

DOI: 10.16544/j.cnki.cn43-1494/u.20210922001

文章编号: 1674-599X(2023)02-0031-10

引用格式: 桂羽彤, 蒋志明. 公路边坡生态防护机理及技术研究进展[J]. 交通科学与工程, 2023, 39(2): 31-41, 48.

Citation: GUI Yutong, JIANG Zhiming. Research progress on ecological protection mechanism and technology of highway slope[J]. J. Transp. Sci. Eng., 2023, 39(2): 31-40, 48.

公路边坡生态防护机理及技术研究进展

桂羽彤, 蒋志明

(长沙理工大学 土木工程学院, 湖南 长沙 410114)

摘 要:生态防护技术具有固土护坡、生态绿化的双重效果,在公路边坡的防护中被广泛应用。为探究生态防护的作用机理、技术方法及评价体系,该研究在现有成果的基础上,总结了生态防护在发展过程中的关键问题。分析了不同的生态防护机理、作用效应及影响因素,介绍了各种生态防护技术并进行了归纳,形成了生态防护技术体系,对关键技术进行了讨论与展望。根据现有评价体系中存在的问题,提出了生态防护评价指标体系以及方法的发展方向。

关键词:生态防护;防护机理;技术方法;评价体系

中图分类号: U417.1

文献标志码: A

Research progress on ecological protection mechanism and technology of highway slope

GUI Yutong, JIANG Zhiming

(School of Civil Engineering, Changsha University of Science & Technology, Changsha 410114, China)

Abstract: Ecological protection technology has the dual effects of soil consolidation, slope protection, and ecological greening. It is widely used in the protection of highway slopes. In order to explore the action mechanism, technical methods, and evaluation system of ecological protection. Based on summarizing the existing research results, this paper summarizes the critical problems in the development of ecological protection. Firstly, different ecological protection mechanisms, the action effects and influencing factors of each mechanism were analyzed, and the problems of theoretical research and engineering practice were put forward. Secondly, various ecological protection technologies are introduced, sorted, and classified, forming an ecological protection technology system, and the key technologies were discussed and prospected. Finally, the ecological protection evaluation index and method were introduced, and the current situation of insufficient attention and professionalism in the development of the evaluation system was summarized.

Key words: ecological protection; protection mechanism; technical method; evaluation system

随着生活水平的提高,人们不仅对公路边坡的安全性提出要求,还对其景观性、生态的可持续性等都有更高要求。生态防护工程能对公路边坡进行防护和生态美化,被广泛应用于公路边坡、铁路边坡等边坡防护^[1-2]。国内外学者针对生态防护机理进行了许多研究,包括分析加固效应、提出加固

模型、进行数值分析模拟^[3]、开展室内试验验证等,但仍有一些问题亟须进一步研究。如:许多学者从不同角度分析了植被的护坡机理,但并未形成统一的结论,且机理研究落后于技术发展^[4];护坡技术专业术语使用不规范,未将同一类型的护坡方式进行归类和规范表述,导致护坡技术未能形

收稿日期: 2021-09-22

作者简介: 桂羽彤(1998—),女,长沙理工大学硕士生。

成条理清晰、结构完整的体系;护坡现有的评价体系也未能提出统一的评价指标及评价方法,使得实际工程效果难以横向对比。这些都导致生态防护体系结构不完整、层次不清晰。因此,在工程实践中往往低估了生态防护的固土护坡作用。

本研究在已有成果基础上总结和分析相对完善的护坡机理及计算模型,对生态护坡技术进行归类总结,分析了其优缺点和适用范围,并对关键技术的发展方向进行了讨论与展望。分析了在评价体系中使用较多的评价指标、评价方法和各种评价方法的特点,对于指标的选取给出了建议,提出了生态防护综合评价体系的发展方向。

1 公路边坡生态防护机理研究

生态防护作为一项加固绿化技术,其机理研究落后于工程实践。随着生态防护技术的广泛应用,其防护机理的研究得以重视,国内外许多学者结合不同的加固机理提出了相应的计算模型,并通过室内试验、原位试验等进行验证。研究表明:生态防护技术中的固土护坡作用主要来源于植物的力学效应、水文效应及生物效应等^[5]。

1.1 力学效应

植物在生态防护工程中的力学效应主要来自于其根系。植物根系从形态上分为主根与侧根。主根可以穿过较深的土层,将植物及浅层土壤锚固到较为稳定的土层中,从而起到类似于锚杆的作用。而侧根一般为直径较小的高密集根系,其主要分布于土壤浅层且抗剪强度更高,能与土壤盘根交错,形成特殊的根-土复合体,达到抑制边坡浅层滑动的作用。结合植物根系的作用方式,学者们提出了深根的锚固理论和浅根的增加筋理论。

1.1.1 深根的锚固理论

木本植物的主根一般较为粗壮,具有一定的刚度,可扎入岩土体深部较为稳定的土层中。根-土间的相互作用主要为黏接作用和摩擦作用。其中,黏接作用是由根系分泌的有机胶质、黏液产生,其作用效果较弱。摩擦作用是由根系所受土压力及根-土相对运动产生,其能够分担土壤中的部分荷载,并改善土壤中的荷载分布,从而作增强了土壤的抗拉强度和抗压强度。因此摩擦作用的效果较

为明显。

根据根-土间的相互作用及力学特点,可从摩擦角度将根系的锚固作用表示为全长黏接型锚杆模型,如图1所示。其中, l 为锚杆长度。

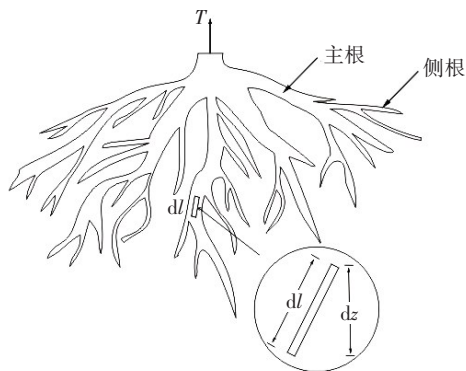


图1 深根锚固作用力学模型

Fig. 1 Mechanical model of deep root anchorage

根据锚杆支护理论,对深粗根系的锚固作用进行定量分析^[6],其表达式为:

$$T = 2\pi\mu\gamma \int_0^{\infty} P(z) \cdot Q(z) \cdot z dz + 2\pi c \int_0^{\infty} P(z) \cdot Q(z) dz \quad (1)$$

式中: T 为植物根系锚固力; $P(z)$ 为根的平均半径沿深度 z 方向的分布函数; $Q(z)$ 为根的密度沿深度 z 方向的分布函数; c 、 μ 分别为土体黏聚力和摩擦系数; γ 为土的自然容重。

由式(1)可知,植物主根的半径大小及分布方式影响锚固作用的大小,随着半径及密度的增加,锚固作用越大。同时,边坡土体的自然容重与抗剪强度等指标也能对锚固作用产生影响,土质越密实,抗剪强度指标越大,锚固作用越强。

1.1.2 浅根的增加筋理论

草本植物、灌木的根系一般分布于土体浅层,具有多而细的特点,其纵横交错成三维网状。由于根系的分布及作用特点类似于加筋材料,可将含有浅根的土体视为根-土复合材料。因此,有学者提出运用准黏聚力原理和摩擦加筋原理对根-土复合材料的增强作用进行解释。

1) 准黏聚力原理。

准黏聚力原理认为根-土复合体中侧根的作用主要体现为限制边坡土体的侧向变形^[7]。由于土体与根系的变形模量相差较大,在受到竖向荷载时,根-土间将产生摩擦力,协调造成变形,使得土体侧

向变形较无根状态下大幅减小。因此,在侧向压力相同时,竖向荷载增大至 σ'_1 土体才能达到极限平衡状态,如图2所示。通过剪切试验表明:根-土复合体的加筋作用主体限制于黏聚力的增加,其摩擦角增大不明显,增加的黏聚力 Δc 称为“准黏聚力”。

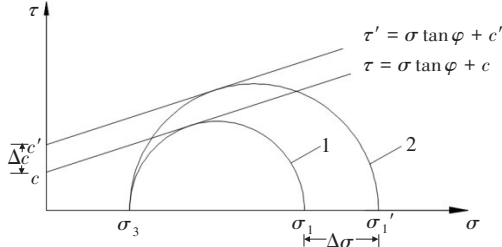


图2 莫尔圆示意

Fig. 2 Mohr circle diagram

2) 摩擦加筋原理。

结合根系对边坡土体的作用效果及现场土样抗剪强度试验可知:根-土复合体强度特征与加筋土强度特征吻合度高。因此,可将根-土复合体视为三维加筋土,按照加筋土原理对含根土体进行分析。

Waldron 最早对植物根系的加筋作用进行描述,其基于 Mohr-Coulomb 强度方程,提出了加筋土的修正力平衡模型^[8],其表达式为:

$$\tau_r = \sigma \tan \varphi + c + \Delta S \quad (2)$$

式中: τ_r 为加筋土体的剪切强度; ΔS 为加筋作用引起的土体剪切强度增量; c 为加筋土体的黏聚力; φ 为加筋土体的内摩擦角。

GRAY 和 AL-REFEAI 基于式(2),根据根系与剪切平面的位置关系,提出了植物根系与土体的相互作用力学模型(如图3所示,其中 x 为位移),并推导出土体剪切强度增量 ΔS 的计算方法^[9],其计算式为:

$$\Delta S = \frac{\sum_{j=1}^m T_j \sin \theta_j}{A} + \frac{\sum_{j=1}^m T_j \cos \theta_j}{A} \tan \varphi + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \sin(90^\circ - \psi_j)}{A} + \frac{\sum_{j=m+1}^n T_j \cos(90^\circ - \psi_j)}{A} \tan \varphi \quad (3)$$

$$\psi_j = \tan^{-1} \left[\frac{1}{k_j + (\tan^{-1} i_j)^{-1}} \right], \quad j = m+1, m+2, \dots, n \quad (4)$$

式中: T_j 为根的抗拉力; A 为土体面积; θ_j 为正交根剪

切变形角度; ψ_j 为斜交根变形角度; φ 为土体内摩擦角; i_j 为根的延伸方向与剪切面的初始夹角; k_j 为剪切变形比; m 为正交根的个数; n 为土体中根的总数。

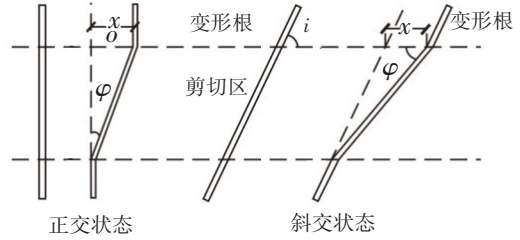


图3 植物单根与土体相互作用力学模型

Fig. 3 Mechanical model of interaction between plant single root and soil

该模型表明:土体的摩擦加筋作用与植物根系的抗拉强度及根系分布密切相关。植物根系的抗拉拔力随着土壤的含水率与根系体积的增加,呈先增加后减小趋势^[10]。但植物根系的分布也并非越多越好,加筋土在最优加筋率时的抗裂性能最佳。

张云伟等^[11]在该数学模型的基础上,从根-土黏合键的作用机制和破坏原理作进一步研究,提出了摩擦型根-土黏合键破坏模型,提高了模型的模拟精度。周云艳等^[12]提出了根系增强模型,并通过原位试验进行验证。

这些研究准确地描述了植物在力学效应上的加固机理。但模型中参数较多,数据的获取较为困难,实际应用不便。

一些学者采用室内试验分析植物的力学效应,试验表明:含有植物根系的边坡土体的抗剪强度仍符合摩尔-库伦原理,且随着含根量的增加,黏聚力明显增大,而摩擦角增幅较小^[13]。但室内试验中一般使用扰动土样进行试验,这与实际情况相差较大,试验结果的有效性有待考量。

还有学者进行了原位测试,发现植物根系可以增加土体的强度与延性^[12]。但原位测试的难度较大,且结果往往与现场的植物种类、特征、生长情况及气候环境密切相关,不具有代表性。

本研究在理论模型的基础上对计算模型进行简化,并结合大量室内试验与原位测试的结果,将一些难以获取的数据用其他相关的、易得的数据替代,结合不同的地质与气候条件,形成较为完善的经验取值,从而兼顾计算过程的简便性与计算结果的准确性。

1.2 水文效应

降雨是引起边坡失稳破坏的重要原因之一。短时间的大量降雨将导致边坡发生深层的整体破坏,长时间的小强度降雨也会使边坡发生浅层的局部破坏^[14]。植物通过吸水减压作用、降雨截流作用及削弱溅蚀作用,有效地减缓降雨的不利影响^[15]。

1.2.1 吸水减压作用

植物根系通过蒸腾作用消耗土体中的入渗水,减小土体的含水率及孔隙水压力。由饱和土有效应力原理可知,减小孔隙水压力可以增大有效应力,增大土体的抗剪强度,使边坡趋于稳定。

对于非饱和土,FREDLUND等^[16]在1978年提出的非饱和土抗剪强度计算式为:

$$\tau = c' + (\sigma - u_a) \tan \varphi' + (u_a - u_w) \tan \varphi_b \quad (5)$$

式中: u_a 、 u_w 分别为孔隙气压力和孔隙水压力; $(\sigma - u_a)$ 为净法向应力; $(u_a - u_w)$ 为基质吸力; c' 、 φ' 分别为饱和土的黏聚力和内摩擦角; φ_b 为抗剪强度随基质吸力变化的内摩擦角。

由式(5)可知,当含水量减小时,孔隙水压力减小,孔隙气压力增大,颗粒间的基质吸力增大。因此,随着含水量的减小,非饱和土的表观黏聚力增大,而真黏聚力基本无变化,故其抗剪强度增大。

土体的含水量减小会使得土颗粒间的结合水膜变薄,由水膜产生的水膜黏聚力将变大。因此,土颗粒间的黏结强度随之增大。且在外力作用时,土颗粒间由相对错动趋势产生的摩擦强度增加,土体的内摩擦角也将增大。

1.2.2 降雨截流作用

降雨发生时,植物的茎叶可以截留部分雨滴使其不能落到坡面。这部分被植物截留的最大雨量由植物覆盖度及临界降雨量决定^[17],其计算式为:

$$E = \begin{cases} \lambda^* \cdot P, & P \leq P^* \\ E^*, & P > P^* \end{cases} \quad (6)$$

$$E^* = a \cdot C_{FVC} \cdot I_{LAI} \quad (7)$$

式中: E 为植物截留降雨; P 为临界降雨; P^* 为临界降雨量,由植物类型和叶面积指数确定; E^* 为植物截流最大降雨量; C_{FVC} 为植被覆盖度; I_{LAI} 为叶面积指数; a 为叶片极限持水深度,约为0.1~0.2 mm; λ^* 为最大截留系数,其数值等于植被覆盖度。

径流测量结果表明:植物的降雨截流作用能减

少到达坡面的降雨量。

1.2.3 削弱溅蚀作用

雨滴在下落过程中将势能转化为动能,然后通过冲击坡面的形式将动能传递给土体,使土颗粒分离。随后,土颗粒随坡面径流流失,从而造成坡面侵蚀及水土流失。

植物的茎叶能够对雨滴产生缓冲作用,从而减小雨滴落到坡面的冲击力。且草本植物的根茎可使土粒在坡面沉积,形成微型滤水体,对坡面径流产生阻截与过滤的作用^[18]。从而大幅减小降雨对边坡坡面土体的侵蚀。

1.3 生物效应

生物效应来源于植物在生长过程中生物特性对边坡稳定性的影响。植物根系表面生长着众多的根节及根毛,部分植物的根系还生长着大量菌根。这种生物特征能够增大根土间的接触面积,从而有效地增加根-土间的摩擦力及黏结力,提高了根-土复合体的强度^[12]。

植物在生长过程中根系表面会产生一些化学物质,有利于根系和土颗粒紧密黏接,增强了根-土复合体的黏聚力^[19]。根系生长和吸水过程中具有膨胀作用,能够对周围土体施加膨胀压力,增加根-土复合体的摩擦力。植物根系数量众多且非常发达,在土体中密布。根系能够将周围土体紧密固结在一起,增强土体的整体性,从而提高了土体对外力的抵抗力。生物效应较为全面地解释了植被的固土护坡作用,其理论分析结果与实际工程较吻合。但它还不能定量地描述植被对边坡稳定性的实际增强作用。植物的生长发育过程也会对边坡稳定性造成负面影响,如植物生长会加大边坡自重,植物根系生长可能造成土体间的裂隙,以及根系腐烂,导致土体松软等。工程设计中,将生态防护技术视为绿化手段,但在边坡支护过程中没有考虑其作用。因此,随着边坡设计的精细化发展,在明确生态防护机理的基础上,可以适当地在工程设计中考虑生态防护技术对边坡的加固作用,兼顾安全性与经济性。

2 公路边坡生态防护技术

与传统的刚性支护相比,生态防护技术既能够起到良好的固土护坡作用,又能够改善工程环境,在实际工程中得到了广泛应用。在应用的过程中,

施工者对各种技术的施工要点、适用情况有了清楚认识,标志着防护技术逐渐成熟。本研究在参考国内外有关文献的基础上,结合实际工程经验,总结了常用的生态防护形式及其使用条件,并对同类型的技术手段进行归类总结,形成了一套完整的生态防护技术体系。

2.1 人工植被护坡

人工植被护坡是通过人工在坡面播撒草籽、铺草皮或移栽灌木形式的一类护坡。人工植被护坡具有施工工艺简单、造价低廉和成坪时间短的特点。但人工植被易受雨水冲刷,植被成活率较低,易造成坡面侵蚀、水土流失等现象^[20]。近年来,人工植被护坡的发展体现在植被种类的优选上,其中,香根草因其固土力强、种植简易、管理方便、价格低廉的优势在工程备受关注^[21]。

2.2 外挂织物护坡

外挂织物护坡技术是将植物种子、肥料及土壤等混装于织物中,然后将其固定于边坡表面进行绿化的一种方法。根据所使用织物不同,具体分为:网袋工程护坡、三维植被网护坡、植被毯护坡等。

网袋工程中护坡常使用纤维网袋、金属网袋等袋状物。三维植被网是以热塑性树脂为原料,通过挤出、拉伸等工序制成的立体网状物^[22]。植被毯是以稻草、秸秆为原料,添加草种、保水剂、植草基质等材料形成的^[23]。外挂织物护坡技术具有植草均匀、防降雨冲刷、成坪速度快、绿色可降解和施工方便等优点^[24]。但其成本一般较高,且在极端气候条件下护坡效果将大打折扣。

根据不同织物的特点,一般认为网袋工程适用于土石边坡和岩质边坡;三维植被网护坡则广泛应用于公路、铁路和水利工程的边坡防护中;植被毯护坡技术适用于岩石边坡及陡坡。

2.3 喷射护坡

喷射护坡技术主要是将植物种子、保水剂、黏结剂、肥料及木纤维等搅拌均匀后,通过机械设备喷射到边坡表面达到护坡效果。根据其喷射混合料的配方不同,可将其分为液压喷播技术、客土喷播技术、厚层基材喷播技术、纤维结构团粒喷播技术及植被混凝土技术等^[25-26]。

液压喷播技术混合料主要成分为植物种子、植草基质与水,其混合料为悬浊液。客土喷播技术的混合料除这些成分外增加了土壤,且黏结剂质量分数

<5%、有机物质量分数<20%。厚层基材喷播技术所使用的混合料也含有土壤,其有机质质量分数>20%。纤维结构团粒喷播技术添加了团粒剂使喷播瞬间发生团粒反应,增强了黏附能力^[27]。植被混凝土技术添加水泥作为固化黏结剂。这些喷射护坡技术应当根据混合料的状态和具体的施工环境,选择不同类型的喷播机进行施工^[28]。

喷播技术的施工流程包括:①清理、平整坡面。清除坡面浮石等杂物,平整坡面,保证作业面凹凸度不超过 ± 15 cm。②铺设金属网。自上而下地铺设金属网或加强土工网,并使用土钉等将其固定于坡面上。其作用是固定喷射混合物,防止其在重力作用或雨水冲刷作用下流失。③拌和混合料。采用拌合机械将混合料拌合均匀,其间注意水分流失等情况。④喷射混合料。依据设计厚度在边坡表面喷射混合料,保证不平处及死角部分均达到厚度要求。⑤养护工作。根据当地的气候特点安排养护工作,以植物生长达到设计要求为止。

喷射护坡技术的优点主要为^[29]:①施工效率高。其施工过程只需要3~4名工人,且一台喷播机单日工作量可达7 000 m²,能够缩短工期、减少成本。②成坪速度快、草坪覆盖率高。由于混合物中含有适当比例的保水剂、肥料,草种和幼苗能够充分地吸收养分和水。因此,植物的萌芽及生长较为迅速。③草坪均匀度大。喷射技术使用搅拌机、喷播机等机械施工,混合物拌和均匀且喷射速度稳定,因此建植的植被均匀度大。④适用性广。喷射技术可根据气候、土壤特点选用适宜的植被类型,可调整肥料及保水剂等添加物含量,并选择适宜的施工方法,具有广泛的适用性。

喷射技术的缺陷和局限性为:①喷播技术的机械化程度较高,在零星的护坡工程中难以显示其优势。②喷播技术的施工过程较为繁琐,工作量大、成本高。通常情况下,液压喷播技术广泛应用于大面积的土质边坡。客土喷播技术适用于土壤成分较少、硬度较高的土质边坡或坡度较缓的岩质边坡。厚层基材喷播技术适用于岩质边坡^[30]。纤维结构团粒喷播技术及凝土技术适用于不同岩性及坡率的边坡^[31]。植被混凝土技术适用于不宜植物生长的各类边坡。

目前,针对喷射技术的研究主要集中于对混合

料的优化,在混合料中加入纳米材料、高吸水树脂或新型黏结剂、稳定剂等,使喷播过程中的黏剂效果、植被生长效果等更加显著^[32]。在未来的研究中,应基于喷播护坡的技术框架,针对不同边坡的强度、气候特点,设计并优化混合料的组成成分,达到更广泛的工程适用性及更显著的防护效果。

2.4 HYCEL-OH液植草护坡

OH液植草护坡技术是在新型化工产品HYCEL-OH液中加入水和草籽后喷洒于坡面的方法。其混合物能够在极短的时间内固化成弹性薄膜,达到防止岩石风化的目的。草种在3~6个月内发芽、生长,弹性固体薄膜逐渐分解,从而达到生态防护的目的^[33]。

该技术具有工艺简单、施工速度快等优点,无后期养护需求,且植被生长效果较好。但该技术需使用进口的化工产品HYCEL-OH液,导致工程造价较高。牛笑笛等^[34]研制出的新型固砂剂能防止砂质边坡风化,但其作用较为单一,需要和其他产品共同使用才能达到生态防护的效果。

2.5 生态砌块护坡

生态砌块护坡是指在边坡坡面放置生态砌块从而达到生态防护的方法。根据生态砌块的功能不同,可分为植生混凝土护坡和空心砌块护坡。

植生混凝土是一种特殊的混凝土。其骨架有一定的孔隙率,能够在孔隙中充填植物种子及生长基质,为植物的生长提供空间与养分^[35]。植生混凝土护坡技术不但可以起到护坡的作用,其多孔结构富集微生物,还可以净化水质、恢复生态系统等^[36],适用于风化破碎的岩石边坡。近年来诸多学者对植生混凝土护坡技术展开了研究,如:优化植生混凝土制备方法^[37]、增强降碱效果^[38]等。但植生混凝土护坡技术的施工过程较为复杂,且造价相对较高。部分学者使用矿渣、破碎岩土等废弃物作为混凝土骨料,在降低成本的同时,减少废弃物带来的环境污染。

空心砌块护坡技术是在坡面上铺设空心砌块,然后在砌块内铺土植草的方法^[39]。根据砌块的形状不同分为矩形砌块、蜂巢形砌块等。这种结构受力合理,能够起到固土、引流作用,有效地减少坡面冲刷^[40]。砌块可以在预制场制备,减少施工时间。此方法施工简易、美观大方,但工程造价较高,一般

多用于填方边坡的防护。

3 公路边坡生态防护评价

完成生态防护工程后,应当建立评价体系对其工程效果进行综合评价^[41]。诸多学者从护坡功能、生态功能、社会效应等方面构建评价体系,并采用不同的评价方法对其进行评价。公路边坡生态防护评价的步骤包括:

1) 构建评价体系。学者们以生态防护评价为目标,选择不同的功能、效益为因素,如结构功能、生态功能、社会效益等。一些学者也会在评价体系中考虑施工特性、工程影响等其他方面。然后,确定具体测量数据为指标,依据层次分析法构建综合评价体系。

2) 获取评价数据并进行处理。通过实地测量、观察打分等方法获得评价的基础数据,并利用模糊理论、灰色系统理论、集对分析等方法对数据进行处理。

3) 确定指标权重。通过两两比较对指标层相对重要性进行定量表示,计算出指标权重^[42]。

4) 计算总排序。利用指标权重对基础数据进行排序,并计算综合评价值。

在进行生态防护评价的过程中,评价体系的构建决定了评价的有效性及准确性。针对不同的功能,学者们选择了不同的指标进行评价。

结构功能用于评价生态防护的护坡效果,主要从生态防护工程对边坡稳定性影响的角度来考虑。常用的指标有:安全系数、渗透系数、孔隙比、抗冲刷能力、耐久性、实用性、土壤抗拉强度及抗剪强度等。但部分指标实用性不高,如:安全系数、抗冲刷能力等指标,其评价结果的判定较为困难。考虑到评价的便捷性,可以采用孔隙比、渗透系数、土壤抗拉强度及抗剪强度等指标,通过小型的土工试验得到定量结果。

生态功能从植被、群落角度对生态护坡工程在植被生态上的作用进行评价。从植被角度设置的指标有植物高度、密度、根系深度、绿色期、越冬率等。从群落角度设置的指标有植被盖度、生物多样性、群落配置及均匀度等。不同学者采用的指标差异性较大。对于边坡的生态评价,必须抓住主要问题,对边坡整体的生态情况作整体评价。评价指标

过于细致将加大评价工作的难度,且收益甚微。

社会功能从公众认可及经济效应对生态护坡工程的社会价值进行评价,其常用的评价指标有公众认可度、工程建设费用、后期维护费用及运营年限等。VON DER THANNEN等^[43]从能量消耗、碳足迹方面建立指标,考察生态防护的能量消耗,提出节能建议。这在全球重视碳排放的今天,具有前瞻性的启发意义。

生态防护评价尚未建立统一的指标体系,许多学者都选取不同的指标进行考察,使不同工程之间难以进行横向对比。GIUPPONI^[44]提出了生态成功指数(the index of ecological success, IES),评价生态护坡工程在边坡稳定方面的功能,以及对生态系统和景观的影响。该指数从意大利边坡生态防护工程中的应用情况看,其具有广泛的适用性及有效性^[45]。但该指数的生态指标非常多,且评价较为繁琐。因此,需精选必要的指标建立评价体系,从而对生态防护工程进行精确、简便、系统、全面的评价是当前亟须解决的问题。

数据在评价结果中的有效性由采用的分析处理方法决定。常见的数据分析方法有:①层次分析法。该法是一种将定性结果定量化的数据分析方法,构建了评价体系的基础^[46]。其目的是建立全面、合理的评价体系。②模糊理论。该理论是对数据进行模糊化处理的方法。其可以和神经网络相结合。在数据模糊化处理后,构造神经网络进行样本训练,运用训练好的模糊神经网络对数据进行分析处理。这种耦合评价方法具有良好的知识表达能力和强大的学习能力^[47]。但大量的模糊规则降低了模型的可解释性^[48],易造成误差,神经网络算法的收敛性也值得研究。③灰色系统理论。该理论是基于不明确的灰色关系,利用有限的信息去认识整体,适用于测量数据较少的项目^[49]。④未确知测度与集对分析耦合的评价模型。该模型是基于不确定分析方法和处理模糊信息的数学工具对生态护坡工程进行质量评价,其评价结果与灰色评价模型的一致^[50]。但此方法要求分析的数据较多,加大了数据获取的困难。在确定评价指标的前提下,结合分析方法的特点,选择适宜的评价方法,才能得到准确的评价结果。

目前,在生态防护工程中,对工程的全生命周期监测与评估不够重视,通常“重建不重养”。对边坡生态防护效果的评价工作,国内常由生态学、植

物学学者进行,表现了工程领域对边坡生态监测的忽视。国外学者不仅从生态群落角度对生态防护工程进行长期的跟踪与评价,而且还从能量消耗和碳足迹角度对工程展开研究。这对中国实现碳达峰、碳中和目标是具有参考意义的。

4 结论

生态防护技术在中国得到了高速发展,取得了诸多的成果。现今的高速公路边坡不只采用混凝土全坡面支护,而且是结合生态防护技术进行全面的立体支护。本研究通过分析已有的公路边坡生态防护理论、技术及评价方法的研究成果,提出相关的建议:

1) 生态防护理论研究的应用程度低。虽然目前对生态防护机理研究已经比较透彻,但是还没有提出适于工程稳定性分析的定量计算方法。这使得生态防护在稳定性中发挥的作用常被忽略,造成了一定的经济损失。随着边坡稳定性计算的精细化发展,在充分了解生态防护加固机理、设计计算方法的基础上,应将植被的加固作用适当考虑到边坡支护工程的设计范围。

2) 促进生态防护技术的发展与突破。现今生态防护技术虽得到广泛应用,大部分技术施工技术水平也得到大幅提高,但部分技术的发展缺乏创新,且少部分技术仍没有得到突破。因此,应研发适应不同地质、气候条件及当地物种的生态防护技术,并及时对知识产权进行保护。

3) 生态防护评价系统适用性不明确,评价指标不统一。不同的评价体系使得评价的侧重点有所不同,不利于不同支护技术之间的对比。不同的评价方法将直接导致评价结果出现差异。未来应在养护与监测的基础上,形成统一的评价指标,结合地理信息系统、遥感等技术获得监测数据,利用图像处理、大数据、云平台等手段进行图像及数据的处理,并及时发布,从而得到实时、准确的生态防护评价结论。

参考文献(References):

- [1] 赵冰琴,夏振尧,许文年,等.工程扰动区边坡生态修复技术研究综述[J].水利水电技术,2017,48(2):130-137.
ZHAO Bingqin, XIA Zhenyao, XU Wennian, et al.

- Review on research of slope eco-restoration technique for engineering disturbed area [J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2017, 48(2):130-137.
- [2] 邓友生, 梅靖宇, 王欢, 等. 铁路边坡生态防护应用研究[J]. *建筑技术*, 2017, 48(9):996-998.
DENG Yousheng, MEI Jingyu, WANG Huan, et al. Study on application of ecological protection for railway side slope [J]. *Architecture Technology*, 2017, 48(9): 996-998.
- [3] ŚWITALA B M, WU W. Numerical modelling of rainfall-induced instability of vegetated slopes [J]. *Géotechnique*, 2018, 68(6): 481-491.
- [4] 陈洁, 雷学文, 黄泽彬, 等. 生态边坡稳定机制研究综述[J]. *安徽农业大学学报*, 2019, 46(2): 282-288.
CHEN Jie, LEI Xuewen, HUANG Zebin, et al. Review on the mechanism of ecological slope stability [J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 2019, 46(2): 282-288.
- [5] 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. Atmospheric-vegetation-soil interaction: theory and mechanism [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39(1): 1-47.
- [6] 刘小燕. 根系土的工程性状研究及其在生态边坡稳定分析中的应用[D]. 赣州: 江西理工大学, 2014.
LIU Xiaoyan. Study on engineering properties of root soil and its application in stability analysis of ecological slope [D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology, 2014.
- [7] 蒋德松, 蒋冲, 赵明华. 城市岩质边坡生态防护机理及试验[J]. *中南大学学报(自然科学版)*, 2008, 39(5): 1087-1093.
JIANG Desong, JIANG Chong, ZHAO Minghua. Bio-engineering protection mechanism of city rock slope and its laboratory test [J]. *Journal of Central South University (Science and Technology)*, 2008, 39(5): 1087-1093.
- [8] WALDRON L J. The shear resistance of root-permeated homogeneous and stratified soil [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1977, 41(5): 843-849.
- [9] Gray D H, Al-Refeai T. Behavior of fabric-versus fiber-reinforced sand [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1986, 112(8):181-187.
- [10] 王桂尧, 胡圣辉, 张永杰, 等. 小乔木根系根土间作用力的室外拉拔试验研究[J]. *水文地质工程地质*, 2017, 44(6):64-69.
WANG Guiyao, HU Shenghui, ZHANG Yongjie, et al. An outdoor drawing test study of the root soil interaction force for a small tree root system [J]. *Hydrogeology and Engineering Geology*, 2017, 44(6):64-69.
- [11] 张云伟, 刘跃明, 周跃. 云南松侧根摩擦型根土粘合键的破坏机制及模型[J]. *山地学报*, 2002, 20(5): 628-631.
ZHANG Yunwei, LIU Yueming, ZHOU Yue. Failure mechanism and model of friction-type root-soil bond of *Pinus yunnanensis* lateral root [J]. *Mountain Research*, 2002, 20(5): 628-631.
- [12] 周云艳. 植物根系固土机理与护坡技术研究[D]. 武汉: 中国地质大学, 2010. ZHOU Yunyan. Study on soil consolidation mechanism of plant roots and slope protection technology [D]. Wuhan: China University of Geosciences, 2010.
- [13] 陈飞, 钟连祥, 郭顺, 等. 生态防护技术对稀土矿山边坡的固坡效果[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(3): 132-136, 143.
CHEN Fei, ZHONG Lianxiang, GUO Shun, et al. Effects of ecological protection technology on slope reinforcement of rare earth mine [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(3): 132-136, 143.
- [14] 胡华, 吴轩, 张越. 基于降雨滑坡模拟试验的花岗岩残积土边坡破坏模式分析[J]. *厦门大学学报(自然科学版)*, 2021, 60(6): 1098-1102.
HU Hua, WU Xuan, ZHANG Yue. Failure mode analysis of granite residual soil slope based on rainfall landslide simulation test [J]. *Journal of Xiamen University (Natural Science)*, 2021, 60(6): 1098-1102.
- [15] HUANG G, ZHENG M X, PENG J. Effect of vegetation roots on the threshold of slope instability induced by rainfall and runoff [J]. *Geofluids*, 2021, 2021: 1-19.
- [16] FREDLUND D G, MORGENSTERN N R, WIDGER R A. The shear strength of unsaturated soils [J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 1978, 15(3): 313-321.
- [17] 胡万良, 谭学仁, 丁国权, 等. 辽东山区水源林改造后的生态与经济效益分析[J]. *东北林业大学学报*, 2012, 40(2):50-53, 92.
HU Wanliang, TAN Xueren, DING Guoquan, et al. Ecological and economic benefits of water conservation forests in eastern mountainous region of Liaoning Province after different types of aiteration [J]. *Journal of Northeast Forestry University*, 2012, 40(2):50-53, 92.
- [18] 杨亚川, 莫永京, 王芝芳, 等. 土壤-草本植被根系复合体抗水蚀强度与抗剪强度的试验研究[J]. *中国农业大学学报*, 1996, 1(2): 31-38.

- YANG Yachuan, MO Yongjing, WANG Zhifang, et al. Experimental study on anti-water erosion and shear strength of soil-root composite [J]. Journal of China Agricultural University, 1996, 1(2): 31-38.
- [19] 苑亚茹, 韩晓增, 李禄军, 等. 低分子量根系分泌物对土壤微生物活性及团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2011, 25(6): 96-99.
- YUAN Yaru, HAN Xiaozeng, LI Lujun, et al. Effects of soluble root exudates on microbial activity and aggregate stability of black soils [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2011, 25(6): 96-99.
- [20] 李青芳, 何宜典. 公路边坡防护与生态恢复[J]. 水土保持研究, 2006, 13(6): 273-275.
- LI Qingfang, HE Yidian. Highway slope protection and the restoration of ecology[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2006, 13(6): 273-275.
- [21] 陶坚, 王桂尧, 常婧美, 等. 香根草根系对膨胀土渗透性影响试验研究[J]. 交通科学与工程, 2020, 36(4): 10-16.
- TAO Jian, WANG Guiyao, CHANG Jingmei, et al. Experimental study on the effect of vetiver root system on the permeability of expansive soil [J]. Journal of Transport Science and Engineering, 2020, 36(4): 10-16.
- [22] 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(S2): 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(S2): 91-95.
- [23] 赵廷华, 牛首业, 郭红超, 等. 新型生态植被毯边坡防护技术水土保持效应研究[J]. 人民长江, 2017, 48(13): 20-22.
- ZHAO Tinghua, NIU Shouye, GUO Hongchao, et al. Study on effect of new ecological vegetation blanket in soil and water conservation of slope[J]. Yangtze River, 2017, 48(13): 20-22.
- [24] 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.
- [25] 阳个, 张黎明, 骆俊晖, 等. 生态护坡技术在巴平高速公路的应用研究[J]. 公路, 2021, 66(6): 100-103.
- YANG Gexiao, ZHANG Liming, LUO Junhui, et al. Study on application of ecological slope protection technology in baping expressway [J]. Highway, 2021, 66(6): 100-103.
- [26] 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.
- SHEN Jian, ZHOU Mingtao, TIAN Dezhi, et al. Analysis on greening technology of slope protection by shotcreting and planting in China [J]. Yangtze River, 2020, 51(3): 61-64, 80.
- [27] 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.
- [28] 赵平. 喷播技术设备的类型与性能比较[J]. 公路, 2005, 50(1): 200-206.
- ZHAO Ping. Comparison of types and performance of spray seeding technology and equipment [J]. Highway, 2005, 50(1): 200-206.
- [29] 刘海朋. 客土喷播绿化技术及其在边坡生态修复与防护中的应用[J]. 江西建材, 2021(1): 118-120.
- LIU Haipeng. Spray seeding greening technology of soil and its application in slope ecological restoration and protection [J]. Jiangxi Building Materials, 2021 (1): 118-120.
- [30] 叶建军, 王波, 李虎, 等. 湿式喷射法生态护坡技术在曼大公路取土场的应用[J]. 西北林学院学报, 2019, 34(6): 259-263, 272.
- YE Jianjun, WANG Bo, LI Hu, et al. Application of wet spraying technology of ecological slope protection in the borrow pit slope in mandela-datong highway[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2019, 34(6): 259-263, 272.
- [31] 吕宋, 魏少伟, 姚建平, 等. 不同坡率下纤维结构团粒喷播技术的适用性研究与应用[J]. 铁道建筑, 2021, 61(2): 79-82, 94.
- LYU Song, WEI Shaowei, YAO Jianping, et al. Applicability research of spray seeding technology of fiber structure with pellet under different slope gradients and its application [J]. Railway Engineering, 2021, 61(2): 79-82, 94.
- [32] 师海然. 喷播绿化木纤维基质材料配方的开发研究

- [D]. 北京: 北京林业大学, 2019.
- SHI Hairan. Development and research on the formula of spray seeding green wood fiber matrix material [D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2019.
- [33] 叶珺琳. 公路生态边坡防护技术研究[J]. 绿色科技, 2020(15): 68-69.
- YE Junlin. Research on protection technologies of highway ecological slope [J]. Journal of Green Science and Technology, 2020(15): 68-69.
- [34] 牛笑笛, 杨广庆, 蒲昌瑜, 等. 新型固砂剂试验效果分析及边坡防护施工工艺研究[J]. 铁道建筑, 2017(2): 86-90.
- NIU Xiaodi, YANG Guangqing, PU Changyu, et al. Experimental effect analysis of new sand-fixing agent and study on slope protection construction technology [J]. Railway Engineering, 2017(2): 86-90.
- [35] 钱波, 蔡光泽, 陈开陆. 植生混凝土护坡技术研究现状及趋势[J]. 西昌学院学报(自然科学版), 2020, 34(2): 38-41.
- QIAN Bo, CAI Guangze, CHEN Kailu. Current situation and trends of research on slope protection technology of vegetation-growing concrete [J]. Journal of Xichang College (Natural Science Edition), 2020, 34(2): 38-41.
- [36] 佟洁. 植生型生态混凝土材料制备及其净水性能研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2014.
- TONG Jie. Study on preparation and water purification performance of plant-growing ecological concrete materials [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2014.
- [37] 颜小波. 多孔生态混凝土的制备与性能研究[D]. 济南: 济南大学, 2013.
- YAN Xiaobo. Study on preparation and properties of porous ecological concrete [D]. Jinan: University of Jinan, 2013.
- [38] 廖文字, 石宪, 黄泽峰, 等. 植生混凝土的降碱技术及种植效果研究[J]. 混凝土, 2013(7): 155-158.
- LIAO Wenyu, SHI Xian, HUANG Zefeng, et al. Study on decreasing alkalinity of planting concrete and the resulting planting effect [J]. Concrete, 2013(7): 155-158.
- [39] 刘芳, 李金堂. 生态型柔性边坡护坡各类工程技术特点与前景展望[J]. 城市道桥与防洪, 2010(5): 31-35, 206.
- LIU Fang, LI Jintang. Various engineering technical characteristics of ecological flexible side slope protection and foreground expectation [J]. Urban Roads Bridges & Flood Control, 2010(5): 31-35, 206.
- [40] 郭晓军. 基于生态保护的公路边坡设计[J]. 交通世界, 2019(11): 36-37.
- GUO Xiaojun. Highway slope design based on ecological protection [J]. TranspoWorld, 2019(11): 36-37.
- [41] 张宇航. 生态护坡系统结构形式的综合评价研究[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2017.
- ZHANG Yuhang. Study on comprehensive evaluation of structural forms of ecological slope protection system [D]. Zhengzhou: North China University of Water Resources and Electric Power, 2017.
- [42] 郭佳惠, 教忠意, 何旭东, 等. 基于层次分析法对柳树观赏性及适应性的综合评价[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2021, 45(6): 169-176.
- GUO Jiahui, JIAO Zhongyi, HE Xudong, et al. A comprehensive evaluation of ornamental characteristics and adaptability of willows based on analytic hierarchy processes [J]. Journal of Nanjing Forestry University (Natural Sciences Edition), 2021, 45(6): 169-176.
- [43] VON DER THANNEN M, HOERBINGER S, PARATSCHA R, et al. Development of an environmental life cycle assessment model for soil bioengineering constructions [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2020, 24(2): 141-155.
- [44] GIUPPONI L, BISCHETTI G B, GIORGI A. A proposal for assessing the success of soil bioengineering work by analysing vegetation: Results of two case studies in the Italian Alps [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2017, 13(S1): 305-318.
- [45] GIUPPONI L, BORGONOVO G, GIORGI A, et al. How to renew soil bioengineering for slope stabilization: Some proposals [J]. Landscape and Ecological Engineering, 2019, 15(1): 37-50.
- [46] 柳超, 贺琳, 杨大鹏, 等. 不同类型生态护坡的综合评价: 以青岛市大沽河为例[J]. 水资源保护, 2017, 33(1): 90-94.
- LIU Chao, HE Lin, YANG Dapeng, et al. Comprehensive evaluation of different types of ecological revetments: a case study of Dagou River in Qingdao City [J]. Water Resources Protection, 2017, 33(1): 90-94.
- [47] 张大勇, 王冬, 王建军. 基于模糊神经网络的护坡植被优选[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(7): 116-119.
- ZHANG Dayong, WANG Dong, WANG Jianjun. Selection of optimal slope protection plants based on fuzzy neural network [J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(7): 116-119.

(下转第48页)

- 的非极限主动土压力解[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(2): 362-371.
- XU Riqing, XU Yebin, CHENG Kang, et al. Method to calculate active earth pressure considering soil arching effect under nonlimit state of clay[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2020, 42(2): 362-371.
- [5] 杨明辉, 吴志勇, 赵明华. 挡墙后有限宽度土体土拱效应分析及土压力计算方法[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2020, 47(3): 19-27.
- YANG Minghui, WU Zhiyong, ZHAO Minghua. Soil arch effect analysis and earth pressure calculating method for finite width soil behind retaining wall[J]. Journal of Hunan University (Natural Sciences), 2020, 47(3): 19-27.
- [6] 蒋波, 应宏伟, 谢康和. 挡土墙后土体拱效应分析[J]. 浙江大学学报(工学版), 2005, 39(1): 131-136.
- JIANG Bo, YING Hongwei, XIE Kanghe. Analysis on soil arching behind retaining wall[J]. Journal of Zhejiang University (Engineering Science), 2005, 39(1): 131-136.
- [7] 赵琦, 朱建明. 临近地下室外墙影响下的考虑土拱效应的挡土墙主动土压力研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(3): 723-728.
- ZHAO Qi, ZHU Jianming. Research on active earth pressure behind retaining wall adjacent to existing basements exterior wall considering soil arching effects[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(3): 723-728.
- [8] 马平, 秦四清, 钱海涛. 有限土体主动土压力计算[J]. 岩石力学与工程学报, 2008(S1): 3070-3074.
- MA Ping, QIN Siqing, QIAN Haitao. Calculation of active earth pressure for limited soils[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2008(S1): 3070-3074.
- [9] 刘忠玉. 有限无黏性填土刚性挡土墙主动土压力计算[J]. 中国公路学报, 2018, 31(2): 154-164.
- LIU Zhongyu. Active earth pressure calculation of rigid retaining walls with limited granular backfill space[J]. China Journal of Highway and Transport, 2018, 31(2): 154-164.
- [10] CAO W G, LIU T, XU Z. Estimation of active earth pressure on inclined retaining wall based on simplified principal stress trajectory method [J]. International Journal of Geomechanics, 2019, 19(7): 6019011.
- [11] 王梅, 李镜培. 考虑土拱效应的刚性挡墙主动土压力计算方法[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(5): 865-870.
- WANG Mei, LI Jingpei. New method for active earth pressure of rigid retaining walls considering arching effect [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(5): 865-870.
- [12] TAKE W A, VALSANGKAR A J. Earth pressures on unyielding retaining walls of narrow backfill width[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2001, 38(6): 1220-1230.
- (责任编辑:赵冰;校对:李脉;英文编辑:李岳林)

(上接第40页)

- [48] 李浩楠, 刘勇. 模糊神经网络的优化及其应用[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2020, 25(6):142-149.
- LI Haonan, LIU Yong. Optimization and application of fuzzy neural network[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2020, 25(6):142-149.
- [49] 刘远成. 基于灰色综合评价法的水利工程外观质量评价[D]. 大连: 大连理工大学, 2019.
- LIU Yuancheng. Appearance quality evaluation of water conservancy projects based on grey comprehensive evaluation method [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2019.
- [50] 万炳彤, 鲍学英, 李爱春. 基于未确知一集对耦合的生态护坡工程质量评价体系及应用[J]. 水土保持通报, 2019, 39(2):108-114.
- WAN Bingtong, BAO Xueying, LI Aichun. Quality evaluation system and application of ecological slope protection project based on unascertained-set pair coupling [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(2):108-114.
- (责任编辑:欧兆虎;校对:刘国奇;英文编辑:陈璐)