

百里杜鹃景区马缨杜鹃林凋落物对土壤蒸发的影响

陈明梅¹, 李苇洁², 杨瑞¹, 张建利², 王加国²

(1. 贵州大学 林学院, 贵州 贵阳 550025; 2. 贵州省山地资源研究所, 贵州 贵阳 550001)

摘要: [目的] 探究百里杜鹃景区马缨杜鹃林下凋落物覆盖对土壤蒸发的影响, 为其林下水源涵养功能的发挥提供科学依据。[方法] 根据土壤蒸发理论, 采用自制微型蒸渗装置进行模拟试验, 参照百里杜鹃林下凋落物现存状况, 研究不同质量相同比例及相同质量不同比例的凋落物覆盖对土壤蒸发抑制的影响。[结果] 不同分解程度凋落物覆盖比例相同质量不同时, 土壤水分蒸发量随凋落物的质量增大而减小; 土壤水分蒸发量随着土壤含水率的下降呈递减关系, 当含水率每下降 0.5% 时, 60, 30 和 15 g 凋落物覆盖的土壤水分蒸发量分别依次减少了 0.11, 0.49 和 1.23 g。凋落物覆盖质量相同时, 不同分解程度的凋落物对土壤水分蒸发抑制作用不同, 表现为: 未分解 > 半分解 > 已分解。[结论] 凋落物覆盖量越多, 对土壤蒸发的抑制作用越大; 凋落物分解程度越低, 对土壤蒸发的抑制作用越好。

关键词: 百里杜鹃; 马缨杜鹃林; 凋落物; 影响; 土壤水分蒸发

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2019)06-0060-06

中图分类号: S715.4

文献参数: 陈明梅, 李苇洁, 杨瑞, 等. 百里杜鹃景区马缨杜鹃林凋落物对土壤蒸发的影响[J]. 水土保持通报, 2019, 39(6): 60-65. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2019.06.009; Chen Mingmei, Li Weijie, Yang Rui, et al. Effects of *Rhododendron delavayi* litters on soil moisture evaporation in Baili azalea scenic area [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2019, 39(6): 60-65.

Effects of *Rhododendron Delavayi* Litters on Soil Moisture Evaporation in Baili Azalea Scenic Area

Chen Mingmei¹, Li Weijie², Yang Rui¹, Zhang Jianli², Wang Jiaguo²

(1. College of Forestry, Guizhou University, Guiyang, Guizhou 550025, China;

2. Institute of Mountain Resources of Guizhou Province, Guiyang, Guizhou 550001, China)

Abstract: [Objective] The effects of litter cover on soil evaporation in the *Rhododendron delavayi* forest in Baili azalea scenic area were studied, in order to provide a scientific basis for the function of water conservation under the forest. [Methods] According to the theory of soil evaporation, a self-made micro evaporation and infiltration device was used to conduct the simulation experiment. The existing status of litter under the Baili *rhododendron* forest was taken as a reference, to study the effect of litter with different mass and different proportion on the inhibition of soil evaporation. [Results] The evaporation of soil water decreased with the increase of litter mass at different decomposition degrees and with the same litter coverage ratio. The evaporation of soil moisture decreased with the decrease of soil moisture contents. When the moisture contents decreased by 0.5%, the evaporation of soil moisture with litter cover of 60 g, 30 g and 15 g decreased by 0.11 g, 0.49 g and 1.23 g, respectively. When the cover quality of litter was the same, the inhibition of litter with different decomposition degrees on soil water evaporation was different, which showed as follows: undecomposed > semi-decomposed > decomposed. [Conclusion] The more litter cover, the greater the inhibition of soil evaporation; the lower the decomposition degree of litter, the better the inhibition of soil evaporation.

Keywords: Baili azalea; *Rhododendron delavayi* forest; litter; influence; soil moisture evaporation

收稿日期: 2019-04-15

修回日期: 2019-06-01

资助项目: 国家自然科学基金项目“百里杜鹃景区马缨杜鹃林凋落物对枯落物分解及其主要水文功能的影响”(41561109)

第一作者: 陈明梅(1992—), 女(汉族), 贵州省遵义市, 硕士研究生, 研究方向为森林生态。E-mail: 492131353@qq.com。

通讯作者: 李苇洁(1977—), 女(汉族), 贵州省贵阳市, 硕士, 研究员, 主要从事森林生态及经济林栽培研究。E-mail: lwj024333@163.com。

森林凋落物是覆盖在林地土壤表面未分解、半分解和已分解的林木枝、茎、叶和果实等器官的残体^[1-2]。它不仅作为森林涵养水源的第二个活动层,也是森林生态系统的重要组成部分^[3-5],其森林水文功能主要体现在保持土壤结构、拦蓄降水、防止溅蚀、减少表土水分蒸发等方面^[6-9]。土壤水分蒸发不仅受气象因子、土壤组成与结构等的影响,还与土壤表层所覆盖的凋落物有着密切联系^[10-11]。凋落物覆盖可以明显降低林地土壤的水分蒸发,对于保水、保土、改良土壤的效果显著^[12-13]。近年来,国内外学者开展了大量森林凋落物层与土壤水分蒸发的关系的研究^[14-20]。结果表明,凋落物覆盖对土壤水分蒸发的抑制作用十分明显。但是,大多数是基于不同凋落物覆盖量开展的研究,林茂森等^[11]研究表明,不同分解程度的凋落物对土壤水分蒸发的抑制作用不同。在开展森林凋落物层与土壤水分蒸发的关系的研究中在考虑凋落物量的基础上,同时考虑不同分解程度的凋落物对土壤蒸发的影响。在气候变化背景下百里杜鹃景区由于特殊的地质构造,地表水不易保持,干旱越来越频繁和严重。马缨杜鹃林作为百里杜鹃景区的主要建群种和优势种,占地和分布面积较广^[21-22]。经过多年的自然积累,马缨杜鹃林下凋落物已经达到一定的厚度,但对马缨杜鹃林下的凋落物在抑制林地土壤水分蒸发的作用目前未见报道。基于此,本研究选取百里杜鹃马缨杜鹃林下凋落物不同覆盖量及不同分解程度对土壤水分蒸发的影响开展研究,以期为百里杜鹃景区马缨杜鹃林发挥水源涵养功能提供一定的科学依据。

1 研究区概况

百里杜鹃景区位于贵州省西北部、毕节市中部(105°45'30"—106°04'45"E,27°08'30"—27°20'00"N),为国家 5A 级旅游景区,被誉为“世界上最大的天然花园”。属于高原山地过渡地带,中山地貌类型,海拔大多在 1 400~1 900 m^[23-24],地处低纬度高海拔地区,属亚热带湿润季风气候,年平均温度 12.0 °C,年降雨量为 1 120.1 mm^[25]。主要分布有马缨杜鹃(*Rhododendron delavayi*)、露珠杜鹃(*Rhododendrom irroratum*)、迷人杜鹃(*Rhododendron agastum*)等杜鹃属植物 35 个种(含亚种、变种),分属 6 个亚属、4 个组及 9 个亚组,花期 3—4 月(40~50 d)^[26-28]。百里杜鹃景区为寒武系与二迭系的碳酸盐分布地区,其出露地表的龙潭组煤层中含有黄铁矿,氧化后生成硫酸,使地下水变成酸性,导致灰岩与龙潭组接触地带岩溶强烈发育。土壤母质为煤系酸性土壤,土壤类型为硅质黄壤和煤层土^[27,29]。

2 研究方法

根据土壤蒸发理论^[30]并参照前人相关试验方法^[11,15,31],本试验亦采用自制微型蒸散装置进行模拟试验。微型蒸法装置材料为白色 PVC 管材,直径为 20 cm,高 30 cm 的 PVC 管,底部密封处理。于 2018 年 6 月在百里杜鹃景区的马缨杜鹃纯林(醉九牛)内按照 Z 字形选择 3 个 10 m×10 m 的样方,沿样方对角线在样地内取马缨杜鹃林下取原状土并收集凋落物带回室内开展人工模拟蒸散试验,试验期间使用电子温湿度传感设备观测室内温度与湿度每日平均值。将质量为 1 000 g 的马缨杜鹃林下原状土装入管内,并浸泡 12 h 使管内土壤达到最大饱和含水率,根据百里杜鹃景区凋落物总储量为 13.49 t/hm²^[29],计算可得,在自然状态下 PVC 管横截面积 0.031 4 m² 的凋落物鲜重约为 42.36 g,干重约为 15 g(凋落物平均含水率为 63.73%)。林下凋落物未分解、半分解、已分解的储量分别为 2.89,3.20,7.40 t/hm²。将凋落物放在 80 °C 条件下进行 18 h 的烘干处理,再按不同的处理覆盖在试验土壤表面。覆盖处理分为 6 组,每组重复 3 次,另设一组无覆盖对照。

(1) 设 A,B,C 3 组,分别取凋落物储量的 4,2,1 倍放入 PVC 管,即在 0.031 4 m² 面积下 15 g 凋落物的 4,2,1 倍(60,30,15 g)凋落物覆盖。每个处理按未分解、半分解和已分解自上而下 3 层覆盖,比例为 1:1:1;设 D,E,F 共 3 组,取凋落物储量的 4 倍,即 60 g 的情况下,按不同比例覆盖不同分解程度凋落物进行 3 个不同处理。已分解(g)、半分解(g)、未分解层(g)的比例为 2:1:1;1:2:1;1:1:2。

(2) 设 G 组重复 3 个处理,根据马缨杜鹃林 3 个层次凋落物的储量计算得出 PVC 管面积未分解、半分解和已分解的质量分别为 18,20,42 g 覆盖在土壤表面^[32]。(本组设计根据林下 3 个层次凋落物原始储量覆盖);设对照组 H(无凋落物覆盖)。试验期间试验场所平均温度 23 °C,平均湿度 79.4%,在此期间百里杜鹃景区平均温度 22.1 °C、平均湿度 83.9%,趋近于百里杜鹃同时期的气候环境。

试验于 2018 年 6 月 13 日至 7 月 31 日在贵州大学花溪校区实验室内进行。试验每天重复称重 7 次,分别在每日 6:00,8:00,10:00,12:00,14:00,16:00,18:00 使用电子天平称重(精度为 1 g),根据重量差推算土壤日蒸发量和蒸发速率,称重直至其无明显变化为止。采用 Excel 进行数据的初步整理,再分别对每组处理的数据进行单因素方差分析(one-way ANOVA)。

3 结果与分析

3.1 不同质量凋落物覆盖对土壤水分蒸发的影响

A, B, C 处理组覆盖于土壤表面的凋落物分别是 60, 30 和 15 g, 根据对 A, B, C 3 组蒸发量分析(图 1), 研究发现每组土壤水分蒸发量存在明显的差异, A, B, C 组处理均值日蒸发量为: 4.26 ± 0.93 g, 5.47 ± 1.15 g, 6.75 ± 2.25 g ($A < B < C$)。由此可见, 土壤水分蒸发随覆盖凋落物的增多而减少 ($F = 10.09$, $P_{AB} = 0.003 < 0.01$; $F = 15.71$, $P_{AC} = 0.00 < 0.01$; $F = 3.84$, $P_{BC} = 0.05$)。即覆盖于土壤表面的凋落物越多, 土壤水分蒸发越少, 对土壤水分蒸发的抑制作用越明显。反之, 覆盖凋落物越少, 对土壤水分蒸发的抑制作用越差。

通过对土壤水分蒸发速率的分析发现(图 1): 试验前期凋落物覆盖越多时土壤水分蒸发速率越缓慢,

对土壤的遮挡作用越好。但随着时间的推移, 各处理的土壤水分蒸发速率逐渐趋同。所以凋落物抑制土壤水分蒸发的作用不会随着凋落物质量增加而一直增强, 到达一定数值时将不再是土壤水分蒸发的限制因子。这是由于在自然界中凋落物的不断分解, 因此凋落物对土壤水分蒸发的抑制作用不会持续维持在同一个状态下。为对比布设不同质量凋落物所得结论与马缨杜鹃林下凋落物的原始状态储量及无凋落物覆盖的土壤水分蒸发的趋势存在什么差异, 增设无凋落物覆盖组 H(CK) 和按未分解、半分解、已分解 (18, 20, 42 g) 覆盖组 G 与 A, B, C 3 组的对比。如图 1 中所示, 发现 H, G 组的水分蒸发量的日变化虽有不同但与 A, B, C 处理趋势相同, 同样是随着时间的推移而减小, 到达一定时间内趋于稳定(图中之所以有波动是受天气变化的影响)。这与 Bond 等^[1]研究结论是一致的。

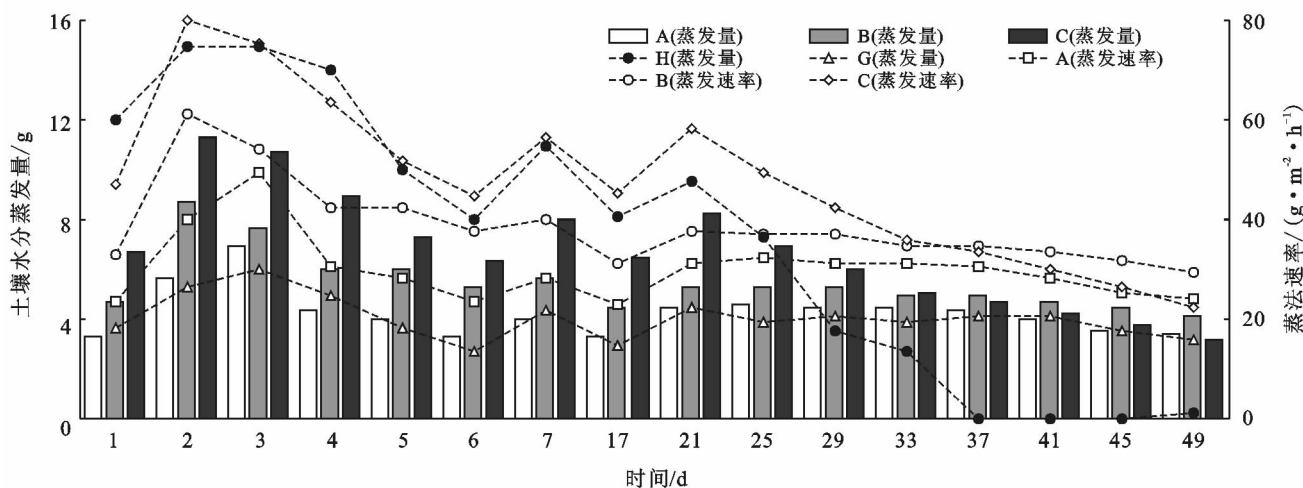


图 1 不同质量凋落物覆盖下的土壤水分日蒸发量及速率变化

3.2 不同分解程度凋落物覆盖对土壤水分蒸发的影响

自然情况下, 马缨杜鹃林地土壤被多年积累凋落物覆盖, 自上而下有未分解层、半分解层、已分解层。因此试验设计将质量相同分解程度不同的凋落物按不同的比例覆盖土壤进行研究, 其目的是为得到不同分解程度的凋落物对土壤水分蒸发抑制的差异。研究发现(图 2), 相同质量不同比例的凋落物覆盖, 土壤水分日蒸发量变化趋势相同但变化的幅度不同, 3 种处理存在差异 ($F = 3.89$, $P_{DE} = 0.058$; $F = 21.36$, $P_{DF} = 0.000$; $F = 20.54$, $P_{EF} = 0.00$)。在不同比例覆盖的 D, E, F 的日蒸发量均值为: 4.78 ± 0.93 g, 4.26 ± 0.40 g, 3.53 ± 0.49 g ($D > E > F$), 即未分解层对土壤蒸发的抑制作用效果最好, 半分解层其次, 已分解

层最差)。由于不同分解程度凋落物的外形、质地有所差异, 覆盖在土壤表面时, 不同分解程度的凋落物对孔隙的覆盖能力, 阻隔辐射、保温能力都有所不同。从形态上来看, 未分解、半分解、已分解的凋落物形态的完整性是依次减弱的, 加上马缨杜鹃是常绿阔叶树, 叶片革质, 叶面积较大, 叶背被有较厚的绒毛, 容易锁住至下而上蒸发的水分, 可见未分解比重多的 F 组对土壤蒸发的抑制能力最强。但随时间推移, 试验后期发现(表 1)已分解程度比重多的 D 组处理蒸发速率小于半分解比重多的 E 组, 原因是已分解层的凋落物较半分解层凋落物更贴近土壤表层, 随着时间的推移已分解层凋落物吸收较多的水分, 持水能力加强, 对土壤的保湿作用加大。

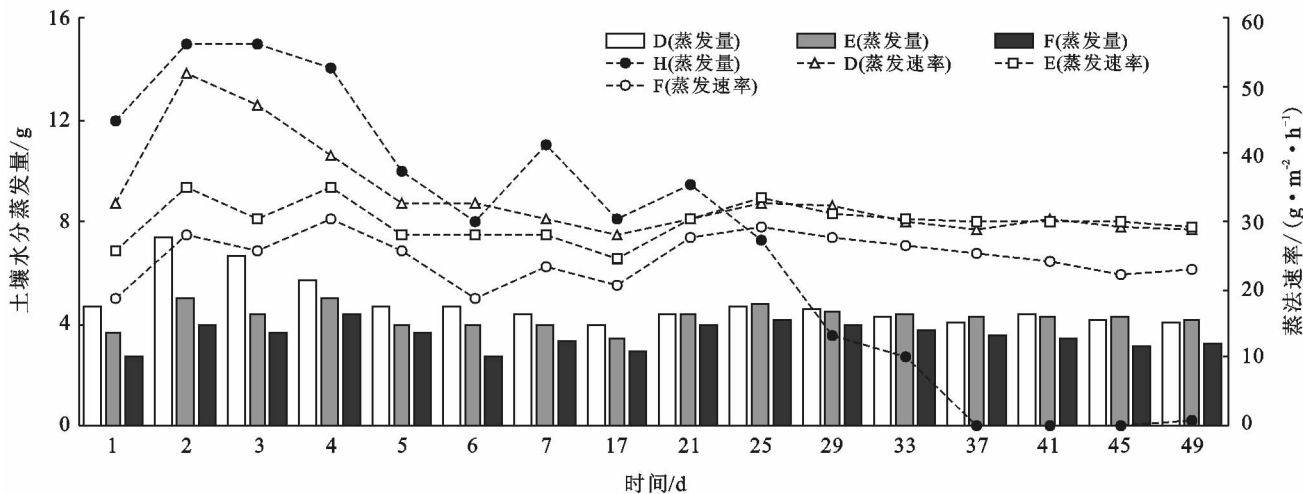


图 2 不同分解程度凋落物覆盖下土壤水分日蒸发量及速率变化

表 1 D,E,F 处理蒸发速率对比 $g/(m \cdot h)$

组别	实验前期	实验后期
D	36.95 ± 7.89	30.37 ± 1.43
E	29.46 ± 3.73	30.59 ± 1.19
F	24.01 ± 4.07	25.68 ± 2.32

注:数据为:实验期间土壤水分的平均蒸发速率均值±标准差。

3.3 6 种不同模式凋落物覆盖下土壤水分蒸发与土壤含水率的关系

如图 3 所示,A,B,C 处理组土壤水分蒸发量随着土壤含水率的降低而减少。3 组处理的趋势线方程分别为:A: $y = -0.1129x + 13.354$; B: $y = -0.4935x + 20.604$; C: $y = -1.2288x + 30.698$ 。根据图 3 趋势线方程可得出:含水率每降低 0.5%,A,B,C 3 组的蒸发量分别依次减少 0.11,0.49 和 1.23 g(A<B<C),即土壤含水率降低时,凋落物覆盖量越多对土壤水分蒸发抑制作用越明显,从而说明当林地遭受干旱的袭击时,凋落物层在一定程度上能提高林地抵御干旱的能力,从而减轻干旱引起的损失。

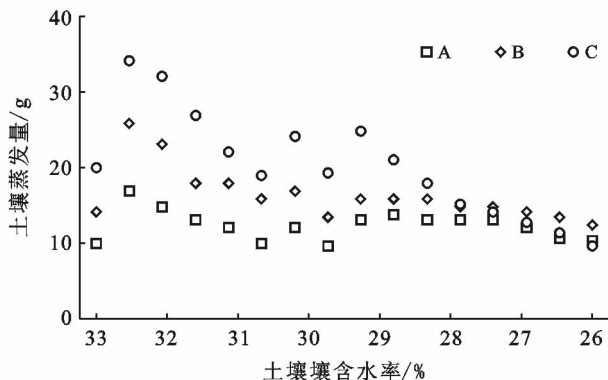


图 3 各组土壤水分日蒸发量与土壤含水率的关系

分析(图 4)发现,D,E,F 三组土壤的水分蒸发量随土壤含水率的降低而减少(D>E>F),与上述 A,B,C 组结果一致。在凋落物覆盖量相同,布设比例不同下土壤含水率下降的过程中三组的变化存在差异是由于凋落物的不同分解程度所影响,与凋落物覆盖量无关。根据趋势线 $k_D(0.4050) > k_E(0.0105) > k_F(0.0056)$,发现随土壤含水率的降低,未分解程度比重多的处理土壤水分蒸发速率减小相对较慢,半分解层的次之,已分解层的最快。这种趋势与对(图 2) D,E,F 分析的结论一致。

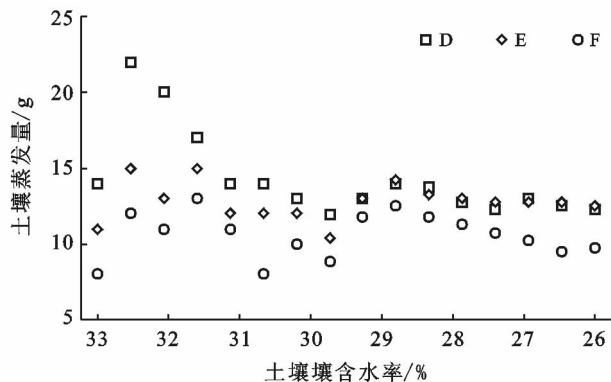


图 4 各组土壤水分日蒸发量与土壤含水率的变化趋势

3.4 凋落物覆盖对土壤保水作用的影响

6 种不同凋落物覆盖模式与对照组(H)存在很大差异,无凋落物覆盖的土壤水分蒸发量远大于有凋落物覆盖的土壤(表 2),这是因为没有覆盖的土壤直接与空气接触,受温度、湿度、太阳辐射等的影响非常大。分析发现:凋落物的 6 种不同覆盖模式对土壤的保水能力各不相同,在 1 hm^2 的马缨杜鹃林的保水作用为 $A = 18.87 \text{ t/hm}^2$, $B = 12.68 \text{ t/hm}^2$, $C = 6.16 \text{ t/hm}^2$ (A>B>C),由此可知凋落物越多对土壤的保

水作用越大。D=16.31 t/hm², E=18.77 t/hm², F=22.48 t/hm² (F>E>D), G=19.87 t/hm², H=0.00 t/hm², 由此可知未分解程度凋落物对土壤保水作用效果最好。按照试验设计 F 组处理凋落物覆盖量 60 g, G 组处理凋落物覆盖量为 80 g, 对比两

组的保水作用表现出 F>G (F₁=4.62, F₂=4.17), 说明凋落物对土壤的保水作用不会随凋落物覆盖量的增加而持续加大, 这是因为当凋落物质量增加到一定水平, 随着质量的增加, 蒸发抑制能力增加的幅度逐渐降低, 并且保持在一定水平。

表 2 不同处理组的土壤水分蒸发量及土壤保水量对比

g

时间/d	不同处理组土壤保水量							
	A	B	C	D	E	F	G	H
1	3.33	4.67	6.67	4.33	3.67	3.00	3.67	23.00
2	5.67	8.67	11.33	7.33	5.00	4.00	5.33	15.00
3	7.00	7.67	10.67	6.67	4.33	3.67	6.00	15.00
4	4.33	6.00	9.00	5.67	5.00	4.33	5.00	14.00
5	4.00	6.00	7.33	4.67	4.00	3.67	3.67	10.00
6	3.33	5.33	6.33	4.67	4.00	2.67	2.67	8.00
7	4.00	5.67	8.00	4.33	4.00	3.33	4.33	11.00
17	3.27	4.43	6.43	3.97	3.67	2.93	2.97	8.10
21	4.42	5.33	8.25	4.33	4.33	3.92	4.42	9.50
25	4.58	5.25	7.00	4.67	4.75	4.17	3.92	7.25
29	4.42	5.25	6.0	4.58	4.42	3.92	4.08	3.50
33	4.42	4.92	5.10	4.25	4.33	3.75	3.92	2.75
37	4.33	4.92	4.75	4.08	4.25	3.58	4.08	0.00
41	4.00	4.75	4.25	4.33	4.25	3.42	4.17	0.00
45	3.58	4.50	3.75	4.17	4.25	3.17	3.58	0.00
49	3.42	4.17	3.17	4.08	4.17	3.25	3.17	0.25
总蒸发量/(g·m ⁻²)	68.10	87.53	108.03	76.14	68.42	56.77	64.97	127.35
总蒸发量/(t·hm ⁻²)	21.69	27.88	34.40	24.25	21.79	18.08	20.69	40.56
土壤保水量/(t·hm ⁻²)	18.87	12.68	6.16	16.31	18.77	22.48	19.87	0.00

注: 土壤保水量/(t·hm⁻²)=40.56/(t·hm⁻²)-总蒸发量/(t·hm⁻²)。

4 讨论与结论

(1) 凋落物覆盖量不同分解程度比例相同时, 凋落物覆盖量越大, 土壤水分蒸发量就越小 (A<B<C), 即土壤水分蒸发量随覆盖凋落物的递减而增加, 覆盖的凋落物越多对土壤水分蒸发的抑制作用越明显。随着土壤含水率的降低, 土壤水分蒸发量与土壤含水率呈正相关的关系, 覆盖物越多土壤水分蒸发随土壤含水率下降越慢。(土壤含水率每降低 0.5%, 60, 30 和 15 g 覆盖下蒸发量分别依次减少 0.11, 0.49, 1.23 g), 在温度有所升高的情况下, 土壤水分蒸发量依然随土壤含水率的降低呈减小的趋势。这与赵鸿雁等^[18]对森林枯枝落叶层抑制土壤蒸发研究一致。土壤覆盖量的多少直接影响土壤水分的蒸发率, 土壤保持较高的含水量时, 对土壤水分蒸发的抑制作用越好。

(2) 在凋落物覆盖量相同分解程度比例不同的情况下, 土壤水分日平均蒸发量表现为: D>E>F, 即未分解层对土壤蒸发抑制的作用最强, 半分解次之,

已分解最强。根据趋势线 $k_D > k_E > k_F$, 可知对土壤的保湿作用: 未分解>半分解>已分解。这与林茂森等^[11]对阔叶红松林凋落物土壤蒸发的研究结果一致。本研究中发现于试验后期, 随着时间的递增, 已分解程度凋落物最贴近土壤通过对土壤蒸散出的水分吸收, 本身持水能力加强, 在覆盖量较多时蒸发速率呈减小的趋势, 对土壤的保湿效果增强, 这也符合凋落物不同分解程度的持水的特性。

(3) 本文研究发现凋落物覆盖量越多土壤的保水性能越好, 但凋落物覆盖量增加到达一定水平, 对增加土壤蒸发抑制能力幅度减小。这一结论与周宏伟等研究结果一致^[15]。对马缨杜鹃林凋落物的 6 种不同覆盖模式对抑制土壤水分蒸发情况的比较, 在 1 hm² 马缨杜鹃林 F, G 组处理下的凋落物对土壤的保水作用最大。而 F>G (F=22.48 t/hm², G=19.87 t/hm²), 由此可见凋落物覆盖量到达一定数值时对百里杜鹃景区马缨杜鹃林分发挥水源涵养功能作用逐渐减小。

(4) 随着全球气温的升高, 百里杜鹃景区干旱日

益严重、加上特殊的地质条件导致地表水分不易保存,要想提高马缨杜鹃林水源涵养功能,保证和维持马缨杜鹃林凋落物的覆盖十分重要。经过长年年累积马缨杜鹃林下凋落物逐渐增多,林下覆盖物对土壤水分的无效蒸发已经起到一定的抑制作用。而此次研究结果显示,凋落物对土壤水分蒸发的抑制作用不会随凋落物量的无限增加而持续加大,不同的覆盖处理对土壤水分蒸发的抑制作用也不尽相同。林中自然覆盖物作为降低土壤水分蒸发的天然屏障,但观花景区为了增强观赏效果,采取林下杂灌和凋落物的清除措施是否会对林中水源涵养造成影响有待进一步的研究。同时,在不影响马缨杜鹃林分水源涵养功能的情况下科学管理林下凋落物以促进景观和森林安全值得进一步深入研究。

[参 考 文 献]

- [1] Bond J J, Wills W O. Soil water evaporation: Surface residue rate and placement effect[J]. Soil Science Society of America Journal, 1969,33(3):445-448.
- [2] Black P E. Research issues in forest hydrology[J]. *Jawra Journal of the American Water Resources Association*, 2010,34(4):723-728.
- [3] Maguire D A. Branch mortality and potential litter fall from Douglas-fir trees in stands of varying density[J]. *Forest Ecology and Management*, 1994,70(1/3):41-53.
- [4] 党宏忠,周泽福,赵雨森,等. 祁连山水源涵养林土壤水文特征研究[J]. *林业科学研究*, 2006,19(1):39-44.
- [5] 陈佩岩,马岚,梅雪梅,等. 降雨过程中不同密度凋落物对各土层含水率动态影响[J]. *北京林业大学学报*, 2018,40(11):93-101.
- [6] 潘明亮,丁访军,谭伟,等. 六盘水地区4种典型森林类型凋落物的水文特性[J]. *贵州农业科学*, 2011,39(5):183-186,190.
- [7] 黄进,张金池,陶宝先. 江宁小流域主要森林类型水源涵养功能研究[J]. *水土保持学报*, 2009,23(1):182-186.
- [8] 刘广全,王浩,秦大庸,等. 黄河流域秦岭主要林分凋落物的水文生态功能[J]. *自然资源学报*, 2002,17(1):55-62.
- [9] 常宗强,王金叶,常学向,等. 祁连山水源涵养林枯枝落叶层水文生态功能[J]. *西北林学院学报*, 2001,18(S1):8-13.
- [10] 郑文辉,刘圣恩,林开敏,等. 不同树种凋落物覆盖对土壤温度与水分时空分布的影响[J]. *福建农林大学学报:自然科学版*, 2015,44(5):487-493.
- [11] 林茂森,关德新,金昌杰,等. 凋落物覆盖对阔叶红松林土壤蒸发的影响[J]. *生态学杂志*, 2012,31(10):2501-2506.
- [12] 马忠秋,张万军,刘志军,等. 太行山低山区刺槐人工林水土保持效应研究[J]. *水土保持学报*, 2001,15(4):133-135.
- [13] 贾剑波,刘文娜,余新晓,等. 半城子流域3种林地枯落物的持水能力[J]. *中国水土保持科学*, 2015,13(6):26-32.
- [14] 王冬,杨政,郝红敏,等. 黄土区退耕草地凋落物—土壤界面水分过程特征研究[J]. *水土保持研究*, 2015,22(1):80-84.
- [15] 周宏伟,李生宇,孙树国,等. 自然覆盖物对塔里木沙漠公路防护林土壤蒸发的影响[J]. *科学通报*, 2008,59(S2):123-130.
- [16] Hillel D. Simulation of evaporation from bare soil under steady and diurnally fluctuating evaporativity [J]. *Soil Science*, 1975,120(3):230-237.
- [17] 申卫军,彭少麟,周国逸,等. 马占相思与湿地松人工林凋落物层的水文生态功能[J]. *生态学报*, 2001,21(5):846-850.
- [18] 赵鸿雁,吴钦孝,刘向东,等. 森林枯枝落叶层抑制土壤蒸发研究[J]. *西北林学院学报*, 1992,7(2):14-20.
- [19] 王改玲,郝明德,李仲谨. 不同覆盖物和蒸发抑制剂对土壤蒸发影响的研究初报[J]. *水土保持研究*, 2003,19(1):133-136.
- [20] 刘向东,吴钦孝,汪有科,等. 油松林枯枝落叶层截留与蒸发的研究[J]. *水土保持研究*, 1994,10(3):19-23,30.
- [21] 王孜昌,陈训,黄家勇,等. 贵州百里杜鹃景区最主要杜鹃花种的开花习性与花期规律研究[J]. *贵州林业科技*, 2010,38(2):20-23,57.
- [22] 李苇洁,陈训. 百里杜鹃森林公园马缨杜鹃种群结构与更新初步研究[J]. *贵州科学*, 2005,23(3):46-49.
- [23] 陶云,黄承玲,黄家勇,等. 贵州百里杜鹃风景名胜露珍珠杜鹃群落研究[J]. *安徽农业科学*, 2013,41(15):6791-6793,6796.
- [24] 张长芹,黄承玲,黄家勇,等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃花属种质资源的调查[J]. *植物分类与资源学报*, 2015,37(3):357-364.
- [25] 罗值贤,罗玉友,张成刚. 大方县近50年来降水变化特征分析[J]. *贵州气象*, 2012,36(2):28-29.
- [26] 陈翔,黄家勇,谢华,等. 百里杜鹃自然保护区杜鹃属植物资源研究[J]. *贵州科学*, 2010,28(4):26-34,39.
- [27] 吴倩楠,董建文,郑宇,等. 百里杜鹃国家森林公园优势种生态位研究[J]. *南京林业大学学报:自然科学版*, 2017,41(2):175-180.
- [28] 黄红霞. 百里杜鹃国家森林公园杜鹃花属植物资源调查与旅游应用研究[D]. 北京:北京林业大学,2006.
- [29] 张建利,王加国,李苇洁,等. 贵州百里杜鹃自然保护区杜鹃林凋落物储量及持水功能[J]. *水土保持学报*, 2018,32(3):167-173.
- [30] 夏卫生,刘贤赵,雷廷武. 土壤蒸发的动力学分析[J]. *灌溉排水*, 2001,20(3):17-19,32.
- [31] 张志山,王新平,李新荣,等. 沙漠人工植被区土壤蒸发测定[J]. *中国沙漠*, 2005,25(2):101-106.