

黄土和红壤丘陵区输变电路工程 水土流失影响因素及特征

陈晓刚¹, 丰佳¹, 王文龙^{2,3}, 潘明九⁴, 顾晨临⁴, 余智芳⁴, 伍欢⁵

(1.国网浙江省电力有限公司, 杭州 310007; 2.西北农林科技大学 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 3.中国科学院 水利部 水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100; 4.国网浙江省电力有限公司 经济技术研究院, 杭州 310020; 5.中国电力工程顾问集团 西北电力设计院有限公司, 西安 710075)

摘要:为顺应国家电网公司高质量绿色发展的内在需求,防治输电线路工程施工过程中造成的严重水土流失。以黄土丘陵区 and 红壤丘陵区为研究对象,通过野外调查和文献查阅,选取区域内两条典型线路,就气候、地形、土壤和植被等自然因素对输电线路工程水土流失特征的影响进行研究。结果表明:(1)黄土丘陵区相较于红壤丘陵区侵蚀营力除水力之外还有风力。(2)黄土丘陵区土壤渗透性强、土层深厚,而红壤丘陵区质地粘重、遇水易板结、入渗能力差。(3)黄土丘陵区植被自我恢复能力较差,施工过程中需要随时进行补植,而红壤区植被遭受破坏后恢复能力强,即使施工中植被遭受破坏,在短期内也可自然恢复。(4)黄土丘陵区输电线路工程在施工期土壤侵蚀模数是自然恢复期的 1~10 倍。黄土丘陵区输电线路各区域的土壤侵蚀模数是红壤丘陵区的 2.5~31.25 倍。(5)黄土丘陵区侵蚀模数在换流站站区、机电缆区和榆林市线路工程塔基区的侵蚀模数取最大值,换流站站区和线路工程塔基区新增水土流失量最大;而红壤丘陵区输电线路工程侵蚀模数在宜昌市线路工程塔基区取最大值,塔基区的新增水土流失量亦为最大。塔基区是水土流失防治和监测的重点区域。因此,根据当地自然因素差异,分区域设计工程措施,有利于减少水土流失。

关键词:输电线路工程; 水土流失; 影响因子; 黄土丘陵区; 红壤丘陵区

中图分类号:S157.1

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)04-0192-06

Influencing Factors and Soil Erosion Characteristics for Transmission Line Engineering in Loess and Red Soil Hilly Region

CHEN Xiaogang¹, FENG Jia¹, WANG Wenlong^{2,3}, PAN Mingjiu⁴,

GU Chenlin⁴, YU Zhifang⁴, WU Huan⁵

(1.State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310007, China; 2.Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shanxi 712100, China; 3.Institute of Soil and Water Conservation, CAS&MWR, Yangling, Shanxi 712100, China; 4.Economic and Technological Research Institute, State Grid Zhejiang Electric Power Company, Hangzhou 310020, China; 5.Northwest Electric Power Design Institute CO., Ltd., China Power Engineering Consulting Group, Xi'an 710075, China)

Abstract: In order to meet the inherent needs of high-quality green development of the State Grid Corporation of China, prevent and control the serious soil erosion caused by the construction of the transmission line project, taking loess hilly region and red soil hilly region as a study area, we investigated the variation in natural influencing factors of soil erosion such as climate, topography, soil and vegetation and soil erosion characteristics of transmission line engineering through field investigation and literature review. The results show that: soil erosion force in the loess hilly region includes wind and water, which is different from the red soil hilly region where water erosion dominates; the soils in the loess hilly region have strong permeability and

收稿日期:2021-05-18

修回日期:2021-07-20

资助项目:国家电网公司总部科技项目“山丘区架空输电线路工程水土保持设计施工关键技术研究”(8100-202019156A-0-0-00)

第一作者:陈晓刚(1980—),男,浙江杭州人,博士,高级工程师,主要从事输电线路工程研究。E-mail:512279441@qq.com

通信作者:王文龙(1964—),男,陕西大荔人,博士,研究员,主要从事土壤侵蚀与水土保持研究。E-mail:wlwang@nwsuaf.edu.cn

deep layer, while the soils in red soil hilly area are characterized by a heavy texture, poor infiltration capacity and high potential of sealing in water; the natural revegetation in the loess hilly region is limited, which means that replanting is needed during the construction process, while the natural revegetation in the red soil region is strong and the revegetation can be restored naturally shortly after the construction; the soil erosion rate during the construction period of the transmission line project in the loess hilly region was 1~10 times that of the natural recovery period; the soil erosion rate of the transmission lines in the loess hilly area was 2.5~31.25 times that of the red soil hilly area; the erosion rate of the loess hilly area reached the largest value in the converter station area, the motor cable area and the tower base area of the Yulin City; the water and soil loss in the converter station area and the line engineering tower base area was the largest; the erosion rate of the transmission line project in the red soil hilly area reached the maximum in the tower base area in Yichang City, and the newly added soil erosion in the tower base area was also the largest; the tower base area was a key area for soil erosion prevention and monitoring. Therefore, according to the differences of local natural factors, the design of engineering measures in different regions is conducive to reducing soil erosion.

Keywords: transmission line engineering; soil loss; influencing factor; loess hilly region; red soil hilly region

输电线路工程作为国家基础设施建设的重要组成部分,在保障电力供应、促进清洁能源发展和改善环境等方面具有重要战略意义。截至2018年底,110 kV及以上输电线路长度全国范围内已达103.34万km^[1]。然而,输电线路工程在塔基、施工便道、牵张场、跨越施工场地、变电站、施工营地的施工活动过程中,不可避免地会对地表产生扰动,对地表植被造成破坏,从而产生严重水土流失^[2-3]。输电线路工程建设中的水土流失特征已经成为国际土壤侵蚀学会主要探讨的科学问题。作为一种线型工程,输变电工程水土流失具有以下特点^[4-7]:(1)空间跨度大,穿越水土流失类型区多,各区不同水土流失背景值具有一定差异性,导致采取的水土保持措施也不尽相同。(2)呈离散型(线形)分布。总体扰动面积大、水土流失强度小,但局部点状水土流失强烈。(3)具有阶段性。一般在输电线路施工期水土流失更为严重;而在运营期,由于水土保持措施逐步发挥效益,水土流失程度逐步减轻。而施工期中施工便道区和线路塔基区的水土流失较其他区域更为严重^[8-9]。

我国是一个多山的国家,全国山地、丘陵的面积占到了国土总面积的70%左右,目前大部分山丘区生态环境仍然脆弱、经济发展还较为落后。输电线路建设过程中跨越大型沟谷、翻越山岭,使本来就生态较为脆弱的山丘区更加支离破碎。其中,黄土丘陵区 and 红壤地形区作为两大地形单元,在气候、地形地貌、土壤和植被等自然因素方面存在较大差异,故水土流失特征上存在较大不同。因此,在进行山丘区架空输电线路工程水土保持设计和施工以及水土流失综合治理时,需综合考虑不同区域的山丘区输电线路工程水土流失表现出的差异性特征,在明确各区水土流失

特征及主控因子的基础上,指导水土保持设计和施工以及水土流失综合治理。揭示水土流失影响因素和特征的差异性有助于施工过程中“因地制宜”,保持水土,最大限度减小输变电工程开挖建设过程中造成的水土流失危害。本文以黄土丘陵区 and 红壤丘陵区输变电线路为对象,基于野外调查和资料分析,选取黄土丘陵区 and 红壤丘陵区两条典型线路,对两区域自然因素及输电线路侵蚀特征差异性进行分析,以期为当地山丘区输变电工程以及其他相关电网、线性工程水土保持设计提供科学依据和技术支撑。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

黄土丘陵区位于太行山以西,乌鞘岭以东,长城以南,秦岭以北,面积22.74万km²,多年平均土壤侵蚀模数1 000~3 000 t/km²,水土流失严重,生态环境脆弱。南方红壤丘陵区位于秦岭—淮河以南,大巴山—云贵高原以东、雷州半岛以北,总土地面积118万km²,约占国土总面积的12.3%,多年平均侵蚀模数为3 419.8 t/km²。是我国最重要的农业生产地区之一,也是生态脆弱地带^[10]。

1.2 数据来源

本文选取陕北—湖北±800 kV特高压直流输电工程和酒泉—湖南±800 kV特高压直流输电工程为研究对象,进行水土流失特征及影响因素的分析。陕北—湖北±800 kV特高压直流输电工程沿线地貌主要涉及黄土丘陵、平原和山丘地貌。直流线路长1 137.3 km,其中黄土丘陵区长度409.5 km,占直流线路总长度的36.0%;接地极线路总长度为158.0 km,其中黄土丘陵区长度39.0 km,占接地极线路总

长度的24.7%。黄土丘陵区涉及县市为陕西省榆林市、山西省吕梁市和临汾市。酒泉—湖南±800 kV特高压直流输电工程线路路径总长度约2 413.0 km,线路航空距离2 062.5 km,曲折系数1.17。红壤丘陵区涉及县市为湖北省恩施州、宜昌市、荆州市和湖南省的常德市、益阳市、长沙市、湘潭市。

扰动后土壤侵蚀模数和土壤流失量的取值,采用以下方式确定:

(1) 类比工程概况和观测资料。相近地区同类工程项目的监测验收数据,同时针对相近项目区的环境特征进行模数修正,最终确定实际的扰动后侵蚀模数。

(2) 简易测针法。选择有代表性的原地表与扰动地表布设简易水土流失观测场,布设样地规格1.0 m×1.0 m。将钢钎(直径1 cm,长50 cm),根据坡面面积,按0.5 m×0.5 m的距离分上中下、左中右纵横各3排共9根布设钢钎,并沿铅垂方向打入地面,钉帽与坡面齐平,且在钉帽上涂红漆并编号。每次大风之后,观测钉帽距地面高度,计算土壤侵蚀厚度和总的土壤流失量。

新增土壤流失量采用下式计算:

$$\Delta W = \sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m F_{ji} \times \Delta M_{ji} \times T_{ji}$$

式中: F_{ji} 为某单元的区域面积(km^2); ΔW 为新增土壤流失量(t); ΔM_{ji} 为某时段某单元的新增土壤侵蚀模数 $[\text{t}/(\text{km}^2 \cdot \text{a})]$; T_{ji} 为某时段某单元的预测时间

(a); i 为预测单元, $i=1,2,3,\dots,n$; j 为预测时段, $j=1,2$,指施工期和自然恢复期。

2 结果与分析

2.1 输电线路工程水土流失影响因素

(1) 气候。由表1可知,黄土丘陵区属温带季风气候,降水年际变化大,主要集中在5—10月,多年平均降雨量350~560 mm,蒸发量较大,降雨多以暴雨形式出现,一次或数次大暴雨就可造成严重水土流失。此外,该区风力较强,且大风天气主要集中在春季。如晋西北丘陵区多年平均8级以上大风可达74次之多^[11]。在输电线路施工过程中及施工完成后的一段时间,由于植被尚未完全恢复,导致施工区地表裸露,在风力作用下表土被剥蚀。在黄土丘陵区输电线路施工及后期维护过程中,尤其是雨季,要注意采用合理的防治措施(如排水沟、排水孔、设置风障、留茬等)来减轻水力和风力对输电线路工程造成的危害。红壤丘陵区属亚热带季风气候,降雨季节分配不均匀,主要集中在春季和夏季,多年平均降雨量1 500~1 600 mm,区域内气温高、辐射热量大^[12]。因此,红壤丘陵区输电线路建设工程中主要侵蚀营力为水力。充沛的降雨为崩岗和滑坡的发育和形成提供了十分有利的外部条件,使红壤丘陵山地密集建设的输电网沿线存在大量边坡隐患及病害^[13]。

表1 黄土和红壤丘陵区气候条件差异

地区	气候类型	多年平均降雨量/ mm	年日照时数/ h	风力强度/ 级	无霜期/d	年均温/℃
黄土丘陵区	温带季风	350~560	2300~2800	1~8	140~210	6.8~11.3
红壤丘陵区	亚热带季风	1500~1600	1500~2000	1~3	220~365	16.0~19.5

注:表中数据来源于参考文献[14—17]。

(2) 地形。黄土丘陵区地形破碎,坡陡沟深,地势较高,海拔多在1 000~1 300 m,按其形态可分为长条形的“梁”和椭圆形或圆形的“峁”。黄土台塬、黄土梁塬边缘地带地形破碎,沟壑纵横,不良地质作用发育,主要表现为滑坡、崩塌、落水洞等。梁峁坡的坡度一般为10°~35°,其中15°以上的坡面面积占50%~70%,这些都为水土流失的发生创造了条件。陕北—湖北±800 kV特高压直流输电工程中,陕北换流站主体设计最初提出了两处比选方案:循环工业园站址和物流园站址,其中物流园站址地形破碎,区域内发育有多条冲沟,西面山沟正对站址,防排洪条件及站址安全方面较差。因此将循环工业园站址作为送端换流站的推荐站址。而红壤丘陵区属于我国第三级阶梯,海拔多在500 m以下,区内主要有山地、丘陵、高原和盆地,垂直地带显著。区域内低山丘陵

交错,地形破碎(如崩岗地貌发育,且分布广泛),岩土体中的节理裂隙、风化软弱面等各种结构面发育,减弱了岩石的抗侵蚀能力,造成土体塑性破坏,对边坡稳定性造成一系列影响,为红壤丘陵区水土流失提供了条件^[18]。因此,红壤丘陵区输电线路水土流失主要是由于破碎地形导致边坡不稳定而引起的。

(3) 土壤。土壤物理性质对输变电工程水土流失的影响主要体现在土壤结构和质地上。北方丘陵区土壤以黄土为主,根据不同发育时间可分为中更新统黄土、上更新统黄土和全新统黄土。其中上更新统黄土相较中更新统黄土和上中更新统黄土而言,具有更强的渗透性。输电线路施工过程中扰动土体,导致土壤松散,土壤结构发生破坏,强度降低,渗透性加强,减小边坡稳定性。此外,还会引起土体内部应力场的变化^[19],从而对黄土丘陵区输电线路工程的建设造

成不利的影 响。南方丘陵区土壤母质主要为第四纪红色黏土、花岗岩和玄武岩等。具有黏性强、有效水含量低、遇水易粘结形成结皮、持水能力差等特征^[20]。此外,花岗岩等岩类地区风化层厚,其上发育的红壤容易发生崩岗,造成红壤的流失。碳酸盐岩红壤的土层较薄,导致植被生长困难,降低了红壤的抗

蚀性^[21]。二者性质对比见表2。陕北—湖北±800 kV 特高压直流输电工程在施工过程中,由于黄土丘陵区黄土层较厚,上下土体的有机质含量相差无几,通常无需进行表土剥离。而在南方红壤丘陵区占用的耕地、林地、草地的表层土均需剥离,通常剥离厚度不超过30 cm。

表2 黄土和红壤原状土和扰动土性质对比

地区	土壤类型	质地	压缩性	强度	湿陷性
黄土丘陵区	中更新统黄土(老黄土)	致密	低	高	弱或者无
	上更新统黄土(新黄土)	一般	一般	一般	强烈或有
	全新统黄土(新近堆积黄土)	疏松	高	低	变化范围较大
红壤丘陵区	扰动土	疏松	高	极低	强
	红壤	黏重	低		
	扰动土	一般	一般		

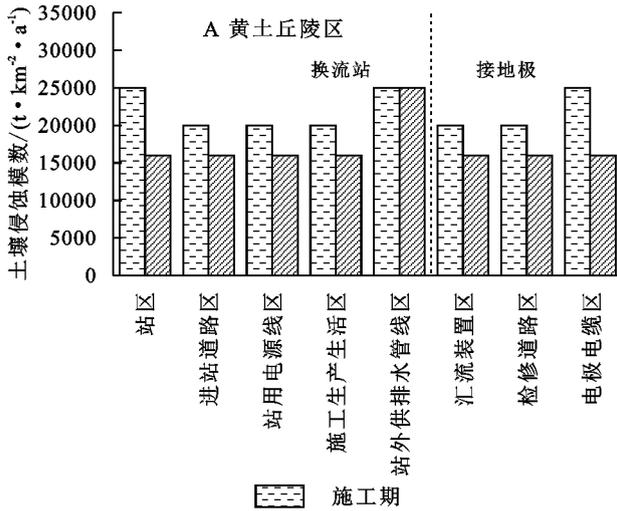
(4) 植被。输电线路项目对植被的影响主要集中在工程建设期。项目建设工程中的地表开挖,会对植物地上部分和地下部分产生扰动^[22]。黄土丘陵区植被以旱生植物为主^[23],其中天然植被以草本植物群落为主。这些草本植物根系发达,叶水势较高,对环境具有较强的适应性。植被对黄土区土壤保持具有重要意义,如提高抗冲刷能力,减小坡面渗透系数^[24]。然而,该区降水量小且分布不均。在输电线路施工过程中,植被一旦破坏,自我恢复能力较差,植被恢复固土保水功能的时间也就越长,因此,在输电线路施工过程中,应尽量避免植被的破坏。如不得已破坏后,要通过撒播、条播、栽植等技术手段种植当地优势树种,以使植被尽快恢复。陕北—湖北±800 kV 特高压直流输电工程中,对黄土丘陵区的输电线路杆塔基础采用全方位高低腿设计,减小了破坏植被的面积。红壤丘陵区良好的气候适宜于各种植物生长,植被覆盖率较高。植被以地带性植被常绿阔叶林占优势,并有藤本和附生植物。南方丘陵区由于雨水充沛,植物生长速度快,更新能力强,即使在输电线路工程施工中植被遭受破坏,在短期内也可自然恢复。酒泉—湖南±800 kV 特高压直流输电工程植被覆盖度调查显示,各市(区)的林草覆盖度为37.6%~67%。然而,该区虽然很多地区林木茂盛,植被覆盖度较高,其林下缺少灌木或草本植物,使得土壤表面裸露程度高,出现“远看青山在,近看水土流”的“林下流”现象^[25]。因此,在红壤丘陵区进行植被恢复时,要尤其注意灌木和草本植物的合理补植。酒泉—湖南±800 kV 特高压直流输电工程采用撒播草籽的方式进行植被的恢复,取得良好的效果。

2.2 黄土和红壤丘陵区输电线路工程土壤侵蚀模数差异

输电线路工程主要包括施工期和自然恢复期。在塔建设过程中,所开挖的松散土壤如果不及时进行防护,土壤颗粒易在水力和风力共同作用下发生移动,从而产生水土流失。此外,塔基开挖、修建施工场地、平整牵张场、修筑施工便道等建设过程中所进行的爆破操作会破坏地层结构,使得地层松动,甚至造成塌陷等问题。黄土和红壤丘陵区典型线路工程土壤侵蚀模数如图1所示,陕北—湖北±800 kV 特高压直流输电工程中,陕西省榆林市和山西省吕梁市的黄土丘陵区土壤侵蚀以极强烈水力侵蚀为主[土壤侵蚀模数背景值分别为15 000,13 000 t/(km²·a)];山西省临汾市黄土丘陵区以强烈水力侵蚀为主[土壤侵蚀模数背景值8 000 t/(km²·a)]。然而,黄土丘陵区输电线路施工期导致塔基区和塔基临时占地、施工道路土壤发生扰动,扰动后的土壤侵蚀模数增至17 246~25 120 t/(km²·a),自然恢复期土壤侵蚀模数略有下降,为9 000~16 000 t/(km²·a)。红壤丘陵区水土流失类型以水蚀为主,包含少量的重力侵蚀,侵蚀形式包括面蚀、沟蚀、崩塌、滑坡等。土壤容许流失量为500 t/(km²·a),土壤侵蚀强度为微度侵蚀,扰动后的土壤侵蚀模数增至5 000~12 000 t/(km²·a),自然恢复期土壤侵蚀模数降至1 000~1 200 t/(km²·a)。综上,输电线路工程的施工可导致土壤侵蚀模数的大幅增加,其中,施工期的土壤侵蚀大于自然恢复期,黄土和红壤丘陵区施工期土壤侵蚀模数分别是自然恢复期的1~1.56倍和7.25~10倍。

黄土丘陵区的输电线路工程土壤侵蚀模数大于红壤丘陵区。黄土丘陵区换流站在施工期和自然恢

复期的土壤侵蚀模数分别是红壤丘陵区的 2.67~3.14 倍和 20~31.25 倍。黄土丘陵区接地极在施工期和自然恢复期的土壤侵蚀模数分别是红壤丘陵区的 2.50~3.33 倍和 20 倍。两区域接地极差异特征同换流站一样,均为施工期大于自然恢复期。黄土丘陵区各城市线路工程的土壤侵蚀模数平均值在施工期和自然恢复期分别是红壤丘陵区的 2.11 倍和 10.80



倍。虽然流水作用与降雨量关系密切,但并不是在降雨最多的地带作用最强,因为红壤丘陵区植物茂盛,植被地上部分削弱了降雨对地表的打击,植被地下部分增强了土壤的固结能力,阻碍了流水的侵蚀作用,所以流水侵蚀作用最强烈的地方反而是雨量中等的黄土丘陵区,即黄土丘陵区流水侵蚀作用造成的危害较红壤丘陵区更强。

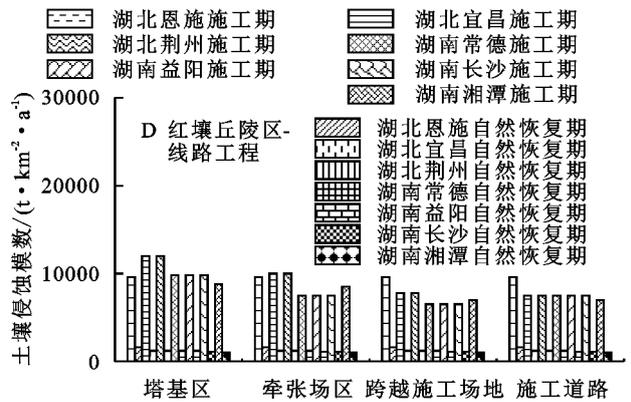
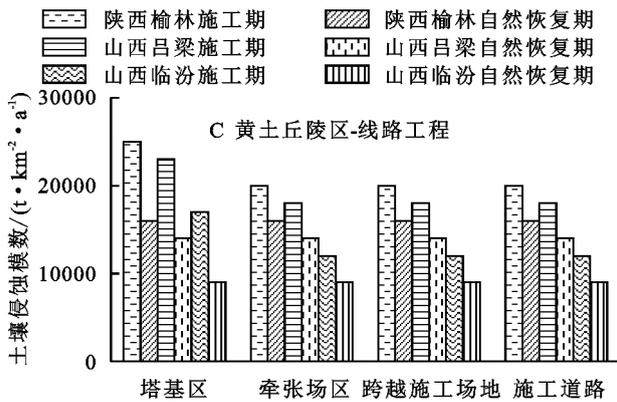
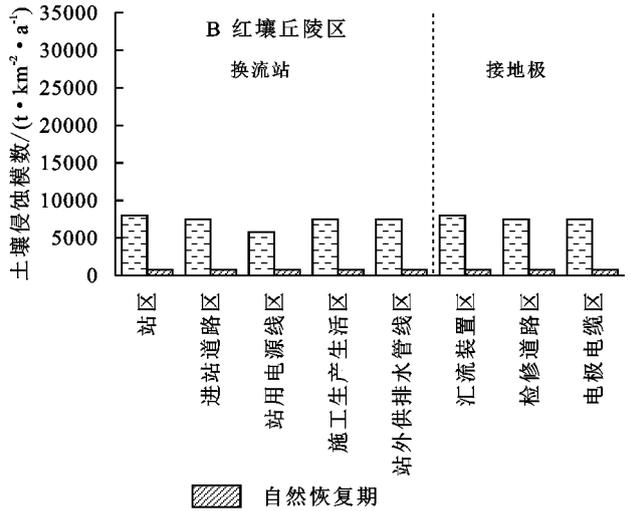


图 1 黄土和红壤丘陵区施工期和自然恢复期土壤侵蚀模数

对于黄土丘陵区而言,侵蚀模数在换流站站区、电机电缆区和榆林线路工程塔基区的侵蚀模数取最大值,均为 25 000 $t/(km^2 \cdot a)$,而红壤丘陵区输电线路工程侵蚀模数在宜昌塔基区取最大值 12 000 $t/(km^2 \cdot a)$,其次为换流站站区和接地极的汇流装置区。由此可知,塔基区是黄土和红壤丘陵区土壤侵蚀最为严重的区域。在施工过程中,要尤其主要塔基区水土流失措施的布设。

2.3 黄土和红壤丘陵区输电线路工程新增土壤流失量

所选线路在黄土丘陵区 and 红壤丘陵区各区域的土壤侵蚀模数如图 2 所示。陕北换流站在施工期和自然恢复期的新增水土流失总量为 25 261 t。其中,陕北换流站新增水土量 12 421 t,送端接地极新增水土流失量 3 523 t,线路工程新增水土流失量 5 962 t。

换流站以站区和站外供排线水管所占比例较大,分别占输电线路工程新增总土壤流失量的 26.72%, 12.50%;接地极的电机电缆区新增土壤流失量最大,占总土壤流失量的 13.93%;线路工程的塔基区新增土壤流失量最大,达 5 277 t,占总土壤流失量的 20.89%。综上,黄土丘陵区水土流失防治和监测的重点区域是换流站站区和线路工程塔基区。红壤丘陵区在施工期和自然恢复期的新增水土流失总量为 22 820.7 t。其中,湖南换流站新增水土量 3 082 t,受端接地极新增水土流失量 538.9 t,线路工程新增水土流失量 18 056.2 t。塔基区新增水土流失量所占比例最大,达 14 153.1 t,占全部新增土壤流失量的 62.0%。因此,红壤丘陵区水土流失防治和监测的重点区域是塔基区。

- (6):1310-1321.
- [21] 熊俊楠,彭超,程维明,等.基于 MODIS-NDVI 的云南省植被覆盖度变化分析[J].地球信息科学学报,2018,20(12):1830-1840.
- [22] 何云玲,余岚,屈新星,等.云南喀斯特关键带植被时空变化特征及气候与人为影响因子解析[J].长江流域资源与环境,2021,30(2):439-447.
- [23] 马海云,张林林,魏学琼,等.2000—2015 年西南地区土地利用与植被覆盖的时空变化[J].应用生态学报,2021,32(2):618-628.
- [24] Pang G, Wang X, Yang M. Using the NDVI to identify variations in, and responses of, vegetation to climate change on the Tibetan Plateau from 1982 to 2012[J]. Quaternary International, 2017,444:87-96.
- [25] 丁文荣.滇东南喀斯特地区植被覆盖变化及其影响因素[J].水土保持研究,2016,23(6):227-231.
- [26] 康雄,曹俊涛,陈成,等.不同趋势法的宁夏长时序植被变化分析[J].测绘通报,2020(11):23-27.
- [27] Jiang L, Bao A, Guo H, et al. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia[J]. Science of the Total Environment, 2017,599:967-980.
- [28] 张翀,李强,李忠峰.三江源地区人类活动对植被覆盖的影响[J].中国人口·资源与环境,2014,24(5):139-144.
- [29] 孙晓鹏,王天明,寇晓军,等.黄土高原泾河流域长时间序列的归一化植被指数动态变化及其驱动因素分析[J].植物生态学报,2012,36(6):511-521.
- [30] 金凯.中国植被覆盖时空变化及其与气候和人类活动的关系[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2019.
- [31] 何奕萱,易桂花,张廷斌,等.红河流域“通道-阻隔”作用下 2000—2014 年植被 EVI 变化趋势与驱动力[J].生态学报,2018,38(6):2056-2064.
- [32] 郑勇.川西高原近 20 年植被覆盖遥感动态监测及驱动力分析[D].成都:成都理工大学,2020.
- [33] 李同艳.西南地区植被覆盖度时空变化特征及其影响因素研究[D].昆明:云南大学,2019.
- [34] 刘群,陈振华.1982—2015 年云南省植被时空变化及其影响因子研究[J].昆明学院学报,2018,40(6):77-82.

(上接第 191 页)

- [26] 谢红霞,李锐,杨勤科,等.退耕还林(草)和降雨变化对延河流域土壤侵蚀的影响[J].中国农业科学,2009,42(2):569-576.
- [27] 汪邦稳,杨勤科,刘志红,等.延河流域退耕前后土壤侵蚀强度的变化[J].中国水土保持科学[J],2007,5(4):27-33.
- [28] 刘文超,刘纪远,匡文慧.陕北地区退耕还林草工程水土保持效应的时空特征[J].地理学报,2019,74(9):1835-1852.
- [29] 梁占岐,李锦荣,郭建英,等.退耕还林工程建设对土壤侵蚀的影响:以安塞县为例[J].水土保持研究,2016,23(3):77-81.
- [30] 侯瑞,员学峰.陕北黄土丘陵沟壑区土壤侵蚀驱动机制分析及稳定性评价[D].西安:长安大学.
- [31] 娄和震,杨胜天,周秋文,等.延河流域 2000—2010 年土地利用/覆被变化及驱动力分析[J].干旱区资源与环境,2014,28(4):16-21.
- [32] Wang L, Yan H, Wang X W. The potential for soil erosion control associated with socio-economic development in the hilly red soil region, southern China [J]. Catena, 2020,22(5):1177-1194.

(上接第 197 页)

- [17] 杨汝荣.南方红壤丘陵地区草地资源开发潜力分析[J].江西农业大学学报,2000,22(2):192-198.
- [18] 马鹏飞,夏栋,许文年,等.含水率及坡度对红壤丘陵区崩岗崩壁重力侵蚀影响规律的有限元分析[J].水利水电技术,2019,50(4):214-227.
- [19] 杜少少,洪勃,王力,等.陕北黄土地层地貌特征及工程特性综述[J].中国地质调查,2018,5(6):83-89.
- [20] 蔡强国,吴淑安,马绍嘉,等.花岗岩发育红壤坡地侵蚀产沙规律试验研究[J].泥沙研究,1996(1):89-96.
- [21] 王玉朝.红壤侵蚀特征与环境因子的关系[J].云南地理环境研究,2013,25(1):30-35.
- [22] 王英,马俊杰,王伯铎.南方丘陵红壤区抽水蓄能电站建设的生态环境影响及对策研究[J].水土保持学报,2006,20(5):142-145.
- [23] 陈辉.植被根系对黄土边坡稳定性及固土效果的影响[J].水电能源科学,2019,37(10):97-100.
- [24] 赵其国.我国南方当前水土流失与生态安全中值得重视的问题[J].水土保持通报,2006,26(2):1-8.
- [25] 顾祝军.水蚀区“林下流”发生机理与植被恢复度的遥感监测研究[D].南京:中国科学院南京土壤研究所,2008.