

喀斯特森林近地表层覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响

车陆禄¹, 刘冬冬^{1,2}, 杨 娅¹, 陈 雪¹

(1.贵州大学资源与环境工程学院, 贵阳 550025; 2.喀斯特地质资源与地质环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: 蒸发是西南喀斯特地区薄层土壤水分损失的主要途径, 浅层土壤水分的存蓄对喀斯特地区农业生产和生态恢复至关重要。以西南喀斯特森林碳酸盐岩红土为研究对象, 基于室内蒸渗试验设置4个苔藓生物量(0, 0.32, 0.64, 0.95 kg/m²)和3个松针生物量(0, 0.32, 0.64 kg/m²)共12种处理, 分析森林近地表层覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程及表层温度时空分布的影响规律, 并对比3种蒸发模型(Black、Rose、空气动力学蒸发模型)在喀斯特森林碳酸盐岩红土的适用性。结果表明: 苔藓和松针覆盖显著降低累积蒸发量和蒸发速率($P < 0.05$), 接种苔藓0.95 kg/m²和覆盖松针0.64 kg/m²处理比裸土累积蒸发量小36.9%; 苔藓和松针导致土壤含水量显著增加($P < 0.05$); 苔藓和松针增加了表层土壤的平均温度, 松针对土壤温度的提升作用强于苔藓; Black、Rose和空气动力学模型均能较好地模拟碳酸盐岩红土蒸发过程, Black蒸发模型的拟合精度高于Rose和空气动力学蒸发模型。研究结果能为西南喀斯特地区的水量平衡分析提供理论支撑并加强对喀斯特森林地表水文过程的认知。

关键词: 喀斯特森林; 苔藓; 松针覆盖; 碳酸盐岩红土; 蒸发过程; 蒸发模型

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2020)05-0153-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2020.05.022

Effect of Surface Cover on Evaporation Process of Carbonate Laterite in Karst Forest

CHE Lulu¹, LIU Dongdong^{1,2}, YANG Ya¹, CHEN Xue¹

(1.College of Resource and Environment Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025;

2.Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment, Ministry of Education, Guiyang 550025)

Abstract: Evaporation is one of the most important ways for soil water loss of shallow layer from karst areas in Southwest China. The storage of soil water in shallow layer is very important for agricultural production and ecological restoration in these regions. Based on a series of indoor evaporation experiments, four moss crust biomass levels (0, 0.32, 0.64 and 0.95 kg/m²) and three pine needle biomass levels (0, 0.32 and 0.64 kg/m²) were used to estimate the influences of moss crusts and pine needles on the evaporation losses and the temporal and spatial distribution of soil surface temperature. The performances of three different evaporation models (Black, Rose and Bulk) to simulate the evaporation process of carbonate laterite in karst forest were compared. The results showed that the cumulative evaporation and evaporation rate of moss and pine needle coverage were significantly reduced ($P < 0.05$), and the cumulative evaporation of soil treated with moss inoculation (0.95 kg/m²) and pine needle coverage (0.64 kg/m²) was reduced by 36.9% compared with that of bare soil. Soil water content was significantly increased by moss crusts and pine needles ($P < 0.05$). Moss crusts and pine needles increased the average temperature of the topsoil, and the effect of pine needles on soil temperature was stronger than that of moss crusts. Black, Rose, and Bulk models could well simulate the evaporation process of carbonate derived laterite, but Black model had better performance than Rose and Bulk models. Our results can provide theoretical support for the analysis of water balance and strengthen the understanding of surface hydrologic process in karst forests.

Keywords: karst forest moss; pine needle cover; carbonate laterite; evaporation process; evaporation model

收稿日期: 2020-02-02

资助项目: 国家自然科学基金项目(41807016); 黔科合基金项目([2019]1081); 贵州省水利科技项目(KT201803); 贵州省人才基地项目(RCJD2018-21)

第一作者: 车陆禄(1998-), 男, 硕士研究生, 主要从事岩溶区生态水文研究。E-mail: 1780195024@qq.com

通信作者: 刘冬冬(1989-), 男, 博士, 特聘教授, 硕士生导师, 主要从事地球关键带水土过程及生态环境效应研究。E-mail: liudongdong@foxmail.com

西南喀斯特地区常年受溶蚀作用形成了区别于非喀斯特地区的二元水文地质结构,该地区基岩裸露率高,土壤浅薄、土壤块状分布且总量少^[1]。贵州省位于西南喀斯特区域中心,受亚热带季风气候的影响,降雨充沛,蒸发作用强烈,造成区域地表水文过程复杂,极易导致干旱缺水。在喀斯特生态系统中,森林是抵御水土流失等生态问题的重要保障,在陆地水循环中起着巨大的调节作用。森林近地表层覆盖在提升土壤表层稳定性、涵养水源、抑制土壤蒸发等方面有重大意义。因此,探讨喀斯特森林近地表层覆盖对土壤蒸发过程的影响在喀斯特地区水土流失防治及生态修复中有现实意义。

蒸发是喀斯特地区水文循环中重要过程,直接影响到水资源的分配管理^[2],蒸发过程中水分脱离土壤以气态形式进入大气中,引起土壤含水量波动,进而对农业生产和植物生长造成巨大影响^[3]。目前对喀斯特地区土壤水分蒸发的研究主要集中在特殊植被和覆盖材料对蒸发过程的调控机理上,Swaffer 等^[4]探究了喀斯特森林中马尾松生理形态特征对土壤蒸发的影响,Zhang 等^[5]比较了喀斯特农林生态系统中典型植被覆盖(荒草、灌木及农作物)对土壤蒸发过程的影响。利用覆盖材料是减少土壤表面与大气之间水汽交换的有效途径,与裸露的土壤相比,增加麦秆覆盖量对土壤蒸发有明显的抑制作用^[6-7],Zribi 等^[8]讨论了不同覆盖材料(塑料、松树皮、藤蔓)对土壤蒸发的影响。苔藓和松针覆盖作为喀斯特森林典型的近地表特征,对于维持区域生态系统稳定具有重要作用。近年来,关于苔藓对土壤蒸发过程的影响研究受到研究者的广泛关注。苔藓能有效降低土壤水分蒸发能力,使土壤水分分布浅层化并且增大土壤的水分时空分布差异,周丽芳等^[9]研究表明,苔藓对土壤蒸发以抑制作用为主,但随着发育程度的增加,由抑制蒸发逐渐转为促进蒸发。尽管如此,喀斯特森林近地表层覆盖对土壤蒸发过程的影响研究还存在较大不足。虽然针对 Black、Rose 和空气动力学模型在土壤蒸发模拟方面已经做了大量研究^[10-13],但是对于喀斯特森林近地表层覆盖条件下这些模型的适用性研究仍较少。受限于蒸发机理阐释不足,喀斯特森林近地表层覆盖条件下土壤蒸发模型还存在精度不高和适用性弱等问题。

碳酸盐岩红土广泛分布于西南喀斯特地区,是贵州省较为典型的土壤。贵州省境内出露的碳酸盐岩面积约 $13 \times 10^4 \text{ km}^2$,占全省总面积的 18.54%,在碳酸盐岩出露地区分布着薄厚不均的红色黏土。目前对该地区碳酸盐岩红土分布及其土壤的理化性质进行了一定的研究^[14-16],碳酸盐岩红土的黏粉粒含量多

在 60%以上,属重黏土,碳酸盐岩红土的天然含水量一般为 21%~60%,最大可达 90%,碳酸盐岩红土微结构研究^[16]表明,土壤孔隙连通性并不好。然而,目前对碳酸盐岩红土蒸发过程的量化研究仍没有明确结论。因此,本研究选取喀斯特森林未扰动的碳酸盐岩红土,通过模拟土柱蒸发试验分析喀斯特森林近地表层覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响。本研究目的在于:(1)明确森林近地表覆盖(苔藓和松针覆盖)下对红土蒸发过程差异;(2)对比不同处理间土壤表层温度、土壤含水率和土壤蒸发特性差异,揭示喀斯特森林近地表层覆盖对红土蒸发的作用机制;(3)对常见蒸发模型和公式进行适用性检验。研究结果可为喀斯特森林生态水文过程研究及区域水量平衡计算提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于贵阳市花溪区国土资源部喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室邻近 30 年生马尾松林($26^{\circ}25'39.62''\text{N}$, $106^{\circ}40'5.81''\text{E}$)。花溪区属亚热带季风气候,年均降水量 1 178.3 mm,年平均蒸发量 738 mm,年平均气温 14.9°C ,年均日照时间 1 686.8 h,无霜期 246 天,降雨主要集中在夏季,其中 6—8 月的降雨量占全年降雨量的 70%以上。森林土壤为喀斯特典型的碳酸盐岩红土,土壤黏粒、粉粒和砂粒含量分别为 25.74%,71.18%,1.08%;土壤有机质含量 51.88 g/kg,电导率 $75.3 \mu\text{S}/\text{cm}$,pH 为 6.2。森林松针常年凋落在地表形成松针凋落层,近地表生长有灌草和苔藓等,苔藓为小灰藓,植物体形小,枝叶与茎叶同形,受阳光照射时长短,多沿地表水流汇聚处生长,苔藓与马尾松凋落的松针覆盖构成了喀斯特马尾松森林近地表典型的特征。

1.2 土柱试验

研究于 2019 年 4—6 月在国土资源部喀斯特环境与地质灾害防治重点实验室土壤水观测实验场进行,通过模拟土柱蒸发试验完成。通过野外实测发现,马尾松凋落松针直径范围为 0.15~0.25 mm,长度范围 11~18 cm,覆盖厚度范围为 3~5 cm,干生物量范围 $0 \sim 0.65 \text{ kg}/\text{m}^2$;苔藓厚度 3~6 cm,生物量 $0 \sim 0.95 \text{ kg}/\text{m}^2$,因此选定 0,0.32,0.64,0.95 kg/m^2 4 个梯度苔藓接种量和 0,0.32,0.64 kg/m^2 3 个梯度松针覆盖量(表 1)。由于野外原生苔藓的结构和发育程度差异较大,考虑通过与 Xiao 等^[11]类似的人工培育苔藓的方法,减小苔藓结构和发育程度差异。苔藓在自然条件下主要通过有性孢子繁殖和无性断茎增殖,因此在本次研究中利用野外采集的苔藓茎叶碎块人工培育苔藓,然后将苔藓在土壤表面进行定殖。

从马尾松林中采集结构完整的苔藓,去除土壤和岩石颗粒后放入植物粉碎机,得到苔藓断茎。苔藓断茎在尺寸 30 cm 底部自由排水的方盘中进行培育,培育土壤为试验采集土壤,将土壤填装在方盘中,土表均匀播撒苔藓断茎,填土厚度为 0.5 cm,容重约为 1.3 g/cm³。最后将苔藓培育置于温室中,控制温室温度 20~30 ℃,每隔 7 天进行灌溉直至苔藓完全覆盖土表结束,得到含 0.5 cm 薄层土壤基底的人工培育苔藓。

试验土壤为马尾松林内碳酸盐岩红土,与苔藓培育土壤相同,选择暴雨后进行现场取样。在自然降雨后立即清除马尾松林土层碎石、树叶和表面腐殖质层等,将直径 200 mm 高 30 cm 的 PVC 管打入地表 16 cm,挖出 PVC 管并密封管底放置于阴凉处并切割高于土壤的部分,预留 4 cm 用于放置苔藓和松针,共制备 36 根原状土柱。考虑森林土壤性质空间差异,在同一个地点进行 PVC 管取样,实测土壤含水量为 0.30 g/g。原状土柱制备完成后,立即移入实验室中,进行试验处理。温室培育得到的苔藓含 0.5 cm 薄层土壤基底,预先使其吸水饱和,利用接种法移栽苔藓,接种过程中在土表喷洒少量的水并用小刷轻刮土表至糊状,施加轻微的压力使苔藓的薄层土壤基底与土表贴合,以确保苔藓成活。考虑到松针的覆盖特征,松针直接从马尾松林中采集并随机均匀铺满土壤表面。

试验开始后,每隔 1~5 天早晨 9:00 观测土壤蒸发过程和土壤表层温度变化。大气湿度利用 testo 174

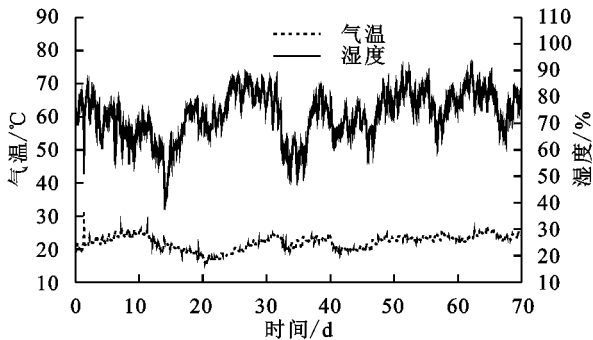


图 1 室内温湿度变化及自由水面蒸发过程

1.3 蒸发模型

Black 模型形式简单,广泛应用于蒸发下边界没有水分持续补给时土壤累积蒸发量随时间的变化情况。侯亚玲等^[10]探究了 Black 模型模拟枯草芽孢杆菌生长情况下的盐碱土蒸发过程,结果表明,Black 模型能够较好地估算枯草芽孢杆菌生长情况下的盐碱土累积蒸发量。公式为:

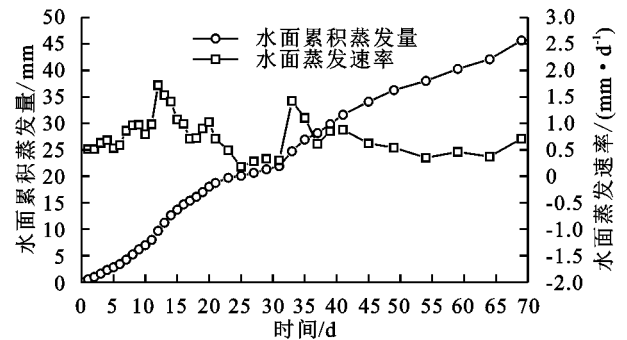
$$E_c = F + B t^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

式中: E_c 为累积蒸发量(mm); F 为蒸发经验参数, B 为蒸发参数,大小与土壤水力特性有关; t 为蒸发历时(天)。

自记温湿度计测量,温湿度计自动记录间隔为 5 min。自由水面蒸发过程用相同规格的 PVC 管灌装蒸馏水测量。土柱重量变化利用精度为 0.1 g 的电子秤测得,土柱质量变化即为该时段的水分蒸发损失量,累积蒸发量为土柱减少的质量与蒸发面积的比值,蒸发速率为累积蒸发量与蒸发历时的比值。土壤表面温度利用 testo 865 热成像仪测量,测定土壤表面温度时为确保温度场数据稳定可靠,保持热成像仪与观测平面的垂直距离为 0.2 m,采集相关操作在 5 min 内完成。试验期间温度 15.6~31.8 ℃,湿度 41.3%~88.9%,自由水面累积蒸发量呈二次型曲线增加趋势(图 1)。

表 1 试验处理设置

试验处理	B 苔藓生物量/ (kg · m ⁻²)	苔藓覆盖度/ (m ² · m ⁻²)	P 松针干生物量/ (kg · m ⁻²)
B0P0	0	0	0
B0P1	0	0	0.33
B0P2	0	0	0.64
B1P0	0.32	10.97	0
B1P1	0.32	14.56	0.32
B1P2	0.32	15.26	0.64
B2P0	0.64	33.08	0
B2P1	0.64	39.98	0.32
B2P2	0.64	39.38	0.64
B3P0	0.95	31.09	0
B3P1	0.95	39.84	0.32
B3P2	0.95	45.97	0.64



Rose 模型是由 Rose 等经过大量土壤水分蒸发模拟试验总结得出的经验公式,体现出土壤累积蒸发量随时间推移的变化关系。王志超^[17]评价了 Rose 模型模拟农膜残留下砂壤土和砂土蒸发过程的适用性,结果表明,Rose 模型受残膜量的影响较小,更适合农膜残留下土壤累积蒸发量的计算。公式为:

$$E_c = Ct + Dt^{\frac{1}{2}} \quad (2)$$

式中: C 为稳定蒸发参数; D 为水分扩散系数; t 为蒸发历时(天)。

空气动力学模型是一个假设液相和气相相等的热力学平衡土壤蒸发模型,Xin 等^[12]利用空气动力学

模型模拟小溪—沼泽系统中的土壤蒸发过程,揭示蒸发引起的浅层土壤中盐分累积机理,但未准确评价该模型的适用性。公式为:

$$E_v = \frac{\rho_a \left(\min\left(1, \frac{1.8\varphi S_{ss}}{\varphi S_{ss} + 0.3}\right) \frac{0.622 P_a}{P_a - 0.376} - q_a \right)}{94.909 U_w^{-0.9036}} \quad (3)$$

$$P_v = 0.6108 e^{\left(\frac{17.27 T_s}{T_s + 237.3}\right)} \quad (4)$$

式中: E_v 为土壤蒸发速率(mm/d); ρ_a 为空气密度(kg/m^3); U_w 为风速(m/s); q_a 为湿度(g/kg); P_v 为饱和大气压(kN/m^2); P_a 为地表附近的大气压强(kN/m^2); T_s 为大气中的温度($^{\circ}\text{C}$); S_{ss} 为土壤湿度(g/g); φ 为土壤孔隙度(cm^3/cm^3)。由于本次研究在室内进行,风速 U_w 的影响可以忽略不计。

1.4 数据处理

文中试验数据取 3 次重复均值,采用 IRSoft 软件分析热成像图片中土壤覆盖层的温度分布并计算表面平均温度, testo Comfort Software Basic 5.0 软件分析大气温湿度变化;采用 Excel 2010 进行数据处理, R 语言进行方差分析和模型参数拟合,利用几何平均数 GMER、均方根误差 RMSE 及决定系数 R^2

评价模型适用性。

2 结果与分析

2.1 近地表层覆盖特性对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响

由图 2 可知,近地表层覆盖的生物量越高,累积蒸发量曲线越低(靠近横坐标)。蒸发开始 7 天后,不同处理之间累积蒸发量开始出现明显差异;蒸发开始 13 天后,苔藓和松针覆盖对土壤累积蒸发量的影响程度越来越显著。为了排除大气蒸发变化对土壤蒸发的影响,采用土壤累积蒸发量与自由水面蒸发量的比值(E_c/E_{c_0})进一步分析, E_c/E_{c_0} 在试验初期表现出增加的趋势,13 天时发生突变, E_c/E_{c_0} 减小然后趋于稳定(图 2)。一方面,在相同的松针覆盖条件下,相比于 B1、B2、B3 处理,B0 处理的 E_c/E_{c_0} 最大;另一方面,对比不同松针生物量和苔藓生物量处理下相对蒸发速率(E_c/E_{c_0})的变化,在松针生物量为 $0, 0.32 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时,苔藓对蒸发过程有明显的抑制作用(图 2);当松针生物量达到 $0.64 \text{ kg}/\text{m}^2$ 时,松针对土壤蒸发的抑制起主导作用,不同苔藓生物量的 E_c/E_{c_0} 变化无明显差异,苔藓对土壤蒸发的抑制作用并不明显。

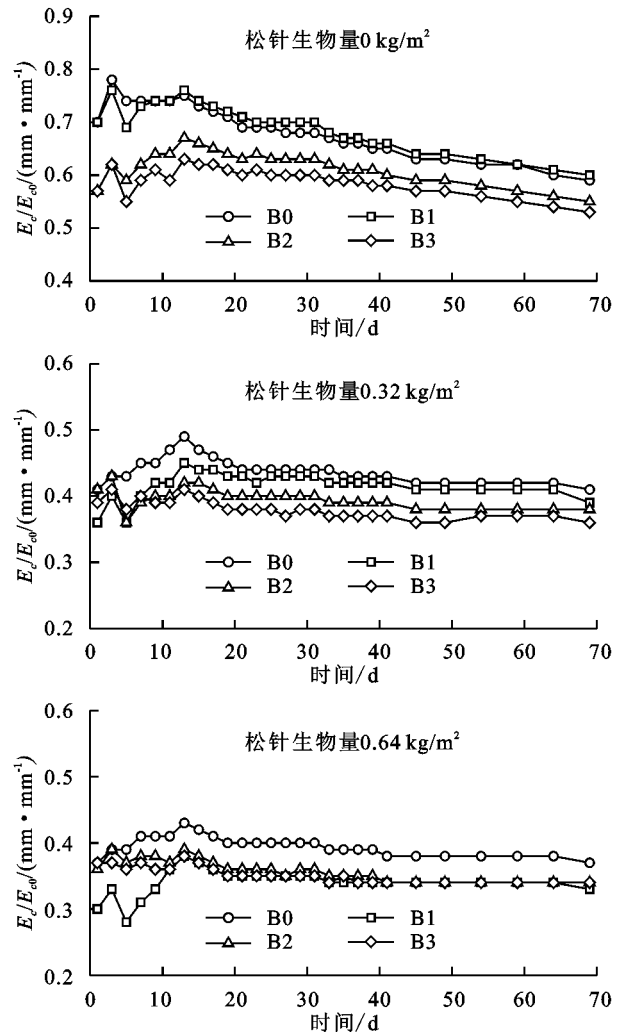
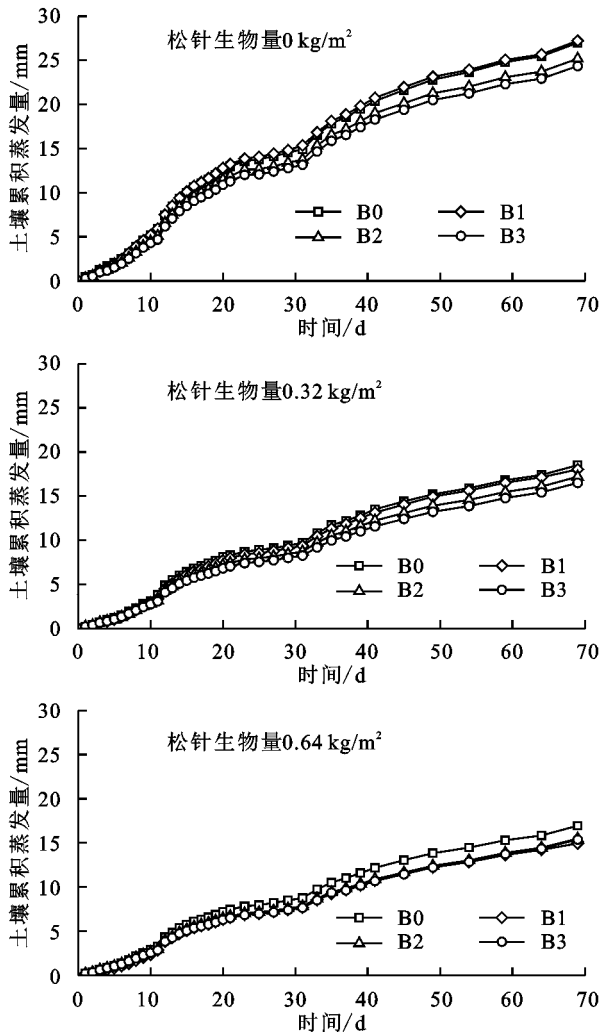


图 2 喀斯特森林近地表层覆盖特征对碳酸盐岩红土累积蒸发量及相对蒸发速率的影响

进一步的拟合分析结果也证实了上段的分析结论:随土壤表层松针覆盖生物量增加,苔藓对碳酸盐岩红土蒸发过程的抑制作用逐渐减弱(图 3)。对于 P1 处理, B0 处理(苔藓 0)的土壤累积蒸发量比 B3 处理(苔藓 0.95 kg/m²)大 9.7%($F=27.69, P=0.034 < 0.05$);对于 P1 和 P2 处理,苔藓生物量与累积蒸发量无显著关系。随土壤表层松针覆盖量的增加,苔藓对土壤累积蒸发量影响的差异性越来越不显著。方差分析结果表明,任何苔藓生物量条件下,松针覆盖对土壤累积蒸发量的影响均显著($P=0.01$);B0~B3 处理下,土壤累积蒸发量随着松针量的增加分别降低了 37.2%,45.1%,37.4%,36.9%。总体来说,松针覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的抑制作用明显强于苔藓覆盖。

2.2 不同覆盖特征下土壤蒸发速率与土壤含水量的关系

苔藓和松针覆盖显著提升了土壤持水能力。对比不同覆盖特征下土壤含水率的变化曲线,不同处理之间土壤含水率差异随着苔藓和松针生物量的增加而减小。B3P0 处理的土壤含水率比 B0P0、B1P0、

B2P0 处理高 14.1%,15.4%,1.9%;B2P1 处理的土壤含水率比 B0P1,B1P1,B3P1 处理高 10.8%,3.0%,3.15%;B2P2 处的土壤含水率比 B0P2,B1P2,B3P2 处理高 7.0%,1%,2.3%。由图 4 可知,随着苔藓和松针生物量的增加,含水率对土壤蒸发能力(E_c/E_{c0})的影响逐渐减小且达到显著水平,松针生物量为 0 时,随着苔藓生物量的增加(0~0.95 kg/m²)含水率对土壤蒸发的影响作用逐渐减弱。与接种苔藓的处理相比,松针增加了碳酸盐岩红土蒸发达到稳定阶段对应的含水率,且随着松针生物量的增加(0~0.64 kg/m²),有效提升土壤持水能力,减小土壤水分流失(表 2)。

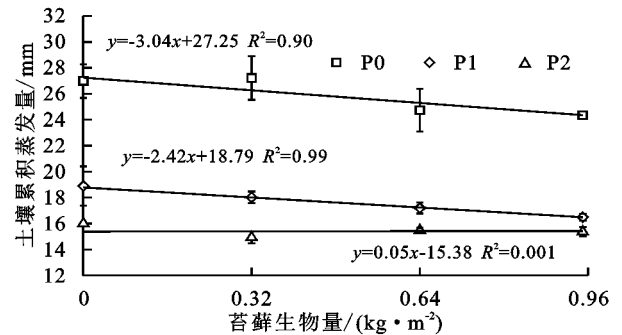
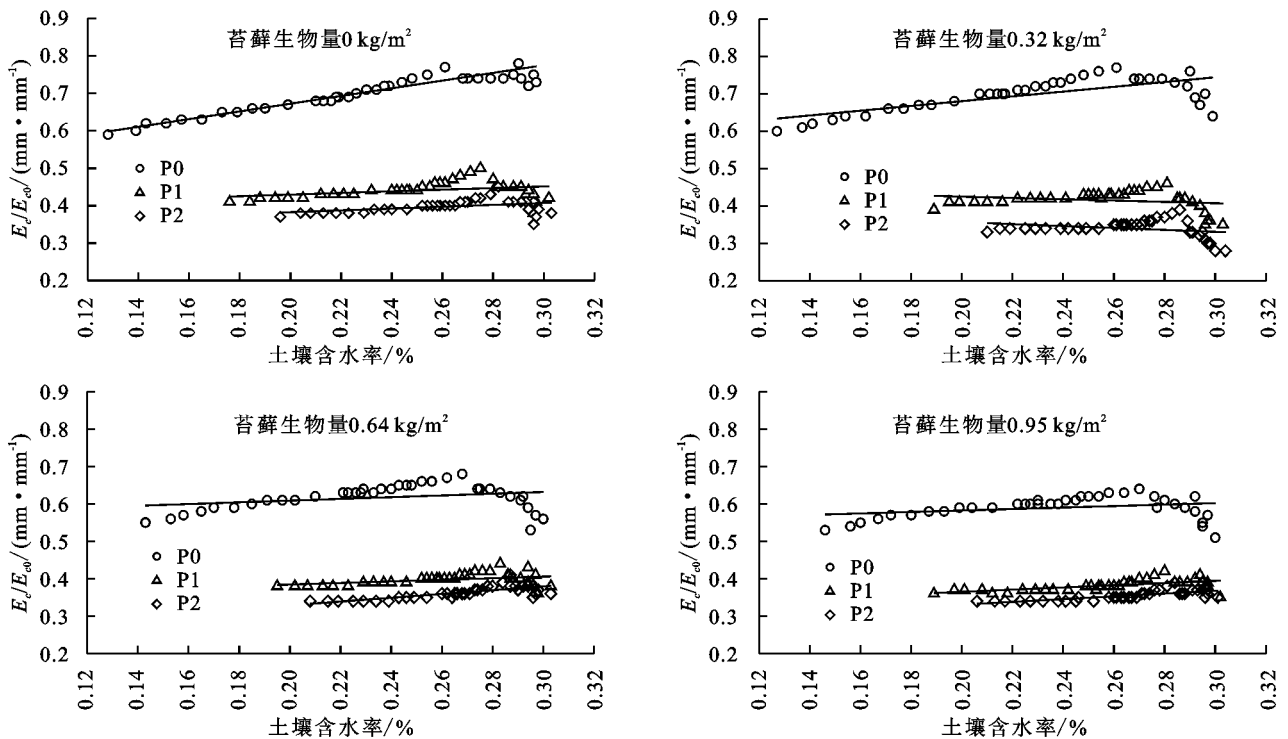


图 3 土壤累积蒸发量与苔藓生物量的关系



注:P0、P1、P2 分别代表松针干生物量为 0、0.32、0.64 kg/m²。

图 4 不同覆盖特征下土壤含水率对相对蒸发速率的关系

表 2 不同覆盖特征下土壤含水率与相对蒸发速率的拟合关系

苔藓生物量/ (kg · m ⁻²)	松针生物量 0 kg/m ²		松针生物量 0.32 kg/m ²		松针生物量 0.64 kg/m ²	
	回归方程	R ²	回归方程	R ²	回归方程	R ²
0	$y=0.47+1.03x$	0.85	$y=0.39+0.22x$	0.11	$y=0.33+0.25x$	0.16
0.32	$y=0.55+0.64x$	0.52	$y=0.46-0.18x$	0.05	$y=0.41-0.26x$	0.07
0.64	$y=0.56+0.23x$	0.09	$y=0.34+0.21x$	0.15	$y=0.23+0.51x$	0.59
0.95	$y=0.54+0.20x$	0.09	$y=0.31+0.29x$	0.37	$y=0.26+0.37x$	0.57

注:x 为土壤含水率(g/g);y 为土壤蒸发量与自由水面蒸发量的比值(mm/mm)。

2.3 表层温度场时空分布特征及其与蒸发速率的关系

土壤表层温度随苔藓和松针覆盖生物量的增加呈上升趋势。原因可能在于,苔藓和松针覆盖对太阳辐射量的吸收转换和热量传递有影响。苔藓和松针能够在土壤表层形成一层热量交换的阻碍层,在阻挡太阳辐射的同时,又能减少土壤热量的散失,间接影响土壤大气间的水汽输送过程。在相同生物量条件下,松针覆盖对土壤的保温效应强于苔藓(图 5)。P2(松针生物量 0.64 kg/m^2)处理下土表温度与裸土差异最大,增温 $2.7 \text{ }^\circ\text{C}$,

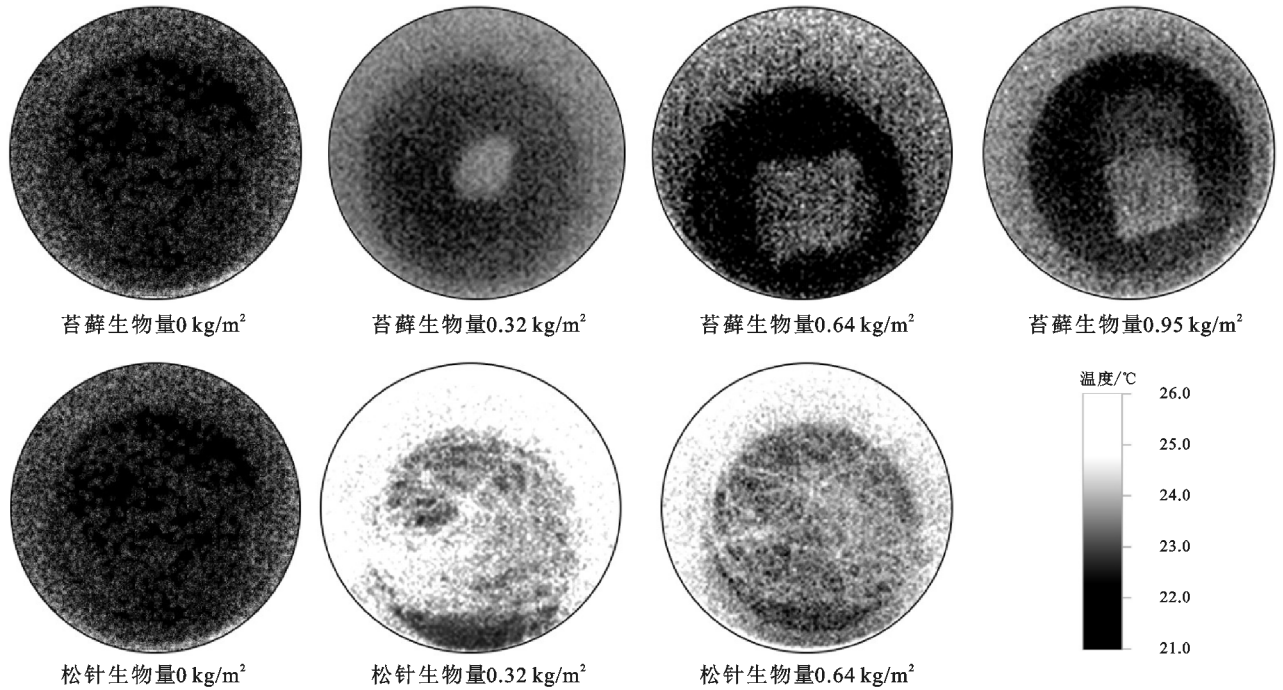


图 5 松针和苔藓覆盖对表层土壤温度空间分布特征的影响

表 3 蒸发历时 20 天苔藓/松针表面温度 (T_{moss} , T_{pine}) 与裸土表层温度 (T_{baresoil}) 的差异

时间/ d	$T_{\text{baresoil}}/^\circ\text{C}$	$T_{\text{moss}} - T_{\text{baresoil}}/^\circ\text{C}$			$T_{\text{pine}} - T_{\text{baresoil}}/^\circ\text{C}$	
		B1	B2	B3	P1	P2
2	18.6	1.0	1.7	1.6	0.8	2.7
4	20.4	-0.3	-0.3	0.2	0.6	0.9
6	23.2	0.5	0.1	0.2	0.5	0.5
8	22.0	0.6	0.4	0.5	0.9	1.2
10	23.1	0	0.6	0.5	0.5	0.8
12	18.8	0.1	0.4	0.8	1.3	1.8
14	18.5	0	0.2	0.1	0.7	1.0
16	17.7	-0.2	0.3	0.5	0.5	0.8
18	16.8	0.2	0.7	0.5	0.7	1.0
20	14.1	0.1	0.3	0.1	0.4	1.1

注: T_{baresoil} 为裸土表层温度, $T_{\text{moss}} - T_{\text{baresoil}}$ 为表层苔藓处理与裸土的温差; $T_{\text{pine}} - T_{\text{baresoil}}$ 为松针处理与裸土温差。

土壤表层温度与土壤蒸发速率无显著的相关关系(图 6),表明土壤表层温度并不是土壤蒸发过程显著影响因子。为探讨土壤表层温度与土壤蒸发速率之间的关系,考虑大气环境对土壤蒸发过程的影响,计算土壤表层温度与大气温度的差值,建立温差与土

平均增幅 6.33% ; B1 处理(苔藓生物量 0.32 kg/m^2)与裸土的温度差异较小,平均增幅 1.01% ; B2、B3、P3 处理下(苔藓生物量 $0.32, 0.64 \text{ kg/m}^2$ 和松针生物量 0.64 kg/m^2)土表温度与裸土相比有明显提升,平均增幅分别为 2.37% , 2.62% 和 3.62% 。进一步方差分析结果也证实了上述观点:苔藓对土表温度的影响不显著,而松针对温度的影响较为显著($P = 0.058$)(表 3)。试验中,苔藓对土壤表层温度的影响与苔藓在湿热的夏季降低土壤温度的结论相反^[18]。

壤蒸发速率的关系发现, $E_0 > 0.5 \text{ mm/d}$ 时,蒸发速率随温差的增加有明显的上升趋势(图 6); $E_0 < 0.5 \text{ mm/d}$ 时,蒸发速率随温差的增加没有明显变化趋势。原因可能在于,土壤表层温度的变化引起土壤与大气间温度梯度的差异,直接影响土壤大气界面的气压势的大小,气压势变化引发土壤毛细管堵塞和疏通现象导致土壤水汽输送过程受到不同程度的改变,导致土壤蒸发速率不同^[19]。

2.4 喀斯特森林近地表层覆盖下土壤蒸发模型分析

对于 Black 模型,随着苔藓和松针生物量的增加,蒸发参数 F 逐渐增大,蒸发参数 B 逐渐减小,模型均方根误差、残差和决定系数 R^2 均随覆盖量增大而减小,表明随着苔藓和松针覆盖量的增加 Black 模型的拟合精度呈降低趋势(表 4)。在 Rose 蒸发模型中,其 RMSE 和 GMER 随着苔藓和松针覆盖量的增加而减小,这与 Black 蒸发模型拟合计算的结果表现一致。对于 Roes 蒸发模型,随着苔藓生物量的增加,稳定蒸发参数变化不明显,水分扩散参数逐渐减小,随着松针生物量的增加,稳定蒸发参数逐渐减小,水分扩散参数 D

显著逐渐减小,不同的是,Rose 蒸发模型的决定系数 R^2 随着覆盖量的增加而增大,Rose 蒸发模型的 RMSE 和 GMER 整体大于 Black 蒸发模型,决定系

数也整体低于 Black 模型。由此可见,Black 蒸发模型对于喀斯特森林覆盖存在条件下碳酸盐岩红土蒸发过程的适用性要优于 Rose 蒸发模型。

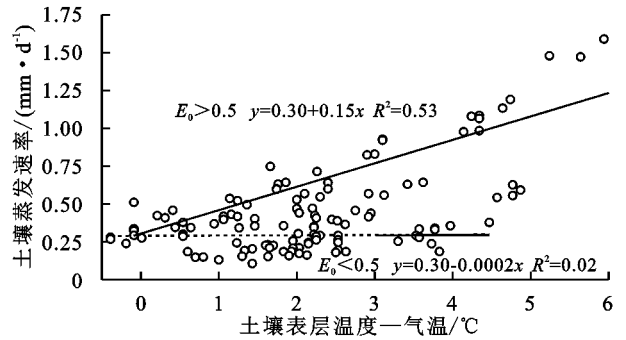
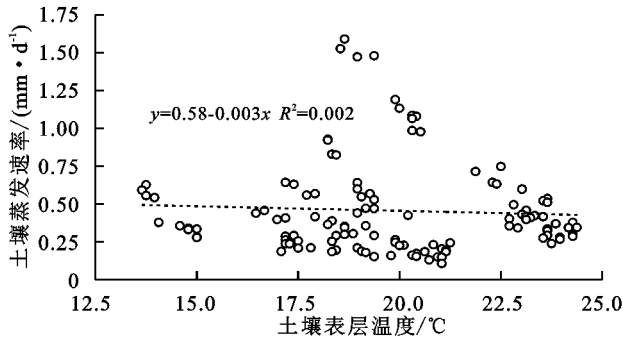


图 6 土壤表层对土壤蒸发速率的影响

本研究也检验了较为复杂的空气动力学蒸发模型,对在气象因素和土壤表面差异影响下的土壤累积蒸发量进行模拟计算。根据贵州省典型环境,确定了模型输入参数值,结果表明,模拟值与实测值误差过大($R^2=0.003$),表明此模型不能精确的模拟喀斯特森林碳酸盐岩红土的蒸发过程。因此计算了模拟值与实测值的修正系数 K (实测值/模拟值),基于修正系数 K 对模型进行了改进,改良后的空气动力学模

型拟合精度得到了显著提升。随着苔藓和松针覆盖量增加,模型的 RMSE 和 GMER 增大、 R^2 减小,表明在松针和苔藓覆盖量高时模型拟合精度较差。从 RMSE 上来看整体优于 Black 和 Rose 蒸发模型,但是模型 GMER 和 R^2 却差于 Black 和 Rose 蒸发模型(表 4)。由此可见,空气动力学蒸发模型对于喀斯特森林覆盖存在条件下碳酸盐岩红土蒸发过程的适用性要差于 Black 和 Rose 蒸发模型。

表 4 不同覆盖条件下蒸发模型拟合效果分析

试验处理	Black 蒸发模型					Rose 蒸发模型					空气动力学蒸发模型		
	F	B	RMSE	GMER	R^2	C	D	RMSE	GMER	R^2	RMSE	GMER	R^2
B0P0	-6.21	4.03	0.88	1.034	0.987	0.27	1.27	1.32	1.174	0.970	0.068	2.01	0.972
B1P0	-6.38	4.10	0.90	1.040	0.987	0.27	1.29	1.40	1.190	0.970	0.067	2.02	0.972
B2P0	-6.19	3.81	0.86	1.035	0.986	0.27	1.04	1.28	1.203	0.971	0.107	2.28	0.969
B3P0	-6.09	3.68	0.84	1.024	0.986	0.27	0.93	1.20	1.194	0.973	0.112	2.38	0.964
B0P1	-4.53	2.74	0.62	1.019	0.986	0.20	0.68	0.83	1.176	0.975	0.115	3.18	0.979
B1P1	-4.68	2.71	0.64	0.951	0.984	0.21	0.56	0.81	1.184	0.977	0.119	3.38	0.985
B2P1	-4.32	2.53	0.60	0.988	0.984	0.20	0.52	0.52	1.201	0.979	0.165	3.53	0.959
B3P1	-4.07	2.40	0.57	0.994	0.984	0.19	0.50	0.63	1.158	0.981	0.154	3.68	0.963
B0P2	-4.19	2.50	0.56	1.010	0.986	0.19	0.57	0.71	1.174	0.978	0.132	3.53	0.977
B1P2	-3.87	2.23	0.55	1.068	0.983	0.18	0.45	0.67	1.212	0.977	0.140	4.14	0.987
B2P2	-3.75	2.24	0.52	0.998	0.985	0.17	0.51	0.60	1.150	0.981	0.144	3.86	0.969
B3P2	-3.77	2.22	0.53	0.985	0.984	0.18	0.46	0.57	1.166	0.983	0.163	3.95	0.961

注:F、B、C、D 为蒸发参数;RMSE 为均方根误差;GMER 为误差比的几何平均数; R^2 为决定系数。

3 讨论

森林是喀斯特地区抵御水土流失,土地石漠化的重要场所,对调节地表水分循环起着重要的作用。喀斯特森林近地表覆盖,影响了水分运移途径,从而改变了喀斯特森林地表水文循环过程。本研究通过量化喀斯特马尾松林近地表典型覆盖特征对碳酸盐岩红土的蒸发过程,揭示表层覆盖物(松针和苔藓)影响土壤蒸发机理,对喀斯特地区治理水土流失防治和生态防治有重要意义。

近地表生长的苔藓和常年凋落的松针构成了喀斯特森林典型的覆盖特征,本研究量化不同生物量苔

藓和松针对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响。相关研究^[20]表明,苔藓盖层提升了土壤表层的持水能力使土壤累积蒸发量显著增加,这一结论与本研究中苔藓抑制土壤蒸发的结果相矛盾。本研究结果表明,在苔藓发育良好的情况下土壤蒸发过程受到显著抑制作用,这一结果与 Xiao 等^[18]的结论保持一致。过去的研究^[21-22]多集中在苔藓生长发育对土壤性质和生态的影响,由于苔藓中胞外多糖的膨胀和表面生物的存在,堵塞土壤孔隙并使土壤表面封闭,限制水蒸气逃逸^[22]。然而,针对土壤表层温度的研究还未有明确结论。本研究针对覆盖层的温度变化,采集了土表温

度数据。裸土条件下土壤温度低于大气温度,而苔藓提升了土壤表层的平均温度,这与干旱区苔藓降低土表温度的结果并不一致^[21]。另外,黄土高原苔藓对黄土蒸发过程的影响存在阶段性特征^[23],而喀斯特地区碳酸盐岩红土的蒸发过程并未出现阶段性特征,研究结果差异可能是由土壤质地和化学组分不同造成。已有研究^[9]表明,在科尔沁沙地中自然生长苔藓主要通过阻碍水分扩散作用及改变土壤水力特性来影响蒸发,与本试验接种人工培育苔藓得出的结论一致,随着苔藓生物量的增加水分扩散参数 D 显著逐渐减小,表明苔藓的吸湿作用降低了土壤的导水性,形成阻水层,削弱了垂直方向上的水分运动。

喀斯特地区以马尾松为优势树种的森林,日积月累后在土表逐渐形成较厚的松针枯落层。相关研究^[24]表明,马尾松枯落物层对森林生态系统抑制表层土壤蒸发和涵养水源有重要意义。本次研究量化了松针覆盖对碳酸盐岩红土蒸发过程的影响,相比于苔藓覆盖,未腐化的松针无法直接改变土壤容重、表面粗糙度、粒度分布等,对土壤蒸发过程的抑制作用主要体现在松针吸水特性和盖层延缓土表温度变化上。本研究监测了土表上松针覆层温度数据,松针能够提升土壤温度,且松针覆层对温度的作用要显著大于苔藓覆盖。试验结果的差异可能是由于松针和苔藓的覆盖面积差异引起的。松针显著提升了喀斯特森林表层土壤的含水量,有效降低了土壤水分流失,该结论与华北土石山区典型森林枯落物层的研究相同^[24]。

喀斯特森林近地表层覆盖能够有效抑制土壤蒸发从而提升土壤持水能力,本文分析和比较了苔藓和松针覆盖土壤含水量对土壤蒸发能力(E_c/E_{c0})的影响,帮助深入了解苔藓和松针在喀斯特地区表层土壤水分运移过程中所起的关键效应。相较于裸土,苔藓和松针增加了土壤蒸发到达稳定阶段对应的土壤含水量(图 6),表明苔藓和松针盖层的存在提高了喀斯特森林土壤水分有效性,有利于喀斯特森林近地表层植物的生长。本研究表明,苔藓和松针弱化了土壤含水量对土壤蒸发过程的影响(图 6),苔藓和松针的覆盖降低了较高土壤含水率时的相对土壤蒸发速率,并且随着苔藓和松针生物量的增加其弱化程度越显著。由苔藓和松针引起的土壤水分对土壤蒸发的弱化现象,对森林近地表层植被的生长演化有积极作用。相关研究^[25]表明,苔藓生长发育改善沙地灌木群落中土壤水分状况,促进了固沙灌木种群恢复,有效缓解土壤沙化。

综上所述,喀斯特森林近地表层覆盖一方面影响了表层土壤温度场,导致局部温度的升高或降低,延

缓土表温度变化;另一方面阻断了土壤表面孔隙,导致水分向上传输的通道被不同程度的阻挡,因而抑制了碳酸盐岩红土的蒸发过程。除此之外,森林近地表层覆盖抑制表层土壤蒸发过程并且延缓土壤含水率变化,从而提高表层土壤水分的有效性,对森林近地表层灌木生长演化有积极作用。

4 结论

(1)喀斯特森林近地表层覆盖(松针、苔藓)对碳酸盐岩红土的蒸发过程有抑制作用。在蒸发开始 70 天后,表层无松针覆盖时,B1~B3 处理较 B0 处理累计蒸发量分别减少了 44.67%,42.65%,43.03%,苔藓对土壤蒸发过程有显著的抑制作用($P=0.034$)。随着松针生物量的增加,松针对土壤蒸发过程有显著的抑制作用($P=0.01$)。

(2)喀斯特森林近地表层覆盖对森林土壤的水分流失有着显著的抑制作用,随着苔藓和松针生物量的增加,土壤含水率对相对蒸发速率(E_c/E_{c0})的影响逐渐减小且达到显著水平。不同覆盖特征下的土壤含水率有明显的差异,B3P2 处理下的土壤含水率最高,比裸土高 60.35%。

(3)喀斯特森林近地表层覆盖对土表温度有正效应,B1~B3 处理土表温度分别增加了 1.63%,2.09%,1.31%;P1,P2 处理土表温度分别增加了 3.62%,6.33%。且在蒸发速率较高时,蒸发速率与土表温度和气温的差值正相关($R^2=0.53$)。

(4)对比 Black、Rose 和空气动力学蒸发模型模拟结果,Black 模型能较好地反映喀斯特森林近地表层覆盖下土壤累积蒸发量随时间的变化过程。

参考文献:

- [1] 吴清林,梁虹,熊康宁,等.石漠化环境水土综合整治与山地混农林业前言理论与对策[J],水土保持学报,2018,32(2):11-19.
- [2] Liu M, Xu X, Wang D, et al. Karst catchments exhibited higher degradation stress from climate change than the non-karst catchments in southwest China: An ecohydrological perspective[J].Journal of Hydrology,2016,100(535):173-180.
- [3] 宋卫康,丁文其,崔玉军.枫丹白露砂土的环境箱蒸发试验[J].水科学进展,2014,25(1):69-76.
- [4] Swaffer B A, Holland K L. Comparing ecophysiological traits and evapotranspiration of an invasive exotic,Pinus halepensis in native woodland overlying a karst aquifer [J].Ecohydrology,2015,8(2):230-242.
- [5] Zhang R, Xu X, Liu M, et al. Comparing evapotranspiration characteristics and environmental controls for three agrofor-

- 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.