特高压输电工程植被恢复过程中树草种适宜性研究
——以酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段为例

金子惠[1]，耿文婷[1]，李永红[2]，安 宁[1]，徐 宁[1]，李正发[1]，刘晓菊[1]，成晓杰[1]
(1.国家电网甘肃省电力公司建设分公司，甘肃 兰州 73 000；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] 开展输电工程植被恢复及适宜树草种筛选研究，为提升输变电工程植被恢复效率和质量、减少工程造成的水土流失，降低生态恢复成本，保障电网绿色高质量可持续发展提供科学依据。[方法] 以甘肃酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段为例，采用现场调查、实地观测和室内分析的方法，设置 26 个栽种观测点，观测栽种 2 a 和 5 a 草种、树种的生长情况，观测指标主要包括草种及其丛高、干草产量、树种及其株高、分枝数和冠幅。通过熵值法排序并筛选草、树种在输变电沿线各植被分区的生长适宜性。[结果] 根据观测结果，初步筛选出 6 个草种(冰草、芨芨草、草木犀、紫花苜蓿、老芒麦和披碱草)和 6 个树种(多花柽柳、柠条、沙棘、梭梭、沙地柏、胡杨)。适宜性评价结果显示：在秦岭阔叶—落叶混交区，芨芨草、紫花苜蓿、柠条均排序第 1；在河西走廊荒漠戈壁区，草木樨(第 2)和梭梭(第 1)排名最高；在河西走廊绿洲平原区，冰草(第 2)和沙棘(第 1)排名最高；在河西走廊荒漠草原区，老芒麦(第 2)、多花柽柳(第 1)和胡杨(第 1)排名最高；在黄土高原荒漠草原区，披碱草、多花柽柳、柠条、梭梭和沙地柏排序最高，均为第 2 名；在黄土高原干旱草原区，芨芨草(第 2)和沙地柏(第 1)排名最高。[结论] 输变电沿线各植被区分植被恢复适宜树草种选择应因地制宜，综合考虑生长适宜性和生态功能，推荐优先选择乡土种，如在黄土高原干旱草原区宜优先种植芨芨草、沙棘和沙地柏。

关键词：输变电线路；植被恢复；土壤理化性质；草树种筛选
文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X(2025)01-0199-09　　**中图分类号：**S344，S157.1

文献参数：金子惠，耿文婷，李永红，等.特高压输电工程植被恢复过程中树草种适宜性研究[J].水土保持通报，2025，45(1)：199-207. Jin Zihui，Geng Wenting，Li Yonghong，et al. Vegetation restoration and screening with suitable tree and grass taxa for extra-high voltage transmission projects [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2025，45(1)：199-207. DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2025.01.021；CSTR：32312.14.stbctb.2025.01.021.

Vegetation restoration and screening with suitable tree and grass taxa for extra-high voltage transmission projects
—Taking Gansu section of Jiuquan—Hunan ± 800 kV DC transmission line project as an example

Jin Zihui[1]，Geng Wenting[1]，Li Yonghong[2]，An Ning[1]，Xu Ning[1]，Li Zhengfa[1]，Liu Xiaoju[1]，Cheng Xiaojie[1]
(1.*State Grid Gansu Electric Power Company Construction Branch*，*Lanzhou*，*Gansu* 730000，*China*；
2.*College of Soil and Water Conservation Science and Engineering*，*Northwest A&F University*，*Yangling*，*Shaanxi* 712100，*China*)

Abstract：[Objective] Vegetation restoration and screening with suitable trees and grasses in power transmission projects were performed to provide scientific guidance to improve vegetation restoration success in power transmission and transformation projects，reduce soil erosion caused by the project，and reduce ecological restoration costs. This is particularly important to guarantee the green，high-quality and sustainable development of power grids. [Methods] Using on-site investigation，field observation，and indoor analysis，26 planting observation points were set up to observe the growth of grass and tree taxa two and five years after planting. The observation indices mainly included grass taxa and their height，hay production，

收稿日期：2024-05-20　　**修回日期：**2024-11-24　　**采用日期：**2024-11-25
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(汉族)，甘肃省兰州市人，硕士，工程师，主要从事输变电工程植被恢复及环境效应评价工作。Email：geng-wt214@163.com。
通信作者：李永红(1971—)，男(汉族)，陕西省永寿县人，博士，高级工程师，主要从事生产建设项目水土保持工程研究。Email：lyh712100@163.com。

tree taxa and their height, branch number, and crown width. The entropy value method was used to sort and screen the suitability of the growth of the grass and tree taxa in the various vegetation sub-zones along the transmission and substation routes. [Results] According to the observations, six grass taxa (*Agropyron ristatum*, *Achnathurum splendens*, *Melilotus suavcolen*, *Medicago sativa*, *Elymus sibiricus* and *Elymus dahuricus*) and six tree taxa (*Tamarix hohenackeri*, *Caragana korshinskii*, *Hippophae rhamnoides*, *Haloxylon aphyllum*, *Sabina vulgaris*, and *Populus euphratica*) were screened for the suitability evaluation. The results showed that in the broadleaf-deciduous mixed zone of the Qinling Mountains, *A. splendens*, *M. sativa*, and *C. korshinskii* ranked No. 1. In the desert Gobi zone of the West Hebei Corridor, *M. suavcolen* (No. 2) and *H. aphyllum* (No. 1) ranked the highest. In the oasis plain zone of the Hexi Corridor, *A. ristatum* (No. 2) and *H. rhamnoides* subsp. sinensis (No. 1) ranked the highest. In the desert grassland zone of the Hexi Corridor, *E. sibiricus* (No. 2), *T. hohenackeri* (No. 1) and *P. euphratica* (No. 1) ranked the highest. In the desert steppe zone of the Loess Plateau, *E. dahuricus*, *T. hohenacke*, *C. korshinskii*, *H. aphyllum*, and *S. vulgaris* were the most highly ranked species, and they were all ranked No. 2. In the dry steppe zone of the Loess Plateau, *A. splendens* (No. 2) and *S. vulgaris* ranked No. 1. [Conclusion] Selecting suitable tree and grass taxa for vegetation restoration in each vegetation zone along the transmission line should be adapted to local conditions, taking into account the suitability for growth and ecological function. It is recommended to prioritize selecting native species. For example, in the dry grassland area of the Loess Plateau, it is preferable to prioritize planting water with *A. splendens*, *H. rhamnoides* and *S. vulgaris*.

Keywords: transmission lines; vegetation restoration; soil physicochemical properties; tree and grass taxa screening

特高压直流输电工程是国家能源战略布局的关键项目,是构建新型电力系统,实现清洁能源规模化开发和高效配置的关键支撑。作为优化能源配置和推动清洁能源利用不可或缺的环节,该工程发挥了巨大的作用,特别是在化石燃料短缺和城镇化高速发展的背景下[1]。近 10 a 来,特高压直流输变电工程在中国广阔的地理区域以极快的速度发展,包括跨越戈壁、荒草地、水体和山地等广泛的生态脆弱区以及森林、湿地等生态功能区[2]。然而,其建设过程往往伴随着高强度的人类活动对自然景观的改造和切割,不可避免地会对地表植被和土壤产生负面影响,直接导致土壤结构扰乱、植物群落破坏、生物多样性减少,并进一步加剧水土流失[3-4]。因此,特高压直流输电系统在很大程度上造成了能源供需平衡和生态功能受损之间的潜在冲突,迫切需要确定适合特高压直流输电工程的植被恢复模式和技术。

当前研究侧重于对特高压直流输变电工程扰动后的地表植被恢复适宜性评价等。在架设牵引线过程中,采用不落地放线技术和索道运输方式[5];跨越林区采取高塔跨越方式[6];高陡边坡进行植被恢复的同时布设工程措施等[7]减小了工程对沿线植被的扰动和破坏。综上可见,当前研究主要聚焦于输变电工程施工环节相关工艺对植被扰动的影响。输变电工程扰动植被稀疏和土壤贫瘠的区域主要通过表土覆盖种植植被[7],如何有效地进行植被恢复和树草种的筛选成为了研究热点。在土质丘陵区,柠条、沙蒿和铁杆蒿等可以作为输变电工程扰动区域的优先种植物种,而在土石山区,柠条、针茅和牛枝子可以作为优势植被配置[8]。然而,当前研究并没有考虑不同植被类型区和不同施工类型区土壤状况的变化差异,也忽视了施工过程中不同植被类型在不同恢复年限的生长发育状况,从而无法实现科学、细致的植被配置和管理,有碍于输变电工程扰动区域植被恢复速度和效率的快速提升。

甘肃酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段穿越了多样化的地理环境,包括干旱的戈壁荒漠、荒漠草原、干旱草原、绿洲平原等多种植被生态区,气候、土壤和植被条件差异明显,是研究输变电工程扰动区植被恢复状况的理想对象。基于此,本文以该线路为研究对象,系统分析该工程扰动区土壤理化性质的变化差异,评估不同植被类型的生长状况,进而提供植被恢复及适宜树草种种植的科学方案。研究结果不仅能够为直流输电工程扰动区植被恢复的科学配置和管理以及其他生产建设线型工程生态恢复工作提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

新建酒泉—湖南±800 kV 直流输电线路工程甘肃段西起酒泉市瓜州县河东乡,途经酒泉市、张掖市、金昌市、武威市、白银市、兰州市、定西市、天水市、陇南市 8 市 22 县(区),线路长 1 248.59 km。该项目由 2015 年 8 月开始建设,于 2017 年 6 月投入试运行。

线路跨越河西走廊荒漠戈壁、河西走廊绿洲平原、河西走廊荒漠草原、黄土高原荒漠草原、黄土高原干旱草原、秦岭常绿阔叶—落叶阔叶混交林地区 6 个植被分区。土壤类型主要包括棕漠土、灰钙土、灰漠土、黄绵土、黑垆土和黄褐土等。跨越区域气候干旱少雨,多年平均降雨量在 40～750 mm,整体生态环境脆弱,风蚀、水蚀共存。该工程水土流失的重点区域为换流站、塔基区及工场地、牵张场、接地极。本工程中酒泉换流站永久性占地 37.04 hm^2,挖方 3.83×10^5 m^3,扰动规模大,对土体破坏严重。塔基通常有 4 个基坑,基坑的开挖主要有人工开挖、机械开挖 2 种,开挖规格(长宽高)通常为 1 m×1 m×1.5 m。每处塔基都有一处施工临时占地作为施工场地,施工场地平均占地面积 500～600 m^2,主要干扰方式为占压和扰动原有地表,施工完成后会清理场地,以消除砂石及混凝土残留,以利于植被恢复生长。牵张场根据沿线实际情况各施工标段内每隔 5～7 km 设置一处,平均每处占地面积约为 2 000 m^2。牵张场主要扰动方式为破坏原有地表,扰动强度较小,一般采用复耕、自然修复的方式进行植被恢复。

1.2　研究方法

工程建设期间,在玉门市、高台县、凉州区、景泰县、安定区、徽县 6 个线路段各选择典型施工区设置监测点,共 26 个监测点,定位监测降雨、植被恢复等情况,监测点位分布如图 1 所示。2018 年对各线路段草种生长情况进行监测,指标包括出苗率、越夏率、越冬率、越冬前株高、返青率和有无病虫害,为草种的适宜性评价作提前筛选。2019 年对植被恢复重建 2 a 的植被生长情况进行调查。调查指标主要包括草种及其丛高、干草产量,树种及其株高、分枝数和冠幅,草地样方设置为 1 m×1 m,林地样方设置为 20 m×20 m,均为 3 个重复。所选指标均基于以往经验、当地生态环境及评价所需选取。

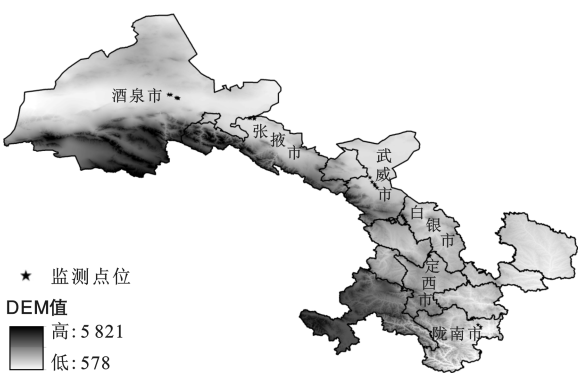

图 1　监测点位分布

Fig.1　Distribution of monitoring sites

工程建设完成后,植被恢复期 5 a 即 2022 年,对监测点区域,采用野外调查、定点监测和室内试验分析相配套的方法,分析线路扰动区和未扰动区土壤理化性质,取样深度为 0—20 cm,重复 3 次,测定指标包括土壤容重、含水率、有机碳和全氮,测定方法分别为环刀法、烘干法、重铬酸钾—外加热法、全自动凯氏定氮仪法[9],调查指标为草种及其株丛高、干草产量;树种及其株高、分枝数和冠幅。根据调查指标,采用熵值法确定不同草、树种在各植被分区的综合得分,进而筛选各植被分区的适宜草、树种。

根据熵值法的要求,数据必须为无量纲数据,即标准化,标准化公式为:

$$X_{ij}=(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min}) \tag{1}$$

但是,标准化后,标准值 X_{ij} 值在[0,1]。不满足熵值法要求,即标准化后的标准值 X_{ij} 在(0,1),因此,必须对公式 1 修正。采用系数法修正,为了较好的满足取值范围,引入系数 a,并取值为 0.9,修正后标准值计算公式为:

$$X_{ij}=(1-a)+a\times(x_{ij}-x_{i\min})/(x_{i\max}-x_{i\min}) \tag{2}$$

式中:i 为指标编码;j 为植被分区编码;X 为标准化值;x 为初始值;$x_{i\min}$ 为所有植被分区的第 i 个指标最小值;$x_{i\max}$ 为所有植被分区的第 i 个指标最大值;a 为常数,取值 0.9。

计算指标同度量化比重(P_{ij}):

$$P_{ij}=x_{ij}/\sum_{i=1}^{m}x_{ij} \tag{3}$$

计算信息熵(a_j):

$$a_j=-(1/\ln m\sum_{i=1}^{m}p_{ij}\ln p_{ij}) \tag{4}$$

计算指标熵权(w_j):

$$w_j=(1-a_j)/\sum_{j=1}^{n}(1-a_j) \tag{5}$$

计算综合得分(H_i):

$$H_i=\sum_{j=1}^{n}(w_j\cdot X_{ij}) \tag{6}$$

式中:m 为植被分区数;n 为指标个数;H_i 为植被生长状况综合分数。

2　结果与分析

2.1　各线路段树草种生境因子分析

该工程不同线路段土壤理化指标详见表 1。酒泉段项目区地处暖温带西部极端干旱灌木—半灌木荒漠区,属温带荒漠植被带,林草覆盖率 2%～5%。年均温度 6.9 ℃,年均降雨量 63.3 mm,年均蒸发量 2 952.0 mm。相比于对照区,项目区除土壤含水率略有减少外,土壤容重增加了 11.28%,土壤有机碳和全氮分别下降了 32.18%和 38.46%。施工后土壤结构

发生变化，土壤更为密实。①张掖段项目区地处暖温带东部半灌木—灌木荒漠区，属荒漠绿洲地貌，年均温度 8.1 ℃，年降雨量为 112.3 mm，年均蒸发量较酒泉段较小，为 1 923.0 mm。项目区土壤容重增加不明显，但是由于扰动造成表层黏粒含量减少，粉粒和沙粒含量增加，土壤肥力急剧下降，土壤有机碳和全氮分别下降了 73.47%和 77.78%。②武威段项目区途经石羊河流域下游以及河西走廊东北部，属温带荒漠植被区，林草覆盖率 5%～20%。该区年均温度8.8 ℃，年降雨量为 113.2 mm，年均蒸发量 2 675.6 mm。项目区较对照区土壤含水率减小 13.37%；土壤容重增加了 4.55%；土壤有机碳和全氮分别减小 52%和 40%，造成这一现象的主要原因是该区土壤颗粒以粉粒和沙粒为主，经过扰动后，稀薄的表层土壤遭到破坏，土壤营养流失。③白银段项目区位于黄土高原与腾格里沙漠之间的过渡地带，属温带大陆性干旱、半干旱气候，年均温度 8.2 ℃，年降雨量为 185.0 mm，年均蒸发量 3 038.0 mm，主要生长温性草原草地类植物。工程建设后土壤理化性质出现了以下变化：土壤含水率增长了 5.2%，土壤孔隙度增大，导致土壤持水能力增强。土壤容重降低了 9.68%，密度降低通常意味着土壤疏松。土壤有机碳含量降低了 66.67%，全氮含量下降了 50%。定西段项目区属中温带干旱半干旱区，年均温度最低，为 7.2 ℃，年降雨量为 377.0 mm，年均蒸发量 1 526.0 mm。植被类型属森林草原带干草原区。土壤经项目区建设扰动后，土体结构发生变化，造成土体容重减少 13.24%，孔隙率增加，土壤含水率增大 6.76%。土壤有机碳、全氮分别减少 48.39%和 28.57%。④陇南段项目区气候类型属北亚热带向暖温带过渡性的大陆季风气候，年平均气温 11.36 ℃，年均降水量最大，为 748.5 mm，年均蒸发量最小，为 1 178.0 mm。植被类型属常绿阔叶—落叶阔叶混交林区，林草覆盖率 68%～73%。项目区建设后，含水率降低，容重变小。土壤有机碳由 1.02%减少到 0.69%，全氮含量由 0.13%减少到 0.08%。这表明扰动促使土壤的质地变差。总体而言，特高压直流输电工程建设对土壤理化性质产生较大的负面影响，尤其是土壤养分[10]。

表 1 2022 年各线路段树草种及未扰动生态系统生境因子情况

Table 1 Habitats for arboreal and herbaceous species in different route sections during 2022

线路段		年均降雨量/mm	年均蒸发量/mm	年均温度/℃	土壤含水率/%	土壤容重/(g·cm^{-3})	土壤有机碳/%	土壤全氮/%
酒泉段	项目区	63.3	2 952.0	6.9	9.55	1.48	0.59	0.08
	对照区				10.22	1.33	0.87	0.13
张掖段	项目区	112.3	1 923.0	8.1	14.18	1.35	0.13	0.02
	对照区				16.78	1.28	0.49	0.09
武威段	项目区	113.2	2 675.6	8.8	12.63	1.38	0.12	0.03
	对照区				14.58	1.32	0.25	0.05
白银段	项目区	185.0	3 038.0	8.2	16.18	1.12	0.15	0.03
	对照区				15.38	1.24	0.45	0.06
定西段	项目区	377.0	1 526.0	7.2	17.37	1.18	0.32	0.05
	对照区				16.27	1.36	0.62	0.07
陇南段	项目区	748.5	1 178.0	11.36	20.58	1.22	0.69	0.08
	对照区				19.52	1.35	1.02	0.13

2.2 不同线路段草种筛选情况

酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程人工种树种草措施，根据当地常见的草种种类，优先选取乡土种，综合考虑不同线路段草种生长的生境因子，在不同区域选取 20 种草种。在春季采用人工播撒的方式播种，草籽撒播量为 150 kg/hm^2，播撒后前两个月每月灌溉一次。监测出苗率、越夏率、越冬率、越冬前株高、返青率和有无病虫害，为草种的适宜性评价作提前筛选。设计草种主要有沙生冰草（*Agropyron desertorum*）、芨芨草（*Achnatherum splendens*）、草木犀（*Melilotus suaveolens*）、紫花苜蓿（*Medicago sativa*）、老芒麦（*Elymus sibiricus*）、披碱草（*Elymus dahuricus*）、骆驼刺（*Alhagi camelorum Fisch*）、狗牙根（*Cynodon dactylon*）等 20 个草种。筛选结果（表 2）表明冰草、芨芨草、草木犀、紫花苜蓿、老芒麦和披碱草有着更高的出苗率、越夏率、越冬率、返青率，在各区域具有更好的生存表现，因此，筛选出这 6 种草种，进行进一步的适宜性评价。

表 2　各线路段草种生长监测结果

Table 2　Growth monitoring of grass species in different route sections

线路段	植被分区	草种	出苗率/%	越夏率/%	越冬率/%	越冬前株高/cm	返青率/%	有无病虫害
酒泉段	河西走廊荒漠戈壁区	沙生冰草	73	94	65	11.2	93	无
		芨芨草	78	92	70	10.4	95	无
		骆驼刺	46	85	30	13.4	88	无
		沙 蒿	48	89	20	12.8	86	无
张掖段	河西走廊绿洲平原区	沙生冰草	82	75	62	13.4	98	无
		芨芨草	85	80	68	14.5	100	无
		马 莲	43	28	0	—	65	有
		骆驼刺	52	35	30	12.3	89	无
		沙 米	32	23	12	10.9	81	无
武威段	河西走廊荒漠草原区	草木犀	68	67	60	13.9	85	无
		紫花苜蓿	71	70	63	12.2	97	无
		老芒麦	65	63	58	13.0	93	无
		披碱草	80	75	65	14.2	97	无
		沙打旺	53	45	20	14.3	64	有
		小冠花	58	40	36	15.2	85	无
		委陵菜	48	42	38	13.4	83	无
		沙 蒿	35	15	12	14.9	71	有
白银段	黄土高原荒漠草原区	沙生冰草	89	88	73	15.5	96	无
		芨芨草	80	80	70	16.8	91	无
		草木犀	81	80	65	14.8	93	无
		紫花苜蓿	85	83	62	13.8	90	无
		老芒麦	83	82	60	15.5	98	无
		披碱草	91	90	68	14.9	90	无
		沙打旺	73	65	46	16.4	93	无
		小冠花	70	63	52	13.2	78	有
		金露梅	43	31	0	12.4	0	无
		牛筋草	0	0	0	—	0	—
定西段	黄土高原干旱草原区	沙生冰草	92	85	72	14.5	98	无
		草木犀	85	84	75	13.3	98	无
		芨芨草	78	76	72	15.5	95	无
		紫花苜蓿	83	83	69	14.7	91	无
		老芒麦	88	85	73	17.9	94	无
		披碱草	81	80	78	16.3	90	无
		苦马豆	52	45	32	18.4	91	无
		骆驼蓬	48	42	28	13.8	94	无
陇南段	秦岭常绿阔叶—落叶阔叶混交林区	沙生冰草	92	91	74	15.1	96	无
		芨芨草	95	93	71	17.8	90	无
		草木犀	90	89	69	14.9	92	无
		紫花苜蓿	92	92	75	16.2	100	无
		老芒麦	97	95	68	14.5	93	无
		披碱草	94	92	68	16.5	90	无
		狗牙根	42	35	23	15.6	89	有
		百脉根	51	51	43	18.8	95	无

2.3　不同草种生长发育适宜性评价

2.3.1　不同植被分区各优势草种生长状况　不同植被分区的草种生长状况详见表 3。

由表 3 可以看出,新建酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程由西向东(从河西走廊荒漠戈壁区到秦岭阔叶—落叶混交林区),适生树、草种增多,随着生态环境的改善,植物生长量及覆盖度明显增加,这可能是由于降雨增加、土壤肥力提高[11];随着土壤种类的变化,土壤质地逐渐变好,草的产量和覆盖度逐渐增加;在干旱、半干旱地区,草木犀和披碱草的生长状况较好,干草产量均高于 178 g/m^2,远高于同类型区其他草种的覆盖度和干草产量;在湿润地区,尽管披碱草的丛高和干草产量最大,但与紫花苜蓿、老芒麦相比,优势不明显。

表 3 不同植被分区优势草种生长状况

Table 3 Growth status of dominant grass species in different vegetation zones

植被分区	土类	草种	株高/cm	干草产量/(g·m^{-2})
河西走廊荒漠戈壁区	棕漠土	冰 草	41	101
		芨芨草	31	164
河西走廊绿洲平原区	灰钙土	冰 草	52	122
		芨芨草	35	180
河西走廊荒漠草原区	灰漠土	冰 草	43	115
		草木樨	115	327
		芨芨草	51	171
		紫花苜蓿	55	127
		老芒麦	59	158
		披碱草	66	178
黄土高原荒漠草原区	黄绵土	冰 草	53	120
		草木犀	115	329
		芨芨草	54	199
		紫花苜蓿	62	200
		老芒麦	59	255
		披碱草	67	272
黄土高原干旱草原区	黑垆土	冰 草	56	127
		草木樨	120	336
		芨芨草	58	206
		紫花苜蓿	61	220
		老芒麦	62	267
		披碱草	71	283
秦岭阔叶—落叶混交林区	黄褐土	紫花苜蓿	78	312
		老芒麦	72	337
		披碱草	82	363

注:数据为监测时段内 2019 年的监测数据。

2.3.2 不同植被分区草种适宜性及筛选 从不同植被分区各项目区人工种植草地中选取适分布面积较广、适应性较强,生长发育状况较好的紫花苜蓿、芨芨草、草木犀、冰草、披碱草和老芒麦 6 个草种在恢复第 2 a 和恢复第 5 a 进行监测(表 4),以评估人为扰动作用下草种的恢复状况,并基于熵值法结合株高、干草产量 2 个指标进行适宜草种筛选[11]。不同草种在各植被分区的生长状况随时间变化如表 4 所示。通过对比 2 个指标增长幅度的平均值可以看出,不同草种的整体增长幅度由大到小为:紫花苜蓿>芨芨草>披碱草 >冰草 >老芒麦>草木樨。虽然草木樨在生长量上大于其他草种,但是从生长期上来看,其持久性则不如其他多年生草种。

从各草种在不同植被分区的适生性情况来看,本研究中所选草种在秦岭阔叶—落叶混交区综合排序均位于第 1,但是根据指标的增长量和该区的生境情况,推荐在该区工程扰动恢复区优先种植芨芨草和紫花苜蓿。除此之外,冰草在河西走廊绿洲平原区(排序由第 3 升为第 2)较为适宜生长;草木樨在河西走廊荒漠戈壁区(排序由第 3 升为第 2)较为适宜生长;芨芨草在黄土高原干燥草原区(排序为第 2)较为适宜生长;紫花苜蓿在黄土高原荒漠草原区(排序为第 2)较为适宜生长;老芒麦在河西走廊荒漠草原区(排序为第 2)较为适宜生长;披碱草在黄土高原荒漠草原区较为(排序由第 3 升为第 2) 适宜生长。

2.4 不同树种生长发育适宜性及筛选

酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段人工种树种类主要有多花柽柳(*Tamarix hohenackeri*)、柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides* subsp. *sinensis*)、梭梭(*Haloxylon aphyllum*)、沙地柏(*Sabina vulgaris*)、沙枣(*Elaeagnus angustifolia*)胡杨(*Populus euphratica*)杜梨(*Pyrus pyrifolia*)8 个树种。所有树种均采用树苗移植进行栽种。实施过程中由于杜梨、沙枣对水分要求较高,成活率低于 20%被自然淘汰外,多花柽柳、柠条、沙棘、梭梭、沙地柏、胡杨 6 个树种实施面积广。

2.4.1 不同植被分区优势树种生长状况 本研究选择株高、分枝数和冠幅 3 个指标来反映新建酒泉—湖南±800 kV 直流输电工程甘肃段不同植被分区各树种的生长发育状况(表 5)。总体来看,在干旱半干旱地区,不同树种的生长发育情况差异较大,如在河西走廊荒漠草原区和黄土高原荒漠草原区,多花柽柳的株高和分枝数远高于其他树种,而其冠幅却在这些树种中,处于中等水平。

2.4.2 不同植被分区树种适宜性及筛选 本研究从项目人工恢复林地中选取多花柽柳、柠条、沙棘、梭梭、沙地柏、胡杨 6 个树种。这 6 个树种分布面积较广、适应性较强、生长发育状况较好、冠幅当年超过 15 cm 且 2 a 后高于周边林地覆盖度。树种于春季栽种,种植方式为每隔 3 m 种植一排,每一排每隔一米设一处种植穴,每穴种植 3 株柠条,根据土壤含水情况适当灌溉以保证树种的正常生长。对恢复期的第 2 年和恢复第 5 年进行了监测,评估不同树种在各植被分区的生长适宜性,具体结果详见表 6。整体来看,多花柽柳的株高、分枝数和冠幅在各植被分区的平均值分别由恢复 2 a 的 39.6 cm,3.4 个和 18.6 cm 增长到恢复 5 a 的 45.8 cm,6.2 个和 28.6 cm;柠条的株高、分枝数和冠幅分别由恢复 2 a 的 63.6 cm,2.4 个和 18.6 cm 增长到恢复 5 a 的 76.0 cm,4.8 个和31.4 cm;沙棘的株高、分枝数和冠幅分别由恢复 2 a 的 76.0 cm,4.8 个和 45.6 cm 增长到恢复 5 a 的 83.0 cm,6.4 个和 52.0 cm;梭梭的株高、分枝数和冠幅分别由恢复 2 a 的 75.2 cm,6.6 个和 52.6 cm 增长

到恢复 5 a 的 84.2 cm,8.6 个和 63.8 cm;沙地柏的株高、分枝数和冠幅分别由恢复 2 a 的 54.8 cm,4.0 个和 29.0 cm 增长到恢复 5 a 的 59.6 cm,5.4 个和 32.4 cm;胡杨的株高、分枝数和冠幅分别由恢复 2 a 的 45.2 cm,10.5 个和 39.6 cm 增长到恢复 5 a 的 49.4 cm,13.2 个和 49.0 cm。

表 4　不同植被分区草种生长发育情况

Table 4　Growth and development status of grass species in different vegetation zones

草种	植被分区	施工区	株高/cm			干草产量/(g·m^{-2})			综合排序	
			2 a	5 a	增长量	2 a	5 a	增长量	2 a	5 a
冰草	河西走廊荒漠戈壁区	塔基	41	45	4	105	115	10	6	6
	河西走廊绿洲平原区	塔基	53	62	9	126	135	9	3	2
	河西走廊荒漠草原区	牵张场	43	48	5	103	110	7	5	5
	黄土高原荒漠草原区	塔基	52	58	6	120	121	1	4	4
	黄土高原干燥草原区	施工道路	56	61	5	124	134	10	2	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	塔基	78	82	4	335	356	21	1	1
	平均		53.8	59.3	5.5	152	161.8	98		
草木樨	河西走廊荒漠戈壁区	站场	117	122	5	351	357	6	3	2
	河西走廊绿洲平原区	输水管线	114	118	4	348	351	3	6	6
	河西走廊荒漠草原区	塔基	115	118	3	332	339	7	5	5
	黄土高原荒漠草原区	站场	117	125	8	346	354	8	4	4
	黄土高原干燥草原区	施工道路	120	124	4	343	356	13	2	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	输水管线	132	138	6	381	386	5	1	1
	平均		119.2	124.2	5	350.2	357.2	7		
芨芨草	河西走廊荒漠戈壁区	塔基	31	36	5	164	170	6	5	6
	河西走廊绿洲平原区	塔基	35	42	7	166	179	13	6	5
	河西走廊荒漠草原区	牵张场	51	58	7	170	178	8	4	4
	黄土高原荒漠草原区	塔基	54	60	6	178	191	13	3	3
	黄土高原干燥草原区	塔基	58	62	4	185	200	15	2	2
	秦岭阔叶—落叶混交区	施工道路	60	72	12	206	227	21	1	1
	平均		48.2	55	6.8	178.3	190.8	12.5		
紫花苜蓿	河西走廊荒漠戈壁区	塔基	30	39	9	128	144	16	6	6
	河西走廊绿洲平原区	塔基	50	57	7	213	225	12	5	5
	河西走廊荒漠草原区	塔基	55	63	8	220	229	9	4	4
	黄土高原荒漠草原区	塔基	62	69	7	256	268	12	2	2
	黄土高原干燥草原区	塔基	61	68	7	235	246	11	3	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	塔基	78	92	14	335	355	20	1	1
	平均		56	64.7	8.7	231.3	244.5	13.2		
老芒麦	河西走廊荒漠戈壁区	塔基	34	38	4	158	162	4	6	6
	河西走廊绿洲平原区	塔基	54	60	6	223	227	4	5	5
	河西走廊荒漠草原区	塔基	59	68	9	238	256	18	2	2
	黄土高原荒漠草原区	塔基	58	63	5	235	242	7	3	3
	黄土高原干燥草原区	塔基	58	61	3	226	238	12	4	4
	秦岭阔叶—落叶混交区	塔基	72	77	5	335	345	10	1	1
	平均		55.8	61.2	5.4	235.8	245	9.2		
披碱草	河西走廊荒漠戈壁区	塔基	35	39	4	168	172	4	6	6
	河西走廊绿洲平原区	塔基	55	62	7	213	219	6	5	5
	河西走廊荒漠草原区	塔基	59	67	8	230	238	8	4	4
	黄土高原荒漠草原区	塔基	62	72	10	262	274	12	3	2
	黄土高原干燥草原区	塔基	66	71	5	266	273	7	2	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	塔基	74	78	4	341	367	26	1	1
	平均		58.5	64.8	6.3	246.7	257.2	10.5		

注:2 a 数据为监测时段内 2019 年的监测数据,5 a 数据为 2022 年测定数据。

表 5 不同植被分区优势树种生长状况

Table 5 Growth status of dominant tree species in different vegetation zones

类型区	树种	株高/cm	分枝数/个	冠幅/cm
河西走廊荒漠戈壁区	沙 棘	32	2	197
	梭 梭	67	6	46
河西走廊绿洲平原区	沙 棘	38	4	22
	梭 梭	69	6	41
河西走廊荒漠草原区	多花柽柳	38	3	16
	柠 条	55	3	15
	梭 梭	78	6	46
	沙 棘	43	5	25
	沙地柏	52	3	23
	胡 杨	45	8	45
黄土高原荒漠草原区	多花柽柳	48	4	17
	柠 条	65	3	19
	梭 梭	52	6	31
	沙 棘	50	4	30
	沙地柏	55	7	34
	胡 杨	52	9	53
黄土高原干旱草原区	沙 棘	45	4	27
	柠 条	75	3	34
秦岭阔叶—落叶混交林区	沙 棘	59	5	35
	柠 条	89	2	53

注:数据为监测时段内 2019 年的监测数据。

通过对比 3 个指标增长幅度的平均值可以看出,不同树种的整体增长幅度由大到小为:柠条 >多花柽柳 >梭梭 >沙棘 >胡杨 >沙地柏。

不同树种在各植被分区的适生性情况差异明显,其中多花柽柳适宜在河西走廊荒漠草原区和黄土高原荒漠草原区(分别排序第 1 和第 2)生长,柠条适宜在秦岭阔叶—落叶混交区(排序第 1)生长,沙棘适宜在河西走廊绿洲平原区和黄土高原干燥草原区(分别排序第 1 和第 2)生长,梭梭适宜在河西走廊荒漠戈壁区(排序由第 2 升为第 1)生长,沙地柏适宜在黄土高原干燥草原区和黄土高原荒漠草原区(分别排序第 1 和第 2)生长,胡杨适宜在黄土高原荒漠草原区(排序第 1)生长。

3 结 论

(1) 特高压直流输电工程建设能够导致原地貌土壤质量下降,特别是造成土壤有机碳等土壤养分的流失,限制了扰动景观中的植物生长和生物多样性发展,需要在短时间内进行合理的管理和保护。

表 6 不同植被分区树种生长发育情况

Table 6 Growth and development status of tree species in different vegetation zones

草种	类型区	施工区	株高/cm		分枝数/个		冠幅/cm		综合排序	
			2 a	5 a	2a	5 a	2 a	5 a	2 a	5 a
多花柽柳	河西走廊荒漠戈壁区	塔 基	36	43	2	5	16	27	5	5
	河西走廊绿洲平原区	塔 基	39	46	3	5	17	30	3	3
	河西走廊荒漠草原区	牵张场	45	50	3	6	23	29	1	1
	黄土高原荒漠草原区	塔 基	40	47	4	7	18	31	2	2
	黄土高原干燥草原区	施工道路	38	43	5	8	19	26	4	4
	平 均		39.6	45.8	3.4	6.2	18.6	28.6		
柠条	河西走廊绿洲平原区	站 场	60	71	2	4	16	29	5	5
	河西走廊荒漠草原区	塔 基	57	65	2	4	18	28	3	4
	黄土高原荒漠草原区	站 场	56	73	3	5	18	33	4	2
	黄土高原干燥草原区	施工道路	67	79	2	5	18	27	2	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	输水管线	78	92	3	6	23	40	1	1
	平 均		63.6	76.0	2.4	4.8	18.6	31.4		
沙棘	河西走廊荒漠戈壁区	塔 基	66	71	4	5	39	45	5	5
	河西走廊绿洲平原区	塔 基	85	88	6	8	51	55	1	1
	河西走廊荒漠草原区	牵张场	69	79	4	5	41	49	4	4
	黄土高原荒漠草原区	塔 基	78	91	5	7	47	57	3	3
	黄土高原干燥草原区	塔 基	82	86	5	7	49	54	2	2
	平 均		76.0	83.0	4.8	6.4	45.6	52.0		
梭梭	河西走廊荒漠戈壁区	塔 基	76	87	7	10	53	66	2	1
	河西走廊绿洲平原区	塔 基	74	84	6	7	52	64	5	5
	河西走廊荒漠草原区	塔 基	75	82	6	8	52	62	4	4
	黄土高原荒漠草原区	塔 基	78	85	8	10	55	64	1	2
	黄土高原干燥草原区	塔 基	73	83	6	8	51	63	3	3
	平 均		75.2	84.2	6.6	8.6	52.6	63.8		

续表 6　(Continued table 6)

草种	类型区	施工区	株高/cm		分枝数/个		冠幅/cm		综合排序	
			2 a	5 a	2a	5 a	2 a	5 a	2 a	5 a
砂地柏	河西走廊荒漠戈壁区	塔 基	48	58	4	5	27	33	5	3
	河西走廊绿洲平原区	塔 基	54	55	3	5	28	31	4	5
	河西走廊荒漠草原区	塔 基	56	59	3	4	29	34	3	4
	黄土高原荒漠草原区	塔 基	57	64	5	6	30	32	2	2
	黄土高原干燥草原区	塔 基	59	62	5	7	31	32	1	1
	平 均		54.8	59.6	4.0	5.4	29.0	32.4		
胡杨	河西走廊绿洲平原区	塔 基	46	51	11	14	38	52	2	2
	河西走廊荒漠草原区	塔 基	44	46	9	12	38	43	5	5
	黄土高原荒漠草原区	塔 基	48	53	12	15	43	54	1	1
	黄土高原干燥草原区	塔 基	46	50	11	12	40	50	3	3
	秦岭阔叶—落叶混交区	塔 基	42	47	10	13	39	46	4	4
	平 均		45.2	49.4	10.5	13.2	39.6	49.0		

注:2 a 数据为监测时段内 2019 年的监测数据,5 a 为 2022 年测定数据。

(2) 工程扰动区在草种选择上,应因地制宜,优先选取乡土种,推荐在秦岭阔叶—落叶混交区种植芨芨草和紫花苜蓿,河西走廊荒漠戈壁区、河西走廊绿洲平原区、河西走廊荒漠草原区、黄土高原荒漠草原区和黄土高原干燥草原区分别宜优先选择草木樨、冰草、披碱草、老芒麦和芨芨草。

(3) 在树种选择上,河西走廊荒漠戈壁区宜优先种植梭梭和沙棘,河西走廊荒漠草原区宜优先种植多花柽柳和胡杨,河西走廊绿洲平原区宜优先种植沙棘,黄土高原荒漠草原区可种植多花柽柳、柠条和沙地柏,黄土高原干燥草原区宜优先种植沙棘和沙地柏,秦岭阔叶—落叶混交区可种植柠条,以确保生态修复的持续性和有效性。

参考文献(References)

[1] Feng Quanlong, Niu Bowen, Ren Yan, et al. A 10 m national-scale map of ground-mounted photovoltaic power stations in China of 2020 [J]. Scientific Data, 2024,11(1):198.

[2] 黄志元,刘宝华,崔星怡,等.输变电工程对土壤环境的影响及其防控[J].农业资源与环境学报,2019,36(5):561-569.
Huang Zhiyuan, Liu Baohua, Cui Xingyi, et al. Impacts of power transmission projects on the surrounding soil environment: Prevention and control [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2019,36(5):561-569.

[3] 刘强,李熙,江世雄,等.输变电工程边坡生态防护关键问题及发展趋势[J].人民长江,2022,53(S1):16-20.
Liu Qiang, Li Xi, Jiang Shixiong, et al. Key problems and development trends of slope ecological protection in power transmission and transformation projects [J]. Yangtze River, 2022,53(S1):16-20.

[4] 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.
Chen Zhuoxin, Li Kui, Wang Wenlong, 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.

[5] 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 Zhongfeng, Yang Wenji, Song Kang. 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.

[6] 赵力,廖彤,汤泽平,等.500 kV 国安输变电工程穿越水源保护区的生态影响与生态保护调查分析[J].生态科学,2019,38(3):107-115.
Zhao Li, Liao Tong, Tang Zeping, et al. Ecological impacts and ecological protection of power transmission projects crossing water source protection areas: A case study of 500 kV Guo'an transmission and transformation project [J]. Ecological Science, 2019,38(3):107-115.

[7] Yang Dan, Du Siying, Zhang Wentao, et al. Study on vegetation restoration technology in ecologically sensitive area of power transmission and transformation project in Sichuan-Chongqing area [J]. Advances in Education, Humanities and Social Science Research, 2023,8(1):83.

(下转第 253 页)

Wang Shuang, Zhao Xiao, Zhou Shenghu. Exploring on the impact of future multi-scenario land use change on Henan Province regional carbon storage[EJ/OL]. Environmental Science [2024-10-16], https://doi.org/10.13227/j.hjkx.202405168.

[22] 李克让,王绍强,曹明奎.中国植被和土壤碳贮量[J].中国科学(D 辑:地球科学),2003,33(1):72-80.
Li Kerang, Wang Shaoqiang, Cao Mingkui. Vegetation and soil carbon storage in China [J]. Science in China (Ser D), 2003,33(1):72-80.

[23] 陈利军,刘高焕,励惠国.中国植被净第一性生产力遥感动态监测[J].遥感学报,2002,6(2):129-135.
Chen Lijun, Liu Gaohuan, Li Huiguo. Estimating net primary productivity of terrestrial vegetation in China using remote sensing [J]. Journal of Remote Sensing, 2002,6(2):129-135.

[24] 任玺锦,裴婷婷,陈英,等.基于碳密度修正的甘肃省土地利用变化对碳储量的影响[J].生态科学,2021,40(4):66-74.
Ren Xijin, Pei Tingting, Chen Ying, et al. Impact of land use change on carbon storage in Gansu Province based on carbon density correction [J]. Ecological Science, 2021,40(4):66-74.

[25] Raich J W, Nadelhoffer K J. Belowground carbon allocation in forest ecosystems: Global trends [J]. Ecology, 1989,70(5):1346-1354.

[26] Alam S A, Starr M, Clark B J F. Tree biomass and soil organic carbon densities across the Sudanese woodland savannah: A regional carbon sequestration study [J]. Journal of Arid Environments, 2013,89:67-76.

[27] 廖超明,韦媛媛,云子恒,等.基于 PLUS-InVEST 模型的珠三角碳储量时空演变与预测[J].水土保持通报,2024,44(1):410-420.
Liao Chaoming, Wei Yuanyuan, Yun Ziheng, et al. Spatiotemporal evolution and prediction of carbon storage in Pearl River Delta based on PLUS and InVEST models [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):410-420.

[28] Nelson E, Mendoza G, Regetz J, et al. Modeling multiple ecosystem services, biodiversity conservation, commodity production, and tradeoffs at landscape scales [J]. Frontiers in Ecology and the Environment, 2009,7(1):4-11.

[29] 万海峰,蒙友波,陈洋,等.黔中城市群碳储量对土地利用/覆被变化的响应及脆弱性[J].水土保持通报,2024,44(1):443-452.
Wan Haifeng, Meng Youbo, Chen Yang, et al. Response of carbon storage to land use/cover changes and vulnerability for central Guizhou urban agglomeration [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024,44(1):443-452.

[30] 滕明塔,李旭东,方冰轲,等.黔中城市群地表覆盖变化及驱动因素分析[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2023,41(1):21-31.
Teng Mingta, Li Xudong, Fang Bingke, et al. Study of land cover change and its driving factors of urban cluster in central Guizhou [J]. Journal of Guizhou Normal University (Natural Sciences), 2023,41(1):21-31.

(上接第 207 页)

[8] 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 Chenghu, Wang Yachen, Xu Lijuan, 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.

[9] 鲍士旦.土壤农化分析[M].北京:中国农业出版社,2000.
Bao Shidan. Soil Agricultural Chemistry Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Press, 2020.

[10] 穆少杰,李建龙,陈奕兆,等.2001—2010 年内蒙古植被覆盖度时空变化特征[J].地理学报,2012,67(9):1255-1268.
Mu Shaojie, Li Jianlong, Chen Yizhao, et al. Spatial differences of variations of vegetation coverage in Inner Mongolia during 2001—2010 [J]. Acta Geographica Sinica, 2012,67(9):1255-1268.

[11] 王国梁,刘国彬,许明祥.黄土丘陵区纸坊沟流域植被恢复的土壤养分效应[J].水土保持通报,2002,22(1):1-5.
Wang Guoliang, Liu Guobin, Xu Mingxiang. Effect of vegetation restoration on soil nutrient changes in Zhifanggou watershed of loess hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2002,22(1):1-5.