

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.2018.02.18

模拟降雨条件下寒旱地区边坡土体 位移及土压力特征

窦增宁¹, 赵玉娇¹, 刘昌义¹, 胡夏嵩^{1,2}, 徐志闻¹, 卢海静¹

(1. 青海大学地质工程系, 青海 西宁 810016; 2. 中国科学院青海盐湖研究所, 青海 西宁 810008)

摘要: 为深入研究降雨条件下寒旱地区植物边坡与裸坡浅层位移及土压力特征, 定量评价植物护坡效应, 以位于西宁盆地的青海大学自建试验区为例, 通过对柠条锦鸡儿边坡与裸坡开展原位模拟降雨试验, 系统分析两种边坡浅层土体的土压力值及其水平、垂直方向上位移量变化规律; 在此基础上评价这两种类型边坡的稳定性。得到以下主要结论: 降雨前后, 柠条锦鸡儿边坡 a 层(边坡表层以下 0 ~ 20 cm)、b 层(边坡表层以下(20 ~ 40 cm)土体含水率增加幅度均较裸坡降低 32.03 %、13.63 %, 反映出模拟降雨过程中植物茎叶起到降雨截流作用; 降雨后两种边坡平均土压力值均较降雨前略高, 其中裸坡增加 0.125 kPa, 柠条锦鸡儿边坡增加 0.129 kPa。降雨前后柠条锦鸡儿边坡在水平、垂直方向的平均位移量分别为 0.031、0.027 cm, 裸坡坡面的分别为 0.196、0.158 cm, 说明柠条锦鸡儿根系在一定程度上起到有效抑制坡面土体变形效果, 达到了提高边坡稳定性的作用。

关键词: 寒旱地区; 西宁盆地; 模拟降雨; 植物边坡; 边坡稳定性

中图分类号: P642.2; TU457

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2018)02-0117-06

Soil displacement and earth pressure characteristics of slopes in a cold and arid region under rainfall simulation

DOU Zengning¹, ZHAO Yujiao¹, LIU Changyi¹, HU Xiasong^{1,2}, XU Zhiwen¹, LU Haijing¹

(1. Department of Geological Engineering, Qinghai University, Xining, Qinghai 810016, China;
2. Qinghai Institute of Salt Lakes, Chinese Academy of Sciences, Xining, Qinghai 810008, China)

Abstract: The displacement and earth pressure characteristics of the vegetated slope and the bare slope in a cold and arid region under rainfall condition are explored to quantitatively analyze and evaluate the slope protection effects of plants. The self-built test area is located in Qinghai University of Xining Basin. Through in-situ rainfall simulation to the bare slope and the slope vegetated with *Caragana Korshinskii*, the earth pressure values of the two slope surfaces are analyzed. Changes in the displacement in both the horizontal and vertical directions are analyzed as well. The stability of two kinds of slopes in the test area is evaluated. The results show that as to the slope vegetated with *C. Korshinskii* before and after the rainfall simulation in layer a (below slope surface 0 ~ 20 cm) and layer b (below slope surface 20 ~ 40 cm), the increase rates of soil moisture are reduced by 32.03 % and 13.63 % compared with the bare slope, which indicates that the plant stems and leaves play an important role in rainfall interception. After the rainfall simulation, the average earth pressures of the two slopes are slightly higher than that before the rainfall simulation, the average earth pressure of the bare slope is 0.125 kPa higher than that before rainfall and the average earth pressure of the slope vegetated with *C. Korshinskii* is 0.129 kPa higher than that before rainfall. The surface deformations in

收稿日期: 2017-07-18; 修订日期: 2017-10-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41572306;41162010); 教育部长江学者和创新团队发展计划(IRT_17R62); 青海省自然科学基金资助项目(2014-ZJ-906)

第一作者: 窦增宁(1990-), 男, 硕士研究生, 主要从事地质工程等方面的研究工作。E-mail: 527691064@qq.com

通讯作者: 胡夏嵩(1965-), 男, 教授, 主要从事地质工程与环境地质等方面的教学与研究工作。E-mail: huxiasong@tsinghua.org.cn

both the horizontal and the vertical directions of the bare slope before and after rainfall are 0.196 cm and 0.158 cm, respectively, and the slope vegetated with *C. Korshinskii* before and after rainfall are 0.031 cm and 0.027 cm, respectively. The results also show that the plants can significantly reduce the deformation of slope surface and improve the stability of the slope surface. The results of this test have theoretical and practical significance in preventing the occurrence of geological disasters, such as soil and water loss and shallow landslide in the test area.

Keywords: cold and arid region; Xining basin; rainfall simulation; vegetated slope; slope stability

近年来国内外学者大量研究结果表明,降水条件下雨水对边坡的稳定性具有显著性影响,而由雨水引起的边坡变形可通过边坡位移和土体压力值反映^[1~7]。詹良通等^[4]通过开展模拟降雨试验,采用振弦式土压力盒对湖北枣阳大岗坡处的非饱和膨胀土边坡进行原位监测,结果表明:第一次降雨开始后土压力值呈先增加后趋于稳定变化规律,第二次降雨后土压力值则呈降低的变化趋势。刘文庆等^[5]采用多点位移计对安徽汤屯高速公路II-7位置处高度为42 m的高边坡进行了安全监测,并指出7月份位移变化速率呈现增加趋势,其原因主要是受到连续暴雨作用的影响。张昌军等^[6]通过对位于秦岭北麓山前大断裂带附近一坡高5 m、坡度40°的黄土边坡进行了两种不同雨强下(274 mm/d、302 mm/d)的人工降雨试验,采用位移计监测坡体浅层及内部变形特征,结果表明当降雨强度超过274 mm/d时,坡体浅层位移呈增大趋势并易发生失稳。雷航等^[7]采用单点位移计监测了毕节至威宁高速公路云贵高原乌蒙山脉北段一坡高为42 m的边坡,其结果表明受降雨影响边坡产生局部滑塌,最大下错深度达3 m。

由上述研究结果可知,诸多学者对于在降雨条件下边坡的位移量和土压力特征开展了较为深入的研究,其研究对象多以未种植植物的素土边坡为主;对于生长了植物的边坡在模拟自然降雨条件下,主要是对坡面形成径流^[8]、泥沙流失^[8]、含沙量^[3]等相关内容的试验分析。而通过分析裸坡和种植植物边坡的浅层土体位移量、土压力值及其变化规律,探讨降水条件下植物对于提高边坡浅层土体稳定性作用等方面的研究,尚有待于进一步加强。

针对上述实际情况,本研究选取位于青藏高原东北部的西宁盆地作为研究区,在模拟降水条件下,通过在边坡浅层土体中布设压力盒、位移计的方法,对种植植物的边坡和未种植植物的裸坡的浅层土体的位移量和土压力值进行监测,定量评价区内植物根系增强边坡浅层土体稳定性的贡献,其研究成果可为寒旱环境下边坡坡面水土流失、浅层滑坡等地质灾害的有效防治,提供理论参考依据和实际指导。

1 试验区概况

试验区位于青海西宁城北青海大学校内自建试验区。区内发育厚层状黄土层,夏季平均降水量为110.6 ~ 479.1 mm,平均蒸发量为1 350 ~ 3 000 mm,平均日照为634.5 h/a,平均气温为13.0 °C^[9,10]。试验区边坡为阴坡,坡度30°,其土体以粉土为主,属于人工堆积边坡。

2 试验材料与试验方法

2.1 试验材料

通过调查试验区周边地区已有的灌木种类,得出柠条锦鸡儿分布范围和数量相对较为广泛,具有较好的代表性,故选取生长期为2 a的柠条锦鸡儿(*Caragana Korshinskii* Kom)边坡与裸坡作为研究对象。两种类型边坡的划分方案见图1。区内柠条锦鸡儿种植方法采用穴播法种植,即株距为5 cm,行距为5 cm,穴深为3 ~ 5 cm,每穴种植3 ~ 5粒,在降雨试验前首先清除边坡中的杂草,仅保留供试种,其中柠条锦鸡儿生长量统计结果见表1,植物生长情况见图2。

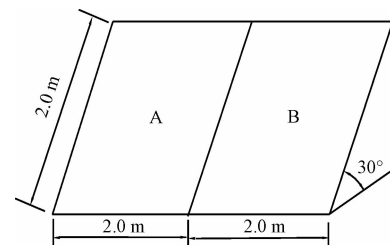


图1 试验区2种类型边坡划分方案示意图

Fig. 1 Sketch map of the division of 2 types of slopes in the testing area

表1 试验区生长期2 a的柠条锦鸡儿植物生长量指标

Table 1 Statistical results of growth indexes of 2 a *Caragana korshinskii* in the testing area

边坡类型	平均株高/cm	平均分枝数	平均地径/mm	冠幅/cm ²	样品数
柠条锦鸡儿	28.7	3.7	3.4	7.0 × 8.0	30.0



图 2 试验区种植柠条锦鸡儿生长情况

Fig. 2 Growth condition of *C. korshinskii* in the testing area

2.2 试验装置原理与设计及方法

2.2.1 试验装置原理与设计

本试验采取课题组自行设计和加工的野外模拟降雨试验装置(图 3)。该试验装置主要由进水表、储集水箱两部分组成。首先通过进水表对进水量进行有效控制和调整,从而达到控制单位时间降雨量的目的;再通过储集水箱作为模拟自然降雨容器,在其底部位置开孔径为 1 mm 的小孔使水均匀降入试验区块。

采用 KTR3-50 型位移计监测区内边坡变形情况,采用微型土压力盒监测边坡浅层土压力值。位移计与压力盒的布设位置见图 4。图 4(a)显示在柠条锦鸡儿边坡、裸坡相同位置处按水平、垂直方向布置位移计,并采用自坡底起依次记为 1 号、2 号、3 号、4 号、5 号点位;图 4(b)中点 I 为坡顶与坡中部中间点位置处,点 II 为坡中部与坡脚中间点位置处。根据试验区气候特征,以及青海东部地区每小时最大降雨强度^[10~11]作为依据,确定本次试验的模拟降雨强度为 34.4 mm/h,降雨历时为 1 h。

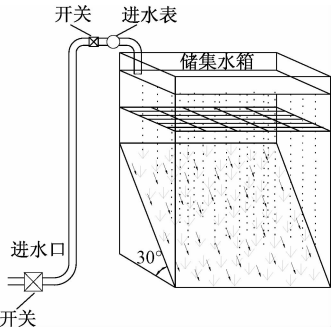


图 3 模拟降雨试验装置结构设计及组成示意图

Fig. 3 Structure design and constitution map of the rainfall simulation device

2.2.2 试验方法

原位模拟降雨试验前后,分别对试验区内两种类型边坡的 a 层(坡面以下 0~20 cm 深度位置处),b 层(坡面以下 20~40 cm 深度位置处)进行开挖,分别采

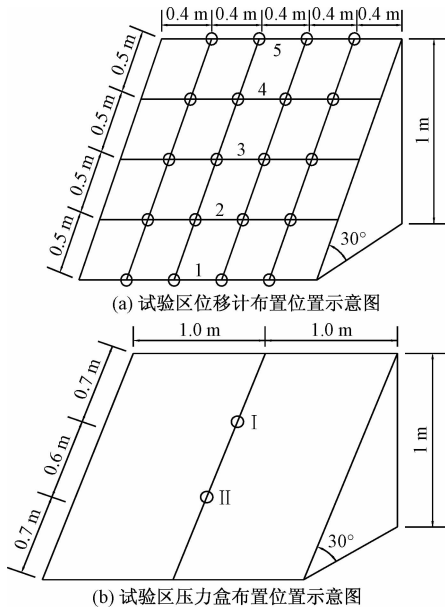


图 4 边坡位移计及土压力盒布设位置示意图

Fig. 4 Diagram for the location of displacement and earth pressure meters fixed in the slopes

集这两处的土体含水率、土体密度试样。在原位模拟降雨试验过程中,分别监测两种类型边坡浅层土体的位移量和土压力值。

2.2.3 计算浅层土压力、位移量

采用万能表测量位移计电压值,根据式(1)计算相应的边坡浅层土体位移值。

$$S = 1.11111 \times a \quad (1)$$

式中: S ——土体位移/mm;

a ——试验测量电压值/V。

采用万能表测量土压力盒电压值(表 2),根据对应压力盒的回归方程,计算得到相应的土压力值。

表 2 试验区边坡浅层土压力传感器标定系数

Table 2 Calibration coefficients of earth pressure meters on the slope shallow layers in the testing area

土压力值/kPa	0	3	6	9	12	15
1 号电压值/V	0.164	0.362	0.511	0.710	0.929	1.159
2 号电压值/V	0.170	0.365	0.526	0.733	0.950	1.176
3 号电压值/V	0.155	0.357	0.510	0.707	0.920	1.136
⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮	⋮
48 号电压值/V	0.175	0.383	0.572	0.783	0.999	1.215

注:以 1 号土压力盒为例,当 1 号土压力盒的压力值为 0 kPa 时,其测定的电压值为 0.164 V。

3 结果与分析

3.1 降雨试验前后边坡浅层土体含水率及密度变化
降雨入渗一方面使土体饱和度增大,边坡上覆土

体自重应力增加,另一方面降雨入渗引起土层含水率增大,从而降低坡体稳定性^[12]。试验区裸坡与柠条锦鸡儿边坡模拟降雨试验前后边坡土体含水率、密度试验结果见表3。由表可知,降雨试验前坡面地表以下a层柠条锦鸡儿边坡土体平均含水率较裸坡略高,而在b层柠条锦鸡儿边坡土体含水率与裸坡无显著变化。试验后在a层柠条锦鸡儿边坡土体平均含水率较裸坡略小,而在b层柠条锦鸡儿边坡土体平均含水率较裸

坡呈降低趋势。柠条锦鸡儿边坡a层、b层土体平均含水率增加幅度依次为38.54%、13.28%,裸坡则在a层、b层依次为70.57%、26.91%。

降雨试验结束后,即开挖相应边坡测得边坡不同深度位置处的密度,即分别得到柠条锦鸡儿边坡、裸坡各点位置处土体密度。柠条锦鸡儿边坡a层、b层土体平均密度增加幅度依次为8.53%、1.30%;裸坡a层、b层则依次为6.95%、2.59%。

表3 试验区裸坡与柠条锦鸡儿边坡模拟降雨试验前后土体密度与含水率试验结果

Table 3 Testing results of soil density and moisture content of the bare slope and the slope planted with *C. Korshinskii* before and after rainfall simulation test in the testing area

边坡类型	取样位置	试验条件	土体平均含水率/%		土体含水率增加幅度/%		土体平均密度/(g·cm ⁻³)		土体密度增加幅度/%	
			a层	b层	a层	b层	a层	b层	a层	b层
裸坡	I	降雨前	9.74	9.67			1.499	1.971		
		降雨后	16.74	13.56			1.572	2.034		
	II	降雨前	10.00	13.73	70.57	26.91	1.507	1.972	6.95	2.59
		降雨后	16.93	16.14			1.643	2.011		
柠条锦鸡儿边坡	I	降雨前	11.01	8.95			1.466	1.846		
		降雨后	15.78	10.68			1.641	1.874		
	II	降雨前	10.76	13.83	38.54	13.28	1.490	1.925	8.53	1.30
		降雨后	14.38	15.12			1.567	1.946		

3.2 降雨试验前后边坡浅层土压力值特征

由降雨引起的土压力变化是评价边坡稳定性的一项重要指标,降雨入渗导致坡体强度减小,且当土压力增大至一定程度时坡体发生变形破坏^[13]。试验区裸坡与柠条锦鸡儿边坡模拟降雨前后,边坡浅层土体土压力值结果见表4。由表可计算得出降雨前后裸坡与柠条锦鸡儿边坡浅层平均土压力分别增加0.125 kPa,0.129 kPa,由此反映出降雨前后区内柠条锦鸡儿边坡浅层平均土压力值变化量大于裸坡。

表4 试验区裸坡与柠条锦鸡儿边坡模拟降雨前后土体土压力计算结果

Table 4 Calculation results of earth pressures of the bare slope and slope planted with *C. Korshinskii* before and after rainfall simulation in the testing area

边坡类型	测量位置	试验条件	土压力值/kPa	土体平均压力值变化量/kPa	土压力值变化量增加幅度/%
裸坡	I	降雨前	1.460		
		降雨后	1.563		
	II	降雨前	1.504	0.125	8.400
		降雨后	1.650		
柠条锦鸡儿边坡	I	降雨前	1.448		
		降雨后	1.620		
	II	降雨前	1.488	0.129	8.790
		降雨后	1.573		

本项研究表明,降雨入渗使区内两种类型边坡浅层土体容重相对增加,引起土压力值亦相应增大。类似的

研究结果还表现在:武彩萍等^[14]采用MFF系列多点薄膜压力测试系统,以降雨强度58.5~138.3 mm/h,降雨历时600 min,对坡度为45°的人工堆积边坡进行模拟降雨试验,结果表明:在降雨后边坡土压力值显著增大,即在降雨历时550 min时土压力值增加5 kPa。陈玺文^[15]采用土压力传感器,以降雨强度1.6 mm/min,降雨历时300 min对坡度为22°的人工堆积边坡进行模拟降雨试验,结果表明:在降雨过程中土压力值呈缓慢增大趋势,即边坡降雨前后土压力值变化量分别在坡顶处增加5 kPa,坡中处增加2 kPa,坡底处增加10 kPa。

此外,区内柠条锦鸡儿边坡浅层土压力值变化量相对大于裸坡,其主要原因在于其根系的吸水作用,以及柠条锦鸡儿自重因素所致。诸多研究表明,植物根系的存在一方面对边坡表层起到有效防治坡面水土流失作用^[16],另一方面,植物根系能够有效增强坡面土体黏聚力,使得边坡表层土体承受上覆土体自重的能力相对增强,因此在一定程度上缓解了因边坡浅层土压力增加引起的边坡浅层土体的变形^[13]。

3.3 模拟降雨试验前后边坡浅层土体位移量特征

降雨引起的边坡位移,主要由于边坡非饱和区含水量增加,基质吸力下降,而基质吸力的降低又使得边坡非饱和区产生应变,其结果使得边坡产生与降雨有关的位移^[17]。试验区两种边坡在模拟降雨前后浅层土体位移量见表5。由表可知,降雨后裸坡浅层土体

水平方向平均位移量为 0.196 cm,垂直方向为 0.158 cm;柠条锦鸡儿边坡浅层土体水平方向平均位移量为 0.031 cm,垂直方向为 0.027 cm。裸坡在降雨后其水平和垂直方向位移量显著大于柠条锦鸡儿边坡。由图 5 可知,两种类型边坡在 5 个测量位置处(图 4)水平和垂直方向位移量自坡顶至坡底均呈减小趋势,且裸坡在水平和垂直方向上其位移变化趋势均大于柠条锦鸡儿边坡。由上述分析结果可知,降雨入渗至边坡浅层位置后,非饱和土的基质吸力降低,在重力作用下土体产生水平滑移和竖向沉降变形,表现为相对位移的增大;另一个方面,柠条锦鸡儿边坡由于其根系的加筋和锚固作用,一定程度上提高了边坡浅层的稳定性。

表 5 试验区裸坡与柠条锦鸡儿边坡模拟降雨
试验前后浅层土体位移量计算结果

Table 5 Calculation results of soil displacement values
of the bare slope and slope planted with *C. Korshinskii*
before and after rainfall simulation in the testing area

边坡 类型	测量 位置	土体位移 量/cm		土体平均 位移量/cm		土体平均位移 量标准差	
		水平 方向	垂直 方向	水平 方向	垂直 方向	水平 方向	垂直 方向
裸坡	1	0.109	0.161				
	2	0.207	0.056				
	3	0.230	0.256	0.196	0.158	0.052	0.077
	4	0.197	0.114				
	5	0.238	0.203				
柠条锦 鸡儿 边坡	1	0.010	0.009				
	2	0.028	0.032				
	3	0.004	0.051	0.031	0.027	0.025	0.016
	4	0.060	0.012				
	5	0.051	0.030				

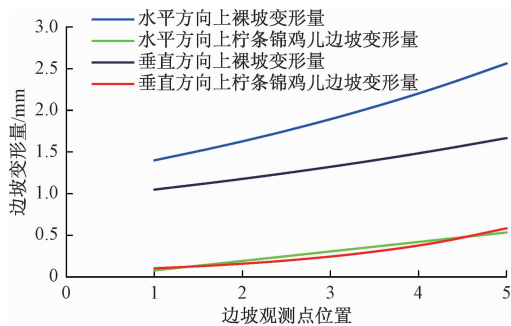


图 5 试验区裸坡和柠条锦鸡儿边坡坡面位移量
Fig. 5 Distribution features of displacement
values of the bare slope and slope vegetated
with *C. Korshinskii* in the testing area

由以上研究结果可知,降雨对于边坡浅层土体稳定性的影响主要表现在,降雨入渗使得边坡土体自重增加,且在自重影响下发生水平和垂直方向上的位移

变化,具体表现为自坡顶处至坡底位置呈依次减小的趋势。相应地,与本项研究相类似的研究结果还表现在:陈伟^[18]采用示踪法以降雨强度 0.97 ~ 2.30 mm/min,降雨历时 60 min,对 45°人工堆积边坡进行位移监测,其结果为自坡顶至坡底位移变化量呈依次减小趋势。陈玺文^[15]采用位移传感器以降雨强度 1.2 mm/h,降雨历时 300 min,对坡度为 31°人工堆积边坡进行模拟降雨试验,结果表明坡顶位置处土体水平位移最大为 25.73 mm,而在坡中和坡底位置处水平位移均为 0.14 mm。

4 结论

(1) 试验区柠条锦鸡儿边坡与裸坡,在模拟降雨试验过程中,部分降水入渗至坡面以下的 b 层深度,反映出在降雨过程中,植物边坡中植物茎叶部分有效地发挥了降雨截流作用。

(2) 柠条锦鸡儿边坡和裸坡浅层土压力值,在模拟降雨试验条件下表现出相同的特征,即土体平均土压力值分别增加 0.129 kPa、0.125 kPa,而两者之间的增加量差异主要变现在植物根系的吸水作用以及植物自重所致。

(3) 模拟降雨试验前后,柠条锦鸡儿边坡与裸坡坡面的位移量表现为:自坡顶至坡底水平、垂直方向的位移量均呈减小趋势;同时,柠条锦鸡儿边坡坡面水平、垂直方向的位移量均显著低于裸坡,表现出柠条锦鸡儿根系具有显著防治边坡浅层土体位移和变形的作用。

参考文献:

- [1] Niu Q, Zhao K, Wang Y H, et al. Examining the influence of vegetation on slope hydrology in Hong Kong using the capacitive resistivity technique [J]. Journal of Applied Geophysics, 2016, 129: 148 - 157.
- [2] 刘小文, 耿小牧. 降雨入渗对土坡稳定性影响分析[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(6): 40 - 42. [LIU X W, GENG X M. Stability analysis of soil slope under rainfall seepage influence [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2006, 33(6): 40 - 42. (in Chinese)]
- [3] Chau N L, Chu L M. Fern cover and the importance of plant traits in reducing erosion on steep soil slopes [J]. Catena, 2017, 151: 98 - 106.
- [4] 詹良通, 吴宏伟, 包承纲, 等. 降雨入渗条件下非饱和膨胀土边坡原位监测[J]. 岩土力学, 2003, 24(2): 151 - 158. [ZHAN L T, WU W H, BAO C G, et al.

- Artificial rainfall infiltration tests on a well-instrumented unsaturated expansive soil slope [J]. *Rock & Soil Mechanics*, 2003, 24(2): 151–158. (in Chinese)]
- [5] 刘文庆, 赵飞, 董建辉, 等. 多点位移计在高速公路高边坡稳定性监测中的应用[J]. *地质灾害与环境保护*, 2010, 21(4): 104–107. [LIU W Q, ZHAO F, DONG J H, *et al.* Application of multiple-point rod extensometer to high slope of expressway stability monitoring[J]. *Journal of Geological Hazards & Environment Preservation*, 2010, 21(4): 104–107. (in Chinese)]
- [6] 张昌军. 西安地区黄土斜坡人工降雨试验研究[D]. 西安: 长安大学, 2013. [ZHANG C J. Experiment study on the artificial rainfall of loess slope in Xi'an area [D]. Xi'an: Chang'an University, 2013. (in Chinese)]
- [7] 雷航. 基于坡面位移监测信息的边坡稳定性分析[D]. 成都: 西南交通大学, 2014. [LEI H. Stability analysis of slopes based on surface displacement monitoring information [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2014. (in Chinese)]
- [8] KATUWAL S, VERMANG J, CIRNELIS W M, *et al.* Effect of root density on erosion and erodibility of a loamy soil under simulated rain[J]. *Soil Science*, 2013, 178(1): 29–36.
- [9] 魏鸿业, 祁栋林, 马明亮, 等. 降水对西宁市城市空气污染的影响分析[J]. *青海环境*, 2015, 25(2): 54–58. [WEI H Y, QI D L, MA M L, *et al.* The influence of precipitation of Xining city air pollution analysis [J]. *Journal of Qinghai Environment*, 2015, 25(2): 54–58. (in Chinese)]
- [10] 马汝忠. 近 50 年西宁地区雷暴日气候变化特征分析[J]. *青海气象*, 2009, 5(2): 15–18. [MA R Z. Nearly 50 years in Xining region analysis of characteristics of thunderstorm on climate change[J]. *Journal of Qinghai Meteorology*, 2009, 5(2): 15–18. (in Chinese)]
- [11] 张国胜. 青海省气候变化及其对生态环境影响研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2004. [ZHANG G S. The study on Qinghai climate change and its imPaets on the eological environment [D]. Beijing: China Agricultural University, 2004. (in Chinese)]
- [12] 孙红, 吴刚, 宋金岩, 等. 路基工程中植被边坡的安全技术指标分析[J]. *岩土工程学报*, 2010 32 (增刊 2): 594–597. [SUN H, WU G, SONG J Y, *et al.* Technology parameters of stability in subgrade slope of vegetation [J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2010, 32(Sup2): 594–597. (in Chinese)]
- [13] 李华坦, 李国荣, 赵玉娇, 等. 模拟自然降雨条件下植物根系增强边坡土体抗剪强度特征[J]. *农业工程学报*, 2016, 32(4): 142–149. [LI H T, LI G R, ZHAO Y J, *et al.* Characteristics of slope soil shear strength reinforced by vegetation roots under artificially simulated rainfall condition [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2016, 32(4): 142–149. (in Chinese)]
- [14] 武彩萍. 人工降雨条件下黄土边坡的室内模型试验研究[D]. 咸阳: 西北农林科技大学, 2013. [WU C P. Indoor model test resrarch on loess slope under artificial rainfall conditions [D]. Xianyang: Northwest Agriculture & Forestry University, 2013. (in Chinese)]
- [15] 陈玺文. 堆积碎石土滑坡降雨致滑模型试验研究[D]. 湘潭: 湘潭大学, 2014. [CHEN X W. The model test study on rainfall-induced eluvial gravel soil landslides [D]. Xiangtan: Xiangtan University, 2014 (in Chinese)]
- [16] 张兴玲, 胡夏嵩, 李国荣, 等. 寒旱环境草本植物根系护坡的时间尺度效应[J]. *水文地质工程地质*, 2009, 36(4): 117–120. [ZHANG X L, HU X S, LI G R, *et al.* Time scale effect of herb roots on slope protection in a cold arid and semi-arid environment [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2009, 36(4): 117–120. (in Chinese)]
- [17] 弗雷德隆德. 非饱和土土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2015. [FREDLUND D G. Unsaturated soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2015. (in Chinese)]
- [18] 陈伟, 骆亚生, 武彩萍. 人工降雨作用下黄土边坡的室内模型试验研究[J]. *中国农村水利水电*, 2013, 5(5): 100–104. [CHEN W, LUO Y S, WU C P. The laboratory model test study of loess slope under the artificial rainfall [J]. *China Rural Water and Hydropower* 2013, 5(5): 100–104. (in Chinese)]

责任编辑: 汪美华