

城市绿化树种银杏的蒸散特征和土壤水分状况

马靖涵^{1,2}, 穆艳¹

(1.西北农林科技大学 风景园林艺术学院, 陕西 杨陵 712100; 2.陕西省水利电力勘测设计研究院, 陕西 西安 710001)

摘要: [目的] 研究关中地区城市园林绿地 0—300 cm 土壤含水量的变化特征, 探究园林绿地的蒸散发及其组分的变化特征, 为城市园林绿化的高效水分管理提供科学依据。[方法] 以常见的绿化树种银杏为例, 通过中子仪测定以银杏为主景树的园林绿地的土壤水分, 2020 年采用热扩散探针法 (TDP) 分别对 24 a 和 29 a 银杏树干液流速率进行定位监测, 结合微型蒸发皿测定银杏棵间土壤蒸发量, 计算银杏园林的蒸散发及其组分占比。[结果] 两处绿地 0—300 cm 土壤含水量的变异程度为中度变异。24 a 银杏蒸散量的变化范围为 0.24~9.06 mm/d, 蒸腾所占比例变化范围为 51.77%~71.92%; 29 a 银杏蒸散量的变化范围为 0.46~19.76 mm/d, 蒸腾占比的变化范围为 64.45%~79.24%。[结论] 城市生态系统中, 不同树龄银杏园林蒸散发最大的组分均为蒸腾, 且 7—8 月蒸腾比例最大。土壤水分变化与银杏树龄之间无明显规律, 且与银杏蒸散发的相关性较弱。

关键词: 城市园林绿地; 银杏; 土壤水分; 蒸散特征

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2023)02-0069-08

中图分类号: TV212

文献参数: 马靖涵, 穆艳. 城市绿化树种银杏的蒸散特征和土壤水分状况[J]. 水土保持通报, 2023, 43(2): 69-76. DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.20230217.001; Ma Jinghan, Mu Yan. Evapotranspiration characteristics and soil moisture conditions of *Ginkgo biloba* in urban gardens [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(2): 69-76.

Evapotranspiration Characteristics and Soil Moisture Conditions of *Ginkgo Biloba* in Urban Gardens

Ma Jinghan^{1,2}, Mu Yan¹

(1.College of Landscape Architecture and Arts, Northwest A&F

University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Shaanxi Province Institute of Water

Resources and Electric Power Investigation and Design, Yangling, Shaanxi 710001, China)

Abstract: [Objective] The variation characteristics of 0—300 cm soil water content of urban garden green space in the Guanzhong area were studied to determine the variation characteristics of evapotranspiration and its components in an urban garden green space in order to provide a scientific basis for efficient urban water management. [Methods] We used *Ginkgo biloba* as an example, soil moisture of a garden green space with *G. biloba* as the main scenic tree was measured with a neutron moisture meter. The sap flow rates for *G. biloba* trunks of 24 and 29-year old trees was monitored with thermal diffusion probes in 2020. Soil evaporation between trees was measured with micro-evaporating dishes, and evapotranspiration and its components were calculated. [Results] The variation of 0—300 cm soil water content in the two green spaces was basically moderate. The transpiration range of 24-year old *G. biloba* green space was 0.24~9.06 mm/d, and transpiration accounted for 51.77%~71.92% of evapotranspiration. The respective ranges in the 29-year old green space were 0.46~19.76 mm/d and 64.45%~79.24%. [Conclusion] In an urban ecosystem, the largest component of evapotranspiration of *G. biloba* green space of different tree ages was transpiration, and transpiration

收稿日期: 2022-07-19

修回日期: 2022-10-09

资助项目: 国家自然科学基金面上项目“城市景观植被蒸散分割及生态需水量模拟”(41877014)

第一作者: 马靖涵(1996—), 女(汉族), 陕西省西安市人, 硕士, 助理工程师, 研究方向为城市生态水文。Email: majinghan@nwafu.edu.cn。

通讯作者: 穆艳(1979—), 女(汉族), 陕西省咸阳市人, 硕士, 副教授, 主要从事城市水文和城市景观方面的研究。Email: muyanyl@126.com。

accounted for the largest proportion from July to August. There was no obvious relationship between soil water environment change and tree age, and the correlation with tree evapotranspiration was weak.

Keywords: urban garden green space; *Ginkgo biloba*; soil moisture; evapotranspiration characteristics

近年来,在可持续发展理念的引领下,以建设“海绵城市”为目标,城市生态环境和水资源利用等相关研究备受关注^[1]。对城市生态系统而言,园林绿地在改善环境以及提高居民生活质量方面占据重要地位,但缺乏针对性和科学性的管理措施使城市园林并不能完全发挥其生态效益,甚至会导致灌溉消耗量过大,造成不必要的水资源浪费。相对于农业和林业生态系统,目前对城市生态系统中不同树种水分状况的研究还相对较少^[2],对城市园林典型树种银杏的蒸散发及其与环境因子之间的关系尚未有具体的报道。充分掌握区域气象因子与银杏蒸散发之间的关系,可以合理地利用气候资源,提升对极端天气和气象灾害防御能力,有利于城市园林植被的可持续健康发展。

蒸散发包括蒸腾和蒸发,对蒸散发进行分割,以及分析蒸腾和蒸发比例的动态变化已成为水循环研究的重点。蒸散组分的比例具有季节性变化的特点^[3],不同生态系统中土壤蒸发和植被蒸腾之间的比值有所不同^[4]。以往的研究证实,与蒸散发有关的影响因子为植被的生理状态、温度、相对湿度、风速、太阳辐射等气象因子。随着社会经济的发展,城市化对水分循环和水分平衡也会产生越来越重要的影响。城市化会导致不透水面增加,造成反照率等地表参数发生变化,从而对蒸散发产生显著影响^[5]。Hao等^[6]评估了城市化对蒸散发的影响,结果表明城市下垫面反照率变化会导致净辐射通量下降;同时,不透水面的增加也会促进地表径流,减少蒸散发的产生。除此以外,城市化会导致CO₂等温室气体大量排放,造成植被生理结构产生变化,蒸腾特性也由此发生变化。Pan等^[7]模拟了城市园林蒸散发对不同CO₂浓度的响应,结果表明CO₂浓度的增加会导致植被气孔导度降低,从而造成蒸散发的减少。此外,由于人为干扰,城市生态系统中易在局部区域出现水热收支差异,形成特有的小气候,加之城市环境的复杂多变性,对城市土壤水分也会产生影响,因此有必要针对城市园林绿地蒸散发进行相关研究,以期海绵城市的建设和城市水土保持措施的制定提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况与样树信息

试验时间为2020年的6—9月和2021年的5—9月,试验地点位于陕西省杨凌示范区的中心位置西

北农林科技大学(108°09'E, 34°24'N),该区年均气温约为12.9℃,多年平均降雨量约为637.6mm,蒸发量约为884mm。校园内植物种类丰富,且绿化率较高,生态环境良好,栽植的植物主要有银杏(*Ginkgo biloba*)、栎树(*Koelreuteria paniculata*)和迎春(*Jasminum nudiflorum*)等399种绿化树种,落叶乔木的种类占比最大,约为41%,其中银杏作为代表性的落叶乔木共有812棵。选择银杏作为研究对象,以期从具有代表性的物种入手,获取城市园林植被的基础生态水文信息,使城市绿地更好地发挥其生态效益。

两处试验地均为混合式园林绿地,下垫面为植物和水体。由于建筑等人为活动,土体的构造和土壤的形成层次不规律,且含有一定的砖石等侵入体,与自然土壤相比园林绿地土壤容重较大,孔隙度较小,渗水透气性较差,有机质含量较低,pH值较高。两处试验地能较好地代表城市园林绿地,主景树均为银杏。2020年银杏树龄分别是24a和29a,种植密度和立地环境基本一致,灌溉来源包括降水和自动喷灌。在两处样地分别选择树干通直、长势良好的银杏各6棵,作为监测液流数据的样树。使用测树胸径尺测定银杏的胸径,生长锥测定其边材厚度,CGQ-1测高器测定其树高,测得样树的基本信息详见表1。

表 1 2020 年样树基本信息

Table 1 Basic information of the sample trees in 2020

样树编号	树高/m	胸径/cm	边材面积/cm ²	树龄/a
1	9.32	16.55	81.89	29
2	8.81	15.17	80.48	29
3	8.04	15.96	79.23	29
4	10.12	11.74	72.26	29
5	7.84	14.51	81.16	29
6	7.23	15.95	84.35	29
7	7.82	13.52	77.12	24
8	7.27	12.81	77.89	24
9	6.91	12.23	75.69	24
10	8.23	8.36	69.22	24
11	8.26	9.15	73.69	24
12	6.95	7.83	63.52	24

1.2 数据测定

1.2.1 气象数据 常规气象数据由样地的小型气象站和中国科学院水利部水土保持研究所气象站(距样

地 2 km) 获取。监测的数据有太阳辐射 (R_s , W/m^2)、风速 (W_s , m/s)、空气温度 (T_a , $^{\circ}C$)、相对湿度 (RH, %) 和降水量 (P , mm) 等。通过 Penman 模型计算该地区的潜在蒸散发^[8], 评估不同时期大气蒸散能力和气候干旱程度。

$$ET_p = \frac{\Delta(R_n - G) + 6.43\gamma(e_s - e_a)(1 + 0.0536U_2)}{\Delta + \gamma} \quad (1)$$

式中: ET_p 为潜在蒸散发 (mm); Δ 为饱和水汽压与温度曲线的斜率 ($kPa/^{\circ}C$); γ 是饱和水汽压和空气温度曲线的斜率; R_n 为作物表面净辐射 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; G 为土壤表面热通量密度 [$MJ/(m^2 \cdot d)$]; U_2 为 2 m 高处的日均风速 (m/s); e_s 饱和水汽压 (kPa); e_a 为实际水汽压 (kPa)。

1.2.2 银杏蒸腾数据 使用热扩散液流探针法 (Thermal dissipation probe) 分别在每个样地连续监测 6 棵银杏树干液流速率^[9]。在样树胸高处 (距地面 1.3 m) 的同一方向安装 TDP 探针, 探针 (参考探针和加热探针) 型号为 TDP-10, 长度为 10 mm, 直径为 1.2 mm。于 2020 年 6 月至 2021 年 5 月通过采集器 CR-1000 自动储存的数据, 计算银杏树干液流速率和液流量。

$$V = 0.0119 \times \left(\frac{\Delta T_{max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \quad (2)$$

$$T = n \times \frac{24 \times 3.6 \times A_s \times V}{S} \quad (3)$$

式中: V 为树干液流速率 (cm/s); ΔT_{max} 为无液流时加热探针与参考探针的最大温差 ($^{\circ}C$); ΔT 为瞬时温差 ($^{\circ}C$); A_s 为树干胸径处边材面积 (cm^2); T 为样地日蒸腾量 (mm/d); n 为样地银杏树株数; S 为样地面积。

1.2.3 土壤蒸发数据 通过布设微型土壤蒸发皿测定原状土的土壤蒸发^[10], 每个样地放置 3 个。微型

蒸发皿由筒套和内筒双侧 PVC 管制成, 尽量减少更换操作对蒸发皿附近土壤结构的破坏。每 3 d 更换一次蒸发皿内的原状土, 降雨或喷灌后依据具体情况及时更换, 尽量减少蒸发皿内的土壤湿度与田间土壤实际含水量之间的差异。于每日早上 8:00 使用精度为 0.01 g 的电子天平称重, 依据 24 h 称重的差额与相应蒸发面积之比计算土壤蒸发量。

$$E = 10 \times \frac{\Delta w / \rho}{\pi(D/2)^2} \quad (4)$$

式中: E 为土壤蒸发量 (mm/d); Δw 为 24 h 微型蒸发皿重量的差值 (g); ρ 为土壤水的密度 (g/cm^3); D 为内筒直径 (cm)。

1.2.4 土壤水分数据 通过中子仪 (型号 CNC503 B) 测定土壤含水量 (SWC, %), 在每个样地内各安装 3 个埋深为 300 cm 的 PVC 材质中子管, 于每月的 1 日和 15 日进行测定。使用中子仪前用标准方法进行标定^[11], 结合中子仪标定方程及 0—300 cm 土层读数, 计算某时段的土壤含水量 (表 2)。

表 2 中子仪标定方程

Table 2 Calibration equations for neutron meters

土层深度/cm	标定方程	R^2
0—20	$y = 15.364x + 20.542$	0.759
20—300	$y = 70.621x - 0.551$	0.913

2 结果与分析

2.1 银杏绿地的基本环境要素

研究样地 2020 年和 2021 年日间和夜间温度, 以及相对湿度的月变化如图 1 所示。夏季 (6—8 月) 温度的年际变化表现为 2021 年大于 2020 年, 相对湿度则相反。风速和太阳辐射的月变化如图 2 所示。风速的月间差异不明显, 太阳辐射表现为 2020 年低于 2021 年。

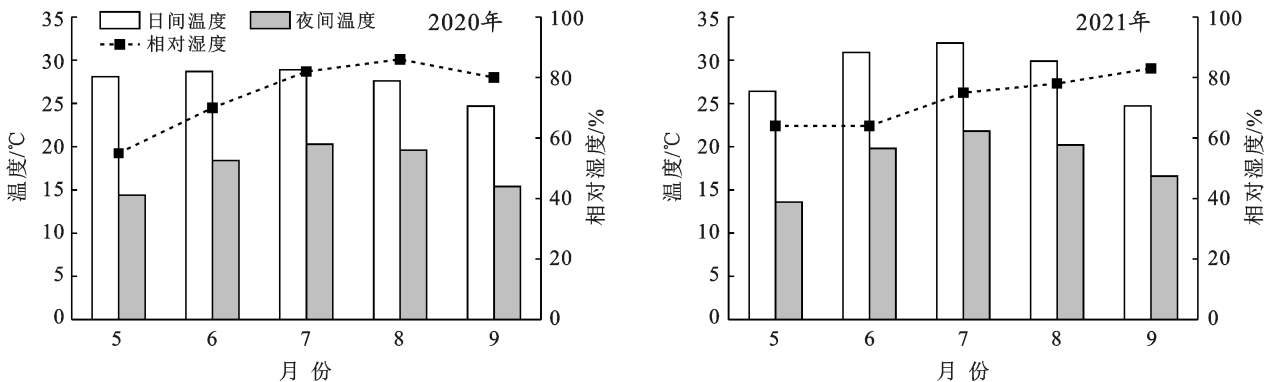


图 1 试验期间温度和相对湿度月变化

Fig.1 Monthly variation of temperature and relative humidity during the experiment period

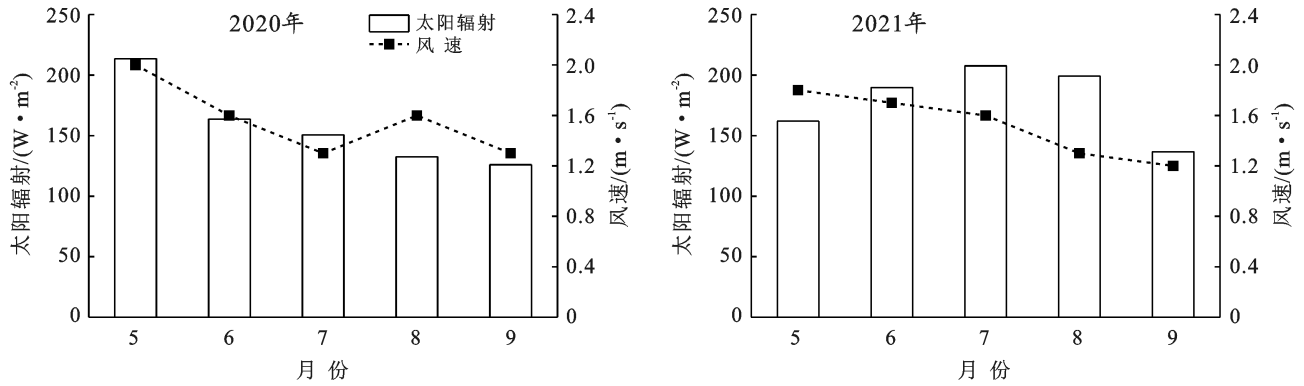


图 2 试验期间太阳辐射和风速月变化

Fig.2 Monthly variation of solar radiation and wind speed during the experiment period

在进行水文特征相关研究时,不仅可以结合气象因子,还可以通过计算潜在蒸散发(ETP)衡量区域的水分状况和大气蒸散能力,2020年和2021年5—9月潜在蒸散发的月变化特征如图3所示。2020年每日潜在蒸散发的变化范围为1.44~6.26 mm/d,2021年为1.07~6.74 mm/d。2020年和2021年的月变化趋势相似,2020年潜在蒸散发最大的月份为6月,月累计值为127.34 mm。2021年潜在蒸散发最大的月份为7月,月累计值为138.71 mm。

研究样地2020年和2021年5—9月降雨和土壤含水量的月变化如图4所示,降雨量的月间差异大于土壤含水量的月间差异。2020年降雨属于正常偏多年份,连续降雨天数、日均降雨量和降雨频率均较高。土壤含水量与降雨量密切相关,2020年两处样地土壤含水量大于2021年,2020年月间土壤含水量的变化范围为23.45%~28.92%,2021年的变化范围为

18.56%~23.86%。通过土壤含水量与潜在蒸散发的相关性分析表明,24 a和29 a银杏土壤含水量均与潜在蒸散发呈显著性负相关($p < 0.05$),相关系数分别为-0.641和-0.609。

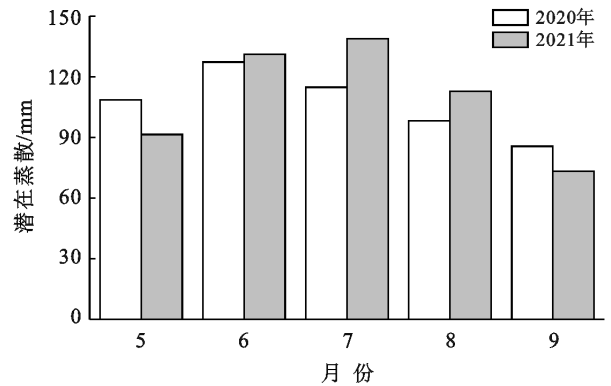
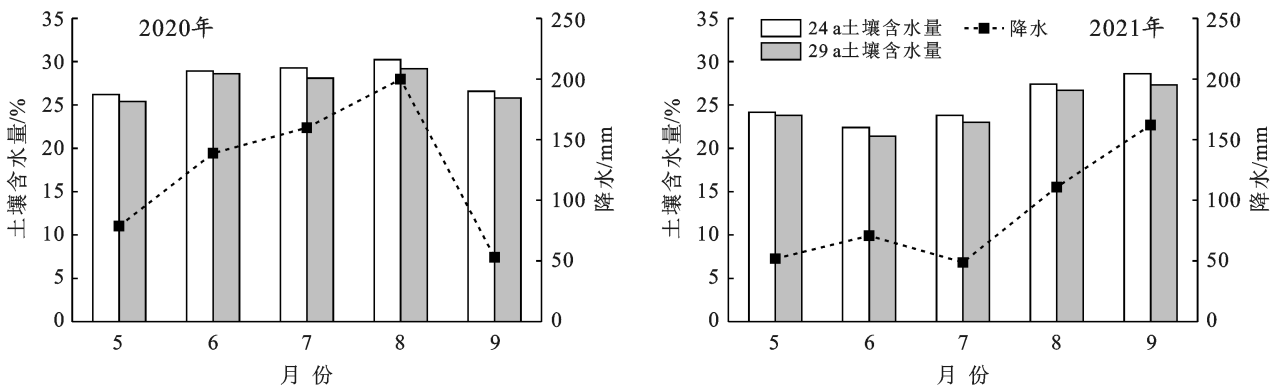


图 3 试验期间潜在蒸散发月变化

Fig.3 Monthly variation of potential evapotranspiration during the experiment period



注:24 a,29 a生银杏树龄皆以2020年为标准。下同。

图 4 试验期间降雨量和24 a,29 a生银杏样地土壤含水量月变化

Fig.4 Monthly variation of rainfall and soil water content of 24 yr and 29 yr aged *G. biloba* during the experiment period

2.2 银杏绿地的蒸散特征及其组分

蒸散量为土壤蒸发和植被蒸腾两个组分之和,是区域水量平衡的重要组成部分之一。量化各组分占蒸散量的比例,有利于合理规划水资源的利用和管

理,制定高效节水的措施。2020年和2021年生长季24 a银杏每日蒸散量变化范围分别为0.24~7.97 mm/d,1.63~9.06 mm/d;29 a银杏地变化范围分别为0.46~13.62 mm/d,1.17~19.76 mm/d。图5—6

为 2020 年和 2021 年两处银杏蒸散(土壤蒸发和银杏蒸腾)的月变化趋势,图 7—8 为蒸散各组分所占比例,蒸腾占蒸散的比例大于蒸发。2020 年 24 a 和 29 a 银杏生长季蒸腾比例的平均值分别为 65.51%和74.06%,蒸腾占比最大的月份为 8 月。2021 年 24 a 和 29 a 银

杏生长季蒸腾比例的平均值分别为 61.98%和68.98%,蒸腾占比最大的月份为 7 月。从不同树龄上看,24 a 银杏蒸腾占蒸散的比例小于 29 a 银杏,24 a 银杏蒸腾所占比例的变化范围为 51.77%~71.92%,29 a 银杏蒸腾所占比例的变化范围为 64.45%~79.24%。

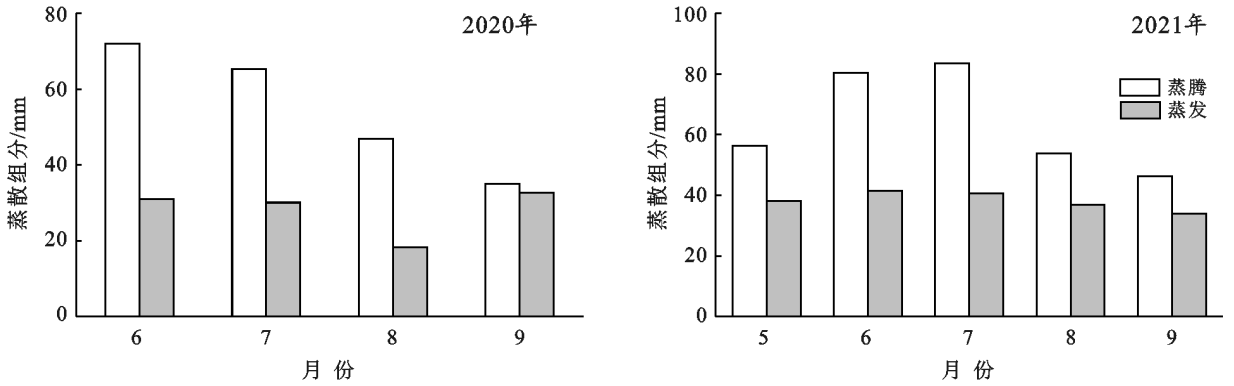


图 5 24 a 生银杏样地 2020 年和 2021 年生长季蒸散组分月变化

Fig.5 Monthly variation of evapotranspiration fractions of 24 yr aged *G. biloba* in the growing season of 2020 and 2021

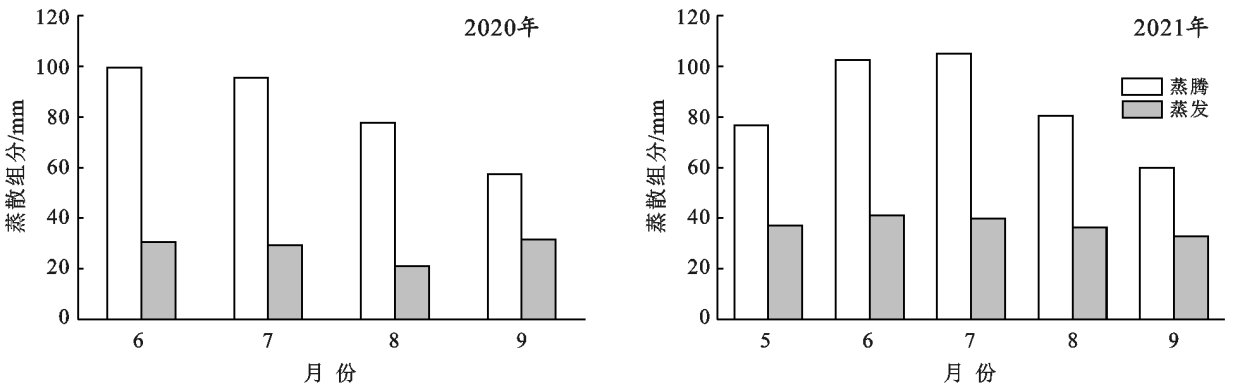


图 6 29 a 生银杏样地 2020 年和 2021 年生长季蒸散组分月变化

Fig.6 Monthly variation of evapotranspiration fractions of 29 yr aged *G. biloba* in the growing season of 2020 and 2021

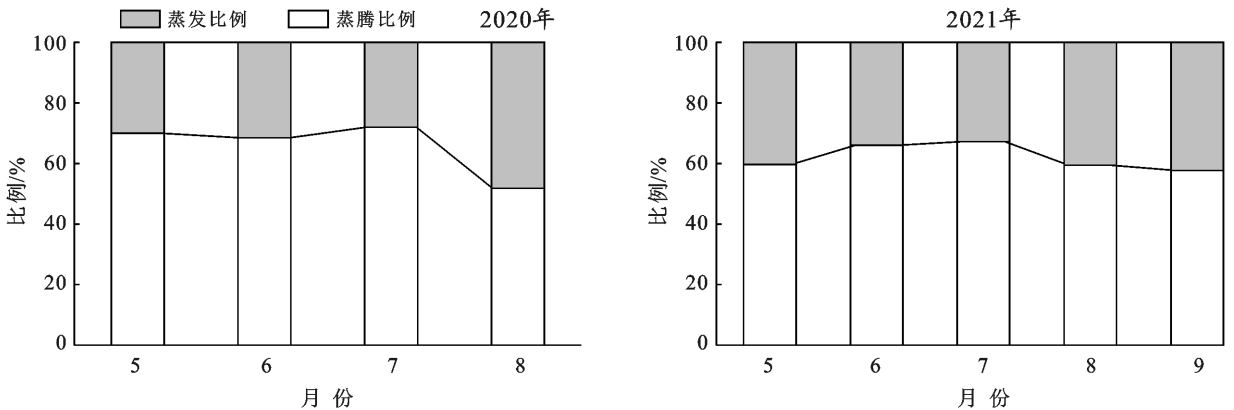


图 7 24 a 生银杏样地 2020 年和 2021 年生长季蒸散组分所占比例

Fig.7 Percentage of evapotranspiration fractions of 24 yr aged *G. biloba* in the growing seasons of 2020 and 2021

2.3 银杏绿地的土壤水分变化特征及其与蒸散发的关系

24 a 和 29 a 银杏 2020 年和 2021 年 5—9 月土壤

水分的垂直变化如图 9—10 所示,样地 50—100 cm 土层的土壤含水量较高。土壤含水量的垂直变化不仅与降雨、温度和太阳辐射等气象因子有关,还与土

壤质地组成、植被类型、地下水深度等有关。为进一步分析不同树龄银杏在不同土层深度土壤水分的变异程度,计算了 2020—2021 年不同树龄土壤含水量的变异系数(C_v)。如图 11 所示,24 a 和 29 a 银杏土壤含水量变异程度无明显差异,0—300 cm 土层土壤水分基本为中度变异($10\% < C_v < 100\%$)。从不同树龄上看,24 a 银杏土壤含水量的变异系数的变化范围为 7.88%~16.23%,变异系数最小值出现在 80 cm

土层处,随着土层深度的增加,变异系数的变化趋势为减小—增大—减小;29 a 银杏的变化范围为 8.94%~15.86%,变异系数最小值出现在 240 cm 土层处,随着土层深度的增加,变异系数有波动减小的变化趋势,土壤水分更加稳定。从不同土层深度上看,24 a 和 29 a 银杏都表现为表层土壤含水量变异程度大于深层,土壤水分的垂直变化与银杏的树龄之间无明显规律。

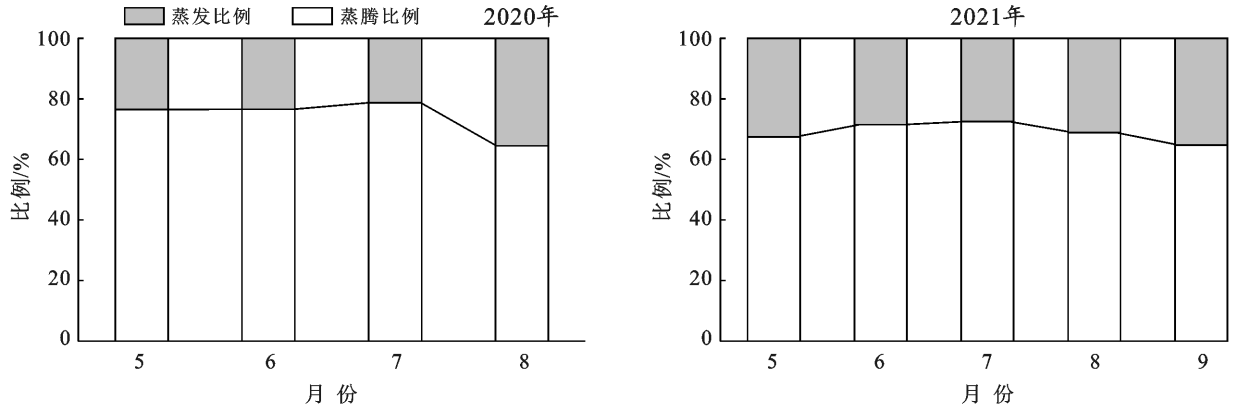


图 8 29 a 生银杏样地 2020 年和 2021 年生长季蒸散组分所占比例

Fig.8 Percentage of evapotranspiration fractions of 29 yr aged *G. biloba* in the growing seasons of 2020 and 2021

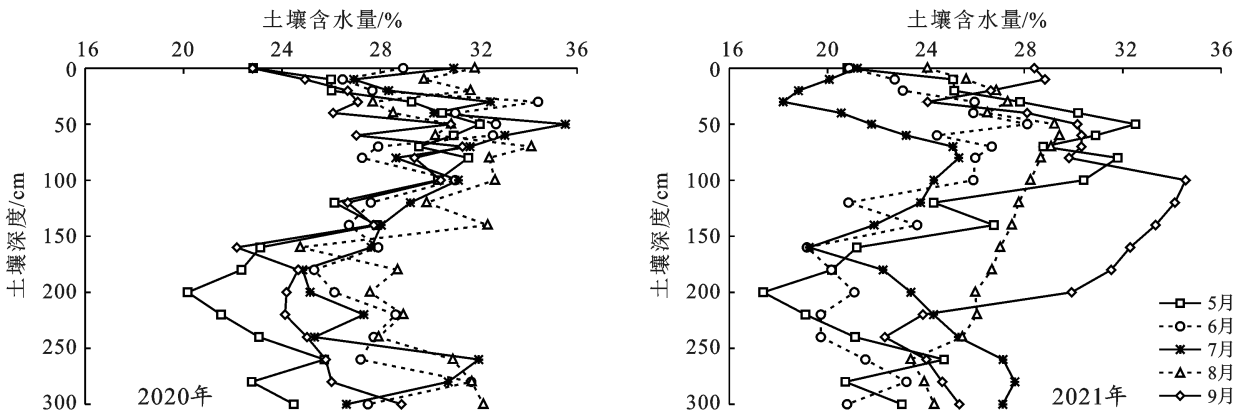


图 9 试验期间 24 a 生银杏样地 0—300 cm 土壤含水量月变化

Fig.9 Monthly variation of soil water content in 0—300 cm of 24 yr aged *G. biloba* during the experiment period

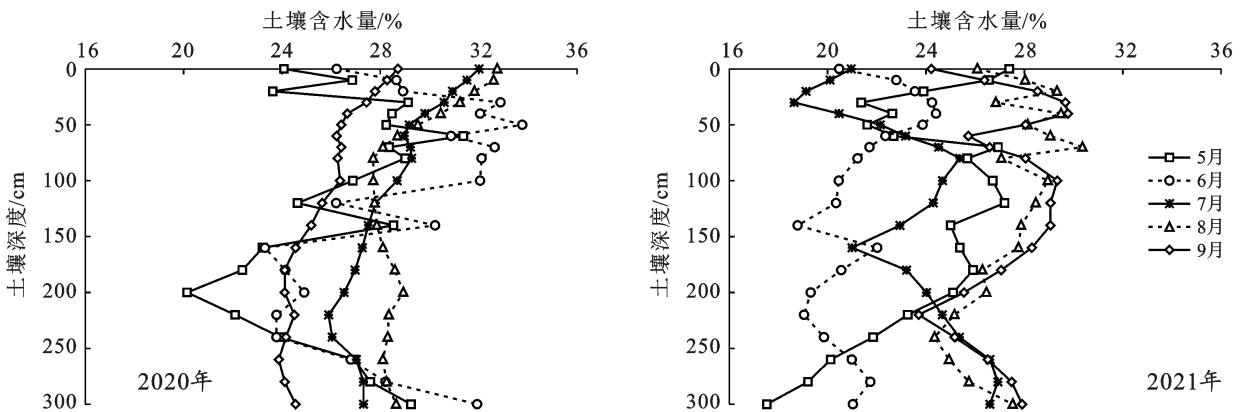


图 10 试验期间 29 a 生银杏样地 0—300 cm 土壤含水量月变化

Fig.10 Monthly variation of soil water content in 0—300 cm of 29 yr aged *G. biloba* during the experiment period

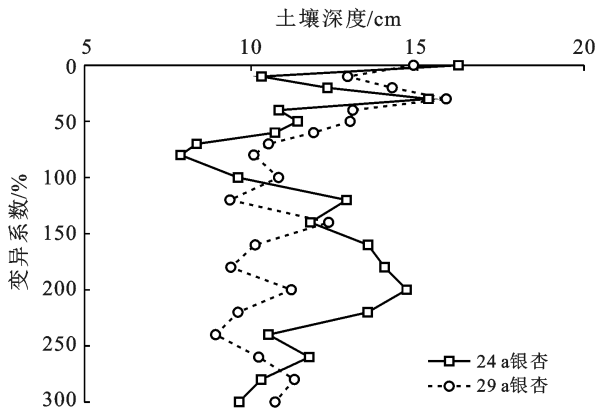


图 11 24 a 和 29 a 生银杏样地 0—300 cm 土层土壤含水量变异系数

Fig.11 Coefficient of variation of soil water content in the 0—300 cm soil layer of 24 yr and 29 yr aged *G. biloba*

以上结果表明,不同深度土壤含水量的季节性变化受树龄影响的程度较小,两种树龄土壤含水量的变异程度基本为中度变异,随着土层的增加,变异系数之间的差异有缩小趋势。

通常情况下,土壤水分直接影响着蒸散发的变化,然而在城市环境中,复杂的下垫面以及人为因素的影响,削弱了土壤水分与蒸散发之间的关系。本研究中,不同树龄的银杏样地 0—300 cm 的平均土壤含水量(SWC)与土壤蒸发(E)、银杏蒸腾(T)以及蒸散发(ET)均无显著性相关(表 3)。

表 3 月尺度上城市土壤水分与银杏蒸散发及其组分之间的相关分析

Table 3 Correlation analysis between urban soil moisture and *G. biloba* evapotranspiration and its components at monthly scales

树龄/a	土壤蒸发(E)	银杏蒸腾(T)	蒸散发(ET)
24	0.316	0.300	0.337
29	0.354	0.412	0.430

3 讨论

本研究中,不同树龄银杏土壤含水量之间差异性不明显,城市植物的蒸散发对土壤水分环境的变化响应不敏感。城市生态系统与森林生态系统不同,园林植物在合理灌溉的条件下植被蒸腾和土壤蒸发受土壤含水量的限制较低。本研究中,由于喷灌等设施完善、植物斑块面积相对较小,基本可以根据气候变化对园林土壤水分进行及时补充。不同时期土壤含水量维持在田间持水量的 60% 以上,水分充足、波动变化较小且季节性差异不明显。有研究表明,当土壤水分环境受限时,蒸散发对土壤水分的响应越强^[12]。

当土壤含水量不低于临界值时,蒸散发与土壤含水量的相关性下降^[13],这与王华等^[2]对北京市绿化树种紫玉兰的研究一致,土壤含水量对植被蒸腾耗水没有显著性影响。穆家伟^[14]的研究表明,土壤含水量波动范围小的地区,土壤蒸发变化也较为稳定。通过蒸散发对土壤水分较不敏感的反应也在一定程度上说明了城市园林土壤水分状况良好,可以满足园林植被正常的生长发育,充分发挥其生态效益。

基于良好的管理条件(如及时充分灌溉),无论在干旱和降水丰润期,城市植物均保持良好的水分环境状况,因此土壤水分不是城市植被生长的限制因素。但值得注意的是,随着城市绿化面积的扩增,绿化用地的需求量也在持续增长,部分城市土壤暴露出土层深度不足、有机质含量偏低、土壤密实度高、透水性和透气性差、土壤孔隙度低等问题^[15]。这主要是由于城市园林中的土壤基本采取“就地取土”的措施,部分土壤中掺杂了建筑垃圾。本研究中,土壤水分变化幅度较大,土壤含水量的垂直变化表现为 0—150 cm 土层土壤含水量大于 150—300 cm 土层,可能就是不同土层深度土壤质地差异较大的原因。史宇^[16]对北京山区土壤水分垂直变化的研究结果表明,随土层深度增加土壤含水率的变异系数降低,而本研究中部分深层土壤的变异系数较大,可能存在难透土层。土壤的优劣与植被的生长发育有着直接的关系,在城市园林建设和维护时,应注意改善土壤的透气排水性,避免土壤板结对植被造成的不利影响。

本研究中两种树龄银杏所在样地立地环境及气候基本一致,造成 29 a 银杏园林蒸散量大于 24 a 的原因主要是两种不同树龄银杏间液流速率的差异,以及两处银杏胸径和边材面积不同,导致 29 a 银杏园林蒸腾量更大,这与许浩等^[17]针对植被胸径和蒸腾之间关系的研究结论一致。本研究中的蒸散发组分为两部分,分别为通过微型蒸发皿测得的土壤蒸发量,以及通过 TDP 插针式热扩散液流计测定和计算的蒸腾耗水量。降雨并不是城市园林植物唯一的水分来源,样地会根据气候变化定期进行喷灌,不同月份以及年际间样地水分收入部分差异小。此外,本试验没有考虑冠层截留部分,以蒸腾和蒸发这两部分作为蒸散组分,可能会相对低估实际蒸散量^[18]。从试验方法上看,计算得到的蒸散发会与园林植物实际的蒸散发具有一定的误差,具体原因有:① TDP 插针式热扩散液流计对树干接触部位可能产生“热损伤”,会影响探针的灵敏度。有研究表明插针对木质部的影响导致液流被低估高达 47.5%。对于长期监测,热损伤逐步积累并扩大,随测定时间的增长加重对热传递

的影响,从而进一步降低液流计的准确性^[19]。TDP 液流计的校准方式一般为,加热探针与对照探针之间温差最大时,确定为零液流速率,该时间一般在夜间。然而有研究表明植物夜间也存在明显的液流,夜间蒸腾量占日蒸腾量的比例约为 2%~13%^[20],对夜间液流的考虑较少会导致液流速率被低估^[21]。②微型蒸发皿测定的土壤蒸发量具有局限性^[22-23],无法对雨天土壤的蒸发进行测定,只能统计没有降雨事件发生时的土壤蒸发量^[24]。试验期间,间隔 3~5 d 对蒸发皿的原状土进行更换,间隔时间的长短对结果也有一定的影响。虽然微型蒸发皿和 TDP 插针式热扩散液流计自身会产生一定的潜在误差,但是目前还是被广泛使用和认可,具有可靠性和易操作性,本研究结果可以在一定程度上反映城市绿地的土壤蒸发以及植被蒸腾量。

4 结论

(1) 绿化树种银杏土壤含水量的差异小于降雨量的月间差异。24 a 和 29 a 银杏样地土壤含水量无显著性差异,两处样地 0—300 cm 土壤含水量的变异程度基本为中度变异,随着土层的增加其变异系数之间的差异有缩小趋势。

(2) 29 a 银杏的蒸腾量显著高于 24 a 银杏($p < 0.05$),29 a 银杏月蒸腾量最高可达 105.03 mm,24 a 银杏最高可达 83.43 mm。两处银杏样地蒸散最大的组分均为蒸腾,且 7—8 月蒸腾所占比例最大。24 a 银杏蒸腾所占比例变化范围为 51.77%~71.92%,29 a 银杏蒸腾比例的变化范围为 64.45%~79.24%。

(3) 城市园林 0—300 cm 平均土壤含水量与土壤蒸发、银杏蒸腾以及蒸散发均无显著性相关。

[参 考 文 献]

- [1] 王兴超.基于生态水利的海绵城市设计原则[J].水土保持通报,2017,37(5):250-254.
- [2] 王华,欧阳志云,任玉芬,等.北京市绿化树种紫玉兰的蒸腾特征及其影响因素[J].生态学报,2011,31(7):1867-1876.
- [3] Raz Y N, Yakir D, Schiller G, et al. Dynamics of evapotranspiration partitioning in a semi-arid forest as affected by temporal rainfall patterns [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2012,157(2):77-85.
- [4] Moran M S, Scott R L, Keefer T O, et al. Partitioning evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems using time series of soil surface temperature [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149(1):59-72.
- [5] 李晓媛,于德永.蒸散发估算方法及其驱动力研究进展[J].干旱区研究,2020,37(1):26-36.
- [6] Hao Lu, Sun Ge, Liu Yongqiang, et al. Urbanization dramatically altered the water balances of a paddy field-dominated basin in southern China [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2015,19(7):3319-3331.
- [7] Pan S, Tian H, Dangal S R S, et al. Responses of global terrestrial evapotranspiration to climate change and increasing atmospheric CO₂ in the 21st century [J]. *Earth's Future*, 2015,3(1):15-35.
- [8] Keyu X, Yi L, Robert H, et al. Similarity and difference of potential evapotranspiration and reference crop evapotranspiration: A review [J]. *Agricultural Water Management*, 2020,232:106043.
- [9] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1988,3(4):309-320.
- [10] 李王成,王为,冯绍元,等.不同类型微型蒸发器测定土壤蒸发的田间试验研究[J].农业工程学报,2007,23(10):6-13.
- [11] 田昌玉,孙文彦,林治安,等.中子仪测定土壤水分方法的研究进展[J].中国农学通报,2011,27(18):7-11.
- [12] Shang Lunyu, Zhang Yu, Lü Shihua, et al. Energy exchange of an alpine grassland on the eastern Qinghai-Tibetan Plateau [J]. *Science Bulletin*, 2015, 60(4):435-446.
- [13] Meinzer FC, Goldstein G, Jackson P, et al. Environmental and physiological regulation of transpiration in tropical forest gap species: The influence of boundary layer and hydraulic properties [J]. *Oecologia*, 1995, 101(4):514-522.
- [14] 穆家伟.毛乌素沙地典型沙生灌木群落土壤蒸发动态研究[D].北京:北京林业大学,2017.
- [15] 高国荣.上海市杨浦区公园、道路绿地土壤物理性状及电导率分析[J].中国农学通报,2019,35(26):107-114.
- [16] 史宇.北京山区主要优势树种森林生态系统生态水文过程分析[D].北京:北京林业大学,2011.
- [17] 许浩,张希明,闫海龙,等.塔克拉玛干沙漠腹地梭梭(*Haloxylon ammodendron*)蒸腾耗水规律[J].生态学报,2008,28(8):3713-3720.
- [18] Molina A J, Campo A D D. The effects of experimental thinning on throughfall and stemflow: A contribution towards hydrology-oriented silviculture in Aleppo pine plantations [J]. *Forest Ecology and Management*, 2012,269:206-213.
- [19] Wiedemann A, Marañón-Jiménez S, Herbst M, et al. An empirical study of the wound effects on sap flow measured with thermal dissipation probes [J]. *AGU Fall Meeting Abstracts*, 2014,36(12):1471-1484.

- 源涵养功能差异评价[J].水土保持学报,2019,33(2):244-250.
- [19] 胡文杰,庞宏东,王晓荣,等.长江中游平原湖区人工林枯落物和表层土壤持水特性[J].长江流域资源与环境,2021,30(3):644-653.
- [20] 李娜,赵传燕,郝虎,等.海拔和郁闭度对祁连山青海云杉落叶凋落物分解的影响[J].生态学报,2021,41(11):4493-4502.
- [21] 牛勇.北京山区不同林分水文生态效应特征[D].北京:北京林业大学,2015.
- [22] 涂志华,范志平,孙学凯,等.大伙房水库流域不同植被类型枯落物层和土壤层水文效应[J].水土保持学报,2019,33(1):127-133.
- [23] 朱家晷,秦富仓,李龙,等.内蒙古清水河县公益林区不同林地类型枯落物层水文效应[J].水土保持通报,2022,42(1):114-121.
- [24] 赵阳,王飞,齐瑞,等.白龙江、洮河林区 5 种典型森林枯落物与土壤层水源涵养效应[J].水土保持研究,2021,28(3):118-125.
- [25] 杨家慧,谭伟,卯光宪,等.黔中不同龄组柳杉人工林枯落物水源涵养能力综合评价[J].水土保持学报,2020,34(2):296-301.
- [26] 周巧稚,毕华兴,孔凌霄,等.晋西黄土区不同密度刺槐林枯落物层水文生态功能研究[J].水土保持学报,2018,32(4):115-121.
- [27] 刘凯,贺康宁,王先棒.青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应[J].北京林业大学学报,2018,40(1):89-97.
- [28] Wieder W R, Cleveland C C, Townsend A R. Tropical tree species composition affects the oxidation of dissolved organic matter from litter [J]. Biogeochemistry, 2008,88(2):127-138.
- [29] 罗航,何介南,康文星,等.湘南红壤区互叶白千层人工林枯落物层及土壤水源涵养能力研究[J].中南林业科技大学学报,2021,41(5):102-109.
- [30] 陈乾,刘凯,王希贤,等.福建柏混交林主要土壤理化性质与土壤含水量的关联研究[J].福建农林大学学报(自然科学版),2021,50(6):771-780.
- [31] 骆土寿,李意德,陈德祥,等.广东白盆珠水库水源林土壤水源涵养能力研究[J].生态科学,2007,26(2):159-164.
- [32] 李璐杉.昆明车木河水库水源地不同森林类型枯落物与土壤特性及水源涵养功能研究[D].云南昆明:云南师范大学,2020.
- [33] 赵雨森,韩春华,张宏光,等.阿什河上游小流域主要林分类型土壤水文功能研究[J].水土保持学报,2012,26(2):203-208.
- [34] 杨晓霞,赵锦梅,张雪,等.祁连山东段山地典型灌丛枯落物及土壤水源涵养功能研究[J].干旱区地理,2022,45(1):197-207.
- [35] 孙海,王秋霞,张春阁,等.不同树叶凋落物对人参土壤理化性质及微生物群落结构的影响[J].生态学报,2018,38(10):3603-3615.
- [36] 胡静霞,杨新兵,朱辰光,等.冀西北地区 4 种纯林枯落物及土壤水文效应[J].水土保持研究,2017,24(4):304-310.
- [37] 张引,黄永梅,周长亮,等.冀北山地 5 个海拔梯度油松林枯落物与土壤水源涵养功能研究[J].水土保持研究,2019,26(2):126-131.
- [38] 王佑民.中国林地枯落物持水保土作用研究概况[J].水土保持学报,2000,14(4):108-113.

(上接第 75 页)

- [20] Han Chun, Chen Ning, Zhang Cankun, et al. Sap flow and responses to meteorological about the *Larix principis-rupprechtii* plantation in Gansu Xinlong Mountain, Northwestern China [J]. Forest Ecology and Management, 2019,451:117519.
- [21] 赵飞飞,马煦,邸楠王焯,等.毛白杨茎干不同方位夜间液流变化规律及其主要影响因子[J].植物生态学报,2020,44(8):864-874.
- [22] Shawcroft R W, Gardner H R. Direct evaporation from soil under a row crop canopy [J]. Agricultural Meteorology, 1983,28(3):229-238.
- [23] Lascano R J, Van-Bavel C H M, Hatfield J L, et al. Energy and water balance of a sparse crop: Simulated and measured soil and crop evaporation [J]. Soil Science Society of America Journal, 1987,51(5):1113-1121.
- [24] Flumignan D L, Faria R T D, Prete C E C. Evapotranspiration components and dual crop coefficients of coffee trees during crop production [J]. Agricultural Water Management, 2011,98(5):791-800.