

亚热带季风区樟树的水分利用特征

夏银华¹, 章新平^{1,2}, 戴军杰¹, 王锐¹, 罗紫东³, 饶志国¹, 肖雄¹, 张赐成¹

(1.湖南师范大学地理科学学院,长沙 410081;2.湖南师范大学地理空间大数据挖掘与应用湖南省重点实验室,长沙 410081;3.中国科学院亚热带农业生态研究所,长沙 410081)

摘要: 基于2017—2019年樟树(*Cinnamomum camphora*)生长季(4—10月)的茎干水、叶片水和土壤水稳定同位素及同期环境因子数据,并结合2019—2021年樟树生长季的蒸腾速率,分析了日间樟树植物水同位素与其影响因子之间的关系,探究樟树在生长季和不同环境条件下吸水深度的变化特征,旨在加深对樟树自身水分利用特征的了解。结果表明:在晴日,樟树蒸腾速率与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 的值在日间高于夜间,茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的值在日间低于夜间。蒸腾速率与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的时滞在8月晴日较5月晴日大,平均时滞为2.32 h。在5月晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、饱和水汽压差、相对湿度及蒸腾之间均呈二次函数关系;在8月晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 与温度、饱和水汽压差、相对湿度及蒸腾之间呈二次函数关系,但茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与上述影响因子之间无明显的函数关系。樟树的吸水深度存在明显的季节变化特征。在生长季初期(4—5月)樟树吸水层位单一,主要利用浅层土壤水;在生长季中期(6—8月)和后期(9—10月),樟树有2个吸水层位:在中期利用中层和深层土壤水,在后期利用浅层和深层土壤水。樟树的吸水深度和蒸腾还受到生境的影响。季节性干旱期间,随着干旱的持续,蒸腾日变化曲线的宽度逐渐变窄,蒸腾耗水量相应减小;受环境变化和自身生理特性的影响,樟树的吸水深度逐渐由浅变深再变浅。与降水前相比,降水后樟树的蒸腾作用增强,吸水深度上升,吸水土层变窄。

关键词: 樟树; 蒸腾; 氢氧稳定同位素; 吸水深度

中图分类号: S175.4

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)06-0195-11

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcbx.2022.06.025

Water Use Characteristics of *Cinnamomum camphora* in Subtropical Monsoon Region

XIA Yinhua¹, ZHANG Xinping^{1,2}, DAI Junjie¹, WANG Rui¹,

LUO Zidong³, RAO Zhiguo¹, XIAO Xiong¹, ZHANG Cicheng¹

(1.College of Geographical Sciences, Hunan Normal University, Changsha 410081;

2.Hunan Key Laboratory of Geospatial Big Data Mining and Application, Changsha 410081;

3.Institute of Subtropical Agroecology, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410081)

Abstract: In order to better understand water use characteristics of *Cinnamomum camphora*, based on stable isotopes of stem water, leaf water and soil water of *C. camphora* during growing seasons (April-October) of 2017—2019 and corresponding environmental factors in the same period, as well as transpiration rate during the growing season of 2019—2021, we analyzed the relationship between plant water isotopes and influencing factors of *C. camphora* plants at daily scale, explored the variation characteristics of water absorption depth of *C. camphora* under different environmental conditions during the growing season. The results showed that in the sunny day, the $\delta^{18}\text{O}$ of leaf water and transpiration rate were higher in daytime than those at night, while the $\delta^{18}\text{O}$ value of stem water was lower in daytime than that at night. The time lag between transpiration rate and leaf water $\delta^{18}\text{O}$ was larger on the sunny day in August than that in May, and the average time lag was 2.32 h. On the sunny day in May, the $\delta^{18}\text{O}$ of leaf water and stem water had a quadratic function with temperature, vapor pressure difference, relative humidity and transpiration. On the sunny day in August,

收稿日期: 2022-03-17

资助项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目(42101130)

第一作者: 夏银华(1995—), 女, 安徽六安人, 硕士研究生, 主要从事亚热带生态水文研究。E-mail: 939973367@qq.com

通信作者: 章新平(1956—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士, 博导, 主要从事气候变化及水文研究。E-mail: zxp@hunnu.edu.cn

there was a quadratic relationship between leaf water $\delta^{18}\text{O}$ and the above factors, but there was no obvious functional relationship between stem water $\delta^{18}\text{O}$ and the above factors. The water absorption depth of *C. camphora* had obvious seasonal variation characteristics. At the beginning of the growing season (April-May), *C. camphora* had single water-absorbing layer, mainly used shallow soil water. It had two water-absorbing layers during the middle growing season (June-August) and the late growing season (September-October). *C. camphora* used middle and deep soil water in the middle of the growing season, while it used shallow and deep soil water in the late growing season. The water absorption depth and transpiration were also affected by habitat. During seasonal drought, the width of the diurnal variation curve of transpiration gradually narrowed with the duration of drought, and the water consumption of transpiration decreased correspondingly. Affected by environmental changes and its own physiological characteristics, water absorption depth of *C. camphora* gradually changed from shallow to deep and then shallow. However, compared with that before precipitation, transpiration of *C. camphora* increased after precipitation, the water absorption depth moved up, and the water absorption layer became narrow.

Keywords: *Cinnamomum camphora*; transpiration; stable isotopes of hydrogen and oxygen; water-used depth

水分不仅影响林木内部的生理生化过程,同时对林木外部形态的构建、生长发育状况以及区域植被分布状况都起着决定性作用^[1],它是植物生长、发育的关键因子和重要限制性因素,尤其是在季节性干旱或水资源短缺地区^[2]。受气候变化的影响,水文循环过程发生改变,进而导致植物的水分利用方式发生变化^[3]。因此,研究植物的吸水和耗水特征对提高生态水文过程的认识和生态管理至关重要^[4]。

近年来,随着稳定同位素技术日趋成熟,稳定同位素示踪方法被广泛应用于生态水文领域。植物叶片水稳定同位素变化可以反映叶片内部与外界环境的物质和能量变化,并且能够反映植物周围的微环境与生态信息^[5]。罗伦等^[6]研究认为,叶片水同位素主要受气象因子(如温度、相对湿度、饱和水汽压差等)和生态因子(如蒸腾和气孔导度等)的影响;李龙等^[7]研究发现,叶片水同位素与叶片性状有关,并且同一叶片中同位素存在异质性。茎干作为叶片与土壤的连接体,对于植物生长至关重要,目前对茎干水同位素的研究多集中在植物的水分利用来源方面,对茎干水同位素影响因子的研究较少。邓文平^[8]研究发现,侧柏和栓皮栎年内茎干水同位素与液流呈正相关关系,与黎明叶片水势呈直线或二次函数关系,说明茎干水同位素也随着影响因子的变化而变化。但以往在茎干水与影响因子之间的关系研究仍比较欠缺,需要进一步加深对植物茎干水和叶片水同位素与影响因子之间关系的研究。另外,有研究^[9]发现,除少数盐生和旱生植物外,大部分植物茎干水中稳定同位素不发生分馏,通过对比茎干水和土壤水中稳定同位素的组成可以判断植物的吸水深度。大多数研究^[10-11]认为,植物在湿季利用浅层土壤水,旱季利用深层土壤水。但王欣等^[12]对北京

山区侧柏的吸水深度进行研究发现,季节性干旱发生时,随着土壤水分的降低,侧柏的吸水深度逐渐由深层向浅层转移;Grossiord 等^[13]研究发现,杜松在干燥的夏季受天气变暖影响,吸水来源向浅层土壤水转变。在亚热带季风区,王锐等^[14-15]对长沙市典型植物的吸水特征进行了诸多研究发现,长沙典型的森林树种在旱季利用土壤水的深度较雨季下移,但植物在旱季吸水深度的变化过程可能因为研究的时间尺度过大而被掩盖;Luo 等^[16]和夏银华等^[17]分别对长沙市的樟树在干旱不同阶段和不同降水事件前后的蒸腾耗水进行研究发现,樟树的蒸腾作用在干旱后期十分微弱,在降水之后显著增强,这或许与樟树吸水深度的变化有关。目前,尽管氢氧稳定同位素技术在森林生态系统水循环中的研究较为丰富,但大多是对植物吸水或耗水过程的单方面研究,没有将 2 个过程结合起来进行分析,同时对植物的吸水深度与耗水进行分析更能说明植物对水分的利用问题。

亚热带季风区受季风影响,全年降水分配不均,季节性干旱时发生的频率和危害程度都在持续增加^[18]。樟树喜温暖湿润气候,广泛分布于亚热带季风区。樟树对环境变化的响应十分敏感,以樟树为研究对象对于研究当地植物对环境变化的响应具有一定的典型性。植物水同位素特征能够综合反映树木水分利用状况,蒸腾可以反映树木生理生态特征,将樟树生理生态特征(蒸腾)与植物水同位素特征进行耦合研究,有利于更直观地发现樟树的水分来源与耗水特征。因此,本研究以长沙市的樟树为研究对象,基于 2017—2019 年樟树生长季(4—10 月)的茎干水、叶片水和土壤水稳定同位素和同期环境因子数据,结合 2019—2021 年樟树生长季的蒸腾速率,分析

了樟树植物同位素与蒸腾、环境因子之间的关系,探究了生长季樟树的吸水深度,对比了樟树在季节性干旱和降水事件前后樟树的吸水深度及蒸腾变化特征,旨在明确樟树的吸水和耗水规律,为当地水资源的合理利用和科学管理提供一定的参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于湖南省长沙市望城区八曲河村(28°22′09″N,112°45′43″E),平均海拔 50 m,该地位于典型的亚热带季风区,气候温和湿润,四季分明。多年平均气温 17.4 °C,年平均积温 5 457.0 °C。多年平均蒸发量为 902 mm,多年平均降水量为 1 447 mm,降水主要集中在 3—6 月,约占全年降水的 51.3%。每年的 7—9 月受副热带高压控制,雨日不足 20 天,易出现季节性干旱。样地的土壤类型以红壤为主,pH 在 6.0~7.0 范围内,粉粒占 70%以上,质地为粉砂质黏壤土。0—100 cm 土壤容重为 1.16~1.40 g/cm³,0—100 cm 土壤孔隙度大体上随土层深度增加而减小,其值为 47.2%~56.2%。样地的平均郁闭度在 0.8 以上,属于亚热带常绿阔叶林,其中 90%以上树种为樟树(*Cinnamomum camphora*),根系集中分布在 1 m 以内,85%的根系分布在浅层 0—40 cm 内,水平根系很发达,地下水深达 18 m,因此难以利用地下水。樟树平均树龄为 15 年,平均树高为 11 m,林地伴生有马尾松(*Pinus massoniana*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*)、桑树(*Morus allba*)等常绿乔木,地面草本植物稀少。在样地中选择 8 棵生长状况良好的樟树进行观测,样树的基本特征见表 1。

表 1 观测样树的基本特征

编号	树高/m	胸径/cm	边材	边材
			厚度/cm	面积/cm ²
ZS1	11	10.25	5.56	260.94
ZS2	12	10.79	5.95	292.10
ZS3	11	12.10	7.00	377.91
ZS4	11	10.98	6.09	303.69
ZS5	11	10.82	4.85	294.01
ZS6	11	9.55	4.45	224.17
ZS7	11	7.72	3.66	145.08
ZS8	9	9.39	4.39	216.35

1.2 樟树蒸腾及环境因子的测定

于 2019—2021 年 4—10 月采用美国 Dynamax 公司生产的热扩散式探针测定系统(TDP,Dynamax Inc3,Houston,USA)对样树的蒸腾速率进行观测。在每棵樟树高约 1.3 m 的韧皮部插入 2 组热扩散式探针,将探针根部及电缆线固定在树干上,并与 12 V 直流电的电源连接。其中上方探针用直流电进行持续加热,下方探针作为参考不加热;再用铝箔纸将探

针及周围的树干包裹好,防止雨水进入和太阳光直射。由于韧皮部水分运输的影响,2 组探针之间的温差发生变化,可以反映樟树的蒸腾速率。用数据采集仪(Delta-T data logger,Delta-T UK)自动记录 2 组探针间的温差,数据采集间隔为 10 s,且每 30 min 记录平均值。根据公式(1)^[19]推算出樟树的蒸腾速率。

$$E_c = 0.0119 \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T}{\Delta T} \right)^{1.231} \times \frac{A_s}{A_c} \quad (1)$$

式中: ΔT 为上下探针之间的瞬时温度差(°C); ΔT_{\max} 为蒸腾速率为零时上下探针间的瞬时温度差(°C); A_s 为樟树胸高处的边材面积(cm²); A_c 为樟树有效冠层投影面积(cm²); E_c 为单棵樟树的蒸腾速率(mm/h)。

土壤体积含水量和土壤温度采用布设在样地中心位置的云智能管式水分温度监测仪(RWET-100,中国)测定,仪器探头位于 0—100 cm 每隔 10 cm 处,监测精度分别为±2.5%,±0.5 °C,监测时间自 2017 年 2 月起,数据采集时间间隔为 1 h,土壤含水量数据利用烘干称重法进行校正。

气温(T)(°C)、相对湿度(RH)(%)、太阳辐射(R_s)(w/m²)、降水量(P)等气象数据采用安装在樟树林外 50 m 左右的开阔地上的微型自动气象站(WeatherHawk-232,USA)获取,每 30 min 采集 1 次数据。林地附近的饱和水汽压差(VPD)(kPa)根据监测的温度和相对湿度计算得到。

1.3 植物水与土壤水同位素样品采集

在 2017—2019 年的樟树生长季(4—10 月)采集植物和土壤样品。为避免降水干扰,样品采集一般集中在降水后 3~10 天进行,采样频率为每月 2~3 次,共 55 次。日内变化过程的取样(茎干水、叶片水)于典型无风晴日 2019 年 5 月 23—24 日和 2019 年 8 月 28—29 日进行,采样间隔为 2 h。

采集植物样品时,选择 3 棵长势良好的樟树作为固定样树,用于长期连续取样。采集枝条样品时,剪取冠层下部已木质化的小枝(直径 0.3~0.5 cm,长 4~6 cm),剪下枝条后迅速去皮装入 10 mL 玻璃瓶内;采集叶片样时,每次至少采集 3 个重复样,剪取不同方位的成熟叶片,并将其混合后迅速装入 10 mL 玻璃瓶中,再密封、编号、冷冻保存。土壤样品与植物样品采集同期进行,在样树附近利用手持式土壤取样钻机(科力 SD-1,北京吉奥科技有限公司)钻取土壤样,每次钻取 2 个平行土样。钻孔深度 130 cm,0—20 cm 取样间隔为 5 cm,20 cm 以下取样间隔为 10 cm。采集的土壤样品密封于 10 mL 的玻璃瓶中,用于测定土壤中稳定同位素比率。植物和土壤样品利用全自动真空冷凝抽提系统(LI-2100,LICA,中国)抽提出土

壤水,水分抽提率约 99%。

所有水样经过滤后均利用气—液两用型水稳定同位素分析仪(DLT-IWA-35EP,LGR,美国)测定氢、氧稳定同位素。测试的稳定同位素丰度用相对于维也纳标准平均海洋水(V-SMOW)稳定同位素比率的千分差值表示。

$$\delta_{\text{sample}} = (R_{\text{sample}}/R_{\text{V-SMOW}} - 1) \times 1000 \quad (2)$$

式中: R_{sample} 和 $R_{\text{V-SMOW}}$ 分别为水样和标准平均海洋水中稳定同位素比率($^2\text{H}/^1\text{H}$ 或 $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$)。 $\delta^2\text{H}$ 和 $\delta^{18}\text{O}$ 的测试精度分别为 $\pm 0.6\%$ 和 $\pm 0.2\%$ 。文中除土壤水稳定同位素的平均值为相应时段内土壤含水量的加权平均值外,其他所有要素的平均值均指时段内的算术平均值。由于植物水在抽提过程中存留有机物,而有机物中的甲醇和乙醇会引起光谱干扰,并造成被测定的植物茎杆水中稳定同位素值出现偏差,因此需对水需要进行校正,具体校正方法见文献[20]。

1.4 数据处理与分析

樟树的蒸腾速率采用 Baseline 4.0(Ram Oren, Duck University, USA)软件转化得到。

采用 Oringin 2018 软件中提供的 Peak 形式函数中的 Gauss 方程对樟树蒸腾速率与植物水同位素的日变化进行拟合并判别峰值时刻:

$$f(t) = y + \frac{A}{\omega \sqrt{\pi/2}} e^{-2(t-t_c)^2/\omega^2} \quad (3)$$

式中: $f(t)$ 为因变量 E_c 、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 的拟合函数; t 为时刻(0~24 h); t_c 为各变量达到峰值的时间; y 、 A 、 ω 均为方程参数。

直接对比法^[8]可以解释超过 80%的水分利用问题,即将各层土壤水与植物茎干水的同位素进行直接对比,对于与茎干水同位素值大致处于同一区域或存在部分交叉的土壤水,将其视为植物的利用水源,该土层深度为植物的吸水深度。本研究中生长期不同时段和不同生境中樟树的吸水深度判断采用直接对比法。

2 结果与分析

2.1 樟树蒸腾与同位素的季节变化

图 1 为 2017—2019 年生长季(4—10 月)樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 、土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 2019—2021 年生长季樟树蒸腾(E_c)的变化情况。叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 在生长季的变化范围为 -4.31% ~ 20.29% ,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 在整个生长季呈逐渐减小的趋势,生长季初期(4—5 月)、中期(6—8 月)、后期(9—10 月)的叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值分别为 12.05% 、 4.42% 和 3.00% 。茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化趋势与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 较为一致,但变化幅度相对较小,茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 在生长季初期、中期和后期的平均值分别为 -4.50% 、 -6.80% 和 -7.39% 。

0—40 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化幅度较大,具有明显的季节变化,从生长季初期到后期,0—40 cm 土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的平均值分别为 -4.34% 、 -8.14% 和 -8.93% 。由土壤表层到深层,土壤水同位素逐渐贫化,但 40 cm 以下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 没有明显的季节变化。樟树在生长季的蒸腾变化范围为 $0.01\sim 7.91$ mm,从生长季初期到后期蒸腾先增大后减小,对应的平均值分别为 2.95 、 4.37 、 2.02 mm,其中最大值出现在生长季中期,最小值出现在生长季后期。

综上,植物水同位素、浅层土壤水同位素以及蒸腾在生长季均存在明显的季节变化,叶片水同位素与蒸腾的变化存在差异,说明植物水同位素还受到其他因素的影响。

2.2 日尺度蒸腾与植物水同位素的关系

2.2.1 蒸腾与植物同位素的日变化 因为只在 2019 年对樟树蒸腾、植物水同位素和气象因子都进行了监测,所以选择 2019 年 5 月 23—24 日和 2019 年 8 月 28—29 日 2 个典型晴日进行研究。樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和蒸腾(E_c)在这 2 个典型晴日的日变化见图 2。在 5 月和 8 月典型晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化范围分别为 9.90% ~ 16.26% 和 -1.68% ~ 12.30% ,日蒸腾耗水量分别为 3.04 、 4.38 mm。 E_c 和叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈倒“U”形单峰曲线变化,其值均在白天高,夜间低。 E_c 明显提前于叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 到达峰值。基于实测数据,5 月和 8 月 E_c 与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的时滞分别约为 2 h 和 3 h。茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 5 月和 8 月典型晴日的变化范围分别为 -4.07% ~ -3.15% 和 -6.78% ~ -5.46% ,茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的整体波动较小,不呈正态分布,没有明显的峰值变化,其值在夜间高于日间。8 月典型晴日的茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 比 5 月典型晴日的茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 波动更大,说明 8 月典型晴日水分来源较复杂,而 5 月典型晴日水分来源相对稳定,这是因为在 8 月气候比较干旱,并且此时樟树处于蒸腾旺盛期,供水与需水之间的矛盾比较突出。

表 2 为用 Gauss 方程(公式 3)对典型晴日樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 E_c 日变化的拟合结果。从表 2 可以看出,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和 E_c 到达峰值的时刻,从而准确地计算出二者到达峰值的时滞(茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的日变化不是正态分布,且无明显峰值,无法用 Gauss 方程对其进行拟合)。在 5 月和 8 月的典型晴日, E_c 的变化特征符合 Gauss 方程变化规律($R^2 > 0.93$),在 5 月和 8 月的典型晴日 E_c 到达峰值的时间分别提前于叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 1.84 h 和 2.80 h,典型晴日 E_c 峰值平均提前于叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 2.32 h。典型晴日 E_c 与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 之间的时滞 在 8 月较 5 月大,一方面可能是因为研究区受季风影响,8 月气候干旱,叶片水同位素的富集程度和动力

分馏程度较 5 月小^[21];另一方面,可能是因为 8 月樟树的水分传导率受到土壤阻抗和樟树体内阻抗的限

制,土壤水分无法及时补给水分消耗,樟树气孔导度比 5 月提前关闭,导致 E_c 峰值提前。

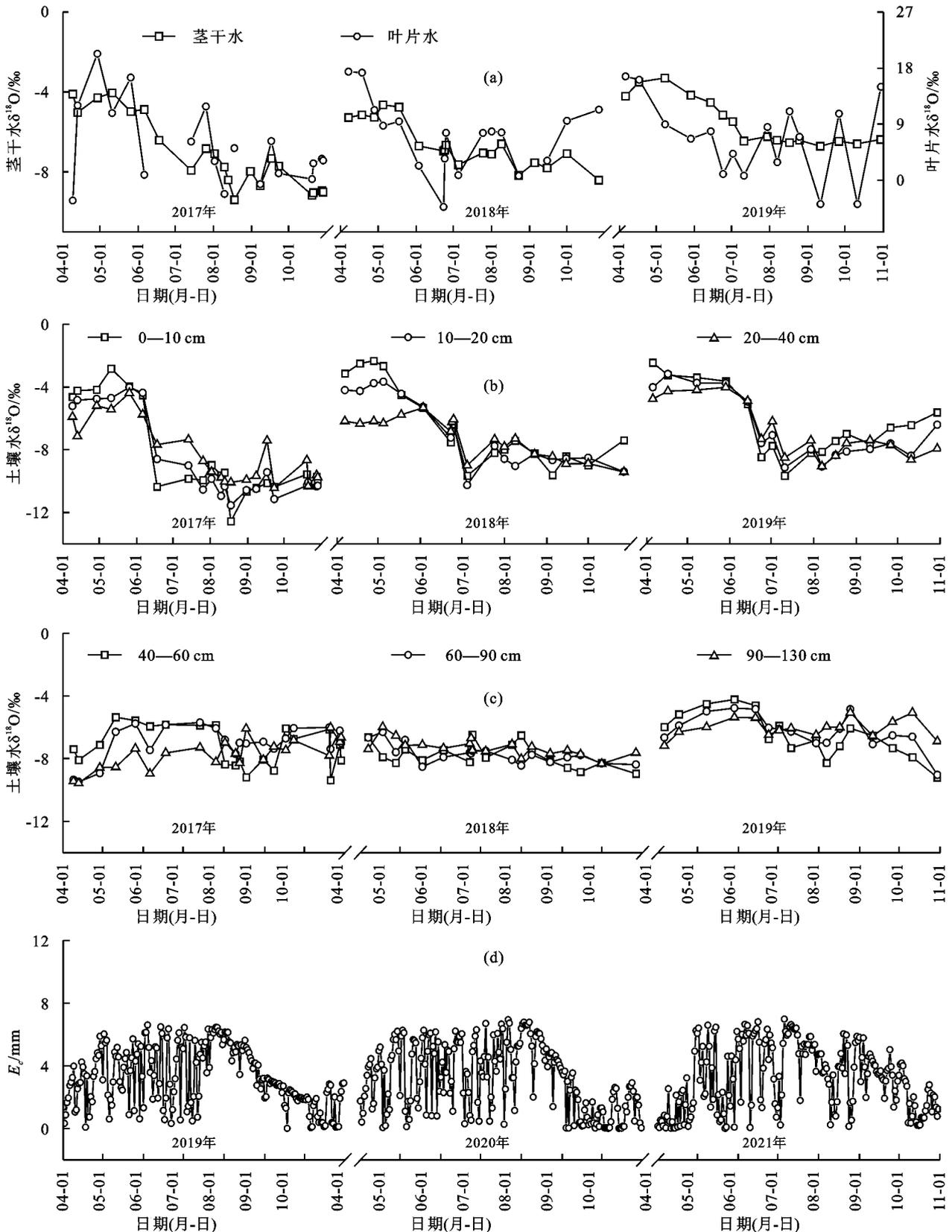


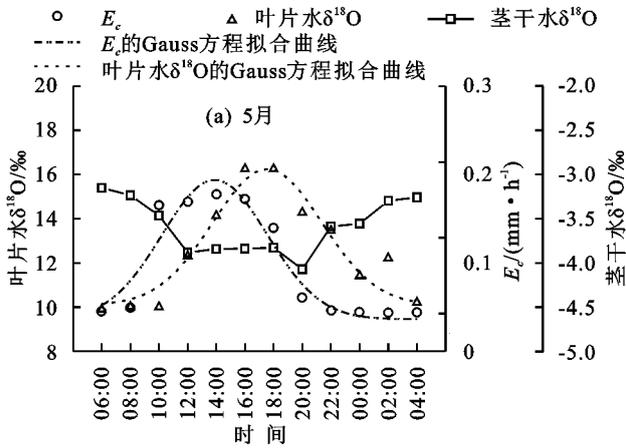
图 1 蒸腾(2019—2021 年)与同位素(2017—2019 年)在樟树生长季(4—10 月)的季节变化

2.2.2 樟树植物水同位素与影响因子之间的关系

就对 2019 年 5 月和 8 月典型晴日的樟树植物水 $\delta^{18}O$ 与温度(T)、饱和水汽压差(VPD)和蒸腾(E_c)之间的关系

进行函数估算发现,二次函数拟合效果最好(图 3)。就叶片水而言,在 5 月和 8 月典型晴日叶片水 $\delta^{18}O$ 与影响因子(T 、 RH 、 VPD 和 E_c)之间有很好的二次函数关系

($R^2 > 0.62$)。在典型晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 T 、VPD、 E_c 呈正相关,与 RH 呈负相关。在 5 月典型晴日函数的斜率随 T 、VPD 和 E_c 的增加而增大,随 RH 的增加逐渐减小后趋于 0;在 8 月典型晴日函数的斜率随 T 、VPD 和 E_c 的增加逐渐减小后趋于 0,随 RH 的增加逐渐增大。



表明在樟树未受到环境胁迫时,高温、高 VPD 和湿润的环境有助于樟树进行蒸腾作用。蒸腾时较轻的水分子优先逸出叶片,导致叶片水同位素富集^[22]。但在环境胁迫的情况下樟树减小甚至关闭气孔(表现为函数的斜率趋于 0),使叶片水同位素的富集速度减慢。

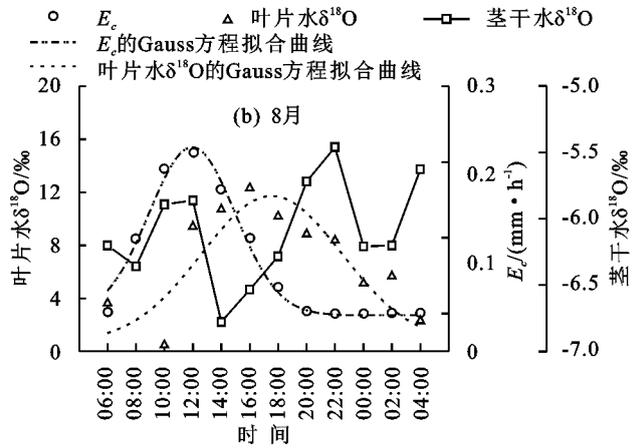


图 2 2019 年 5 月和 8 月典型晴日蒸腾、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 、茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的日变化

表 2 2019 年 5 月和 8 月典型晴日蒸腾与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 日变化的 Gauss 拟合

变量	5 月典型晴日					8 月典型晴日				
	y	t_c	w	A	R^2	y	t_c	w	A	R^2
E_c	-0.01	4.94	3.69	0.83	0.91	-0.01	3.97	3.04	0.84	0.98
叶片水 $\delta^{18}\text{O}$	10.09	6.78	3.82	29.39	0.92	0.68	6.77	4.93	68.17	0.73

就茎干水而言,二次函数能较好地说明 5 月典型晴日茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与影响因子(T 、 RH 、VPD 和 E_c)之间的关系($R^2 > 0.59$)。茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 T 、VPD 正相关,与 RH 、 E_c 负相关。这是因为茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 随根系吸收的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 的变化而变化,此时樟树主要利用浅层土壤水,当 T 、VPD 增加的时候,土壤蒸发增强,浅层土壤水同位素逐渐富集,则茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 随之增大;而当 RH 增加时,浅层土壤水同位素贫化,则茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 随之减小。在 8 月典型晴日茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 T 、VPD、 RH 和 E_c 之间没有明显的二次函数关系,这可能是因为 8 月樟树处于季节性干旱时期,土壤水分决定植物的水分利用深度, T 、VPD、 RH 和 E_c 不是樟树水分利用来源的主导影响因素。

2.3 生长季樟树吸水深度的变化特征

由图 4 可知,在生长季初期(4—5 月),茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 主要与 20—40 cm 的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 接近,生长季中期(6—8 月)茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 50 cm 以下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 接近,生长季后期(9—10 月)茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与 20 cm 以上和 90 cm 以下的土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 接近。生长季初期樟树处于新老叶交替的更新阶段,能够进行蒸腾作用的成熟叶片较少,所以樟树蒸腾耗水量较少。浅层土壤水可以满足樟树生长需要,樟树主要吸收 20—40 cm 根系密集分布区的土壤水。生长季中期是樟树的生长旺盛期,樟树蒸腾耗水量增多导致根

系—土壤水势逐渐增加^[23],樟树的吸水深度为 50—70,90—130 cm,相较于生长季初期的吸水深度有所下降。在生长季后期,樟树的蒸腾作用减弱,所以需水量相对于生长旺盛期减少。此时环境中的温度降低,土壤蒸发作用减弱,浅层土壤水得到一定恢复。但由于降水量不充沛,浅层土壤水分不足以补充樟树生长所需的耗水量,樟树仍旧需要利用一部分深层土壤水。此时樟树主要利用 10—20,90—120 cm 的土壤水。相较于生长季中期,生长季后期樟树的吸水深度有所上升,这可能与樟树的根系活性减弱有关。

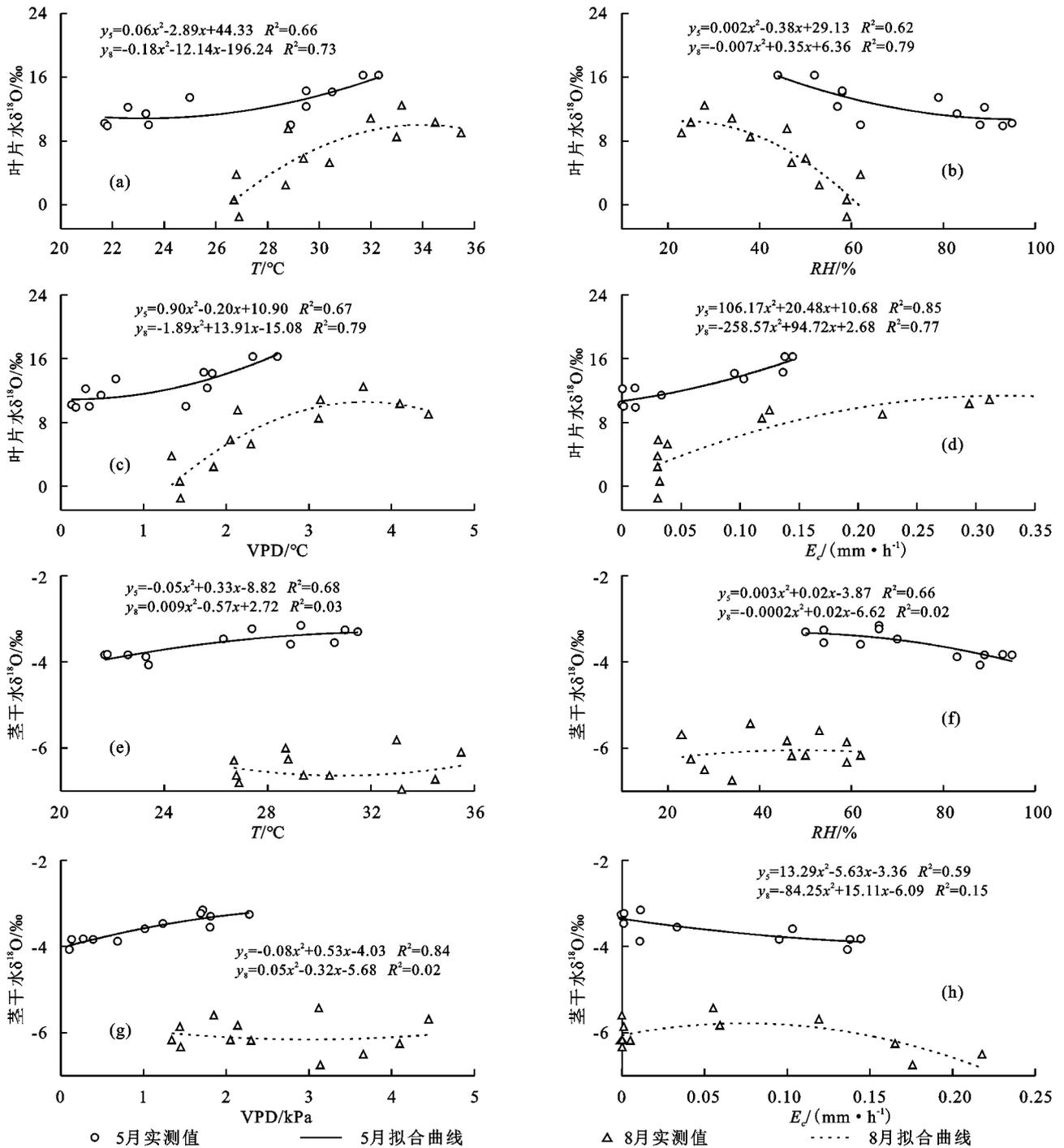
由此可以发现,樟树的吸水深度随着蒸腾作用的变化呈现出明显的季节变化特征,即生长季初期樟树的吸水深度较浅,范围较小,中后期樟树的吸水深度加深,吸水范围增加。

2.4 不同生境中樟树的水分利用特征

2.4.1 干旱条件下樟树的用水策略 2019 年 7—9 月长沙发生季节性干旱,降水主要集中在 7 月 13 日之前,选取 7 月 11 日、7 月 30 日、8 月 17 日和 8 月 25 日这 4 个无降水日,分析樟树的吸水深度以及樟树的蒸腾变化特征(图 5)。由于前期降水丰沛,樟树在 7 月 11 日并未遭受干旱胁迫,土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 变化曲线在 60—80 cm 土层出现 1 个拐点,7 月 30 日、8 月 17 日和 8 月 25 日 0—130 cm 土层范围内土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈“S”形变化,并且随着干旱的持续,垂直分布上的“S”

形曲线越发明显。干旱发生后,土壤水同位素逐渐富

集,且变幅越来越大。



注: y_5 表示 5 月植物 $\delta^{18}O$; y_8 表示 8 月植物 $\delta^{18}O$; x 表示影响因子。

图 3 2019 年 5 月和 8 月典型晴日叶片水 $\delta^{18}O$ 和茎干水 $\delta^{18}O$ 与影响因子之间的函数关系

监测表明,樟树蒸腾的峰值在干旱期间急剧下降,4 个观测日蒸腾速率的峰值分别为 0.19, 0.14, 0.04, 0.03 mm/h, 相应地,整日耗水量逐渐减小,4 个观测日的耗水量分别为 2.79, 2.09, 0.29, 0.21 mm; 且蒸腾的日变化曲线宽度也随着干旱的加剧逐渐变窄。这是因为高温干旱条件下, 较低的土壤含水量不能满足樟树的形成层细胞生长所需的条件^[24], 樟树蒸腾启动时间延后, 结束时间提前。

在未发生干旱的 7 月 11 日, 樟树的吸水深度为

70—80 cm; 在干旱前期的 7 月 30 日, 樟树利用深层土壤水来维持较强的蒸腾作用, 吸水深度为 120—130 cm; 在干旱中期的 8 月 17 日, 深层土壤水已不足以维持蒸腾耗水, 樟树的吸水层位增加, 除了利用 100—120 cm 的土壤水, 还利用 60—70 cm 的土壤水; 在干旱后期的 8 月 25 日樟树的吸水深度已转为 50—60 cm。对比各时期樟树的吸水深度可以发现, 干旱发生后, 樟树的吸水深度先逐渐加深后逐渐转向浅层。

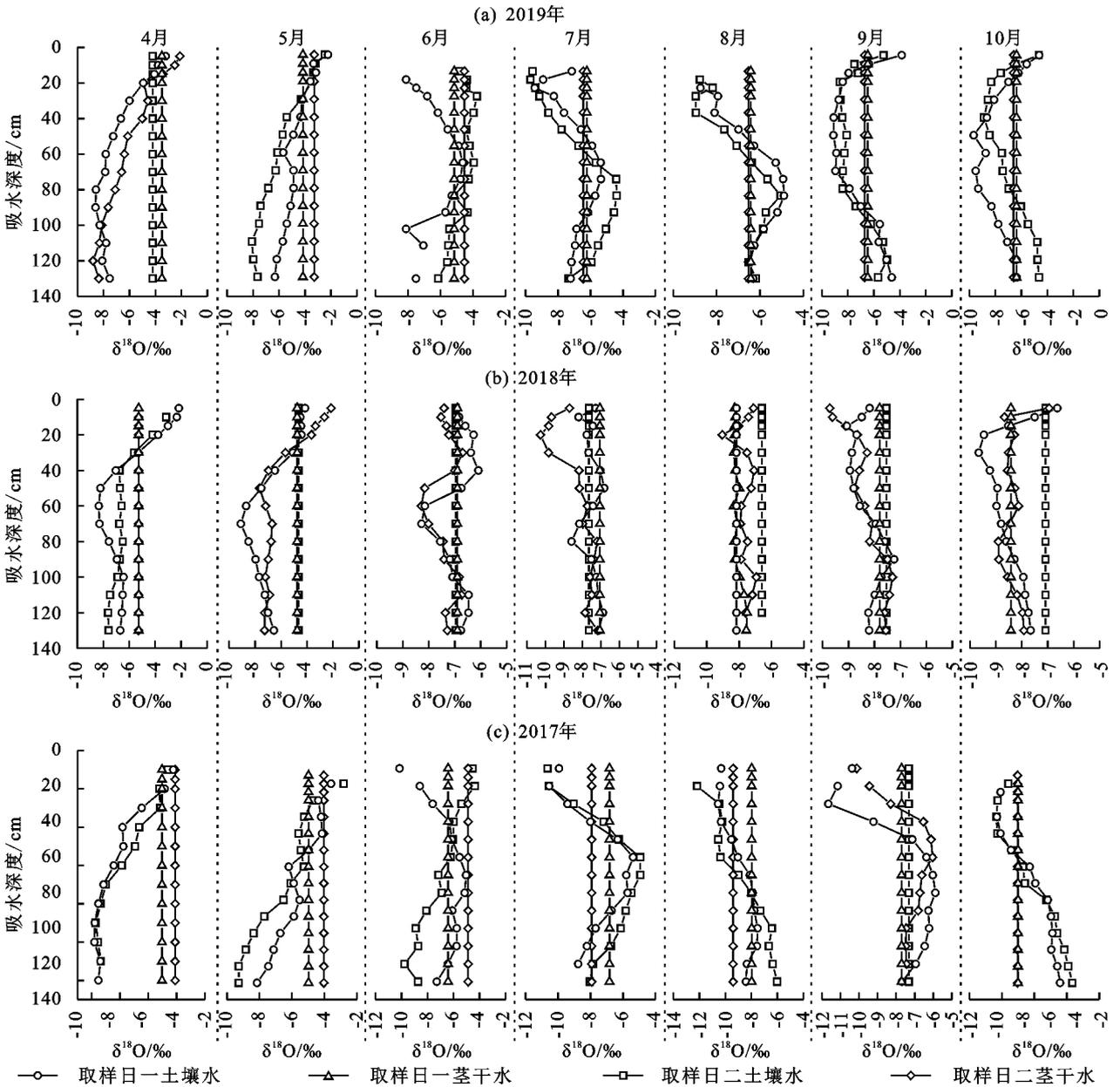


图 4 2019 年、2018 年、2017 年樟树吸水深度的季节变化

2.4.2 降水条件下樟树的用水策略 为了分析在降水条件下樟树对土壤水分的利用特征以及蒸腾耗水对降水的响应,选取 2019 年 6 月 16—23 日(163.6 mm)和 7 月 4—9 日(104.4 mm)的 2 次降水事件,图 6 分别为降水前(6 月 14 日和 7 月 2 日)与降水后(6 月 24 日和 7 月 11 日)土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 与茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的比较以及降水前后樟树蒸腾速率(E_c)的比较。

降水事件发生前的蒸发作用使浅层土壤水同位素较深层土壤水同位素富集;降水发生后,表层土壤水受到降水的补给,土壤水同位素贫化,随土层加深土壤水同位素逐渐富集后又逐渐贫化。2 次降水事件发生后,茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 均较降水前减小,说明降水事件导致樟树的吸水深度发生变化。6 月 14 日,樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 60、90 cm 附近有交

点,说明此次降水前樟树主要利用 60—90 cm 土层的土壤水;6 月 24 日,樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 50、70 cm 附近有交点,说明樟树此时利用 50—70 cm 土层的土壤水。7 月 2 日,樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 80、110 cm 附近有交点,说明樟树此时主要利用 80—110 cm 土层的土壤水;7 月 11 日,樟树茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与土壤水 $\delta^{18}\text{O}$ 在 70、80 cm 附近有交点,说明樟树此时利用 70—80 cm 土层的土壤水。 E_c 的峰值由 6 月 14 日的 0.24 mm/h 上升为 6 月 24 日 0.28 mm/h,由 7 月 2 日的 0.26 mm/h 上升为 7 月 11 日的 0.33 mm/h,蒸腾耗水量分别增加 25.5% 和 64.4%。

3 讨论

樟树的吸水深度对季节性干旱事件和降水事件

的响应比较敏感。对比上文中 2 次降水事件前后樟树的吸水深度可以发现,降水后樟树的吸水深度较降水前上移,并且降水后樟树对土壤水的利用区域较降水前变窄。这是因为降水前长期的蒸发作用使浅层土壤含水量减少,所以樟树为了获得足够多水分,吸

水深度逐渐下移,并且吸水土层较宽;降水后,由于浅层土壤水分的增加,樟树的吸水深度上移,且较小范围土层内的土壤水分即可以满足樟树的耗水需求,所以樟树的水分利用区域变窄。降水后土壤水分的改善使蒸腾耗水量显著提高。

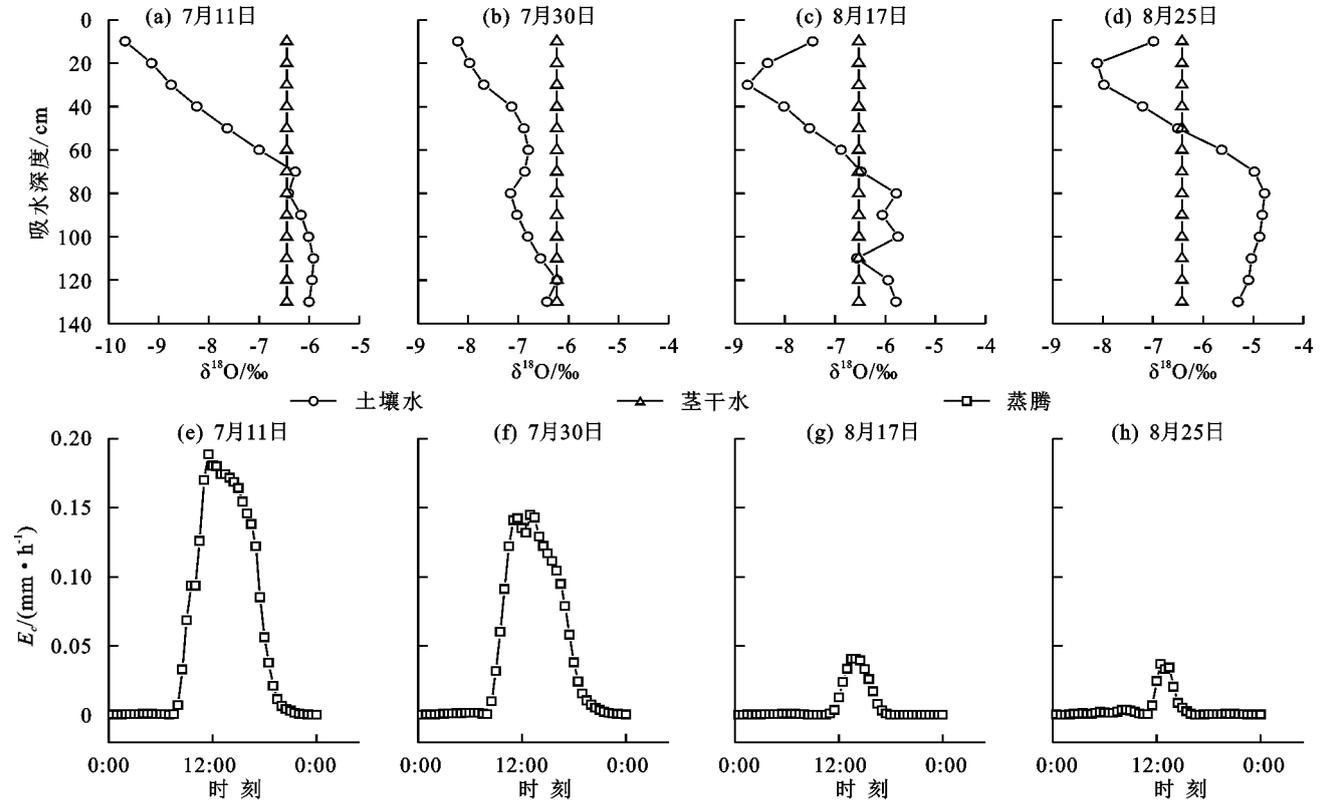


图 5 2019 年干旱期樟树的吸水深度和蒸腾的变化

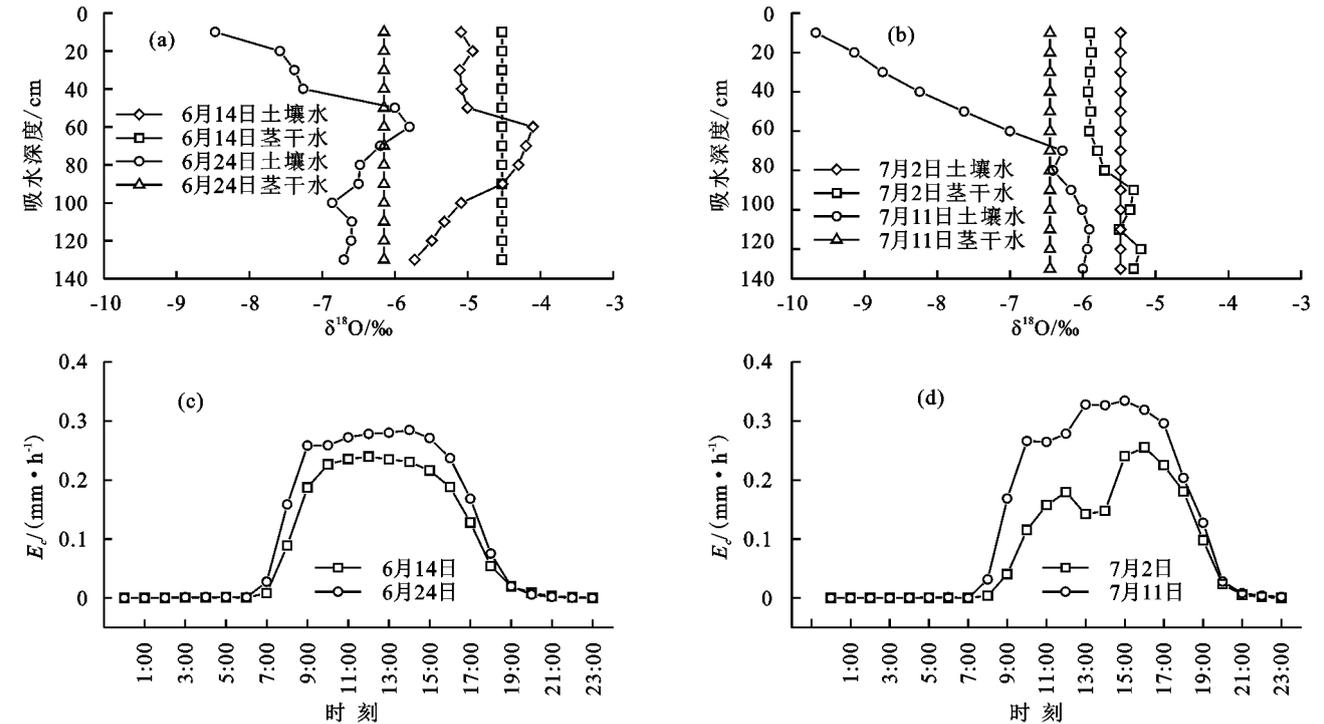


图 6 2019 年降水前后樟树吸水深度及蒸腾的变化

另外,土壤与植物根系之间的水势梯度随着干旱的持续逐渐增大,当水势梯度达到植物生长的安全阈

值时,植物减小甚至关闭气孔避免“空穴化”^[25]。这样的避旱机制使得植物的水分消耗相对减少,这也从

蒸腾速率在干旱加剧的条件下逐渐减小中体现出来(图 5)。一般情况下,干旱期间植物的吸水深度随着土壤中可利用水分的减少而加深,但本研究中,樟树的吸水深度在季节性干旱后期却逐渐上移。Munoz—Villers 等^[26]也发现,随着干旱的持续,植物对浅层土壤水的利用比例增加。这可能有 2 个原因:一方面是因为植物根系对土壤水分的吸收与土壤养分有关^[27],较高的养分能够促进植物根系对土壤水分的吸收利用^[28]。由于枯枝落叶物的存在,浅层土壤中养分相对较多,所以浅层根系更容易获取这部分养分以维持较弱的生理活动。另一方面,由于浅层根系较深层根系分布相对密集,并且随着深层土壤水分的消耗殆尽,植物深层根系的活性远不如浅层根系,所以在持续干旱期间浅层根系汲取土壤水分时比深层根系消耗更少的能量^[29]。因为土壤水分的相对贡献与植物自身的绝对利用量可能不一致,所以将植物的吸水深度与蒸腾耗水结合起来更能说明问题。最终,环境条件的改变以及植物生理性的变化导致植物的吸水深度变化,进而表现为蒸腾作用的变化。

4 结论

(1)日尺度上,蒸腾速率、叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 呈倒“U”形曲线变化,蒸腾速率与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 白天高,夜间低;茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 在小范围内波动,茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 白天低,夜间高。典型晴日蒸腾与叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 的时滞在 8 月较 5 月大,平均时滞为 2.32 h。

(2)在 5 月晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 和茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与主要影响因子(温度、相对湿度、饱和水汽压差和蒸腾)之间均呈二次函数关系;在 8 月晴日,叶片水 $\delta^{18}\text{O}$ 与上述因子之间呈二次函数关系,但茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 与上述影响因子之间没有明显的函数关系,说明此时这些影响因子并不是茎干水 $\delta^{18}\text{O}$ 的主导影响因子。

(3)樟树的吸水深度具有明显的季节变化特征,生长季初期(4—5 月)樟树的吸水层位单一,主要利用 20—40 cm 浅层土壤水;在生长季中期(6—8 月)和生长季后期(9—10 月)樟树有 2 个吸水层位,樟树在中期主要利用 50 cm 以下的中深层(50—70, 90—130 cm)土壤水,在后期主要利用浅层(10—20 cm)和深层(90—120 cm)土壤水。

(4)樟树的吸水深度以及蒸腾耗水随着环境的变化而变化。干旱发生时,随着干旱的持续,樟树蒸腾耗水量逐渐减小,樟树的吸水深度由浅变深再变浅。樟树的蒸腾作用在降水后增强,吸水深度较降水前变浅,并且吸水范围变窄。

参考文献:

- [1] 邓文平,章洁,张志坚,等.北京土石山区水分在土壤—植物—大气连续体(SPAC)中的稳定同位素特征[J].应用生态学报,2017,28(7):2171-2178.
- [2] Schlaepfer D R, Bradford J B, Lauenroth W K, et al. Climate change reduces extent of temperate drylands and intensifies drought in deep soils[J].Nature Communications,2017,8(1):1-9.
- [3] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, et al. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau[J].Agricultural and Forest Meteorology,2015,209/210:87-99.
- [4] Wang J, Fu B J, Lu N, et al. Water use characteristics of native and exotic shrub species in the semi-arid Loess Plateau using an isotope technique[J].Agriculture, Ecosystems and Environment,2019,276:55-63.
- [5] 邓文平,章洁,张志坚,等.北京土石山区水分在土壤—植物—大气连续体(SPAC)中的稳定同位素特征[J].应用生态学报,2017,28(7):2171-2178.
- [6] 罗伦,余武生,万诗敏,等.植物叶片水稳定同位素研究进展[J].生态学报,2013,33(4):1031-1041.
- [7] 李龙,唐常源,曹英杰.亚热带地区常绿阔叶林 SPAC 系统水分的氢氧稳定同位素特征[J].应用生态学报,2020,31(9):2875-2884.
- [8] 邓文平.北京山区典型树种水分利用机制研究[D].北京:北京林业大学,2015.
- [9] Brunel J, Walker G R, Kennett-Smith A K. Field validation of isotopic procedures for determining sources of water used by plants in a semi-arid environment[J].Journal of Hydrology,1995,167(1):351-368.
- [10] 李荣磊,黄来明,裴艳武,等.毛乌素沙地圪丑沟小流域沙柳水分利用来源研究[J].水土保持学报,2021,35(2):122-130.
- [11] 苏文旭,贾德彬,冯蕴,等.浑善达克沙地杨树水分利用特征[J].干旱区研究,2020,37(2):357-363.
- [12] 王欣,贾国栋,邓文平,等.季节性干旱地区典型树种长期水分利用特征与模式[J].应用生态学报,2021,32(6):1943-1950.
- [13] Grossiord C, Sevanto S, Dawson T E, et al. Warming combined with more extreme precipitation regimes modifies the water sources used by trees[J].New Phytologist,2016,213:584-596.
- [14] 王锐,章新平,戴军杰,等.亚热带湿润区樟树吸水的土层来源及研究方法对比[J].水土保持学报,2020,34(5):267-276.
- [15] 王锐,章新平,戴军杰,等.亚热带典型植物水分利用来源变化的水稳定同位素分析[J].水土保持学报,2020,

- 34(1):202-209.
- [16] Luo Z D, Guan H D, Zhang X P, et al. Responses of plant water use to a severe summer drought for two subtropical tree species in the central southern China [J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 8:1-9.
- [17] 夏银华,章新平,戴军杰,等.亚热带季风区樟树树干液流对降水的响应[J]. *水土保持研究*, 2021, 28(6):144-152, 161.
- [18] 戴军杰,章新平,吕殿青,等.南方红壤丘陵区樟树林土壤水分动态变化[J]. *水土保持研究*, 2019, 26(4):123-131.
- [19] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements [J]. *Tree Physiology*, 1987, 3(4):309-320.
- [20] 刘文茹,彭新华,沈业杰,等.激光同位素分析仪测定液态水的氢氧同位素及其光谱污染修正[J]. *生态学杂志*, 2013, 32(5):1181-1186.
- [21] 王锐,章新平,戴军杰,等.亚热带针阔混交林土壤—植物—大气连续体(SPAC)中水稳定同位素特征[J]. *生态环境学报*, 2021, 30(6):1148-1157.
- [22] Bögelein R, Thomas F M, Kajmen A, et al. Leaf water ^{18}O and ^2H enrichment along vertical canopy profiles in a broadleaved and a conifer forest tree [J]. *Plant, Cell and Environment*, 2017, 40:1086-1103.
- [23] 罗紫东.洞庭湖流域部分常见树种的光合作用和水分利用研究[D].长沙:湖南师范大学, 2016.
- [24] 吴丽杰, Arisa K, 付培立, 等.热带季节性湿润林苦楝 (*Melia azedarach*) 径向生长季节动态及其对环境因子的响应[J]. *生态学报*, 2020, 40(19):6831-6840.
- [25] 金鹰,王传宽,周正虎.木本植物木质部栓塞修复机制:研究进展与问题[J]. *植物生态学报*, 2016, 40(8):834-846.
- [26] Munoz-Villers L E, Holwerda F, Alvarado-Barrientos M S, et al. Reduced dry season transpiration is coupled with shallow soil water use in tropical montane forest trees [J]. *Oecologia*, 2018, 188(1):303-317.
- [27] Amin A, Zuecco G, Geris J, et al. Depth distribution of soil water sourced by plants at the global scale: A new direct inference approach [J]. *Ecohydrology*, 2020, 13:e2177.
- [28] Goldsmith G R, Muñoz-Villers L E, Holwerda F, et al. Stable isotopes reveal linkages among ecohydrological processes in a seasonally dry tropical montane cloud forest [J]. *Ecohydrology*, 2012, 5:779-790.
- [29] 赵西宁,李楠,高晓东,等.基于 ^{18}O 示踪的不同树龄枣树土壤水分利用特征分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(3):135-142.
- (上接第194页)
- [15] Wang B, Zhang G H, Yang Y F, et al. Response of soil detachment capacity to plant root and soil properties in typical grasslands on the Loess Plateau [J]. *Agriculture Ecosystems and Environment*, 2018, 266:68-75.
- [16] Li T Y, Li S Y, Liang C, et al. Erosion vulnerability of sandy clay loam soil in Southwest China: Modeling soil detachment capacity by flume simulation [J]. *Catena*, 2019, 178:90-99.
- [17] Zhu X L, Fu S H, Wu Q Y, et al. Soil detachment capacity of shallow overland flow in Earth-Rocky Mountain Area of Southwest China [J]. *Geoderma*, 2020, 361:e114021.
- [18] Horton R E, Leach H R, Vliet R V. Laminar sheet-flow [J]. *Transactions American Geophysical Union*, 1934, 15(2):393-404.
- [19] 曹颖,张光辉,唐科明,等.地表覆盖对坡面流速影响的模拟试验[J]. *山地学报*, 2011, 29(6):654-659.
- [20] 张光辉.冲刷时间对土壤分离速率定量影响的实验模拟[J]. *水土保持学报*, 2002, 16(2):1-4.
- [21] 郭继成,张科利,董建志,等.西南地区黄壤坡面径流冲刷过程研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(6):1102-1108.
- [22] 柳玉梅,张光辉,李丽娟,等.坡面流水动力学参数对土壤分离能力的定量影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6):96-99.
- [23] Sirjani E, Mahmoodabadi M. Study on flow erosivity indicators for predicting soil detachment rate at low slopes [J]. *International Journal of Agricultural Science Research and Technology*, 2012, 2(2):55-60.
- [24] 张光辉,刘宝元,张科利.坡面径流分离土壤的水动力学实验研究[J]. *土壤学报*, 2002, 39(4):882-886.