风日数/d	最大风速/(m·s ⁻¹)
酒泉市	7.2	38.4	-31.6	2954.5	2005.2	85.4	131	SW	2.2	47	44.2	5.5	132	15.0	33
张掖市	7.1	38.6	-28.7	2870	2047.9	110	148	ESE	2.0	52	46.7	5.8	123	12.3	29
金昌市	9.0	39.5	-25.1	3088.1	1595.4	156.1	143	NE	1.1	59	65	8.1	93	28.0	31
武威市	7.9	40.8	-32.0	2250	2021.2	165.9	135	SSW	1.8	53	62.7	7.8	141	39.0	32
白银市	9.0	39.5	-25.1	3088.1	1595.4	237.6	143	SE	1.1	59	65	8.1	93	5.3	17
庆阳市	8.7	36.4	-22.6	2650	1456.8	456.3	160	S	2.4	62	68	8.5	105	3.9	19
平凉市	8.9	36.0	-24.3	2540	1410	489.1	453	NNW	2.0	64	71.3	8.9	89	4.8	21

表 2 甘肃段沿线主要土壤特性统计

Table 2 Statistics of main soil properties along Gansu section

名称	有机质/%	含氮/%	含磷/%	含钾/%	pH	利用方向
棕漠土	0.1~0.3	视植被情况	0.1~0.36	较丰富	>8.5	放牧地
灰钙土	0.5~3.0	不确定	0.04~0.25	较丰富	8.0~9.5	放牧、农业
风沙土	0.012~1.6	不确定	0.12~0.16	较丰富	8.0~9.5	发展农牧业
灌淤土	0.5	不确定	0.17~0.24	较丰富	7.5~8.5	高产稳产基本农田

表 3 甘肃段沿线各行政区植被类型一览表

Table 3 Overview of vegetation types in each administrative district along Gansu section

行政区	植被类型及种类	林草覆盖/%
酒泉市	温带至暖温带过渡带,植被为极旱荒漠、典型荒漠和草原化荒漠,稀疏且物种少,主要为半灌木和草本植物,如黑柴、红砂等	2~5
张掖市	温带荒漠植被,绿洲内为人工农作物和林,外围为旱生耐盐碱植被,如白刺、红砂	2~5
金昌市	温带荒漠植被,走廊平原多为灌木和稀疏乔木,如新疆杨、沙枣树,植被有黑沙蒿、白刺等	3~15
武威市	温带荒漠植被,绿洲内为人工农作物和林,外围荒漠植被有白刺、木紫苑等	5~20
白银市	草原和荒漠草原植被,脆弱且种类贫乏,主要为旱生灌木、半灌木和草本植物,如碱蓬、白刺	6~20
庆阳市	干旱草原至荒漠化草原过渡带,以草本植物为主,覆盖度北低南高,人工植被有柠条、沙棘,自然植被有本氏针茅、白羊草等	10~25
平凉市	旱生草灌植被为主,间有乔木如杜梨、辽东栎,草本有四季青、本氏羽草等	10~35

2.1.1 预防保护模式

(1) 减少扰动面积。在施工之前对施工现场的各个区域,包括站场区(接地极)、塔基区、牵张场区、施工生产生活区、施工道路区以及输水管线区等进行明确的界定和围护。通常采用醒目的彩条旗标识施工场地的边界,严格限制施工扰动区域,避免对区域外的土壤结构、植被覆盖、水体以及当地生物多样性造成破坏,规避大规模的土方开挖和转移,减少对地形地貌的改变,以及控制施工噪音和扬尘,确保施工活动对环境的负面影响降到最低。

(2) 降低地表扰动。对站场、塔基以及输水管线

区的临时堆土区域,先行铺设一层土工膜。在土工膜铺设完成后,随后进行堆土作业。此外,土工膜的使用还有助于防止雨水冲刷和风蚀作用,进一步保护施工现场的土壤结构^[9]。

(3) 降低外部因素对施工区的影响。对施工和生产生活区,采取砾石压盖裸露地表,其效能主要表现为:防止风蚀,砾石压盖能减少风力对土壤表层的直接作用,可有效控制土壤颗粒被风力搬运;保持土壤水分,砾石层有助于减少水分的蒸发,维持土壤的湿润状态;减少水蚀,覆盖物能够减缓水流的速度,降低雨水对土壤的直接冲击,从而减轻水蚀;促进植

被恢复,覆盖物保持了更加稳定和适宜的生长环境,有利于植被的自然恢复;效益高,与其他土壤保护措施相比,砾石覆盖具有效益高的优点;多功能性,除

了防蚀作用,砾石覆盖还具备其他功能,如防尘、降噪等;美观性,适当的砾石覆盖可以改善施工和生活区的外观。

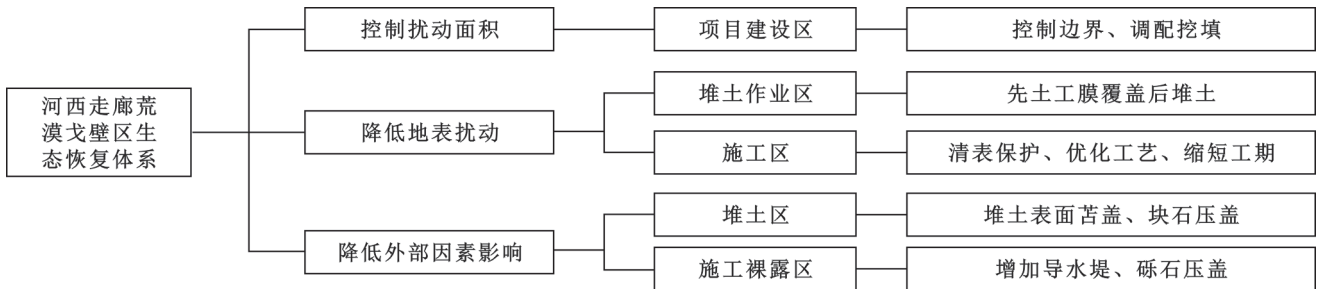


图 1 河西走廊戈壁荒漠区生态恢复体系

Fig. 1 Ecological restoration system in Gobi desert region of Hexi Corridor

2.1.2 生态恢复模式 由于该区极为干旱,且多为戈壁地貌,如果缺失灌溉,人工植被恢复可能性极低,因此只考虑砾石压盖等预防保护模式,不考虑人工植被恢复模式。

2.2 河西走廊荒漠草原区生态恢复模式

该区是甘肃省水土流失最为严重的区域之一,有流失范围广、类型多、强度高、危害重四大特点^[10]。该区生态恢复难点有两个,一是输电线路沿线经过荒漠草地外,还经过盐碱地等敏感区,穿越区域土地利用类

型较多;二是输电线路除经过风蚀、水蚀区外,还穿过冻融区。这些区域具有环境恶劣、土壤贫瘠、植被稀疏、扰动后恢复能力差四大特点^[11]。因此集成该区生态恢复模式应当首先立足于强化预防保护和减少扰动,然后着力配置兼具风蚀+水蚀综合防治的植被生态恢复措施体系,同时兼顾盐碱地等敏感区的耐盐、抗盐植物选配以及防治冻融侵蚀的“埋压花管排水和沙粒垫层排水”等工程措施,最终形成独具特色的河西走廊荒漠草原综合防控植被生态恢复体系(图 2)。

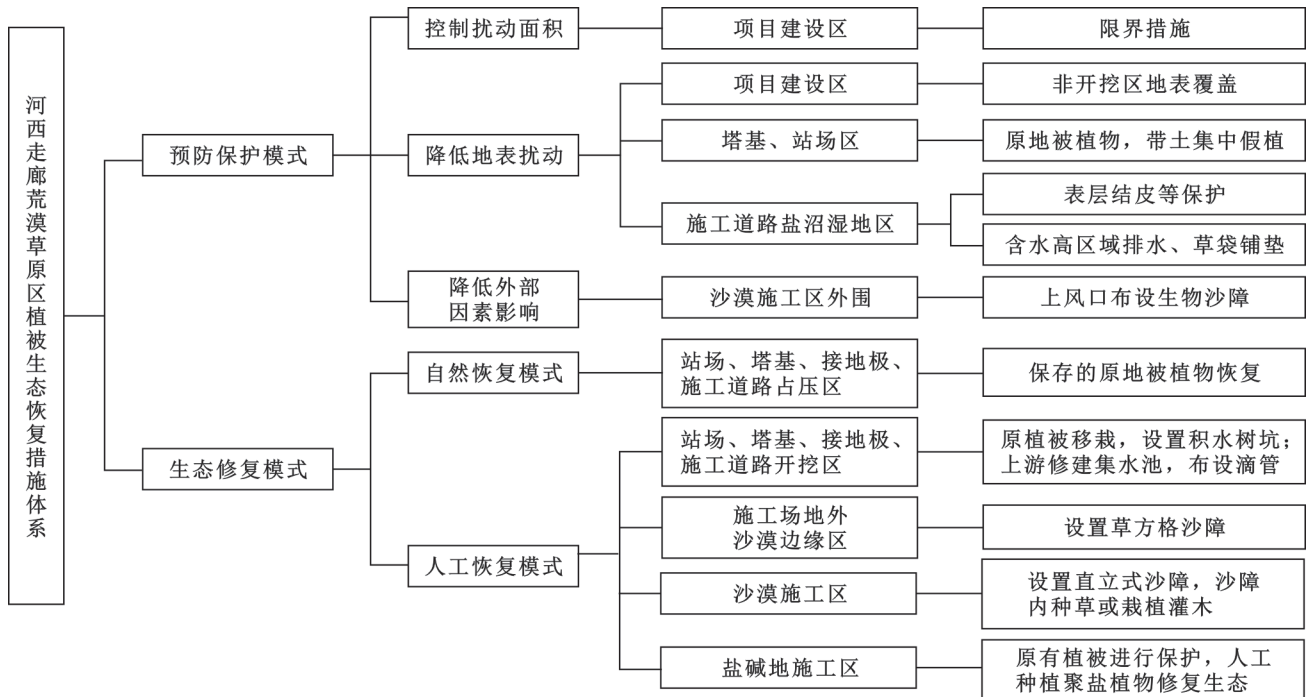


图 2 河西走廊荒漠草原区植被生态恢复措施体系

Fig. 2 System of ecological restoration measures for desert steppe region of Hexi Corridor

2.2.1 预防保护模式

(1) 减少扰动面积。在施工开始前,按照施工设计布设施工位置及占压范围,合理划定扰动范围,并使用彩条旗标明施工界限^[12]。施工界限的划定应该不影响工程的正常施工,并尽可能减少施工活动范

围。在施工范围内,除深层开挖区外,减轻施工对项目区域的地面扰动面积及破坏程度,尽量保护原有立地的生态环境。

(2) 降低地表扰动影响。针对该区输电线路沿线生态环境脆弱,土壤贫瘠,植被生长条件差且受到

干扰后极易导致生态环境进一步恶化的特点,在施工过程中,对项目扰动区域选取厚地膜覆盖,确保地表在整个施工期处于覆盖状态,尽可能减少施工对地表扰动以及植被破坏^[13]。对于塔基和站场等片状开挖等深层扰动区,为保护作业区的稀有植被,严格实施“宁移不毁”的施工原则,加强植被保护,将深层扰动区的植被以及四周难以形成的土壤层实施集中保护,施工结束后,将保护的原植被及土壤回填移栽,进行地表植被的恢复,确保乡土植物“种子库”的效能得到充分发挥。在施工道路等经过盐沼湿地时,要注重盐结皮等结皮层的保护。

(3)降低外部因素影响。该区的外部因素主要为风力,特点为风力强度大,加之该区地表物质疏松,扰动后极易被风力搬运,因此,在工程施工期间,根据主风向条件布设生物沙障。为进一步固定沙丘,最大程度降低风力对施工区的危害,沙障一般垂直于风向,材料以当地适合树种如怪柳科植物为主。

2.2.2 生态恢复模式

(1)植被自然恢复模式。针对站场区、塔基区、施工道路区等深层扰动区,在开挖过程中,将已保护的植被及土壤,在施工结束后原土回覆并进行土地整治,对移栽保护的原有植被进行植被恢复。通过这种方式,不仅能够确保施工区域的环境得到妥善修复,还能够促进生态平衡,保持土壤的稳定性,减少水土流失,同时也有助于提升施工区域环境的整洁和美观。

(2)人工促进恢复模式。对于塔基、站场、施工

道路等开挖深层扰动区,采用人工促进恢复为主。人工促进恢复措施以草方格固沙的工程措施为主,具备植物生长条件区域辅以植物措施^[14]。扰动区布设在(施工道路)沙漠边缘固定、半固定沙丘区时,为固定沙丘,采用低立式草方格沙障固沙,以增加扰动面的地表粗糙度,削减风速、阻挡蠕动沙粒,新生风蚀基准面,减缓或阻止沙丘移动。施工完成后,对施工道路等扰动区进行场地整平;根据立地条件和主风向,扰动区垂直主风向上外边缘布设宽度不小于20 m草方格沙障固沙,沙障为2.0×2.0 m²~4.0×4.0 m²直立式网格柴草沙障,在网格内撒播种草或栽植灌木。对扰动区为盐碱地的区域,除原有保护的立地植被进行回植外,还可选取聚盐植物如碱蓬属、滨藜属等,进行人工种植生态恢复。

2.3 黄土高原干旱草原区生态恢复模式

该区地处黄土高原西北部,属腾格里沙漠与黄土高原之间的过渡带,水蚀风蚀并存,水土流失严重,强度侵蚀和剧烈侵蚀面积超过40%,该区主要呈现水资源匮乏与水土流失并存,土地潜在沙漠化威胁较大,水土流失量大面广3个特点。该区生态恢复的“卡脖子”问题是干旱缺水以及由此衍生的潜在沙漠化威胁。因此集成该区生态恢复模式应当立足于在强化预防保护的基础上重点关注线路扰动片区灌+草立体恢复措施的雨水利用措施和水资源高效利用措施以及预防沙漠化措施的配置,形成黄土高原地区干旱草原区植被生态恢复体系(图3)。

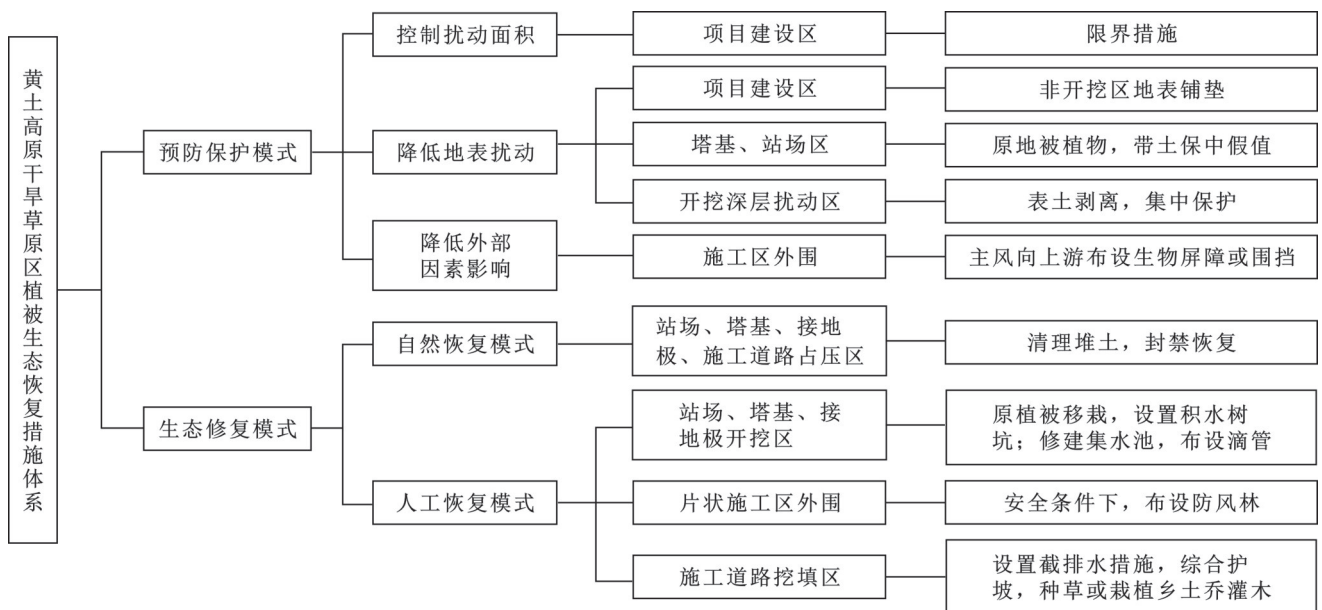


图3 黄土高原地区干旱草原区植被生态恢复措施体系

Fig. 3 System of ecological restoration measures for arid steppe region of Loess Plateau

2.3.1 预防保护模式 (1)减少扰动面积。在施工开始前,按照施工设计布设施工位置及占压范围,合

理划定扰动范围,并使用彩条旗标明施工界限^[14]。施工界限的划定应该不影响工程的正常施工,并尽

可能减少施工活动范围。在施工范围内,除深层开挖区外,减轻施工对项目区域的地面扰动面积及破坏程度,尽量保护原有立地的生态环境。

(2)降低地表扰动。在该段,根据区域内水资源匮乏与水土流失并存,土地潜在沙漠化威胁较大,水土流失量大、面广的特点,考虑到项目施工周期较长而该区风蚀严重,在施工过程中,对项目施工区域苫盖材料舍弃传统的密目网,选取厚地膜覆盖,确保地表在整个施工期处于覆盖状态,尽可能地减少施工对地表结构的扰动和植被的破坏^[15]。对于塔基和站场等片状开挖等深层扰动区,为保护作业区的稀有植被,严格实施“宁移不毁”的施工原则,加强植被保护,将深层扰动区的植被以及四周难以形成的土壤层实施集中保护,施工结束后,将保护的原植被及土壤回填移栽,进行地表植被的恢复,确保乡土植物“种子库”的效能得到充分发挥。

(3)降低外部因素影响。该区的外部因素主要为风力,特点为风力强度大,加之该区地表物质疏松,扰动后极易被风力搬运,造成风蚀加剧,因此,在工程施工期间,根据主风向布设生物沙障。为最大程度降低风力对施工区的危害,沙障一般垂直于风向,材料以当地适合树种为主。

2.3.2 生态恢复模式

(1)自然恢复模式。对非开挖扰动区即占压区,主要为堆土区,采取自然恢复进行植被恢复,施工前,将表土(一般为30 cm厚)及植被收集并集中堆放保护,施工完成后,将保护的表土回覆植被恢复的片区并进行土地整治,回植原有植被,充分发挥原表土“种子库”的效能。对于牵张场区,施工结束后对该区进行围栏封禁,当地水土流失治理实践证明,围封对草地恢复效果显著,植被的高度、盖度、密度均有所增加,有利于植物群落向着有利于群落良性演替的方向发展。

(2)人工促进恢复模式。对于塔基等开挖扰动区,植被恢复以人工促进恢复为主。①依据立地条件,选择乡土树种或耐盐碱树种构建生物活性防风屏障,然后选择适宜的当地草种并结合防风屏障进行植草或灌草结合实施乔灌草立体人工促进植被恢复。②对施工完成后站场等片状扰动区,在利用适宜树种构建生物活性防风屏障的基础上,尽可能选择乡土树草种或适合树草种进行乔灌草立体恢复,同时辅以灌溉或雨水利用设施,加强施肥等抚育管理,促使扰动环境优质恢复。

2.4 陇中黄土高原丘陵沟壑区生态恢复模式

该区是黄土高原水土流失最严重区域之一,也是水土流失重点治理区域,由于线路途经区域多为

黄土丘陵地貌,坡度大,植被覆盖率低(17.68%)、沟谷边缘侵蚀剧烈以及人为扰动危害大,因此该区具有抗蚀性弱、强度高、危害重三大特点,该区生态恢复的难点在于恢复模式需要适应多种的地貌类型,同时兼顾扰动区之外的沟谷边缘侵蚀以及人为扰动侵蚀。因此,集成该区生态恢复模式应当立足于在强化预防保护的基础上,除了要关注线路扰动片区的立体植被恢复措施配置外,还要考虑扰动区周边的边坡和沟谷边缘治理工程和植物措施,形成独具特色的陇中黄土高原丘陵沟壑区综合防控植被生态恢复体系(图4)。

2.4.1 预防保护模式

(1)减少扰动面积。在施工开始前,按照施工设计布设施工位置及占压范围,重点关注丘陵沟壑区高低腿塔基开挖的范围,合理划定扰动范围,并使用彩条旗标明施工界限。施工界限的划定应该不影响工程的正常施工,并尽可能减少施工活动范围。在施工范围内,除深层开挖区外,减轻施工对项目区域的地面扰动面积及破坏程度,尽量保护原有立地的生态环境。

(2)强化对临时堆土的过程管护。针对该地区沟壑密布,坡面侵蚀及沟谷边缘侵蚀严重的特点,考虑到该项目周期较长,充分利用该区降雨较多的优势^[16],在施工过程中,对土方开挖产生的临时堆土除采取四周拦挡和密目网苫盖措施外,再增加撒播草籽临时绿化措施,规避覆盖材料因风化或破坏引起的长时间裸露,同时在堆土场地外围设置临时土质排水沟,充分发挥预防降水和外来径流造成的临时堆土区的水土流失以及加快后期植被恢复进程的效能^[17-18]。

(3)加强表土剥离保护和回覆利用。对于塔基、站场、施工道路等开挖部位,为在施工后优质快速恢复,施工作业坚决贯彻表土剥离保护利用原则,将剥离的表土集中堆放在施工区附近,以便施工结束后,尽快回覆,实施土地整治,使地表植被尽快恢复^[19]。

2.4.2 生态恢复模式

(1)自然恢复模式。对非开挖扰动区即占压区,主要为堆土区,采取自然恢复进行植被恢复,施工前,将表土(一般为30 cm厚)及植被收集并集中堆放保护,施工完成后,将保护的表土回覆植被恢复区并进行土地整治,使其得到充分和有效的利用。对施工结束后的牵张场等区,采用封禁措施,以减少恢复期的人为扰动^[20-23]。

(2)人工促进恢复模式。对于塔基开挖位置以及场站区,以人工促进恢复为主^[23]。首先结合该区已有水土保持成功经验,平整地形减小坡度,固化坡沟边缘,然后选择乡土树草种或适宜树草种进行乔-灌-草立体恢复,人工促进扰动片区的植被及时恢复,

同时强化边坡防护和沟谷边缘工程措施,其次对施工作业后的站场区域,尽可能增加雨水综合利用措

施、施肥及其他植被抚育措施,确保扰动环境快速优质恢复,发挥良好防护效能。

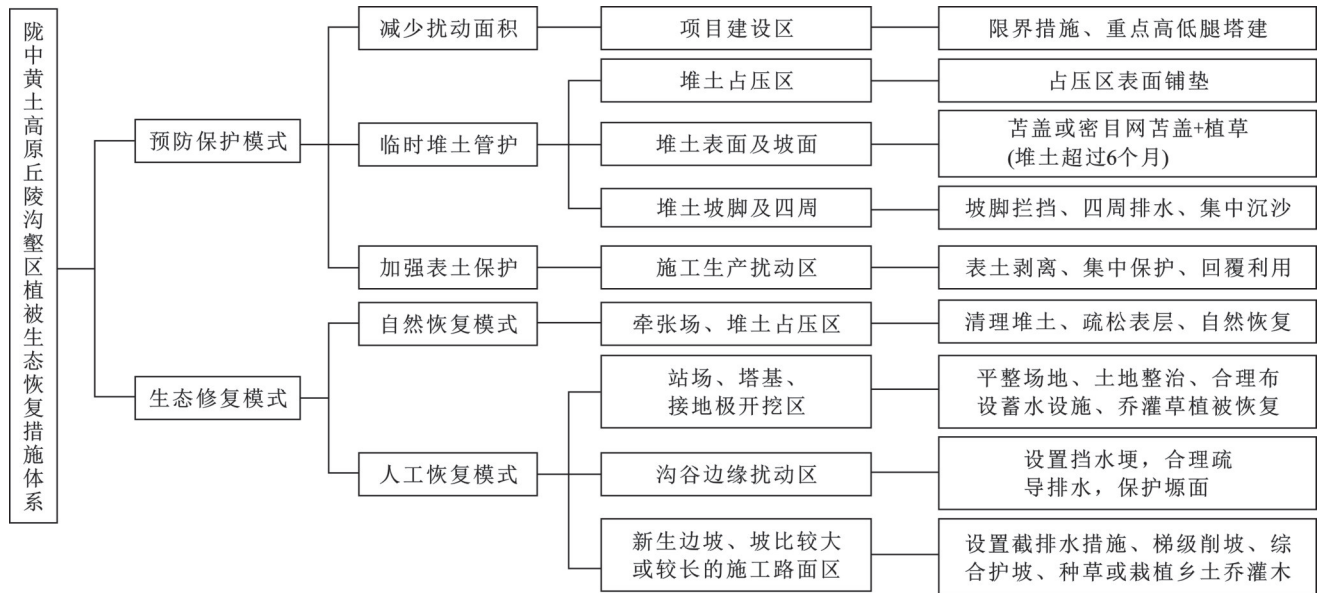


图 4 陇中黄土高原丘陵沟壑区植被生态恢复措施体系

Fig. 4 System of ecological restoration measures for hilly-gully region of Loess Plateau in central Gansu

2.5 陇东黄土高原沟壑区生态恢复模式

该区基本地貌由塬+坡+沟构成,最显著特点是在塬的边缘分布众多沟壑,且沟壑深度大多超过 100 m,沟头溯源侵蚀严重,地质灾害易发,不良地质作用较发育,总体上地质灾害以小规模及单点分布为主。该区水力侵蚀本来就处在中度以上水平,加上此外近年来频发的极端降雨,加剧本来就比较严重的重力侵蚀危害和固沟保塬压力,因此该区生态恢复的难点在于一方面考虑乔-灌-草的配置,另一方面还要考虑防范以沟头溯源侵蚀为代表的重力侵蚀诱发的地质灾害。所以集成该区生态恢复模式应当立足于在强化预防保护的基础上,着重关注线路扰动片区的乔+灌+草恢复措施配置,同时兼顾防治重力侵蚀的工程措施配置,形成独具特色的陇东黄土高原沟壑区综合防控植被生态恢复体系(图 5)。

2.5.1 预防保护模式

(1) 减少扰动面积。在施工开始前,按照施工设计布设施工位置及占压范围,重点关注丘陵沟壑区高低腿塔基开挖的范围,合理划定扰动范围,并使用彩条旗标明施工界限^[24]。施工界限的划定应该不影响工程的正常施工,并尽可能减少施工活动范围。在施工范围内,除深层开挖区外,减轻施工对项目区域的地面扰动面积及破坏程度,尽量保护原有立地的生态环境^[25]。

(2) 强化临时堆土过程管护。针对该地区沟壑密布,水蚀强烈以及重力侵蚀易发的特点,考虑到该项目周期较长,充分利用该区降雨较多的优势^[26],在施工过程中,对土方开挖产生的临时堆土除采取四

周拦挡、密目网苫盖外,再增加临时绿化措施,规避免覆盖材料因风化或破坏引起的长时间地表裸露,同时在临时堆土场地外围设置临时土质排水沟,充分发挥防止降水和外来径流造成的临时堆土水土流失以及加快后期植被恢复进程的效能^[27]。

(3) 加强表土剥离保护和回覆利用。对于塔基、站场、施工道路等开挖部位,施工作业坚决贯彻表土剥离保护利用原则^[28],将开挖剥离表土在周围集中堆放,施工结束后施用表土进行地表植被的恢复,加快植被恢复进程,缩短地表裸露时间,尽可能发挥植被良好的水土保持和生态保护效能^[29]。

2.5.2 生态修复模式

(1) 自然恢复模式。对非开挖扰动区即占压区,主要为堆土区,采取自然恢复进行植被恢复,施工前,将表土(一般为 30 cm 厚)及植被收集并集中堆放保护,施工完成后,将保护的表土回覆植被恢复区并进行土地整治,使其得到充分和有效的利用。对施工结束后的牵张场等区,采用封禁措施,同时人工加大优良植物的占比,促进植物群落向着良性演替方向发展。

(2) 人工促进恢复模式。对于塔基开挖位置以及场站区,以人工促进恢复为主^[30]。首先根据立地条件,选择乡土树草种或适宜树草种进行乔-灌-草立体恢复,人工促进项目区的植被及时恢复,同时完善水系联通措施并强化防治重力侵蚀的工程和植物措施;其次对施工作业后的站场区域,尽可能增加雨水综合利用措施、整地施肥等其他植被抚育措施确保扰动环境快速优质恢复,发挥良好防护效能。

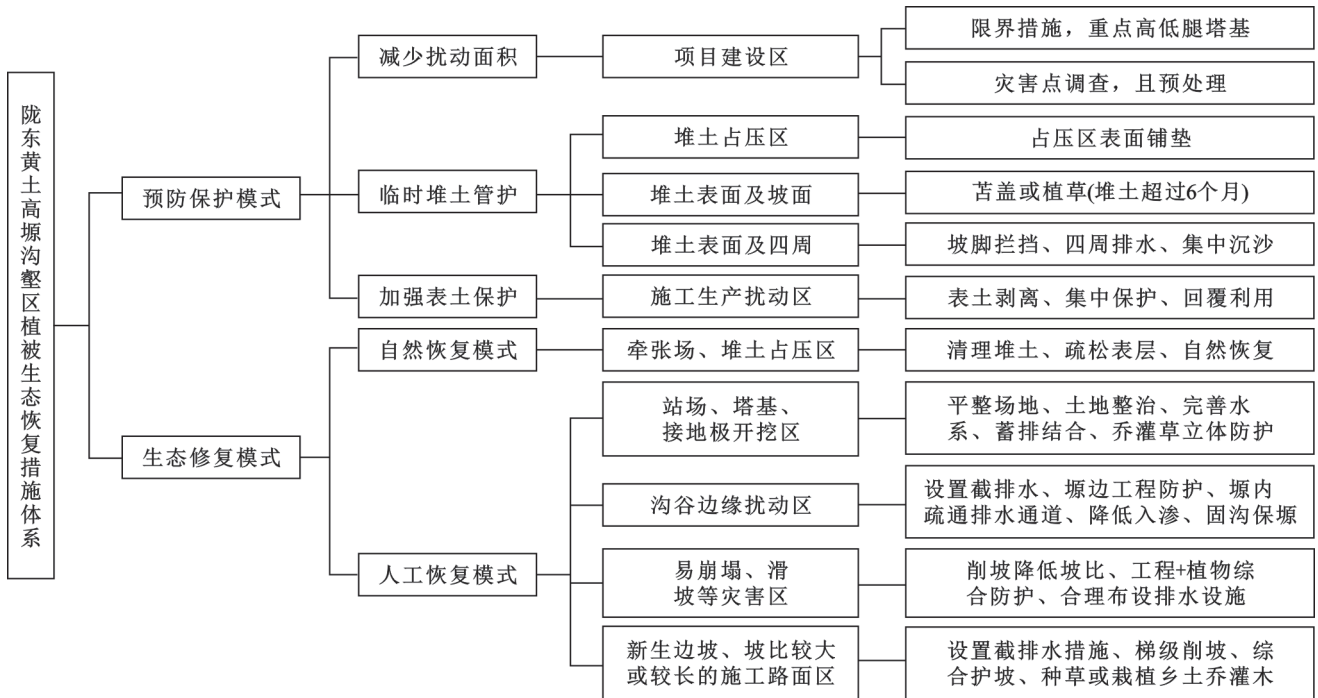


图 5 陇东黄土高原沟壑区植被生态恢复措施体系

Fig. 5 System of ecological restoration measures for gully region of Loess Plateau in eastern Gansu

3 生态恢复模式差异总结及差异分析

在探讨河西走廊荒漠戈壁区、河西走廊荒漠草原区、黄土高原干旱草原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区以及陇东黄土高原沟壑区的生态恢复模式时,不难发现,尽管准东-华东(皖南)±1 100 kV 特高压直流输电工程在这些区域都面临着生态环境退化的挑战,且都采取一系列共性保护措施,如植被恢复、水土保持、生物多样性保护等,但因其地理位置、气候条件、土壤类型及生态系统类型的显著差异,其生态恢复模式也呈现出鲜明的地域特色。以下是对 5 种生态恢复模式的总结及差异分析(见表 4)。(1) 河西走廊荒漠戈壁区。该区域以耐旱、耐盐碱的植物种植为主,如梭梭、红柳等,旨在构建稳定的荒漠生态系统。同时,利用地下水进行合理灌溉,恢复土壤水

分,促进植被生长。(2) 河西走廊荒漠草原区。在保护原有草原植被的基础上,实施退化草地改良,通过补播、施肥等措施提高草地生产力。同时,加强草原鼠虫害防治,维护草原生态平衡。(3) 黄土高原干旱草原区。注重水土保持与植被恢复相结合,选择适宜的草本植物和灌木进行种植,减少水土流失。此外,通过修建梯田、淤地坝等工程措施,改善农业生产条件,促进生态与经济双赢。(4) 陇中黄土高原丘陵沟壑区。该区域地形复杂,水土流失严重。因此,生态恢复重点在于综合治理,包括植树造林、封禁治理、梯田建设等多方面措施。同时,推广节水农业,提高水资源利用效率。(5) 陇东黄土高原沟壑区。在保护原有植被的基础上,实施退耕还林还草工程,恢复林草植被,提高生态系统自我修复能力。同时,加强流域综合治理,减少泥沙流失,改善河流水质。

表 4 生态恢复模式差异分析

Table 4 Analysis of differences in ecological restoration models

生态恢复区域	主要恢复措施	目标生态系统类型	特色措施
河西走廊荒漠戈壁区	耐旱植物种植、地下水灌溉	荒漠生态系统	梭梭、红柳等耐旱植物种植
河西走廊荒漠草原区	草原改良、鼠虫害防治	荒漠草原生态系统	补播、施肥提高草地生产力
黄土高原干旱草原区	水土保持、植被恢复	干旱草原生态系统	草本植物与灌木种植、梯田建设
陇中黄土高原丘陵沟壑区	综合治理、梯田建设、节水农业推广	丘陵沟壑区生态系统	封禁治理、植树造林、节水灌溉
陇东黄土高原沟壑区	退耕还林还草、流域综合治理	沟壑区生态系统	林草植被恢复、泥沙流失控制、水质改善

综上所述,5种生态恢复模式在共性保护措施的基础上,根据各自区域的特定条件,采取针对性的恢复措施,旨在构建稳定、健康的生态系统,实现生态、经济、社会的可持续发展。

4 结论

(1) 准东-华东(皖南)±1 100 kV 特高压直流输电工程甘肃段沿线生态脆弱,环境特征波动大、敏感

性强、承受能力弱,需将“预防保护和减小扰动”置于核心,但各区段地貌、气候、土壤及水土流失差异明显,生态恢复模式应各有侧重。

(2) 针对甘肃段5个主要立地类型,提出5种生态恢复模式:河西走廊荒漠戈壁区、荒漠草原区、黄土高原干旱草原区、陇中黄土高原丘陵沟壑区、陇东黄土高原沟壑区生态恢复模式。

(3) 5种模式均强调“预防保护和减小扰动”,同时考虑各区段特定环境条件和恢复难点,措施配置和模式构建体现差异性,提升针对性。河西走廊荒漠戈壁区侧重预防保护;荒漠草原区除预防保护外,配置风蚀+水蚀防护及盐碱地、冻融侵蚀防治措施;黄土高原干旱草原区关注灌+草立体恢复、雨水利用及防沙漠化措施;陇中黄土高原丘陵沟壑区强化预防保护,重视乔+灌+草立体恢复及边坡、沟谷边缘措施;陇东黄土高原沟壑区除强化预防保护外,着重乔+灌+草恢复及防治重力侵蚀措施。

参考文献(References):

- [1] 艾红杰,黄金海,吴金波,等. 陕北-武汉特高压直流输电工程无功控制策略研究[J]. 电力系统保护与控制, 2021,49(14):149-156.
Ai H J, Huang J H, Wu J B, et al. Reactive power control strategy for the Shanbei-Wuhan UHVDC transmission project[J]. Power System Protection and Control, 2021,49(14):149-156.
- [2] 安以达. 中国三省交界区生态系统格局-质量-安全综合集成研究[D]. 四川绵阳:西南科技大学,2023.
An Y D. Research on the comprehensive integration of ecosystem pattern-quality-security in the tri-provinces junctional zone of China[D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2023.
- [3] 马涛,周波,周茂荣. 河西走廊输变电工程水土保持监测技术及其措施体系[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(S1):62-69.
Ma T, Zhou B, Zhou M R. Techniques of soil and water conservation monitoring of power transmission and transformation project in Hexi Corridor[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013,11(S1):62-69.
- [4] 束洪春,张雪飞,王璇,等. 一种利用衰减非周期分量的UHVDC线路故障选极元件[J]. 电机与控制学报, 2021, 25(1):46-58.
Shu H C, Zhang X F, Wang X, et al. UHVDC line fault selective component using attenuating non-periodic component[J]. Electric Machines and Control, 2021, 25(1): 46-58.
- [5] 高泽宇. 黄河流域甘肃段生态安全格局构建研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2023.
Gao Z Y. Study on the construction of ecological security pattern in the Gansu section of the yellow river basin[D]. Lanzhou: Lanzhou Jiaotong University, 2023.
- [6] 樊成虎,王雅琛,许丽娟,等. 西北生态脆弱区输变电工程植被恢复技术体系构建[J]. 环境生态学, 2023,5(8):112-118.
Fan C H, Wang Y C, Xu L J, et al. Construction of vegetation restoration technology system for power transmission and transformation projects in ecological fragile area of Northwest China[J]. Environmental Ecology, 2023, 5(8):112-118.
- [7] 张凤梅. 山西省输变电工程水土流失特点及防治措施体系研究[D]. 北京:北京林业大学,2014.
Zhang F M. Soil erosion measure system in Shanxi Province power transmission and transformation project[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2014.
- [8] 孙中峰,杨文姬,宋康. 输变电工程建设低扰动水土保持技术研究:以山西省输变电工程为例[J]. 水土保持研究, 2014, 21(3):62-67.
Sun Z F, Yang W J, Song K. Research on low disturbance soil and water conservation technology integration of power transmission engineering: Power transmission engineering in Shanxi Province as examples[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(3):62-67.
- [9] 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 and comprehensive benefits evaluation of power transmission engineering[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2013.
- [10] 张玉刚,杨鹏龙,保承家. 准东-华东(皖南)±1100kV特高压直流输电工程线路途经甘肃地区风速特性分析[J]. 甘肃科技, 2017, 33(13):52-55.
Zhang Y G, Yang P L, Bao C J. Analysis of wind speed characteristics of Zhundong-East China (southern Anhui) ±1100kV UHVDC transmission project in Gansu Province[J]. Gansu Science and Technology, 2017, 33(13):52-55.
- [11] 刘艳改,姚娜,程艳辉. 不同水土保持工程措施对侵蚀红壤坡地植被恢复的影响研究[J]. 绿色科技, 2019, 21(24):20-22.
Liu Y G, Yao N, Cheng Y H. Study on the influence of different soil and water conservation engineering measures on vegetation restoration of sloping land eroded by red soil[J]. Journal of Green Science and Technology, 2019, 21(24):20-22.
- [12] 白玉,徐成,秦百顺,等. 长输管道植被恢复及关键种植技术[J]. 水土保持通报, 2016, 36(1):201-205.
Bai Y, Xu C, Qin B S, et al. Recovery and key cultivation technology of long-distance pipeline vegetation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(1): 201-205.
- [13] 沈中原,赵罡,李占斌,等. 生态脆弱区输气管道沿线生态修复措施探讨:以西气东输宁夏段为例[J]. 安全与环境学报, 2005, 5(5):71-74.

- Shen Z Y, Zhao G, Li Z B, et al. Ecological rehabilitation of environment along West-East Pipe Project (WEPP) in vulnerable regions [J]. *Journal of Safety and Environment*, 2005, 5(5):71-74.
- [14] 孙翔, 薛世峰, 朱秀星. 西气东输管道沿线地质灾害浅议[J]. *低温建筑技术*, 2014, 36(9):132-134.
- Sun X, Xue S F, Zhu X X. Discuss on geological disaster along west-east gas transportation pipeline[J]. *Low Temperature Architecture Technology*, 2014, 36(9):132-134.
- [15] 李国强, 陈利顶, 高启晨, 等. 黄土高原地区西气东输工程沿线水土流失敏感性评价[J]. *水土保持学报*, 2003, 17(6):55-58.
- Li G Q, Chen L D, Gao Q C, et al. Sensitivity assessment of water and soil loss along west-east pipeline project in Loess Plateau, China [J]. *Journal of Soil Water Conservation*, 2003, 17(6):55-58.
- [16] 杨霞, 乌吉木吉, 朝力格尔. 半干旱区草原生态环境质量时空变化及其驱动因素研究: 以锡林郭勒为例[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(3):231-240.
- Yang X, Wu J, Chao L. Research on the spatiotemporal change of ecological environment quality and its driving factors in semi-arid grasslands: a case study of Xilingol [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(3):231-240.
- [17] 赵晓娟, 郑树海, 姚姬璇, 等. 输变电工程表土剥离技术指标研究[J]. *中国水土保持*, 2024(2):40-44, 75.
- Zhao X J, Zheng S H, Yao J X, et al. Research on technical indicators of topsoil stripping in power transmission and transformation projects [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2024(2):40-44, 75.
- [18] 徐辉. 500kV 仁和输变电工程项目风险分析与管理研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2012.
- Xu H. Research on risk analysis and management of 500kV Renhe power transmission and transformation project [D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2012.
- [19] 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.
- [20] 宫联沙, 杨静, 戴全厚, 等. 不同降雨类型下植被剔除对灌木林降雨再分配特征的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(5):315-322, 331.
- Gong L S, Yang J, Dai Q H, et al. Effects of vegetation exclusion on rainfall redistribution characteristics of shrubs under different rainfall types [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(5):315-322, 331.
- [21] 马雪燕, 穆兴民, 王双银, 等. 黄土高塬沟壑区植被恢复对土壤入渗及产流的影响[J]. *水土保持学报*, 2024, 38(6):89-96, 104.
- Ma X Y, Mu X M, Wang S Y, et al. Effects of vegetation restoration on soil infiltration and runoff in the Gully Regions on the Loess Plateau [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2024, 38(6):89-96, 104.
- [22] 梁晓娜, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 黄河源区4种不同禁牧条件对草地根-土复合体力学特征的影响[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(2):224-233.
- Liang X N, Liu C Y, Hu X S, et al. Effects of four different grazing exclusion conditions on the mechanical characteristics of grassland root-soil composite system in the source region of the Yellow River [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(2):224-233.
- [23] 解铭威, 周慧荻, 陈耸, 等. 银川市生态系统服务价值评估及多情景模拟[J]. *水土保持研究*, 2025, 32(1):294-304.
- Xie M W, Zhou H D, Chen S, et al. Valuation of ecosystem service value and multi-scenario simulation in Yinchuan city [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2025, 32(1):294-304.
- [24] O' Faircheallaigh C. Public participation and environmental impact assessment: Purposes, implications, and lessons for public policy making [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2010, 30(1):19-27.
- [25] Li B J, Niu D X, Lu Y, et al. Analysis of the surplus rate of power transmission and transformation project cost based on grey correlation analysis [C]. *Electronics, Electrical Engineering and Information Science*. Guangzhou, China. World Scientific, 2016: 223-229.
- [26] Tan C X, Feng Z K. Mapping forest fire risk zones using machine learning algorithms in Hunan Province, China [J]. *Sustainability*, 2023, 15(7):6292.
- [27] 姚金雄, 雷磊, 王琳琳, 等. 陕北地区输变电工程水土流失防治措施研究[J]. *陕西电力*, 2017, 45(5):88-92.
- Yao J X, Lei L, Wang L L, et al. Study on soil and water erosion control of power transmission project in northern Shaanxi area [J]. *Shaanxi Electric Power*, 2017, 45(4):88-92.
- [28] de Oliveira Fraga A, Klunk M A, de Oliveira A A, et al. Soil corrosion of the AISI1020 steel buried near electrical power transmission line towers [J]. *Materials Research*, 2014, 17(6):1637-1643.
- [29] Biasotto L D, Kindel A. Power lines and impacts on biodiversity: a systematic review [J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2018, 71:110-119.
- [30] Richardson M L, Wilson B A, Aiuto D A S, et al. A review of the impact of pipelines and power lines on biodiversity and strategies for mitigation [J]. *Biodiversity and Conservation*, 2017, 26(8):1801-1815.