

锚固植被加强系统对新开挖膨胀土边坡 大气影响深度的作用

唐林强¹, 陈君婷¹, 许英姿²

(1. 广西交通职业技术学院 路桥工程学院, 广西 南宁 530004; 2. 广西大学 土木建筑工程学院, 广西 南宁 530004)

摘要: [目的] 探索锚固加强植被系统(ARVS 系统)对新开挖膨胀土边坡大气影响深度的影响,为该系
统防护新开挖膨胀土边坡的应用提供参考依据。[方法] 以南宁市膨胀土边坡为研究对象,进行新开挖的
裸露边坡、植草边坡、ARVS 系统防护边坡的现场试验,监测边坡的土体含水率、土体温度、锚杆轴力,研究
大气作用下 ARVS 系统对新开挖膨胀土边坡的大气影响的深度。[结果] 裸露边坡的大气影响深度发展最
快,短时间内就能发展到了 2.4 m 左右,ARVS 系统防护边坡的发展最慢,多次降雨后,大气影响深度小于
1.8 m;ARVS 系统能约束膨胀作用,限制胀缩裂隙的发育,再加上植被作用,减缓大气影响深度向内部发
展的速度;随着大气影响深度向土体深部发展,中性点向深处移动,坡面的植被与高性能植被保护垫
(HPTRM)能使限制这种移动,保证 ARVS 系统约束膨胀作用的能力。[结论] ARVS 系统的植被,
HPTRM 和锚杆 3 者相互作用,通过约束膨胀作用来限制新开挖膨胀土边坡大气影响深度的发展。

关键词: 锚固植被加强系统; 新开挖膨胀土边坡; 大气影响深度; 现场试验

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2022)04-0145-08

中图分类号: TU443

文献参数: 唐林强, 陈君婷, 许英姿. 锚固植被加强系统对新开挖膨胀土边坡大气影响深度的作用[J]. 水
土保持通报, 2022, 42(4): 145-152. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.04.019; Tang Linqiang, Chen Junting,
Xu Yingzi. Effects on atmospheric influence depth for an anchored vegetation reinforcement system to protect
newly excavated expansive soil slopes [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(4): 145-152.

Effects on Atmospheric Influence Depth for an Anchored Vegetation Reinforcement System to Protect Newly Excavated Expansive Soil Slopes

Tang Linqiang¹, Chen Junting¹, Xu Yingzi²

(1. Road and Bridge Engineering School, Guangxi Transport Vocational and Technical College, Nanning,
Guangxi 530004, China; 2. School of Civil Engineering, Guangxi University, Nanning, Guangxi 530004, China)

Abstract: [Objective] The data that could provide a reference basis for the application of an anchor-reinforced
vegetation system (ARVS) were obtained to protect newly excavated slopes with expansive soil. [Methods]
Field tests were conducted on a newly excavated bare slope, vegetated slope, and ARVS-protected slope of
expansive soil in Nanning City. Soil moisture content, soil temperature, and anchor shaft force of the slope
were monitored to study the depth of atmospheric influence of ARVS on a newly excavated expansive soil
slope under atmospheric action. [Results] The depth of atmospheric influence on the bare slope developed the
fastest, developing to about 2.4 m in a short time. The depth of atmospheric influence on the ARVS-protected
slope developed the slowest. The depth of atmospheric influence was less than 1.8 m after repeated rainfall
events. ARVS restrained the expansive effect and limited the development of expansive and shrinking
fissures, together with vegetation and high performance turf reinforcement mats (HPTRM), ARVS slowed
down the development of the depth of atmospheric influence to the interior. As the depth of atmospheric
influence developed to the deep part of the soil body, the neutral point moved deeper. [Conclusion] The
vegetation, HPTRM, and anchor rod of ARVS interacted with each other to limit the development of atmospheric
influence depth on a newly excavated expansive soil slope by restraining the expansive effect.

收稿日期: 2021-12-20

修回日期: 2022-02-21

资助项目: 广西职业教育第二批专业发展研究基地项目“广西职业教育道路桥梁工程技术专业群发展研究基地”(桂教职成[2018]65号)

第一作者: 唐林强(1987—), 男(汉族), 广西壮族自治区全州县人, 硕士, 工程师, 主要从事岩土工程、水利工程方面的研究。Email:
375405084@qq.com.

Keywords: anchor reinforced vegetation system; new excavation of expansive soil slope; atmospheric influence depth; field test

膨胀土具有遇水膨胀、失水收缩的特性,在降雨、蒸发等大气作用下,膨胀土反复胀缩,导致膨胀土的胀缩裂隙不断发育,工程性质发生改变,强度降低,严重威胁到工程的安全^[1]。膨胀土边坡开挖后,在大气作用的影响下,膨胀土边坡的稳定性降低,其边坡破坏也主要集中在大气影响深度范围内^[2]。大气影响深度是指大气作用,由降雨—蒸发、温度等因素引起地基土胀缩变形的有效深度,对膨胀土边坡的变形、应力分布情况等有着重要的意义^[3-4],通过监测气候区土体变形或含水率变化深度、地温变化情况确定^[5]。针对大气影响深度,国内外许多学者开展了研究,赵艳林^[6]运用土体渗流和蒸发理论,建立了大气—非饱和土相互作用模型,用于计算膨胀土地区的大气影响深度;孔令伟^[7]通过现场试验,发现植被能削弱大气作用对膨胀土边坡的影响,减小大气影响深度。除此以外,植被还能减小膨胀土的胀缩作用,提高抗冲刷能力等^[8]。但单一依靠植被对膨胀土进行防护,效果有限。将植被与土工合成材料结合后,极大地提升了防护能力^[9],锚固加强植被系统(anchor reinforced vegetation system, ARVS 系统)便是其中一种。ARVS 系统由高性能植被保护垫(high performance turf reinforcement mats, HPTRM),植被和锚杆组成。HPTRM 一种高强度、高耐久、高韧性的三维土工网。植被的根系会与 HPTRM 紧密缠绕,形成一个承受剪切力的整体^[10-11],在国外广泛应用于堤坝、渠道等水利工程。基于 HPTRM 的高强度,高耐久,抗侵蚀等特点,ARVS 系统被应用于膨胀土边坡的防护,通过限制膨胀土的膨胀作用来保护膨胀土的坡面,目前该方面的研究成果较少。裴圣瑞^[12]首次进行 ARVS 系统加强膨胀岩的模型试验,证实了 ARVS 系统能有效地约束膨胀岩的膨胀作用,限制胀缩裂隙的发展。康春艳^[13]通过模型试验研究了 ARVS 系统防护膨胀边坡时的抗冲刷能力。鲜少华^[14]用模型试验验证了数值模拟 ARVS 系统防护膨胀土坡面的可行性,并探讨了防护膨胀土坡面时的最优参数。上述研究的方法均是模型试验,由于存在尺寸效应^[15],且现场膨胀土边坡地质情况复杂,

受大气作用、地下水等许多因素的影响,模型试验无法完全模拟现场边坡。膨胀土边坡开挖后,大气影响深度随着时间在不断变化。ARVS 系统对新开挖膨胀土边坡大气影响深度的影响尚未可知。同时,ARVS 系统的植被在不断生长,根系逐渐 HPTRM 缠绕形成整体覆盖在坡面,这个过程对大气影响深度的影响目前尚未有人进行研究。因此,运用现场试验的手段,研究 ARVS 系统对新开挖膨胀土边坡大气影响深度的影响具有意义。为此,本文进行新开挖的裸露膨胀土边坡、植草膨胀土边坡、ARVS 系统防护膨胀土边坡的现场试验,记录研究区的气象数据,监测土体含水率、土体温度、锚杆轴力,分析新开挖膨胀土边坡的大气影响深度变化规律,探索 ARVS 系统对膨胀土边坡大气影响深度发展的影响。

1 材料与方 法

1.1 试验场地概况

试验场地位于广西壮族自治区南宁市水牛研究所桥头附近的草场。南宁市属于亚热带季风区,历年降雨丰富,年均降雨量达 1 304.2 mm。边坡是一个向南的缓坡,原坡度约为 $10^{\circ} \sim 18^{\circ}$ 。场地表层覆有 20~40 cm 厚的耕植土。开挖的边坡坡度为 18° ,削坡厚度 0.4 m,移除原有的耕植土。边坡分成 3 种边坡,即裸露边坡、植草边坡、ARVS 系统防护边坡。每种边坡宽 4 m,斜坡长 5.5 m,坡顶设置宽 1 m 的平台。坡顶外围有截水沟,避免雨水对试验区产生影响。边坡的四周用隔墙隔开,防止雨水产生横流现象。

1.2 地层情况

由于在膨胀土上直接种植植被存在一定困难,故在坡面均匀铺设了厚度为 10 cm 的耕植土,所以边坡上的土体剖面主要由 3 层组成,分别为耕植土、红褐色膨胀土、灰白色膨胀土。耕植土由于长年施肥的作用,呈黑色,并伴有一定的异味。红褐色膨胀土和灰白色的膨胀土的裂隙较发育,红褐色膨胀土呈可塑—硬塑状。灰白色膨胀土呈可塑状,黏性强,裂隙面光滑,具有典型膨胀土的特征。各土层的性质详见表 1。

表 1 各层土样基本物理力学性质

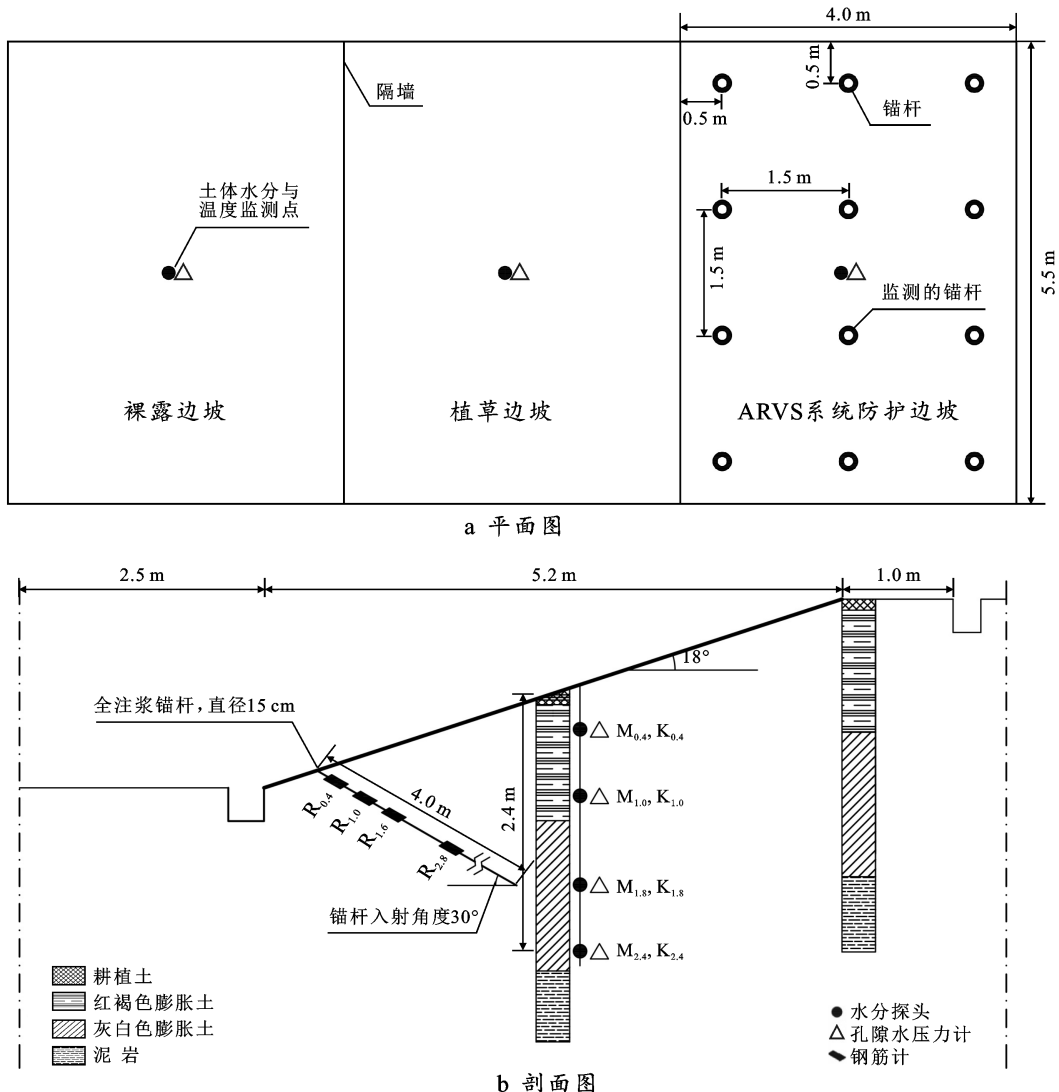
土层名称	厚度/ m	密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	含水率/ %	干密度/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限/ %	塑限/ %	塑性指标	自由膨胀 率/%	饱和渗透系数/ ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$)	胀缩总 率/%
耕植土	0.0~0.1	2.01	15.7	1.74	39.9	14.9	25.0	19.5	45.3	0.52
红褐色膨胀土	0.1~1.2	1.95	25.2	1.56	48.6	19.8	28.8	38.6	6.24	0.78
灰白色膨胀土	1.2~2.5	1.84	32.8	1.39	75.3	26.7	48.6	59.0	1.38	2.23

1.3 ARVS 系统的铺设与监测仪器安装

ARVS 系统防护边坡布置 HPTRM 与锚杆。先对 ARVS 防护边坡进行平整,锚杆的灌浆孔采用洛阳铲进行挖孔。然后铺设厚度为 4 mm 的 HPTRM,将 HPTRM 平铺在坡面,尽量拉直,四周埋入隔墙之下,以固定 HPTRM 边界,随后覆盖 0.1 m 厚的耕植土并种植植被。锚杆的平面布置为 3 列,4 行,共 12 根锚杆,锚杆间距为 1.5 m,外围的锚杆距离隔墙 0.5 m,具体平面布置如图 1a 所示。由于 ARVS 系统主要用于保护膨胀土边坡的浅层破坏,所以使用长度较短的全注浆锚杆。此外,南宁市膨胀土地区的大气影响深度为 3 m^[15-16],锚杆长度必须大于大气影响深度。当锚杆长度为 4 m 时,锚杆已嵌入到强风化泥岩中的。综合以上原因,本文选择了长度为 4 m 的锚杆。根据我国《建筑边坡工程技术规范(GB50330-2013)》规定,锚杆的倾角应为 10°~30°,因此锚杆的

倾角为 30°。故本次现场试验使用长度为 4 m 的全注浆锚杆,锚固体直径为 15 cm,钢筋采用 II 级螺纹钢 Φ18。植草边坡和 ARVS 系统防护边坡播种种植狗牙根和宽叶雀稗,根系主要集中在沿土层深方向下 0~20 cm。每个边坡播撒 500 g 的草籽,两种植被的草籽按 1:1 的比例混合,均匀撒在坡面,铺上薄膜。草本植被在初期生长速度缓慢,当草高大于 3 cm 时,生长速度非常快,为了防止薄膜影响到植被的生长,所以在草长到 3 cm 高时,移除薄膜^[17]。

土体含水率用 MP-406B 水分探头(简称 M)监测,土体温度用 JMZX-5410 孔隙水压力计(K)监测,均埋设在坡中,埋设深度分别为 0.4,1.0,1.8 和 2.4 m。锚杆轴力用 JMZX-418A 智能记忆型钢筋计(R)监测。在锚杆的位置上,分别沿锚头向内的 0.4,1.0,1.6 和 2.8 m 处安装钢筋计,监测仪器的具体布置如图 1b 所示。监测总历时 141 d。



注:图中的 R,M,K 为传感器智能记忆型钢筋计、水分探头和孔隙水压力计的简称,字母后的数字为传感器的埋设深度(单位:m)。

图 1 新开挖膨胀土边坡的布置图

ARVS 现场使用小型气象站监测气象数据,气象站由空气温湿度传感器、风向风速传感器、雨量传感器、蒸发传感器组成(图 2)。

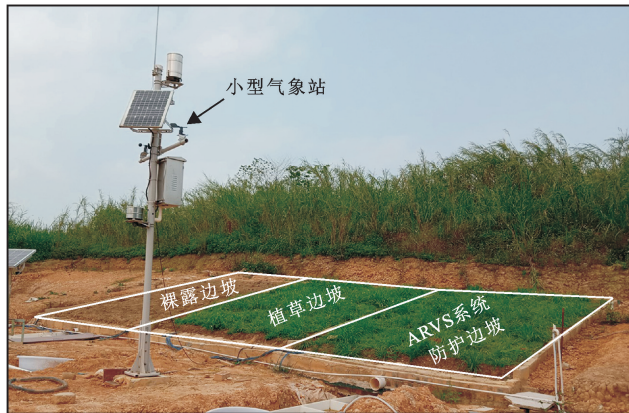


图 2 试验现场布设情况

2 监测结果分析

2.1 气象数据

边坡修筑完成后,经历了由台风引起的暴雨天气(简称 T),历时 2 d,降雨强度分别为 54.6 和 56.8 mm/d,总降雨量为 114.4 mm。后续边坡经历了 3 次持续性降雨,根据时间顺序,分别称为 C₁、C₂ 和 C₃,其

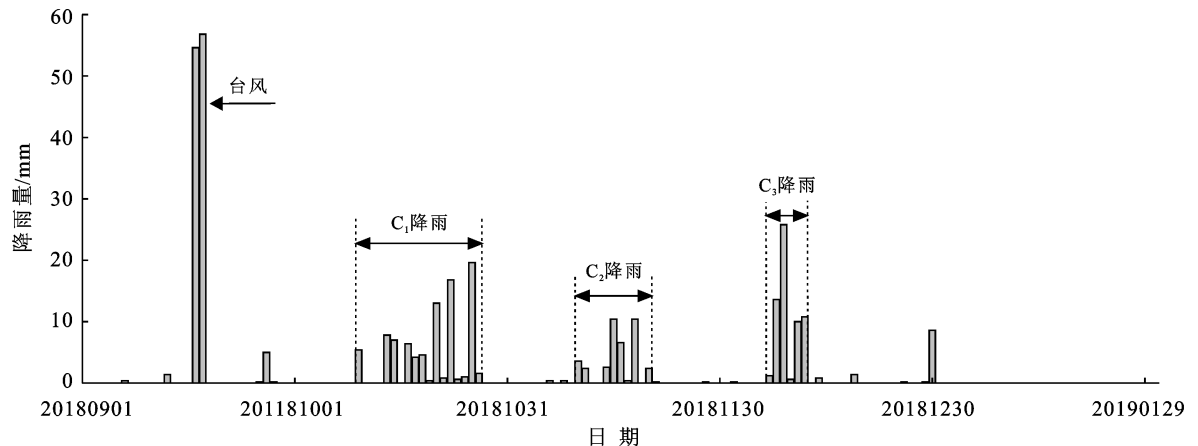


图 3 监测期间的降雨情况

2.2 土体含水率

整理 4 次自然降雨后 3 种边坡的最大土体含水率,减去初始土体含水率,得到变化值,并绘制曲线图(图 5)。

由图 5 可知,3 种边坡深度 0.4 m 和 1.0 m 处含水率变化比较接近,4 次降雨均会导致这两处土体的含水率大幅度变化,变化幅度在 5%~18%。边坡修筑完成 16 d 后,迎来 T 降雨。南宁市 9 月的平均温度

降雨强度为小雨或中雨,4 次降雨的信息详见表 2,降雨数据如图 3 所示。除此以外,边坡还经历过若干次小雨,持续时间短,强度小,对边坡几乎没有影响,所以本文不做讨论。边坡现场监测到的蒸发量与气温数据如图 4 所示。

南宁市属亚热带季风气候。气候炎热潮湿,夏长冬短。边坡修筑完后的 16 d 内,气温较高,蒸发量大。膨胀土迅速失水收缩,出现裂隙。随后膨胀土边坡经历了两天由台风导致的暴雨天气。膨胀土边坡刚开挖,这种气候现象对边坡的稳定性会是一种比较大的威胁。此外,植被在初期极其脆弱,初期便经历了极端天气,对植被的存活率造成了极大的影响,这进一步威胁到边坡的安全。11 月,南宁的气温开始降低,但期间也出现过气温上升的情况,这与南宁地区的气候有关。在此期间,蒸发量明显低于 9 月与 10 月,且降雨也相对较少。

表 2 监测期间的降雨信息

降雨编号	最大降雨强度/ (mm · d ⁻¹)	降雨 历时/d	总降雨量/ mm
T	58.2	2	114.4
C ₁	19.6	14	83.3
C ₂	10.4	11	38.8
C ₃	25.8	6	62.0

约 35 °C,蒸发量高。边坡土体的含水率降低速度快,膨胀土失水收缩,产生裂隙。降雨后,前期边坡土体失水产生的裂隙成为雨水入渗的通道,所以雨水入渗深度大于 1.0 m。可见膨胀土边坡刚开挖后,大气影响深度会迅速发展。该时期,3 种边坡的植被都未发育,仅 ARVS 系统防护边坡有 HPTRM 与锚杆,这说明仅 HPTRM 与锚杆防护边坡时,对土体含水率的影响较小。

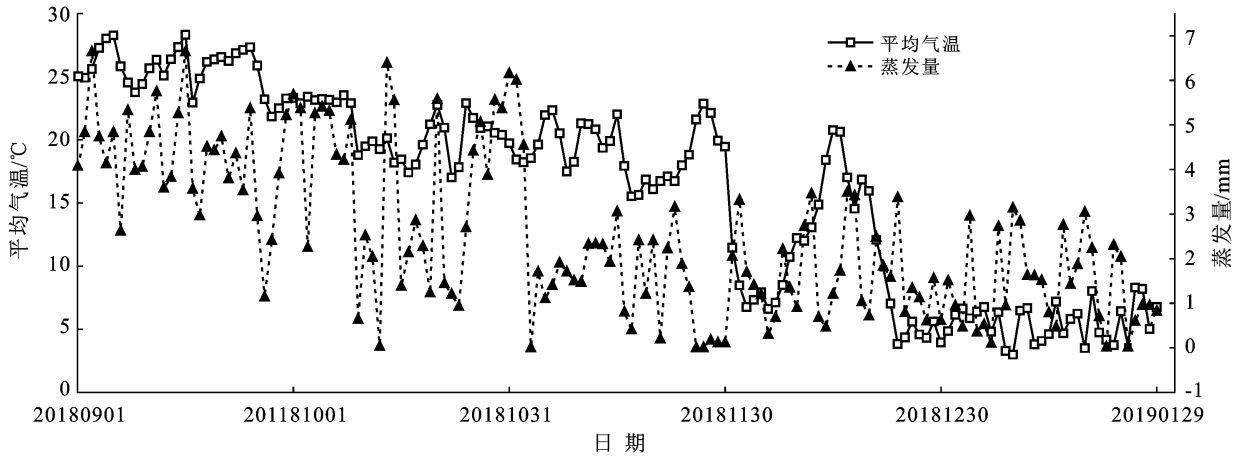


图4 监测期间的平均气温与蒸发量

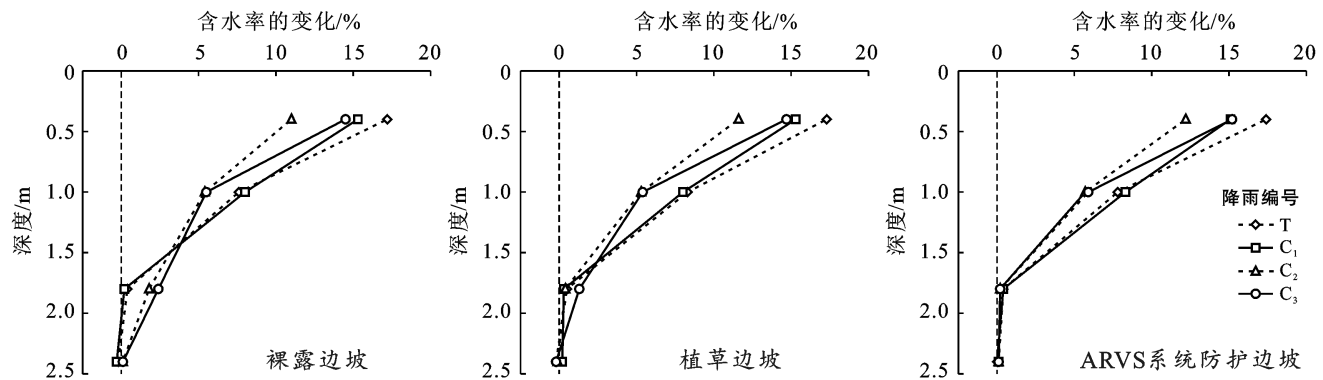


图5 降雨后不同深度的土体含水率变化

膨胀土的饱和渗透系数很低,降雨后浅层的膨胀土迅速吸水膨胀,裂隙闭合,雨水难以向深部入渗^[17]。所以雨水入渗深度的增加需要膨胀土的裂隙向深部发展,而裂隙的发育需要经历反复干湿循环,即大气作用中的降雨—蒸发过程。所以随着后续几次降雨,膨胀土边坡的大气影响深度在向深部发展。根据图7中的含水率变化情况可知,C₂降雨时,裸露边坡由含水率确定的大气影响深度在2.4 m,植草边坡在C₃降雨时,大气影响深度在2.0 m左右,而ARVS系统防护边坡的大气影响深度在监测期间一直小于1.8 m。说明裸露边坡的大气影响深度发展速度最快,而ARVS系统防护边坡最慢。随着时间的推移,边坡表面的植被逐渐生长茂盛,植被护坡的作用开始体现。虽然植被的根系能为雨水增加了入渗通道^[18-19],但根系深度很浅,仅分布在土体的浅层。而根系需要吸收水分,植被的蒸发、蒸腾作用会减小向深部入渗的雨水,阻碍大气影响深度的发展^[20]。此外,植被在一定程度上约束膨胀土的膨胀作用^[21],限制胀缩裂隙的发育,这也影响到大气影响深度的发展。而ARVS系统的HPTRM与植被根系会缠绕形成整体,并通过锚杆固定在坡面,约束膨胀作用的能

力远大于植被^[22-23],胀缩裂隙的发育被限制,加上植被的作用,使得ARVS系统防护边坡的大气影响深度发展速度最慢。

2.3 土体温度

整理监测期间的土体温度数据,得到三种边坡的土体温度曲线(如图6所示)。由图6可知,南宁由夏季进入冬季,气温降低,土体温度也随之降低。夏季期间,深层土体的温度低于浅层土体,冬季则相反。浅层土体的变化比较复杂,浅层土体随气温的变化以外,还会受到降雨的影响。结合降雨数据进行分析,夏季的降雨常会伴随一定的降温。以T降雨为例,由于是台风引起的降雨,气温降低的同时,雨水也会使土体降温,所以在T降雨后,3种边坡的0.4 m与1.0 m处温度均出现减小。此时由于植被已长成,所以3种边坡的土体温度变化情况基本一致,说明边坡的表面仅HPTRM与锚杆时,对土体温度的影响很小。随着时间的推移,边坡经历降雨—蒸发导致的干湿循环后,裂隙向深部发育,大气影响深度也在逐渐向深部发展,裸露边坡与植草边坡的K_{1.8}逐渐开始出现变化,但植草边坡出现的时间较晚,说明植被能阻碍大气影响深度的发展速度,ARVS系统的阻碍作用更显著。

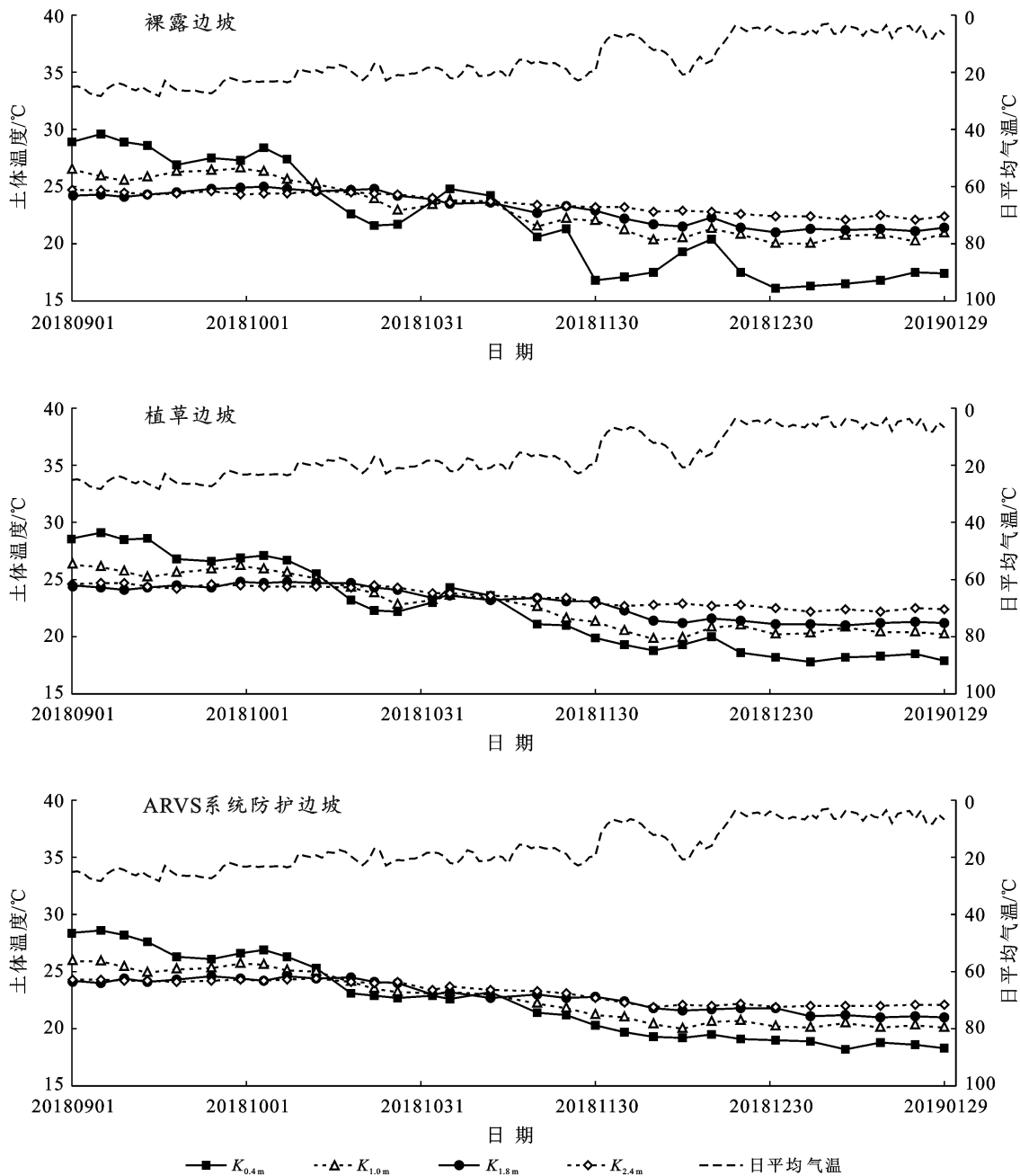


图 6 监测期间不同深度(m) 土体温度(K) 随时间的变化

边坡表面的植被逐渐生长茂盛后, 植被的作用也越来越明显, 除了阻碍大气影响深度的发展外, 还有对浅层土体温度的调控作用。监测后期, 裸露边坡的浅层土体温度的波动幅度明显大于其他边坡, ARVS系统防护边坡的变化幅度最小。植被可以吸收大部分的太阳辐射, 能够阻止到达表土层辐射的 54%~65%, 极大地减少了进入土层使地温升高的热量^[24]。ARVS系统的 HPTRM 与植被形成的整体较高, 覆盖在坡面上, 能在一定程度上阻碍外界变化对土体的影响, 所以 ARVS 系统防护边坡的浅层土体温度变化幅度最小。

2.4 锚杆轴力

整理钢筋应变计的数据, 得到监测期间锚杆轴力的变化曲线(图 7)。轴力为正, 锚杆受拉。轴力为负, 锚杆受压。由图 7 可知, 降雨后, 锚杆轴力随着深度的增加逐渐增大, 达到峰值后减小。这是因为降雨后膨胀土吸水膨胀, 锚固体与膨胀土之间出现相对位移, 产生摩阻力。摩阻力以中性点为界, 锚杆受到向外的摩阻力。中性点以上, 锚杆受到向外的摩阻力。中性点以下, 锚杆受到向内的摩阻力, 中性点的位置锚杆轴力最大。监测前期, 锚杆的中性点在深度为 0.4~1.0 m 的范围内, 随着时间的推移, 移动

到深度为 1.0~1.6 m 范围。说明大气影响深度向深处发展。大气影响深度过大,会导致产生向外摩阻力的范围增大。ARVS 系统的植被与 HPTRM 能限制大气影响深度的发展,帮助锚杆拥有更好的工作效果。

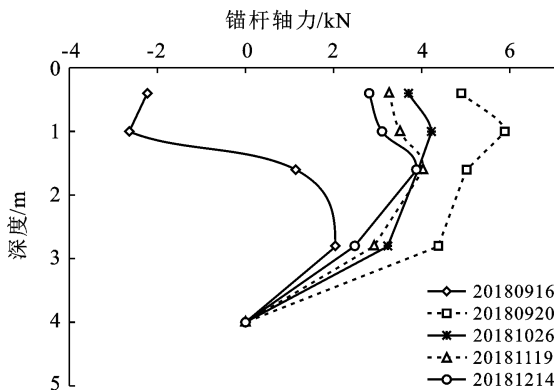


图7 锚杆轴力与深度的关系曲线

3 讨论

膨胀土含水率的增加与减少,会导致膨胀土出现膨胀与收缩,反复的胀缩作用使得裂隙发育,雨水极易沿着裂隙向深部入渗,加深大气影响深度,所以膨胀土的胀缩作用与大气影响深度密切相关。ARVS 系统是通过影响膨胀土的胀缩作用来阻碍大气影响深度发展,ARVS 系统限制膨胀作用主要是通过两方面,一是植被作用,二是 HPTRM 与锚杆的共同作用。

植被能有效限制膨胀变形,这是因为植被根系网的包裹作用能限制膨胀土变形,根系与土体界面的摩擦力抵消和抑制了膨胀土的部分膨胀力,从而限制膨胀作用^[24]。此外,植被的蒸腾、蒸发作用能阻止土体含水率的变化,减小雨水入渗深度,同时植被还具备保水性以及对土体温度的调控能力,在温度较高时,减缓膨胀土失水收缩的速度,限制胀缩裂隙的发育,从而减小大气影响深度的发展。

HPTRM 与锚杆共同工作,能有效限制膨胀土的膨胀作用^[13],使得膨胀土膨胀时变形没有完全释放,失水收缩时,收缩量小,收缩应力较小,所以 HPTRM 与锚杆可以通过约束膨胀变形来限制裂隙的发育^[11]。ARVS 系统防护膨胀土边坡时,坡面会种植植被,ARVS 系统的植被根系与 HPTRM 之间存在连锁作用,两者形成整体^[25],覆盖在膨胀土的表面,进一步约束膨胀土的膨胀作用。与仅植草的边坡相比,ARVS 系统进一步地加强了对膨胀作用的约束能力,对胀缩裂隙发育的限制更强,从而阻碍大气影响

深度的发展。但锚杆的中性点会随着大气影响深度的发展而移动,坡面的植被与 HPTRM 限制了大气影响深度的发展后,会减缓锚杆中性点向深部移动的速度,保证锚杆的工作效果,使 ARVS 系统具有较强的约束膨胀作用的能力。而植被的生长需要时间,选用植被进行防护的膨胀土边坡都需要面临新开挖后植被未长成的问题。由于 ARVS 系统也需要植草,所以在边坡开挖后的初期仅有 HPTRM 与锚杆进行防护,两者通过约束膨胀作用来限制胀缩裂隙的发育。理论上这两者对大气影响深度的发展有一定的影响,但该理论需要反复的干湿循环证实。而本次试验的初期降雨次数少,边坡未进行足够的干湿循环,所以无法看出两者对边坡大气影响深度有着直接影响。植被长成后,HPTRM、锚杆、植被三者共同作用,共同阻碍大气影响深度。

4 结论

(1) 降雨后,三种边坡浅层土体的含水率变化趋势基本一致,增幅在 5%~18% 内,深层土体的含水率出现变化的时间不同,裸露边坡出现的时间最早,ARVS 系统防护边坡最晚。边坡浅层土体温度受外界影响大,裸露边坡土体温度变化幅度最大,植被能在一定程度上调控土体温度,所以植草边坡的变化幅度小于裸露边坡,而 ARVS 系统的调控能力最强。

(2) 随着时间的推移,裸露边坡的大气影响深度发展最快,两个降雨期后,大气深度就已经发展到了 2.4 m 左右;ARVS 系统防护边坡的发展最慢,多次降雨后,大气影响深度依旧小于 1.8 m。

(3) ARVS 系统能约束膨胀作用,限制胀缩裂隙的发育,再加上植被作用,且植被的根系会与 HPTRM 缠绕形成整体,多种作用下,ARVS 系统能有效地阻碍大气影响深度向内部发展。

(4) 大气影响深度向深部发展后,ARVS 系统锚杆的中性点向土体深部移动。坡面的植被与 HPTRM 能使减缓这种移动,保证 ARVS 系统约束膨胀作用的能力。

[参 考 文 献]

- [1] 胡东旭,李贤,周超云,等.膨胀土干湿循环胀缩裂隙的定量分析[J].岩土力学,2018,39(S1):318-324.
- [2] 范晓洁,杨茜,李栋.大气影响带对膨胀土边坡稳定的影响及对策[J].水利水电技术,2016,47(5):46-48.
- [3] 王向阳,余学林,宋辉,等.埃塞俄比亚黑棉土路基换填深度及处置技术研究[J].公路,2017,62(3):7-12.
- [4] 翟聚云,郝晓,马明江,等.大气影响下平顶山膨胀土地表蒸发研究[J].冰川冻土,2019,41(2):342-349.

- [5] 赵平,徐正宣,唐林,等.埃塞俄比亚黑棉土胀缩特性及大气影响深度研究[J].铁道工程学报,2014,31(4):46-50.
- [6] 赵艳林,曾召田,吕海波.大气作用下膨胀土地基的水分迁移与胀缩变形分析[J].防灾减灾工程学报,2011,31(6):659-665.
- [7] 孔令伟,陈建斌,郭爱国,等.大气作用下膨胀土边坡的现场响应试验研究[J].岩土工程学报,2007,29(7):1065-1073.
- [8] 郑硕,黎凤林,杨超炜.特殊土边坡的植被防护工程及景观研究[J].公路工程,2020,45(5):234-238.
- [9] Likitlersuang S, Kounyou K, Prasetyaningtiyas G A. Performance of geosynthetic cementitious composite mat and vetiver on soil erosion control [J]. Journal of Mountain Science, 2020, 17(6): 1410-1422.
- [10] Pan Yi, Chen Yongping, Zhang Tongxin, et al. Laboratory study on erosion of vegetated HPTRM system under high-speed open-channel flow [J]. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 2017, 144(1): 04017038.
- [11] Yuan Saiyu, Tang Hongwu, Li Lin, et al. Overtopping erosion and failure mechanism of earthen levee strengthened by vegetated HPTRM system [J]. Ocean Engineering, 2015, 96: 139-148.
- [12] 裴圣瑞.新型锚固加强植被系统加固南宁膨胀岩的试验研究[D].广西南宁:广西大学,2014.
- [13] 康春艳.南宁膨胀岩边坡高性能植被保护垫系统冲刷试验研究[D].广西南宁:广西大学,2016.
- [14] 鲜少华.锚固加强植被系统防护膨胀土边坡坡面效果的研究[D].广西南宁:广西大学,2016.
- [15] Mehrjardi G T, Behrad R, Tafreshi, S N M. Scale effect on the behavior of geocell-reinforced soil [J]. Geotextiles and Geomembranes, 2019,47(2): 154-163.
- [16] 侯兆霞.特殊土地基[M].北京:中国建筑工业出版社,2007.
- [17] 肖衡林,张晋锋.三维土工网垫固土植草试验研究[J].公路,2005(4):163-166.
- [18] Ng C W W, Zhan L T, Bao C G, et al. Performance of anunsaturated expansive soil slope subjected to artificial rainfall infiltration [J]. Geotechnique, 2003, 53 (2): 143-157.
- [19] Guo WenZhao, Chen ZhuoXin, Wang Wenlong, et al. Telling a different story: The promote role of vegetation in the initiation of shallow landslides during rainfall on the Chinese Loess Plateau [J]. Geomorphology, 2020, 350: 106879.
- [20] Xie Canrong, Ni Pengpeng, Xu Meijuan, et al. Combined measure of geometry optimization and vegetation for expansive soil slopes[J]. Computers and Geotechnics, 2020, 123: 103588.
- [21] 李润发,王桂尧,张永杰,等.种植香根草根系对膨胀土特性影响的试验研究[J].公路交通科技,2020,37(5): 43-52.
- [22] 鲜少华,许英姿,姚海林,等.锚固加强植被系统约束膨胀土变形模型试验研究[J].岩土力学,2017,38(S1): 158-166.
- [23] 周婷,张寅生,高海峰,等.青藏高原高寒草地植被指数变化与地表温度的相互关系[J].冰川冻土,2015,37(1):58-69.
- [24] Wang Guiyao, Huang Yonggang, Li Runfa, et al. Influence of vetiver root on strength of expansive soil-experimental study [J]. PLoS One, 2020, 15(12): e0244818.
- [25] Tan Huiming, Chen Fumao, Chen Jia, 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.

(上接第 134 页)

- [22] 张克存,屈建军,俎瑞平.下垫面条件对风沙活动层气流紊动性影响的风洞模拟[J].水土保持通报,2004,24(3):1-4.
- [23] 何志辉,李生字,王海峰,等.塔克拉玛干沙漠 4 种结构尼龙阻沙网的防风阻沙效益对比[J].干旱区研究,2014,31(2):369-374.
- [24] 闫德仁,袁立敏,黄海广,等.直压立式纱网沙障对近地表输沙量及风速的影响[J].中国沙漠,2020,40(2): 79-85.
- [25] 袁立敏,黄海广,闫德仁,等.不同沙埋程度下带状沙障的防风固沙效果研究[J].农业工程学报,2019,35(16): 172-179.
- [26] 杜鹤强,薛嫻,孙家欢.乌兰布和沙漠沿黄河区域下垫面特征及风沙活动观测[J].农业工程学报,2012,28(22):156-165.
- [27] 闫德仁.沙漠化土地综合治理技术研究[M].内蒙古呼和浩特:内蒙古大学出版社,2019.