

文章编号:1671-8879(2016)04-0026-07

陕北黄土地区护坡植物适应性研究

许 锐¹, 李寻昌¹, 吴瑞芳¹, 董 琪²

(1. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054; 2. 信息产业部电子
综合勘察研究院, 陕西 西安 710054)

摘 要:针对黄土高原生态环境脆弱,且随着人类工程活动日益频繁,黄土滑坡等地质灾害日益严重的问题,以植物护坡是恢复黄土边坡生态和防治黄土地质灾害的有效手段为依据,基于陕北地区黄土边坡植物调查,统计分析延安地区黄土边坡植物科属分布及密度,提出了植被群落的结构特点。通过多样性指数分析研究了黄土边坡植物物种多样性特点,并提出了蒿属植物的相对优势度。研究表明:陕北地区植物物种多样性处于中等偏下水平,基本符合陕北黄土高原半干旱地区的边坡植被组成特征;延安地区黄土边坡植物主要以耐寒旱及耐贫瘠的品种为主;随着坡度增大和土壤湿度降低,植物数量相应线性减少,但蒿属植物相对优势度相应增大,并提出了坡度与植物数量及坡度与蒿属植物比重间关系的经验公式;蒿属植物是该地区植物护坡和生态重建的潜在优良树种,对黄土边坡稳定性及生态恢复有重要研究价值;最后基于各种影响因素与相对优势度的规律分析,提出了各坡度下适宜的植物种群及相应的附着结构措施,为陕北地区黄土边坡植物防护设计提供了可靠依据。

关键词:道路工程;适应性;黄土边坡;植被群落结构;多样性指数

中图分类号:U419.4;U417.2 **文献标志码:**A

Research on adaptability of slope-protecting plants in north of Shaanxi loess area

XU Rui¹, LI Xun-chang¹, WU Rui-fang¹, DONG Qi²

(1. School of Geology Engineering and Geomatics, Chang'an University, Xi'an 710054, Shaanxi, China;

2. Electronic Comprehensive Surveying Institute, Ministry of Information Industry, Xi'an 710054, Shaanxi, China)

Abstract: Due to the fragile ecological environment and the influence of human engineering activities, the loess slope geological disasters such as landslides have been increasing in Loess Plateau. The loess slope protection by vegetation is the effective means for restoration ecology and geological disaster prevention. Based on the investigation of local natural growth plants on loess slope in north Shaanxi, the statistics of dominant families and genera as well as vegetation density were analyzed, and the vegetation community structure of loess slope was presented. The community species diversity characteristics were studied based on diversity index analysis, and the relative dominance of artemisia species on loess slope was presented. The results show that

收稿日期:2016-02-17

基金项目:国家自然科学基金项目(41572261);陕西省科学技术研究发展计划项目(2014K13-02);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2013G1261062,310826161018)

作者简介:许 锐(1981-),男,四川自贡人,讲师,工学博士,博士后,E-mail:firewoodxu@126.com。

the vegetation species diversity is below the medium level in north Shaanxi, which accords with the slope vegetation composition characteristics of Loess Plateau semiarid areas; the drought and freezing tolerant plant types are the main varieties of loess slope vegetation; the plant quantity decreases with the increase of gradient or the decrease of soil moisture, but the relative dominance of artemisia species on loess slope increases; the empirical formulas of the relation between plant quantity and slope height and between slope height and proportion of artemisia species was proposed. Artemisia is the main varieties of loess slope naturally growing vegetation in north Shaanxi area, which is the suitable species for ecological restoration and slope protection. The research on its slope protection effect as well as growth characteristics plays an important role in loess slope stability and ecological restoration. Finally, based on the relative dominance under the influence of complex factors, the selection of vegetation type and structural design of eco-engineering for loess slope protection under different slope gradients are suggested, which provides a reliable basis for the design of plant protection to loess slope. 2 tabs, 7 figs, 23 refs.

Key words: road engineering; adaptability; loess slope; vegetation community structure; diversity index

0 引言

黄土高原地质环境脆弱,湿陷性黄土广泛分布,土质疏松且裂隙发育,透水性极强,在降雨等风化作用下,为滑坡等地质灾害创造了条件。日趋频繁的人类工程活动,进一步加剧了地质灾害的发育^[1-3]。以抗滑桩、挡土墙等为代表的刚性防护技术,在边坡治理上效果显著,但造价高且无法有效恢复自然环境。植被护坡作为一种生态防护技术,综合了生物和工程措施各自的优点,具有明显的经济性、技术性 & 生态性的优点^[4-7]。

植物护坡是以植物或植物与工程措施相结合的形式来提高坡体的稳定性和抗侵蚀能力。近年来植物护坡机理的研究较多,主要有边坡破坏机理、植物护坡力学效应及植物护坡水文效应等研究方向^[8-18]。在植物护坡的研究手段上,应用土工试验、原位试验和模型试验研究根系的土体参数提高效应是目前研究的重点方向^[19-20];另一方面,植物护坡抗冲刷试验研究也是热点研究方向^[18]。相较于试验研究,中国的调查研究多集中在东部湿润地区,黄土地区特殊地域环境的植被调查相对较少,且多数缺乏大样本的支撑,研究停留在“观察”阶段,难以达到“调查”研究的目的,导致很难筛选出真正适应当地自然环境的护坡树种^[21-23]。

延安地区生态环境极不利于护坡植物的生长,而且西北黄土地区植物护坡的研究和应用还主要局限于常见护坡树种,并不一定适应西北黄土地区特殊的自然条件,护坡植物的选择不仅要考虑其环境

适应性和护坡效应,还必须警惕物种入侵等潜在生态风险,因此有必要针对延安黄土干旱地区的特点,提出适应该地区地质、气候和地形特点的护坡植物类型及分布规律。本文重点在于调查适宜于延安地区的植物种类,进行筛选,提出该地区与植物护坡设计和实践有关的工程建议,推动植物护坡在黄土边坡治理工程中的应用。

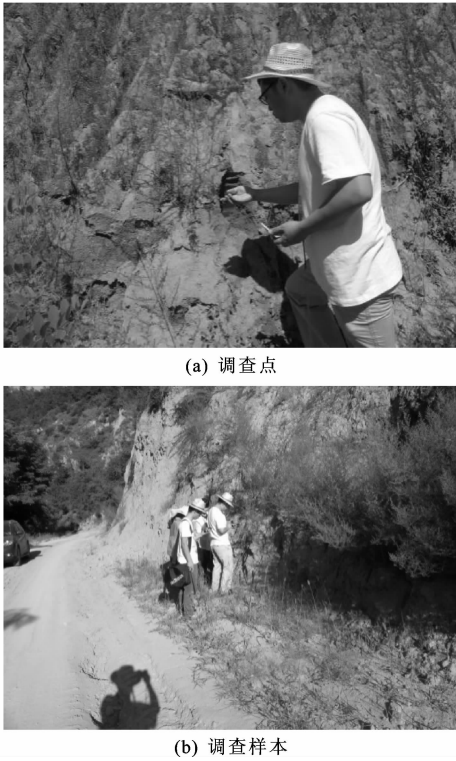
1 调查概况及研究方法

1.1 调查概况

延安地区自然环境与地质环境较为脆弱,季节温差较大,有记载以来的极端气温为 $-25.4\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 39.7\text{ }^{\circ}\text{C}$,降水量年内分配极不均匀,全年降水量 $60\%\sim 80\%$ 集中在夏季,年际降水量差别较大($330.0\sim 871.2\text{ mm}$)。采用实地调查的方法,对延安地区自然生长的植物种类及其群落搭配进行详细的统计分析,是最具有针对性的研究方法。项目组于2014年7月对延安地区自然黄土边坡的植被类型、生长状况及群落结构进行了野外实地调查。根据延安地区的地貌和气候等自然条件特点,调查范围以延安市为中心,向周边县乡扩展。共调查自然边坡323个,调查工作如下页图1所示。

1.2 研究方法

调查考虑地形地貌特点,选择典型黄土沟壑进行。对于每1个调查点,选择植物生长均匀且具有代表性的坡面,在距离坡脚 1.5 m 以上,距离坡顶 1.5 m 以下部分设定 $1\times 1\text{ m}^2$ 范围的样方作为调查样本,进行详细调查,拍照并记录位置、边坡产状、地



(a) 调查点

(b) 调查样本

图 1 调查工作

Fig.1 Research work

层地质条件、土体物理参数等环境特征,以及植物及其结构群落等数据,具体调查记录如下。地点:清凉山杨家岭隧道上方区党校山左侧窑洞旁;位置:东经 109°27′49.8″,北纬 36°36′52.9″,海拔 1 068 m;土壤类型:表层坡积土且多孔隙疏松,黄褐色,雨水侵蚀,稍湿;边坡特征:坡度 36°,坡向 232°,具体植物覆盖率 85%,优势种为黑沙蒿,植被信息见表 1。

表 1 调查区域植被种类及特征

Tab.1 Plant types and features of research area

序号	植被名称	数量	平均高度/cm
1	黑沙蒿	15	55
2	臭蒿	10	50
3	臭草	10	20
4	槐树	2	100
5	枣树	4	120
6	榆树	3	100

2 调查分析

2.1 植被群落结构分析

2.1.1 科属统计

植被群落结构是反映植物种类组成及其与环境之间彼此影响、相互作用的最基本指标。植被能够减小雨雪的下落速度,降低地表雨水流量,减少表层土壤及营养物质的流失,一方面保持了坡面生态系

统和土壤营养元素的可持续性;另一方面保证了边坡生态系统生产力的长期性。物种丰富度的增加,能有效地提高边坡的水土保持能力,因此,对边坡坡面植被组成进行调查具有重要意义。本次调查共辨认出 33 种最主要植被(下页表 2)。

由表 2 可知,由于陕北黄土高原特殊的环境条件,延安地区边坡植物物种数量相对较少,主要以适生性强的品种为主。其中,以黑沙蒿、臭蒿和白莲蒿等为代表的蒿属植物在调查中出现次数最多,表现出相对较好的生长状态,具有较高的护坡应用潜力。故在调查统计表中将草本类植物分为蒿属植物和非蒿属草本植物进行分类统计。

2.1.2 植被数量与物种数量统计

植物生长状态受各种环境因素的影响,如边坡产状、地层地质条件、土体物理参数等,需要通过数据分析以得到最主要的控制因素。下页图 2 和图 3 分别为边坡高度与植被数量及物种数量关系的统计图,其线性拟合函数分别为 $y_1 = 1.594x + 30.6$, $y_2 = 0.126x + 5.636$,可见植被数量与物种数量随边坡高度增大而增加,这可能是由于边坡高度与其储水能力有相应的关系。但是图 2 和图 3 中其数据相关系数仅为 0.324 和 0.170,分布较离散,说明 323 个边坡所体现的整体规律并不明显。坡高仅仅是影响坡体土壤水分和养料条件的因素之一,边坡产状、地形地貌、水文地质条件、工程活动等因素均会对植物生长环境造成影响。所以在此次调查中,每个坡面开挖 40 cm 以上,除了统计根系特征的目的之外,还能记录坡体内部的“土壤湿度”,并以其综合反映边坡特征和地质条件等因素对边坡深层土壤储水储养能力的影响。

除坡体深层土壤湿度外,坡度直接影响着浅表层土壤储水与植被附着能力。下页图 4 为坡度、土壤湿度与植物数量统计图,对 3 种土壤湿度下坡度与植物数量关系进行线性拟合,得到土壤湿度分别处于干、稍湿、湿状态的拟合函数为 $y_3 = -0.5477x + 48.2462$, $y_4 = -1.0406x + 97.0236$, $y_5 = -1.5119x + 143.8734$,可见植被数量随着坡度增大和土壤湿度降低呈明显线性减少趋势。首先,土壤水分作为植物生长发育的必备物质,对于植被生长有着不可替代的作用。延安地区黄土孔隙大,具有高渗透性、易崩解性和湿陷性,其独特的构成,造成了土壤含水量普遍较低;其次,坡度增大会显著降低表层土壤保水能力及植物附着能力,因此延安地区黄土边坡上,对西北寒旱环境有较强适应性的植物优势度会相对较

表 2 植被统计
Tab.2 Vegetation statistic

类	科属	名称	出现次数	生长习性
草本	蒿属	黑沙蒿	296	耐沙压埋,为良好的固沙植物之一
		臭蒿	145	生于湖边草地、河滩、砾质坡地、田边、路旁、林缘等
		白莲蒿	83	生于中、低海拔地区的山坡、路旁、灌丛地及森林草原地区
	非蒿属草本类	黑麦草	79	耐湿,但在排水不良或地下水位过高时不利于黑麦草生长
		紫花苜蓿	121	生于田边、路旁、旷野、草原、河岸及沟谷等地
		结缕草	117	喜光,有一定耐阴性,抗旱、抗盐碱、抗病虫害,耐瘠薄、耐践踏、耐水湿
		无芒雀麦	60	可防沙固土,特别适于寒冷干燥地区,较耐盐碱
		臭草	161	生于地下水位较高的沙地上、山野或荒芜田野
		狗尾草	172	适生性强,耐旱耐贫瘠,酸性或碱性土壤均可生长
		野菊花	46	喜凉爽湿润气候,耐寒
		蒲公英	111	生于中、低海拔地区的山坡草地、路边、田野、河滩
		灰灰菜	117	生于路旁、荒地及田间,为很难除掉的杂草
		芦苇	60	多生于低湿地或浅水中
		牛荆草	39	耐沙埋、抗风蚀,具有良好的沙生特点
		草木犀	46	耐碱性土壤,为常见的牧草
	藓	苔藓	9	喜欢潮湿环境,特别不耐干旱及干燥
木本	灌木类	迎春	46	喜光,稍耐阴,略耐寒,怕涝
		紫穗槐	7	各种土质的瘠薄山坡上均能生长,耐干旱能力强、耐寒性强
		柠条	7	耐旱、耐寒、耐高温,是干旱草原、荒漠草原地带的旱生灌丛
		胡枝子	4	耐阴、耐寒、耐干旱、耐瘠薄
		荆条	16	常生于山地阳坡上,形成灌丛
		杞柳	32	喜光照、喜肥水,抗雨涝,多生于肥沃沙壤土、河滩地以及近水沟渠边坡
		沙地柏	4	适应性强,护坡固沙,岸边防护,城区净化空气等用途
		松树	2	耐贫瘠土壤、抗寒性、耐阴性
		狼牙刺	5	中度盐碱地区或路段有前途的落叶灌木树种
	乔木类	火炬树	9	喜光,耐寒,适应性强,耐干旱瘠薄,耐水湿,耐盐碱
		泡桐	31	适宜生长于排水良好、土层深厚、通气性好的沙壤土或砂砾土
		野核桃树	13	喜温树种,但耐寒性强,不耐湿热
		槐树	11	喜光而稍耐阴
		榆树	133	阳性树,生长快,根系发达,适应性强
		枣树	109	喜光,适应性强,喜干冷气候,耐湿热,耐干旱瘠薄,耐低湿
		椿树	77	喜光,不耐阴,耐寒,耐旱,不耐水湿
		苹果树	66	适于山坡梯田、平原旷野以及黄土丘陵

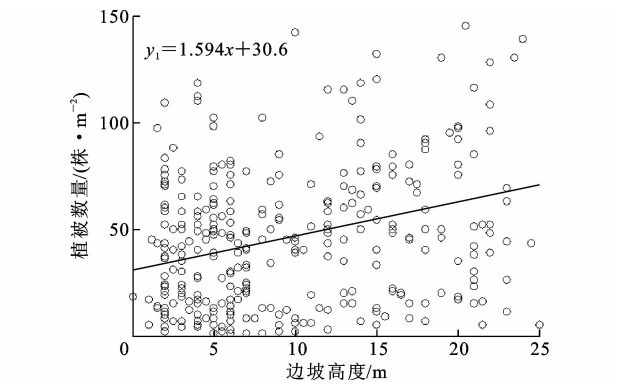


图 2 植被数量与边坡高度的关系

Fig. 2 Relationship between plant quantity and slope height

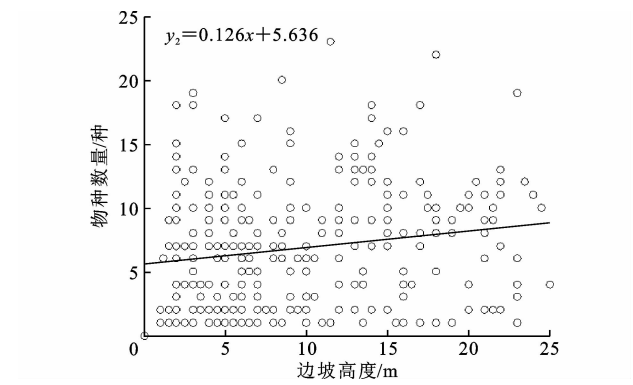


图 3 物种数量与边坡高度的关系

Fig. 3 Relationship between species quantity and slope height

高,这也是护坡树种筛选的考虑因素之一。图 5 所示边坡坡度、土壤湿度与物种数量统计关系,3 种土壤湿度(干、稍湿、湿)下的拟合函数分别为 y_6 、 y_7 、 y_8 ,表现出相同规律,印证了上述土壤湿度和坡度对边坡植物生长影响的分析。

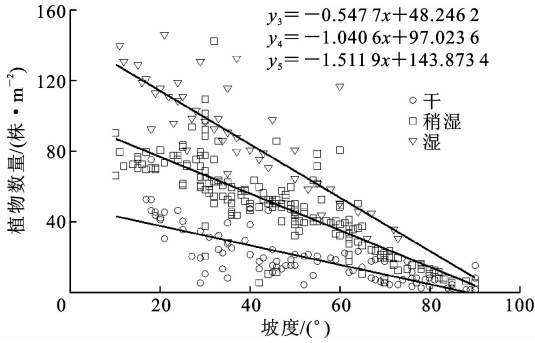


图 4 植物数量与坡度关系

Fig. 4 Relationship between plant quantity and slope

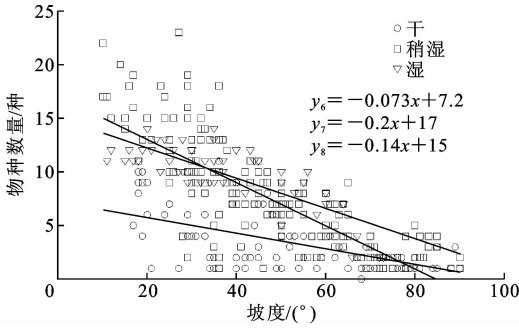


图 5 物种数量与坡度关系

Fig. 5 Relationship between species quantity and slope

2.2 物种多样性分析

物种多样性是一定区域内物种及其生态系统复杂性的总称。本文对调查的 323 个边坡上各种植物进行统计,计算各边坡物种 Shannon-Wiener 指数,以定量分析黄土边坡植物多样性。

在群落多样性的测度上,Shannon-Wiener 指数借用信息论中不定性测量方法,即预测下一个采集的个体属于什么种,如果群落的多样性程度越高,其不定性也就越大。Shannon-Wiener 指数的计算公式为

$$H' = - \sum P_i \ln(P_i) \quad i = 1, 2, 3, \dots, S \quad (1)$$

式中: S 为物种数; P_i 为一个个体属于第 i 种的概率,以其个体占总个体的比例表示。

式(1)表明,群落中生物种类增多代表了群落的复杂程度增高,即 H' 值愈大,群落所含的信息量愈大,各种个体分配越均匀,群落多样性越好。一般群落的生物多样性指数在 1.5~3.5 之间。图 6 所示为物种 Shannon-Wiener 指数统计图,由图 6 可以看

到,所调查的 323 个边坡的 Shannon-Wiener 指数分布在 0~2.368 1 之间,均值为 0.930 7,说明延安地区植物多样性略低于正常水平,植被群落结构较简单。且随着黄土边坡坡度增大及土壤湿度降低,植物物种数量相应减少,适应性物种的优势度反而更加凸显,所以 Shannon-Wiener 指数随着调查边坡坡度增大而相应减小。

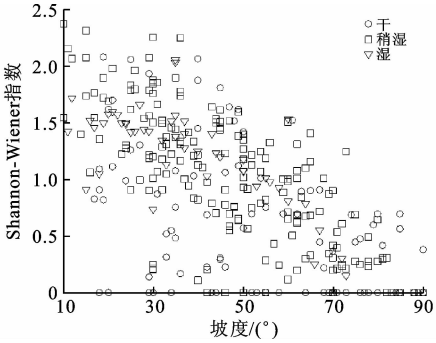


图 6 种群 Shannon-Wiener 指数统计

Fig. 6 Statistics of Shannon-Wiener index

2.3 蒿属植物优势性分析

在延安地区调查发现,蒿类主要有 3 种,分别是黑沙蒿、臭蒿和白莲蒿。在调查中蒿属植物表现出极强的适应性,故可作为本地区潜在的护坡树种加以进一步研究。图 7 为各坡度下蒿属植物数量占有植物总数的百分比统计图。由图 7 可知,坡度与蒿属植物比重呈近似线形关系: $y_9 = 0.4x + 60$,即随着土壤湿度减小及坡度增大,蒿属植物数量比重随之增大。由经验公式可知,当坡度大于 50°后,蒿属植物比重基本超过 80%,说明蒿属植物适应性相对较强,当环境条件降低时其优势度更加明显。

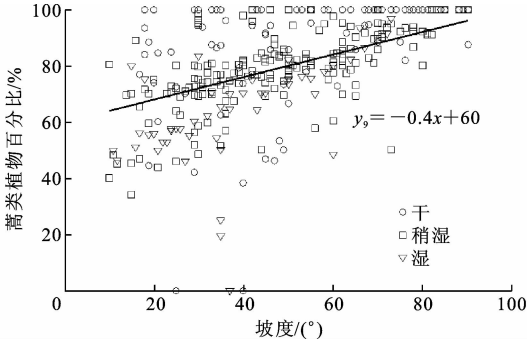


图 7 蒿属植物比重统计

Fig. 7 Proportion of artemisia species

边坡生境是植物生长的必要条件。首先,土壤水分和养料是制约延安地区植物生长的关键因素。陕北地区受自然环境和地质条件限制,边坡生态环境较差。在调查中发现,延安地区的蒿属植物根系发达,主要分布于 0~50 cm 的垂直土层(调查中主

根最长可达到 1.5 m),以及距植株 0~30 cm 的水平范围内,明显大于非蒿属草本植物,使得蒿属植物在坡体中水分和微量元素的利用能力、抗风蚀能力、附着能力都较为显著。而木本植物水分需求量较高,自重较大,并不适合作为坡度较大边坡上的护坡树种。此外,许多蒿属植物耐寒性强,是极少能在陕北安全过冬的草本植物,保证了多年生植物对边坡长效的固土能力。

2.4 黄土边坡护坡植物组合

植物调查的目的是筛选适应本地区自然环境的潜在护坡树种,并提出相应的工程实施建议。护坡树种选择的原则:首先,需考虑物种对当地气候、地质等条件的适应性,且不能造成物种入侵等生态破坏;其次,树种应具有发达的根系,利于根-土复合体的形成;最后,树种应对边坡环境有长期恢复作用,能提高边坡后期物种多样性。根据以上原则,本文提出了延安地区黄土边坡护坡植物群落及植物配比的建议。当坡度小于 35°时,表 2 中常见的草本类和木本类植物可混合种植;当坡度介于 35°~65°时,应选择蒿属植物与结缕草、臭草、狗尾草等常见草本植物;当坡度大于 65°时,可以黑沙蒿等蒿属植物为先锋护坡植物,待蒿属植物对边坡生态进行有效恢复以后,再进一步播种其他草本类植物,以提高植物群落结构的复杂性。另一方面,采用植物与工程措施相结合的方式,可增加植物的附着能力,所以建议采用不可降解的排水网,必要时使用铁丝网或格构梁等工程措施或结构,加快边坡生态恢复速度,提高植物种群多样性。

3 结 语

(1)延安地区自然环境与地质环境具有独特性,通过当地自然边坡植物调查进行护坡植物的筛选,是兼顾护坡效果与生态协调的最有效方法。

(2)延安地区边坡植物物种数量相对较少,主要以适生性强的品种为主,其中蒿属植物表现出相对较好的生长状态,具有较高的护坡应用潜力。

(3)随着黄土边坡坡度增大及土壤湿度降低,植物数量及物种数量相应减少,物种分布比例结构差异性增大,但蒿属植物比重相应增大。

(4)提出了延安地区植物护坡的工程建议,对推动黄土边坡植物护坡技术工程应用有指导意义。

(5)黄土边坡蒿属植物固土护坡机理及效应还有待后续进一步的研究,以提供其工程应用的理论基础。

参考文献:

References:

- [1] 张茂省,校培喜,魏兴丽.延安市宝塔区崩滑地质灾害发育特征与分布规律初探[J].水文地质工程地质,2006,33(6):72-74,79.
ZHANG Mao-sheng, XIAO Pei-xi, WEI Xing-li. A preliminary discussion of the occurrence of landslide in the Baota district of Yan'an City[J]. Hydrogeology and Engineering Geology, 2006, 33(6): 72-74, 79. (in Chinese)
- [2] 李家春,田伟平.黄土路堤坡顶及土路肩暴雨冲蚀破坏机理试验[J].长安大学学报:自然科学版,2004,24(2):27-29.
LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Rainfall erode mechanism on loess road shoulder and tope of side slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2004, 24(2): 27-29. (in Chinese)
- [3] 王福恒,李家春,田伟平.黄土边坡降雨入渗规律试验[J].长安大学学报:自然科学版,2009,29(4):20-24.
WANG Fu-heng, LI Jia-chun, TIAN Wei-ping. Test on rainfall filtration in loess slope [J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2009, 29(4): 20-24. (in Chinese)
- [4] 许锐,郭璐,李寻昌,等.延安地区黑沙蒿生长特征及护坡效应研究[J].铁道工程学报,2015,32(9):19-24.
XU Rui, GUO Lu, LI Xun-chang, et al. Research on the growth characteristics and slope protection of artemisia ordosica in Yan'an area[J]. Journal of Railway Engineering Society, 2015, 32(9): 19-24. (in Chinese)
- [5] 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 Wen-sheng, YANG Xiao-hua, XIE Yong-li. Mechanism of biotechnical protection for highway slope[J]. Journal of Chang'an University: Natural Science Edition, 2005, 25(4): 26-30. (in Chinese)
- [6] 梁伟,高德彬,倪万魁.公路黄土路堑高边坡植物防护研究[J].灾害学,2007,22(3):45-48.
LIANG Wei, GAO De-bin, NI Wan-kui. Research on surface plant protection for highway loess cutting slope[J]. Journal of Catastrophology, 2007, 22(3): 45-48. (in Chinese)
- [7] 赵志明,吴光,王喜华.工程边坡绿色防护机制研究[J].岩石力学与工程学报,2006,25(2):299-305.
ZHAO Zhi-ming, WU Guang, WANG Xi-hua. Research on greening protection mechanism for engineering slope[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics

- and Engineering, 2006, 25(2): 299-305. (in Chinese)
- [8] 徐则民, 黄润秋, 唐正光, 等. 植被护坡的局限性及其对深层滑坡孕育的贡献[J]. 岩石力学与工程学报, 2005, 24(3): 438-449.
- XU Ze-min, HUANG Run-qiu, TANG Zheng-guang, et al. Limitations of biotechnical slope protection and contribution of vegetation to deep seated landslide preparation[J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005, 24(3): 438-449. (in Chinese)
- [9] WIEL M J V D, DARBY S E. A new model to analyse the impact of woody riparian vegetation on the geotechnical stability of riverbanks[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2007, 32(14): 2185-2198.
- [10] ALI F H, OSMAN N. Shear strength of soil containing vegetation roots [J]. Soils and Foundations, 2008, 48(4): 587-596.
- [11] 杨 璞, 向志海, 胡夏嵩, 等. 根对土壤加强作用的研究[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2009, 49(2): 305-308.
- YANG Pu, XIANG Zhi-hai, HU Xia-song, et al. Soil reinforcement by vegetation roots [J]. Journal of Tsinghua University: Science and Technology, 2009, 49(2): 305-308. (in Chinese)
- [12] SCHWARZ M, COHEN D, OR D. Root-soil mechanical interactions during pullout and failure of root bundles [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2010, 115(F4): 701-719.
- [13] 胡夏嵩, 李国荣, 朱海丽, 等. 寒旱环境灌木植物根-土相互作用及其护坡力学效应[J]. 岩石力学与工程学报, 2009, 28(3): 613-620.
- HU Xia-song, LI Guo-rong, ZHU Hai-li, et al. Research on interaction between vegetation root and soil for slope protection and its mechanical effect in cold and arid environments [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2009, 28(3): 613-620. (in Chinese)
- [14] ZHANG C B, CHEN L H, LIU Y P, et al. Triaxial compression test of soil-root composites to evaluate influence of roots on soil shear strength[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(1): 19-26.
- [15] 言志信, 宋 云, 江 平, 等. 植被护坡中植物根和岩土相互作用的力学分析[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(5): 585-590.
- YAN Zhi-xin, SONG Yun, JIANG Ping, et al. Mechanical analysis of interaction between plant roots and soil mass in slope vegetation[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(5): 585-590. (in Chinese)
- [16] GOVERS G, POESEN J. Assessment of interrill and rill contributions to total soil loss from an upland field plot[J]. Geomorphology, 1988, 1(4): 343-354.
- [17] ZHOU Z C, SHANGGUAN Z P, ZHAO D. Modeling vegetation coverage and soil erosion in the Loess Plateau area of China[J]. Ecological Modelling, 2006, 198(1/2): 263-268.
- [18] 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 Hai-song, NI Wan-kui, YANG Hong-quan, 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. (in Chinese)
- [19] SCHWARZ M, COHCN D, OR D. Pullout test of root analogs and natural root bundles in soil: experiments and modeling [J]. Journal of Geophysical Research: Earth Surface, 2011, 116(F2): 167-177.
- [20] 陈昌富, 刘怀星, 李亚平. 草根加筋土的室内三轴试验研究[J]. 岩土力学, 2007, 28(10): 2041-2045.
- CHEN Chang-fu, LIU Huai-xing, LI Ya-ping. Study on grassroots-reinforced soil by laboratory triaxial test[J]. Rock and Soil Mechanics, 2007, 28(10): 2041-2045. (in Chinese)
- [21] 李 斌, 张金屯. 黄土高原地区植被与气候的关系 [J]. 生态学报, 2003, 23(1): 83-89.
- LI Bin, ZHANG Jin-tun. Analysis of relationships between vegetation and climate variables in Loess Plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2003, 23(1): 82-89. (in Chinese)
- [22] 信忠保, 许炯心, 郑 伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响[J]. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.
- XIN Zhong-bao, XU Jiong-xin, ZHENG Wei. Impacts of climate change and human activity on vegetation cover change over Loess Plateau[J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 2007, 37(11): 1504-1514. (in Chinese)
- [23] 邹 群, 邹国平. 高速公路生态护坡技术及其应用 [J]. 筑路机械与施工机械化, 2013, 30(2): 52-54.
- ZOU Qun, ZOU Guo-ping. Application of ecological slope protection technology to expressway[J]. Road Machinery & Construction Mechanization, 2013, 30(2): 52-54. (in Chinese)