

滩地杨树人工林皆伐后蒸发散与产流变化*

高升华¹, 汤玉喜², 唐洁², 唐学君^{1,3},
田甜¹, 易洪波⁴, 陈筑衢⁴, 张旭东^{1**}

(1. 国家林业局林木培育重点实验室, 林木遗传育种国家重点实验室, 中国林业科学研究院林业研究所, 北京 100091;

2. 湖南省林业科学院, 湖南长沙 410004; 3. 国家林业局华东林业调查规划设计院, 浙江杭州 310019;

4. 岳阳市君山区林业局, 湖南岳阳 414000)

摘要: [目的] 揭示杨树人工林皆伐对滩地蒸发散和产流的影响。 [方法] 基于涡度相关系统对长江滩地杨树人工林皆伐前后水汽通量连续3年(2010—2012年)的观测数据, 通过对比皆伐前、后气候条件相似的2个时段(1整年)的蒸发散, 揭示皆伐后研究区蒸发散的变化, 并基于水量平衡反推研究区产流的变化。 [结果] 皆伐后土壤温度和水位上升, 土壤表层含水量全年均值减小约0.03; 研究区蒸发散皆伐前、后具有相似的日变化规律和季节动态特征, 但皆伐后的全年蒸散量仅为皆伐前的66.3%; 皆伐后研究区产流率(产流量/降雨量)从皆伐前的0.53上升至0.62; 皆伐前、后7、8、12月的干旱指数(潜在蒸发散/降雨量)均大于1, 其他时期均小于1。 [结论] 滩地杨树人工林皆伐后滩地蒸发散减少而产流率增加, 加剧夏季干旱的可能性有所降低, 但洪水爆发期间削减洪峰的能力也减弱。

关键词: 杨树人工林; 长江滩地; 皆伐; 蒸发散; 涡度相关; 产流

中图分类号: S715

文献标识码: A

文章编号: 1001-1498(2017)03-0486-08

Variations of Evapotranspiration and Water Yield in a Post-clearcutting Riparian Poplar Plantation

GAO Sheng-hua¹, TANG Yu-xi², TANG Jie², TANG Xue-jun^{1,3}, TIAN Tian¹,
YI Hong-bo⁴, CHEN Zhu-qu⁴, ZHANG Xu-dong¹

(1. Key laboratory of Tree Breeding and Cultivation, State Forestry Administration; State Key Laboratory of Tree Genetics and Breeding;

Research Institute of Forestry, Chinese Academy of Forestry, Beijing 100091, China; 2. Hu'nan Academy of Forestry,

Changsha 410004, Hu'nan, China; 3. East China Forest Inventory and Planning Institute, State Forestry Administration,

Hangzhou 310019, Zhejiang, China; 4. Junshan Forestry Bureau of Yueyang City, Yueyang 414000, Hu'nan, China)

Abstract: [Objective] To reveal the effects of clearcutting a poplar plantation at the floodplain of Yangtze River on evapotranspiration (ET) and water yield (WY). [Method] Based on 3-years' consecutive observation data of water vapor flux from a poplar plantation on the floodplain of Yangtze River during the years before and after clearcutting by eddy covariance system, the variation of ET post-clearcutting was investigated by comparing the ETs in two periods (a whole year before and after clearcutting, respectively) with similar weather conditions. Then the variation of WY post-clearcutting was calculated by water balance. [Result] (1) After clearcutting, both soil temperature and ground water level increased obviously while the soil water content decreased by about 0.03. (2) The ETs before and post clearcutting had the similar seasonal and diurnal dynamics; Nevertheless, the annual ET post-clearcutting

收稿日期: 2015-06-29

基金项目: 国家科技支撑课题“长江防护林质量调控与高效经营技术研究与示范(2015BAD07B04)”和“生态经济型血防林构建技术研究与示范(2015BAD07B07)”

作者简介: 高升华, 男, 中国林业科学研究院林业研究所, 助理研究员. 研究方向: 林业生态工程与技术. E-mail: shenghua1128@yeah.net

* 感谢盛炜彤先生和徐梅卿先生对论文提出的宝贵意见!

** 通讯作者: 张旭东, 研究员, 博士生导师. E-mail: zhxdcaf@163.com

was only 66.3% of that before clearcutting. (3) The WY ratio (WY/precipitation) increased from 0.53 to 0.62 after clearcutting. (4) The dryness index (potential ET /precipitation) was larger than 1 in July, August, and December, while less than 1 in other months in both before and post clearcutting period. [**Conclusion**] Clearcutting a poplar plantation on the floodplain of Yangtze River leads to a decrease of ET and an increase of WY ratio. As a result, it is less likely to intensify regional drought in summer, but the capacity of the floodplain for flood peak clipping during flooding would also decline.

Keywords: poplar plantation; floodplain of Yangtze River; clearcutting; evapotranspiration; eddy covariance; water yield

森林植被对径流的影响是森林水文学研究中争论的焦点^[1]。尽管经历了上百年的研究,森林植被变化对流域径流的影响至今仍未达成共识。最新研究表明,森林植被对径流的影响因流域水资源状况和流域特征(如面积、坡度、地表覆盖等)的不同而不同^[2];而人工林与天然林结构有很大差异,因而其水文效应与天然林也有巨大不同,因此,以天然林的研究结论来指导人工造林或恢复是不可取的^[3]。目前,我国人工林面积已占全国森林总面积的1/3^[4],且人工林采伐与更新的频率远高于天然林;然而,目前关于人工林采伐与更新对流域水文过程影响的研究十分不足,从而限制了对我国林业生态工程水文效应的评估和人工林科学经营管理方案的制定。

蒸发散(ET)是森林生态系统水量平衡的重要组成部分,它占流域森林生态系统水分输出的40%~90%^[3,6];然而,在传统的森林水文研究中,蒸发散往往仅作为降雨、径流和土壤储藏量的余项进行估算^[6,7],而缺乏直接观测,这大大增加了森林水文效益研究的不确定性,也使蒸发散成为生态水文系统中最亟待研究的部分^[8]。准确测算林地蒸发散的时空变化,对揭示森林影响径流的机理、开发流域水文模型和制定森林经营管理方案具有十分重要的意义^[9]。近20年,涡度相关技术越来越多地被用于生态系统蒸发散的直接观测,而对人工林采伐前后的蒸发散观测却很少。

杨树是我国主要的造林树种之一^[5,10],由于具有较短的轮伐期和较强的环境适应能力而被广泛用于长江中下游速生丰产林、滩地抑螺防病林和防护林的营建^[11-13]。杨树人工林轮伐期一般10年左右,其采伐频率远高于杉木、马尾松等造林树种的人工林;然而,杨树人工林采伐更新对区域耗水和产流的影响尚未被揭示,使得难以准确评估长江中下游地区大面积营建杨树人工林所产生的区域水文效应。本研究基于涡度相关法对滩地杨树人工林皆伐

前后生态系统蒸发散进行连续观测研究,旨在验证以下假设:(1)滩地杨树人工林皆伐后生态系统蒸发散减少;(2)杨树人工林皆伐后滩地产流率增加。

1 研究区概况

研究区位于湖南省岳阳市君山区长江外滩(29°31'35" N, 112°55'22" E),海拔31 m,系中亚热带向北亚热带过渡的气候区,具有典型的季风气候特征,春夏多雨,秋季多旱,冬季寒冷,全年盛行北风。长期年均气温16.8℃,年均降水量1400 mm。土壤类型为江湖洲滩特有的潮土类型。

研究区面积60 hm²,呈南北向楔形,其中,东西向宽约800 m,南北长约1500 m^[14],地势较平整。伐前林分营造于2000年,树种为美洲黑杨(*Populus deltoides* Marsh)。该林分于2011年9月全部皆伐,皆伐前平均树高19.5 m,胸径23 cm,郁闭度达0.85,林下优势种为益母草(*Leonurus artemisia* (Laur.) S. Y. Hu),其盖度达90%以上。新林于2012年2月初种植完成,树种仍为美洲黑杨,平均苗高3.5 m,胸径2.5 cm。2011年7月—2012年8月,林下植被主要有狗牙根(*Cynodon dactylon* (L.) Pers.)、堇菜(*Viola verecunda* A. Gray)、辣蓼(*Polygonum flaccidum* L.)、风轮菜(*Clinopodium chinense* (Benth.) O. Ktze.)等。2010年淹水55 d(2010年6月28日—8月21日),最大淹水深度2.8 m;2012年淹水40 d(2012年7月11日—8月20日),最大淹水深度2.90 m;2011年未淹水。林地地表水随长江洪水退却而通过径流方式退出林地,2次退水后林地草本植物全部枯蔫并贴服地面。

2 研究方法

研究区建有30 m通量观测塔1座,以CSAT-3三维风速仪(Campbell Scientific, Inc., USA)和LI-COR 7500 CO₂/H₂O分析仪(LI-COR, Inc., USA)分

别观测三维风速和 CO_2 /水汽浓度。观测高度根据冠层高度进行调整,一般高于冠层高度 2~3 m。采伐前观测高度为 21.0 m;于 2011 年 7 月 4 日调整至 3.5 m,此时通量塔以南的所有树木和通量塔的其他 3 个方向 50 m 以内的所有树木均皆伐完;2012 年 3 月后观测高度为 6.5 m。环境因子观测包括地面以上部分和地面以下部分,主要包括辐射、降雨、空气温湿度、土壤温度、土壤含水量、地下水位等^[15]。其中,采用 TE525 雨量桶 (Campbell Scientific, Inc., USA) 观测降雨量,采用 2 个 CS616 土壤含水量传感器 (Campbell Scientific, Inc., USA) 观测土壤 15 cm 深处的土壤体积含水量 (VWC, %),用 HOBO 自记式水位温度记录仪 (Onset Computer Corporation, USA) 观测水位 (WT, m)。

研究期间,在常规样地调查的基础上,以中分辨率卫星遥感 (MODIS NDVI) 对植被进行动态监测,所用数据集为 MYD13Q1,其时间和空间分辨率分别为 16 d 和 250 m。数据来源于美国地质调查网站 (<http://www.usgs.gov/>)。

采用 EdiRe 软件 (version 1.5.0.32; Robert Clement, University of Edinburgh, Edinburgh, UK; <http://www.geos.ed.ac.uk/abs/research/micromet/EdiRe/>) 进行通量计算和数据质量控制。主要过程包括:去除了超出仪器测量范围和超过 4 倍标准差的异常值,运用坐标轴二次旋转法使垂直风速均值为 0^[16],进行超声虚温校准 (SND correction)^[17],频率损失校准, WPL 校准^[18]等。

通量计算后,对 30 min 的通量数据进行质量控制:(1) 去除夜间摩擦风速过低时的通量值^[19],2010 年 1 月—2011 年 6 月和 2011 年 7 月—2012 年 9 月摩擦风速的阈值分别为 0.14、0.10 $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ 。(2) 通过通量贡献率、湍流积分特征、稳态测试 3 项指标对 30 min 的通量数据进行综合评价,其中,当湍流积分特征或稳态测试值 > 100% 或皆伐后通量贡献率 < 80% 时,该 30 min 数据标记为不合格。在 2011 年 5—8 月皆伐期间,每天均根据采伐进度单独设定每个方向的通量风浪区长度。当研究区的通量贡献率 < 80% 时,该 30 min 的记录将弃而不用。因此,5—6 月的通量主要来源于未采伐区域,而 7—8 月通量主要来源于皆伐后的采伐迹地,最终水汽通量的数据保存率为 55.4%。

以潜热通量插补后的数据估算累计蒸发散。对 < 2.5 h 的空缺以线性内插法插补,而对 ≥ 2.5 h 的

空缺则采用滑动窗平均法进行插补^[20],窗口大小分别为 7、15、30 d。

单日潜在蒸发散以世界粮农组织推荐的公式 FAO Penman-Monteith 进行计算:

$$PET = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T_a + 273.15} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

式中:PET 为潜在蒸发散 (mm); Δ 为饱和水汽压随温度变化的斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}$); R_n 为净辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2}$); G 为土壤热通量; γ 为干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}$); T_a 为空气温度 ($^\circ\text{C}$); e_s 为饱和蒸汽压 (kPa); e_a 为实际蒸汽压 (kPa); u_2 为 2 m 高的风速 ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$);900 为转换系数。基于式 (1) 计算的潜在蒸发散表示 0.12 m 高的草坪在不受水分限制时的最大蒸发散,而杨树人工林和采伐迹地的潜在蒸发散较草地更大,因此,需乘以转化系数 K 。由于伐前期 8 月土壤水分充足,且植被指数恢复较好,因此,取该月实际蒸发散与草地潜在蒸发散的比值作为 K 值,即 1.42。采伐迹地在 2012 年 6 月 25 日—7 月 11 日由于地下水位的抬升蒸发散有明显的增大,因此,将此阶段的实际蒸发散与草地蒸发散的比值作为采伐迹地的 K 值,即 1.19,而淹水期间由于植被较少而不进行转换。

由于受长江水位的顶托作用,其生态系统水量平衡公式为:

$$\Delta S = P - ET - (O - I) \quad (2)$$

式中: ΔS 为生态系统中储水量的变化量 (mm); P 为降雨量 (mm); ET 为蒸发散 (mm); I 和 O 分别为从长江流入系统内的水量和系统内流入至长江的水量, $(O - I)$ 为生态系统与长江的净交换水量 (R , mm)。当 $R > 0$ 时,表示从生态系统流出的水量,即生态系统的产流量 (WY)。 ET 通过涡度相关系统直接观测的水汽通量 ($\text{g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$) 获得, P 通过雨量桶 (TE52, Campbell Scientific, Inc., USA) 进行计量。由于伐前林分结构较其前一年没有明显变化,因此,认为其全年 $\Delta S \approx 0$ ^[21],而采伐迹地 ΔS 采用式 (3) 进行计算^[6]。

$$\Delta S = \Delta VWC_{15} \times 300 + \Delta WT \times \theta_d \quad (3)$$

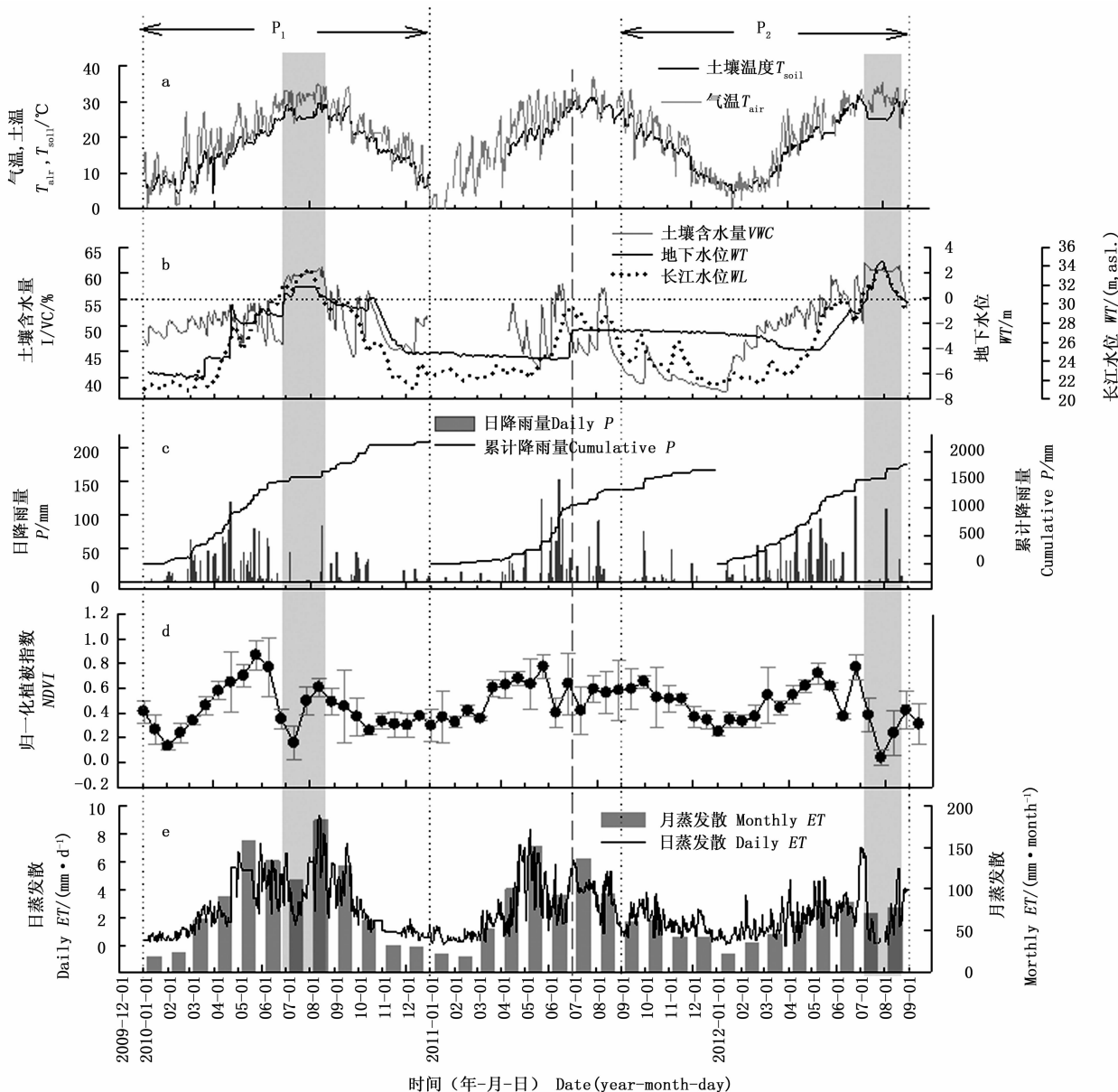
式中: ΔVWC_{15} 为地表 15 cm 深处土壤体积含水量的变化量,代表地面以下 300 mm 深的土层平均体积含水量变化量; ΔWT 为平均地下水位的变化量 (mm); θ_d 为土壤非毛细管孔隙度,取 0.4。

选取2010年1月—2012年8月蒸发散和环境因子的连续观测数据进行采伐前、后的比较研究,其中,2010年1月—2011年6月为伐前期,2011年7月—2012年8月为采伐迹地期。在进行全年比较时,伐前期和采伐迹地分别选择2010年1月—12月(P_1)和2011年9月—2012年8月(P_2),分别包含了伐前期和采伐迹地期的淹水月份(7—8月)。选取2010—2013年全年降雨量数据计算4年年均降雨量和单月平均降雨量以计算干旱指数。

3 结果与分析

3.1 环境因子动态

总体而言,2010年和2012年的区域气象条件相似,即雨水充沛,且具有相似的淹水情形(图1)。 P_2 阶段的平均气温同该区域长期(1981—2010年)年均气温相当(16.8℃),但较 P_1 阶段低0.16℃。两阶段的降雨量总体无明显差异(约2200mm),但均比该区域长期年均降水量(约1400mm)高出约800mm(表1)。



P_1 和 P_2 分别为选定的伐前一年时段和采伐迹地一年时段;虚线为采伐前和采伐后的分界线;阴影部分分别为采伐前和采伐后的淹水时段。

P_1 and P_2 indicate a whole year before and after clearcut, respectively; the dash line is the border between before and after clearcut; the shaded parts are indicate the inundation periods before and after clearcut.

图1 环境因子和蒸发散的动态变化

Fig.1 Dynamics of environmental factors and ET

皆伐后土壤温度升高,且土壤含水量下降(表1)。尽管 P_2 阶段平均气温较 P_1 阶段更低,但平均土壤温度(17.85°C)却较 P_1 阶段高 0.52°C ,主要由于皆伐后,地表植被覆盖减少导致土壤直接接受太阳辐射的能量增加。在总降雨量相当的情况下, P_2 阶段土壤含水量全年均值却较 P_1 阶段减小 3.11% ,一方面由于地表覆盖的减少使地表温度升高和地表风速增大,从而加速了地表水分的蒸发;另一方面由于采伐后以草本植物为主,其根系分布较浅($<30\text{ cm}$),因而,对土壤表层的水分消耗更快。 P_2 和 P_1 阶段土壤温度和土壤含水量的变化与皆伐期间采伐迹地和未采伐区同步对照观测结果一致^[12]。

表1 2个阶段环境因子比较

Table 1 Comparison of environmental factors in two periods

阶段 Periods	气温 $T_a/^\circ\text{C}$	土温 $T_s/^\circ\text{C}$	土壤含水量 $\text{WVC}/\%$	地下水位 WT/m	长江水位 $\text{WL}/(\text{m}, \text{asl.})$	饱和蒸汽压亏缺 VPD/hPa	降水量 P/mm	归一化植被指数 NDVI
P_1	17.01	17.33	51.34	-2.66	26.00	4.37	2 184.4	0.43
P_2	16.85	17.85	48.23	-2.30	25.64	4.17	2 157.5	0.46

皆伐前后林下植被的优势草本植物发生变化,且草本物种数量有所增加^[12]。从2010年和2011年6—8月的 NDVI 数据推测,病虫害降低了伐前人工林的植被指数(图1d),加之淹水导致伐前林下草本植物的死亡,使2011年7月 NDVI 降至全年最低水平(0.16);淹水期间采伐迹地 NDVI 降低至全年最低(约0)。2012年5月末的除草作业使采伐迹地的 NDVI 大幅下降,但很快恢复,表明该区域草本植物生长旺盛。

3.2 蒸发散的动态变化

皆伐前后的蒸发散均呈现明显的季节变化,主要表现为生长季强而非生长季弱,而生长旺季明显下降(图1e)。 P_1 阶段全年蒸发散最大月份为8月(183.0 mm),5月次之(157.5 mm),最小月份为1月和2月(约20 mm)。 P_2 阶段全年最大月份为5月(151.0 mm),7月次之(135.8 mm),最小月份为1月(20.3 mm)。 P_1 阶段淹水月份(7—8月)总蒸发散(293.6 mm)约为 P_2 阶段(147.3 mm)的2.0倍。病虫害和淹水分别是采伐前和采伐后生长旺季 ET 下降的最主要原因。

在生长季和非生长季皆伐前后蒸发散的日变化特征(图2)均显著。在非生长季(图2a),采伐前的人工林在2010年和2011年的变化规律相似,在下午14:00—15:00出现较弱的“午休”现象;采伐迹地(2012年)的蒸发散在白天较伐前更大,且“午休”现

象不明显(图2a)。病虫害爆发前,在2010年和2011年的生长季,伐前林的蒸发散较采伐迹地同期的更大,最大值分别为2012年的1.37和1.67倍,月总蒸散量分别为2012年同期的1.5和1.7倍(图2b)。在病虫害爆发的月份(图2c),伐前林分蒸发散日最大值与采伐迹地相当,且2011年当月的月通量降至采伐迹地同期的1.1倍,此时为当年受病虫害影响最严重的月份(图1d),说明病虫害对杨树人工林蒸发散具有重要影响。淹水期间(7—8月)伐前林日最大蒸发散略高于未淹水月份的采伐迹地(图2d),但显著高于淹水期间的采伐迹地;总蒸发散分别为未淹水伐前林和淹水期采伐迹地的1.3和2.0倍。

森林采伐会导致地下水位的抬升^[21],而本研究区地下水位受地表植被和长江水位的共同调节。在皆伐期间(2011年7月前后)地下水位急剧抬升,但由于此时恰逢长江水位快速上涨,地下水位的抬升难以完全归因于皆伐;然而,此后水位一直较高直至次年春季到来(图1b)。此外, P_2 阶段的平均长江水位较 P_1 阶段下降 0.36 m ,但平均地下水位却上升 0.36 m ,因此推测,皆伐导致地下水位的抬升。这是由于蒸发散减少导致地下水消耗减少(图1e和表2),以及采伐迹地活体根系所触及的地下水深度较伐前减小,因而使深层次的水受植物蒸腾影响较小。

象不明显(图2a)。病虫害爆发前,在2010年和2011年的生长季,伐前林的蒸发散较采伐迹地同期的更大,最大值分别为2012年的1.37和1.67倍,月总蒸散量分别为2012年同期的1.5和1.7倍(图2b)。在病虫害爆发的月份(图2c),伐前林分蒸发散日最大值与采伐迹地相当,且2011年当月的月通量降至采伐迹地同期的1.1倍,此时为当年受病虫害影响最严重的月份(图1d),说明病虫害对杨树人工林蒸发散具有重要影响。淹水期间(7—8月)伐前林日最大蒸发散略高于未淹水月份的采伐迹地(图2d),但显著高于淹水期间的采伐迹地;总蒸发散分别为未淹水伐前林和淹水期采伐迹地的1.3和2.0倍。

3.3 皆伐对水量平衡的影响

皆伐导致研究区水量输出的结构发生变化(表2)。 P_1 和 P_2 阶段的总降雨量无明显差异,然而, P_2 阶段的蒸发散下降明显,仅为 P_1 阶段的65.9%,而产流量上升为 P_1 阶段的1.17倍。此外,由于皆伐后地下水位的上升和土壤含水量的下降(表1),土壤储水量较 P_1 阶段增加了134.7 mm。因而,蒸发散的减少一方面增加了地下水的储藏,另一方面增加了产流。根据所观测的蒸发散推算, P_2 阶段产流量较 P_1 阶段增加190.8 mm,产流率(R/P)上升至 P_1 阶段的1.18倍(表2)。

伐前林地淹水期间 $ET > P$,导致 $R < 0$,表明淹

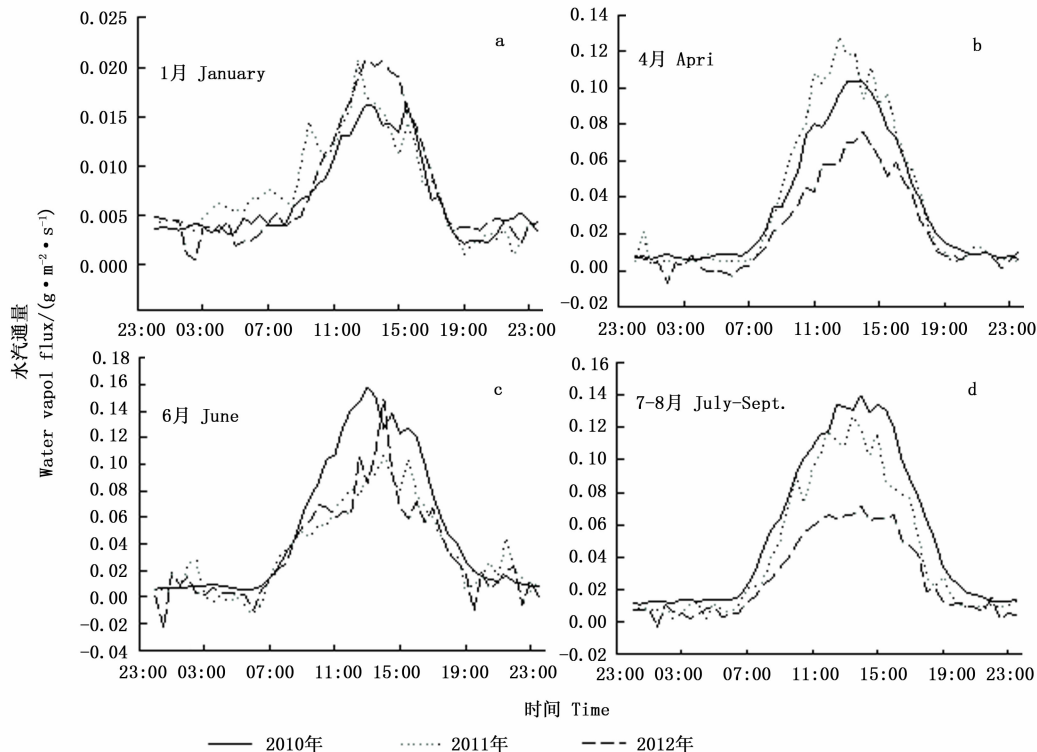


图2 不同阶段蒸发散的典型月份平均日变化
Fig. 2 Mean diurnal variation of ET in typical months

表2 各阶段的水量平衡

Table 2 Water balance in different periods

阶段	降水 <i>P</i> /mm	蒸发散 <i>ET</i> /mm	产流 <i>R</i> /mm	土壤储 水量变 化量 ΔS /mm	潜在蒸 发散 <i>PET</i> /mm	产流率/ 降水量 <i>R/P</i>
P_1	2 184.4	1 033.0	1 151.4	0.0	1 163.7	0.527
P_2	2 157.4	680.5	1 342.2	134.7	889.0	0.622
2010-07-08	232.6	293.7	-61.1		393.9	-0.263
2012-07-08	254.8	147.3	107.5		292.8	0.422
2011-07-08	292.4	229.6	62.8		333.0	0.215

水期间洪水贡献了约 60 mm 的蒸散量;而采伐迹地在淹水期间(2012 年 7—8 月)的蒸散率(0.578)远比未淹水年份同期(2011 年 7—8 月,0.785)的小,同时淹水期采伐迹地的植被指数(约为 0)也远比未淹水年份同期(0.4~0.6)的小,因而,推测采伐迹地期的植被蒸腾作用在蒸发散中占较高的比例。

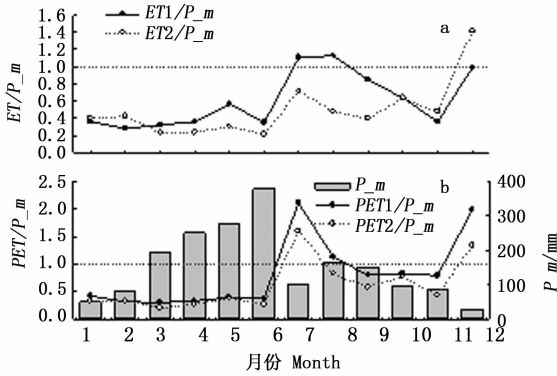
3.4 干旱指数的变化

PET/P 常被用作干旱程度的指示参数^[2]。相对于 2010—2013 年这 4 年的平均年降雨量(P_m) (1 863.8 mm), P_1 和 P_2 阶段的全年干旱指数(PET/P_m) 分别为 0.62 和 0.48;降雨量在一年内分布不

均匀,其中前 6 个月占全年的 66.4%,导致 P_1 和 P_2 阶段的 PET/P_m 前半年小于 0.5(图 3b)。伐前林和采伐迹地在 7—8 月和 12 月的干旱指数均大于 1,都可能加剧区域干旱,而 7—8 月恰逢长江洪水期,因此,杨树人工林由于具有较大的蒸散耗水和较大的地下储水潜力而恰好起到削弱洪峰的作用。从 P_2 阶段的 PET/P_m 看,采伐迹地在 7 月也可能起到削弱洪峰作用(图 3b),而实际上在淹水期间,植被全部被淹没,蒸发散远小于潜在蒸发散,因此,难以起到削洪作用(图 3a)。相反,冬季草本植物依然比较旺盛(图 1d),蒸发散较伐前林高(图 2a),因此采伐迹地更可能促使南方冬旱(图 3a)。

4 讨论

国外一些观测研究显示,森林采伐后生态系统的蒸发散将先减小,之后随着再造林或采伐迹地的自然演替,蒸发散将逐渐上升。Sun 等^[6] 基于涡度相关系统对比观测了采伐迹地前 2 a 和火炬松幼林的蒸发散动态变化,发现采伐迹地的蒸发散较火炬松幼林小 23%。Liu 等^[22-23] 对火烧作业后的 3、15 和 80 a 的研究区进行对比观测,发现 3 a 的研究区比 80 a 的研究区蒸发散小 33%,但 15 a 的蒸发散和



ET_1 和 ET_2 分别为 P_1 和 P_2 阶段的蒸发散; PET_1 和 PET_2 分别为 P_1 和 P_2 阶段的潜在蒸发散; P_m 为 2010—2013 四年平均年降雨量。

ET_1 and ET_2 are the ET in period P_1 and P_2 , respectively; PET_1 and PET_2 are the potential ET in period P_1 and P_2 , respectively; P_m was the mean yearly precipitation during 2010—2013.

图3 降水的季节分布和干旱指数的季节变化

Fig. 3 The mean monthly precipitation in the latest four years and dryness index seasonal variation

80 a 的蒸发散无明显差异,并预测蒸发散在最初几年会有所下降,但随着植被的恢复,中林龄蒸发散将会超过老龄林。此外,Chen 等^[24]对 20、40 和 450 a 的红杉林夏季的水汽通量对比观测时也发现,450 a 的红杉林蒸散量比 20、40 a 林分的蒸散量分别高 70% 和 12.2%;但也有观测结果显示,皆伐并未对蒸发散有明显改变,如 Gholz 等^[21]对湿地松的采伐迹地、中龄林和成熟林进行对比观测发现,尽管叶面积指数和冠层结构有很大不同,3 种林分的年蒸发散几乎相同。本站点 11 a 杨树人工林皆伐后,采伐迹地的蒸发散较伐前下降了 34.1%,与 Sun 等^[6]的研究结果最相似。根据上述研究结果推测,随着幼林根系和叶片的发展,这一比例将可能下降,但需要更长时间尺度的观测验证。

本研究显示,11 a 杨树人工林皆伐后,产流效率上升至伐前的 1.18 倍,和目前较普遍观点相一致,即森林覆盖的减少有增加地表径流的趋势^[3, 9]。此外,本站点 7 a 杨树人工林和 11 a 林的年蒸发散分别为 958^[25] 和 1 033 mm,比亚热带(鼎湖山)季风阔叶林的(1 324 mm)小^[26],与同气候区的会同杉木林(848 ~ 983 mm)^[27-28]十分接近,而略比同气候区千烟洲站的人工针叶林(640 ~ 820 mm)^[29]高,且明显比北京地区 11 a 杨树人工林(585 mm)^[25]高。因此,可以推测,在水分充足的长江中下游,杨树的耗

水与同区域其他人工林的差异不大。因而,营造杨树人工林是否会导致区域干旱的问题归根结底是森林植被覆盖与径流关系的问题。Farley 研究了 26 个配对集水区的植被对水的影响,发现在草地或灌木上造林将可能多耗 150 ~ 200 mm 或 15% 的降水^[30],而本研究中 11 a 杨树人工林较采伐迹地多消耗水 190.8 mm,但仅多耗 8.7% 的降雨,主要由于本研究区降雨量较大。根据 Zhou 等^[2]的研究,在湿润地区,植被的变化对产流率的影响更小,因而,在南方水分较充足的区域,植树造林对产流率的影响比在干旱区更小。

值得注意的是,滩地杨树人工林在 7—8 月长江丰水季由于具有更大的地下蓄水潜力和更大的蒸散量而比采伐迹地更能起到削减洪峰的作用;然而,它同时也暗示,在夏季雨水偏少的情况下,非长江滩地区域的杨树人工林比草地更有可能加剧区域季节性干旱。此外,造林、采伐、再造林对流域水文的影响并不完全相同^[31],需要更多针对性研究。

5 结论

滩地杨树人工林皆伐后,土壤温度有所上升,土壤含水量下降,且地下水位上升;皆伐前、后的蒸发散具有相似的日变化规律和季节动态特征,但采伐后,全年蒸散量减少至采伐前的 66.3%;同时,产流率增加至采伐前的 1.18 倍。此外,采伐前、后的 7、8、12 月的干旱指数(PET/P)均大于 1,而其它月份均小于 1。本研究结果表明,滩地杨树人工林皆伐会导致流域蒸发散减少和流域产流率增加;由于丰水季节具有更大的地下蓄水潜力和更大的蒸散量,滩地杨树人工林在长江洪水爆发期间可更好的减少长江径流量而起到削减洪峰的作用,相反,当丰水季长江径流量较小时,杨树人工林相比采伐迹地或草地更可能加剧区域夏季干旱。

参考文献:

- [1] 周延辉. 森林对径流影响的综述[J]. 地理科学进展, 1990, 9 (3): 31 - 37.
- [2] Zhou Guoyi, Wei Xiaohua, Chen Xiuzhi, et al. Global pattern for the effect of climate and land cover on water yield[J]. Nature Communications, 2015, 6: 5918.
- [3] 刘世荣, 孙鹏森, 王金锡, 等. 长江上游森林植被水文功能研究[J]. 自然资源学报, 2001, 16(5): 451 - 456.
- [4] 国家林业局森林资源管理司. 第八次全国森林资源清查主要结果(2009 - 2013 年)[EB/OL]. <http://www.forestry.gov.cn/main/65/content-659670.html>.

- [5] Sun G, Noormets A, Gavazzi M J, *et al.* Energy and water balance of two contrasting loblolly pine plantations on the lower coastal plain of North Carolina, USA [J]. *Forest Ecology and Management*, 2010, 259(7):1299–1310.
- [6] Wilson K B, Hanson P J, Mulholland 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(2):153–168.
- [7] Kool D, Agam N, Lazarovitch N, *et al.* A review of approaches for evapotranspiration partitioning[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2014, 184:56–70.
- [8] 张志强, 余新晓, 赵玉涛, 等. 森林对水文过程影响研究进展[J]. *应用生态学报*, 2003, 14(1):113–116.
- [9] 国家林业局. 中国森林资源简况——第八次全国森林资源清查[G]. 国家林业局, 2013.
- [10] 盛炜彤. 中国人工林及其育林体系[M]. 北京: 中国林业出版社, 2014: 533.
- [11] 张旭东, 彭镇华, 周金星. 抑螺防病林生态系统抑螺机理的研究进展[J]. *世界林业研究*, 2006, 19(3):38–43.
- [12] 高升华, 张旭东, 汤玉喜, 等. 滩地美洲黑杨人工林皆伐对地表甲烷通量的短期影响[J]. *林业科学*, 2013, 49(1):7–13.
- [13] 彭镇华, 江泽慧. 中国新林种:抑螺防病林研究[M]. 北京: 中国林业出版社, 1995.
- [14] 高升华, 张旭东, 汤玉喜, 等. 滩地人工林幼林不同时间尺度 CH₄ 通量变化特征——基于涡度相关闭路系统的研究[J]. *生态学报*, 2016, 36(18):5912–5921.
- [15] 魏 远, 张旭东, 江泽平, 等. 湖南岳阳地区杨树人工林生态系统净碳交换季节动态研究[J]. *林业科学研究*, 2010, 23(5):656–665.
- [16] Rebmann C, Kolle O, Heinesch B, *et al.* Data acquisition and flux calculations[M]//Aubinet M, Vesala T, Papale D. *Eddy covariance: a practical guide to measurement and data analysis*. London: Springer Atmospheric Sciences, 2012:59–84.
- [17] Schotanus P, Nieuwstadt FTMf, De Bruin HAR. Temperature measurement with a sonic anemometer and its application to heat and moisture fluxes[J]. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 26(1):81–93.
- [18] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106(447):85–100.
- [19] Schmid H P. Ecosystem-atmosphere exchange of carbon dioxide over a mixed hardwood forest in northern lower Michigan[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2003, 108(D14).
- [20] Falge E, Baldocchi D, Olson R, *et al.* Gap filling strategies for defensible annual sums of net ecosystem exchange[J]. *Agricultural and forest meteorology*, 2001, 107(1):43–69.
- [21] Gholz H L, Clark K L. Energy exchange across a chronosequence of slash pine forests in Florida[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 112(2):87–102.
- [22] Liu H, Randerson J T, Lindfors J, *et al.* Changes in the surface energy budget after fire in boreal ecosystems of interior Alaska: An annual perspective[J]. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 2005, 110(D13).
- [23] Liu H, Randerson J T. Interannual variability of surface energy exchange depends on stand age in a boreal forest fire chronosequence[J]. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences* (2005–2012), 2008, 113(G1).
- [24] Chen J, Ustin S L, Suchanek T H, *et al.* Net ecosystem exchanges of carbon, water, and energy in young and old-growth Douglas-fir forests[J]. *Ecosystems*, 2004, 7(5):534–544.
- [25] Xiao J f, Sun G, Chen J, *et al.* Carbon fluxes, evapotranspiration, and water use efficiency of terrestrial ecosystems in China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2013, 182:76–90.
- [26] 黄忠良, 孔国辉, 余清发, 等. 南亚热带季风常绿阔叶林水文功能及其养分动态的研究[J]. *植物生态学报*, 2000, 24(2):157–161.
- [27] 康文星. 杉木人工林蒸发散及能量消耗规律的研究[J]. *中南林学院学报*, 1993, 13(1):74–80.
- [28] 康文星, 邓湘雯, 赵仲辉. 林冠截留对杉木人工林生态系统物质循环的影响[J]. *林业科学*, 2006, 42(12):1–5.
- [29] 魏焕奇, 何洪林, 刘 敏, 等. 基于遥感的千烟洲人工林蒸散及其组分模拟研究[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(5):778–789.
- [30] Farley K A, Jobbágy E G, Jackson R B. Effects of afforestation on water yield: a global synthesis with implications for policy[J]. *Global Change Biology*, 2005, 11(10):1565–1576.
- [31] Brown A E, Zhang L, McMahon T A, *et al.* A review of paired catchment studies for determining changes in water yield resulting from alterations in vegetation[J]. *Journal of hydrology*, 2005, 310(1):28–61.

(责任编辑:詹春梅)