

陕南土石山区坡改梯对坡面稳定性的影响

程圣东, 杭朋磊, 李 鹏, 成玉婷, 郭梦京

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 西安 710048)

摘 要:梯田是土石山区水土流失治理的主要措施。以陕南土石山区为研究对象, 研究坡耕地改建成梯田后对坡面整体稳定性的影响, 采用实地调查取样、室内试验和软件分析相结合的方法, 分析了坡改梯前后梯田土层厚度、田坎坡度以及田面宽度对梯田坡面稳定性的影响。结果表明: (1) 15°坡面修建梯田后坡面安全系数降低了 45%, 25°坡面修建梯田后坡面安全系数降低了 73%, 15°坡面修建梯田稳定性优于 25°坡面; (2) 在相同的坡长和坡度下, 修建梯田后坡面安全系数与土层厚度成正比, 与田坎坡度和田面宽度成反比。研究结果可为土石山区梯田的断面布局提供理论依据。

关键词:土石山区; 水土保持; 坡改梯; 稳定性; 断面布局

中图分类号: S157.3⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2018)05-0157-05

Effects of Terracing on the Slope Stability in the Rocky Mountain Area of Southern Shaanxi Province

CHENG Shengdong, HANG Penglei, LI Peng, CHENG Yuting, GUO Mengjing

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of
China, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: Terrace was one of the main measures to control soil loss in the rocky mountain area of southern Shaanxi Province. The objective of this study was to examine the effects of terracing on slope stability, and it is very important to terrace collapse and to control soil loss. Based on the filed survey sampling, laboratory experiments and combined with model calculations, we analyzed the influence of the slope stability after terracing, and discussed the effects of soil thickness, ridge slope and the width of filed surface on the slope stability. Results show that the slope safety factor would decrease by 45% on the slope 15° and by 73% on the slope 25° after the construction of terraces. The stability of terracing on the 15° slope is better than the 25° slope. Under the same slope length and gradient, the safety factor is directly proportional with soil thickness and inversely proportional with the ridge slope and width of the field surface. These results can provide scientific basis for the layout of terraced section in the rocky mountain area of southern Shaanxi Province.

Keywords: rocky mountain area; soil and water conservation; terrace; stability; layout of terraced section

陕西省南部地区, 北倚秦岭, 南靠巴山, 多属土石山区, 共有耕地 74.5 万 hm^2 , 其中坡耕地占 81%^[1]。由于土壤环境特殊, 加之受气候条件影响, 降雨量多, 时间长, 暴雨频繁, 导致该区域水土流失严重。为治理陕南土石山区坡耕地的水土流失, 当地采取了改造坡耕地, 建设水平梯田来预防水土流失^[2-4]。

陕南土石山区每年实施坡改梯 1.7~2.0 万 hm^2 , 这些梯田是区域一项重要的水土保持措施, 为当地增加粮食产量和保证群众生活温饱发挥了重要

作用^[5-6]。但是, 坡改梯的田坎大都是经过人工夯实而成的, 受田面的土壤特性、田坎材料特性、坡度和施工技术等因素以及不合理的人为活动影响, 梯田田坎垮塌现象较为严重, 从而影响了流域坡面的稳定性, 不利于区域的水土流失治理。据调查, 一般当年修的土坎梯田在第二年雨季有 30%~40% 因垮坎而毁坏。为预防梯田垮坎, 许多专家针对这一问题进行了大量研究, 如李光录等^[5]对 PP 织物袋在梯田田坎建设中的应用进行了研究; 高霞等^[7]分析了 PP 织物

袋筑坎梯田田坎坎高、坎坡与稳定性之间的关系;蔡强国等^[8]提出了植物固土护坎等保护田坎的对策;伍斌^[9]等认为坡改梯中应采用生物和工程技术处理相结合的方式控制田坎稳定性,提高水土保持效应。但是,以上研究主要针对梯田材料、坡改梯的设计及梯田保护,然而,在梯田设计前,针对区域地形条件、土壤性质以及土层厚度等对梯田稳定性的研究较少。为此,本文选取陕南地区典型小流域内比较有代表性的土石山区梯田为研究对象,通过实地调查取样、室内试验和 SLOPE 软件分析相结合的方法,研究坡耕地改建成梯田后坡面的整体稳定性变化情况,分析梯田的土层厚度、田坎坡度以及田面宽度这 3 个因素对梯田坡面稳定性的影响,以期为该区域梯田断面布局提供理论依据。

1 材料和方法

1.1 研究区概况

余姐河流域位于陕西省安康市汉滨区恒口镇境内,在东经 108°48′15″—108°48′42″,北纬 32°44′55″—32°45′13″,占地面积 0.141 km²^[10]。流域地势北边高南边低,呈条状分布,海拔高程介于 310.0~382.0 m,属于南秦岭低山区,地质构造复杂,褶皱强烈。流域土壤主要为母岩风化的岩屑,夹杂以少量砂质黏土构成石碛土,地力相对瘠薄,土层厚度多小于 70 cm。流域上游坡面陡,土层薄,坡面大于 25°的近于 60%,中下游坡面坡度相对较缓,5°~25°的约占 55%,坡面坡度大于 25°的约占 40%左右,耕地以坡耕地为主。流域多年平均降水量 850 mm,降水量年内分配不均,雨季 7—10 月降水量占全年降水量的 65%,枯水期 11—3 月降水量占全年降水量不足 10%。土地利用类型坡耕地占 24%、林地占 31%、草地占 28%、梯田占 16%。

1.2 研究方法

1.2.1 土样采集 选取研究区域内典型梯田样地 and 对比坡耕地。在梯田中进行土样采集时,利用内径为 60 mm、高度 20 mm 的环刀按照“Z”字形采集土壤原状土,沿靠近上田坎、梯田对角线和靠近下田坎共布设 7 个采样点,其中在靠近下田坎处的填方土布设 3 个采样点。在坡耕地中进行土样采集时,分别沿坡耕地坡上、坡中和坡下各布设 2 个采样点,共计 6 个。以上每个采样点在进行土壤样品的采集时,均在 3 个土层深度(0—10 cm,10—20 cm,20—40 cm)采集土壤原状土并带回实验室进行分析。

1.2.2 土的抗剪强度计算 采集的土壤样品利用直剪仪进行了直接剪切试验,测定土的抗剪强度 S (kPa)。依据库仑公式计算土壤黏聚力和内摩擦角,计算公式如下:

$$S=C+\sigma\tan\varphi \tag{1}$$

式中: S 为抗剪强度(kPa); C 为土壤黏聚力(kPa); σ 为试样被破坏时的剪应力(kPa); φ 为土壤内摩擦角(°)。

1.2.3 稳定性分析及试验设计 采用 SLOPE 软件中的边坡稳定性计算模块(SLOPE/W),根据研究区域的实际调查数据和实验室测定的抗剪强度参数,建立模型进行坡改梯的稳定性计算分析^[11-14]。该模型包含土层、梯田填方、土石混合层和基岩层四部分,其中基岩层为不透水层。由于坡改梯工程一般在 5°~25°的坡耕地中进行,尤以 15°~25°的坡耕地为主^[15-16]。因此,本文分别选取 15°和 25°的坡面分别建立坡耕地模型与梯田模型,对坡改梯前后坡面稳定性进行计算分析。同时,进一步建立不同规格的梯田模型,讨论不同土层厚度、不同梯田田坎坡度和不同梯田田面宽度对梯田坡面稳定性的影响,以期为梯田断面布局选择提供依据。具体试验设计方案详见表 1。

表 1 试验方案设计

试验设计	坡度	土层厚度	田坎坡度	田面宽度	备注
1	15° 25°	0.5 m	60°	9 m	分析坡改梯前后坡面稳定性
		0.4 m			
2	15°	0.5 m	60°	9 m	土层厚度对梯田稳定性的影响
		1.0 m			
		1.5 m			
3	15°	0.5 m	60°	9 m	田坎坡度对梯田稳定性的影响
			70°		
			80°		
			90°		
4	15°	0.5 m	60°	6 m	田面宽度对梯田稳定性的影响
				7 m	
				8 m	
				9 m	

2 结果与分析

2.1 土壤抗剪强度

在计算梯田稳定性时,必须先要得到梯田土的黏聚力 c 与内摩擦角 φ 这两个参数值,因此,依据公式(1)计算不同条件下土壤抗剪强度,从表 2 中可以看出在含水量相同的条件下,土壤黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值随着土壤干密度的增大而逐渐增大,在土壤干密度相同的条件下,土壤的黏聚力 c 和内摩擦角 φ 值随着土壤含水量的增大而减小。

表 2 不同条件下土壤抗剪强度

含水量/ %	干密度/($\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$)					
	1.25		1.46		1.85	
	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$	c/kPa	$\varphi/(\text{^\circ})$
10	32.5	23.2	38	29.9	101.5	43.4
15	23.5	22.7	24.5	28.4	34	38.9
20	21	20.2	20	23.2	32.5	24.1
25	18.5	17.1	19	20.8	27.5	22.7
饱和	14.5	15.8	16.1	20.6	21	20.5

2.2 坡改梯前后坡面的整体稳定性

采用 SLOPE 软件建立坡度为 15° 和 25° 的坡耕地模型(图 1A、图 2A)与梯田模型(图 1B、图 2B)。在坡耕地模型中,由于研究区为薄层土石山区,平均有效土层厚度仅有 0.5 m,因此,土层和土石混合层的土层厚度各取 0.5 m,坡长按照梯田修建的实际规格取 30 m。依据选

取梯田样地实际调查数据,将梯田模型中梯田的田坎高设为 1.8 m,田坎坡度设为 60° ,田面宽度设为 9 m。两个模型中抗剪强度参数设置依据土壤抗剪强度计算结果进行设置,具体详见表 3。

表 3 模型抗剪强度参数设置

类别	粘聚力/ kPa	内摩擦角/ ($^\circ$)	重度/ ($\text{kN} \cdot \text{m}^{-3}$)
土层层	23.5	22.7	12.5
土石混合层	30.5	32.6	16.5
填方	19.6	18.7	10.5

通过模型计算可以得出(图 1), 15° 的坡耕地抗滑稳定安全系数为 11.454,最危险滑移面主要在坡体中上部分,而梯田抗滑稳定安全系数为 6.262,最危险滑移面要是在坡体部分。根据已有文献资料,梯田的稳定性是属于土力学中的土坡稳定问题,梯田稳定必须使抗滑力大于滑动力,也就是说要求稳定安全系数大于 1,一般设计中稳定安全系数值采用 $1.2 \sim 1.5$ ^[17]。王棣等^[18]认为,当主体梯田和辅助梯田稳定安全系数大于 1.5 时,满足工程设计要求。从 15° 的坡耕地和梯田的整体稳定性分析可以看出,其抗滑安全系数均大于 1.5,表明当坡度为 15° 时,修建梯田前后坡面整体比较稳定。然而,修建梯田之后坡面的安全系数比坡耕地降低了 45%,其稳定性有所下降,但仍满足设计要求。因此,在 15° 的坡面上修建梯田是可行的^[19]。

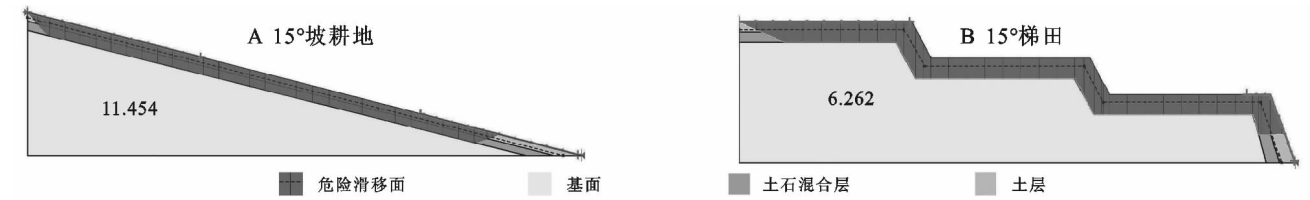


图 1 坡度 15° 坡耕地和梯田整体稳定性分析

坡度为 25° 时,坡耕地抗滑稳定安全系数为 6.823(图 2A),最危险滑移面主要集中在坡体部分,而梯田抗滑稳定安全系数为 1.871(图 2B),最危险滑移面主要是在坡体(图 2)。修建梯田之后坡面安全系数明显下降,比坡耕地降低了 73%,接近工程设

计要求的安全系数,其稳定性较差。从两个坡面的计算结果可以看出, 25° 坡面的坡耕地与梯田其安全系数均低于 15° 坡面,并且在 15° 坡面修建梯田后其安全系数下降幅度小于 25° 的坡面,表明 15° 坡面修建梯田其稳定性优于 25° 坡面,更适合修建梯田。

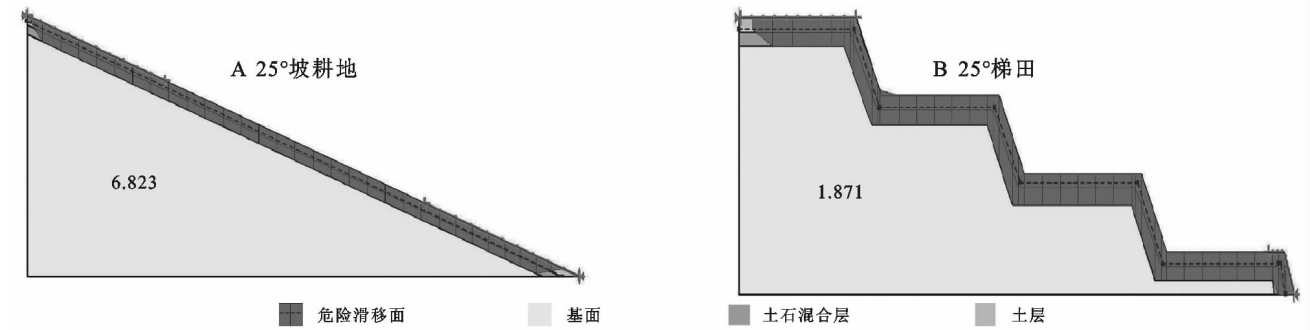


图 2 坡度 25° 坡耕地和梯田整体稳定性分析

2.3 不同规格梯田的坡面稳定性影响分析

为进一步了解梯田不同土层厚度、不同田坎坡度和不同田面宽度对梯田坡面稳定性的影响,分别建立不同规格的梯田模型进行讨论分析。

2.3.1 不同土层厚度对梯田稳定性的影响 在 15° 的坡面上,选取田坎坡度为 60° 、田面宽度为 9 m 以及不同的土层厚度(0.4 m, 0.5 m, 1.0 m 和 1.5 m)建立梯田模型,分析不同土层厚度对梯田稳定性的影响。

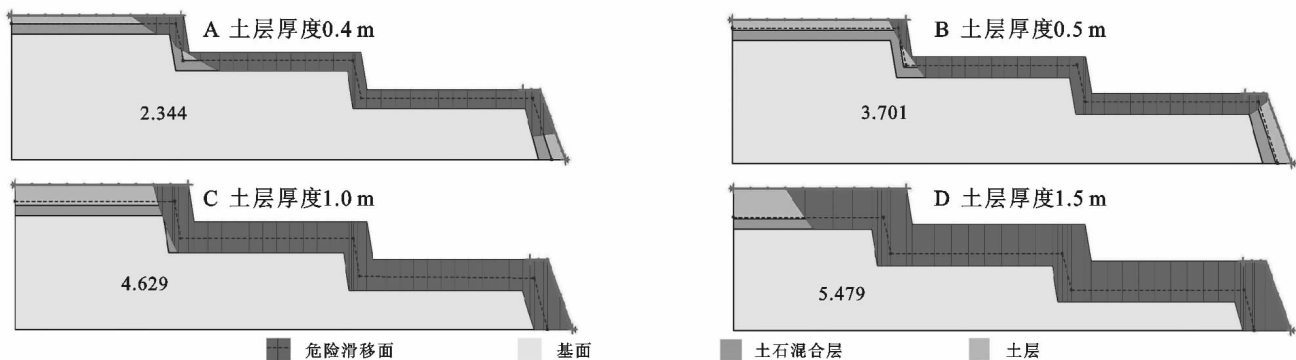


图3 不同土层厚度梯田整体稳定性

2.3.2 不同梯田田坎坡度对梯田稳定性的影响 在 15° 的坡面上,选取土层厚度为 0.5 m、田面宽度为 9 m 以及不同田坎坡度(60° , 70° , 80° 和 90°)建立梯田模型,分析不同田坎坡度对梯田稳定性的影响。从计算结果可以看出(图 4),田坎坡度为 60° , 70° , 80° 和 90° 的梯田安全系数分别为 6.262, 4.191, 1.701, 1.807, 临界滑移面逐渐朝坡脚下移。相对于 60° 的田坎坡度而言, 70° 的田坎坡度其安全系数降低了 33%, 80° 和 90° 的安全系数分别降低了 73% 和 71%。

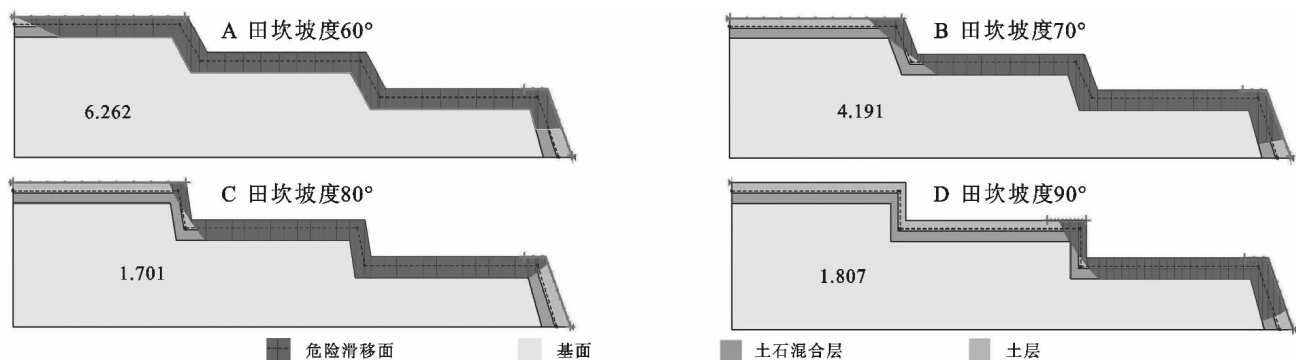


图4 不同田坎坡度梯田整体稳定性分析

2.3.3 不同田面宽度对梯田稳定性的影响 在 15° 的坡面上,选取土层厚度为 0.5 m、田坎坡度为 60° 、以及不同田面宽度为(6 m, 7 m, 8 m 和 9 m)建立梯田模型,分析不同田面宽度对梯田稳定性的影响。从计算结果可以看出(图 5),当梯田田面宽度分别为 6 m, 7 m, 8 m 和 9 m 时,坡面的安全系数分别为 13.699, 1.055, 1.070, 1.701。田面宽度为 6 m 时,坡面安全

系数最高,稳定性最好。从计算结果可以看出(图 3),当梯田土层厚度分别为 0.4, 0.5, 1.0, 和 1.5 m 时,坡面的安全系数分别为 2.344, 3.701, 4.629, 5.479;相对于 0.4 m 的土层厚度而言, 0.5 m 的土层其安全系数增加了 58%, 而 1.0 m, 1.5 m 的土层其安全系数增加了 62% 和 68%。可见当土层厚度超过 1 m, 随着土层厚度的增加, 坡面安全系数增加的幅度较小。因此, 当土层厚度超过 1 m, 其对梯田稳定性的影响较小。

田坎坡度在 $60^\circ \sim 70^\circ$ 其安全系数下降幅度较小, 随着坡度增加其安全系数急剧下降。结果表明, 田坎坡度对梯田的稳定性影响较大, 随着坡度的增加梯田的稳定性逐渐降低。这一结果与高霞等^[7] 的结论基本一致, 其分析了 6 种田坎坡度(60° , 65° , 70° , 75° , 80° 和 85°) 下梯田的稳定性, 认为田坎高度一定时, 随着坡度的增加田坎抗滑稳定性及抗倾覆稳定性逐渐减小。因此, 研究区在 15° 坡面修建梯田时, 建议应选择较小的田坎坡度。

系数最高, 稳定性最好。

当田面宽度为 7 m, 8 m 和 9 m 时, 坡面安全系数较田面宽度 6 m 分别降低了 92%, 92% 和 88%, 随着田面宽度的增加, 坡面安全系数逐渐降低, 且下降幅度较大。结果表明, 田面宽度对梯田的稳定性影响较大, 研究区在 15° 坡面修建梯田时, 应选择较小的田面宽度。

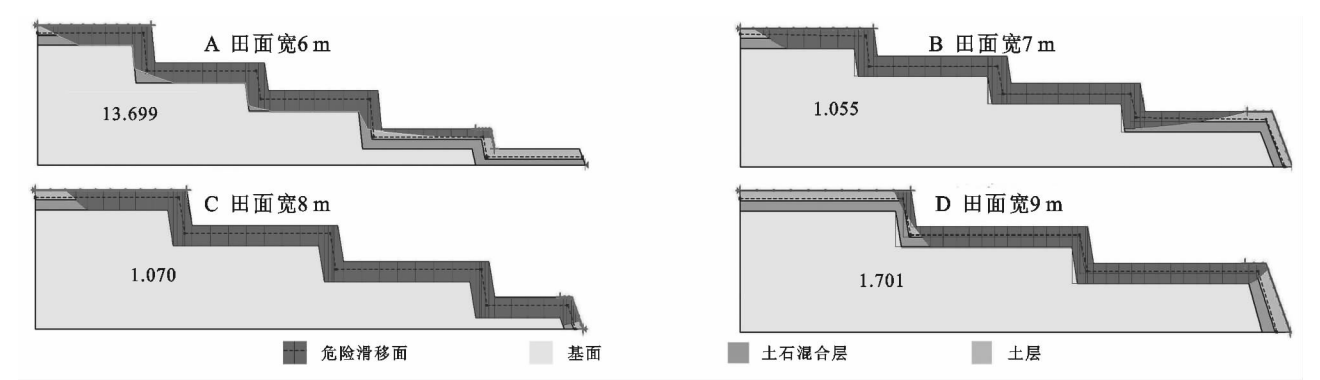


图 5 不同田面宽度下梯田稳定性分析

3 结论

(1) 坡度为 15°时,坡耕地坡面抗滑安全系数为 11.454,修建梯田后坡面抗滑安全系数为 6.262,比坡耕地降低了 45%。坡度为 25°时,修建梯田之后坡面安全系数(1.871)比坡耕地的安全系数(6.823)降低了 73%。15°坡面修建梯田稳定性优于 25°坡面,其抗滑安全系数较高。

(2) 在相同的坡长和坡度下,坡面安全系数与土层厚度成正比。土层厚度对梯田稳定性的影响较小,随着土层厚度的增加,坡面安全系数逐渐增加;土层厚度超过 1 m,坡面安全系数增加的幅度较小。

(3) 在相同的坡长和坡度下,坡面安全系数与田坎坡度和田面宽度成反比。田坎坡度对梯田的稳定性影响较大,随着坡度的增加梯田的稳定性逐渐降低;田坎坡度在 60°~70°之间其安全系数下降幅度较小,随着坡度增加其安全系数急剧下降,下降幅度高达 73%。田面宽度对梯田的稳定性影响较大,随着坡度的增加梯田的稳定性急剧降低,且下降幅度较大;田面宽度为 7 m,8 m 和 9 m 时,坡面安全系数较田面宽度 6 m 分别降低了 92%,92%和 88%。

参考文献:

[1] 卜贵贤,李凯荣,周俊. 陕南秦巴山区小流域水土保持治理综合效益评价[J]. 水土保持研究,2011,18(6):231-235.

[2] 白振锋,李光录,李想,等. PP 织物袋梯田筑坎稳定性试验与研究[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版,2014,42(4):157-164.

[3] 高霞. PP 织物袋梯田筑坎型式及其稳定性分析[D]. 陕西杨凌:西北农林科技大学,2013.

[4] 李光录,高霞,刘馨. PP 织物袋梯田筑坎破坏形式与稳定性分析[J]. 中国农业大学学报,2015,20(2):201-206.

[5] 李光录,柳诗众,邓民兴,等. PP 织物袋梯田筑坎技术

在陕南秦巴山区的应用[J]. 中国水土保持,2011(11):29-31.

[6] 张永涛,王洪刚,李增印,等. 坡改梯的水土保持效益研究[J]. 水土保持研究,2001,8(3):9-11.

[7] 高霞,李光录,柳诗众,等. 陕南秦巴山区 PP 织物袋筑坎梯田田坎稳定性分析[J]. 中国水土保持,2012(12):21-23.

[8] 蔡强国,张光远,吴淑安,等. 长江三峡库区梯田稳定性分析与对策:以鄂西秭归县为例[J]. 地理研究,1997,16(1):45-52.

[9] 伍斌,何能,谢丽娟. 南方坡改梯土坎快速稳定措施[J]. 水土保持研究,2000,7(3):201-202.

[10] 成玉婷. 薄层土石山区坡改梯关键技术及土壤环境效应研究[D]. 陕西西安:西安理工大学,2015.

[11] 唐朝晖,柴波,刘忠臣,等. 填土边坡稳定性的可靠度分析[J]. 地球科学,2013,38(3):616-624.

[12] 高涛,毛巨省,罗建峰,等. SLOPE/W 程序在土质边坡稳定性分析中的应用[J]. 西安科技大学学报,2006,26(2):184-188.

[13] 梁学战,陈洪凯. 库水位升降条件下不同渗透性的滑坡体稳定性变化规律[J]. 中国地质灾害与防治学报,2012,23(4):20-26.

[14] 郑涛,张玉灯,毛新生. 基于 Geo—Slope 软件的土质边坡稳定性分析[J]. 水利与建筑工程学报,2008,6(1):6-8.

[15] 杨文文,张学培,王洪英. 东北黑土区坡耕地水土流失及防治技术研究进展[J]. 水土保持研究,2005,12(5):232-236.

[16] 韦杰,贺秀斌. 三峡库区坡耕地水土保持措施研究进展[J]. 世界科技研究与发展,2011,33(1):41-45.

[17] 王礼先. 水土保持工程学[M]. 北京:中国林业出版社,1991.

[18] 王棣,李永生,刘捷,等. 太行山石灰岩区隔坡复式梯田及稳定性研究[J]. 水土保持学报,1996,4(2):66-70.

[19] 张杰. 降雨条件下边坡入渗及稳定性的影响因子分析[D]. 杭州:浙江大学,2014.