

永定河沿河沙地杨树人工林林下土壤蒸发研究

莫康乐, 张志强*, 陈立欣, 周 洁

(北京林业大学水土保持学院, 北京 100083)

摘要:【目的】探讨沙地杨树人工林林下土壤蒸发的变化特征及规律。【方法】以永定河沿河沙地杨树人工林为研究对象,通过称重法测定其林下土壤蒸发量,同时应用主成分法和回归分析法分析各环境因子对土壤蒸发的影响。【结果】2010—2011年生长季内土壤蒸发量分别为155.4 mm和209.8 mm,分别占同期降雨量的42.4%和41.5%。影响土壤蒸发的主要因子为土壤水分、土壤温度、大气因子,当土壤水分条件较差时,土壤蒸发与土壤温度和大气因子之间的关系不显著。【结论】沙地杨树人工林林下土壤蒸发作用较强,并且主要受到土壤水分的限制,同时大气因子和土壤温度对其也有不同程度的影响。

关键词: 土壤蒸发; 环境因子; 杨树人工林

中图分类号: S152.7⁺3 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-2650(2013)01-0032-05

Sandy Soil Evaporation beneath the Canopy of Poplar Plantation in Yongding River Basin

MO Kang-le, ZHANG Zhi-qiang*, CHEN Li-xin, ZHOU Jie

(College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China)

Abstract: 【Objective】The objective of this study was to find out the trends and properties of sandy soil evaporation beneath the canopy of poplar plantation. 【Method】A weighing method was used to measure daily soil evaporation in a poplar plantation on the flood plain of Yongding river. The relationships between soil evaporation and environmental factors were detected through statistic methods including principal components and regression analysis. 【Results】Soil evaporation during the growing season in 2010 and 2011 were 155.4 mm and 209.8 mm respectively, consuming 41.5%—42.4% of precipitation in the corresponding period. Soil water content, soil temperature, and atmosphere factor were the major factors that affected the change of soil evaporation. But the coupling relationship between atmosphere and soil evaporation was weaken when the soil water was poor. 【Conclusion】Sandy soil evaporation beneath canopy was relatively strong. It was mainly affected by soil water condition, but also reacted to the changes of atmosphere factor and soil temperature.

Key words: soil evaporation; environmental factors; poplar plantation

蒸发散是陆地生态系统水量平衡的主要输出项,也是土壤—植被—大气连续体中水和能量交换的重要过程。陆地生态系统蒸发散主要分为两大部分:植物蒸腾和土壤蒸发。土壤蒸发造成土壤水分减少,而土壤水分被认为是陆地生态系统的最基本

和最重要的限制因子之一,因此在同一生态系统中,土壤蒸发对植物利用土壤水分有很大的影响。近年来,国内外研究者对土壤蒸发进行了各项研究。从土壤蒸发的观测模拟方面,Xiao X.等^[1]通过一种热脉冲法,基于土壤深度和时间建立了裸土累积蒸发

收稿日期:2013-01-14

基金项目:国家林业行业科研专项(201204102);北京市林业碳汇工作办公室观测运行基金。

作者简介:莫康乐,在读硕士。*责任作者:张志强,博士,教授,主要从事森林水文研究,E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn。

量的估算模型,同时还指出土壤蒸发随深度的变化受到土壤水分和净辐射的影响,从土壤蒸发的机制上阐述了土壤蒸发的过程。在土壤蒸发和环境因子之间的关系方面,J. C. Villegas 等^[2]研究了落叶林下枯落物、植被覆盖的沙壤土土壤蒸发,发现植被层次结构和气候因子是影响土壤蒸发的主因。国内的相关研究有刘丽霞等^[3]对农田防护林内小麦行间土壤蒸发的研究,主要阐述了防护林系统内土壤蒸发量受到土壤本身和气象因子条件的制约。王冠丽等^[4]从分析影响土壤蒸发因子的方法着手,提出了应用主成分分析法,浓缩及简化对土壤蒸发产生影响的指标,使得对土壤蒸发进行多元回归等统计分析时计算更为简便。国内关于土壤蒸发的研究多在裸地或农田、草地系统中进行,关于纯林地的土壤蒸发研究较为少见。以上述研究为基础,本文通过对永定河沿河沙地杨树人工林林下土壤蒸发进行观测,同时分析各环境因子对土壤蒸发的影响,探讨沙地杨树人工林林下土壤蒸发的变化特征及规律,以期为进一步研究该人工林蒸发散及其组分特点提供依据。

1 材料和方法

1.1 研究地概况

研究地位于北京南郊大兴区榆垓镇大兴林场,于永定河沿岸冲积平原上,地理坐标为 39°31′50″N, 116°15′07″E。该地区属暖温带亚湿润气候区,多年平均气温为 11.5℃,无霜期 209 d。年均降雨量 569 mm,最小降雨量 262 mm,最大降雨量 1 058 mm。年蒸发散量 517.0~672.5 mm^[5]。平均风速 2.6 m/s,夏季主风向为东南风。土壤为河流冲积沙壤土,土质疏松通透性好,平均土层厚度 200 cm,各层土壤容重、田间持水量、饱和含水量、凋萎系数等土壤物理性质见参考文献^[6]。2001—2011 年平均地下水位 17.2 m。

研究区内主要为欧美 107 杨树人工纯林,林下植被多为一年生植物,主要植被为藜科的尖头叶藜 (*Chenopodium acuminatum*) 和菊科的黄花蒿 (*Artemisia annua* L.) 以及紫苜蓿 (*Medicago sativa*) 等。

1.2 试验方法

1.2.1 土壤蒸发的测定

本研究通过称重法测定林下土壤蒸发。2010 年 6—10 月、2011 年 5—10 月,在大兴林场内设置标准样地,在样地内选择典型杨树人工林林下空地,

随机布设 10 个土壤蒸发观测点。土壤蒸发观测采用自制土壤蒸发皿,以 1 mm 厚的铁皮做成口径 20 cm、高 30 cm 的圆柱形蒸发皿,内填装原状土,底部均匀分布小孔,蒸发皿内外土体可以进行垂直水分交换。在生长季内,每日 20:00 进行称重测定,所用天平为德国产 BP-3400 精密天平(精度 0.1 g)。日土壤蒸发量通过下式计算:

$$E_s = \frac{4\Delta m}{10\rho\pi d^2} \quad (1)$$

式中, E_s 表示日土壤蒸发量,单位 mm; Δm 表示相邻两天土壤蒸发皿重量差,单位为 g; ρ 表示水密度,取 $\rho = 1 \text{ g/cm}^3$; d 为土壤蒸发皿口径, $d = 20 \text{ cm}$ 。将 10 个土壤蒸发皿所测 E_s 求平均值,即得到当日土壤蒸发量。

1.2.2 土壤水分、土壤温度的测定

在布设土壤蒸发观测点的样地内,安装 TDR 土壤水分观测仪(CS616, Campbell Scientific Inc., USA),对土壤体积含水率(soil volume water content, VWC, cm^3/cm^3)进行连续观测。2010 年观测深度为 20 cm; 2011 年观测深度分别为 20、30、60、90、120、160、200 cm。通过 REW (relative effective water) 对土壤含水率进行分级,以表示土壤水分亏缺时段^[13]。REW 的计算公式如下:

$$\text{REW} = \frac{\text{VWC} - \text{VWC}_{\min}}{\text{VWC}_{\max} - \text{VWC}_{\min}} \quad (2)$$

式中 VWC (cm^3/cm^3) 表示土壤体积含水率, $\text{VWC}_{\max}$ (cm^3/cm^3) 表示研究时段内土壤体积含水率最大值, $\text{VWC}_{\min}$ (cm^3/cm^3) 表示研究时段内土壤体积含水率最小值。

在同一样地内,安装土壤温度传感器(TCAV107, Campbell Scientific Inc., USA),埋深分别为 5、10 和 20 cm。

1.2.3 气象数据的观测

降雨量数据取自布置于林外的自计式雨量筒(RG3-M, Campbell Scientific Inc., USA)的观测值。其他气象观测项目包括气压计(CS105, Campbell Scientific Inc., USA)、空气温湿度传感器(HMP45C probe, Campbell Scientific Inc., USA)、净辐射仪(Q7.1, REBS, USA)。

采用气温和大气相对湿度的综合参数——饱和水汽压差(vapor pressure deficit, VPD)表示大气蒸发能力,其计算公式如下:

$$\text{VPD} = 0.611e^{[17.502T_a/(T_a+240.97)]}(1-R_h) \quad (3)$$

式中, VPD 为饱和水汽压差,单位 kPa; T_a 表示大气

温度,单位 $^{\circ}\text{C}$; R_h 表示大气相对湿度, %。

1.3 数据分析

各数据通过剔除超过 $\pm 6\text{SD}$ 数据的方法剔除异常值。为减少在统计分析过程中,由于有效数字损失造成的误差,采取了数据标准化的方法。具体做法为,将各组数据除以该组数据中的最大绝对值,使最大值变为 1。本研究所有数据的处理及统计分析均采用微软 EXCEL 软件和统计软件 SPSS 13.0 进行。

2 结果与分析

2.1 生长季内的土壤蒸发量

2010—2011 年生长季内各月总土壤蒸发量(E_s)及所占月总降雨量(P)的比例如表 1。两年的月总土壤蒸发量均在 10 月份达到最大,分别为 44.8 mm 和 49.2 mm,月总蒸发量在生长季上总体呈现逐月增加的趋势。在 2010 年 10 月、2011 年 5、9、10 月,土壤蒸发量都超过了当月降雨量。月总降雨量最大分别出现在 2010 年 8 月和 2011 年 7 月,达到 158.5 mm 和 222.8 mm,但根据表 1,这两个月土壤蒸发月总量都未达到最大,且仅占当月降雨量的 23.2%和 17.4%。日最大土壤蒸发量也在 10 月达到最大,为 4.9 mm/d、4.6 mm/d。

2.2 影响土壤蒸发的环境因子

采用主成分分析法对净辐射 R_n 、土壤温度 T_s 、饱和水汽压差 VPD、土壤体积含水率 VWC 及风速 μ 进行综合描述。分别对 2010 年和 2011 年的上述各项环境因子进行主成分分析,各提取出 3 个主成分如表 2,累积贡献率分别达到 82.2%和 82.4%。表 2 中因子的特征值,表示各主成分与相应因子的相关系数。根据表 2,2010 年各层土壤温度与 F_{01} 相关性大,净辐射、饱和水汽压差和风速与 F_{02} 相关

性较大,20 cm 土壤体积含水率与 F_{03} 相关性大,因此在 2010 年, F_{01} 、 F_{02} 、 F_{03} 分别代表了土壤温度、大气因子、土壤水分对土壤蒸发的影响;而在 2011 年各层土壤温度与 90 cm 以上的各层土壤体积含水率与 F_{11} 最为相关,净辐射、饱和水汽压差和风速与 F_{12} 相关性大,120 cm 以下土壤体积含水率与 F_{13} 相关性较大,因此在 2011 年, F_{11} 、 F_{12} 、 F_{13} 分别代表了土壤温度及浅层土壤水分、大气因子、深层土壤水分对土壤蒸发的影响。

根据表 3,可计算出各主成分的值。将 2010—2011 年标准化的日土壤蒸发量(E_{s_s})与标准化的主成分值(F_s),进行回归分析,发现当土壤水分差异较大时,土壤蒸发与环境因子的耦合关系差别较大(表 3)。REW ≥ 0.3 时,为土壤水分充足时段;REW < 0.3 时,为土壤水分亏缺时段。从表 3 可以看出,在土壤水分条件好时,大气因子和土壤温度占的权重较大,且通过环境因子模拟土壤蒸发具有较好的可靠性,置信度可达到 95%以上。当土壤水分条件较差时,土壤水分因子的权重相对较大,但回归模型的可靠性很低。

2.3 土壤蒸发模型检验

图 1 中,真值为标准化以后的实测土壤蒸发量,模型值为通过表 3 给出的回归模型计算出的土壤蒸发量。根据 1:1 直线两边的散点分布可以看出,当日土壤蒸发较小时,模拟值偏小;当土壤蒸发较大时,模拟值偏大。图 2 显示了表 3 回归模型的残差(真值与模型值之差),数据序列表示模型输出的结果数目。从图 2 中看出,残差在 -0.5~0.5 间波动,且分布于 0 等值线上线下的残差数量基本相当(大于 0 的结果数为 55 个,小于 0 的结果数为 52 个),但负值的绝对值较大,说明模型得到的模拟值总体偏小。

表 1 2010—2011 年生长季各月土壤蒸发量
Table 1 Monthly soil evaporation in 2010—2011 growing season

月份 Month	2010 年			2011 年		
	月土壤 蒸发量 Monthly E_s /mm	土壤蒸发与 同期降雨之比 Ratio of E_s and P /%	最大日土壤 蒸发量 Maximum daily E_s /mm	月土壤 蒸发量 Monthly E_s /mm	土壤蒸发与 同期降雨之比 Ratio of E_s and P /%	最大日土壤 蒸发量 Maximum daily E_s /mm
5 月	—	—	—	20.4	107.1	4.2
6 月	12.2	16.3	1.7	30.9	53.9	4.3
7 月	23.2	78.1	3.1	38.7	17.4	4.1
8 月	36.7	23.2	3.8	36.5	21.1	3.6
9 月	38.5	49.1	3.7	34.2	152.5	3.6
10 月	44.8	180.5	4.9	49.2	424.2	4.6
总和/总平均	155.4	42.4	3.4	209.8	41.5	4.1

表 2 各环境因子对应主成分的特征值
Table 2 Environmental factor corresponding eigenvalues of principal components

主成分 Principals	2010 年			2011 年		
	F_{01}	F_{02}	F_{03}	F_{11}	F_{12}	F_{13}
净辐射(R_n)	0.5	0.53	0.45	0.56	0.61	0.28
5 cm 土壤温度(T_{s5})	0.97	-0.19	-0.13	0.93	0.13	-0.11
10 cm 土壤温度(T_{s10})	0.98	-0.15	-0.14	0.9	0.25	-0.1
20 cm 土壤温度(T_{s20})	0.97	-0.17	-0.13	0.94	0.11	-0.11
饱和水汽压差(VPD)	0.46	0.71	0.25	-0.02	0.88	0.3
20 cm 土壤水(VWC ₂₀)	0.01	-0.4	0.79	0.66	-0.14	-0.4
30 cm 土壤水(VWC ₃₀)	—	—	—	0.87	-0.12	-0.19
60 cm 土壤水(VWC ₆₀)	—	—	—	0.82	0.01	-0.08
90 cm 土壤水(VWC ₉₀)	—	—	—	0.91	-0.18	0.23
120 cm 土壤水(VWC ₁₂₀)	—	—	—	0.68	-0.44	0.52
160 cm 土壤水(VWC ₁₆₀)	—	—	—	0.45	-0.61	0.59
200 cm 土壤水(VWC ₂₀₀)	—	—	—	-0.35	-0.75	0.25
风速(μ)	-0.15	0.64	-0.26	-0.18	0.66	0.54

表 3 标准化日土壤蒸发量与标准化主成分的回归分析
Table 3 Regression equations between standardized soil evaporation and standardized principal components

年份 Year	土壤水分分级 Relative effective water	回归模型 Regression models	显著性 Significances
2010 年	REW $\geq$ 0.3	$E_{s,s}=0.055F_{01,s}+0.746F_{02,s}+0.312F_{03,s}+0.046$	Sig=0.03
	REW<0.3	$E_{s,s}=-0.282F_{01,s}-0.082F_{02,s}-0.385F_{03,s}+0.620$	Sig=0.84
2011 年	REW $\geq$ 0.3	$E_{s,s}=0.617F_{11,s}+0.148F_{12,s}-0.014F_{13,s}+0.193$	Sig=0.05
	REW<0.3	$E_{s,s}=0.056F_{11,s}+0.157F_{12,s}-0.287F_{13,s}+0.315$	Sig=0.84

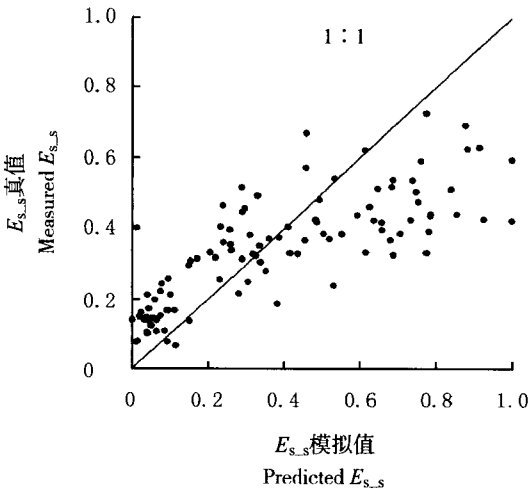


图 1 $E_{s,s}$ 模拟值- $E_{s,s}$ 真值
Figure 1 The relationship between the true $E_{s,s}$ and the modeling $E_{s,s}$

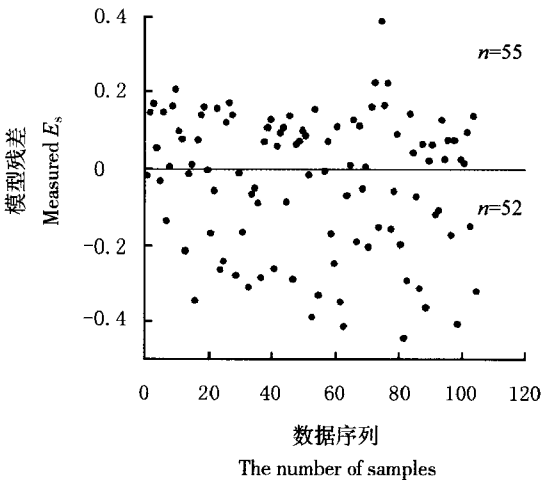


图 2 $E_{s,s}$ 回归模型残差
Figure 2 The residuals of regression prediction

3 讨论

植被蒸腾和土壤蒸发在蒸发散中的比例一直是研究者们关注的热点^[7-11],而土壤蒸发占降雨的比

例直接影响到土壤水分,进而一定程度上对蒸腾占蒸发散的比例造成影响,故土壤蒸发与降雨的比例关系也是研究者们关注的焦点之一。总结现有土壤蒸发研究,在草地/草原生态系统中土壤蒸发量约占同期降雨量(E_s/P)的 0~80%^[11-12],在山区林地这

一比例为 20.7%~23.5%^[13]。本研究中,2010—2011 年生长季内 E_s/P 为 42.4%和 41.5%,对比各类研究,本研究中人工林林下土壤蒸发与草地生态系统的土壤蒸发相比水平低,但在各类林地土壤蒸发研究中,本研究的 E_s/P 比例较大,这是由于本研究地区土质属于冲击性沙壤土,空隙大,保水、持水性差,因此土壤水分容易蒸发散失。

影响土壤蒸发的因子包括土壤本身的特性,如土壤质地、结构、色泽、表面粗糙度等,亦包括土壤自身的温度、水分等条件,还有辐射、气温、湿度、风速等气象因子^[14]。王冠丽等^[4]通过主成分分析法,提出温度因素、湿度因素、风速因素是影响沙地土壤蒸发能力的 3 个主要气象因素。史学斌等^[15]则认为,灌溉因子对土壤蒸发的影响远大于气象因子。刘丽霞等^[3]根据相关分析,对影响土壤蒸发的因子排序为土壤含水量>太阳辐射>空气相对湿度>风速>气温。本研究中通过主成分分析和回归分析,提取出了与土壤蒸发最为相关的土壤水分、土壤温度、大气因子 3 个因子。本研究亦发现,只有在土壤水分条件好的情况下($REW \geq 0.3$),大气因子、土壤温度对土壤蒸发的影响作用才较为明显,而当土壤水分条件不好时($REW < 0.3$),土壤蒸发对土壤水分以外的条件响应均减弱。这表明,该林地的土壤蒸发水平主要取决于土壤水分。另外,由于土壤蒸发除了受限于土壤水分、土壤温度、大气因子,还受到土壤自身结构、质地等因素的影响,因此仅通过这 3 个因子建立的回归模型存在一定的误差。要更准确地模拟土壤蒸发,还需从土壤蒸发的机理出发,考虑土壤本身的持水性、吸水性及蒸发表面阻抗等问题。

参考文献:

- [1] Xiao X, Horton R, Sauer T J, et al. Cumulative soil water evaporation as a function of depth and time [J]. *Vadose Zone Journal*, 2011(10): 1016-1022.
- [2] Villegas J C, Breshears D D, Zou C B, et al. Ecohydrological controls of soil evaporation in deciduous drylands: How the hierarchical effects of litter, patch and vegetation mosaic cover interact with phenology and season [J]. *Journal of Arid Environments*, 2010(74): 595-602.
- [3] 刘丽霞,王辉,孙栋元,等.绿洲农田防护林系统土壤蒸发特征研究[J]. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(1): 162-166.
- [4] 王冠丽,刘廷玺,孙铁军,等.沙地土壤蒸发能力的气象影响因子辨析及沙地土壤蒸发量特点分析[J]. *中国农村水利水电*, 2008(7): 1-4.
- [5] 张燕.北京地区杨树人工林能量平衡和水量平衡[D].北京:北京林业大学水土保持学院,2010.
- [6] 刘晨峰.北京地区杨树人工林能量和水量平衡研究[D].北京:北京林业大学水土保持学院,2007.
- [7] Yaseef N R, Yakir D, Rotenberg E, et al. Ecohydrology of a semi-arid forest: partitioning among water balance components and its implications for predicted precipitation changes [J]. *Ecohydrology*, 2010(3): 143-154.
- [8] Williams D G, Cable W, Hultine K, et al. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004(125): 241-258.
- [9] Wilson K B, Hanson P J, Mullholland P J, et al. A comparison of methods for determining forest evapotranspiration and its components: sap-flow, soil water budget, eddy covariance and catchment water balance [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001(106): 153-168.
- [10] Rothfuss Y, Biron P, Braud I, et al. Partitioning evapotranspiration fluxes into soil evaporation and plant transpiration using water stable isotopes under controlled conditions [J]. *Hydrological Processes*, 2010(24): 3177-3194.
- [11] Lauenroth W K, Bradford J B. Ecohydrology and partitioning AET between transpiration and evaporation in a semiarid steppe [J]. *Ecosystems*, 2006(9): 756-767.
- [12] Ferretti D F, Pendall E, Morgan J A, et al. Partitioning evapotranspiration fluxes from a Colorado grassland using stable isotopes: Seasonal variations and ecosystem implications of elevated atmospheric CO₂ [J]. *Plant and Soil*, 2003(254): 291-303.
- [13] 黄枝英.北京山区典型林分水分循环与水量平衡研究[D].北京:北京林业大学水土保持学院,2012.
- [14] 王政友.土壤水分蒸发的影响因素分析[J]. *山西水利*, 2003(2): 26-29.
- [15] 史学斌,鲍忠文,杜虎林,等.塔里木河下游农田根灌与滴灌条件下土壤蒸发试验研究[J]. *节水灌溉*, 2012(6): 17-21.

(本文审稿:范少辉;责任编辑:巩艳红;英文编辑:刘彬)