

紫色土坡耕地埂坎水分衰减下土压力非线性分布

罗华进^{1,2}, 韦杰^{1,2}, 孙宇辉²

(1. 重庆师范大学 地理与旅游学院, 重庆 401331; 2. 三峡库区地表过程与环境遥感重庆市重点实验室, 重庆 401331)

摘要: [目的] 揭示紫色土坡耕地埂坎土压力分布特征及其影响因素, 为三峡库区乃至长江上游地区的紫色土坡耕地埂坎优化设计、建设与维护提供科学依据。[方法] 采用土槽模拟试验, 向土槽注水至土壤基本饱和, 使用静态应变仪分层采集土压力, 采用烘干法测量各层土壤水分含量, 分析土壤水分衰减过程中土压力变化特征。[结果] ① 土压力随着土层深度的增加呈非线性分布, 表现为土压力先随着土层深度的增加而增大, 在距离试验土槽底部 0.375 H 左右达到最大, 然后又随着土层深度的增加而减小。② 试验条件下, 土壤水分饱和后随着时间的变化呈近似线性衰减, 并对土压力产生了显著影响 ($p < 0.01$), 但不同土层间存在一定差异。③ 土层深度和土壤水分含量的交互效应对土压力的影响显著 ($p < 0.01$)。[结论] 三峡库区紫色土坡耕地埂坎土压力呈非线性分布, 土层深度和土壤水分含量及其交互效应对埂坎土压力均存在显著影响。

关键词: 土压力; 埂坎; 坡耕地; 紫色土; 三峡库区

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0149-06

中图分类号: K903, S157.2

文献参数: 罗华进, 韦杰, 孙宇辉. 紫色土坡耕地埂坎水分衰减下土压力非线性分布[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 149-154. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.022; Luo Huajin, Wei Jie, Sun Yuhui. Non-linear distribution of soil pressure under water attenuation on purple soil sloping farmland bunds[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 149-154.

Non-linear Distribution of Soil Pressure Under Water Attenuation on Purple Soil Sloping Farmland Bunds

Luo Huajin^{1,2}, Wei Jie^{1,2}, Sun Yuhui²

(1. School of Geography and Tourism Science, Chongqing Normal University, Chongqing 401331, China; 2. Chongqing Key Laboratory of Surface Process and Environment Remote Sensing in the Three Gorges Reservoir Area, Chongqing 401331, China)

Abstract: [Objective] The distribution characteristics of soil pressure on purple soil sloping farmlands bunds and its influencing factors were studied in order to provide basis for the optimal design, construction and maintenance of the purple soil sloping farmland bunds in the Three Gorges reservoir area and the upper reaches of the Yangtze River. [Methods] Using soil bin simulation test, water was injected into the soil bin until the soil was basically saturated. Soil pressure was determined by static strain gauge, and soil moisture content was measured by drying method to analyze the variation characteristics of soil pressure under water attenuation. [Results] ① The soil pressure presented a nonlinear distribution with the increase of soil depth, which showed that the soil pressure initially increased with the increase of soil depth, reached the maximum at about 0.375 H from the bottom of the test device, and subsequently decreased with the increasing soil depth. ② Under the experimental conditions, the change of soil moisture content presented an approximate linear attenuation with time, and had a significant impact on the soil pressure ($p < 0.01$), but there were some differences among different soil layers. ③ The interaction effect of soil depth and soil moisture content

收稿日期: 2019-06-12

修回日期: 2019-08-17

资助项目: 重庆市杰出青年科学基金“三峡库区坡耕地埂坎优势流及失稳判据研究”(cstc2019jcyjX0025); 重庆市教委科技项目“紫色土坡耕地埂坎裂隙发育及其失稳机制研究”(KJZD-K201800502)

第一作者: 罗华进(1990—), 男(土家族), 贵州省沿河县人, 硕士研究生, 研究方向为水土保持与生态建设。E-mail: luohuajin0928@163.com。

通讯作者: 韦杰(1979—), 男(汉族), 四川省苍溪县人, 博士, 教授, 硕士生导师, 主要从事土壤侵蚀与水土保持方面的研究。E-mail: wei_jie@mails.ucas.ac.cn。

on soil pressure was significant ($p < 0.01$). [Conclusion] The distribution of soil pressure show a non-linear trend on purple-soil sloping farmlands bunds in the Three Gorges reservoir area, the soil depth, soil moisture content and their interactive effects have significant effects on the soil pressure.

Keywords: soil pressure; bunds; sloping farmlands; purple soil; the Thres Gorges reservoir

埂坎通过拦截地表径流和泥沙调控坡耕地土壤侵蚀,在山区水土流失治理中得到了广泛应用并取得了良好效果^[1-2]。埂坎稳定性是其发挥水土保持作用的前提,埂坎规格、筑坎材料、管护措施等是影响埂坎稳定性的重要因素。埂坎的稳定性系数随着高度的增加和外边坡坡度变陡均呈减小趋势,但二者的交互效应对埂坎的稳定性没有显著影响^[3]。植物篱能显著提高埂坎稳定性,具有较好的水土保持效果和经济效益^[4]。在紫色土区坡耕地构建生物埂能稳定土壤结构,抵抗降雨侵蚀,从而提高埂坎稳定性达到水土保持的效果^[5]。调查表明,三峡库区埂坎破坏形式有剥落、坍塌、鼓胀等,这些破坏形式除了受降雨、地面坡度和修筑质量影响外,还与土压力的影响有关。然而,影响土压力因素众多,包括土壤含水率、容重和坡度等。土壤含水率大,会增加土体重度和降低土体抗剪强度,从而导致土压力增大^[6-7]。土壤容重影响土壤透气性、持水性和入渗性能等,土壤容重不同,土壤入渗性能、持水性等均不同,土压力也有差异^[8]。在地面坡度相同、埂坎高度相等的条件下,坡度越大,填方土体越多,土体重度增加,导致土压力增大^[9]。

三峡库区紫色土坡耕地埂坎类型多样,其中土坎因其生态适宜、造价低、农民接受意愿高等优点,占比较大,超过了 65%^[10],但库区雨量充沛、降雨集中,土坎容易垮塌。当前,有关埂坎的研究主要集中在生物埂的构建技术与效益评价^[11-12]方面。有关紫色土坡耕地埂坎土压力分布及其影响因素报道较少,埂坎规划设计、建设缺乏依据。本文以紫色土坡耕地埂坎为研究对象,通过土槽模拟试验,分析埂坎土压力分布特征以及土壤水分含量对土压力的影响,以明确紫色土坡耕地埂坎土力学特征,为三峡库区乃至长江上游紫色土坡耕地整治等工程中埂坎优化设计、建设和维护提供依据。

1 材料与方 法

1.1 试验装置

利用规格为 280 cm × 50 cm × 80 cm (长 × 宽 × 高) 的试验土槽模拟埂坎土压力分布 (图 1)。试验土槽置于 15° 坡面上,土槽的底板预留出水口便于排水。为方便试验,将埂坎与坡耕地结构进行简化,以垂直试验土槽长度方向下端面模拟埂坎截面,用截面应力反映紫色土坡耕地土体对埂坎的压力。土压力监测器件采用江苏省丹阳市龙宇土木工程仪器厂生产的 LY-350 应变式微型土压力盒,其规格 28 mm × 10 mm (直径 × 高),量程 0~50 kPa,为保证土压力盒自身稳定、便于掩埋和操作,将土压力盒以 10 cm 为间隔固定在规格为 80 cm × 9 cm (长 × 宽) 的防腐型硬质木板中心线上,然后将该木板紧贴在垂直试验土槽长度方向下端面内壁正中间并固定。土压力盒周围回填颗粒较细且均匀的土壤,避免粗颗粒之间的空隙对数据采集造成影响,其余部分则回填坡耕地埂坎后方原状土,基本物理性质详见表 1。土压力盒与静态应变仪间的数据传输线套在 PVC 软管内,以免被外力破坏影响监测数据传输。数据采集终端为武汉优泰电子技术有限公司生产的 uT7110Y 静态应变仪。

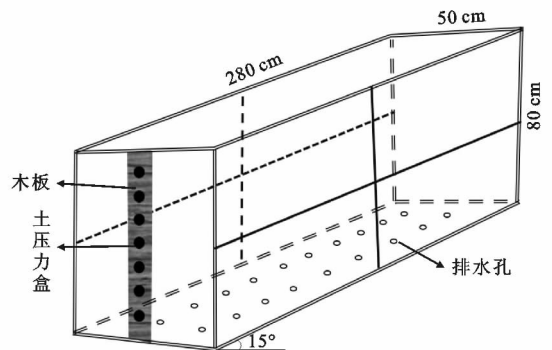


图 1 试验土槽示意图

表 1 供试土壤基本物理性质

土壤类型	容重/ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	总孔隙度/ %	颗粒组成/%		
			黏粒 ($< 0.002 \text{ mm}$)	粉粒 ($0.002 \sim 0.05 \text{ mm}$)	砂粒 ($> 0.05 \sim 2 \text{ mm}$)
紫色土	1.33 ± 0.25	50.60 ± 0.91	7.20 ± 0.75	41.64 ± 2.11	51.17 ± 2.85

注:表中数值为均值±标准误。

1.2 试验设计

待试验土槽中回填土沉降基本稳定后于 2018 年

3 月中旬开始试验,直到土壤水分含量基本稳定后停止监测,每 24 h 监测 1 次,共监测 10 d。试验前向土

槽注水至底部有水流出,认为此时的土体已达到饱和状态,然后用塑料膜盖住试验土槽,浸润 48 h,以保证水分均匀分布。试验期间,为了有效控制土壤水分含量,下雨天用遮雨棚将试验土槽遮挡。以 10 cm 为间隔,分层监测 0—70 cm 土压力及土壤水分含量。监测时,将土压力盒传输线接头与静态应变仪连接好后预热 30 min,待仪器稳定,每 10 min 采集 1 次,连续采集 3 次。每次土压力数据采集完成后,在试验土槽中部垂直于土槽长度方向的直线上选取采样点,用土钻采集与土压力监测点所对应土层的土壤,装入自封袋带回实验室立即称重。称重时各土层取 3 个重复土样,每个土样称 30 g,用烘干法测量土壤水分含量。土壤水分含量测量完成后,为了减小重复采集土样对试验的影响,将自封袋内的余土原位回填到试验土槽中。

2 结果与分析

2.1 埂坎土压力与土壤水分含量

试验条件范围内,各层土壤水分含量均随时间增加而减小(图 2)。从垂直深度上看,0—30 cm 各层土

壤水分含量变化相比其余土层变化更显著,这是因为 0—30 cm 受气温等外界因素影响较大,而 30—70 cm 土壤水分含量变化主要受土壤自身性质的影响。其中,0—10 cm 层土壤水分含量从 25.5% 衰减到 15.2%,减幅达到 40%,而 50—60 cm 层则从 22.6% 减为 21%,减幅较小。从时间上看,各层土壤水分含量差异逐渐增大,第 7 d 的均值变异系数最大,为 0.09,第 3 d 最小,为 0.02。同样,0—30 cm 各层土壤水分衰减率也大于其余土层。各层土壤水分衰减率均呈现出先增加后趋于稳定,试验前 7 d 各层土壤水分含量平均衰减率变化幅度较大,而试验后 3 d 变化幅度相对较小。各层土压力也随时间增加而减小(图 2),但各层间的变化存在差异,50—70 cm 各层土压力平均衰减率大于其余土层平均衰减率且变化相对稳定。从不同时段来看,试验前 7 d 各层土压力平均衰减率变化幅度较大,试验后 3 d 各层土压力平均衰减率变化幅度相对较小且平均衰减率较为接近。这与土壤水分含量平均衰减率在不同时段变化基本一致,表明土壤水分含量变化引起了土压力变化。

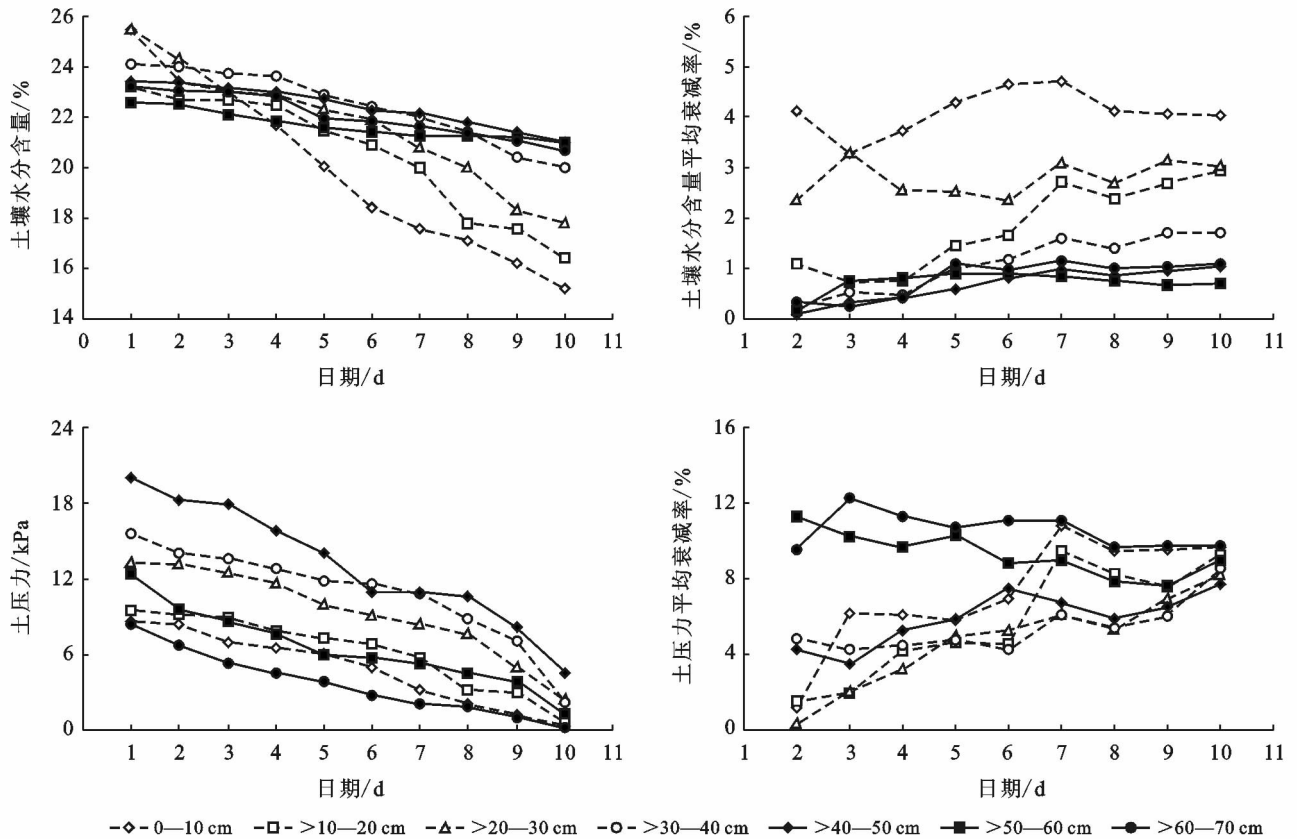


图 2 各层土壤水分含量与土压力随时间的变化

为了定量分析土壤水分含量与土压力的关系,以各层土壤水分含量为自变量,土压力为因变量,进行线性回归分析,并得出土壤水分含量与土压力的线性回归方程(表 2)。

由表 2 可看出,除 60—70 cm 层外,其余土层土压力与土壤水分含量回归方程的判定系数 R^2 均大于 0.85, p 值均小于 0.01。表明在试验条件下,土压力与土壤水分含量之间存在显著的线性相关。

表 2 各层土压力与土壤水分含量的回归分析结果

土层深度/cm	回归方程	R^2	p 值
0—10	$y = -10.932 + 0.802x$	0.863	0.000
10—20	$y = -18.603 + 1.201x$	0.984	0.000
20—30	$y = -21.277 + 1.411x$	0.931	0.000
30—40	$y = -45.720 + 2.519x$	0.897	0.000
40—50	$y = -116.416 + 5.775x$	0.964	0.000
50—60	$y = -109.657 + 5.357x$	0.909	0.000
60—70	$y = -49.251 + 2.402x$	0.582	0.006

2.2 埂坎土压力与土层深度

总体而言, 试验期间土压力随着土层深度的增加均呈先增后减非线性分布(图 3)。0—50 cm 各层土压力随着土层深度的增加而增大, 在 40—50 cm 层达到最大 13.14 kPa, 为其余土层的 1.9 倍, 50—70 cm 各层随着土层深度的增加而减小, 在 60—70 cm 层减至最小, 仅为 40—50 cm 层的 56%。具体来看, 试验时段内土压力随着时间的变化分布曲线倾斜程度逐渐变小, 这可能与土壤水分含量大小有关。当土壤水分含量大时, 土壤内摩擦角小, 作用于垂直试验土槽长度方向下端内壁的外摩擦角大, 而外摩擦角与曲线倾斜程度成正比, 相反, 随着土壤水分含量衰减, 土壤内摩擦角逐渐增大, 作用于试验土槽下端内壁的外摩擦角逐渐变小, 从而使曲线倾斜程度变小^[13]。此外, 土压力合力作用点随着时间的变化基本保持不变, 稳定在距试验土槽底部 0.375 H 左右。

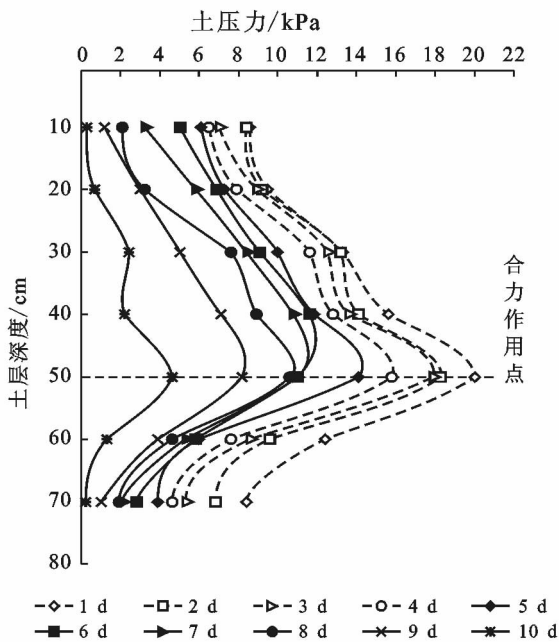


图 3 土压力随土层深度增加分布特征

2.3 土壤水分含量和土层深度与土压力响应面分析

运用多因素方差分析研究土壤水分含量和土层

深度及其二者间交互效应对土压力的影响, 以确定主效应和交互效应。并以土壤水分含量 w 和土层深度 h 为自变量, 土压力为响应值进行回归分析建立响应模型, 结果详见表 3。

表 3 土壤水分含量和土层深度与土压力的方差分析结果

变差来源	平方和	自由度	均方差	F 值	p 值
模型	1 268.38	5	253.68	75.25	0.000
h	175.11	1	175.11	51.94	0.000
w	513.17	1	513.17	152.23	0.000
$h \times w$	188.34	1	188.34	55.87	0.000
h^2	308.73	1	308.73	91.58	0.000
w^2	6.89	1	6.89	2.04	0.157
残差	215.75	64	3.37		
总变异	1 484.13	69			

注: w 土壤水分含量; h 土层深度。

土壤水分含量 w 和土层深度 h 以及二者的交互效应 $w \cdot h$ 的概率 p 值均小于 0.01, 表明土壤水分含量和土层深度以及二者交互效应对土压力的影响显著。二次项 h^2 和 w^2 两影响因素的概率 p 值分别为 0.000, 0.157, 表明 h^2 对土压力的影响显著, w^2 对土压力的影响则不显著, 不能写入响应模型。最终得到的土压力 P 的响应模型为公式(1)。

$$P = -24.815 - 0.992h + 2.715w + 0.066hw - 6.418h^2 \quad (\bar{R}^2 = 0.84, n = 70) \quad (1)$$

从表 3 可见, 土压力 P 对土壤水分含量 w 和土层深度 h 的响应模型式(1)显著 ($p < 0.01$)。土壤水分含量和土层深度两个响应因子构成的响应曲面如图 4 所示, 土层深度一定时, 土压力随土壤水分含量衰减而减小, 土壤水分含量一定时, 土压力随土层深度先增大后减小, 这与前述规律一致。

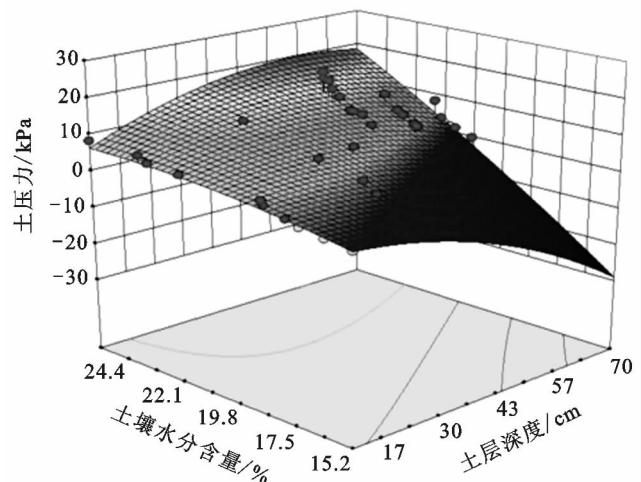


图 4 土壤水分含量和土层深度与土压力的响应面

3 讨论

埂坎土压力大小和分布受多种因素影响,其中,土壤水分含量是重要的影响因素之一。本研究表明,试验条件下土壤水分含量饱和后呈近似线性衰减并对土压力影响显著($p < 0.01$),这与杨果林^[14]等人的研究结果相似。这是由于土壤水分含量的大小,会影响土体自重、抗剪强度和膨胀性等,与垂直试验土槽长度方向下端内壁产生的内向水平摩擦力不同,而对土压力的影响有所差异。我们对不同类型的挡墙土压力分布特征进行了汇总(表4),挡土墙、桥台台背和模型箱的土压力均随土层深度的增加呈先增后减分布特征^[15-20],这与本研究中土压力随土层深度增加呈先增后减的分布特征的研究结果一致,因为试

验土槽下端内壁与填土接触面存在着剪应力,剪应力的方向垂直向上,将会平衡一部分土体自重应力,从而使土压力减小^[20]。同时,还可能与底部土体和试验土槽底板间存在着摩擦阻碍作用有关,摩擦阻碍作用导致越接近试验土槽底部,土体向试验土槽下端内壁的侧向位移越小,从而使土压力逐渐减小。此外,本研究中土压力合力作用点在距试验土槽底部约0.375 H左右处,这与肖衡林等^[17]研究结果基本一致。

需要说明的是,土压力分布复杂且影响因素多。本研究运用自行研制的试验土槽模拟埂坎土壤水分衰减下土压力分布,并分析土壤水分含量、土层深度及其交互效应对土压力的影响。这与实际情况存在一定差异,后续研究中,应注重原位监测研究埂坎土压力分布及其形成机理。

表4 不同类型挡墙土压力分布特征

挡墙类型	高度/m	土壤性质				分布特征	合力作用点	来源
		供试材料	$\rho_d / (g \cdot cm^{-3})$	c / kPa	$\varphi / (^\circ)$			
桥台台背	8	级配碎石加3%水泥	2.1	—	33	随着深度增加先增大后减小	距桥台底部0.41 H处	陈雪华等 ^[15]
挡土墙	2,2.5,3,3.5,4	—	—	—	—	随着深度的增加先增大后减小	均距墙底0.33 H左右处	Paik ^[16]
挡土墙	8	粉质黏土	—	47	31.5	随着深度增加,土压力先增大后减少	距墙底0.38 H处	肖衡林等 ^[17]
桩板墙	2	冲洪积土	—	—	28	呈抛物线型分布	位于墙背中下部	董捷等 ^[18]
模型箱	0.665	钢棒相似土	6.5	—	28.2	随深度先增大后减小	距墙底0.2 H处	芮瑞等 ^[19]
古海塘塘背	4	轻质土	—	17	21.2	中间大、两端小	距墙底0.42~0.49 H处	郑焯等 ^[20]
试验土槽	0.8	紫色土	1.33	—	—	随着深度的增加先增大后减小	距底部0.375 H处	本研究

注:表中“—”表示无数据, ρ_d 为干密度, c 为黏聚力, φ 为内摩擦角。

4 结论

(1) 紫色土坡耕地埂坎土压力呈非线性分布,0—50 cm各层土压力随着土层深度的增加而增大,50—70 cm各层土压力随着深度的增加而减小,土压力合力作用点在距试验土槽底部0.375 H左右处。

(2) 试验条件下,土壤水分含量饱和后呈近似线性衰减,并对土压力产生了显著影响($p < 0.01$),但不同土层间存在一定差异。

(3) 土层深度和土壤水分含量的交互效应对土压力影响显著($p < 0.01$)。

[参考文献]

- [1] Teshome A, Rolker D, Graaff J D. Financial viability of soil and water conservation technologies in Northwestern Ethiopian highlands[J]. Applied Geography, 2013, 37(1):139-149.
- [2] Taye G, Poesen J, Vanmaercke M, et al. Evolution of the effectiveness of stone bunds and trenches in reducing

runoff and soil loss in the semi-arid Ethiopian highlands [J]. Zeitschrift Fur Geomorphologie, 2015, 59(4): 477-493.

- [3] 李进林,韦杰,贺秀斌.紫色土坡耕地不同规格土坎稳定性分析[J].中国水土保持科学,2018,16(5):1-9.
- [4] 陈雪,蔡强国,王学强.典型黑土区坡耕地水土保持措施适宜性分析[J].中国水土保持科学,2008,6(5):44-49.
- [5] 汪三树,史东梅,蒋光毅,等.紫色丘陵区坡耕地生物埂的土壤结构稳定性与抗蚀性分析[J].水土保持学报,2012,26(6):31-35.
- [6] 赵晓中,潘东兴,刘福臣,等.刚性挡土墙主动土压力的计算通式及影响因素分析[J].山东农业大学学报:自然科学版,2003,34(4):548-552.
- [7] 赵吉坤,温娇娇.填土含水率对挡土墙土压力影响的试验分析[J].土木建筑与环境工程,2012,34(S2):155-160.
- [8] 宋自影,王飞.水分入渗对土壤内部综合压力影响的试验研究[J].农机化研究,2012,34(7):191-195.
- [9] 朱建强.陕南土坎梯田垮坎的原因分析及防治对策[J].

- 水土保持通报,1994,14(3):44-47.
- [10] 李进林,韦杰. 三峡库区坡耕地埂坎类型、结构与利用状况[J]. 水土保持通报,2017,37(1):229-233.
- [11] 蒲玉琳,谢德体,倪九派,等. 紫色土区坡耕地植物篱模式综合生态效益评价[J]. 中国生态农业学报,2014,22(1):44-51.
- [12] Amare T, Zegeye A D, Yitaferu B, et al. Combined effect of soil bund with biological soil and water conservation measures in the Northwestern Ethiopian highlands[J]. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 2014, 14(3):192-199.
- [13] 彭述权,周健,樊玲,等. 考虑土拱效应刚性挡墙土压力研究[J]. 岩土力学,2008,29(10):2701-2707.
- [14] 杨果林,黄向京. 不同气候条件膨胀土路堤土压力的变化规律试验研究[J]. 岩土工程学报,2005,27(8):948-955.
- [15] 陈雪华,律文田,王永和. 桥台台背土压力的试验研究[J]. 岩土力学,2006,27(8):1407-1410.
- [16] Paik K H, Salgado R. Estimation of active earth pressure against rigid retaining walls considering arching effects[J]. *Geotechnique*, 2003,53(53):643-653.
- [17] 肖衡林,余天庆. 山区挡土墙土压力的现场试验研究[J]. 岩土力学,2009,30(12):3771-3775.
- [18] 董捷,张永兴,黄治云. 柔性板桩板墙加固斜坡填方地基的土压力分配问题研究[J]. 岩土力学,2010,31(8):2489-2495.
- [19] 芮瑞,叶雨秋,陈成,等. 考虑墙壁摩擦影响的挡土墙主动土压力非线性分布研究[J]. 岩土力学,2019,40(5):1797-1804.
- [20] 郑焯,陈振华,张开伟,等. 不同填料下钱塘江古海塘塘背土压力现场试验研究[J]. 岩土力学,2014,35(6):1623-1628.

(上接第 148 页)

- [13] Wackernagel M, Rees W E. Perceptual and structural barriers to investing in natural capital: Economics from an ecological footprint perspective [J]. *Ecological Economics*, 1997,20(1):3-24.
- [14] 刘东,封志明,杨艳昭. 基于生态足迹的中国生态承载力供需平衡分析[J]. 自然资源学报,2012,27(4):614-623.
- [15] 潘洪义,朱晚秋,崔绿叶,等. 成都市人均生态足迹和人均生态承载力空间分布差异[J]. 生态学报,2017,37(19):6335-6345.
- [16] 哈斯巴根,李百岁,宝音,等. 区域土地资源人口承载力理论模型及实证研究[J]. 地理科学,2008,28(2):189-194.
- [17] 刘钦普,林振山,冯年华. 土地资源人口承载力动力学模拟和应用[J]. 南京师大学报:自然科学版,2005,28(4):114-118.
- [18] 封志明,杨艳昭,游珍. 雄安新区的人口与水土资源承载力[J]. 中国科学院院刊,2017,32(11):1216-1223.
- [19] 郝庆,封志明,杨艳昭,等. 西藏土地资源承载力的现实与未来:基于膳食营养当量分析[J]. 自然资源学报,2019,34(5):911-920.
- [20] 闫峰,吴波. 近 40 年毛乌素沙地荒漠化过程研究[J]. 干旱区地理,2013,36(6):987-996.
- [21] 封志明. 土地承载力研究的过去、现在与未来[J]. 中国土地科学,1994,8(3):1-9.
- [22] 翟凤英,王惠君,王志宏,等. 中国居民膳食营养状况的变迁及政策建议[J]. 中国食物与营养,2006(5):4-6.