

# 公路路基边坡生态防护技术研究综述

张锐<sup>1,2</sup>,李旺军<sup>1</sup>,高乾丰<sup>1,2\*</sup>,陈博<sup>3</sup>,龚毅<sup>3</sup>,侯育东<sup>1</sup>,张喜伟<sup>1</sup>

(1.长沙理工大学交通学院,湖南长沙 410114;2.长沙理工大学公路养护技术国家工程研究中心,  
湖南长沙 410114;3.湖南省高速公路集团有限公司,湖南长沙 410199)

**摘要:**安全耐久、绿色低碳是公路边坡工程发展的重大需求,针对传统圬工护坡及植生结合型护坡技术在施工周期、施工安全性与环境影响等方面的不足,该文开展了公路路基边坡生态防护技术的系统综述。系统梳理了植物护坡技术、附着型护坡技术等典型公路路基边坡生态防护技术的作用机理,总结了上述技术的国内外重要研究成果,深入探讨了不同生态防护技术的护坡性能,并展望了中国公路路基边坡生态防护技术的未来发展趋势。综合分析表明:目前植物防护技术在植物选种和搭配等方面尚无科学系统的指导方法;植生毯防护中关于毯结构层厚度、网格形状、缝制线桩布置对防护效果的影响有待深入研究;植生袋质量直接影响其防护效果,应研发高透水性和低透土性的植生袋;植生混凝土的耐久性能和多孔混凝土对边坡生态的潜在影响尚需持续研究和评估;土工格室护坡面临的耕植土挤压格室变形、降雨格室内积水等问题亟待解决;三维网植物防护技术在材料选型、网型选取、基材研发等方面缺乏标准,植物-耕植土-三维网三者的协同作用机理研究尚不充分;当前生态防护技术的设计和评价指标尚无统一的标准,实际应用时多依赖于现场经验。因此,未来需针对以上领域开展理论和应用研究,以寻求最适合替代骨架植物护坡的生态防护技术,为推动中国公路路基边坡生态防护技术的发展提供指导。

**关键词:**公路路基;边坡工程;生态防护技术;防护机理;综述

中图分类号:U416.1

文献标志码:A

## Review of Research on Ecological Protection Technologies for Highway Subgrade Slopes

ZHANG Rui<sup>1,2</sup>, LI Wangjun<sup>1</sup>, GAO Qianfeng<sup>1,2\*</sup>, CHEN Bo<sup>3</sup>, GONG Yi<sup>3</sup>, HOU Yudong<sup>1</sup>, ZHANG Xiwei<sup>1</sup>

(1. School of Transportation, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 2. National Engineering Research Center of Highway Maintenance Technology, Changsha University of Science & Technology, Changsha, Hunan 410114, China; 3. Hunan Expressway Group Co., Ltd., Changsha, Hunan 410199, China)

**Abstract:** Safety, durability, and green low-carbon performance are key requirements for the development of highway slope engineering. Given the shortcomings of conventional masonry slope protection and vegetation-engineering composite systems with respect to construction duration, construction safety, and environmental impacts, this paper presents a systematic review of ecological protection technologies for highway subgrade slopes. The working mechanisms of typical ecological protection technologies, such as plant slope protection and attached-type slope protection, were systematically analyzed. Important Chinese and international research results on these technologies were summarized. The slope protection performance of different ecological protection technologies was discussed in depth, and future development trends of ecological protection technologies for highway subgrade slopes in China were prospected. Comprehensive analysis indicates that currently, there are no scientific and systematic guidance methods for plant selection and configuration in plant slope protection technologies; regarding vegetation blanket protection, the effects of blanket structural layer thickness, grid shape,

收稿日期:2024-09-14 修回日期:2025-02-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(编号:52378439);中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划项目(编号:K2023G033);  
湖南省交通运输厅科技进步与创新项目(编号:202208)

作者简介:张锐,男,博士,教授.E-mail: zr@csust.edu.cn

\*通信作者:高乾丰,男,博士,副教授.E-mail: qianfeng.gao@csust.edu.cn

and stitching pile arrangement on protection effectiveness require further in-depth study; the quality of ecological bags directly affects their protection effect, thus ecological bags with high water permeability and soil retention capabilities should be developed; the durability of ecological concrete and the potential impact of porous concrete on slope ecology require continuous research and evaluation; geocell slope protection faces problems such as geocell deformation caused by cultivated soil compression and water accumulation inside the cells during rainfall, which need to be solved urgently; for three-dimensional network plant protection technology, standards are lacking regarding material selection, net type selection, and substrate development, and research on the synergistic mechanism among plants, cultivated soil, and the three-dimensional network is insufficient. Currently, there are no unified standards for the design and evaluation indices of ecological protection technologies, and practical applications mostly rely on field experience. Therefore, future theoretical and application research should be conducted in the aforementioned areas to identify the most suitable ecological protection technologies to replace skeleton-plant slope protection, providing guidance for promoting the development of ecological protection technologies for highway subgrade slopes in China.

**Keywords:** highway subgrade; slope engineering; ecological protection technology; protection mechanism; review

## 0 引言

公路工程建设中形成的人工边坡在长期自然暴露下极易发生表面风化、破碎现象,降雨时常引发边坡冲蚀和溜坍等问题,因此对坡表进行防护至关重要。中国公路路基边坡的防护大多采用传统的圬工防护和圬工加植物防护技术,如框格梁防护、护面墙防护、骨架植物防护等<sup>[1]</sup>,此类技术虽然能起到较好的护坡效果,但存在施工周期较长、施工时安全性不高和碳排放量大等问题。随着中国“双碳”战略目标的提出和交通强国建设的快速推进,从保护环境、节约成本、便捷施工等方面考虑,越来越多的中国学者开始重视边坡生态防护技术。该技术是指采用纯植物或植物与非生命材料相结合的护坡方式,是集岩土力学、生态学、植物学、土壤学、水土保持学等多学科的复合型工程技术<sup>[2-4]</sup>。对公路路基边坡生态防护技术和作用机理进行研究,是公路工程建设可持续发展的一个重要对策,对中国公路工程的建设发展具有重要意义。

相比于日、美、欧等国家与地区,中国在边坡生态防护的研究与实践方面起步较晚,从20世纪90年代开始,中国逐渐采用人工撒播草种、铺草皮等植物技术对边坡进行生态防护<sup>[5]</sup>。经过长期的探索与发展,形成了植物护坡、附着型护坡、砌块型护坡等生态防护技术,并已应用在工程实践中,但尚未形成统一的技术规范和标准。在实践中,护坡结构的设计多依赖于工程经验,忽视了区域气候条件、水文特征、土体性质等环境条件差异的影响,从而在影响生态与景观质量的同时也降低了边坡的长期防护效

果。因此,在中国现有公路路基边坡防护中传统圬工防护和圬工加植物防护仍占主导地位。

由于不同生态防护技术的护坡机理和设计要求各异,其固土持水效果和生态效应也不尽相同,因此,有必要对近年来关于不同边坡生态防护技术的相关研究进行梳理与总结。本综述将在结合国内外研究成果的基础上,系统梳理公路路基边坡中植物护坡技术和附着型护坡技术的作用机理和研究现状,展望中国公路路基边坡生态防护技术的未来发展趋势,并寻求最适合替代骨架植物防护的生态护坡技术,为推动中国公路路基边坡生态防护技术的发展提供指导。

## 1 植物防护技术

根据植物类型的不同,可将植物防护分为草本植物防护和木本植物防护两种主要方式,植物防护技术工艺已相对成熟,能有效提升坡面防护性能,对于坡高不大、坡比比较平缓的土质边坡而言,是一种简单有效的防护措施,其工艺特点如表1所示。

### 1.1 草本植物防护

草本植物防护是最原始、最为简单的一种生态护坡方式,在岩土工程、道路工程和水利工程等领域得到了广泛应用,为达到浅层防护和覆绿效果,采用草本植物护坡时,应选择适应当地气候环境、发芽力强、多年生的草种。

草本植物形态矮小、茎秆柔软较短、木质部不发达、根量大、生长速度快,根系90%主要生长分布于边坡浅层0~0.3 m处,根系直径大多为小于1 mm的须根<sup>[7]</sup>。草本植物根系生长结构如图1所示。

表1 植物防护工艺及特点<sup>[6]</sup>  
Table 1 Technologies and characteristics of plant protection<sup>[6]</sup>

防护方式	施工工艺	适用条件	优势
	播撒草种	适用于坡度不陡于1:1的土质边坡防护	施工成本低,不需准备大量原材料,操作简单快速
草本植物防护	摊铺草皮	适用于坡度不陡于1:1的土质边坡和全风化、强风化岩石边坡防护	将草皮摊铺于坡面,生长绿化速度快,迅速改善坡表外观
	喷混植生	适用于坡度不陡于1:0.75的砂性土、碎石土、粗粒土、巨粒土及风化岩石边坡防护,坡高不宜大于10 m	施工效率高,耕植土改良与种子播撒一次性完成
木本植物防护	喷播灌木 种植乔木	适用于坡度不陡于1:0.75的土质、软质岩石和全风化岩石边坡防护	具有更好的抗旱、保土、防风沙等效应,具有良好的环境净化功能和生态平衡能力

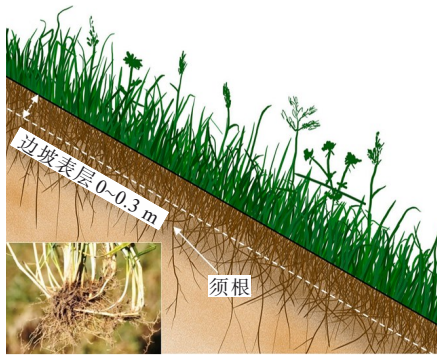


图1 草本植物防护结构图<sup>[8-9]</sup>

Figure 1 Structure diagram of herbaceous plant protection<sup>[8-9]</sup>

草本植物的茎叶可削弱雨滴溅蚀和径流面蚀,根系对边坡起到加筋效应,且叶片通过蒸腾作用可提高土体抗剪强度。关于草本植物防护作用机理可概括为水文效应、力学效应、蒸腾效应三方面,随着植物的茎叶、根系逐渐生长成熟,上述护坡效应也随之加强。

#### (1) 水文效应

水文效应包括雨滴拦截与削弱作用和坡面径流的抑制作用两个方面。

在植物防护的裸坡中,降落的雨滴到达坡面逐渐向四周渗透扩散,土体含水率增加,在雨滴连续击溅的作用下,坡表面形成由小到大、由浅变深、近似圆形的溅蚀坑,溅蚀坑随着降雨强度和历时增加而逐渐增大,从而雨水入渗速率和入渗范围增大,达到土体饱和状态后边坡形成浅层冲蚀<sup>[10]</sup>。而在茎叶和覆盖物的防护下,存在对雨水的拦截和削弱作用,当具有一定动能和势能的雨水落到茎叶和覆盖物上,其茎叶和覆盖物可截留雨水和减缓雨水动能,减少雨水到达坡面的量,削弱雨水对坡面的飞溅侵蚀,减缓雨水击溅而产生的溅蚀坑和雨水渗透对坡面含水率的影响,降低土体团聚体的破碎程度<sup>[11-12]</sup>。不同

植物茎叶对降雨的截留量有所差异,雨水截留量与植物枝叶特性和种植密度有关<sup>[13]</sup>。

雨水形成的径流是坡面受冲蚀的主要因素,降雨下坡面径流的形式包括两种:①坡顶积水沿坡面向下形成径流;②雨水落在坡表沿坡面汇聚成径流。坡面植物可阻滞、分散坡面径流,并降低径流对土体的冲蚀作用,径流速度和降雨持续时间决定了土体受侵蚀程度,而径流速度取决于是否存在坡面覆盖物和植物茎叶在坡面的疏密程度<sup>[14]</sup>。不同植物类型对径流侵蚀抑制效果不同,径流所产泥沙随植物生长情况而变化<sup>[15]</sup>,当坡体植被覆盖度为50%~70%时对抑制坡面径流效果最佳,覆盖度增加可以有效截留雨水,草被覆盖度对径流起到的阻滞作用比降雨强度和边坡坡度更敏感<sup>[14-16]</sup>。

#### (2) 力学效应

草本植物根系生长在边坡的浅表层,在浅表层盘结缠绕下形成加筋复合体,通过增加内摩擦阻力和表观黏聚力来加固边坡浅层土体<sup>[17]</sup>,这使得植物能够在遭受台风、沙尘暴等极端自然灾害时“固定”土体,也可以防止土层变薄、荒漠化等现象出现<sup>[18-19]</sup>,图2为植物根系抑制浅层滑坡的护坡机理图,黑色箭头表示土体重力沿坡面方向的分力,在边坡土体浅表层上产生拉应力,虚线表示边坡的潜在剪切破坏面。植物根系的加筋作用一方面表现在浅层根系增大土体之间的黏聚力 $\Delta c$ ,阻止坡表流水的剪切破坏和表层裂隙的形成;另一方面表现在土粒的网兜效应,减弱水流对土粒解离作用<sup>[6]</sup>,有效提高边坡根土复合体强度和抗崩解特性,满足库仑强度准则<sup>[20]</sup>:

$$\tau_n = c + \sigma_n \tan \varphi + \Delta c \quad (1)$$

式中: $\tau_n$ 为抗剪强度; $c$ 为土体有效黏聚力; $\varphi$ 为土体有效内摩擦角; $\sigma_n$ 为法向应力; $\Delta c$ 为根系加筋引起的黏聚力。

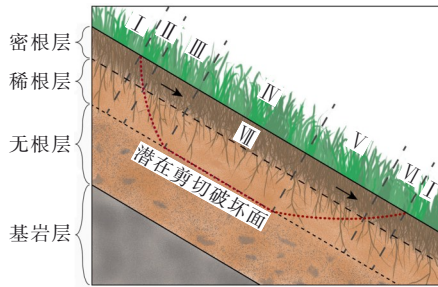


图2 草本植物根系抑制浅层滑波的护坡机理图<sup>[9]</sup>

Figure 2 Mechanism diagram of herbaceous plant roots inhibiting shallow landslides<sup>[9]</sup>

### (3) 蒸腾效应

降雨使得坡面土体含水率提高,坡面水分变化是受地面温度物理蒸发和植物蒸腾作用相互协同的结果,蒸腾作用时根部水分通过木质部运输到叶片,根系吸收的水分约95%在蒸腾作用下以水蒸气形式散失到大气中<sup>[21]</sup>,蒸腾作用强度受到叶片上气孔的数量和大小的影响,决定了植物吸收土体水分的量。此外,影响蒸腾作用的外界因素包括植物类型、光照强度、大气湿度、CO<sub>2</sub>浓度等<sup>[22-24]</sup>,蒸腾作用机理示意图如图3所示。

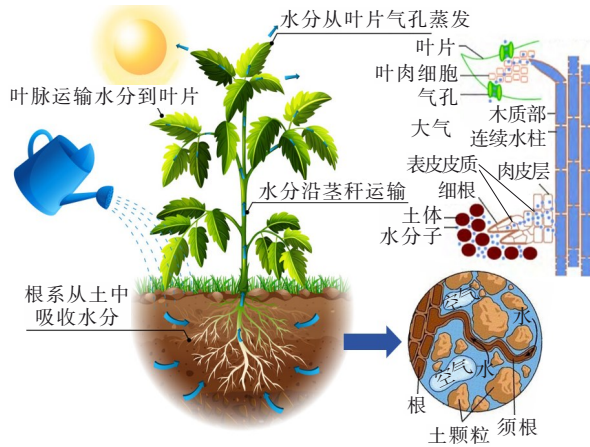


图3 植物蒸腾作用下水分运输机理微观示意图<sup>[25]</sup>

Figure 3 Microscopic schematic diagram of water transport mechanism under plant transpiration<sup>[25]</sup>

植物蒸腾作用下根系吸收土体水分能引发土体产生裂隙,而降雨后水流又会入渗,间接改变土体水力学效应<sup>[26-28]</sup>。植物在生长过程中,蒸腾作用通过根系和木质部吸收传递水分到叶片,降低了土体内部含水率,增强了土体的抗剪强度,提高了边坡地表抗侵蚀能力<sup>[29-30]</sup>。蒸腾作用引起的土体含水率变化对土体抗剪强度的影响可用非饱和土抗剪强度

表示<sup>[31]</sup>:

$$\tau_n = c + (\sigma_n - u_a) \tan \varphi + (u_a - u_w) \left[ \tan \varphi \left( \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \right) \right] \quad (2)$$

式中: $\sigma_n - u_a$ 为土体净法向应力; $u_a - u_w$ 为土体基质吸力; $\theta$ 为体积含水率; $\theta_s$ 为饱和体积含水率; $\theta_r$ 为残余体积含水率。

草本植物防护设计需要考虑的因素包括植物选取、植草密度、草种比例、施工工艺等。此外,还需要考虑不同降雨和径流冲刷下的坡面侵蚀规律和影响程度。单永体等<sup>[32]</sup>和刘海松等<sup>[33]</sup>采用径流冲刷试验研究边坡侵蚀规律,发现随着流量的增大,总产沙量先增大后减小,累积产流量与累积产沙量的关系满足幂函数形式,冲刷流量与侵蚀产沙量呈显著正相关;肖培青等<sup>[34]</sup>研究不同坡度、植物种类、地面条件在暴雨和径流冲刷条件下对边坡的影响,揭示了细沟侵蚀机理和侵蚀特征,为植物防护设计提供理论依据;黄少平等<sup>[35]</sup>对边坡含水率、水土流失等参数进行实时监测,分析边坡坡度对降雨入渗、坡面径流量和土体侵蚀量的影响,研究植物防护下边坡降雨入渗和径流侵蚀规律;于师等<sup>[36]</sup>采用示踪剂法,研究种植间距和降雨量对香根草边坡土体特征的影响,揭示香根草根系特征与优先流的关系,为合理选择植物种植间距,优化植物水文效应提供参考;王连锐等<sup>[37]</sup>通过冲刷试验对比了狗牙根和香根草的径流速率、产沙速率和累计产沙量,并结合拉伸和直剪试验,综合评价了两种植物的固土护坡效应。

从力学特性对植物根系受力状况分析,植物根系的变形是非弹性的,可建立非弹性根与土体共同受力的加固模型<sup>[38]</sup>。Wu等<sup>[39]</sup>提出了植物根系增加土体抗剪强度的垂直根模型,认为根系增强土体抗剪强度是受黏聚力的影响;李本峰等<sup>[40]</sup>和Fan<sup>[41]</sup>对多个植物种类的根土复合体开展抗拉特性原位试验,发现该复合体符合摩尔-库仑定律,可为土体提供额外黏聚力,改变土体力学特性;扈萍等<sup>[42]</sup>分析植物根系在护坡中的加筋效应,建立了植草护坡的根系加筋强度公式,发现根系抗剪强度和法向压力的关系;王桂尧等<sup>[43]</sup>通过植草种植试验和直剪试验得到竖向含根量分布规律和根土复合体强度关系,论证了根系的缠绕包裹作用将提高土体强度及根土复合体的抗崩解特性和减少雨水入渗时的孔隙气压及封闭气

体;李珍玉等<sup>[44]</sup>发现土体黏聚力和根系表面积密度之间符合线性关系,并根据Wu式模型计算植物根系对土体抗剪强度的增强作用;Gao等<sup>[45]</sup>和高乾丰等<sup>[46]</sup>研究了植草作用下红黏土的干缩开裂规律和抗拉强度特性,发现植物根系对土体的加筋效果取决于植物类型和种植间距,在合理的植物配置下可有效提高土体抗拉强度,抑制土体裂隙发展。

关于蒸腾作用,国内外众多学者已开展了相关研究。植物可以通过蒸腾作用吸收水分,在土体内产生吸力,改变土体性质<sup>[27]</sup>。马瑶<sup>[47]</sup>在研究植物蒸腾作用对土体加固的作用时发现,植物根系深度、边坡高度会影响蒸腾作用,进而降低边坡整体含水率。作为蒸腾作用发生部位,叶片面积将影响植物的蒸腾速率,吴宏伟<sup>[25]</sup>指出,植物叶片面积指数大时能吸收更多的光照能量,叶片表面气孔多也有利于提高植物蒸腾效率;陈建斌等<sup>[48]</sup>分析了在非饱和土表层草皮覆盖情况下,植物叶片面积指数和植物根深等参数的变化对植物蒸腾蒸发量、表层吸力和变形的影响规律,分析结果可为选取合适植物种类提供了参考依据;邓春娟等<sup>[49]</sup>通过探究不同肥料对植物蒸腾作用的抑制效果,为植物防护施工肥料选择提供参考依据;刘俊<sup>[50]</sup>从Fredlund强度理论出发,发现非饱和土体抗剪强度和基质吸力相关,阐明了植物蒸腾作用和根系力学效应之间的联系。

## 1.2 木本植物防护

木本植物防护技术是一种利用灌木、乔木来稳定和保护环境的方法,其施工工艺可分为喷播灌木和种植乔木(表1),该技术结合了植物的生物学特性和工程措施,通过植物的根系、茎秆和叶片的共同作用,达到加固边坡、防止土体侵蚀和改善生态环境的效果。

木本植物是具有坚硬木质部和茎秆的植物,其结构主要分为茎、叶和根系三部分,茎部能提供支撑并运输养分,叶片是光合作用和蒸腾作用的重要器官,其根系复杂,主根可深入土层达3~5 m,木本植物作用于边坡表面防护结构图如图4所示。

木本植物和草本植物在水文效应方面存在差异。从结构形态上来说,木本植物叶片和茎秆比草本植物更大更茂密,木本植物茎叶对雨滴和径流的防护力度更好,对抗降雨截留的能力和抗土体侵蚀能力更强<sup>[52]</sup>。降落的雨水落于木本植物可分流成冠层截留、茎秆流和穿透雨三部分<sup>[53]</sup>。被冠层和茎秆

截留的雨水可有效减少和减轻地面溅蚀,再通过蒸发作用重新进入大气之中,上层的木本植物叶片和下层的草本植物叶片起到双重截留作用,能大幅有效减小雨滴的体积和动能,最大程度地降低和避免雨滴直接溅蚀作用和径流冲刷作用。在雨水击溅和径流冲刷作用下,木本植物与草本植物形成了雨水拦截、缓冲、分散作用和径流抑制作用的互补关系。

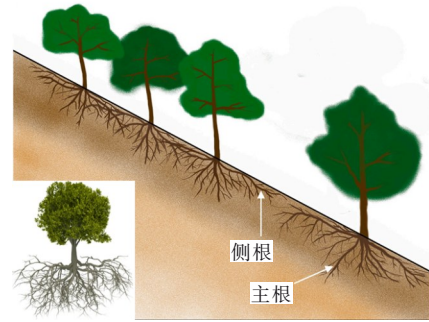


图4 木本植物防护结构图<sup>[9,51]</sup>

Figure 4 Structure diagram of woody plant protection<sup>[9,51]</sup>

木本植物根系对边坡具有锚固效应,其在形态上分为主根和侧根,主根通过穿过较深土体将植物和浅层土体锚固到稳定土层,其作用类似于锚杆,根径较小分布较密集的侧根缠绕土体形成根土复合体,抑制浅层滑坡,起到加筋固化的作用<sup>[54-55]</sup>,在主根和侧根的作用下能进一步抑制边坡失稳的发生。已有研究表明,深层植物根系重要力学特征之一体现在它具有较强的抗拉性,能够提供一定的抗拉和抗剪强度,发挥类似锚杆的锚固作用<sup>[56]</sup>,其最大锚固力可按式(3)计算<sup>[20]</sup>:

$$T = 2\pi\xi\gamma \int_0^{\infty} P(z)Q(z)zdz \quad (3)$$

式中: $\xi$ 为根-土相互作用的最大静摩擦系数; $\gamma$ 为土体的天然重度; $P(z)$ 为主根或者粗根的平均半径沿深度 $z$ 方向的分布函数; $Q(z)$ 为主根或者粗根数目沿深度 $z$ 方向的分布函数。

木本植物蒸腾作用比草本植物更显著,草本植物形态矮小,茎部柔软,没有明显的木质部分,叶面积相对较小,蒸腾作用相对较弱,而木本植物有明显的树干和根系结构,根系较为发达,叶片较大、较宽,因此蒸腾作用更为显著,单位时间内吸水和蒸发量相对较大,由于水分利用效率高,使得木本植物更适合于水分有限的环境生长。

在边坡防护中,木本植物根系对于土体稳固性的提升具有至关重要的作用,在防护设计时主要考

虑木本植物根系对边坡稳定性的提升。一方面,由于木本植物根系的弹性模量远大于土体,当外部荷载导致土体发生变形时,根系能有效限制土体过大变形,类似混凝土中的钢筋,为土体提供了额外的抗拉和抗压能力;另一方面,木本植物根系深深扎入土体,犹如无数细小的锚杆,通过物理嵌入增加根系与土颗粒间的摩擦力,有效限制土体颗粒的移动,其锚固作用极大地增强了边坡的抗滑稳定性<sup>[57]</sup>。朱永杰等<sup>[58]</sup>探究不同植物防护方式对边坡径流泥砂的削减作用,发现植草和草灌结合对坡面径流抑制作用相比于裸坡效果更加显著,草灌结合坡面径流抑制效果优于草本坡,坡面植物防护可优先考虑灌草结合的方式;李华坦等<sup>[59]</sup>分别对种有灌木和草本植物的边坡开展模拟降雨试验,对比草本植物边坡和灌木植物边坡产生的径流量、泥砂量和两者对坡面径流的抑制效果;黄少平等<sup>[60]</sup>从木本植物根系对土质斜坡稳定性的影响出发,总结其在斜坡浅层稳定性的作用模式,运用Geo-studio模拟分析根系对斜坡抗滑能力的影响;陈婧逸等<sup>[61]</sup>探究多年生灌木根系形态和空间分布对固土效果的影响,采用大型直剪试验对原状根土复合体进行直剪试验,发现灌木根系能显著提高土体抗剪强度;韩立亮等<sup>[62]</sup>研究木本植物根系固土护坡力学机制,测定不同木本植物抗拉强度和抗拉力、根系抗拉力、抗拉强度分别随根系直径增大以幂函数的形式增大和逆函数形式减小,单根拉伸的应力-应变特征初始阶段为线性关系,拉伸后表现出塑性特征,根系直径越大最大应力越小。

根据上述植物防护技术的分析,植物茎叶和坡表落叶等覆盖物能有效减缓雨水对坡表浅层溅蚀和截留坡表面径流,对于草本植物和木本植物,它们具有不同粗细、密度和长度的植物根系,其扎根于土体中分别起到浅层加筋和深层锚固作用,植物茎叶上的气孔进行蒸腾作用使得土中含水率降低和抗剪强度进一步增高,在水文、力学和蒸腾作用的协同作用下(协同作用机理图如图5所示),植物防护能有效降低边坡浅表侵蚀和溜坍情况的出现,对坡面起到防护作用,同时植物可对空气中污染物起到吸附和分解作用,符合绿色生态的环保概念。

对于坡高不大、坡比比较平缓 and 坡表平整、无杂物的土质边坡,可以用植物防护替代骨架植物护坡。植物防护效应与植物生长情况紧密相关,植物多样性是保证防护系统稳定的基础,适生植物的搭配及

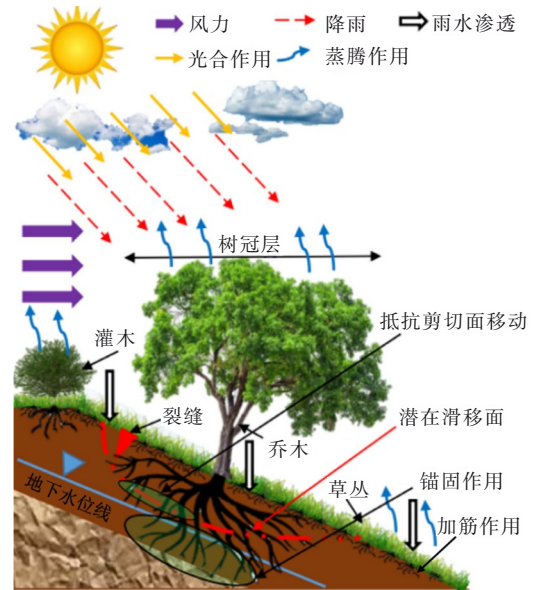


图5 植物防护协同作用机理图<sup>[63]</sup>

Figure 5 Mechanism diagram of synergistic effect of plant protection<sup>[63]</sup>

筛选与保证植物生长的长期稳定是防护成效的关键因素之一,但在植物护坡中,关于草本植物和木本植物的选种和搭配存在不足。

## 2 附着型防护技术

附着型防护是将非活性材料等附于坡表,并构建植物生长层的生态防护技术,是集植物防护和平面加固于一体的复合型边坡防护措施,主要包括植生毯防护、植生袋防护、植生混凝土防护、土工格室防护、三维网植物防护,适用条件及特点如表2所示。

### 2.1 植生毯防护

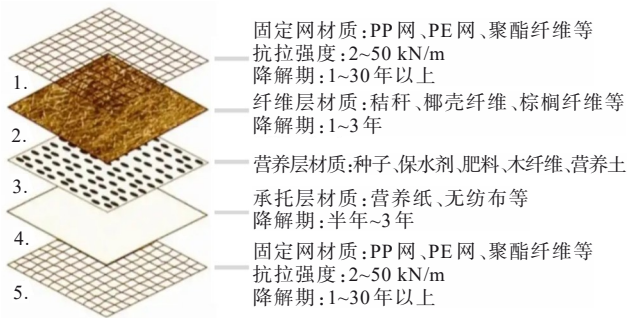
植生毯别名生态毯、生态垫和植物培育垫,是能提供土体防侵蚀保护层和植物生长基质、养料和水分的边坡绿化防治新技术,将植生毯护坡运用于公路路基边坡防护中,能发挥改良土体、水土保持和恢复植被的作用<sup>[68-69]</sup>。

植生毯防护技术是采用秸秆、椰棕等植物纤维为原料,连同定型网、营养纸、植物种子、保水剂、肥料等营养基质缝合加工而成的三维复合草毯结构,其结构组成如图6所示。

植生毯具有的网状固定结构不仅可以把种子、保水剂、肥料等包裹住,为植被生长提供一个完善的平台,还发挥了保水、保温、保种、抗冲刷作用<sup>[70]</sup>。铺设在坡表的植生毯能保护坡体,防止雨水直接接触土体,Jancauskas等<sup>[71]</sup>发现植生毯的保水和涵养

表2 附着型防护适用条件及特点<sup>[64-67]</sup>Table 2 Applicable conditions and characteristics of attached-type protection<sup>[64-67]</sup>

生态防护类型	适用条件	优点	缺点
植生毯防护	适用于坡面较为平缓、山体较矮、坡率不陡于1:1的土质边坡防护	利用植物纤维为原料,与其他护坡技术相比,植生毯的材料和施工成本相对较低	防护效果依赖于植物的生长和成活情况,需要选择合适的草籽
植生袋防护	适用于坡率不陡于1:1的土质边坡和弱风化软质岩边坡防护	植生袋制作和运输成本较低、对环境的影响较小,可根据坡表形态进行灵活铺设	植生袋由较为廉价的降解材料组成,其防护寿命有限
植生混凝土防护	适用于坡率不陡于1:0.75且无潜在隐患的石灰质高陡边坡防护	植生混凝土具有较高的强度和耐久性能,保护边坡土体免受浅层侵蚀和冲刷	基于混凝土这类圬工原料,对土体长久性生态影响需进一步研究和评估
土工格室防护	适用于边坡自身稳定且坡率不陡于1:0.75的土质和易风化岩石边坡	土工格室具有良好的伸缩性,可依据坡面的形状和尺寸进行裁剪和拼接,其展开和安装相对简单,灵活性强	未填满耕植土或被冲刷后的格室内易积水,且格室将承受耕植土的重载和抗剪力,易受破坏和挤压变形
三维网植物防护	适用坡率不陡于1:1的土质、强风化岩石边坡防护,当坡率陡于1:1时采用锚固措施,每级高度不超过10 m	三维网凹凸、粗糙的结构可有效分散水流,减少雨水冲刷对坡面的破坏,该技术施工工序简单,4名工人便可完成整个边坡施工,坡面防护效率可达90 m <sup>2</sup> /(人·工日)	市面上不同材质和结构的三维网往往性能差异很大,普通三维网的耐久性不满足防护要求

图6 植生毯结构图<sup>[68]</sup>Figure 6 Structure diagram of vegetation blanket<sup>[68]</sup>

微生物功能可促进植物根系的生长,增加草本植物的干物质量,土体流失率能有效降低超90%;Bhattacharyya等<sup>[72]</sup>发现植生毯防护可以形成保护网防止雨水侵蚀土体,在该种情况下能有效保存土体中的有机质、全碳和全氮,改善土体性质,达到水土保持效果<sup>[73]</sup>。植生毯与种植灌木相结合,灌木可以形成高、中、低形态的立体植物体系,坡表植生毯可以缩短土体裸露时间,在有效拦挡土颗粒移动的同时又能达到更好的防风固土效果<sup>[74]</sup>。

植生毯防护在设计时主要考虑植生毯原材料、毯内营养基质成分和比例等因素,现有学者主要从植生毯对土体抗侵蚀能力、肥沃能力、含水率、结构、温度、有机质含量影响等方面开展研究。逢红等<sup>[75]</sup>研究保水剂在植生毯防护中发挥的作用,分析植被生长覆盖率和土体受侵蚀状况,发现添加保水剂的植生毯坡面生长情况理想,没有发生明显的土体流

失;岳恒陞等<sup>[76]</sup>采用计算机操作的人工降雨大厅模拟降雨试验,分析3种降雨强度下麦秸秆植生毯和椰丝纤维毯对径流和入渗的影响,发现在不同降雨强度下减少径流、增加入渗的效果不同;石鑫等<sup>[77]</sup>发现纤维毯覆盖在土体表面能抑制水分蒸发,纤维毯用量越大对蒸发的抑制作用越强,植生毯可为植物生长改良成适宜的环境,提高了干旱地区的植被成活率。植生毯中加入植物碎屑材料可提升植生毯性能,倪栋等<sup>[78]</sup>对植物碎屑、椰丝毯、秸秆毯防护下的边坡进行降雨径流试验和土体采样,并与裸坡进行对照,发现植物碎屑材料可明显改良土体有效氮、磷含量;Rickson<sup>[79]</sup>研究植生毯抗侵蚀性能,发现抗侵蚀性能与土工织物覆盖率、表面粗糙程度、持水能力等有关。

通过对植生毯防护作用机理和设计方法的深入分析可知,植生毯防护技术研究主要有两个方面:①植生毯对土体含水率、土体养分影响;②在植生毯内生长的植物对边坡抗冲刷能力的提升。该技术对水土保持、建立和恢复生态环境具有积极作用。但植生毯防护技术适用范围有限,适用于坡面较为平缓、山体较矮、坡率不陡于1:1的土质边坡防护,一定程度上限制了植生毯在工程实践中的应用。此外,植生毯防护效果与织物结构设计密切相关。然而,目前针对植生毯的结构层厚度、网格形状、缝制线桩布置的研究还较少,而这些因素也会影响植生毯的生产和防护效果。

## 2.2 植生袋防护

植生袋防护技术是将装有植物种子和生长基质的植生袋按照规律码放坡表,并用固定钉固定,其编织成袋的方式有效避免了植物种子被雨水直接冲刷,随着袋内植物种子的生长和植生袋的降解,整个防护坡面将逐渐融合成片<sup>[80]</sup>。

植生袋是由植物种子、复合肥料按照一定的比例混合,用尼龙纤维网、加厚无纺布、无纺棉纤维布缝制和胶黏而成的一种绿化材料,其具有一定的抗拉强度、不易快速分解,且规格尺寸可根据施工要求灵活裁制<sup>[81]</sup>,其结构组成图如图7所示。

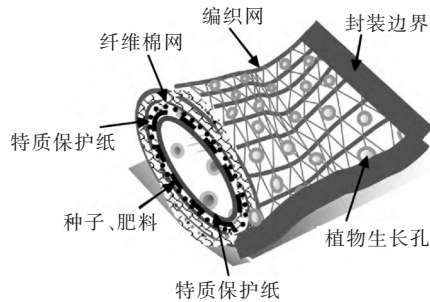


图7 植生袋结构图<sup>[82]</sup>

Figure 7 Structure diagram of ecological bag<sup>[82]</sup>

发挥植生袋防护性能的重要因素是植生袋本身材质和袋内基质,核心是适生植物的选择,基本保障是植生袋使用寿命和肥料发挥的时限<sup>[83]</sup>,关键要素为植生袋内植生基质的组成和配比<sup>[84]</sup>。在降雨下植生袋的立体网状结构吸收雨水冲击产生的能量,成袋结构既能有效阻止土颗粒的位移,又能防止土体受侵蚀,在纤维层内移动的雨水沿袋缓慢流向坡脚,同时减小雨水径流在土中的冲刷力,减小冲蚀沟的产生。根据不同土质状况可调整植生袋厚度和基质用量,坡面土少且风化程度不高,植生袋厚度保持为20~30 cm,坡面土质条件较好,植生袋厚度保持为10~15 cm<sup>[82]</sup>。植生袋在边坡生态修复过程中与挂网喷播防护相结合,起到双重柔性防护作用效果<sup>[85]</sup>,随着植生袋内草籽的生长,植物根系能向下生长至坡面土体内部,植物根系虬结交错成稳定的边坡群落<sup>[80]</sup>,对土体起保护作用,提高植生袋抗冲刷性能。

植生袋防护设计需要综合考虑植生袋材料、施工工艺等因素,考虑植生袋对边坡浅层稳定性和土体性质改变的影响。罗敏敏等<sup>[86]</sup>针对岩质边坡难以防护现状,提出植生袋和NSN柔性防护网技术,初步

建立生态袋与其他柔性防护网在岩质边坡中的应用;刘子壮等<sup>[87]</sup>以植生袋不同恢复年限为研究对象,分析0~10 cm和10~20 cm不同深度下土体含水率、孔隙度、有机质、全氮、速效钾等理化性质差异,为植生袋在土石山区生长和养护管理提供了参考依据;朱海生等<sup>[88]</sup>研究了植生袋结构的设计、施工及植被种植技术,总结归纳出影响植生袋主要因素为植生袋质量、加筋材料、土体密实度、植被覆盖度;刘昆珏等<sup>[89]</sup>通过拉伸强度试验和撕裂强度试验测定植生袋基本性能,采用植生袋表面铺设铆钉和挂网的方式进行加固,建立自然条件和降雨条件下植生袋稳定性计算方法。

上述众多学者的理论研究和实践成果推动了植生袋防护技术在公路路基边坡应用中的发展,其研究重点主要集中在降雨抗冲刷能力护坡效应和植生袋防护技术的应用等方面。该技术主要适用于坡度不陡于1:1的土质边坡和弱风化软质岩边坡防护。植生袋长期暴露于坡表,易出现老化破损甚至降解,展现出纯植物防护效果,其防护有效性不足;目前市面上植生袋良莠不齐,普通塑料编织袋和麻布袋质量和技术指标不合格将加快植生袋降解,优选高透水性和低透土性的植生袋是体现防护效应的关键技术指标,但目前缺乏相关研究。

## 2.3 植生混凝土防护

植生混凝土又称生态混凝土、绿化混凝土,主体是以特定粒径的骨料作为支撑骨架,制作形成类似于“沙琪玛”形状的孔隙结构,其不仅结合了混凝土强度高和整体性能好的特性,还发挥了植物生态绿化的优点。

植生混凝土防护技术主要是由植物、多孔混凝土、表层耕植土、保水材料和肥料组成,多孔混凝土主要由粗骨料、适量的细骨料以及水泥组成,保水材料由有机质和无机保水剂混合使用,为植物生长提供水分,其结构示意图如图8所示<sup>[90]</sup>。

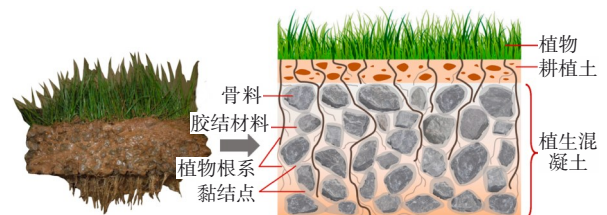


图8 植生混凝土结构图<sup>[90]</sup>

Figure 8 Structure diagram of ecological concrete<sup>[90]</sup>

植生混凝土防护与传统混凝土护坡不同,除了混凝土达到一定的强度要求,植生混凝土防护材料需要满足植物生长需求,因此植生混凝土多为骨架-孔隙结构,需要选择特定的粗骨料和细骨料胶结、嵌挤而成,孔隙为土体、水分、空气和植物根系提供连通的空间和通道,形成具有与土体相似的多孔结构,可防止植物受到冲刷,待植物发芽后,根系穿过混凝土生长在下层土体,对边坡起到加筋作用。

植生混凝土设计时先考虑对混凝土进行配比设计,并考虑植物在多孔混凝土下的适生性能,能保证植物在混凝土孔隙中具有优良的生长环境,并以植物生长情况和坡面抗冲刷性能作为评价指标。水泥在水化时产生的大量碱性物质会影响植物活性,而混凝土的孔隙率会影响植物的生长蔓延,王俊岭等<sup>[91]</sup>认为植生混凝土护坡需调整水泥碱性大小,配置最佳孔隙率的混凝土;胡勇有等<sup>[92]</sup>判断植物在植生混凝土下的适生性,拌制了4组不同孔隙状态下的植生混凝土,种植植物后观察植物根系长度、根系活力和根系活跃吸收面积,发现混凝土的孔隙率和平均孔径都会影响植物适生性;刘大翔等<sup>[93]</sup>通过掺入不同含量的有机质材料,分析了其对植被混凝土孔隙率和抗压强度的影响,据此确定了植生混凝土在制备过程中最佳配比和性能;马朋坤等<sup>[94]</sup>以尾铁矿为基础材料,通过配比水泥、秸秆、蘑菇肥及保水剂等基质,研制出植被混凝土,并探究了植物在该植被混凝土中的生长情况;夏振尧等<sup>[95]</sup>研究了水泥掺量、有机质含量、水灰比对植生混凝土基材2 d龄期的初期强度的影响,对保障植生混凝土初期自身稳定和后期植被顺利生长具有重大意义;梁永哲等<sup>[96]</sup>研究外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响,发现棕纤维与黄麻纤维含量分别为0.6%和0.9%时,能显著提高其耐久性,这为受季节性温度影响的植生混凝土提供了改良措施;Li等<sup>[97]</sup>提出一种加入固化剂SAC/SAP制作生态混凝土的方法,通过测定土体pH值和抗冲刷能力、植物发芽率和成活率,评估该固化剂综合性能;Ma等<sup>[98]</sup>探究不同骨料粒径、孔隙率、水灰比、骨料水泥比等因素,在单轴荷载作用下对植生混凝土力学性能的影响。

综上所述,现有植生混凝土防护研究主要集中于混凝土制备时材料选择、配合比设计、质量控制及其改良效果。相关研究成果为该技术在边坡防护中应用提供了参考。现有植生混凝土防护适用于坡率不陡于1:0.75且无潜在隐患的石质高陡边坡防护,

但混凝土为圬工原料,其对土体长久性生态影响需进一步研究和评估,如植生多孔混凝土的耐久性能和混凝土使用时对生态环境的影响。植生混凝土防护技术仍有待进一步完善。

#### 2.4 土工格室防护

土工格室防护是将展开并固定在坡面上的土工格室内填充耕植土,后均匀喷洒草种的一种护坡技术,待植物种子生长发芽后,两者的有机结合充分发挥土工格室和植物根系的固土作用。

土工格室是一种由高密度聚乙烯(HDPE)超声波焊接而成的蜂巢状三维立体网格结构,具有运输方便、伸缩自如的特点,其张拉时可形成网格,通过铆钉固定于坡面,在网格内填充草籽和耕植土养护而形成一种复合型生态防护技术<sup>[99-103]</sup>,其结构示意图如图9所示。

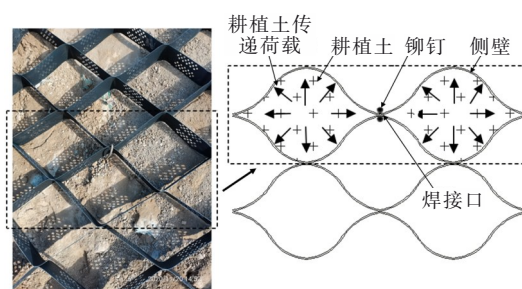


图9 土工格室基本结构形式<sup>[104]</sup>

Figure 9 Basic structural form of geocell<sup>[104]</sup>

土工格室连同耕植土、植物固定在边坡,在边坡降雨抗冲刷过程中发挥重要作用。一方面,土工格室的立体网格形式具有强大侧向刚度,能限制土体移动和分割土体<sup>[105]</sup>,格室和植物协同能抑制侵蚀细沟宽度、深度和数量的发展,在降雨下能防止水流沿着坡面最薄弱处持续冲刷和形成连续贯通的冲蚀渠,增强了土体的抗冲刷能力;另一方面,随着水流冲刷的进行,土体被带走后土工格室外壁逐渐露出坡面,使得水沿格室边缘流动,可起到阻碍和引导坡面水流的作用,减少和降低水流冲击能量和搬运能力,同时延长径流和降低流速<sup>[106-107]</sup>,削弱坡面冲刷影响。

土工格室材料性质对护坡性能有一定程度影响,不同尺寸和厚度的土工格室对其防护功能有所不同,对于铺设于坡表的土工格室防护技术,研究多集中于填土后边坡冲刷性能和土工格室防护下边坡稳定性分析模型。Song等<sup>[108-109]</sup>模拟人工降雨下坡面冲蚀过程,发现采用土工格室加麦秸秆加筋防护

可减缓坡面径流速度、提升土体营养水分和生物活性、有效提高边坡的抗冲刷性能;曾龙辉等<sup>[110]</sup>通过边坡模型试验模拟人工降雨,对不同坡度、不同降雨强度下的土工格室进行冲刷试验,结果表明,格室框格减小有利于边坡降雨抗冲刷性能,在降雨强度为50 mm/h、坡度为21.8°时,抗冲刷性能最好;韩宇琨等<sup>[106]</sup>围绕裸坡、铺设格室和格室内植草3种工况,探讨土工格室与坡面土体相互作用,研究格室尺寸、降雨、边坡性质和植物等参数对边坡径流量和土体流失量的影响,并对边坡防冲刷效果进行参数敏感性分析,结果表明,土工格室防护能减少20%~40%土体流失量,附加植物的保护作用使得土体流失量减少90%以上,降雨和格室尺寸对边坡防冲刷效果有着至关重要的影响,边坡坡度和坡长影响较小。鲁志方等<sup>[111]</sup>基于非饱和土力学中线弹性本构关系,分析了预加应力、临界基质吸力、土的抗剪强度与初始开裂深度的关系,初步推导出添加土工格室预应力[式(4)]和假定基质吸力条件下在膨胀土中初始开裂判断关系式[式(5)];范永丰等<sup>[112]</sup>建立土工格室浅层力学分析模型和深层数值模拟模型,发现格室参数、植草密度对土工格室边坡防护抗滑性有着重要影响,格室内植草对浅层抗滑安全系数提升尤为显著。

$$\psi_0 \geq \psi_0^{\text{CR}} = \frac{1-\mu}{1-2\mu} (\sigma_1 - \Delta\sigma_1) \quad (4)$$

$$z = \frac{1-2\mu}{\mu\gamma} \psi_0 - \frac{1-\mu}{\mu\gamma} (\sigma_1 + \Delta\sigma_1) \quad (5)$$

式中: $\psi_0$ 为地表基质吸力; $\psi_0^{\text{CR}}$ 为临界地表基质吸力; $\mu$ 为泊松比; $\gamma$ 为土的重度; $\sigma_1$ 为净水平应力; $\Delta\sigma_1$ 为土工格室预加应力。

王广月等<sup>[99,113]</sup>和Wang等<sup>[114]</sup>研究土工格室边坡抗侵蚀规律,构建侵蚀模数与边坡坡度之间的关系,发现土工格室防护体系中土体含水率、铆钉间距、坡长和边坡角度对边坡抗冲刷性和抗滑动性影响显著,格室深度和坡面冲刷力影响甚微。此外,建立边坡稳定性分析模型,如图10所示。

综上所述,国内外学者对土工格室防护的研究,主要集中在降雨作用下边坡浅层侵蚀理论公式计算方法分析、坡表冲刷下泥土流失量的模型试验,以及数值模拟下土工格室边坡和材料参数的敏感性分析等。该技术在公路路基边坡防护中的应用进一步推动了边坡生态恢复与重建技术的发展。土工格室防护适用于边坡自身稳定且坡率不陡于1:0.75的土质

和易风化岩石边坡,但在实际工程应用中,众多学者并未充分考虑土工格室在耕植土下的挤压变形和降雨下格室内积水,而该因素也是评价土工格室护坡工程质量的重要依据。

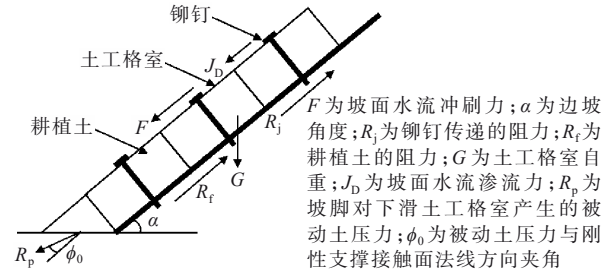


图10 土工格室防护稳定性分析模型<sup>[99]</sup>

Figure 10 Stability analysis model of geocell protection<sup>[99]</sup>

## 2.5 三维网植物防护

三维网植物防护是指利用植物并结合土工合成材料,在坡面构建具有自身生长能力的防护系统,待坡面植物长成后,植物根系与三维网、坡面紧密结合形成整体,从而为表层土体提供保护层,降低坡面雨水侵蚀和减少水土流失。

三维土工网是采用PP聚合物原料,通过精密的机械挤压工艺精制而成,其首先通过将聚合物原料转化为具有一定强度和稳定性的细丝网状结构,然后通过精细控制的热黏合挤压工艺形成具有高空隙率、复杂三维布局和均匀厚度的三维土工网,其结构如图11所示。

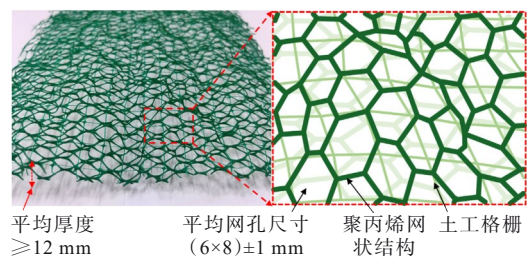


图11 三维网结构图<sup>[115]</sup>

Figure 11 Structure diagram of three-dimensional network<sup>[115]</sup>

三维网植物防护具有良好的抗降雨侵蚀性能,三维网具有形态不一的孔隙结构和外表粗糙不平的立体三维结构,由一定厚度的凹凸上层网和底层平面网组成,能很好地改变水流方向、减少坡面的径流量和泥土冲刷量,进而削弱水流冲刷能力、消减雨水的动能和提高坡面的抗侵蚀能力。随着植物从网口中生长出,三维网逐渐被覆盖,在降雨时能减少和防

止雨水直接击溅在坡表,避免了冲蚀渠沟的形成,而植物根系与三维网紧密交织的形式使得根-网-土体均匀紧密地联合在一起,形成复合型力学嵌锁体系,能对边坡浅层土体起到加筋作用。因此,植物与三维网的协同作用具有良好的减流减砂效果,进一步有效抑制暴雨径流对边坡的侵蚀,提高边坡浅层抗滑能力和抗冲刷能力,达到保护土体表层的目的<sup>[116]</sup>。高强加筋三维网的研发是近年来的突破性发展,该材料以机编双绞合钢丝网为骨架,将聚乙烯或聚丙烯挤压成丝状,并随机热黏结在骨架上,形成具有一定厚度、不规则孔隙的三维网;高强加筋三维网和铆钉作为护坡结构的骨架,配合高性能生态基材、耕植土和保水剂等构成加筋三维网抗侵蚀生态防护技术,该技术具有植被恢复快、强度高、抗侵蚀能力强的优点<sup>[117]</sup>。

三维网材料的厚度、网孔大小、空隙率、凹凸形式、是否加筋、抗拉强度等都会对植物生长和坡表抗冲刷性能产生不同程度的影响,而植物配比和种类的选择也会影响三维网植物防护的最终效果。钟春欣等<sup>[118]</sup>通过对比三维网加筋材料前后草皮防护的效果,三维网防护措施的优势随着冲刷流速的增大愈加显著,揭示了三维网加筋材料的抗冲刷机理;王晓春等<sup>[119]</sup>针对三维网植物防护下根土作用机理进行了研究,发现该护坡方式会增加土体黏聚力,进而增强根土复合体的抗剪强度,不同土体含水率范围下根土强度不同,存在最佳含水率;Wang等<sup>[120]</sup>和王广月等<sup>[121]</sup>建立了三维网侵蚀量和雷诺系数之间的关系,通过室内边坡稳定性破坏试验,发现三维网有助于植物根系形成加筋体,植物根系有助于三维网和边坡土体结合得更加紧密,边坡发生破坏时三维网可有效减小土体位移量,但对边坡整体稳定性的影响微乎其微;尉红彬等<sup>[122]</sup>采用室内模拟降雨冲刷装置对三维网植物防护下的土石边坡开展冲刷试验,分析不同坡度下降雨量、水土流失面积、流失量、侵蚀模量值、抗冲刷时间之间的相互关系,建立土体流失面积和时间的计算公式;Yi等<sup>[123]</sup>在原有的单种三维网植物防护的基础上,提出了一种结合土工格栅与加筋生态网的新型HPTRM结构,并通过室内冲刷试验,得出了采用该边坡防护结构在应对高速水流冲刷破坏下的效果显著优于单种加筋三维植被网结构的结论;Hu等<sup>[124]</sup>在公路路堤边坡上开展三维网冲刷试验,设计不同覆盖度和冲刷流量大小,用高锰酸

钾示踪法测量径流速度,分析土体流失量和侵蚀机理;刘泽等<sup>[117]</sup>以双绞合钢丝网为骨架,基于极限平衡理论建立筋锚三维网柔性防护结构稳定性分析模型,探讨柔性防护结构中边坡倾角、降雨强度、柔性面板厚度、锚钉间距、锚固长度对防护结构稳定性的影响,发现锚钉间距和锚固长度对稳定性影响最为显著;张锐等<sup>[125]</sup>设计了一种高性能生态基材加高强加筋三维网的柔性面层加固结构,建立柔性面层加固计算方法,开展现场原位监测,验证边坡柔性面层支护结构设计方法的合理性。笔者收集了市面上8种不同形态和结构的三维网,采用Matlab编程建立自动提取三维网关键外观特征的图像处理流程,处理后图像如图12所示,并开展不同三维网材料的老化试验和坡面冲刷试验,发现三维网材料在降雨、高温、强紫外线产生不同程度老化且不同三维网坡面防护下抗冲刷效果不同,不同三维网老化试验和冲刷试验结果分别如图13、14所示。

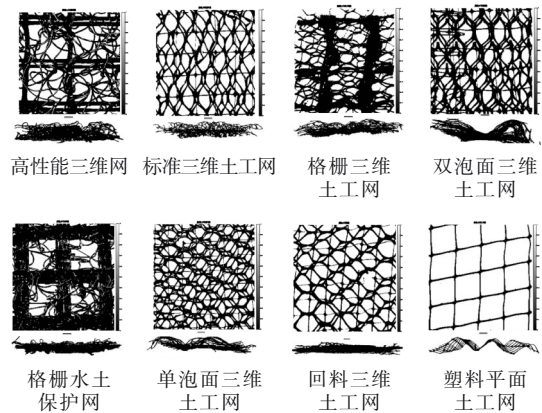
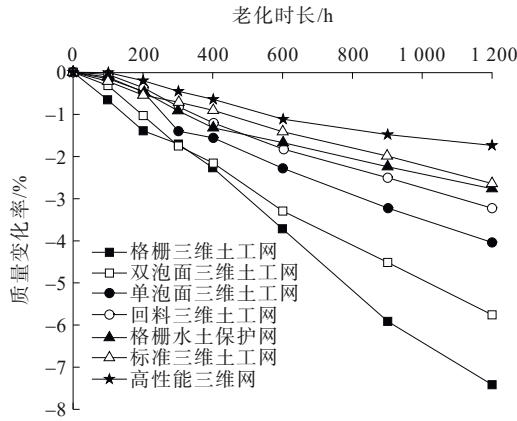


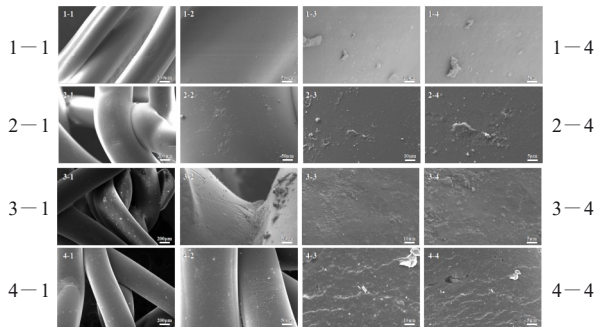
图12 多次腐蚀和膨胀处理后的三维网图像

Figure 12 Images of three-dimensional network after multiple corrosion and expansion treatments

上述学者从三维网材料耐久性、防护抗冲刷机理、浅层防护效果、施工工艺和技术等方面开展了系统的研究工作,所取得的成果促进了三维网植物防护技术在公路路基边坡生态重建中的应用。纵观诸多生态防护技术,三维网植物防护是近年来研究热点,具有较大的应用潜力和背景<sup>[118]</sup>,但目前市面上存在不同材质和结构的三维网,其抗拉性能和抗老化性能差异很大,应用该技术时存在缺乏材料和结构选型参考标准的问题,会导致最终不能发挥生态效应;同时三维网植物防护未充分考虑地域因素和边坡特征,如考虑当地气候条件、坡表为强风化泥岩、



(a) 不同三维网的质量变化率随老化时间变化特征曲线



(b) 不同老化时长下高性能三维网微观特征

(注: 1-1~1-4, 2-1~2-4, 3-1~3-4, 4-1~4-4 分别代表在 300 h, 600 h, 900 h, 1 200 h 4 个老化时间点后的微观表现)

图 13 不同三维网的老化试验

Figure 13 Aging tests of different three-dimensional networks

坡表存在孤石等对三维网防护技术的适用性是否存在制约,上述因素对三维网防护下网型材料选取、生态基材选取也具有重要影响,该工艺在上述相关研究得到进一步完善和实践下可逐渐替代传统骨架植物防护技术。

### 3 结论与展望

纵观公路路基边坡防护技术的发展历程,由原来单一的圪工防护发展成为新结构、新材料、新工艺、新技术的综合生态防护体系,具体表现为圪工防护面积逐渐减小,植物植生空间增加。基于此,本文通过对不同生态防护技术的分析,揭示了现有研究存在的问题,提出了未来深入研究的方向和解决相关工程问题的展望。

(1) 植物防护效应与植物生长情况紧密相关,适生植物的筛选及搭配与保证植物生长的长期稳定是植物防护成效的关键因素之一,中国幅员辽阔,气候

环境多样,如何根据边坡所在区域的气候、水文等自然条件和边坡特征,采用发芽率高、根系发达、抗逆性强等适生植物构建稳定的防护系统尤为重要,此方面的研究工作还有待深入。

(2) 覆于边坡的植生毯可改善土体含水率和营养基质,植生毯防护效果与织物结构设计相关,目前,针对植生毯结构层厚度、网格形状、缝制线桩布置的关注还较少,缺乏相关的设计指标和方法。

(3) 植生袋通过编制成袋的方式可避免植物种子被雨水直接冲刷,目前市面上植生袋良莠不齐,优选高透水性和低透土性的植生袋十分重要,普通塑料编织袋和麻布袋质量不合格,需明确相关技术指标。

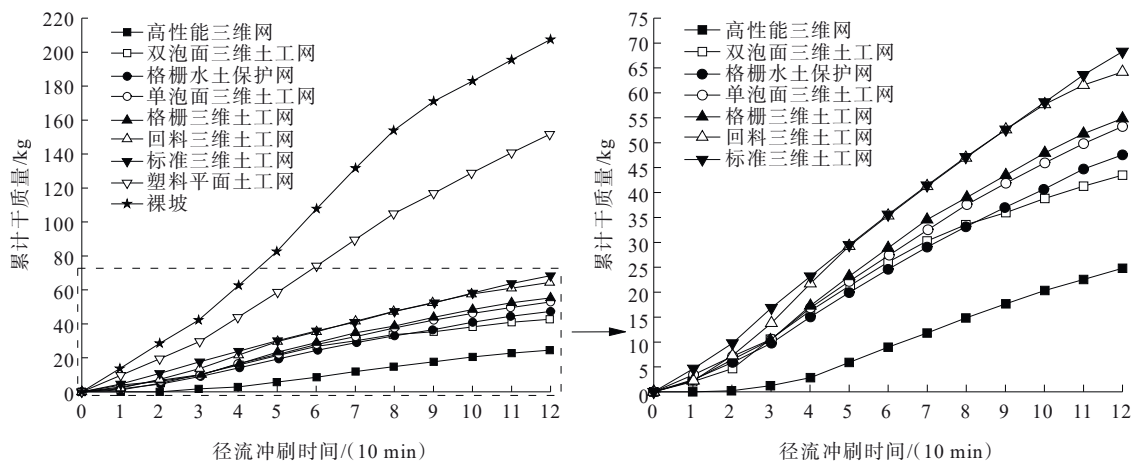
(4) 植生混凝土具有较高的强度,保护边坡土体免受浅层侵蚀和冲刷,但该技术还有待完善的地方,如植生混凝土的耐久性能和多孔混凝土对生态环境的潜在影响,可建立相关的研究和评估体系。

(5) 土工格室技术在公路路基边坡防护中的应用进一步推动了边坡生态恢复的发展,但在实际应用中,未充分考虑土工格室在耕植土下的挤压变形和降雨下格室内积水,而该因素也是确保土工格室护坡工程质量的重要依据。

(6) 纵观诸多生态防护技术,三维网植物防护是近年来研究热点,具有较大的应用前景,但目前市面上存在不同材质和结构的三维网,且性能差异很大,应用该技术时存在缺乏材料选型参考标准的问题,往往导致该防护技术最终未达到很好的效果;同时三维网植物防护未充分考虑地域因素和边坡特征,如当地气候条件、坡表为强风化泥岩、坡表存在孤石等对三维网防护技术的适用性存在制约,而上述因素对三维网防护下材料选取、网型选取、基质配比也具有重要影响,相关研究得到进一步完善和实践是该工艺能逐渐替代传统骨架植物防护技术的关键,具体如下:① 针对市面上不同三维网,其材料基本参数和耐久性能差异显著,经过一段时间的自然老化,材料性能有所下降,因此有必要模拟不同地区光照、温度、湿度等气候条件,对比和评估不同三维网材料的耐久性能,对三维网寿命预测方法进行深入探究;② 生态基材作为植物生长的基础,其固土保水能力和营养成分的长效性是植物发芽生长和生态系统建设的关键,生态基材的研制可以使用植物纤维,辅以保水基质、微孔颗粒、



(a) 裸坡与不同三维网防护下的坡面冲刷特征



(b) 裸坡与不同三维网防护下边坡累计干质量变化图

图 14 裸坡与不同三维网防护下的冲刷试验

Figure 14 Scouring tests of bare slope and slope under different three-dimensional network protection

生长刺激剂、黏结材料等,并调和特定地域气候环境关系,开发基材下植物生长和抗冲刷研究,保证

既能发挥保水功效,又能加速植物生根发芽的作用;③对边坡防护下植物-耕植土-三维网三者的

协同作用机理及力学理论分析仍不充分,建议结合不同种类、不同生长时期的植物,采用模型试验、现场监测和数值模拟的方式,将结果对比分析,揭示三者的相互作用机理。

(7) 随着中国“双碳”目标的提出,边坡工程防护将向减少圬工用量、碳排放量,增加坡面绿化的方向发展,现有边坡生态防护技术的研究也最终将服务于工程,完善边坡生态防护技术规范和理论研究成为学者们亟须研究的任务。尽管已出台了相关生态防护技术方案,但仅是针对某一地区的技术标准,并不适用于其他特定区域,现有阶段大多依赖施工经验,因此,有必要在理论研究的基础上建立生态防护技术标准和规范,进一步指导工程实际。

#### 参考文献:

#### References:

- [1] 杨玉冬,高明生,徐永福.植物根系土的剪切强度简化计算方法[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(6):535-540.  
YANG Yudong, GAO Mingsheng, XU Yongfu. Simplified calculation method of shear strength for root-permeated soils[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(6): 535-540.
- [2] 黄灏峰,王礼旺,南海龙,等.多阶梯边坡植被恢复技术在公路建设中的应用[J].中国水土保持科学,2013,11(4):60-62.  
HUANG Haofeng, WANG Liwang, NAN Hailong, et al. Application of the multi-step slope vegetation recovery technology in highway construction[J]. Science of Soil and Water Conservation, 2013, 11(4): 60-62.
- [3] 燕平,汪展翅,易卫锋,等.新型生态防护技术处理软岩边坡适用性研究[J].中外公路,2018,38(6):29-33.  
YAN Ping, WANG Zhanchi, YI Weifeng, et al. Study on applicability of new ecological protection technology in treating soft rock slope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2018, 38(6): 29-33.
- [4] 芦建国,于冬梅.高速公路边坡生态防护研究综述[J].中外公路,2008,28(5):29-32.  
LU Jianguo, YU Dongmei. Summary of research on ecological protection of expressway slope[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2008, 28(5): 29-32.
- [5] 张同鑫,潘毅,张壮,等.加筋生态护坡技术的应用与发展[J].水利水运工程学报,2017(6):110-117.  
ZHANG Tongxin, PAN Yi, ZHANG Zhuang, et al. Application and development of TRM technology in revetment works[J]. Hydro-Science and Engineering, 2017 (6): 110-117.
- [6] 黄晓明.路基路面工程[M].6版.北京:人民交通出版社股份有限公司,2019.  
HUANG Xiaoming. Road subgrade and pavement engineering[M]. 6th ed. Beijing: China Communications Press Co., Ltd., 2019.
- [7] 王文生,杨晓华,谢永利.公路边坡植物的护坡机理[J].长安大学学报(自然科学版),2005,25(4):26-30.  
WANG Wensheng, YANG Xiaohua, XIE Yongli. Mechanism of biotechnical protection for highway slope [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2005, 25(4): 26-30.
- [8] BADAQSHAN E, VAUNAT J, VEYLON G. Meteorological and vegetation effects on the thermal analysis of slopes[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2024, 196: 114352.
- [9] LÖBMANN M T, GEITNER C, WELLSTEIN C, et al. The influence of herbaceous vegetation on slope stability: A review[J]. Earth-Science Reviews, 2020, 209: 103328.
- [10] 谢潇,孙秀山.边坡生态防护技术研究[J].绿色科技,2020,22(4):192-194.  
XIE Xiao, SUN Xiushan. Brief introduction of study in slope protection by vegetation[J]. Journal of Green Science and Technology, 2020, 22(4): 192-194.
- [11] 赵迎松.雨滴击溅下薄层径流对土壤团聚体破碎、迁移的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2019.  
ZHAO Yingsong. The effect of shallow overland flow on breakdown and transport of soil aggregates under raindrop action[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2019.
- [12] FU Y, LI G L, ZHENG T H, et al. Fragmentation of soil aggregates induced by secondary raindrop splash erosion [J]. Catena, 2020, 185: 104342.
- [13] 姚亚兰.陕西公路黄土路堑边坡植被防护效应研究[D].西安:长安大学,2015.  
YAO Yalan. The research on the vegetation protection effect of Shaanxi highway loess cutting slope[D]. Xi'an: Chang'an University, 2015.
- [14] 王瑞红,李明鑫,张瀚,等.不同植被盖度对三峡库区边坡减蚀的室内模拟降雨研究[J].水土保持学报,2023,37(1):59-64.  
WANG Ruihong, LI Mingxin, ZHANG Han, et al. Study on indoor simulated rainfall with different vegetation coverage on slope erosion reduction in the Three Gorges Reservoir area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2023, 37(1): 59-64.
- [15] 朱谧远,武小飞,李晨辉,等.黄土高原陡坡地不同植被类型及恢复过程对径流泥沙的影响[J].水土保持研究,2023,30(6):57-66.  
ZHU Miyuan, WU Xiaofei, LI Chenhui, et al. Effects of different vegetation types and restoration processes on runoff and sediment on steep slopes of the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2023, 30(6): 57-66.
- [16] 崔钦凯,刘俊娥,陈浩,等.草被覆盖、雨强和坡度对黄土坡面径流含沙量的影响[J].水土保持学报,2023,37(5):40-47.  
CUI Qinkai, LIU Jun'e, CHEN Hao, et al. Influence of

- grass coverage, rain intensity and slope on sediment concentration of runoff on loess slope[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2023, 37(5): 40-47.
- [17] TAN H M, CHEN F M, CHEN J, et al. Direct shear tests of shear strength of soils reinforced by geomats and plant roots[J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2019, 47(6): 780-791.
- [18] 杨文辉, 章定文, 闫茜, 等. 深浅根混种法加固边坡稳定性的数值分析[J]. *东南大学学报(自然科学版)*, 2020, 50(1): 161-168.  
YANG Wenhui, ZHANG Dingwen, YAN Qian, et al. Numerical analysis on stability of slope reinforced by combination of deep and shallow roots[J]. *Journal of Southeast University (Natural Science Edition)*, 2020, 50(1): 161-168.
- [19] VAN DER BIJ A U, WEIJTERS M J, BOBBINK R, et al. Facilitating ecosystem assembly: Plant-soil interactions as a restoration tool[J]. *Biological Conservation*, 2018, 220: 272-279.
- [20] 季贵斌. 广河高速公路边坡浅层生态防护力学效应分析[D]. 沈阳: 东北大学, 2018.  
JI Guibin. Analysis of mechanical effects on ecological protection of slope shallow in Guanghe expressway[D]. Shenyang: Northeastern University, 2018.
- [21] CAIRD M A, RICHARDS J H, DONOVAN L A. Nighttime stomatal conductance and transpiration in C3 and C4 plants[J]. *Plant Physiology*, 2007, 143(1): 4-10.
- [22] GARG A. Effects of vegetation types and characteristics on induced soil suction [D]. Hong Kong: Hong Kong University of Science and Technology, 2015.
- [23] NG C W W, TASNIM R, WONG J T F. Coupled effects of atmospheric CO<sub>2</sub> concentration and nutrients on plant-induced soil suction[J]. *Plant and Soil*, 2019, 439(1): 393-404.
- [24] LIU Q, SU L J, XIA Z Y, et al. Effects of soil properties and illumination intensities on matric suction of vegetated soil[J]. *Sustainability*, 2019, 11(22): 6475.
- [25] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39(1): 1-47.  
WU Hongwei. Atmosphere-plant-soil interactions: theories and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1-47.
- [26] LU J R, ZHANG Q, WERNER A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: 125203.
- [27] JOTISANKASA A, SIRIRATTANACHAT T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54(11): 1612-1622.
- [28] LIU Y, CUI Z, HUANG Z, et al. Influence of soil moisture and plant roots on the soil infiltration capacity at different stages in arid grasslands of China[J]. *Catena*, 2019, 182: 104147.
- [29] 魏耀华, 龙明旭, 肖宇, 等. 湖北安陆公路膨胀土边坡滑塌生态修复技术及其应用[J]. *中外公路*, 2020, 40(增刊2): 73-78.  
WEI Yaohua, LONG Mingxu, XIAO Yu, et al. Ecological restoration technology and its application of expansive soil slope collapse in Anxiao Highway, Hubei Province[J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2020, 40(sup 2): 73-78.
- [30] FREDLUND D G. *Soil mechanics for unsaturated soils* [M]. Hoboken: John Wiley and Sons, 1993.
- [31] VANAPALLI S K, FREDLUND D G, PUFAHL D E, et al. Model for the prediction of shear strength with respect to soil suction[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1996, 33(3): 379-392.
- [32] 单永体, 胡林, 王琦, 等. 径流冲刷对高寒高海拔地区高等级公路边坡侵蚀的影响[J]. *交通运输工程学报*, 2016, 16(4): 88-95.  
SHAN Yongti, HU Lin, WANG Qi, et al. Impacts of runoff scouring on high-grade highway slope erosion in alpine and high-altitude regions[J]. *Journal of Traffic and Transportation Engineering*, 2016, 16(4): 88-95.
- [33] 刘海松, 倪万魁, 杨泓全, 等. 降雨冲刷对黄土公路边坡植物防护影响的试验研究[J]. *工程地质学报*, 2007, 15(4): 527-533.  
LIU Haisong, NI Wankui, YANG Hongquan, et al. A field test of rainfall erosion on loess - highway-slope with plant protection[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2007, 15(4): 527-533.
- [34] 肖培青, 史学建, 陈江南, 等. 高速公路边坡防护的降雨和径流冲刷试验研究[J]. *水土保持通报*, 2004, 24(1): 16-18.  
XIAO Peiqing, SHI Xuejian, CHEN Jiangnan, et al. Experimental study on protecting speedway slope under rainfall and flow scouring[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24(1): 16-18.
- [35] 黄少平, 陈俊毅, 肖衡林, 等. 不同坡度植被边坡降雨入渗和径流侵蚀规律的试验研究[J]. *岩土力学*, 2023, 44(12): 3435-3447.  
HUANG Shaoping, CHEN Junyi, XIAO Henglin, et al. Test on rules of rainfall infiltration and runoff erosion on vegetated slopes with different gradients[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, 44(12): 3435-3447.
- [36] 于师, 李珍玉, 王梦珂, 等. 不同种植间距对香根草植物边坡优先流发育特征的影响[J]. *水土保持通报*, 2022, 42(3): 49-56.  
YU Shi, LI Zhenyu, WANG Mengke, et al. Effects of different plant spacings on preferential flow development characteristics of vetiver plant slopes[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2022, 42(3): 49-56.
- [37] 王连锐, 严亚, 商崇菊, 等. 两种草本植物对红黏土边坡的固土护坡效应[J]. *水土保持通报*, 2024, 44(2): 146-154.  
WANG Lianrui, YAN Ya, SHANG Chongju, et al. Soil strengthening and slope protection effect of two types of herbaceous plants on red clay slopes[J]. *Bulletin of Soil*

- and Water Conservation, 2024, 44(2): 146-154.
- [38] POLLEN N, SIMON A. Estimating the mechanical effects of riparian vegetation on stream bank stability using a fiber bundle model[J]. *Water Resources Research*, 2005, 41(7): 2004WR003801.
- [39] WU T H, MCKINNELL W P, SWANSTON D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1979, 16(1): 19-33.
- [40] 李本锋, 朱海丽, 谢彬山, 等. 黄河源区河岸带高寒草甸植物根-土复合体抗拉特性研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2020, 39(2): 424-432.  
LI Benfeng, ZHU Haili, XIE Binshan, et al. Study on tensile properties of root-soil composite of alpine meadow plants in theriparian zone of the Yellow River source region[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2020, 39(2): 424-432.
- [41] FAN C C. A displacement-based model for estimating the shear resistance of root-permeated soils[J]. *Plant and Soil*, 2012, 355(1): 103-119.
- [42] 扈萍, 宋修广, 吴登高. 高速公路边坡植草护坡的根固效应试验研究[J]. *岩土力学*, 2008, 29(2): 442-444.  
HU Ping, SONG Xiuguang, WU Denggao. Experimental research on reinforcement mechanism of expressway slope protection with greensward[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2008, 29(2): 442-444.
- [43] 王桂尧, 周欢, 夏旖琪, 等. 草类根系对坡面土强度及崩解特性的影响试验[J]. *中国公路学报*, 2018, 31(2): 234-241.  
WANG Guiyao, ZHOU Huan, XIA Yiqi, et al. Experiment on effect of grass root system on slope soil strength and disintegration characteristics[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2018, 31(2): 234-241.
- [44] 李珍玉, 欧阳森, 肖宏彬, 等. 基于根系构型的调控提高植物边坡根系固土能力[J]. *岩土力学*, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290.  
LI Zhenyu, OUYANG Miao, XIAO Hongbin, et al. Improvement of slope soil consolidation capacity of plant root system based on regulation of root architecture[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(12): 3271-3280, 3290.
- [45] GAO Q F, YU H, ZENG L, et al. Roles of vetiver roots in desiccation cracking and tensile strengths of near-surface lateritic soil[J]. *Catena*, 2023, 226: 107068.
- [46] 高乾丰, 余涵, 余慧聪, 等. 植草红黏土干缩开裂特性及影响因素研究[J]. *工程地质学报*, 2025, 33(1): 47-57.  
GAO Qianfeng, YU Han, YU Huicong, et al. Study of the desiccation cracking behavior and the influencing factors of grass-covered lateritic soil[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2025, 33(1): 47-57.
- [47] 马瑶. 植被护坡水文效应对边坡稳定性影响的研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2018.  
MA Yao. Study on influence of vegetation hydrological effect on slope stability[D]. Xi'an: Xi'an University of Technology, 2018.
- [48] 陈建斌, 孔令伟, 赵艳林, 等. 蒸发蒸腾作用下非饱和土的吸力和变形影响因素分析[J]. *岩土力学*, 2007, 28(9): 1767-1772, 1778.  
CHEN Jianbin, KONG Lingwei, ZHAO Yanlin, et al. On influence factors of suction and deformation of unsaturated soil under evaporation and transpiration effect [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2007, 28(9): 1767-1772, 1778.
- [49] 邓春娟, 郭建斌, 高程达. 新型抗蒸腾叶面肥对叶片蒸腾速率的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 113-116, 179.  
DENG Chunjuan, GUO Jianbin, GAO Chengda. Effects of new anti-transpiration foliar fertilizer on transpiration rate[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30(1): 113-116, 179.
- [50] 刘俊. 香根草边坡的水文效应与稳定性研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020.  
LIU Jun. Study on the stability of ecological slope considering the effect of water transfer of plant root system[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2020.
- [51] OSMAN N, SAIFUDDIN M, HALIM A. Contribution of vegetation to alleviate slope's erosion and acidity[M]. London: IntechOpen, 2014.
- [52] 赵娅如, 曹雲翔, 杨成参, 等. 人工降雨条件下高速公路植被边坡模型水文效应测试[J]. *草业学报*, 2024, 33(3): 24-33.  
ZHAO Yaru, CAO Yunxiang, YANG Chengcan, et al. Hydrological effects of highway vegetation slope model under artificial rain conditions[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2024, 33(3): 24-33.
- [53] 龚超龙. 灌草混交植物护坡技术在铁路边坡工程中的应用研究[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2021.  
GONG Chaolong. Study on the application of slope protection technology of shrub-grass mixed plants in railway slope engineering[D]. Changsha: Central South University of Forestry & Technology, 2021.
- [54] 言志信, 曹小红, 张刘平, 等. 植物护坡的力学机制分析[J]. *铁道建筑*, 2011, 51(4): 92-94.  
YAN Zhixin, CAO Xiaohong, ZHANG Liuping, et al. Analysis of mechanical mechanism of plant slope protection[J]. *Railway Engineering*, 2011, 51(4): 92-94.
- [55] 黄建坤, 王学林, 及金楠, 等. 基于渐近均匀化理论的黄土高原草本植物固土效果模拟[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(9): 168-176.  
HUANG Jiankun, WANG Xuelin, JI Jinnan, et al. Numerical simulation of root reinforcement for herbs in Loess Plateau based on asymptotic homogenization theory [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(9): 168-176.
- [56] STOKES A, ATGER C, BENGOUGH A G, et al. Desirable plant root traits for protecting natural and engineered slopes against landslides[J]. *Plant and Soil*, 2009, 324(1): 1-30.

- [57] OSMAN N, BARAKBAH S S. Parameters to predict slope stability: Soil water and root profiles[J]. *Ecological Engineering*, 2006, 28(1): 90-95.
- [58] 朱永杰,王超,刘自强. 降雨和植被覆盖对铁路路基边坡土壤侵蚀的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(6): 8-14.  
ZHU Yongjie, WANG Chao, LIU Ziqiang. Effects of rainfall and vegetation cover on soil erosion of railway bed slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2021, 41(6): 8-14.
- [59] 李华坦,赵玉娇,李国荣,等. 寒旱环境黄土区植物护坡原位模拟降雨试验研究[J]. *水土保持研究*, 2014, 21(6): 304-311.  
LI Huatan, ZHAO Yujiao, LI Guorong, et al. Experimental research on slope protection with vegetation under situ rainfall simulation in cold and arid environment of loess area[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2014, 21(6): 304-311.
- [60] 黄少平,晏鄂川. 木本植物不同部位对土质斜坡稳定性的影响[J]. *安全与环境工程*, 2018, 25(3): 21-26.  
HUANG Shaoping, YAN Echuan. Influence of the different parts of woody vegetation on the stability of soil slope[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2018, 25(3): 21-26.
- [61] 陈婧逸,陈晓清,宋东日,等. 根系形态对土体强度影响的大直剪实验研究[J/OL]. *长江科学院院报*, 1-9(2023-11-22) [2024-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20231122.1430.012.html>.  
CHEN Jingyi, CHEN Xiaoqing, SONG Dongri, et al. Large direct shear experimental study on the influence of root morphology on soil strength[J/OL]. *Journal of Changjiang River Scientific Research*, 1-9(2023-11-22) [2024-03-29]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1171.TV.20231122.1430.012.html>.
- [62] 韩立亮,宋桂龙. 护坡木本植物根系的力学特性及其与细胞壁成分的关系[J]. *北京林业大学学报*, 2015, 37(11): 120-127.  
HAN Liliang, SONG Guilong. Relationship between root mechanical characteristics and cell wall components of woody plant species[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2015, 37(11): 120-127.
- [63] BORDOLOI S, NG C W W. The effects of vegetation traits and their stability functions in bio-engineered slopes: A perspective review[J]. *Engineering Geology*, 2020, 275: 105742.
- [64] 黄学文,程菊海,杨阳. 秸秆植物草毯在高速公路边坡防护中应用研究[J]. *公路*, 2017, 62(1): 220-225.  
HUANG Xuewen, CHENG Juhai, YANG Yang. Study on application of straw plant carpet in slope protection of expressway[J]. *Highway*, 2017, 62(1): 220-225.
- [65] 张英龙. 高速铁路路基边坡纤维团粒喷播生态防护技术[J]. *铁道建筑*, 2020, 60(5): 80-83.  
ZHANG Yinglong. Ecological protection technology of fiber pellet spray-seeding on subgrade slope of high speed railway[J]. *Railway Engineering*, 2020, 60(5): 80-83.
- [66] 刘彦航. 山区高速公路路基边坡防护技术优化与综合评价研究[D]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2017.  
LIU Yanhang. Research on optimum technology and comprehensive assessment method of road bed of the expressway slope protection in mountain area[D]. Shijiazhuang: Shijiazhuang Tiedao University, 2017.
- [67] 蔡德钧,魏少伟,叶阳升,等. 铁路路基边坡生态防护研究现状及展望[J]. *中国铁路*, 2020(9): 46-54.  
CAI Degou, WEI Shaowei, YE Yangsheng, et al. Research status and prospect of ecological protection of railway subgrade sideslope[J]. *China Railway*, 2020(9): 46-54.
- [68] 顾小华,丁国栋,刘胜,等. 一种新型的高速公路边坡生态防护技术[J]. *水土保持研究*, 2006, 13(1): 106-107, 180.  
GU Xiaohua, DING Guodong, LIU Sheng, et al. A new bioengineering technique for slope protection in expressway[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006, 13(1): 106-107, 180.
- [69] 岳睿,李留振,李阿根,等. 生态垫的特点及其研究与应用[J]. *浙江农业科学*, 2010, 51(5): 1165-1166.  
YUE Rui, LI Liuzhen, LI Aagen, et al. Characteristics, research and application of ecological mat[J]. *Journal of Zhejiang Agricultural Sciences*, 2010, 51(5): 1165-1166.
- [70] DAVIES K, FULLEN M A, BOOTH C A. A pilot project on the potential contribution of palm-mat geotextiles to soil conservation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 561-569.
- [71] JANKAUSKAS B, JANKAUSKIENE G, FULLEN M A. Soil conservation on road embankments using palm-mat geotextiles: Field studies in Lithuania[J]. *Soil Use and Management*, 2012, 28(2): 266-275.
- [72] BHATTACHARYYA R, FULLEN M A, DAVIES K, et al. Utilizing palm-leaf geotextile mats to conserve loamy sand soil in the United Kingdom[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2009, 130(1/2): 50-58.
- [73] BHATTACHARYYA R, FULLEN M A, BOOTH C A, et al. Use of palm-mat geotextiles for soil conservation: I. Effects on soil properties[J]. *Catena*, 2011, 84(3): 99-107.
- [74] 苗红昌. 南水北调中线总干渠潮河风沙区段风沙防护措施设计[J]. *中国水土保持*, 2011(3): 34-35.  
MIAO Hongchang. Design of wind-sand prevention measures for the Chaohe river wind-sand section of the Main Canal in the Middle Route of the South-to-North Water Diversion Project[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2011(3): 34-35.
- [75] 逢红,祁有祥,赵廷宁,等. 北京市人民渠生态护岸技术应用研究[J]. *中国水土保持*, 2007(6): 37-39.  
PANG Hong, QI Youxiang, ZHAO Tingning, et al. Study on application of ecological revetment technology in Beijing People's Canal[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2007(6): 37-39.
- [76] 岳恒陞,杨建英,杨阳,等. 不同降雨强度条件下植被毯护坡技术的产流特性[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(1): 35-41.

- YUE Huanbi, YANG Jianying, YANG Yang, et al. Runoff producing characteristics of vegetation carpet greening technology at different rainfall intensities[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2015, 13(1): 35-41.
- [77] 石鑫, 孙海龙, 李绍才. 秸秆纤维网覆盖下纤维用量对土壤蒸发的影响[J]. *中国水土保持*, 2012(2): 47-49.
- SHI Xin, SUN Hailong, LI Shaocai. Effect of fiber content on soil evaporation under straw fiber net mulching [J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2012(2): 47-49.
- [78] 倪栋, 王健, 王笑, 等. 道路边坡植物碎屑材料与植生毯水土保持效果对比[J]. *公路交通科技*, 2022, 39(增刊 2): 396-402.
- NI Dong, WANG Jian, WANG Xiao, et al. Comparison of soil and water conservation effects between plant debris material and vegetative blanket on road slope[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2022, 39(sup 2): 396-402.
- [79] RICKSON R J. Controlling sediment at source: An evaluation of erosion control geotextiles[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2006, 31(5): 550-560.
- [80] 明道轩, 王涛, 熊彪, 等. 植生袋在岩质边坡防护中的固定方式研究[J]. *公路交通技术*, 2021, 37(2): 14-18.
- MING Daoxuan, WANG Tao, XIONG Biao, et al. Study on the fixing method of planting bag in rock slope protection[J]. *Technology of Highway and Transport*, 2021, 37(2): 14-18.
- [81] 江贤圣. 植生袋生态防护的设计与施工研究[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35(23): 7245-7245, 7247.
- JIANG Xiansheng. Study on design and construction of ecological protection of plant bag[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2007, 35(23): 7245-7245, 7247.
- [82] 薛春晓, 程建军, 蒋富强, 等. 青藏铁路多年冻土区段沿线生态修复新技术与实践[J]. *铁道建筑*, 2010, 50(9): 146-148.
- XUE Chunxiao, CHENG Jianjun, JIANG Fuqiang, et al. New technology and its practice of ecological remedy at permafrost section on Qinghai-Tibet railway[J]. *Railway Engineering*, 2010, 50(9): 146-148.
- [83] 夏继红, 严忠民. 浅论城市河道的生态护坡[J]. *中国水土保持*, 2003(3): 9-10.
- XIA Jihong, YAN Zhongmin. An discussion on ecological slope protection of channels in cities[J]. *Soil and Water Conservation in China*, 2003(3): 9-10.
- [84] 赵燕洲, 薛春晓, 杨印海. 青藏铁路路域高寒草原生态修复技术研究[J]. *铁道工程学报*, 2013, 30(7): 90-94.
- ZHAO Yanzhou, XUE Chunxiao, YANG Yin Hai. Research on ecological restoration of Alpine steppe along Qinghai-Tibet railway[J]. *Journal of Railway Engineering Society*, 2013, 30(7): 90-94.
- [85] 袁磊, 周建伟, 温冰, 等. 高陡岩质边坡生态修复过程中植物群落与地下生境特征研究[J]. *西北林学院学报*, 2017, 32(2): 84-89.
- YUAN Lei, ZHOU Jianwei, WEN Bing, et al. Characters of vegetation community and below-ground habitats of ecological restoration process on high-steep slope[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2017, 32(2): 84-89.
- [86] 罗敏敏, 徐超. 生态袋+SNS柔性防护网在岩石护坡中的应用[J]. *地下空间与工程学报*, 2015, 11(增刊 1): 278-281.
- LUO Minmin, XU Chao. Application of ecological bags with SNS flexible protection nets in ecological protection for steep rock slopes[J]. *Chinese Journal of Underground Space and Engineering*, 2015, 11(sup 1): 278-281.
- [87] 刘子壮, 赵晶, 高照良. 高速公路边坡不同恢复年限土壤性质及生态防护模式研究[J]. *科学技术与工程*, 2014, 14(12): 100-106.
- LIU Zizhuang, ZHAO Jing, GAO Zhaoliang. Research on ecological protection modes and soil properties of different years of recovery along highway slopes[J]. *Science Technology and Engineering*, 2014, 14(12): 100-106.
- [88] 朱海生, 陈健, 张桂荣, 等. 生态袋挡墙护岸结构设计及其力学性能变化[J]. *水利水运工程学报*, 2015(4): 48-55.
- ZHU Haisheng, CHEN Jian, ZHANG Guirong, et al. Structural design of retaining wall with ecological geotextile bags and its changes in mechanical properties[J]. *Hydro-Science and Engineering*, 2015(4): 48-55.
- [89] 刘昆珏, 刘问, 刘明西, 等. 路基边坡黄麻植生袋的性能测试与稳定性分析[J]. *中国水土保持科学*, 2022, 20(6): 67-73.
- LIU Kunjue, LIU Wen, LIU Mingxi, et al. Performance test and stability analysis of jute planting bag on subgrade slope[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2022, 20(6): 67-73.
- [90] SUN R, WANG D M, CAO H M, et al. Ecological pervious concrete in revetment and restoration of coastal Wetlands: A review[J]. *Construction and Building Materials*, 2021, 303: 124590.
- [91] 王俊岭, 王雪明, 冯萃敏, 等. 植生混凝土的研究进展[J]. *硅酸盐通报*, 2015, 34(7): 1915-1920.
- WANG Junling, WANG Xueming, FENG Cuimin, et al. Research progress on the planting eco-concrete[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2015, 34(7): 1915-1920.
- [92] 胡勇有, 胡春明, 谢磊, 等. 植生型生态混凝土孔隙状态对植物生长的影响[J]. *华南理工大学学报(自然科学版)*, 2006, 34(12): 5-9.
- HU Yongyou, HU Chunming, XIE Lei, et al. Effect of void status in eco-concrete for planting on plant growth [J]. *Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition)*, 2006, 34(12): 5-9.
- [93] 刘大翔, 李少丽, 许文年, 等. 植被混凝土有机质类型与配比的合理选取[J]. *水利水电科技进展*, 2012, 32(4): 37-40, 54.
- LIU Daxiang, LI Shaoli, XU Wennian, et al. Selection tests for type and ratio of organic matter in vegetation concrete[J]. *Advances in Science and Technology of*

- Water Resources, 2012, 32(4): 37-40, 54.
- [94] 马朋坤, 李富平, 韩新开, 等. 以铁尾矿为基础材料的植被混凝土基质研究[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(11): 110-114, 129.  
MA Pengkun, LI Fuping, HAN Xinkai, et al. Study on vegetation concrete substrate materials based on iron tailings[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 38(11): 110-114, 129.
- [95] 夏振尧, 许文年, 王乐华. 植被混凝土生态护坡基材初期强度特性研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(6): 1719-1724.  
XIA Zhenyao, XU Wennian, WANG Lehua. Research on characteristics of early strength of ecological slope-protected base material of vegetation-growing concrete[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(6): 1719-1724.
- [96] 梁永哲, 陈毅, 刘大翔, 等. 外掺植物纤维对冻融作用下植被混凝土抗剪强度的影响[J]. 水土保持通报, 2016, 36(2): 136-139, 145.  
LIANG Yongzhe, CHEN Yi, LIU Daxiang, et al. Effect of additive plant fiber on shearing strength of vegetation-compatible concrete under freezing-thawing cycles[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2016, 36(2): 136-139, 145.
- [97] LI L B, ZHANG H M, ZHOU X M, et al. Effects of super absorbent polymer on scouring resistance and water retention performance of soil for growing plants in ecological concrete[J]. Ecological Engineering, 2019, 138: 237-247.
- [98] MA H Y, WU Z Y, ZHANG J H, et al. Uniaxial compressive properties of ecological concrete: Experimental and three-dimensional (3D) mesoscopic investigation[J]. Construction and Building Materials, 2021, 278: 121034.
- [99] 王广月, 韩燕, 王杏花. 降雨条件下土工格室柔性护坡的稳定性分析[J]. 岩土力学, 2012, 33(10): 3020-3024.  
WANG Guangyue, HAN Yan, WANG Xinghua. Stability analysis of geocell flexible slope protection in rainfall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(10): 3020-3024.
- [100] 王杏花. 土工格室边坡防护水力侵蚀特性试验研究[D]. 济南: 山东大学, 2012.  
WANG Xinghua. Hydraulic erosion experimental study on geocell reinforced slope protection[D]. Jinan: Shandong University, 2012.
- [101] 吕宋, 魏少伟, 刘越然, 等. 铁路路基边坡浅层稳定性分析与坡面防护现状[J]. 铁道建筑, 2023, 63(6): 12-18.  
LYU Song, WEI Shaowei, LIU Yueran, et al. Analysis of shallow stability of railway subgrade slope and current situation of slope protection[J]. Railway Engineering, 2023, 63(6): 12-18.
- [102] SATYAL S R, LESHCHINSKY B, HAN J, et al. Use of cellular confinement for improved railway performance on soft subgrades[J]. Geotextiles and Geomembranes, 2018, 46(2): 190-205.
- [103] WANG D Y, HU J L, WANG J, et al. Experimental study on anti-eroding effect of slope protected by degradable geocell[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2021, 634(1): 012026.
- [104] YANG G Q, SU P H, XU P, et al. Experimental investigation on failure mechanisms of HDPE welded geocell junctions under different clamping distances[J]. Applied Sciences, 2022, 12(11): 5343.
- [105] 宋飞, 许伟强, 张鲁渝, 等. 土工格室柔性挡墙变形规律数值模拟研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 738-742.  
SONG Fei, XU Weiqiang, ZHANG Luyu, et al. Numerical analysis of deformation behavior of geocell flexible retaining wall[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(sup 1): 738-742.
- [106] 韩宇琨, 卢正, 姚海林, 等. 土工格室加固边坡抗冲刷性研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2021, 40(增刊2): 3425-3433.  
HAN Yukun, LU Zheng, YAO Hailin, et al. Study on scour resistance of slope strengthened by geocell[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2021, 40(sup 2): 3425-3433.
- [107] 孙冬旭, 李静, 兰导, 等. 微桩土工格室在生态护坡工程中的应用[J]. 中外公路, 2021, 41(增刊2): 80-83.  
SUN Dongxu, LI Jing, LAN Dao, et al. Research and application of micro-pile geocell in ecological slope protection engineering[J]. Journal of China & Foreign Highway, 2021, 41(sup 2): 80-83.
- [108] SONG G F, SONG X R, HE S Q, et al. Soil reinforcement with geocells and vegetation for ecological mitigation of shallow slope failure[J]. Sustainability, 2022, 14(19): 11911.
- [109] SONG X R, HUANG M S, HE S Q, et al. Erosion control treatment using geocell and wheat straw for slope protection[J]. Advances in Civil Engineering, 2021, 2021(1): 5553221.
- [110] 曾龙辉, 江辉, 黄海清, 等. 人工降雨条件下土工格室抗侵蚀性能试验研究[J]. 人民长江, 2017, 48(10): 9-12.  
ZENG Longhui, JIANG Hui, HUANG Haiqing, et al. Study on erosion resistance of geocell based on artificial rainfall[J]. Yangtze River, 2017, 48(10): 9-12.
- [111] 鲁志方, 杨晓华, 晏长根. 土工格室植被护坡防膨胀土边坡开裂机理研究[J]. 公路, 2016, 61(4): 23-28.  
LU Zhifang, YANG Xiaohua, YAN Changgen. Research on cracking mechanism of expansive soil slope with geocells flexible retaining wall[J]. Highway, 2016, 61(4): 23-28.
- [112] 范永丰, 韩宇琨, 刘丛木, 等. 土工格室加固边坡稳定性参数分析[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(6): 2507-2514.  
FAN Yongfeng, HAN Yukun, LIU Congmu, et al. Analysis of stability parameters of geocell reinforced slope[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(6): 2507-2514.
- [113] 王广月, 孙秀玲, 魏金祥. 土工格室防护边坡抗冲刷规律试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(5): 69-72.  
WANG Guangyue, SUN Xiuling, WEI Jinxiang.

- Experimental study of anti-erosion pattern on sideslope with geocell protection[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(5): 69-72.
- [114] WANG G Y, ZHANG J P, XU T Y. Numerical analysis of geocell protective slope stability[J]. *The Open Civil Engineering Journal*, 2013, 7(1): 223-231.
- [115] MA S K, MA M, HUANG Z, et al. Research on the improvement of rainfall infiltration behavior of expansive soil slope by the protection of polymer waterproof coating [J]. *Soils and Foundations*, 2023, 63(3): 101299.
- [116] 陈兵, 付金生, 倪安辰, 等. 青藏公路边坡不同生态防护措施的水土流失防治效果研究[J]. *公路交通科技*, 2020, 37(增刊2): 11-17.  
CHEN Bing, FU Jinsheng, NI Anchen, et al. Study on soil erosion control effect on slope of Qinghai-Tibet highway by different ecological protection measures[J]. *Journal of Highway and Transportation Research and Development*, 2020, 37(sup 2): 11-17.
- [117] 刘泽, 陈丽, 何矾, 等. 边坡筋锚三维网柔性防护结构的稳定性分析[J]. *水利水电科技进展*, 2020, 40(4): 65-70.  
LIU Ze, CHEN Li, HE Fan, et al. Stability analysis of flexible protection structure for slope reinforced anchor 3D-geomat[J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2020, 40(4): 65-70.
- [118] 钟春欣, 张玮, 王树仁. 三维植被网加筋草皮坡面土壤侵蚀试验研究[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2007, 35(3): 258-261.  
ZHONG Chunxin, ZHANG Wei, WANG Shuren. Experimental research on soil erosion of turf slope reinforced by 3D vegetation net[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2007, 35(3): 258-261.
- [119] 王晓春, 王远明, 张桂荣, 等. 粉砂土岸坡三维加筋生态护坡结构力学效应研究[J]. *岩土工程学报*, 2018, 40(增刊2): 91-95.  
WANG Xiaochun, WANG Yuanming, ZHANG Guirong, et al. Mechanical effect of three-dimensional reinforced eco-structure on silty sand slopes[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2018, 40(sup 2): 91-95.
- [120] WANG G Y, SUN G R, LI J K, et al. The experimental study of hydrodynamic characteristics of the overland flow on a slope with three-dimensional Geomat[J]. *Journal of Hydrodynamics*, 2018, 30(1): 153-159.
- [121] 王广月, 王艳, 徐妮. 三维土工网防护边坡侵蚀特性的试验研究[J]. *水土保持研究*, 2017, 24(1): 79-83.  
WANG Guangyue, WANG Yan, XU Ni. Test and study on erosion characteristics of 3D geonet protection slope[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2017, 24(1): 79-83.
- [122] 尉红彬, 李娟, 乔建刚. 基于土工网的公路土石边坡固土性能[J]. *科学技术与工程*, 2020, 20(28): 11767-11774.  
YU Hongbin, LI Juan, QIAO Jiangang. Earth-fixing performance of slope with earth-rock based on geonet[J]. *Science Technology and Engineering*, 2020, 20(28): 11767-11774.
- [123] YI P, LIN L, AMINI F, et al. Full-Scale HPTRM-strengthened levee testing under combined wave and surge overtopping conditions: Overtopping Hydraulics, shear stress, and erosion analysis[J]. *Journal of Coastal Research*, 2013, 29(1): 182-190.
- [124] HU L, SHAN Y T, CHEN R H, et al. A study of erosion control on expressway embankment sideslopes with three-dimensional net seeding on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Catena*, 2016, 147: 463-468.
- [125] 张锐, 凌时光, 郑健龙, 等. 膨胀土路堑边坡柔性加固方法及现场监测[J]. *中国公路学报*, 2024, 37(6): 87-97.  
ZHANG Rui, LING Shiguang, ZHENG Jianlong, et al. Flexible reinforcement method and field monitoring of expansive soil cutting slope[J]. *China Journal of Highway and Transport*, 2024, 37(6): 87-97.