第 19 卷　第 32 期　2019 年 11 月
1671—1815(2019)032-0383-06

科　学　技　术　与　工　程
Science Technology and Engineering

Vol. 19　No. 32　Nov. 2019
© 2019　Sci. Tech. Engrg.

引用格式:龙诚璧, 胡　伟, 李光范, 等. 热带不同植被边坡水文效应室内模型试验[J]. 科学技术与工程, 2019, 19(32): 383-388
Long Chengbi, Hu Wei, Li Guangfan, et al. Laboratory model test on hydrologic effect of slope with different plants in tropical region[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(32): 383-388

环境科学、安全科学

# 热带不同植被边坡水文效应室内模型试验

龙诚璧[1]　胡　伟[1,2*]　李光范[2]　万晓亮[2]

(岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室,湖南科技大学土木工程学院[1],湘潭 411201;
海南大学土木建筑工程学院[2],海口 570228)

**摘　要**　结合海南地区台风强降雨规律,对 3 种植被条件的粉土边坡模型进行了人工降雨试验,为热带生态护坡的植被选择提供依据。通过测量两次降雨过程中的总降雨量、地表径流量、雨水渗出量、坡体储水量及相应时间,对 3 种植被条件边坡的水文效应开展了分析。相较于裸土边坡,细叶结缕草(*Zoysia japonica*)边坡和肾蕨[*Nephrolepis auriculate*(L.)]边坡均具有较好的抗雨水冲刷能力,肾蕨边坡更占优势。降雨前后,裸土边坡渗透性大幅降低;细叶结缕草边坡渗透性有所下降,但不明显;肾蕨边坡渗透性则显著提高。肾蕨边坡良好的储水持水能力在一般情况下是有利于边坡稳定的,但在长期干旱后遭遇强降雨时,也有可能因其储水能力太强而给边坡稳定带来不利影响。相比之下,裸土边坡和细叶结缕草边坡的储水和持水能力均较差。综合比较来看,一般情况下,肾蕨的水文效应对于保持边坡的稳定性是最有利的。

**关键词**　植被护坡　　人工降雨　　边坡模型试验　　水文效应
**中图法分类号**　X43;　　**文献标志码**　B

海南岛是中国热带森林面积最大、热带雨林资源最丰富的省份,全省森林覆盖率达 61.9%[1]。但近年来,随着森林旅游经济的迅速发展,海南省雨林原生植被遭到了一定程度的破坏,坡面丧失植被保护,造成了地表对雨水截留、径流、渗流等水文效应的改变,使得在强降雨作用下,冲刷、崩塌、滑坡、泥石流等地质灾害频发,并在数量及规模上呈现逐年上升态势。海南省环境公报显示:与 2012 年相比,2013 发生的灾害点数增加了 328%;而 2014 年虽然数量较 2013 年减少,但造成的损失却是 2013 年的近 60 倍[2—4]。

植被的护坡作用主要通过水文效应来实现[5,6]。朱建新等[7]、Gary[8]、Gholami 等[9]的研究表明:植被具有截留降雨、削弱溅蚀、抑制地表径流等功能。Neris 等[10]对松树林、热带雨林进行了模拟降雨试验,对比发现植被枯落物能影响地表径流,增强土体渗透性和抑制蒸发。刘威等[11]以湖南本土灌木和草本植物为研究对象,通过降雨截留试验发现植物茎叶截留量与吸水率呈线性正相关变化。王照才等[12]研究了温州地区植被对边坡稳定性的影响,结果表明在台风作用下对边坡稳定性有利的植被种类顺序为灌木 > 草本 > 乔木。张莹等[13]研究了黄土区灌木与草本植物护坡的水文效应,发现采用灌木与草本植物结合种植的方式进行护坡,能有效固结坡面土体,增强坡面土体的抗冲刷和抗剪切能力。朱显谟等[14]也对黄土高原植物根系强化土壤渗透力的有效性开展了研究,发现根系能够使土体产生良好的孔隙状况,为雨水的入渗与土体内部水分的蒸发提供通道。上述研究成果证实了植被能够通过水文效应来发挥其护坡效应,同时也表明这种效应具有地域性,不同地区植被的表现是有差异的。目前,少有针对海南本土植被护坡水文效应的研究成果出现,但对于以“生态立省”的海南省而言,地质灾害的生态治理显然具有重要意义。为此,以海南本土草本植被为试验对象,通过强降雨条件下的室内模型试验,研究不同植被边坡的水文效应变化规律,从而为热带雨林地区的生态护坡提供基础性数据。

2019 年 4 月 10 日收到　　国家自然科学基金(51508141)、湖南科技大学岩土工程稳定控制与健康监测省重点实验室开放基金(E21808)资助

第一作者简介:龙诚璧(1995—),男,汉族,湖南长沙人,硕士研究生。E-mail:903920737@qq.com。

*通信作者简介:胡　伟(1982—),男,汉族,湖北松滋人,博士,教授。E-mail:yilukuangben1982@163.com。

表 1 试验土料物理性质指标

Table 1 Test soil physical property indexes

| 土料来源 | 比重 | 液限/% | 塑限/% | 塑性指数 | 最大干密度/(g·cm$^{-3}$) | 最优含水率/% | 工程分类 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 海口美兰 | 2.64 | 23.40 | 31.90 | 8.50 | 2.58 | 17.80 | 粉土 |

## 1 室内模型试验

### 1.1 边坡

试验设计 3 个长 200 cm、宽 100 cm、深 51 cm、坡度为 30°的边坡。边坡用土为取自海口市美兰区国兴大道附近的粉土,其基本物理性质指标如表 1 所示。3 个边坡中一个为裸土边坡,作为对照,另两个分别种植肾蕨[*Nephrolepis auriculate*(L.)]及细叶结缕草(*Zoysia japonica*)。肾蕨根系发达且有根瘤存在,为了避免移植时对边坡土体产生影响,利用试验用土对其进行提前培育;细叶结缕草根系短浅,可直接铺设草皮,无须提前培育。边坡植被移植完成后,进行浇水养护≥60 d。为了保证 3 个模型内土体初始含水率一致,裸土边坡也喷洒相同分量的水分。试验开始前,测得三个边坡不同深度位置处土体的体积含水率在 3.8% ~4.2%,较均匀。

### 1.2 人工降雨

试验采用自制的 3 个相互独立又能同时作业的网管式人工降雨装置模拟降雨。降雨装置离地面高度 3 m;制作材料为常见的 PVC 供水管材,管径 20 mm,通过三通、直角弯头连接;降雨孔间距设定为 50 mm,孔径设 1 mm。试验中,人工降雨装置的降雨强度由流量计与精控铜阀控制,可控范围在 30 ~300 mm/h,满足降雨参数设定要求。试验前对装置降雨特性进行测试,测试降雨高度设置为 2.5 m,任意选择降雨装置下四个位置,用 1 000 mL 量筒收集 1 min 内下落的雨滴,并记录下落的雨滴数量。测试中假定雨滴下落间隔时间相同,雨滴形状为球形。测试数据如表 2 所示。

结果表明:自制装置降雨均匀性和稳定性较好,满足试验要求[15]。此外,为进一步保证雨滴下落的均匀性,正式试验前需排除降雨装置内的空气;试验开始后,对人工边坡的总降雨量、地表径流量和雨水渗出量进行测定记录。

表 2 人工降雨装置降雨测试数据

Table 2 Artificial rainfall simulator test data

| 测试位置 | 1 | 2 | 3 | 4 |
|---|---|---|---|---|
| 接收雨量/g | 20.36 | 21.06 | 20.79 | 21.48 |
| 雨滴数量/滴 | 99 | 100 | 101 | 101 |
| 雨滴质量/g | 0.205 7 | 0.210 6 | 0.205 8 | 0.212 7 |
| 雨滴半径/cm | 0.366 2 | 0.369 1 | 0.366 3 | 0.370 3 |

试验模拟近几年袭击海南的纳沙、尼格、海燕以及威马逊 4 次台风引起的特大暴雨,采用贡力[16]提出的换算方法计算其有效降雨强度如下:纳沙 24 h 雨量约为 350 mm,假设台风降雨的有效降雨时间为 5 h,经换算得出其有效降雨强度为 70 mm/h。以此类推,尼格 24 h 雨量 333.6 mm,有效降雨强度为 66.7 mm/h;海燕 24 h 雨量 278.0 mm,有效降雨强度为 55.6 mm/h;威马逊 24 h 雨量 500.0 mm,有效降雨强度为 100.0 mm/h。参考上述台风的有效降雨强度,本试验模拟相同降雨量不同降雨强度的两次降雨,降雨间隔 48 h,具体参数如表 3 所示。

## 2 结果与分析

### 2.1 地表径流对比分析

在相同降雨强度条件下,由于坡体表面植被不同,导致 3 个边坡模型对雨水的拦截和渗透能力也有所差异,其产生地表径流的时间和流量也就各不相同。以试验开始时间为基准点,在两次降雨条件下 3 个边坡模型产生径流的具体情况如表 4 所示。从表 4 中可以看出,不同植被覆盖情况下,各边坡模型地表径流情况差异显著,在时间、流量以及泥沙含量上均明显不同。其中裸土边坡在第一次降雨过程中未出现地表径流,但坡面受到冲刷破坏,坡体在降雨冲击和雨水入渗共同作用下出现粗细颗粒分离的现象,且坡面土体有所压实。而第二次降雨一开始就出现地表径流,这是因为受第一次降雨的影响,表层土体渗流路径被部分堵塞,而此次降雨强度又大

表 3 人工模拟降雨信息

Table 3 Two artificial simulation of artificial rainfall

| 模型类别 | 裸土边坡 | | 肾蕨边坡 | | 细叶结缕草边坡 | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 降雨过程 | 1-1 | 1-2 | 2-1 | 2-2 | 3-1 | 3-2 |
| 降雨间隔时间/h | 48 | | 48 | | 48 | |
| 降雨强度/(mm·h$^{-1}$) | 75 | 150 | 75 | 150 | 75 | 150 |
| 降雨历时/min | 60 | 30 | 60 | 30 | 60 | 30 |
| 降雨量/mm | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 | 75 |

表 4　地表径流情况

Table 4　Surface runoff contrast

| 模型类别 | 裸土 | 肾蕨 | 细叶结缕草 | 裸土 | 肾蕨 | 细叶结缕草 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 降雨过程 | 1-1 | 2-1 | 3-1 | 1-2 | 2-2 | 3-2 |
| 降雨强度/(mm·h$^{-1}$) | | 75 | | | 150 | |
| 出现时间点/min | 未出现 | 未出现 | 42 | 0 | 未出现 | 3 |
| 地表径流量/g | 0.0 | 0.0 | 13 540.5 | 92 357 | 0.0 | 49 197.5 |
| 泥沙含量/g | 0.0 | 0.0 | 0.0 | 23 366.5 | 0.0 | 31 |
| 雨水含量/g | 0.0 | 0.0 | 13 540.5 | 68 990.5 | 0.0 | 49 166.5 |

幅提高,雨水入渗速度跟不上降落速度所致。与第一次降雨相比,第二次坡面破坏情况更为严重。

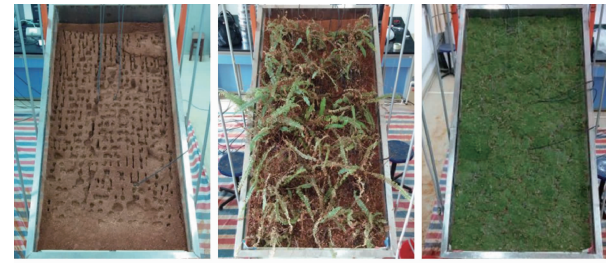
肾蕨边坡在两次降雨过程中均未出现地表径流。这是因为肾蕨本身及其落叶层对坡体构成了一个较为完整的保护体系:其枝叶和落叶层对雨水进行了两次拦截,避免了雨水对坡面的直接冲击;而落叶层则起到了较好的蓄水作用,减缓了雨水在地表的汇流速度,促进雨水入渗;根系则在生长过程中增加了雨水的渗流路径,改善了边坡渗透性,加快了雨水入渗速度。由于没有发生地表径流,两次降雨结束后坡面变化不大。

细叶结缕草边坡两次降雨过程中都出现了地表径流,但第一次出现的时间要远远晚于第二次。这是因为在该边坡中,植被基本实现了全覆盖,雨水无法直接冲刷土体。在第一次降雨过程中,雨水先落在细叶结缕叶片上,并在草皮表面形成一个蓄水层,随后沿着其根系渗入土体,在此过程中也对边坡表面造成了一定的压实作用,逐渐降低渗流速度。初始时由于降雨强度较小且边坡渗透性较好,雨水能够完全入渗,当中期表面雨水蓄积速度高于渗流速度后,地表就开始形成了径流。而在第二次降雨时,降雨强度的增大和边坡渗透性的降低,导致地表径流几乎与降雨同时发生。虽然两次降雨造成的地表径流时间和流量均不同,但其坡面变化不大。

结合表 3 来看,3 个边坡在降雨强度较小的情况下对雨水的抗冲刷能力都较为良好,3 个边坡均未发生地表土体流失现象(径流中泥沙含量为 0)。而在降雨强度增大后,肾蕨坡面依然完全不受雨水冲刷影响,细叶结缕草虽然发生了地表径流,但泥沙含量不足 0.1%,地表土体基本不受影响。但裸土边坡则受雨水冲刷很严重,不仅地表径流量大,而且泥沙含量高,达到了 25% 以上。3 个边坡在两次降雨结束后坡面情况如图 1 所示。

## 2.2　雨水渗透对比分析

降雨到一定程度后,将有部分雨水从模型底部渗出。模型边坡底部铺设透水土工布,渗出雨水经其过滤后由排水板汇集流入下水盆。采用宁波奥通水表有限公司生产的 DN—15 旋翼湿式水表对其进行测量,同时记录渗出起始时间,结果如表 5 所示。



(a) 裸土边坡　(b) 肾蕨边坡　(c) 细叶结缕草边坡

图 1　边坡坡面对比

Fig. 1　Contrast of slope faces

表 5　雨水渗出量对比

Table 5　Rain seepage contrast

| 模型类别 | 裸土边坡 | 肾蕨边坡 | 细叶结缕草边坡 | 裸土边坡 | 肾蕨边坡 | 细叶结缕草边坡 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 降雨过程 | 1-1 | 2-1 | 3-1 | 1-2 | 2-2 | 3-2 |
| 渗出时间/min | 43 | 22 | 25 | 10 | 3 | 4 |
| 渗出雨量/mL | 91 150 | 60 240 | 77 300 | 22 400 | 97 600 | 39 250 |

从雨水渗出时间来看,第一次降雨过程雨水渗出时间整体晚于第二次,这与边坡土体初始含水量有关。两次降雨时间相隔较短,因而第二次降雨坡体初始含水量要高于第一次,因而达到渗出条件所需时间要比第一次短。植被覆盖边坡(肾蕨边坡和细叶结缕草边坡)两次降雨过程的雨水渗出时间大致相同,均早于裸土边坡,这说明植被的存在可以改善边坡的渗透性。从雨水渗出量来看,裸土边坡和细叶结缕草边坡第一次降雨过程的渗出雨量均远高于第二次,而肾蕨边坡则相反。三个模型边坡除植被类型不同外,其他条件均较为一致,故定义等效渗透系数 k 来对边坡土体的渗透特性进行定量评价,以便于直观比较,其表达式为

$$k = Vl/A\Delta ht \tag{1}$$

式(1)中:$V$ 为渗出雨量体积,mm$^3$;$t$ 为从雨水渗出到降雨结束的时间差,s;$l$ 为渗流路径长度,假设渗流路径为竖直方向,边坡竖直方向土体厚度为 519.6 mm;$\Delta h$ 为水头差,与渗流路径长度相等,

mm;$A$ 为坡体水平面内的横断面积 $8.1\times10^{5}$ $mm^{2}$。

计算结果如表 6 所示,可以看出:第一次降雨试验中,裸土边坡的等效渗透系数最大,是细叶结缕草边坡的 2.4 倍,肾蕨边坡的最小,只有裸土边坡的 30%。

**表 6 等效渗透系数**

**Table 6 Equivalent permeability coefficient**

| 模型类别 | 裸土边坡 | 肾蕨边坡 | 细叶结缕草边坡 |
|---|---|---|---|
| 第一次降雨计算结果/(cm·s$^{-1}$) | $1.1\times10^{-4}$ | $3.3\times10^{-5}$ | $4.5\times10^{-5}$ |
| 第二次降雨计算结果/(cm·s$^{-1}$) | $2.1\times10^{-5}$ | $7.4\times10^{-5}$ | $3.1\times10^{-5}$ |

试验中,裸土边坡未出现地表径流,雨水全部下渗,且渗出所用时间最短,因而其等效渗透系数最大。细叶结缕草边坡由于草皮截留的雨水汇集,出现少量地表径流,雨水渗透量不及裸土边坡,渗出所用时间较长,渗等效透系数较小。肾蕨边坡渗出时间与细叶结缕草几乎一致,但雨水渗出量则较之更少,故等效渗透系数最小。第二次降雨,裸土边坡的等效渗透系数出现大幅下降,只有第一次降雨时的 20%。分析其原因,经过第一次降雨试验,雨滴冲击在裸土边坡表面形成了涂抹和水膜效应,坡体则受到了雨水入渗的压密效应,两者共同影响,致使土体中渗流通道减少、堵塞,因而在第二次降雨试验中雨水入渗难度增大,渗透系数急剧降低。对于植被边坡,雨水的冲击能量大部分被植被枝叶吸收,涂抹、水膜效应减小甚至消失。虽然雨水入渗对坡体的压密作用仍然存在,但土中渗流通道的连通性因饱和度较第一次降雨前大幅增加而变得更好;同时细叶结缕草短浅根系也在一定程度上增加了坡体浅层雨水入渗的通道,故其第二次试验中边坡的等效渗透系数只是略有减小。与细叶结缕草相比,肾蕨根系粗大,且扎入土中较深,第一次降雨过程中根系周围土体孔隙在溶蚀作用下相互贯通,沿根系方向形成了更为良好的渗流通道,因而第二次降雨试验中雨水全部入渗,未出现地表径流,等效渗透系数不降反升,达到第一次降雨的 2 倍以上,在 3 个边坡模型中数值最大。

### 2.3 边坡蓄水持水能力对比分析

降雨过程中渗入坡体的雨水,除渗出部分外,其余则储蓄在边坡内部,现以其占降雨总量的百分比来评价边坡土体的储水能力,如图 2 所示。

从图 2 中可以看出,第一次降雨,裸土边坡和细叶结缕草边坡的储水比例大致相当,约为总降雨量的 10% 左右,而肾蕨边坡则达到 40% 之多,这说明后者的储水能力要远远强于前两者。第二次降雨,裸土边坡的储水比例几部没有变化,细叶结缕草边坡也只有少量增长,达到 11.6%,这说明两种边坡第二次降雨时的储水能力受第一次降雨的影响非常小,其原因在于第一次降雨储留在边坡内部的水分能够在较短时间内(两次降雨的间隔期内)通过蒸发或者渗流的方式消耗掉,这样在第二次降雨时边坡土体内部则具有和第一次降雨时相当的储水能力,这也说明两种边坡的持水能力较差。相比之下,肾蕨边坡第二次降雨仅仅储存了 2.4% 的降雨量,和第一次降雨的 40% 相比,变化非常剧烈。这说明肾蕨边坡在两次降雨间隔期内没有太多水分流失,持水能力很强,使得在第二次降雨时,边坡土体的储水能力增量很小。

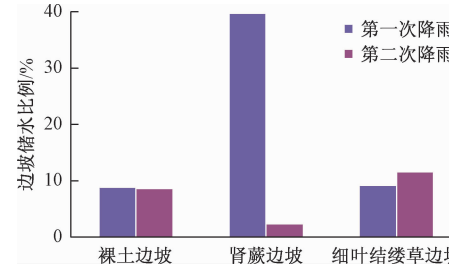



图 2 边坡储水能力对比

Fig. 2 Comparison of water storage capacity

植被护坡工程实践可以从上述规律中得到如下启示:肾蕨边坡因具有很好的持水能力,多次降雨下边坡土体的含水量变化不大,土体力学性质受降雨影响较小,边坡稳定性安全系数一般情况下可以保持,较为稳定。而裸土边坡和细叶结缕草边坡则因持水能力较差,土体含水量会在多次降雨过程中反复升降 从而导致土体力学性质退化,边坡稳定性逐渐降低。另外,值得注意的是,肾蕨边坡的储水能力要远远大于裸土和细叶结缕草边坡,当在长期干旱后遭遇强降雨时,肾蕨边坡土体的含水量会大幅度提高,土体重度随之将显著增大,从而增加边坡下滑力,这对边坡稳定也是不利的。

## 3 结论

结合海南地区台风强降雨规律,开展了人工降雨下,3 种不同植被条件粉土边坡模型的水文效应研究,获得了两次降雨过程中地表径流、雨水入渗、坡体储水等时间、大小数据,经分析后获得如下主要结论。

(1)相较于裸土边坡,在两次降雨过程中,细叶结缕草边坡地表径流很小,肾蕨边坡则未发生地表径流;降雨结束后坡面均未发生明显变化,几乎没有出现土体流失现象,二者都具有较好的抗雨水冲刷

能力,肾蕨边坡则更占优势。

(2)降雨前后,裸土边坡坡体渗透性大幅降低;细叶结缕草边坡渗透性则有所下降,但不明显;肾蕨边坡渗透性则因第一次降雨对根系周围土体的溶蚀作用,在土体内部、沿根系方向形成了更为良好的渗流通道,从而在第二次降雨时渗透性显著提高。

(3)裸土边坡和细叶结缕草边坡的储水和持水能力均较差,相比之下,肾蕨边坡则具有很好的储水持水能力,这在一般情况下是有利于边坡稳定的,但在长期干旱后遭遇强降雨时,肾蕨边坡也有可能因其储水能力太强而给边坡稳定带来不利影响。

## 参　考　文　献


1　周亚东. 基于 GIS 的海南岛森林生态系统服务功能价值评估[J]. 热带作物学报,2015,36(3):623-628
Zhou Yadong. Forest eco-service evaluation in application of GIS in Hainan Island[J]. Chinese Journal of Tropical Crops,2015,36(3):623-628

2　海南省国土环境资源厅. 2012 年海南省环境状况公报[N]. 海南日报,2013-06-05(A02)
Departedment of Load Resources of hainan Province. Hainan Province environmental status bulletin 2012[N]. Hainan Daily,2013-06-05(A02)

3　海南省国土环境资源厅. 2013 海南省环境状况公报[N]. 海南日报,2014-06-05(A02)
Departedment of Load Resources of hainan Province. Hainan Province environmental status bulletin 2013[N]. Hainan Daily,2014-06-05(A02)

4　海南省国土环境资源厅. 2014 年海南省环境状况公报[N]. 海南日报,2015-06-05(A06)
Departedment of Load Resources of hainan Province. Hainan Province environmental status bulletin 2014[N]. Hainan Daily,2015-06-05(A06).

5　吕　刚,刘雅卓,李叶鑫,等. 海州露天煤矿排土场植被恢复的土壤水文效应评价[J]. 生态环境学报,2017,26(1):67-72
Lü Gang, Liu Yazhuo, Li Yexing, et al. Evaluation of soil hydrology effects of the vegetation restortion in Haizhou open-pit coal mine dump[J]. Ecology and Enviromental Science,2017,26(1):67-72

6　赵　华,黄润秋. 岩石边坡生态护坡特点及其关键技术问题探讨[J]. 水文地质工程地质,2004(1):87-90
Zhao Hua, Huang Runqiu. Characters of biological protection of rock slopes and analysis of its key problems[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2004(1):87-90

7　朱建新,李肖锋. 植被护坡的水文效应探讨[J]. 西部探矿工程,2006(8):274-276
Zhu Jianxin, Li Xiaofeng. Discussion on the hydrology effect of the slope protection by Vegetation[J]. West-China Exploration Engineering, 2006(8):274-276

8　Gary D H, Andrew T L. Biotechnical slope protection and erosion-control[M]. New York: Van Nostrand Reinhold Company, 1982,37-54

9　Gholami L, Banasik K, Sadeghi S H, et al. Effectiveness of straw mulch on infiltration, splash erosion, runoff and sediment in laboratory conditions[J]. Journal of Water and Land Development, 2014, 22(1):51-60

10　Neris J, Tejedor M, Rodríguez M, et al. Effect of forest floor characteristics on water repellency infiltration runoff and soil loss in Andisols of Tenerife Canary Islands, Spain[J]. Catena, 2013, 108:50-57

11　刘　威. 植物护坡的水文效应及其对边坡稳定性影响研究[D]. 长沙:中南林业科技大学,2017
Liu Wei. Hydrological effect of plant slope protection and its influence on slope stability[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology,2017

12　王照财,赵其华,韩　俊,等. 台风作用下植被对斜坡稳定性影响的物理模拟[J]. 自然灾害学报,2013,22(4):145-152
Wang Zhaocai, Zhao Qihua, Han Jun, et al. Physical modeling of the effect of vegetation on slope stability under typhoon[J]. Journal of Natural Disasters, 2013,22(4):145-152

13　张　莹,胡夏嵩,李国荣,等. 寒旱环境黄土区灌木与草本植物护坡的水文效应研究[J]. 中国水土保持,2008(6):38-40
Zhang Ying, Hu Xiasong, Li Guorong, et al. Hydrological effects of shrubs and herbaceous plant revetments on loess plateau in cold and drought environment[J]. Soil and Water Conservation in China, 2008(6):38-40

14　朱显谟,田积莹. 强化黄土高原土壤渗透性及抗冲性的研究[J]. 水土保持学报,2015,29(4):85-90
Zhu Xianmo, Tian Jiying. The study on strengthening anti-scourability and penetrability of soil in Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015,29(4):85-90

15　郭东静,陈锡云,马　晶,等. 基于雨滴谱的人工降雨系统效能评估[J]. 水土保持学报,2015,29(4):85-90
Guo Dongjing, Chen Xiyun, Ma Jing, et al. Reliability analysis for artificial rainfall system based on raindrop spectrum detector[J]. Journal of Soil and Water Conservation,2015,29(4):85-90

16　贡　力. 黄土高原降雨雨滴动能的侵蚀计算[J]. 兰州交通大学学报,2005(4):43-45
Gong Li. Erosion Calculation of raindrops' kinetic energy of Loess Plateau' s rainfall[J]. Journal of Lanzhou Jiaotong University, 2005(4):43-45

# Laboratory Model Test on Hydrologic Effect of Slope with Different Plants in Tropical Region

LONG Cheng-bi[1], HU Wei[1,2*], LI Guang-fan[2], WANG Xiao-liang[2]
(Hunan Province Key Laboratory of Geotechnical Engineering Stability Control and Health Monitoring, School of Civil Engineering, Hunan University of Science and Technology[1], Xiangtan 411201, China;
School of Civil and Architectural Engineering, Hainan University[2], Haikou 570228, China)

[**Abstract**] Combined with the heavy rainfall pattern of typhoon in Hainan, artificial rainfall experiment was conducted on silt slope model with three vegetation conditions to provide basis for vegetation selection in tropical ecological slope protection. The hydrological effects of three vegetation slopes were analyzed by measuring the total precipitation, surface runoff, rainwater seepage, water storage in slope, and corresponding time during two rainfall processes. The results show that, compared with bare soil slope, both of *Zoysia japonica* slope and *Nephrolepis auriculata*(L.) slope have better ability of resisting rain wash, and the latter is more dominant. Before and after rainfall, the permeability of bare soil slope is greatly reduced, which is declined but not obvious of *Zoysia japonica* slope and significantly improved of *Nephrolepis auriculata*(L.) slope. In general, good water storage and water retention capacity of *Nephrolepis auriculata*(L.) slope is conducive to the stability of slope, but it may also bring adverse effects on slope stability when heavy rainfall after a long period of drought because of its strong water storage capacity. In contrast, both of bare soil slope and *Zoysia japonica* slope have poor water storage and water retention capacity. Compared comprehensively, in general, *Zoysia japonica* is the most favourable choice to maintain the stability of slope.

[**Key words**] egetation-slope-protect artificial rainfall slope model test hydrological effect