

## 复杂地质条件下框格梁高陡边坡柔性生态袋植被修复技术研究

赵琪<sup>1</sup>, 申新山<sup>2</sup>, 张军<sup>3,\*</sup>, 经伟<sup>3</sup>, 张勇<sup>3</sup>

1. 山东高速工程建设集团有限公司, 山东 济南, 250014

2. 北京华夏绿洲生态环境工程有限公司, 北京, 102206

3. 山东航空学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州, 256603

**摘要:** 为解决高速公路框格梁高边坡风化严重与坡面不平整导致的防护与绿化难题, 本文以山东某高速路段为研究对象, 通过多维度对比研究柔性生态袋、植生袋、喷混植生技术, 优化柔性生态袋植被建植施工工艺, 构建区域适用性强的柔性生态袋植被建植应用技术。结果表明: (1) 柔性生态袋(PP无纺土工织物)具有抗老化、耐高低温(-40~150°C)和透水不透土特性, 是适应坡面地质复杂高陡坡的优选生态修复技术; (2) 优化的种植土改良、精准装填、“品”字形码放、接扣连接、分层夯实与科学养护工艺, 可形成与坡面协同受力的稳定复合体系; (3) 本技术应用监测发现, 边坡深层位移控制在5 mm内, 累计沉降小于3 mm, 180 d植被覆盖度达到92%, 工期缩短20%, 后期养护成本降低35%。该技术有效解决了框格梁外露、混凝土超方与复绿困难等问题, 为山东高速公路边坡生态防护提供了可推广范式, 未来可通过材料复合与智能监测等融合进一步提升该技术综合效益。

**关键词:** 柔性生态袋; 生态防护; 高陡边坡; 施工工艺; 质量控制; 植被建植

## Research on Flexible Ecological Bag Vegetation Restoration Technology for High and Steep Slopes with Frame Beams under Complex Geological Conditions

Qi Zhao<sup>1</sup>, Xinshan Shen<sup>2</sup>, Jun Zhang<sup>3,\*</sup>, Wei Jing<sup>3</sup>, Yong Zhang<sup>3</sup>

1. Shandong High-Speed Engineering Construction Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China

2. Beijing Huaxia Oasis Eco-Environment Engineering Co., Ltd., Beijing 102206, China

3. Shandong University of Aeronautics, Shandong Key Laboratory of Eco-Environmental Science for the Yellow River Delta, Binzhou, Shandong 256603, China

**Abstract:** To address the challenges of slope protection and greening caused by severe weathering and uneven surfaces of high slopes with frame beams on expressways, this paper takes a section of expressway in Shandong Province as the research object. Through multi-dimensional comparative studies of flexible ecological bags, planting bags, and spray-mixing seed technology, the construction process of flexible ecological bag vegetation establishment was optimized, and a flexible ecological bag vegetation establishment application technology with strong regional applicability was developed. The results show that: (1) Flexible ecological bags (PP non-woven geotextile) have characteristics of anti-aging, high and low temperature resistance (-40 ~ 150°C), and water permeability without soil permeability, making them an optimal ecological restoration technology for complex and steep slopes. (2) The optimized process of planting soil improvement, precise filling, "top and twin-side bottom" shaped stacking, connection with buckles, layer-by-layer compaction and scientific maintenance processes can form a stable composite system that works in synergy with the slope. (3) Application monitoring of this technology found that the deep displacement of the slope was controlled within 5 mm, the cumulative settlement is less than

3 mm, the vegetation coverage reaches 92% in 180 days, the construction period is shortened by 20%, and the later maintenance cost is reduced by 35%. This technology effectively solves the problems of exposed frame beams, excessive concrete volume and difficult re-greening, providing a replicable model for ecological protection of expressway slopes in Shandong. In the future, the comprehensive benefits of this technology can be further enhanced through the integration of material composites and intelligent monitoring.

**Keywords:** Flexible ecological bag; Ecological protection; High and steep slope; Construction technology; Quality control; Vegetation establishment

随着我国经济水平的快速提升,高速公路作为国家交通基础设施的核心组成,得以加快推进。在高速公路工程建设过程中,路堑边坡的安全性与生态性是工程建设与运营的关键<sup>[1,2]</sup>。高速公路边坡生态修复是指用植物或者植物-非生命材料相结合的方式,采用人为干预的方法,快速修复边坡生态环境,恢复到原来相似的自维持植物生物群落系统,以稳定坡面、防止侵蚀,提高边坡表面抗冲刷的能力<sup>[3]</sup>。而传统的边坡防护技术,如喷混植生和植生袋工艺,常因植被群落生态适应性差、耐候性不足及养护管理措施等缺陷,难以满足当前工程实践对道路边坡稳定与生态协同发展的需求<sup>[4]</sup>。随着国家“绿水青山就是金山银山”战略的深入推进,高速公路边坡防护已从传统的浆砌片石、混凝土挡墙等形式的“硬性防护”向“生态—安全协同”的多层次防护转型<sup>[5-7]</sup>。

柔性生态袋技术多应用于河岸护坡、矿山边坡生态修复,更关注材料耐候性与结构稳定性<sup>[8-10]</sup>。柔性生态袋在南方地区高速公路边坡的修复,通过“材料—植被—土壤”的协同作用,可显著提升边坡稳定性达到较好的生态修复效果<sup>[11]</sup>。生态袋护坡作为一种兼具生态效益与工程功能的新型边坡绿化方式,正逐步在高速公路建设中推广应用,尤其适用于土质贫瘠或易受侵蚀的复杂地形区域<sup>[12-14]</sup>。目前,针对冬季严寒、夏季高温、降水集中等山东地域特点的适配性优化柔性生态袋技术应用研究较少,尤其缺乏在严重老化框格梁边坡环境中的系统性应用研究。

山东省作为我国重要的交通枢纽,高速公路总里程已突破 7000 km,其中多数路段穿越鲁中南山地与鲁东丘陵区域。本研究以位于临沂市境内某路堑高边坡工程的路堑高边坡路段为研究对象,其边坡结构复杂,一侧为三级边坡,另一侧为四级边坡,坡面垂直高度达 32.5 m,边坡坡比 1:0.75~1:0.5,总防护面积约 8600 m<sup>2</sup>。该区域地质条件复杂、边坡风化严重、坡面形态不规则且砂石含量高、框格梁外露、混凝土超方等问题突出。本研究通过对比分析工程地质条件与传统防护技术缺陷,结合柔性生态袋材料特性与技术优势,优化施工工艺与质量控制,将柔性生态袋技术引入该路段框格梁边坡的植被建植过程中,探究其材料特性、施工工艺优化与工程应用效果,以期为类似地质条件的高速公路边坡防护与生态修复提供可靠的技术支撑与实践案例。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

经现场踏勘与地质勘察,研究区路段坡面地质复杂,强风化砂质泥岩与页岩,局部为大面积裸露松散砂石,坡面不规则且存在大量凹陷,最深处达 1.8 m,无法按标准开槽;前期框格梁施工,导致坡面不平整,部分锚杆框架梁外露达 0.5 m 以上,造成混凝土超量浇筑,成本显著增加。

传统的喷混植生防护技术仅适用于平整坡面,其 10 cm 厚度难以填充深凹区,对稳定性提升有限,其植生袋所用尼龙丝耐候性差,90 d 即腐烂,抗拉强度低于 0.5 MPa,无法形成稳定整体,易发生局部坍塌,无法同时实现坡面有效填充与生态复绿目标。

## 1.2 实验材料

本研究采用的柔性生态袋，其主要材质为100%聚丙烯（PP）长丝无纺土工织物，部分特殊区域则使用了PET复合材质以增强性能。该产品经国家土工合成材料质量监督检验中心检测，其各项核心指标均符合《公路边坡生态防护技术规范》（JTJ/T 039-2019）的要求，具体检测数据见表1。

表1 柔性生态袋核心技术指标

Table 1 Core technical indicators of flexible ecological bags

指标名称	检测值	规范限值
单位面积质量	150 g/m <sup>2</sup>	120 g/m <sup>2</sup> ≤ 150 g/m <sup>2</sup>
纵向抗拉强度	9.2 kN/m	≥ 6 kN/m
横向抗拉强度	8.5 kN/m	≥ 5 kN/m
抗紫外老化性能（1500 h）	强度保留率 92%	≥ 80%
耐低温性能（-40°C，24 h）	无裂纹、无脆化	无破损
耐高温性能（150°C，2 h）	无融化、无变形	无软化
等效孔径	0.2~0.5 mm	0.1~0.8 mm
渗透系数	1.2×10 <sup>-3</sup> cm/s	≥ 1×10 <sup>-3</sup> cm/s

## 1.3 种植土配制、生态袋制作与装填

种植土选用当地含沙量30%~40%的棕壤，经20 mm筛网去除大颗粒杂质，调控其含水量为15% ± 2%（现场以“手握成团、落地即散”为准），随后按12 kg/m<sup>3</sup>和2.5 kg/m<sup>3</sup>比例分别掺入腐熟羊粪有机肥、NPK复合肥（鲁西化工），使得混合均匀后土壤有机质≥1.5%、pH 6.5~7.5，满足草种生长要求。生态袋规格为400 mm×800 mm。种子选用适应山东气候的混播组合：草本为高羊茅5 g、紫花苜蓿5 g、狗牙根3 g、黑麦草2 g、结缕草2 g，具耐寒旱特性，作绿化先锋；灌木为紫穗槐8 g、胡枝子5 g、多花木兰5 g、荆条3 g，具较强固坡能力；花种为波斯菊2 g、野花组合2 g（品种数≥9），起美观点缀作用。生态袋采用人工装填，每袋装填量0.12~0.15 m<sup>3</sup>，用木棒沿袋体四周均匀夯实，确保饱满度≥95%，避免局部空洞。封口采用尼龙扎带（宽10 mm）双道绑扎或封包机（针距12 mm）线缝，封口强度不低于袋体抗拉强度的80%，防止吊装开裂。

## 1.4 施工设备与应用效果监测

生态袋吊装使用臂长≥40 m的25 t汽车吊（徐工 XCT25L5），袋体压实用打夯器（威克诺森 VP 1550A）、喷播机（恒睿 HKP-480）、种植土处理用筛分机（恒睿 GFS-200）。

力学稳定性监测周期为施工完成后365 d，每100 m设1台测斜仪（深度5 m），期间共布设3个深层位移测斜仪（编号C1~C3）；每50 m设1个沉降观测点，5个沉降观测点（编号J1~J5），深层位移监测采用测斜仪、沉降监测采用直接测量法、格梁应力监测采用振弦式传感器（泰安科大 HGLJ）。

生态绿化效果监测采用样方法（1 m×1 m样方，5个重复）对植被生长情况，监测期为365 d。

## 2 结果与分析

### 2.1 三种技术方案对比研究

针对上述路段面临的复杂地质与防护适配性问题，通过综合考量材料耐候性、力学性能、生态效益与经济成本四个维度，对柔性生态袋、植生袋、喷混植生三种技术进行系统比选（见表2）。

柔性生态袋环境适应性优异。其原材料不吸水，遇水不变形、不溶解，可耐受pH 3~11的土壤，

能抵抗沿海盐碱侵蚀；同时具备抗生物侵蚀能力，能防止菌类、田鼠及白蚁蛀蚀。在温度方面，材料在-40~150℃性能稳定，更适应山东地区-19~39℃的温差，无脆化或软化。生态上，袋体等效孔径0.2~0.5 mm，既能有效保住土壤团集体，又可保证土壤水气通透性，有利于植物根系能穿透袋体，形成“袋一根一土”三维网络，增强边坡整体性。

柔性生态袋技术通过多重机制实现高陡边坡稳定。标准规格(400 mm×800 mm)生态袋按“品”字形码放，以高强度塑料接扣(每袋≥1个)连接，配合层间≥150 mm错茬，形成可分散荷载的“蜂巢”结构。袋体填充框格梁梁格并分层夯实(压实度≥90%)后，与梁体及坡面紧密贴合，增大了受力面积，使框格梁应力分布均匀性提升约40%。植物根系易穿透袋体并深入土层30~50 cm，形成“柔性锚固”系统，可通过自身拉伸吸收能量，提升框格梁抗滑稳定性。

对比研究可得，柔性生态袋技术因其卓越的耐久性、良好的力学性能、优异的生态亲和力以及合理的成本，能有效弥补原设计方案的缺陷，不难确定“柔性生态袋”为最优实施方案。

表2 三种防护技术对比分析表

Table 2 Comparative Analysis of Three Protection Technologies

评价指标	柔性生态袋	植生袋	喷混植生
材料组成	PP/PET 双面熨烫针刺无纺布	尼龙丝编织袋	水泥+土壤+草种+粘结剂
使用寿命	≥50 a	≤90 d	≤5 a (易风化剥落)
抗拉强度	≥8 kN/m (横向)	≤0.5 kN/m	无 (整体抗拉性差)
透水性能	透水不透土	透水透土 (易流失)	不透水 (易积水)
适用坡面	不规则、深槽坡面	仅平整浅坡面	仅平整坡面
植被覆盖周期	90~180 d (全覆盖)	30~60 d (后坍塌)	180~240 d (易斑秃)
单位造价 (元/m <sup>2</sup> )	185	90 (需重复施工)	108 (后期养护成本高)
山东地域适配性	耐高低温、抗风化	不耐寒、易腐烂	冬季易冻融剥落

## 2.2 工程质量控制与关键施工工艺优化

### 2.2.1 柔性生态袋吊装、码放与压实

生态袋进场时，需核查合格证与检测报告，并抽样复验抗拉强度和抗紫外线性能，严禁使用不合格材料。种植土改良后按每50 m<sup>3</sup>为一批，取样检测含水量、有机质及pH，确保符合配比要求。采用25 t汽车吊吊装生态袋，吊点固定于袋体中部，单次起吊3~5袋。设专人指挥，确保吊装半径内无人员，严格控制吊臂与格梁位置，避免碰撞。

基础层生态袋沿格梁底部铺设，袋体中心线与梁轴线偏差≤50 mm。上层按“品”字形错缝码放，错茬宽度依坡比动态调整：1:0.75时为150 mm，1:0.5时为100 mm。码放过程中实时检查平整度与错茬宽度，每10层进行一次阶段验收。压实后采用环刀法按每200 m<sup>2</sup>一个测点检测压实度，压实度≥90%为合格。相邻袋体通过塑料接扣连接，插入深度≥30 mm，接扣安装后抽查连接强度，以手动拉动无松动、无位移为合格。

每层码放完成后，使用5 kg木夯或电动夯(振幅2 mm，频率50 Hz)由中间向两侧均匀压实，防止位移变形。压实后层间平整度误差应≤10 mm，确保紧密贴合，降低沉降风险。生态袋码放成型后严禁堆放重物，养护期间避免施工机械碾压坡面。冬季如出现冻害，应及时覆盖保温膜，确保植被安全越冬。

### 2.2.2 植被建植与遮阳网覆盖

草种建植采用机械点播与液压喷播两种方式。其中，机械点播适用于预制草种生态袋，播种前

进行发芽率检测,若发芽率低于80%,则进行补播作业;补播时,使用 $\Phi 22$ 螺纹钢在袋体上随机钻取3~5个孔洞(孔径为20 mm,深度为50 mm),随后每孔点播5~10粒草种。液压喷播适用于未预混草种的生态袋,将草种与专用基质(配比为:泥炭土50%、纤维10%、营养基质30%、保水剂5%、粘合剂1%、缓释肥4%)混合后,均匀喷覆于袋体表面,控制喷播厚度为12 mm;喷播完成后,立即检查覆盖面完整性,对漏喷区域及时进行补喷。

为保障发芽环境,坡面整体覆盖2针遮阳网。使用长度为300 mm的竹签按500 mm间距进行固定,并将遮阳网边缘嵌入格梁缝隙,以防被风掀动。本研究发​​现该措施可减少雨水冲刷与强光直射干扰,可使种子发芽率由约65%提升至85%。

### 2.2.3 养护管理

养护管理总周期为2 a,分三个阶段实施:

(1) 苗期养护(第1~30 d)。浇水1次/d(9:00前或16:00后),水量2.5 L/m<sup>2</sup>,采用雾化喷头均匀喷洒,暴雨后及时检查并修补遮阳网。

(2) 生长期养护(第31~90 d)。浇水1次/(2~3 d),依降水情况调整。出苗第7 d检查植被,对空白面积>0.2 m<sup>2</sup>区域打孔补播。第30 d施尿素(10 g/m<sup>2</sup>),第60 d施NPK复合肥(15 g/m<sup>2</sup>)。每月人工除草一次。

(3) 稳定期养护(第91 d~2 a)。浇水1次/(15~20 d)。地被草修剪1次/180 d、1次/270 d,控制草高25~30 cm。土壤有机质检测1次/a、植被群落结构检测1次/a,必要时补充施肥或调整草种,以维持群落稳定。

## 2.3 工程技术应用效益

### 2.3.1 高陡边坡力学稳定性

深层位移C1~C3测斜仪监测数据显示,边坡深层位移最大值为4.2 mm(位于C2测点,施工后第90 d),远低于《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)中规定的10 mm限值。位移量随时间推移逐渐稳定,自施工后第180 d起各点位移量均小于1 mm,表明生态袋与坡体、格梁形成稳定体系,有效抑制了边坡深层滑移。

沉降观测点(J1~J5)中,最大沉降量为2.8 mm(J3测点,施工后第60 d)。沉降主要集中于施工完成后的前90 d内,之后基本稳定,累计沉降量未超过3 mm,满足规范要求( $\leq 5$  mm控制标准),证明所采用的分层压实工艺,有效控制了袋体及地基的后期沉降。

通过应力传感器对格梁应力进行监测,施工前出现于局部外露段格梁最大应力为1.2 MPa,施工后最大应力降至0.8 MPa,应力分布均匀性提升约40%,且未出现裂缝。表明生态袋结构有效分担了格梁所受荷载,改善了结构受力状态,提升整体安全性能。

### 2.3.2 生态效益

施工后90 d植被覆盖度达65%,180 d时增至92%,至第270 d已超过95%,于第365 d稳定维持在96%左右。形成的植被群落均匀致密,未出现明显斑秃现象,表明植被建植效果良好。

各类种子成活率均高达85%。混播群落表现出良好的生态互补性。草种作为建群种,为群落提供结构支撑;紫花苜蓿发挥固氮作用,有效提升土壤肥力,其他野花组合也起到了3季/a有花的美观作用;狗牙根凭借其匍匐生长特性,快速实现坡面覆盖;木本植物扎根岩层对稳定山体起到决定性作用。灌草协同构建了稳定的生态系统。

施工后365 d,坡面土壤有机质含量由初始的1.2%提高至1.8%,孔隙率由32%提升至38%,土

壤保水能力增强至40%。监测期间未发现雨季土壤冲刷痕迹,实测水土流失量较传统喷混植生边坡减少75%,反映出显著的生态护坡效益。

经估算,此路段坡面植被群落可吸收二氧化碳约8.6 t/a,释放氧气约6.3 t/a,有效削减扬尘约12 t/a。同时,恢复的植被为区域鸟类及昆虫提供了栖息环境,促进了路域生物多样性的恢复与提升,生态效益显著。

### 2.3.3 经济和社会效益

此路段采用柔性生态袋护坡方案,施工总面积8600 m<sup>2</sup>,单位造价185元/m<sup>2</sup>,总造价为159.1万元。相较于喷混植生方案(前期造价103.2万元,后期5养护费用43万元,总造价146.2万元),本方案虽比初始投资略高(12.9万元),但考虑到其50 a的设计寿命及极低的后期养护成本,其全生命周期内的成本效益远超传统方案。以50 a为周期进行测算,生态袋方案全生命周期总成本比喷混植生方案降低约82%,长期经济优势显著。此外,生态袋方案施工周期为16 d,较原方案的45 d缩短64%,有效减少了高速公路施工对交通运营的干扰。

## 3 讨论

针对山东部分沿海高速公路(如青烟威荣城际高速)沿线存在的盐碱土边坡问题,推荐采用PET复合生态袋作为防护材料<sup>[15]</sup>。该材料具有优异的耐腐蚀性能,可有效抵抗盐碱侵蚀,从而延长使用寿命,提升在特殊地质条件下的工程适用性。根据山东省内不同地区的气候特点对草种配比进行差异化调整。山东鲁北地区冬季寒冷,可适当增加耐寒性较强的披碱草比例<sup>[16]</sup>;鲁南地区降水量较高,则可提高耐涝性良好的百喜草比例。通过草种构成的区域化适配<sup>[17]</sup>,进一步增强植被群落的生态适应性与稳定性。

山东地区雨季(7~8月)降水集中,易引发坡面积水,影响施工质量与生态袋稳定性。因此,建议合理安排施工计划,避开雨季作业,优先选择在春季(3~4月)或秋季(9~10月)开展施工,有利于植被建植与坡面稳定<sup>[18]</sup>,可有效保障工程整体质量。

基于本研究实践,柔性生态袋技术在高速公路边坡防护领域仍具备持续优化与提升的广阔空间。展望未来,可在以下方面进一步深化研究与应用:针对坡度超过1:0.5的陡峻边坡,可探索柔性生态袋与土工格栅加筋<sup>[19]</sup>、锚杆锚固等技术的协同使用,构建复合支护体系,从而增强坡体整体性与抗滑稳定性<sup>[20]</sup>;在监测运营和维护方面,可引入物联网技术,通过在生态袋内或坡体关键位置预埋湿度、温度及应力传感器,构建边坡实时监测与预警系统<sup>[21]</sup>,借助数据远程传输与智能分析,实现稳定性风险早期预警与精准研判,推动养护管理向智能化方向转变<sup>[22]</sup>;在生态景观构建方面,可在现有草种基础上适量引入紫穗槐、木槿等适应性花灌木种子,形成“乔一灌一草”立体植被结构,不仅有助于提升坡面水土保持功能,也能增强路域景观的层次感与观赏性。

## 4 结论

(1) 柔性生态袋凭借其优异的力学性能(抗拉强度 $\geq 8$  kN/m)、突出的环境适应性(耐-40~150℃温差、抗盐碱)以及理想的生态兼容性,成功解决了不规则框格梁坡面的填充与生态修复难题,在技术可行性上显著优于传统喷混植生工艺和植生袋工艺。

(2) 通过优化种植土改良、精准装填、品字型码放、分层压实及科学养护等关键施工环节,形成了实用强的施工工艺与质量控制体系。

(3) 工程应用后监测数据显示:边坡深层位移与沉降量分别控制在5 mm与3 mm以内,植被覆盖度在180 d内达到92%,土壤有机质含量提升至1.8%,水土流失量较传统边坡降低75%,整体

效果满足工程安全与生态恢复的双重要求。

### 参考文献

- [1] 阳珍, 袁飞云, 严贤春, 等. 适用于岩质边坡植被恢复的植生基材比选研究[J]. 公路, 2024, 69(1): 351-357.
- [2] 詹美强, 陈怡唯. 某高速公路沿线高陡路堑边坡失稳与风险评估分析[J]. 中国水运, 2025, (20): 134-137.
- [3] 邓辅唐, 吕小玲, 喻正富, 等. 高速公路边坡植物群落的水土保持效应[J]. 中国水土保持, 2007, (5): 43-46+60.
- [4] 申剑, 周明涛, 田德智, 等. 我国喷混植生护坡绿化技术浅析[J]. 人民长江, 2020, 51(3): 61-64+80.
- [5] 刘小光. 高速公路边坡稳定性与防护处治措施分析[J]. 科学技术创新, 2025, (15): 159-162.
- [6] 高阳, 李永红, 高照良, 等. 高速公路边坡生态防护技术及发展趋势分析[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(26): 6-14+21.
- [7] 陶可, 钟明键. 高速公路边坡生态防护技术探究[J]. 交通科技与管理, 2024, 5(13): 186-188.
- [8] 张文迪. 金属矿山废弃地生态复绿技术研究现状及应用探讨[J]. 世界有色金属, 2024, (24): 111-113.
- [9] 简鸿福, 吕辉, 胡强. 河湖生态护岸技术特性研究与应用[M]. 1版. 北京: 中国水利水电出版社.
- [10] Phadungsak H I, Takahashi A, Likitlersuang S. Engineering and environmental assessment of soilbag-based slope stabilisation for sustainable landslide mitigation in mountainous area[J]. Journal of Environmental Management, 2024, 359: 120970.
- [11] Yin W, Pan Y, Yang M, et al. The root reinforcement on the slope under the condition of colonization of various herbaceous plants[J]. Heliyon, 2024, 10(17): e37108.
- [12] 王双全, 连明露. 鄂西南高速公路近自然生态修复设计探究[J]. 设计艺术研究, 2019, 9(6): 113-117.
- [13] 张国雄. 生态袋护坡在高速公路边坡防护中的施工流程与质量控制[J]. 工程技术研究, 2025, 10(18): 152-154.
- [14] 肖衡林, 杨宇天, 白玉霞. 自然降雨条件下生态防护边坡土壤水分动态分析[J]. 湖北工业大学学报, 2025, 40(4): 76-83.
- [15] Cao W, Omran B A, Lei Y, et al. Studying early stage slope protection effects of vegetation communities for Xinnan Highway in China[J]. Ecological Engineering, 2018, 110: 87-98.
- [16] 汪庆, 张治胜, 丁国民. 祁连山东段高海拔煤矿植被退化区植被修复技术研究[J]. 农业与技术, 2020, 40(16): 94-96.
- [17] 李新玲. 公路碎裂岩质边坡植被防护固土技术及植物种的优化选择[D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [18] Lian J, Wu J. Shallow stability and parameter sensitivity analysis of soil slope with frame protection under rainfall seepage[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 19607.
- [19] Ma W, Zhou Y. Mechanical and deformation properties of eco-bag reinforced soil retaining walls under the synergistic effect of roots and geogrids[J]. Bulletin of Engineering Geology and the Environment, 2024, 83(6): 211.
- [20] Liu X, Lü X, Shao Y, et al. Monitoring and disaster prevention of high and steep sandstone slopes along highways under construction[J]. Frontiers in Earth Science, 2024, 12: 1444592.
- [21] Alam M J B, Manzano L S, Debnath R, et al. Monitoring Slope Movement and Soil Hydrologic Behavior Using IoT and AI Technologies: A Systematic Review[J]. Hydrology, 2024, 11(8): 111.
- [22] Piciullo L, Abraham M T, Drøsdal I N, et al. An operational IoT-based slope stability forecast using a digital twin[J]. Environmental Modelling & Software, 2025, 183: 106228.

**基金项目:** 山东航空学院博士学位人员科研启动基金项目(2020Y22), 自然资源部长三角国土生态与土地利用野外科学观测研究站开放基金项目(2023YRDLELU06)。

<sup>1</sup> **第1作者简介:** 赵琪(1991—), 男, 大学本科, 高级工程师, 研究方向: 高速施工管理。 E-mail: zhaoqi@sdluqiao.com。

\* **通讯作者简介:** 张军(1978—), 男, 博士研究生, 正高级工程师, 硕士研究生导师, 研究方向: 生态环境保护与修复。 E-mail: zhangjun7807@163.com。