

## 黄土丘陵沟壑区刺槐动态固坡效应

代智盛<sup>1</sup>, 王云琦<sup>1,2</sup>, 马超<sup>1,2</sup>, 王玉杰<sup>1,2</sup>, 王鑫皓<sup>1</sup>, 李牧阳<sup>1</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,重庆三峡库区森林生态系统教育部野外科学观测研究站,北京 100083;  
2.北京林业大学水土保持学院,重庆缙云山三峡库区森林生态系统国家定位观测研究站,北京 100083)

**摘要:** 植被能够有效提升浅层坡体的稳定性和抗蚀性。为了初步定量评估浅层滑坡易发的黄土丘陵沟壑区植被固坡作用在自然条件下的动态变化结果,以黄土丘陵沟壑区主要造林树种刺槐为例,考虑植被固坡的根系机械作用和水文作用在 2017 年全年自然条件下的动态变化。通过挖掘根系剖面对根系截面积分布进行调查,单根抗拉试验测试根系抗拉强度,以利用 Wu 模型对刺槐根系的附加黏聚力进行计算;通过现场调查确定研究样地与植被水文作用相关的参数,室内入渗试验和土壤离心试验获取土壤的水力学参数,利用生态水文领域水分运移软件 Hydrus-1D 对刺槐植被坡体水分的运移进行瞬态分析;最终基于变饱和条件下的无限斜坡模型对坡体的稳定性进行分析,并分别计算刺槐根系机械作用和水文作用对坡体稳定性的动态贡献率。结果表明:(1)刺槐根系机械作用对 20,40,60 cm 深度处浅层坡体的稳定性提升 196.56%±28.08%,106.74%±13.19%,20.61%±2.43%,同时机械作用的贡献率还具有一定波动性;(2)刺槐在生长期,通过林冠截留拦截 70.2 mm 的降雨量,蒸腾耗水作用改变坡体土壤含水量和吸应力,有效地提升坡体稳定性;(3)根系机械作用的贡献全年均存在,且波动性较水文作用贡献率的波动性小,但水文作用的贡献主要发生在刺槐的生长期,且水文贡献率的部分峰值较机械作用的贡献率大。研究结果进一步揭示了黄土高原丘陵沟壑区刺槐植被坡体在自然条件下的动态变化过程。

**关键词:** 植被固坡动态效应; 水文作用; 根系机械作用; 坡体稳定性

中图分类号:S714.7

文献标识码:A

文章编号:1009-2242(2020)05-0145-08

DOI:10.13870/j.cnki.stbcbx.2020.05.021

## Dynamic Effect of Stabilizing Slope of *Robinia pseudoacacia* in Loess Hilly and Gully Region

DAI Zhisheng<sup>1</sup>, WANG Yunqi<sup>1,2</sup>, MA Chao<sup>1,2</sup>, WANG Yujie<sup>1,2</sup>, WANG Xinhao<sup>1</sup>, LI Muyang<sup>1</sup>

(1.Three-gorges Area (Chongqing) Forest Eco-system Research Station of Ministry of Education, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Chongqing Jinyun Forest Eco-system Research Station, School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083)

**Abstract:** Vegetation can effectively improve the stability and erosion resistance of shallow slope. In order to make a preliminary quantitative assessment of dynamic changes of vegetation slope consolidation under natural conditions in the loess hilly and gully region where the shallow landslide prone to occur, taking *Robinia pseudoacacia*, the main afforestation tree species in the loess hilly and gully region as an example, the dynamic changes of roots mechanical and hydrological effects of vegetation slope consolidation under natural conditions in 2017 were studied. The roots cross-sectional area distribution was investigated by digging the root section, the roots tensile strength was tested by single root tensile test, and the roots additional cohesion of *R. pseudoacacia* was calculated by using the Wu model. Field surveys were conducted to collect the parameters related to the hydrological effects of vegetation and the research plot. Laboratory infiltration experiment and soil centrifugation experiments were conducted to obtain the soil hydraulic parameters. Then the water transport software Hydrus-1D was applied to do the transient analysis of the water content of the *R. pseudoacacia* slope. Finally, the stability of the slope was analyzed based on the infinite slope model under variable saturation conditions, and the dynamic contribution rate of roots mechanical and hydrological effects of *R. pseudoacacia* to the slope stability were calculated. The results showed that: (1) The mechanical effect of *R. pseudoacacia* roots on the stability of shallow slope at the depths of 20, 40 and 60 cm increased by 196.56%±28.08%,

收稿日期:2020-03-04

资助项目:国家自然科学基金项目(31971726)

第一作者:代智盛(1995-),男,硕士,主要从事植被与山地灾害研究。E-mail:ZhishengDai123@163.com

通信作者:王云琦(1979-),女,博士,教授,主要从事水土保持工程研究。E-mail:wanyunqi@bjfu.edu.cn

106.74%±13.19% and 20.61%±2.43%, respectively. At the same time, the contribution rate of root mechanical function also had some fluctuation. (2) During the growth period of *R. pseudoacacia*, *R. pseudoacacia* canopy intercepted 70.2 mm rainfall, transpiration changed the soil water content and suction stress of the slope, so the stability of shallow slope was effectively improved. (3) The contribution of the roots mechanical action existed throughout the year, and the volatility was less than that of hydrological contribution rate. However, the contribution of hydrological action mainly occurred during the growth period of *R. pseudoacacia*, and most parts of the peak values of hydrological contribution rate were larger than those of mechanical action. The results further revealed the dynamic changes of *R. pseudoacacia* slope stability in the hilly and gully region of the Loess Plateau under the natural conditions.

**Keywords:** dynamic effect of stable slopes; hydrological effect; mechanical effect of roots; slope stability

黄土高原丘陵沟壑区位于黄河流域中部,黄土沉积厚度从几米到 300 多米不等,黄土具有松散结构和对高孔隙水的敏感性,容易发生以降雨为诱因的浅表层滑坡<sup>[1]</sup>。然而,植被通过林冠截留水文作用和根系网络机械作用抑制浅层滑坡发生<sup>[2]</sup>。植被对滑坡的水文作用主要体现在地上部分林冠截留作用改变降雨到达坡面的总量和时间,在一定程度上能有效提升坡体失稳的降雨阈值以及推迟稳定性系数的衰减时间<sup>[3]</sup>;地下部分根系吸水作用降低孔隙水压力,增加土体基质吸力提高表观抗剪强度,减小坡体自重荷载,从而提高坡体稳定性<sup>[4]</sup>。

目前,Wu 等<sup>[5]</sup>提出 Wu 模型通过根系抗拉强度和根系截面积比(RAR)来计算根系附加黏聚力,该模型由于其原理清晰、计算简便的特点被广泛地用于估算植物根系附加黏聚力<sup>[6]</sup>,这为定量研究植物根系固坡机械作用提供了理论基础。此外,国内外很多学者<sup>[7-8]</sup>通过 tRIBS-VEGGIE 和 Hydrus 等模型模拟含植被坡体的水分运移情况,这为量化植被水文效应对坡体稳定性的贡献提供了基础。

自然条件下,植被对坡体稳定性的作用是一个动态变化过程,该过程受到降雨、温度、蒸发等气象条件的影响。目前,针对植物固坡机制的研究,主要集中在根系固坡机械作用的研究,通过 Wu 模型或者 FBM 维管束模型等方法对根土复合体的强度进行计算,或者通过原位大盒直剪试验对根土复合体的强度进行确定,且很少结合植被水文作用对植被坡体稳定性进行研究,而植被坡体的稳定性是大气—植被—土体相互作用的结果<sup>[9]</sup>。因此,如果忽略了降雨等自然条件下植被坡体水文的动态变化对坡体稳定性的影响,在进行植被生态坡体对稳定性计算时,难以客观全面地对坡体稳定性进行评估。

本文以黄土丘陵沟壑区主要造林树种刺槐作为研究对象,刺槐具有较强的生理适应性,并且具有较发达的水平根系,能够较好地保持水土、改良土壤,在固土抗蚀方面具有一定的优势<sup>[10]</sup>。通过根系调查和根系强度测试,利用 Wu 模型计算含刺槐根系附加黏

聚力。利用野外实地调查获取与植被水文作用相关的参数和岩土水力学参数,通过生态水文模型 Hydrus-1D 对 2017 年全年自然条件下无植被坡体和含刺槐坡体土壤水分的动态变化进行数值模拟。建立变饱和条件下的无限斜坡模型,结合数值模拟得到的含水量动态变化结果和根土复合体的物理力学参数进行稳定性分析,通过对无植被坡体和含刺槐坡体的计算结果进行对照分析,以期初步定量评估刺槐植物根系固土的机械作用和水文作用对坡体稳定性的贡献在降雨等自然条件变化的动态响应结果。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于延安市宝塔区则子须沟流域,地处黄土高原中部 109°30′54.1″E,36°36′4.15″N(图 1)。属于半干旱大陆性季风气候,根据 1951—2017 年的气候记录,年平均降水量约为 537 mm,大约 64.2%的降雨分布于 6—9 月。研究区域内地表破碎,沟壑纵横,坡度分布于 20°~30°,属于典型的黄土高原沟壑地貌,并且发育有大量降雨诱发的浅表层滑坡。其山坡体由第四系中上更新统黄土组成,节理十分发育,土壤类型为黄绵土,结构疏松,容易受到水蚀的影响。自 1999 年退耕还林项目启动以来,刺槐(*Robinia pseudoacacia*)成为该区域的主要造林树种。

### 1.2 试验设计

1.2.1 样地调查 对研究区进行实地踏查,在海拔 1 079 m,坡度 25.3°的坡地选取具有代表性的刺槐林地中,选取长势接近的 9~12 棵植株作为该样地代表植株,采用每木检尺测定每个代表植株的植物参数<sup>[11]</sup>,所选样地树的平均高度为(7.14±1.23) m,胸径为(16.70±6.12) cm,冠幅为(2.86±0.43) m,郁闭度为 0.64。并利用 LAI-2200 于植物生长期对冠层叶面积指数(LAI)进行定期测定。

1.2.2 土壤物理参数测定 去除土壤表面的枯落物,于 30 cm 深度处采集试验需要的土样。为了确定土壤的物理力学参数,采用烘干法测得土壤干密度为

1.21 g/cm<sup>3</sup>,土颗粒比重利用密度瓶测定为 2.48 g/cm<sup>3</sup>,通过干容重和土颗粒比重计算得到土壤孔隙度为 51.21%,利用环刀采集常规三轴剪切试验原状土样,通过固结不排水剪切试验获取土壤的有效黏聚力  $c'$  为 3.05 kPa 和有效内摩擦角  $\varphi'$  为 14.49°,土壤质地采用比重法测定,砂粒含量为 29.1%,粉粒含量为 61.8%,黏粒含量为 9.1%。为了获取水分运移模型参数,利用 TXT-55 渗透仪(变水头法)测得  $K_s$ (饱和导水率)为 35.7 cm/d,采用 H-1400PF 型土壤离心机测定特征曲线,并用 RETC 软件拟合 van Genuchten 模型的土壤水分特征曲线参数。

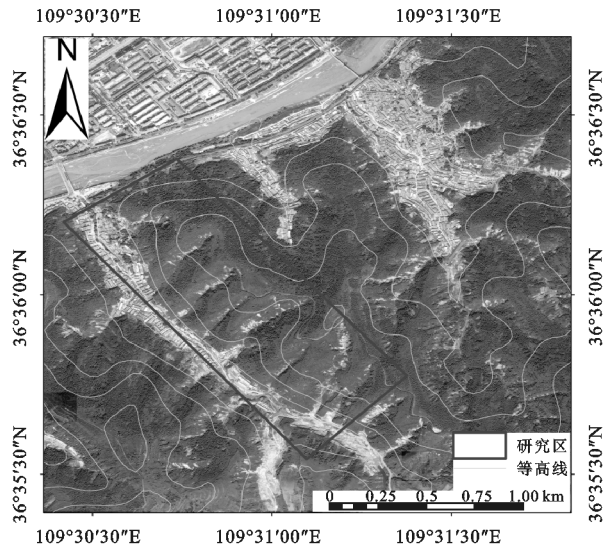


图 1 研究区域位置

1.2.3 根系调查及样品测试 为了量化根系附加黏聚力,用剖面法调查植物根系的截面积分布,在距离树干分别 25,50 cm 的坡上、坡中和坡下 3 部分开挖剖面,用游标卡尺对植物根系的直径进行测量,最终结果取平均值<sup>[12]</sup>,示意图见图 2。随机采集生长良好、完整无损且单根通直均匀且直径 < 10 mm 的根样,利用万能试验机进行单根拉伸试验。同时,在槐树干 50 cm 处设置 3 个取样点,利用  $\varphi$  50 土钻采集含有根系的土样,取出土样用 0.5 mm 土筛进行筛分,分拣出根系,筛选出根茎  $\leq$  2 mm 的吸水根系,利用游标卡尺对根长进行测量,以确定吸水根系分布的根长密度函数<sup>[13]</sup>。

1.3 根系附加黏聚力计算

将剖面调查植物根系直径分布结果按 0~1, 1~2, 2~5, 5~10 mm 径级分为 4 类,并对每个直径范围内的根系数量进行统计。用于计算在某一深度水平横截面上所有植物根系的总横截面积  $A_r$  (mm<sup>2</sup>) 和占该深度上土体总横截面积  $A$  (mm<sup>2</sup>) 的比例(RAR)<sup>[12]</sup>:

$$RAR = \frac{A_r}{A} = \frac{\sum_{i=1}^n \frac{\pi d_i^2}{4}}{A} \quad (1)$$

式中: $d_i$  为第  $i$  个根系的直径(mm);其中根系的总数目为  $n$ 。

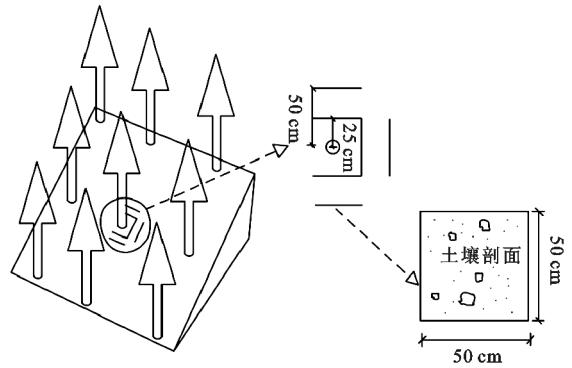


图 2 根系截面积比剖面调查示意

根系单根抗拉强度

$$P = \frac{4F_{\max}}{\pi D^2} \quad (2)$$

式中: $P$  为根系抗拉强度(MPa); $F_{\max}$  为最大拉力(N); $D$  为根断裂处直径(mm)。

Wu 等<sup>[5]</sup>建立的极限平衡法(Wu 式模型)是最经典的计算根系附加黏聚力的方法,但假定了所有根同时并且全部断裂,往往高估了植物根系对土壤抗剪强度的增强作用<sup>[12]</sup>。本文采用基于大量实测基础提出的经验性的修正系数, $k''=0.4$ ,对 Wu 模型的计算结果进行修正,公式为:

$$c_r = k'' k' \sum_{i=1}^n T_{ri} \frac{A_{ri}}{A} \quad (3)$$

式中: $c_r$  为根系附加黏聚力(kPa); $k'$  为根与破坏面间夹角相关的系数,通常取 1.2; $T_{ri}$  为每径级根的平均抗拉强度(kPa)。

1.4 植被坡体水分运移模拟

Hydrus-1D 适用于一维垂直非饱和流的各种恒定或非恒定的边界条件<sup>[14]</sup>,本研究使用 Hydrus-1D 进行地下水流的数值模拟,考虑植物根系吸水作用,基于 Richards 方程模拟 2017 年无植被坡体和有含刺槐坡体 100 cm 深度剖面范围内的土壤变压力水头和含水量对降雨等边界条件的动态响应结果。由于黄土高原土层深厚,地下水位较深,所以下边界设置为自由排水边界;上边界设置为有植被覆盖的大气边界。

(1)水分运移方程。使用嵌入根系吸水模型的 Richards 方程来描述垂直的一维水分运动为:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left( K(h) \left( \frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) \right) - S(z, t) \quad (4)$$

式中: $\theta$  是土壤的含水量; $h$  为压力水头(cm); $K(h)$  为非饱和导水率(cm/d); $s(z, t)$  为根系吸水速率(cm/d); $z$  为土壤深度(cm); $t$  为时间(d);模拟过程中所需水分特征曲线及非饱和导水率参数使用 Van Genuchten-Mulaem 模型<sup>[14]</sup>进行计算,公式为:



$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{(1 + |\alpha h|^{-n})^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(h) = K_s S_e^l (1 - (1 - S_e^{l/m})^m)^2 \quad (6)$$

式中:  $\theta_s$  为土壤饱和含水量为 0.461 2;  $\theta_r$  为土壤残余含水量为 0.025 1;  $\alpha$  为进气值的倒数 ( $\text{cm}^{-1}$ ), 为 0.016 7;  $n$  为孔径分布参数为 1.56;  $m$  为土壤水分特征曲线参数 ( $m = 1 - 1/n$ );  $l$  为土壤孔隙连通性参数, 通常取均值 0.5。

## (2) 刺槐根系吸水模型

Hydrus-1D 使用 Feddes 模型模拟根系吸水过程<sup>[11]</sup>:

$$s(z, t) = \alpha(h, z) \beta(z) T_p \quad (7)$$

式中:  $\alpha(h, z)$  为水分胁迫函数, 无量纲;  $\beta(z)$  为标准化的根系吸水分布函数, 无量纲;  $T_p$  为潜在蒸腾速率 ( $\text{cm/d}$ )。

其中水分胁迫函数计算公式为:

$$\alpha(h, z) = \begin{cases} h/h_1 & h_1 \leq h \leq 0 \\ 1 & h_2 \leq h < h_1 \\ (h-h_3)/(h_2-h_3) & h_3 \leq h < h_2 \\ 0 & h < h_3 \end{cases} \quad (8)$$

式中:  $h_1$ 、 $h_2$  和  $h_3$  为植物根系吸水的水势阈值, 本文参考李蓝君等<sup>[11]</sup>在黄土高原沟壑区对刺槐蒸散发的研究成果来确定, 分别取 -267.7, -893.2, -26 135.2 cm。

标准化根系分布函数  $\beta(z)$  计算方程为:

$$\beta(z) = \frac{\beta'(z)}{\int_0^{L_r} \beta'(z) dz} \quad (9)$$

式中:  $\beta'(z)$  为实测根系分布函数;  $L_r$  为最大根系分布深度 (cm)。

(3) 林木蒸腾与土壤蒸发的计算。Hydrus1D 模型中利用公式 (10) 和公式 (11) 计算潜在蒸腾速率 ( $T_p$ ) 和潜在蒸发量 ( $E_p$ ), 其中参考作物蒸散量 ( $ET_0$ ) 采用 Hargreaves 模型计算<sup>[15]</sup>, 公式为:

$$T_p = ET_0 e^{-\mu LAI} \quad (10)$$

$$E_p = ET_0 (1 - e^{-\mu LAI}) \quad (11)$$

式中:  $\mu$  为植物消光系数, 无量纲, 根据 White 等<sup>[16]</sup>的研究, 刺槐等落叶植物的初始值取 0.54; LAI 为叶面积指数, 无量纲。

(4) 林冠截留量计算。林冠截留量  $I$  (mm), 计算公式<sup>[17]</sup>为:

$$I = a \times LAI \left( 1 - \frac{1}{1 + \frac{bP}{a \times LAI}} \right) \quad (12)$$

式中:  $P$  为降雨量 (mm);  $a$  为截留常数 (mm/d), 通过刺槐日截留阈值与 LAI 的比值获得;  $b$  为植被覆盖率。

## 1.5 坡体稳定性分析

本研究假设地下水位在斜坡的底部, 孔隙水压力

的等值线与坡面平行。通过以上 2 个假设, 非饱和和渗透作用下的无限边坡可以简化为垂直于边坡面的一维渗流问题。因此, 本文采用 Lu 等<sup>[18]</sup>提出的变饱和条件下的无限斜坡模型对斜坡的稳定性进行分析, 模型概念图见图 3, 该模型稳定系数的计算公式为:

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan \beta} + \frac{2c}{W \sin 2\beta} - \frac{\sigma_s}{W} (\tan \beta + \cot \beta) \tan \varphi'(z) \quad (13)$$

式中:  $F_s$  为安全系数;  $\beta$  指地形坡度 ( $^\circ$ ), 研究区域平均坡度为  $25.2^\circ$ ;  $c = c' + c_r$ ,  $c$  为总有效黏聚力 (kPa);  $\sigma_s$  为吸应力 (kPa),

$$\sigma_s = -S_e (u_a - u_w) = -\frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} (u_a - u_w) \quad (14)$$

式中:  $S_e$  为饱和度;  $u_a$  为孔隙气压力 (kPa);  $u_w$  为孔隙水压力 (kPa);  $\theta$  为土壤的含水;  $\theta_s$  为土壤饱和含水量;  $\theta_r$  为土壤残余含水量;  $W$  为单位截面积土的条块重量 ( $\text{kN/m}^2$ ), 通过从潜在滑动面  $z = H_{wt} - H_{ss}$  至斜坡表面  $z = H_{wt}$  垂直方向上的容重  $\gamma$  进行计算。

$$W = \int_{H_{wt} - H_{ss}}^{H_{wt}} \gamma dz \quad (15)$$

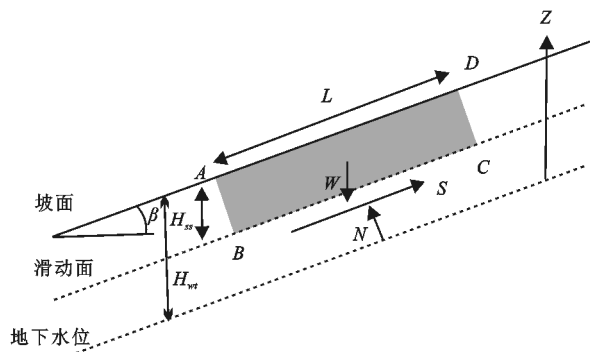


图 3 变饱和条件下无限斜坡概念性示意

## 1.6 刺槐固坡作用贡献率量化

初步定量评估根系机械作用对坡体稳定性的贡献率时, 不考虑植被水文作用对浅层坡体稳定性的贡献, 只考虑根系附加黏聚力对稳定性的影响, 利用无限斜坡模型计算出安全系数, 与无植被的坡体安全系数进行对比。量化刺槐固坡的水文效应时, 不计根系附加黏聚力对坡体稳定性的贡献, 只考虑刺槐水文作用对稳定性的影响, 并利用 Hydrus1D 分别对只具有林冠截留作用和林木蒸腾作用的水分运移结果进行模拟, 最终分别计算林冠截留作用和林木蒸腾作用共同作用和单独作用时坡体的安全系数, 与无植被的坡体安全系数进行对比分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 根系机械作用

由单根抗拉试验得出, 刺槐根系 0~1, 2~5, 5~10 mm 径级的平均抗拉强度分别为  $(38.45 \pm 9.55)$ ,  $(34.17 \pm 7.50)$ ,  $(15.11 \pm 2.70)$ ,  $(9.99 \pm 3.09)$  MPa,

通过单根最大抗拉强度与根系直径之间的幂函数关系式为: $T_r = 38.741D^{-0.716}$ ,  $R^2 = 0.759$  ( $n = 35, P < 0.001$ ); 根系的最大抗拉强度随着直径的增加成幂函数关系递减。由图 4 可知,各径级的根系截面积比随着土层深度的增加而减小。利用 Wu 模型计算出的根系

附加黏聚力呈现出随土层深度增加而递减的趋势,根系附加黏聚力在 10 cm 深度处达到最大值 19.13 kPa,在 60 cm 土层深度处为 3.35 kPa,根系附加黏聚力能够直接表征根系机械作用提高土壤黏聚力的效应。

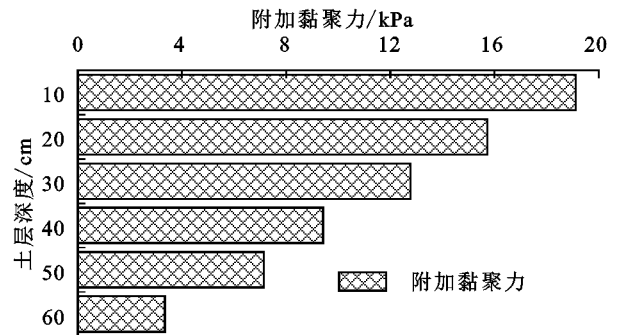
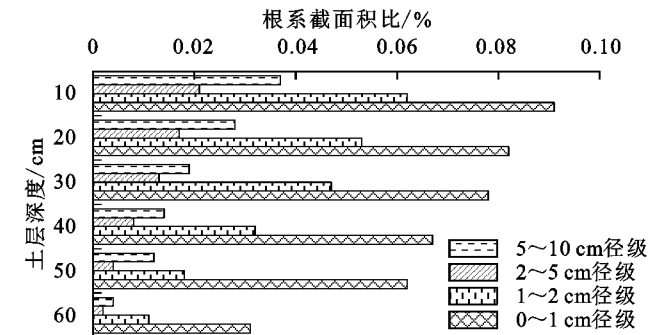


图 4 根系截面积比和附加黏聚力分布

2.2 刺槐生态水文作用

影响坡体土壤含水量动态变化的条件包括降雨量、蒸发量、蒸腾量、林冠截留量等,图 5 为 2017 年影响土壤含水量变化的动态因素条件。2017 年降雨主要集中在 5—10 月,且暴雨集中分布于 7、8 月。全年平均温度为 10.3 °C,日平均最低和最高气温分别为 -9.6 °C 和 28.3 °C,高温高热的天气集中分布于 6—8 月。蒸腾量和蒸发量均在高温高热的晴天时较高,在阴雨低温天气时较低。同时,截留作用主要发生在刺槐的生长期,4—10 月刺槐林地 LAI 的月平均值为 0.96 ± 0.53, 3.20 ± 0.77, 4.29 ± 0.12, 3.81 ± 0.15, 3.19 ± 0.21, 2.51 ± 1.19, 0.84 ± 0.91, 由此可知,截留量随着 LAI 的增大而增大,6、7 月时林冠截留量达到全年最大值。

6.11%, 植被水文作用能使坡体含水量降低。同时,对比图 5 的含水量峰值强度,含刺槐坡体的含水量的大多数峰值较无植被坡体的峰值低,且在刺槐生长期 4—9 月内刺槐对坡体对坡体含水量的消减作用较落叶期明显。

裸坡和含刺槐的坡体含水量的动态变化见图 5,在降雨条件下,坡体土壤含水量增大,降雨结束后坡体土壤含水量消减。降雨对坡体含水量的影响范围随深度的增加递减,含水量变化的临界点(湿润峰)也随深度的增加具有明显的滞后效应,且含刺槐的坡体湿润峰的滞后效应要强于无植被的坡体,20, 40, 60, 100 cm 的深度较无植被坡体分别滞后 0.3, 51.4, 54.2, 12.3 天,说明刺槐的水文作用能够延缓湿润峰的到来。由图 6 可知,刺槐水文作用对 20, 40, 60 cm 深度处土壤水分的变化影响较大,对 100 cm 深度处土壤水分的变化影响较小,这主要是由于刺槐的吸水根系主要分布在 0—60cm 范围内,100 cm 深度处土壤水分的重分布主要取决于林冠截留作用和上层根系吸水作用减少土壤水分的来源。坡体 20, 40, 60, 100 cm 的深度处,无植被坡体的平均含水量为 18.11% ± 6.27%, 17.71% ± 5.92%, 17.15% ± 5.98%, 16.32% ± 6.17%, 含刺槐的坡体平均含水量为 15.27% ± 7.87%, 14.26% ± 7.53%, 15.15% ± 6.47%, 15.34% ±

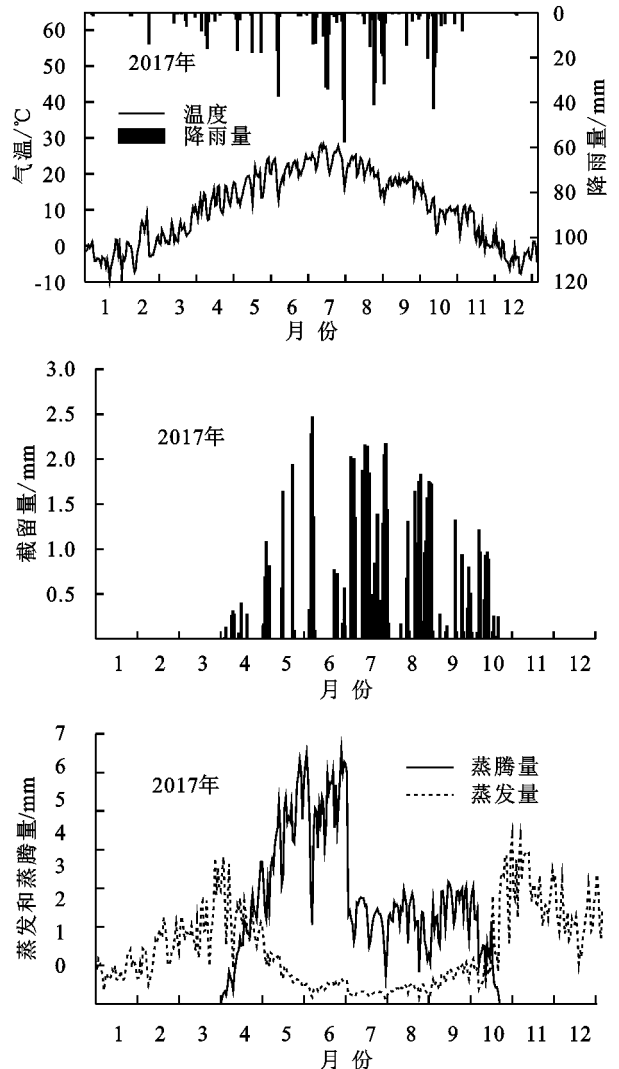


图 5 影响土壤水分变化的动态因素条件

由图 7 可知,当土壤干燥时,吸应力负值高达 $-18.79$  kPa,含水量较高时,吸应力的负值低至 $-1.82$  kPa。吸应力的明显变化临界点和含水量变化临界点随坡体土层深度增加具有相同的滞后效应。同时,在降雨较

为集中的 4—9 月刺槐的水文作用能够在一定程度增加吸应力的负值,20,40,60,100 cm 深度处平均降低 $5.43 \pm 5.11, 6.31 \pm 5.01, 2.61 \pm 2.65, 1.24 \pm 1.87$  kPa,有效消减了降雨对吸应力负值的衰减作用。

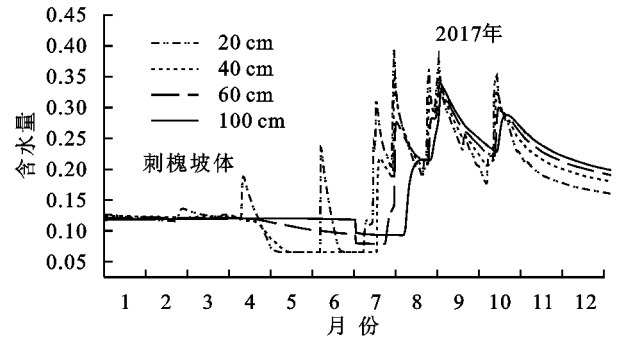
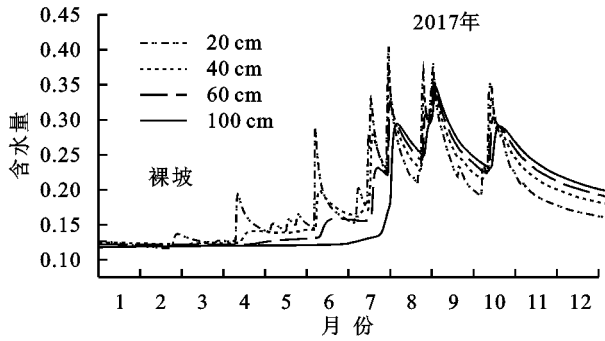


图 6 坡体不同土层深度含水量动态变化

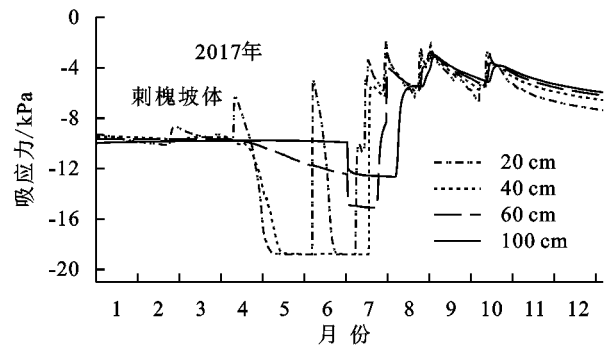
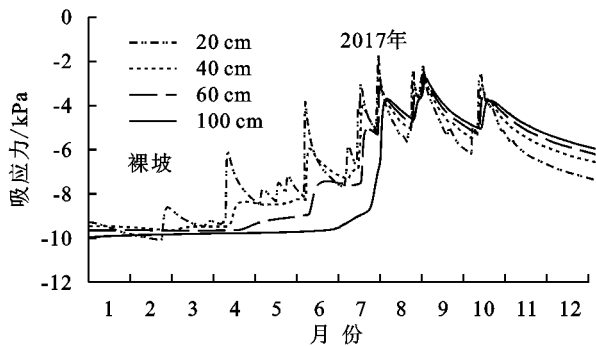


图 7 坡体不同土层深度吸应力动态变化

### 2.3 植被坡体稳定性分析

由图 8 可知,刺槐植被根系的机械力学作用和水文作用耦合能够显著提高浅层坡体的稳定性和土壤抗蚀性。通过计算可得 20,40,60,100 cm 深度处刺

槐植被固土作用对坡体稳定性平均提高: $223.35\% \pm 42.99\%$ ,  $133.24\% \pm 35.57\%$ ,  $31.05\% \pm 15.94\%$ ,  $4.19\% \pm 8.52\%$ ,刺槐对提高坡体稳定性的作用,随着坡体土层深度的增加而减小。

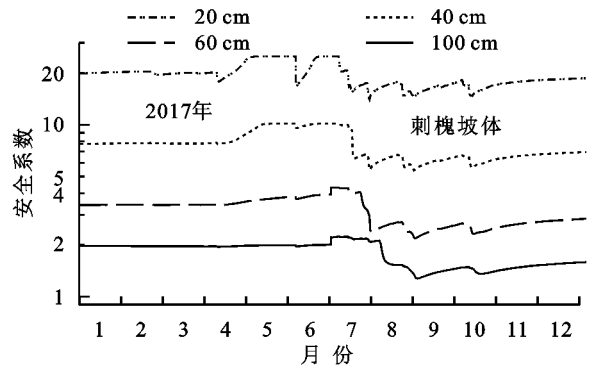
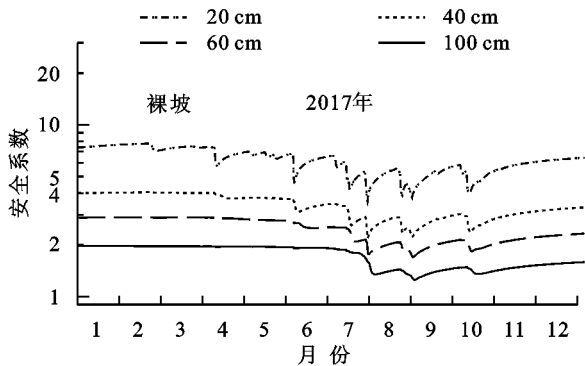


图 8 坡体不同土层深度安全系数动态变化

图 9 中分别为 20,40,60 cm 深度处根系机械作用的动态贡献率,机械作用的平均贡献率为 $196.56\% \pm 28.08\%$ ,  $106.74\% \pm 13.19\%$ ,  $20.61\% \pm 2.43\%$ ,贡献率随深度的增加而递减,这是由于在该深度范围内的根系附加黏聚力随深度的增加而递减。根系机械作用对浅表层坡体稳定性的贡献率随着含水量的变化具有一定的波动性。当坡体土壤含水量较低时,根系机械作用对浅层坡体稳定性的贡献率较小。

刺槐植被的水文作用,分别使得 20,40,60,100 cm 深度处全年的稳定性提升 $34.44\% \pm 39.06\%$ ,  $32.29\% \pm 35.48\%$ ,  $12.04\% \pm 15.91\%$ ,  $4.19\% \pm 8.52\%$ 。图 10 为植被林冠截留作用和蒸腾(根系吸水)作用对坡体稳定性的动态贡献率,刺槐提升坡体稳定性的作用主要发生在生长期。林冠截留作用使得 2017 年全年降雨量达到地面的从 746.1 mm 减少到 675.9 mm,在降雨强度相对较低时,截留作用能够有效提高浅表层坡体稳定性,分别对 20,40,60,100 cm 土层深度处的稳定性最高提升 136.48%,

79.52%, 38.31%, 30.21%, 但降雨强度较大时, 截留作用对浅表层坡体的稳定性贡献相对较小。在高温高热的夏季, 植被蒸腾耗水作用对浅层坡体稳定性的贡献较大, 分别对 20, 40, 60, 100 cm 土层深度处的稳定性最高提升 113.90%, 108.42%, 69.79%, 56.11%。

### 3 讨论

为了研究刺槐植被的固坡效应, 在植被水文作用研究方面选用的 Hydrus-1D 已经广泛运用于生态水文领域植被耗水量和坡体水分运移的模拟<sup>[19]</sup>, 模拟的结果可能会与坡体内部土壤水分的实际情况有一定差异, 但模型作为一种预测工具, 在一定程度上可以反映坡体土壤水分的变化规律及趋势<sup>[20]</sup>。根系机械作用的量化则选用在根系固土领域应用较广泛的 Wu 模型进行计算。对于浅层坡体稳定性分析, 由于植被根系作用的范围较浅, 由降雨诱发的含植被坡体浅层滑坡滑动面都较浅, 且滑动面与坡面平行, 在这种情况下应力集中现象可以忽略不计<sup>[18]</sup>, 因而本

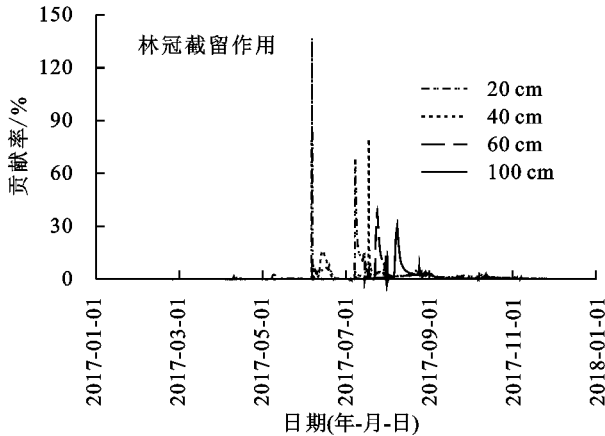


图 10 植被水文作用对坡体稳定性的动态贡献率

通过对刺槐植被的根系调查可知, 根系附加黏聚力对浅层坡体的加固作用主要集中于 0—60 cm 的土层深度范围, 且在这一深度范围内刺槐根系附加黏聚力由 19.13 kPa 衰减至 3.35 kPa, 刺槐附加黏聚力的分布和大多数树种一样随深度的增加而衰减<sup>[12]</sup>, 且提升浅层坡体的稳定性的作用仅存在于根系分布的范围内。根系机械作用对稳定性的贡献率随着坡体土壤含水量的变化而波动, 这与 Arnone 等<sup>[21]</sup>的研究结果具有一致性, 利用变饱和条件下无限斜坡模型计算的根系机械作用对稳定性的贡献率的波动来源于坡体土壤含水量的变化不断改变坡体的土壤容重。

降雨引起坡体土壤含水量快速增大是坡体稳定性降低的潜在机制<sup>[22]</sup>, 植被水文作用能够降低土壤含水量、延缓土壤湿润锋的到来, 通过改变吸应力来增加土壤表观抗剪切强度, 提升坡体稳定性<sup>[4]</sup>, 刺槐林冠截留提升坡体稳定性的作用, 在降雨强度较小时最为有效, 在高强度的暴雨中作用较小, 这与 Sidle

文借鉴 Arnone 等<sup>[21]</sup>和 McGuire 等<sup>[3]</sup>关于植被稳定性的研究方法, 采用变饱和条件下无限斜坡模型分析浅层植被坡体稳定性对上边界条件变化的动态响应, 并分别对刺槐根系机械固土作用和水文作用对浅层坡体稳定性的贡献进行初步量化。

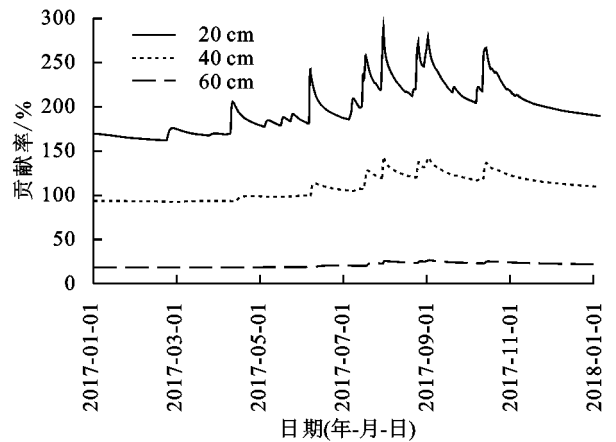
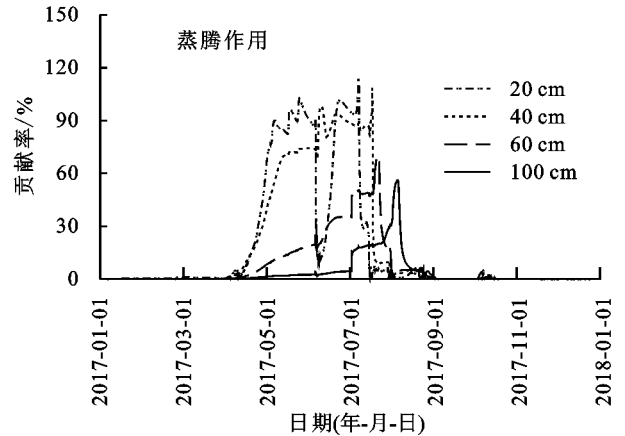


图 9 根系机械作用对坡体稳定性的动态贡献率



等<sup>[23]</sup>于泰国对森林冠层截留作用缓解浅层滑坡的研究结果一致。这主要是由于林冠的截留能力有限, 树冠可以缓冲早期的降雨峰值, 但在高强度的持续降雨中, 林冠饱和, 无法截留过量降雨。刺槐蒸腾耗水提升浅层坡体稳定性的作用与其他落叶树种一样主要发生于植物的生长期<sup>[24]</sup>, 耗水根区范围内, 蒸腾耗水作用直接吸收土壤水分, 改变坡体土壤水分重分布, 间接影响耗水根区深度以下土壤的含水量, 本研究中 100 cm 无耗水根系分布的土层深度处的稳定性亦受到刺槐蒸腾耗水作用的影响, 因而植被蒸腾耗水作用对浅层坡体稳定性的贡献不仅限于根区。蒸腾耗水作用对浅层坡体稳定性的贡献具有一定的波动性是由于植物的蒸腾作用受天气变化的影响, 高温高热的晴天蒸腾耗水作用较低温阴雨天气。

由于受蒸散发和降雨等条件的驱动, 植被对浅层坡体稳定性的贡献具有季节性变化<sup>[25]</sup>, 刺槐对坡体稳定性贡献也具有明显的季节性变化, 由于机械作用



的贡献率波动较小,所以季节性变化主要来源于刺槐水文作用对坡体稳定性的贡献。植被的水文作用和根系的机械作用耦合固坡,但二者对坡体稳定的贡献具有一定的差异。Arnone 等<sup>[21]</sup>通过模拟的结果表明,植被水文作用对坡体稳定性的贡献率可能大于根系机械作用的贡献率。对比图 9 和图 10 可知,在刺槐生长期水文作用对稳定性的贡献率的部分峰值比根系机械作用对稳定性的贡献大,在落叶期内植被固坡的水文效应几乎可以忽略,此时主要依靠根系的机械作用提高坡体的稳定性。

## 4 结论

(1)刺槐根系机械作用对 20,40,60 cm 土层深度处的稳定性系数分别提升 196.56%±28.08%,106.74%±13.19%,20.61%±2.43%。同时,根系机械作用对浅层坡体的稳定性的贡献随含水量的变化具有一定波动性。

(2)刺槐的水文作用能推迟湿润峰到来,同时有效消减了降雨对吸应力的衰减作用,对提高浅层坡体稳定性具有显著效果。其中,林冠截留全年能拦截 70.2 mm 的降雨,在前期降雨中林冠截留作用能够有效提升浅层坡体稳定性,后期暴雨集中导致林冠饱和,林冠截留作用对浅层坡体稳定性影响较小;刺槐蒸腾耗水对浅层坡体的稳定性的影响,受降雨等气象条件变化的制约,但在整个生长季内都能有效提升浅层坡体的稳定性。

(3)在刺槐落叶期,主要由根系机械作用提升浅层坡体稳定性;在生长期,植被的水文作用和根系机械作用均能有效提升浅层坡体稳定性,且水文作用对浅层坡体稳定性的部分贡献率峰值大于刺槐根系机械作用的贡献率。

### 参考文献:

- [1] Zhuang J, Peng J, Wang G, et al. Prediction of rainfall-induced shallow landslides in the Loess Plateau, Yan'an, China, using the TRIGRS model[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2017, 42(6): 915-927.
- [2] Fatahi B, Khabbaz H, Indraratna B. Bioengineering ground improvement considering root water uptake model[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 222-229.
- [3] Mcguire L A, Rengers F K, Kean J W, et al. Elucidating the role of vegetation in the initiation of rainfall-induced shallow landslides: Insights from an extreme rainfall event in the Colorado Front Range[J]. Geophysical Research Letters, 2016, 43(17): 9084-9092.
- [4] Chirico G B, Borga M, Tarolli P, et al. Role of vegetation on

slope stability under transient unsaturated conditions[J]. Procedia Environmental Sciences, 2013, 19: 932-941.

- [5] Wu T H, McKinnell III W P, Swanston D N. Strength of tree roots and landslides on Prince of Wales Island, Alaska[J]. Canadian Geotechnical Journal, 1979, 16(1): 19-33.
- [6] Abdi E, Majnounian B, Genet M. Quantifying the effects of root reinforcement of Persian Ironwood (*Parrotia persica*) on slope stability; a case study: Hillslope of Hyrcanian forests, northern Iran[J]. Ecological Engineering, 2010, 36(10): 1409-1416.
- [7] Band L E, Hwang T, Hales T C, et al. Ecosystem processes at the watershed scale: Mapping and modeling ecohydrological controls of landslides[J]. Geomorphology, 2012, 137(1): 159-167.
- [8] Hilten R N, Lawrence T M, Tollner E W. Modeling stormwater runoff from green roofs with HYDRUS-1D[J]. Journal of Hydrology, 2008, 358(3/4): 288-293.
- [9] 吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(1): 1-47.
- [10] 王思源, 曾润强, 乔良, 等. 松散斜坡上刺槐根系分布特征及其抗拉实验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2014, 50(5): 676-679, 686.
- [11] 李蓝君, 宋孝玉, 夏露, 等. 黄土高原沟壑区典型造林树种蒸散发对气候变化的响应[J]. 农业工程学报, 2018, 34(20): 148-159.
- [12] Ji J, Kokutse N, Genet M, et al. Effect of spatial variation of tree root characteristics on slope stability. A case study on Black Locust (*Robinia pseudoacacia*) and Arborvitae (*Platycladus orientalis*) stands on the Loess Plateau, China[J]. Catena, 2012, 92: 139-154.
- [13] Wu J, Zhang R, Gui S. Modeling soil water movement with water uptake by roots[J]. Plant and Soil, 1999, 215(1): 7-17.
- [14] Van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. Soil Science Society of America Journal, 1980, 44(5): 892-898.
- [15] Hargreaves G H, Allen R G. History and evaluation of Hargreaves evapotranspiration equation[J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2003, 129(1): 53-63.
- [16] White M A, Thornton P E, Running S W, et al. Parameterization and sensitivity analysis of the BIOME-BGC terrestrial ecosystem model: Net primary production controls[J]. Earth Interaction, 2000, 43: 1-86.
- [17] Wang H, Tetzlaff D, Soulsby C. Modelling the effects of land cover and climate change on soil water partitioning in a boreal headwater catchment[J]. Journal of Hydrology, 2018, 558: 520-531.



- estry ecosystems in a subtropical humid karst area[J].*Journal of hydrology*, 2018, 563(1): 1042-1050.
- [6] Zhang Y L, Feng S Y, Wang F X, et al. Simulation of soil water flow and heat transport in drip irrigated potato field with raised beds and full plastic-film mulch in a semiarid area [J]. *Agricultural Water Management*, 2018, 209(C): 178-187.
- [7] 李艳, 刘海军, 黄冠华. 麦秸覆盖条件下土壤蒸发阻力及蒸发模拟[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(4): 98-106.
- [8] Zribi W, Aragüés R, Medina E, et al. Efficiency of inorganic and organic mulching materials for soil evaporation control [J]. *Soil and Tillage Research*, 2015, 148(1): 40-45.
- [9] 周丽芳, 阿拉木萨. 生物结皮发育对地表蒸发过程影响机理研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2011, 25(4): 193-200.
- [10] 侯亚玲, 周蓓蓓, 王全九. 枯草芽孢杆菌对盐碱土面蒸发及水盐分布的影响[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 306-311.
- [11] 肖茜, 张洪培, 沈玉芳, 等. 生物炭对黄土区土壤水分入渗蒸发及硝态氮淋溶的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(16): 128-134.
- [12] Xin P, Zhou T Z, Lu C H, et al. Combined effects of tides, evaporation and rainfall on the soil conditions in an intertidal creek-marsh system[J]. *Advances in Water Resources*, 2017, 103(2): 1-15.
- [13] Geng X, Boufadel M C. Numerical modeling of water flow and salt transport in bare saline soil subjected to evaporation[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 100(524): 427-438.
- [14] 曹星星, 吴攀, 王志强, 等. 岩溶地区红土与碳酸盐岩上覆地层相关性及其指示意义: 以贵阳乌当区剖面为例[J]. *地球与环境*, 2012, 40(1): 57-62.
- [15] 邸欣月, 安显金, 董慧, 等. 贵州喀斯特区域土壤有机质的分布与演化特征[J]. *地球与环境*, 2015, 43(6): 697-708.
- [16] 符必昌, 黄英, 方丽萍, 等. 碳酸盐岩上覆红土的成因研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(增刊1): 2959-2967.
- [17] 王志超. 农膜残留对土壤水分运移的影响及模拟研究[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2017.
- [18] Xiao B, Zhao Y G, Shao M A. Characteristics and numeric simulation of soil evaporation in biological soil crusts[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(1): 121-130.
- [19] 韩江波, 周志芳, 傅志敏, 等. 温度和水汽对土壤水动态影响的模拟研究[J]. *水利学报*, 2014, 45(6): 666-674.
- [20] Kidron G J, Tal S T. The effect of biocrusts on evaporation from sand dunes in the Negev Desert[J]. *Geoderma*, 2012, 179/180: 104-112.
- [21] 杨永胜, 卜崇峰, 高国雄. 毛乌素沙地生物结皮对土壤温度的影响[J]. *干旱区研究*, 2012, 29(2): 352-359.
- [22] Zhang Z S, Chen Y L, Xu B X, et al. Topographic differentiations of biological soil crusts and hydraulic properties in fixed sand dunes, Tengger Desert [J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(2): 205-215.
- [23] Zhang F, Peng Z D, An Y X, et al. Water-holding characteristics of the litter under main tree species plantations in Beijing Xishan mountainous areas [J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2010, 46(10): 6-14.
- [24] 赵阳, 余新晓, 吴海龙, 等. 华北土石山区典型森林枯落物层和土壤层水文效应[J]. *水土保持学报*, 2011, 25(6): 148-152.
- [25] 王莉, 秦树高, 张宇清, 等. 生物土壤结皮对毛乌素沙地油蒿群落土壤水分的影响[J]. *北京林业大学学报*, 2017, 39(3): 48-56.
- (上接第 152 页)
- [18] Lu N, Godt J W. *Hillslope hydrology and stability*[M]. New York: Cambridge University Press, 2013: 313-356.
- [19] Li Y, Šimůnek J, Jing L, et al. Evaluation of water movement and water losses in a direct-seeded-rice field experiment using Hydrus-1D [J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 142: 38-46.
- [20] 刘小璐, 鲁克新, 李鹏, 等. 不同降雨条件下坡面土壤水分入渗过程研究与模拟[J]. *干旱区资源与环境*, 2018, 32(11): 114-118.
- [21] Arnone E, Caracciolo D, Noto L V, et al. Modeling the hydrological and mechanical effect of roots on shallow landslides[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52(11): 85890-8612.
- [22] Kirschbaum D B, Stanley T, Simmons J. A dynamic landslide hazard assessment system for Central America and Hispaniola[J]. *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 2015, 15(10): 2847-2882.
- [23] Sidle R C, Ziegler A D. The canopy interception-landslide initiation conundrum: Insight from a tropical secondary forest in northern Thailand [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(1): 651-667.
- [24] Kim J H, Fourcaud T, Jourdan C, et al. Vegetation as a driver of temporal variations in slope stability: The impact of hydrological processes [J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(10): 4897-4907.
- [25] Bittelli M, Valentino R, Salvatorelli F, et al. Monitoring soil-water and displacement conditions leading to landslide occurrence in partially saturated clays [J]. *Geomorphology*, 2012, 173: 161-173.