

## 不同护坡模式下的高路堑边坡水土流失研究

姜勇军 (中铁二十四局集团南昌铁路工程有限公司, 江西南昌 330000)

**摘要** 通过测定不同护坡模式(A区拱形骨架护坡, B区拱形骨架+植草护坡, C区拱形骨架+六棱砖护坡, D区拱形骨架+六棱砖+植草护坡)下的水土流失状况, 筛选出适宜该研究区的护坡模式。结果表明: 不同护坡模式下土壤结构产生了一些变化, 其中A区的土壤容重增幅最大(11.96%), C区次之, B区第三, 增幅分别为8.55%和6.84%, 而D区增幅最小(3.42%)。A、B、C和D区均以面状侵蚀为主, 其中A区比B区分布有更多的侵蚀沟, 且A区比B区侵蚀更深; C区和D区以六棱砖为单元形成上深、下浅的侵蚀状态, 且C区比D区侵蚀更深。4种护坡模式下的土壤侵蚀模数表现为A区>C区>B区>D区, 且土壤侵蚀模数随着时间的推移呈逐渐下降的趋势。拱形骨架+六棱砖+植草护坡模式的防护效益最优。采用该护坡模式能够有效改善土壤结构, 减少水土流失。因此, 建议在类似地区采用该护坡模式, 以提高边坡的稳定性和安全性。

**关键词** 护坡模式; 高路堑; 水土流失; 土壤侵蚀模数

中图分类号 S29 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2022)05-0178-03

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2022.05.045



开放科学(资源服务)标识码(OSID):

### Study on Water and Soil Erosion of Deep Cutting Slope under Different Slope Protection Modes

JIANG Yong-jun (Nanchang Railway Engineering Co., Ltd., China Railway 24th Bureau Group, Nanchang, Jiangxi 330000)

**Abstract** We determined the soil and water erosion conditions under different slope protection modes to select the suitable slope protection modes for the study area. The results showed that the soil structure changed under different slope protection modes (A, arch skeleton slope protection; B, arch+hexagonal brick slope protection; C, arch+grass slope protection; D, arch+hexagonal brick+grass planting, the same below). The largest increase amplitude of soil bulk density was the largest (11.96%) in area A, followed by area C (8.55%) and area B (6.84%), and the increase amplitude of soil bulk density was the lowest (3.42%) in area D. Area A, B, C and D were dominated by areal erosion. There were more erosion gullies in area A than in area B, and the erosion in area A was deeper than that in area B. The erosion state in area C and D was formed by hexagonal brick, and the erosion in area C was deeper than that in area D. The soil erosion modulus of four different slope protection types was A>C>B>D, and the soil erosion modulus decreased gradually with time. The slope protection mode of arch+hexagonal brick+planting grass had the best protection benefits, which could effectively improve the soil structure and reduce soil erosion. Therefore, area D was suggested to be used in similar regions, so as to improve the stability and safety of slope.

**Key words** Slope protection mode; Deep cutting; Water and soil erosion; Soil erosion modulus

铁路工程的建设对于促进当地经济发展具有重要的推动作用, 但铁路工程不可避免地对当地生态环境产生一定的影响。如果不及时采取有效措施, 不仅会加剧环境问题, 而且会对铁路安全运营产生很大的威胁, 危及人民财产安全。

线路工程中, 路堑和路堤边坡区段经常存在水土流失、边坡失稳等现象。目前常用的护坡模式有拱形骨架护坡、菱形骨架护坡、六棱砖护坡、锚索框架护坡以及植草护坡等单一或多种组合护坡模式<sup>[1-5]</sup>, 以维持边坡的稳定性。然而, 对不同护坡模式下水土流失状况的研究较少, 尤其是在高路堑和高路堤区段。水土流失的危害主要有土壤剥蚀、肥力减退、污染水质、泥沙下泄、堵塞渠道、严重时冲毁线路设施、危及行车安全<sup>[6-7]</sup>。笔者选取了4种不同护坡模式, 对高路堑边坡路段的水土流失状况进行了研究, 筛选出适宜该区段的护坡模式, 提高边坡的水土保持效益, 维持边坡的稳定性。

## 1 研究方法

**1.1 研究区概况** 研究区位于宁夏回族自治区吴忠市境内, 试验地选择在其境内的某铁路路堑边坡区域。该路堑边坡为黄土边坡, 坡度较陡, 坡度约48°。该区域地处西北内陆, 属于中温带干旱、半干旱气候地区, 具有明显的大陆性特

征: 四季分明, 气候干燥, 蒸发强烈, 降水集中, 大气透明度好, 云量少, 日照充分, 热量丰富, 温差较大, 无霜期短, 风沙较多; 多年平均气温9.3℃; 历年平均降水量184.6~273.5mm, 年平均降雨日数为46.5d, 降雨集中在每年7—8月。太阳辐射年总量约619.92kJ/cm<sup>2</sup>。

**1.2 护坡模式** 路堑边坡区域采用4种不同的护坡模式, 如图1所示。其中, 工程护坡模式2种, 分别为拱形骨架护坡和拱形骨架+空心六棱砖护坡模式; 工程护坡与生态护坡相结合的模式2种, 分别为拱形骨架+植草护坡和拱形骨架+空心六棱砖+植草的护坡模式。

①拱形骨架护坡主要是利用混凝土拱形骨架将长大坡面分成由骨架支撑的若干小块, 起到支撑和稳固坡面的作用。通过拱形骨架将坡面分成若干小窗格后, 很大程度上减少了溜坍体的厚度和范围, 且拱形骨架可以有效阻止土体的滑动, 防治坡面土体产生大范围溜坍。该研究中拱形骨架的拱顶至底部之间的垂直距离为3m。该护坡模式下的监测区域为A区。②拱形骨架+空心六棱砖护坡与拱形骨架护坡模式类似, 其不同点主要是在由骨架分割成的小窗格内镶嵌空心六棱砖, 进一步维护窗格内土体的稳定性。该护坡模式下的监测区域为C区。③拱形骨架+植草护坡模式是在拱形骨架分割后的小窗格内移栽灌木植株, 并撒播草种。在拱形骨架支撑和维持基本稳定的基础上, 通过生态修复的手段, 提高土体的黏聚性, 增强土体稳定性。该护坡模式下的监测区域为B区。④拱形骨架+空心六棱砖+植草护坡模式是在拱

**基金项目** 宁夏回族自治区重点研发计划项目(2019BFG02013); 中国中铁股份有限公司引导项目(2016-KJ015-Z013-03)。

**作者简介** 姜勇军(1989—), 男, 湖南邵阳人, 工程师, 从事铁路建设技术工作。

**收稿日期** 2021-07-09

形骨架+空心六棱砖护坡的基础上,在空心六棱砖内栽植灌

木,并撒播草种。该护坡模式下的监测区域为 D 区。

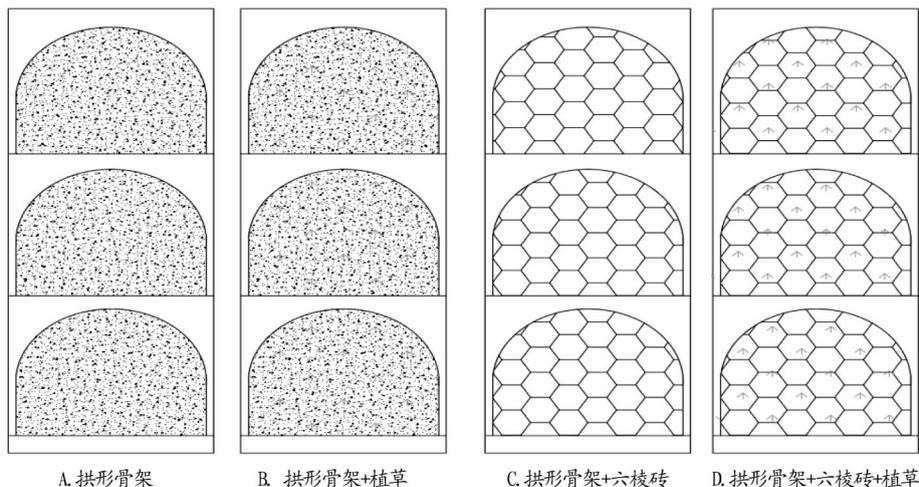


图 1 不同护坡模式示意

Fig.1 Different slope protection modes

### 1.3 土壤侵蚀模数测定

**1.3.1 监测点位置。**为减少监测点受人为因素和其他因素的干扰,监测区域均选在边坡中部位置,即边坡中部的拱形骨架区域内进行监测。

**1.3.2 监测方法。**由于受立地条件和框架结构等因素的影响,不宜采用建立径流场的方法进行监测,因此选用地面定位监测的方法(即钉桩法)进行监测<sup>[8]</sup>。

拱形骨架+六棱砖护坡模式,从拱底 1 排的六棱砖开始,在六棱砖的中部插入直径 0.5 cm、长 30.0 cm 的钢钎,沿铅垂方向打入坡面,距坡面均留 5.0 cm;然后,每间隔 1 排插入钢钎。其余 3 种护坡模式中的钢钎布设位置和间距与拱形骨架+六棱砖护坡模式保持一致。通过监测钉帽距地面的高度,计算土壤侵蚀厚度和土壤侵蚀量。在每种护坡模式中平行布设 5 个地面组定位监测场。

**1.3.3 监测时间。**每隔 1 个生长期进行 1 次监测,监测 2 个生长周期土壤侵蚀量的变化情况。

**1.3.4 计算方法。**按照以下公式计算土壤侵蚀量:

$$E = S \times H \times \cos\theta / 1000 \quad (1)$$

式中, $E$  为土壤侵蚀量( $m^3$ ); $S$  为坡面面积( $m^2$ ); $H$  为土壤侵蚀深度(mm); $\theta$  为斜坡坡度( $^\circ$ )。

## 2 结果与分析

**2.1 不同护坡模式下的土壤容重变化** 初期土壤容重为开始时 A、B、C 和 D 区所有监测样方内测得的土壤表层平均容重;I 期和 II 期土壤容重是指分别经过 1 个和 2 个生长周期后测得的各监测区域土壤容重。

由图 2 可知,4 个监测区域内的土壤容重随着时间的推移均明显提高,其中 A 区土壤容重增幅最大,D 区增幅最小。相较于初期, I 期土壤容重增幅大小表现为 A 区(9.40%)>C 区(5.98%)>B 区(5.12%)>D 区(2.56%),且 A 区和 C 区的土壤达到偏紧的状态,不利于植被恢复。相较于 I 期, II 期土壤容重增幅大小表现为 C 区(2.42%)>A 区(2.34%)>B 区(1.63%)>D 区(0.83%)。随着时间的推移,土壤容重的

增幅明显变小。整体来看, A 区土壤容重的增幅最大(11.96%), C 区(8.55%)次之, B 区(6.84%)第三, D 区增幅最小(3.42%)。

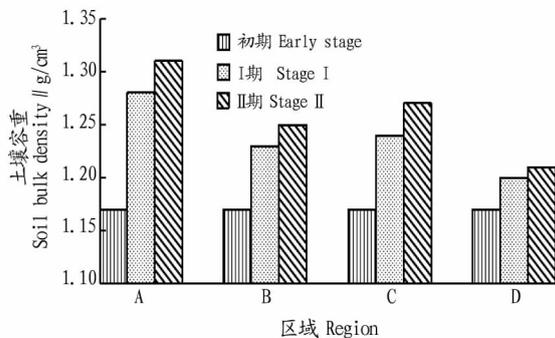


图 2 不同护坡模式下土壤容重的变化

Fig.2 Changes of soil bulk density under different slope protection modes

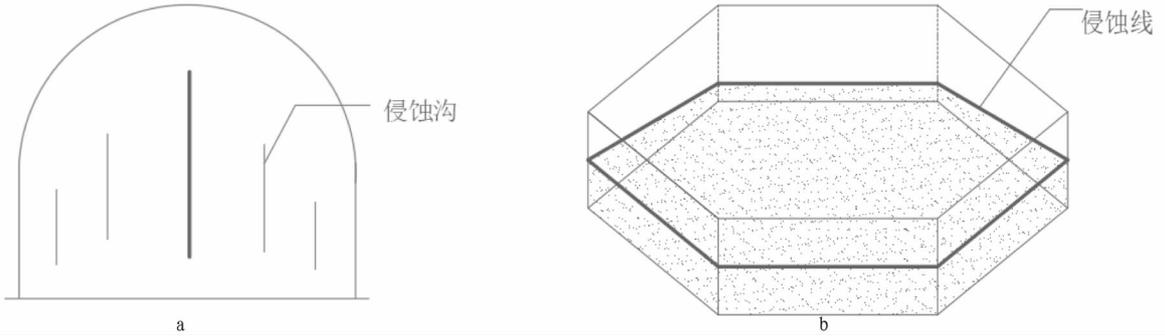
土壤容重除了与土壤质地类型、土壤结构及有机质含量有关外,还受到外界因素的影响,如降水、人为活动等<sup>[9]</sup>。I 期土壤容重相较于初期增幅较大,其主要原因可能是受降水等侵蚀活动的影响,在外界水压力的作用下,土壤孔隙被小粒径的土颗粒填实,致使土壤容重产生较大的变化。II 期土壤容重相较于 I 期增幅减小,其原因可能是多方面的:①I 期土壤孔隙填实程度较高,II 期在水压力的作用下孔隙填实程度减弱;②土壤表层出现不同程度的物理结皮现象,而物理结皮在一定程度上维持了土体的稳定性。

在一定条件下,土壤容重越高,土壤结构就越紧密,土体水源涵养功能减弱,其产生的地表径流量就越大<sup>[10]</sup>,且不利于植被的生长。在同一时期内,对不同护坡模式下的土壤容重进行比较,发现 A 区土壤容重较 C 区更高, B 区土壤容重较 D 区更高,表明拱形骨架+六棱砖的组合护坡模式比单一的拱形骨架护坡模式较好,更有利于改善土壤结构; A 区土壤容重较 B 区更高, C 区土壤容重较 D 区更高,表明工程+生态防护对土壤的改良效果要优于单一的工程防护效果。究

其原因,可能是由于六棱砖在一定程度上分散了地表径流,使水压力减小,减弱了土壤孔隙的填实作用,从而使土壤容重的增幅减小。植被的覆盖作用同样减小了地表水压力,且植物根系改善了土壤结构,增加了土壤孔隙,从而使土壤容重增幅降低<sup>[11]</sup>。

**2.2 不同护坡模式下的土壤侵蚀状态** 不同护坡模式下的土壤侵蚀状态有不同的表现形式,其中 A 区主要以面状侵蚀为主,且分布有大小不一的浅沟,位于拱形骨架中线区域附近的浅沟较深。受拱形骨架的保护,靠近骨架区域的土壤侵

蚀厚度较小;B 区侵蚀类型与 A 区相似,但侵蚀深度与 A 区相比较小,受植被因素的影响,侵蚀沟较为弯曲,侵蚀状态如图 3a 所示;由于区域内土体被六棱砖分割成若干小块,C 区形成了以六棱砖为单元、上深下浅的侵蚀状态,即六棱砖内上部区域侵蚀较深,下部区域侵蚀较浅,其主要原因是由于六棱砖体的阻隔以及水流冲刷和土体自重的作用形成了上深下浅的侵蚀状态;D 区侵蚀状态与 C 区类似,但侵蚀深度较小,侵蚀状态如图 3b 所示。



注:a. A 区与 B 区;b. C 区与 D 区  
Note:a. Area A and B;b. Area C and D

图 3 不同护坡模式下的土壤侵蚀状态示意

Fig. 3 Soil erosion status under different slope protection modes

从图 4 可以看出,不同护坡模式下的土壤侵蚀厚度不同,其中 A 区侵蚀厚度最大,D 区侵蚀厚度最小, C 区侵蚀厚度略高于 B 区。与 I 期相比,II 期各区域内土壤侵蚀厚度均明显下降,A、B、C、D 区分别减少 1.7、1.1、1.5 和 1.3 cm,各区域下降幅度大小表现为 A 区(32.69%)<B 区(34.29%)<C 区(35.71%)<D 区(41.91%)。对其侵蚀深度下降的原因和下降程度不同的原因进行分析,结果发现:①经过降水侵蚀后,土壤结构更加紧密,能够在一定程度上减少降水侵蚀的影响;②土壤表层的物理结皮在降水较小的情况下不易产生破坏,同样能够抵御一定的降水侵蚀;③植物根系有固结作用,能够维持表层土体的稳定,不易产生破坏。

表明不同护坡模式对边坡水土流失的防护效果不同。A 区土壤侵蚀模数虽然最高,但是拱形骨架也具有一定的防护作用。骨架护坡在一定程度上还起到分流降水的作用,使降水沿坡面顺坡而下,有效阻止了路基坡面雨水的汇集。骨架的阻滞作用使水流流速减小,冲刷力减弱。

B 区的土壤侵蚀模数明显低于 C 区,表明在防治土壤侵蚀方面,植被的防护作用要明显优于六棱砖。其主要原因是由于植被防护作用是多方位的:①地上植被的覆盖作用可以减弱降水对地面的溅蚀和冲刷作用;②地下植被的根系具有固结作用,使土体联结在一起,增强土体的稳定性和抗冲性<sup>[12]</sup>;③植被可以吸收和消耗一部分降水,从而减少和分散地表径流,使得植被防护下的土体侵蚀模数较低。六棱砖的防护作用相对较弱,主要是起阻隔作用,保护土体不被冲刷和分散径流作用,但在降水量较大时其防护效果较差,土体易被冲刷。

D 区的土壤侵蚀模数最小,该护坡模式集合了前 3 种护坡模式的优点,既有拱形骨架和六棱砖的阻滞和分隔作用,又有植被的防护作用,因此其土壤侵蚀模数最小,防护效果要优于前 3 种护坡模式。I 期 D 区土壤侵蚀模数也较高,为 2.1049 万 t/(km<sup>2</sup>·a)。

### 3 结论

不同护坡模式下的土壤结构、侵蚀状态和土壤侵蚀模数存在较大的差异。单一工程护坡模式的防护效果要弱于多种工程组合护坡模式;工程+植被护坡模式下的防护效果要优于单一工程护坡模式;在防治土壤侵蚀方面,六棱砖的防

(下转第 187 页)

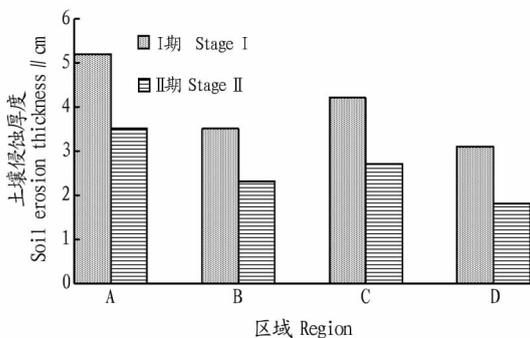


图 4 不同护坡模式下土壤侵蚀厚度的变化

Fig. 4 Changes of soil erosion thickness under different slope protection modes

**2.3 不同护坡模式下的土壤侵蚀模数** 由图 5 可知,不同护坡模式下的土壤侵蚀模数不同。整体来看,A 区的土壤侵蚀模数最高,C 区其次,B 区第三,D 区土壤侵蚀模数最小,这

道建设,为大宗农产品贸易提供交通支持。长江各流域之间的水利势能丰富,利用这一优势,可以加大对水力发电的投入,满足用电需求,发展绿色经济。

(2)完善基础设施建设前期规划,规范建设结构。科学的前期规划能够使农村基础设施建设更加完善,同时还能够节约资源,防止浪费。长江经济带上、中、下游有着较为分明的地理环境和农业基础,各地农业的发展基础和发展道路不尽相同,因此应当对各地农业发展和基础设施建设进行规划,使长江经济带各区域之间能够形成互补,打造区域发展一盘棋,促进区域融合发展。

(3)推动特色农业发展,推动农产品品牌化。长江经济带地貌丰富,各种地貌齐聚,各区域农产品具有各自的特色,各地应当根据自身特色,发展具有地域特色的农产品,有效保护农产品地理标志,加大对特色农产品的投入,推动农产品品牌化建设,充分发挥品牌效应,促进农业经济发展,优化农业产业结构。

### 参考文献

- [1] 曹菲,聂颖. 产业融合、农业产业结构升级与农民收入增长:基于海南省县域面板数据的经验分析[J]. 农业经济问题, 2021, 42(8): 28-41.
- [2] 隋福民. “互联网+农业”还是“农业+互联网”:中国农业产业升级的战略选择[J]. 宁夏社会科学, 2020(6): 102-107.
- [3] 田娟娟,马小林. 数字普惠金融推动农业转型升级的效应分析:基于省际面板数据的实证[J]. 征信, 2020, 38(7): 87-92.
- [4] 胡太平. 智慧农业推动农业产业升级的应用与展望[J]. 农业经济, 2020(6): 6-8.
- [5] 王会钧. 绿色金融如何支持农业产业结构绿色升级:以黑龙江省为例[J]. 农业经济, 2020(5): 108-110.
- [6] 张宇. 唐山市新型城镇化与农业产业升级互动关系研究[J]. 中国农业资源与区划, 2019, 40(11): 282-287.
- [7] 江艳军,黄英. 民间投资、农业科技进步与农业产业结构升级:基于“一带一路”沿线省域的实证研究[J]. 科技管理研究, 2019, 39(17): 123-130.

- [8] 刘妍,赵帮宏. 农产品出口质量对农业产业升级的影响[J]. 农业技术经济, 2019(8): 115-132.
- [9] 陈淑玲,侯代男. 新型农业经营主体的培育与农村地区经济转型升级问题研究[J]. 农业经济, 2019(7): 30-32.
- [10] 杨学儒,韩剑,徐峰. 乡村振兴背景下休闲农业产业升级:一个创业机会视角的实证研究[J]. 学术研究, 2019(6): 101-109.
- [11] 吴军. 农业产业升级下的乡村治理[J]. 人民论坛, 2019(16): 72-73.
- [12] 茹玉,肖庆文,都静. 全球价值链助推农业产业升级的创新路径研究:基于湘潭县茶产业扶贫项目的案例分析[J]. 农业经济问题, 2019, 40(4): 51-59.
- [13] 黄英,江艳军. 新时代耕地利用转型对农业产业结构升级的影响[J]. 广西社会科学, 2019(3): 65-70.
- [14] 霍雨佳. 市场化服务缺失下小农户与产业组织的深度融合研究:基于农业产业集群的小农户转型升级思考[J]. 农村经济, 2018(12): 79-85.
- [15] 陈雪,毛世平. 村庄基础设施建设如何推进农业农村现代化? ——基于日本的经验与启示[J]. 世界农业, 2021(8): 69-76, 120.
- [16] 薛国琴,项辛怡. 以农村信息化基础设施建设促进农业农村数字经济发展[J]. 农业经济, 2020(12): 39-41.
- [17] 胡云香,马占武,韩静云,等. 基于结构熵权-物元可拓分析的宁夏农村基础设施建设适用技术评价[J]. 科学技术与工程, 2020, 20(27): 11302-11307.
- [18] 孙健,张体栋,张释文. 中国农村地区卫生基础设施建设研究[J]. 广东社会科学, 2020(3): 33-43.
- [19] 王昕宇,马昱. 农村基础设施建设减贫效应研究:基于面板平滑转换模型的实证分析[J]. 农村经济, 2020(3): 47-53.
- [20] 赵周华,霍兆昕. 农村基础设施建设对贫困民族地区减贫的影响:基于内蒙古 20 个国家级贫困县的实证研究[J]. 湖北民族大学学报(哲学社会科学版), 2020, 38(2): 68-76.
- [21] 匡远配,周凌. 农地流转的产业结构效应研究[J]. 经济学家, 2016(11): 90-96.
- [22] 干春晖,郑岩谷,余典范. 中国产业结构变迁对经济增长和波动的影响[J]. 经济研究, 2011, 46(5): 4-16, 31.
- [23] 李燕,成德宁,郑鹏. 农业基础设施对农业产出的影响及其区域差异:基于 2004 年~2013 年中国 232 个地级市的分析[J]. 广东财经大学学报, 2017, 32(6): 106-113.
- [24] 张亦弛,代瑞熙. 农村基础设施建设对农业经济增长的影响:基于全国省级面板数据的实证分析[J]. 农业技术经济, 2018(3): 90-99.
- [25] 江艳军,黄英. 农村基础设施对农业产业结构升级的影响研究[J]. 资源开发与市场, 2018, 34(10): 1400-1405.

(上接第 180 页)

护作用要弱于植被的防护作用。整体来看,拱形骨架+六棱砖+植草护坡模式下 D 区的防护效果最优,土壤容重增幅、土壤侵蚀厚度和土壤侵蚀模数均最小,可以有效减缓坡面的水土流失状况,改善土壤结构,促进植被的生长,保持边坡土体的稳定,减少安全隐患。但是, D 区在前期侵蚀模数较大,因此在后期研究中应对其铺设方式进行改进或增加辅助措施,以提高该模式下的前期防护效果。

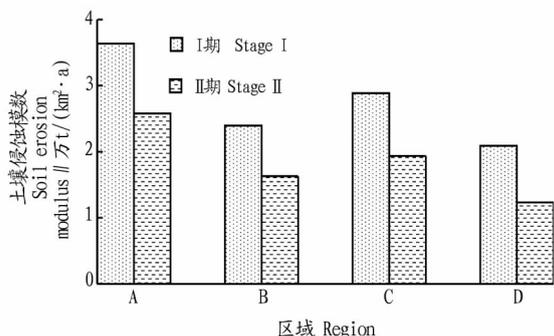


图 5 不同护坡模式下的土壤侵蚀模数

Fig. 5 Soil erosion modulus under different slope protection modes

### 参考文献

- [1] 王晓霞,罗翔,毕书春. 路堤边坡新型混凝土预制件骨架护坡施工方法[J]. 公路工程, 2011, 36(4): 131-135.
- [2] 周富春,王小彪,刘雪莲. 4 种公路工程生态护坡类型的防治效果研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(5): 220-223.
- [3] 张艳,赵廷宁,杨建英,等. 高速公路不同边坡类型对植被恢复的影响[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(4): 80-85.
- [4] 朱宝龙,杨明,胡厚田,等. 土质边坡加固中预应力锚索框架内力分布的试验研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(4): 697-702.
- [5] 伍谦. 高速公路边坡植草护坡的根固效应研究[J]. 中南林业科技大学学报, 2011, 31(11): 106-109.
- [6] 史东梅. 高速公路建设中侵蚀环境及水土流失特征的研究[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 5-9.
- [7] 吕钊,王冬梅,徐志友,等. 生产建设项目弃渣(土)场水土流失特征与防治措施[J]. 中国水土保持科学, 2013, 11(3): 118-126.
- [8] 孔令伟,薛春晓,崔雍,等. 新保墙措施在铁路路域建植技术中的应用研究[J]. 铁道工程学报, 2019, 36(5): 71-76.
- [9] 刘德虎. S233 公路项目水土保持效果评价[D]. 泰安:山东农业大学, 2011.
- [10] 王辉,王全九,邵明安. 表层土壤容重对黄土坡面养分随径流迁移的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 10-13, 18.
- [11] 金晓,陈丽华. 晋西黄土区不同植被类型土壤抗冲性及表层根系分布特征[J]. 水土保持学报, 2019, 33(6): 120-126.
- [12] 熊燕梅,夏汉平,李志安,等. 植物根系固坡抗蚀的效应与机理研究进展[J]. 应用生态学报, 2007, 18(4): 895-904.