

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第1期

Vol.36 No.1

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

2013年夏季典型光化学污染过程中长三角典型城市O ₃ 来源识别	李浩, 李莉, 黄成, 安静宇, 严茹莎, 黄海英, 王杨君, 卢清, 王倩, 楼晟荣, 王红丽, 周敏, 陶士康, 乔利平, 陈明华(1)
厦门冬春季大气VOCs的污染特征及臭氧生成潜势	徐慧, 张晗, 邢振雨, 邓君俊(11)
近10年海南岛大气NO ₂ 的时空变化及污染物来源解析	符传博, 陈有龙, 丹利, 唐家翔(18)
稻草烟尘中有机碳/元素碳及水溶性离子的组成	洪蕾, 刘刚, 杨孟, 徐慧, 李久海, 陈惠雨, 黄柯, 杨伟宗, 吴丹(25)
气相色谱-脉冲氦离子化检测法(GC-PDHID)分析大气中分子氢(H ₂)浓度	栾天, 方双喜, 周凌晔, 王红阳, 张根(34)
小浪底水库影响下的黄河花园口站和小浪底站pCO ₂ 特征及扩散通量	张永领, 杨小林, 张东(40)
夏季中国东海生源有机硫化物的分布及其影响因素研究	李江萍, 张洪海, 杨桂朋(49)
基于Landsat 8影像估算新安江水库总悬浮物浓度	张毅博, 张运林, 查勇, 施坤, 周永强, 王明珠(56)
温瑞塘河流域水体污染时空分异特征及污染源识别	马小雪, 王腊春, 廖玲玲(64)
人类活动影响下水化学特征的影响: 以西江中上游流域为例	于爽, 孙平安, 杜文越, 何师意, 李瑞(72)
太湖梅梁湾不同形态磷周年变化规律及藻类响应研究	汪明, 武晓飞, 李大鹏, 李祥, 黄勇(80)
鄱阳湖沉积物可转化态氮分布特征及其对江湖关系变化的响应	沈洪艳, 张绵绵, 倪兆奎, 王圣瑞(87)
影响浑太河流域大型底栖动物群落结构的环境因子分析	李艳利, 李艳粉, 徐宗学(94)
水华生消过程对巢湖沉积物微生物群落结构的影响	刁晓君, 李一葳, 王曙光(107)
蓝藻水华聚集对水葫芦生理生态的影响	吴婷婷, 刘国锋, 韩士群, 周庆, 唐婉莹(114)
汞在小浪底水库的赋存形态及其时空变化	程柳, 毛宇翔, 麻冰涓, 王梅(121)
三峡库区典型农田小流域土壤汞的空间分布特征	王娅, 赵铮, 木志坚, 王定勇, 余亚伟(130)
三峡库区农林复合小流域水体汞的时空变化特征	赵铮, 王娅, 木志坚, 王定勇(136)
环境条件对三峡库区消落带土壤中邻苯二甲酸二丁酯向上覆水静态迁移释放的影响	宋娇艳, 木志坚, 王强, 杨志丹, 王法(143)
三峡库区消落带土壤中溶解性有机质(DOM)吸收及荧光光谱特征	高洁, 江韬, 李璐璐, 陈雪霜, 魏世强, 王定勇, 闫金龙, 赵铮(151)
舟山渔场有色溶解有机物(CDOM)的三维荧光-平行因子分析	周倩倩, 苏荣国, 白莹, 张传松, 石晓勇(163)
太原市小店污灌区地下水中多环芳烃与有机氯农药污染特征及分布规律	李佳乐, 张彩香, 王焰新, 廖小平, 姚林林, 刘敏, 徐亮(172)
厦门杏林湾水系表层沉积物中PAHs分析与风险评估	程启明, 黄青, 廖祯妮, 苏丽, 刘兴强, 唐剑锋(179)
两种不同的地下水污染风险评价体系对比分析: 以北京市平原区为例	王红娜, 何江涛, 马文洁, 许真(186)
大冶湖滨岸带重金属水-土迁移特征与风险评价	张家泉, 李秀, 张全发, 李琼, 肖文胜, 王永奎, 张建春, 盖希光(194)
铁盐絮凝法从阳宗海湖水中除砷研究与现场扩大试验	陈景, 张曙, 杨项军, 黄章杰, 王世雄, 王莞, 韦群燕, 张艮林, 肖军(202)
铋银氧化物混合物高效氧化降解四溴双酚A的研究	陈满堂, 宋洲, 王楠, 丁耀彬, 廖海星, 朱丽华(209)
一种纳米级不定形碳对水中四环素的吸附研究	吴亦潇, 李爱民, 汪的华, 张维昊(215)
磁性壳聚糖衍生物对阴离子染料的吸附行为	张聪璐, 胡筱敏, 赵研, 苏雷(221)
腐殖酸-高岭土复合体形成机制及对三氯乙烯的吸附	朱晓婧, 何江涛, 苏思慧(227)
降温过程对ANAMMOX工艺城市污水处理系统中微生物群落的影响	赵志瑞, 苗志加, 李铎, 崔丙健, 万敬敏, 马斌, 白志辉, 张洪勋(237)
FISH-NanoSIMS技术在环境微生物生态学上的应用研究	陈晨, 柏耀辉, 梁金松, 袁林江(244)
微囊藻毒素-LR对恶臭假单胞菌细胞活性和表面特性的影响	邓庭进, 叶锦韶, 彭辉, 刘芷辰, 刘则华, 尹华, 陈烁娜(252)
微生物除臭剂的筛选、复配及其除臭条件的优化	曾苏, 李南华, 盛洪产, 贺琨, 胡子全(259)
舟山青浜岛水体及海产品中有机氯农药的分布和富集特征	张泽洲, 邢新丽, 顾延生, 桂福坤, 祁士华, 黄焕芳, 瞿程凯, 张莉(266)
四川凉山藏彝青少年头发中多氯联苯污染水平的研究	周莹, 孙一鸣, 金军, 雷建容, 秦贵平, 何雪珠, 林尤静(274)
铜、毒死蜱单一与复合暴露对蚯蚓的毒性作用	徐冬梅, 王彦华, 王楠, 饶桂维(280)
外源硒对黄瓜抗性、镉积累及镉化学形态的影响	熊仕娟, 刘俊, 徐卫红, 谢文文, 陈蓉, 张进忠, 熊治庭, 王正银, 谢德体(286)
厦门市道路灰尘中铂族元素的污染特征	洪振宇, 洪有为, 尹丽倩, 陈进生, 陈衍婷, 徐玲玲(295)
洋河流域不同土地利用类型土壤硒(Se)分布及影响因素	商靖敏, 罗维, 吴光红, 徐兰, 高佳佳, 孔佩儒, 毕翔, 程志刚(301)
不同钝化剂对重金属污染土壤稳定化效应的研究	吴烈善, 曾东梅, 莫小荣, 吕宏虹, 苏翠翠, 孔德超(309)
畜禽粪便有机肥中Cu、Zn在不同农田土壤中的形态归趋和有效性动态变化	商和平, 李洋, 张涛, 苏德纯(314)
华南某市生活垃圾组成特征分析	张海龙, 李祥平, 齐剑英, 陈永亨, 方建德(325)
生物沥浸耦合类Fenton氧化调理城市污泥	刘昌庚, 张盼月, 蒋娇娇, 曾成华, 黄毅, 徐国印(333)
基于平面波导型荧光免疫传感器的双酚A检测适用性研究	徐玮琦, 张永明, 周小红, 施汉昌(338)
一种新型“Turn-on”荧光探针用于硫化氢可视化检测	刘春霞, 马兴, 魏国华, 杜宇国(343)
典型黄土区油松树干液流变化特征分析	张涵丹, 卫伟, 陈利顶, 于洋, 杨磊, 贾福岩(349)
利用巨藻发酵产氢气与挥发性有机酸的研究	赵晓娟, 范晓蕾, 郭荣波, 薛志欣, 杨智满, 袁宪正, 邱艳玲(357)
人工纳米颗粒在水体中的行为及其对浮游植物的影响	李曼璐, 姜玥璐(365)
《环境科学》征订启事(251) 《环境科学》征稿简则(294) 信息(236, 243, 273, 300)	

典型黄土区油松树干液流变化特征分析

张涵丹^{1,2}, 卫伟^{1*}, 陈利顶¹, 于洋¹, 杨磊¹, 贾福岩^{1,2}

(1. 中国科学院生态环境研究中心城市与区域生态国家重点实验室, 北京 100085; 2. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049)

摘要: 蒸腾耗水是植被水分利用的重要方式和重要过程之一, 对植物养分输送、生长发育、应对和缓解干旱胁迫以及改善区域微气候等都具有重要意义。研究以半干旱黄土区的油松植被为例, 基于四针式热扩散探针法监测树干液流的动态变化, 探讨其蒸腾耗水规律, 分析油松树种的水分利用方式及对生存环境的适应能力。结果表明, 油松的液流速率具有明显的季节性差异, 不同月份的液流速率以4月最低, 其次为10月、9月和8月, 分别为0.024、0.057、0.062和0.071 mL·(cm²·min)⁻¹。液流速率的日变化在各个时期都呈现昼高夜低趋势, 夜间液流速率较低, 但不为零。在降雨事件影响下, 夜间液流量在日液流总量中的比重明显增加, 是晴朗天气的3.9倍, 而白天液流量所占比重下降31.8%。寒潮期间液流速率表现出相似的变化趋势, 对突变环境具有较强的适应能力。油松液流速率与气象因子显著相关, 对液流速率影响的大小顺序为: 太阳辐射 > 水汽压亏缺 > 相对湿度 > 大气温度。

关键词: 液流速率; 降雨; 环境因子; 土壤含水量; 黄土高原

中图分类号: X171 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)01-0349-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.01.047

Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China

ZHANG Han-dan^{1,2}, WEI Wei^{1*}, CHEN Li-ding¹, YU Yang¹, YANG Lei¹, JIA Fu-yan^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China; 2. School of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Transpiration is one of the major processes of water consumption. It is significant for nutrients transportation, plant development, drought stress alleviation and micro-climate amelioration. In this study, the artificially planted Chinese pine (*Pinus tabulaeformis*) was selected as an example to explore its transpiration characteristics, water-use strategies and the adaptability of the living environment in a typical loess hilly area of China. The results showed that: the sap flow rates of Chinese pine varied obviously in different seasons. The minimum sap flow rate occurred in April, followed by October, September and August, which was 0.024, 0.057, 0.062 and 0.071 mL·(cm²·min)⁻¹, respectively. The rule of the diurnal variation of sap flow rate was regular, higher in daytime than at night. The flow rate was low during nighttime, but not zero. In rainfall events, the proportion of sap flow during nighttime was significantly increased, which was 3.9 times of that on sunny days, with 31.8% decrease in daytime. Chinese pine had great adaptability to unexpected climates. The variation trend of flow rate in the clod was similar to that on rainy days. The sap flow velocity was in great relevance with meteorological factors, with a declining order of solar radiation, vapor pressure deficit, relative humidity, and atmospheric temperature.

Key words: sap flow rate; rainfall; environmental factor; soil water content; the Loess Plateau

黄土丘陵区生态环境脆弱, 降水量少而集中, 水土流失严重, 水分成为该地区生态环境建设的主要制约因素。人工植被能有效增加地表覆盖, 并通过根系生长改善土壤通气状况和蓄水性能, 增加土壤团聚性和含水量, 在一定程度上改善水土流失现状^[1-3]。蒸腾作用是植物吸收和运输矿物质的主要动力, 也是调节植物体内及植物与环境间水分动态平衡的重要方式, 更是维持自然界水分平衡的重要因子之一^[4-6]。它影响着植物体内的水分状况, 在一定程度上反映植物调节水分损失及适应干旱环境的能力, 同时对植物生长和物质生产有着重要的生

理及物理意义。植物作为土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 中的重要组成部分, 其蒸腾耗水规律及水分利用方式对干旱地区水分循环及生态修复具有指导意义。

在研究植被蒸腾耗水特征方面, 热脉冲法^[7-9]、热扩散法^[10-12]和热平衡法^[13,14]等以其可在保持树木自然生长和基本不破坏树木正常生长的状态下连

收稿日期: 2014-06-13; 修订日期: 2014-08-02

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41371123, 41390462)

作者简介: 张涵丹 (1990~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为生态水文, E-mail: zhd623@163.com

* 通讯联系人, E-mail: weiwei@rcees.ac.cn

续自动测量植被的蒸腾耗水量,且能精确描绘和反映树木液流速率的动态规律等特点,在农业和林业等各项领域得到广泛应用^[15]。研究表明,液流速率的动态变化规律及其水分利用方式能反映树种对环境的适应能力^[16],为树种选育提供科学依据^[17];此外,单木液流速率的研究对于探讨尺度扩展在水文循环和林木管理中的作用具有实际指导意义^[18],同时也为研究生态系统结构对蒸散特征的影响^[5]提供基础。

油松作为黄土丘陵地区主要的造林树种之一,在保持水土、防风固沙、调节区域小气候、维持区域生态平衡等方面具有重要作用^[19,20]。杨磊等^[21,22]通过分析定西市龙滩流域不同植被类型下的土壤含水量指出,人工植被均存在不同程度的土壤水分亏缺,油松林地是水分亏缺较为严重的植被类型之一,其相对亏缺指数为 0.62, 0~200 cm 内土壤有效储水量不足 50 mm,但该树种依然能正常生长,并在控制保持土壤等生态服务中发挥作用,其环境适应能力及蓄水耗水特性引人深思。基于此,本文以典型黄土区——定西市安家沟流域自然坡面的油松林地研究对象,采用四针式热扩散探针法,分析油松树种树干液流的动态变化特征及其与生环境的相互关系,探寻油松的蒸腾耗水规律,进一步了解其水分利用方式。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于甘肃省定西市安家沟流域(35°33'N~35°35'N, 104°38'E~104°41'E), 平均海拔 1 980 m,属典型半干旱黄土丘陵区。年平均温度 6.8℃,平均无霜期 154 d,平均日照时数 2 466 h。年均降水量 421 mm,主要集中在 4~10 月,占年降水量的 86%,年均蒸发量 1 665.1 mm,年均风速 1.68 m·s⁻¹。试验区主要地貌类型为黄土丘陵沟壑地貌,天然植被以多年生草本为主,主要植物种类有长芒草(*Stipa bungeana*)、赖草(*Leymus secalinus*)、阿尔泰狗娃花(*Heteropappus altaicus*)等,人工植被以柠条(*Caragana korshinskii*)、沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、油松(*Pinus tabulaeformis*)、山杏(*Armeniaca sibirica*)为主,本研究选取该地区开展植被恢复的主要人工乔木——油松作为调查对象。

1.2 研究方法

1.2.1 树干液流观测

分别于 2013 年 7~11 月和 2014 年 4~5 月采

用四针式 SF-L 热扩散探针测定系统(美国 Campbell 公司)对自然条件下的油松树干液流速率进行连续监测。该方法弥补了二针式探针法在径向热扩散方面的不足^[23~25],获取更精确的监测数据。试验在大小为 10 m×10 m,坡度为 20°的典型油松样地内进行,选取生长状况相似的 6 株油松作为研究对象,尽可能排除树种年限、胸径大小等个案造成的干扰(表 1)。安装时,去除油松坚硬老化的表皮,将传感器探针插入油松主干上,加热探针与各参比探针之间保持在 10~15 cm(图 1),然后用反光铝箔包裹,并用硅胶密封,防止环境温度变化和雨水渗入对测定结果的影响。

表 1 选择树种的基本情况

Table 1 Basic characteristics of the selected trees				
样树号	胸径/mm	边材面积/mm ²	树高/m	林龄/a
1	165.6	12 231	8.5	29
2	159.2	10 473	8.2	29
3	160.5	12 047	8.4	29
4	171.3	12 596	8.8	29
5	153.5	10 446	8.6	29
6	153.2	10 437	8.4	29

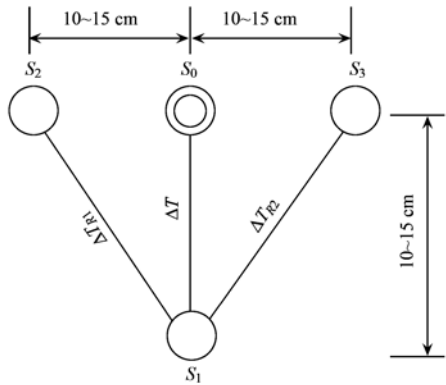


图 1 热扩散探针示意

Fig. 1 General view of the thermal dissipation probe method

利用加热探针和参比探针测得的液流线性热源温差,计算液流速率^[26]:

$$U = 0.714 \times \left(\frac{\Delta T_{\max} - \Delta T'}{\Delta T'} \right)^{1.231} \quad (1)$$

$$\Delta T' = \Delta T - \left(\frac{\Delta T_{R1} + \Delta T_{R2}}{2} \right) \quad (2)$$

式中, U 为液流速率 [mL·(cm²·min)⁻¹]; $\Delta T_{\max}$ 为当 $U=0$ 时求得的最大温差,一般在夜间空气湿度达 100% 并且没有蒸腾或树干直径停止变化处于相对稳定状态时得出^[27,28]; $\Delta T'$ 为实测温差; ΔT 为探头 S_0 和 S_1 的温度差(℃); ΔT_{R1} 为探头 S_2 与 S_1 的温度差(℃); ΔT_{R2} 为探头 S_3 与 S_1 的温度差(℃)

(图 1)。

假设一定时段内,气象因子、土壤水分对于林分内的每一棵树都是同质的,且同一径阶树木之间相同高度断面的输水能力相同,则该时段 Δt 内,单木的总液流量 Q_t 可以表示为:

$$Q_t = 1.44 \times U \times A \times \Delta t \quad (3)$$

$$A = \pi \times \left[\left(\frac{D}{2} \right)^2 - \left(\frac{d}{2} \right)^2 \right] \quad (4)$$

式中, Q_t 为总液流量(kg); A 为边材面积(cm^2); Δt 为计算时间(d); D 和 d 分别为胸径和心材直径(cm)。

1.2.2 气象环境因子数据

将 Vantage Pro2 自动气象站(美国 DAVIS 公司)安装于离油松样地 500 m 左右的空旷平地上,并将气象站的数据采集间隔与热扩散探针式茎流计的数采仪设为一致,实现数据的同步监测。观测记录的气象因子包括太阳辐射($\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$)、空气温度($^{\circ}\text{C}$)、大气相对湿度(%)和降雨量(mm)。水汽压亏缺(VPD)根据公式^[29]计算而得:

$$\text{VPD} = a \times \exp\left(\frac{b \times T_a}{T_a + c}\right) \times (1 - \text{RH}) \quad (5)$$

式中,VPD 为水汽压亏缺(kPa); T_a 为空气温度($^{\circ}\text{C}$); RH 为大气相对湿度(%); a 、 b 、 c 为常数,取值分别为 0.611 kPa、17.27 kPa、237.3 $^{\circ}\text{C}$ 。

土壤体积含水量的测量主要采用 H21 土壤水分温度自动监测系统(美国 ONSET 公司)在样地内进行实时监测,探针测量深度分别为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm。数据采集间隔与茎流计间隔一致。土壤可吸取水(REW)作为土壤水分有效性的指标,由土壤体积含水量 θ 计算而得^[30,31]:

$$\text{REW} = (\theta - \theta_{\min}) / (\theta_{\max} - \theta_{\min}) \quad (6)$$

式中, $\theta_{\max}$ 和 $\theta_{\min}$ 分别为土壤田间持水量和土壤凋萎湿度(%). REW 为土壤可吸取水,无量纲,取值范围为 0~1. 当 $\text{REW} = [0, 0.1]$ 时,土壤受到严重的水分胁迫; $\text{REW} = [0.1, 0.4]$ 时,土壤受到轻微的水分胁迫; $\text{REW} > 0.4$ 时,无水分胁迫。

1.3 数据处理

油松树干液流与降雨事件及土壤含水量的相关关系及回归方程采用统计分析软件 SPSS 17.0 进行分析获得,分析作图由 Origin 8.0 实现。

2 结果与分析

2.1 树干液流动态变化特征

本研究的观测期涵盖生长季的初期和中后期,

分别从各阶段选取连续 3 d 的液流速率,结果如图 2 所示,油松树干液流呈现规律性的昼夜交替变化,中午时段的液流波动较为剧烈,凌晨与午夜的液流速率最低,但不为零,具有明显的夜间液流。生长季后期的 8、9、10 月液流速率明显高于 4 月。为了更清晰地比较各月份液流速率的变化特征,绘制液流速率昼夜变化趋势图(图 3)。由图 3 可知,各月的液流速率变化趋势基本一致,液流的速率在 08:00~09:00 开始升高,下午 13:00~15:00 出现峰值,宽峰现象明显。但不同月份,液流速率大小各有差异。其中,生长季初期的 4 月,相较于其他月份,无论是夜间还是白天的液流速率均低一大截,日平均液流速率最大值不高于 $0.05 \text{ mL} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{min})^{-1}$ 。8、9、10 月的液流变化趋势更为相似,不同点是 8 月白天的液流速率峰值范围更广,瞬时速率更高,9、10 月的夜间液流速率更高。此外,随着日照时间缩短,逐渐进入昼短夜长的生长季后期,油松的液流速率也呈现相似的变化趋势。各月的平均液流量分别为: $20.96 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ (8 月,共 31 d)、 $18.25 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ (9 月,共 30 d)、 $16.84 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ (10 月,共 23 d)、 $7.27 \text{ kg} \cdot \text{d}^{-1}$ (4 月,共 30 d)、观测期液流总量为 1802.68 kg (共 114 d)。

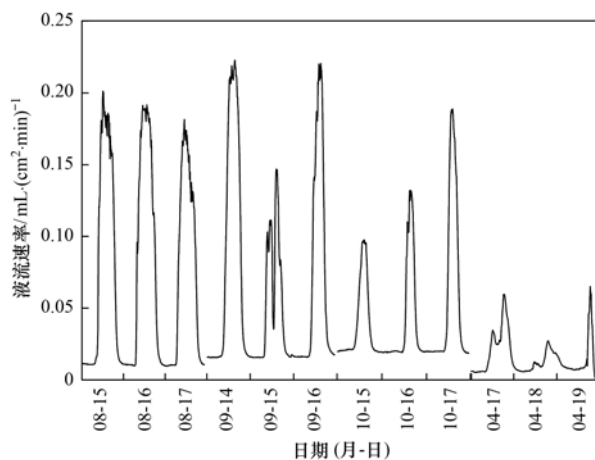


图 2 不同生长阶段油松液流速率的日变化

Fig. 2 Daily variation of sap flow rates of Chinese pine at different growth stages

2.2 不同天气条件下液流变化

2.2.1 降雨前后液流速率变化特征

以 9 月为例,对降雨前后的液流速率变化特征进行分析,结果如图 4(a) 所示。降雨事件从早晨 08:10 持续到下午 14:00,在此期间,油松的液流速率很低,几乎与夜间的液流速率维持在同一水平线。雨后,液流速率迅速升高,与晴天呈现的 14:00 之后

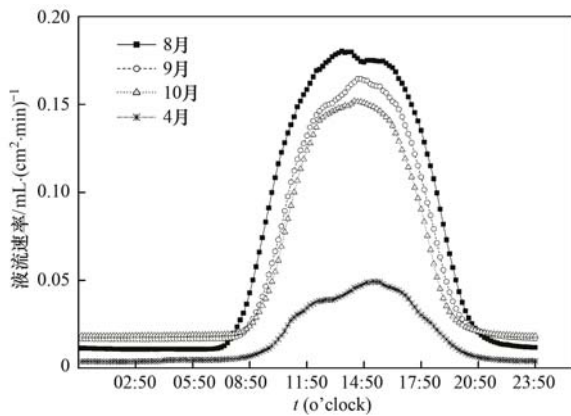


图3 不同生长阶段油松液流速率昼夜变化

Fig. 3 Diurnal variation of trunk sap flux of Chinese pine at different growth stages

液流速率开始下降的变化趋势相反,但液流速率并没有持续增加,在18:00左右开始下降,20:30之后液流速率维持在相对稳定的状态.依据降雨前后,液流速率呈现的显著性差异,分别对白天和夜间的液流速率进行分析,根据定西市该月的日出日落时间,选取00:00~05:00和20:00~24:00为夜间时段,05:10~19:50为白天时段,结果如图4(b).降雨过后,夜间的液流运动明显增加,其在日液流中的比例是晴朗天气的3.9倍,相应的白天液流占日液流总量的比例减少了31.8%.降雨降低了太阳辐射与水汽压亏缺,减少蒸腾动力,使得油松白天的液流速率降低.晴天,蒸腾作用强烈,液流速率较高,呈现出水分过度消耗的现象,降雨量满足了其补偿水分损耗的需求,主要表现在夜间液流的增加,油松通过增加夜间的液流运动缓解干旱胁迫,维持水分平衡.

2.2.2 突变天气条件下液流速率动态变化

由于受到新疆东北部、内蒙古中西部地区冷空气的影响,研究区在生长季初期(4月24日)出现异常冰雹与强降雪事件,24 h内降雪量达14.6 mm,气温降至-2.6℃.由图5可知,油松液流速率受冷空气影响明显,降雪前后,液流速率波动较大.4月液流速率较低,日最大速率不足0.15 mL·(cm²·min)⁻¹,在冷空气影响下,白天液流速率进一步降低,峰值下降62.3%[图5(a)].相反,突变天气在降低白天液流速率的同时,却增加了夜间的液流速率.由图5(b)可知,24日的夜间液流速率升高明显,与23日同一时刻呈现相反的变化趋势.之后两天,夜间的液流速率仍保持在较高的水平,液流量增加了46%.日出之前的液流速率也显著增

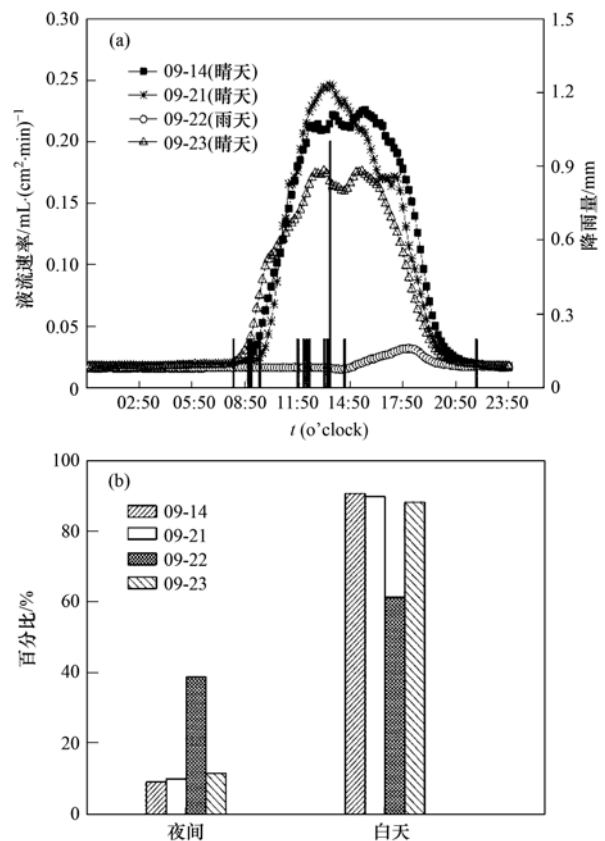


图4 降雨前后液流速率的日动态变化和白天与夜间在日液流总量中的百分比

Fig. 4 Diurnal dynamic variation of trunk sap flow rates on sunny and rainy days and its percentage in total flow during daytime and at night

加,如图5(c)所示,25、26日的液流速率与降雪之前的液流速率处于两个水平.这更多地可归因于水分补给量的增加.随着积雪融化,降雪量转变为降雨量渗入土壤中,增加土壤含水量,从而改变了水势梯度,影响油松的液流速率.总体而言,液流速率变化与降雨前后的变化趋势相似,不同的是,降雪事件引起的环境天气变化更为剧烈,对温度、水汽压亏缺、太阳辐射等的影响更大,该研究结果显示突变天气并未对油松树种造成长久的影响,液流速率在寒潮过后即恢复至正常状态,表明油松树种对突变天气具有较好的适应能力.

2.3 液流速率与环境因子相关性分析

液流速率的动态分析离不开气象因子的同步监测.观测期内,日平均气温、水汽压亏缺、太阳辐射、相对湿度、总降雨量分别为10.3℃、0.43 kPa、218.8 W·m⁻²、64.74%和219.4 mm.太阳辐射是植物蒸腾耗水的主要驱动力,如图6所示,液流速率日变化特征与太阳辐射波形的日变化趋势一致,随着太阳辐射的变化而变化,同时又与太阳辐射之间

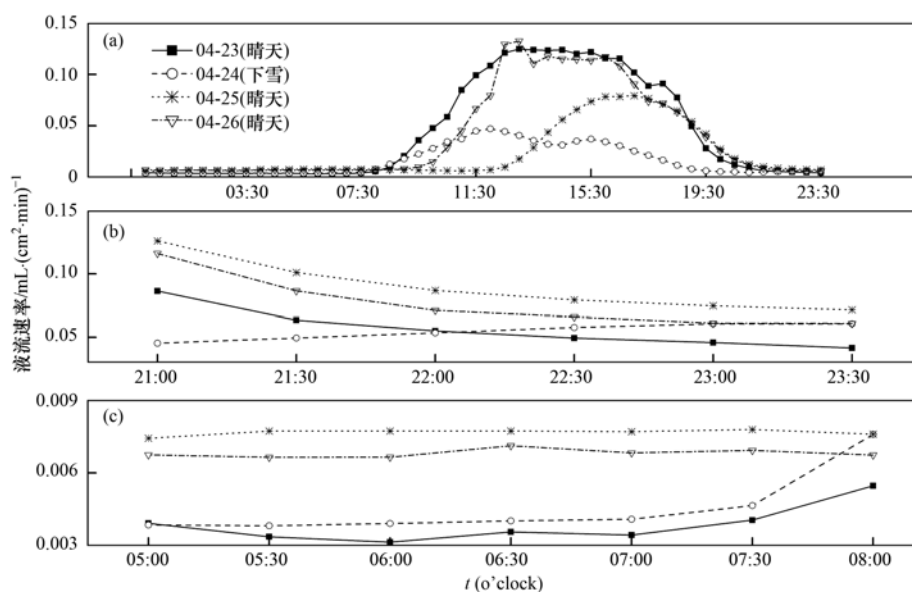


图5 降雪前后液流速率动态变化

Fig. 5 Dynamic variation of trunk sap flow rates before and after snow event

存在明显的时滞现象. 夜间太阳辐射为零, 但液流速率不为零. 结果表明, 研究区油松的夜间液流速率与土壤水分及水汽压亏缺的相关性最为密切. 降雨及降雪之后, 土壤水分得到补充, 土壤可吸取水的比例增加, 同时也增加了油松树种的夜间液流运动. 此外, 9、10 月的水汽压亏缺较其余月份更高, 波动性更大, 这与图 3 显示的结果相一致. 然而, 9、10 月夜间液流运动的主要驱动力却有所差别. 9 月, 降雨量较高, 小降雨事件频繁发生, 较高的土壤可吸取水是其夜间液流速率增加的主要原因; 10 月, 降雨量较少, 其夜间液流速率主要归因于较高的水汽压亏缺. 夜间的液流运动是油松适应干旱环境的方式之一. 生长季内降雨事件频繁, 降雨对表层土壤含水量的作用较为明显, 尤其是小降雨事件, 其入渗深度较低, 对深层土壤水分作用则很小, 如图 7 所示. 观测期内, 土壤水分或多或少受到水分胁迫, 表层土壤水分在整个观测期内, 除了 4 月个别日期受到较为严重的水分胁迫以外, 均受到较为轻微的水分胁迫. 而 0~100 cm 的平均土壤水分则呈现相反的状态, 仅在 8、9 月个别日期受到较为轻微的水分胁迫, 其余时段均处于严重的土壤水分胁迫状况. 这也对 4 月较低的液流速率做出了解释, 4 月受到严重的水分胁迫, 油松能从土壤中吸收的水分甚少, 其蒸腾消耗的水分亦相应降低.

将液流速率与各影响因子做相关性分析, 结果如表 2 所示. 液流速率受太阳辐射的影响最大, 其次为水汽压亏缺和大气温度, 液流速率与相对湿度

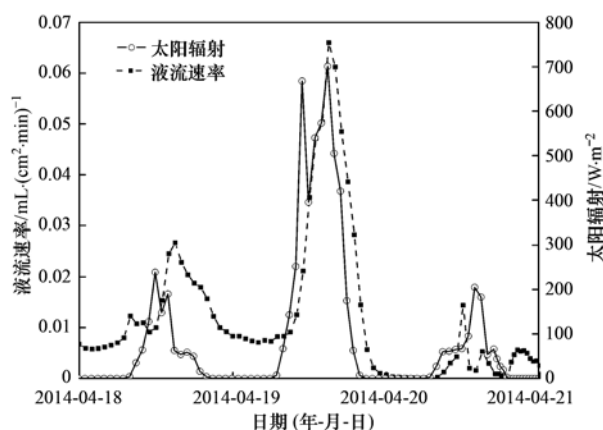


图6 液流速率与太阳辐射的关系

Fig. 6 Relationship between daily sap flow rates and solar radiation

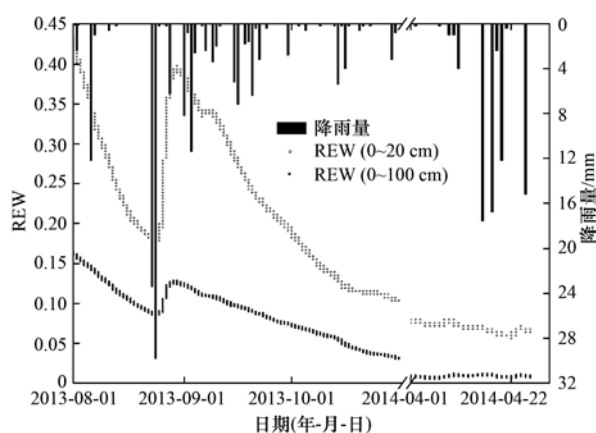


图7 观测期日降雨和土壤相对可吸取水

Fig. 7 Daily rainfall and relative extractable water (REW) during the period of observation

表 2 环境因子与液流速率的相关性¹⁾
Table 2 Correlation between environmental factors and sap flow rates

	<i>T</i>	RH	VPD	<i>P</i>	REW	Flow
Ra	0.570 **	-0.579 **	0.605 **	0.025	-0.097 *	0.621 **
<i>T</i>	1	-0.747 **	0.880 **	-0.108 *	0.149 **	0.391 **
RH		1	-0.895 **	0.112 **	0.280 **	-0.472 **
VPD			1	-0.116	-0.046	0.490 **
<i>P</i>				1	0.144 **	0.010
REW					1	0.181 **

1) * * 表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关,* 表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关; Ra: 太阳辐射; *T*: 大气温度; RH: 空气相对湿度; VPD: 水汽压亏缺; *P*: 降雨量; REW: 土壤可吸取水

呈现负相关. 降雨量与液流速率之间不存在显著的相关性,而降雨事件引起的土壤含水量的变化则与液流速率之间显著相关.

通过逐步回归分析得到如下方程:

$$\begin{aligned} \text{FL} = & 0.155 + 1.774 \times 10^{-5} R_a + \\ & 0.193 \text{VPD} - 0.077 \text{RH} \end{aligned} \quad (7)$$

$(R^2 = 0.782, n = 563)$

式中, FL 表示液流速率[$\text{mL} \cdot (\text{cm}^2 \cdot \text{min})^{-1}$].

逐步回归方程进一步表明,液流速率与太阳辐射、水汽压亏缺以及相对湿度显著相关,而与大气温度和土壤含水量的相关性较弱.

3 讨论

林木树干液流速率总是呈现规律性的昼夜变化,尤其在晴朗天气条件下,这种变化特征更加明显. 对火炬树^[32]、刺槐^[16]、云杉^[33]、栓皮栎^[34]等树种的研究表明,液流速率滞后于太阳辐射并与太阳辐射的日变化趋势相一致,夜间液流速率缓慢,白天随着太阳辐射强度及大气温度的增加,液流速率迅速增加. 林平等^[35]指出油松和栓皮栎在整个生长季内都呈现规律性的昼夜变化,晴天液流速率明显高于阴雨天气;李思静等^[29]对油蒿的研究、Chirino 等^[30]对地中海多个树种的研究、Xia 等^[36]对锦鸡儿的研究亦得到相似结果. 聂立水等^[34]进一步指出油松和栓皮栎具有明显的季节变化,4、5月受到严重的水分胁迫,液流速率最低,7、8月液流速率最高. 本研究中油松液流速率的日变化规律和季节变化规律与以往的研究相一致,但与聂立水等得出的油松白天不产生树干液流的结果不同. 这或许与树种所在的地域差异有关,不同地区,树种适应环境变化的方式不同,其水分利用方式亦有差异. 黄土丘陵地区海拔更高,太阳辐射更强,迫使油松通过蒸腾作用缓解热胁迫,调节其自身对水分的需求及其与环境间的水分平衡.

干旱半干旱地区,水分是植物生长的主要限制因子. 土壤含水量主要依赖于降水进入地表而引发的入渗能力的大小. 一般情况下,强降雨事件导致较强的土壤入渗,而小降雨事件往往只能湿润地表土壤,地表土壤中的水分绝大部分将通过表面物理蒸发而散失. 然而,关于小降雨事件对植物生存生长存有争议. 一些学者认为,小降雨事件的雨水绝大部分都由于冠层截留而散失,其入渗深度达不到植物根部,对植物生长几乎没有作用^[37]; Zeppel 等^[38]、Zhao 等^[39]的研究指出,小降雨事件亦可改变土壤水分状况,这主要与小降雨事件发生的频率有关,随着小降雨事件频率的增加,其土壤入渗深度逐渐加深. 本研究中,8、9月降雨时间频繁,0~100 cm 的土壤可吸取水量处于相对较高的水平,使水分胁迫现状得到缓解. Levitt^[40]指出耗水型树种避旱的方式是通过不断吸收水分,满足水分损失,而节水型树种则通过减缓水分的消耗速率,减少耗水量应对干旱环境. 研究区的油松树种在整个观测期处于不同程度的水分胁迫中,在适度的水分胁迫情况下,油松的液流速率保持在相对稳定的状态,受到严重水分胁迫时,油松通过降低液流速率,减少水分消耗,属于节水型树种.

相关研究表明,太阳辐射、大气温度、水汽压亏缺、降水分布等是影响液流速率动态变化的主要因素. 池波等^[41]指出,水汽压亏缺对液流速率的影响最大,其次为大气温度、太阳辐射和相对湿度. Huang 等^[42]指出太阳辐射和水汽压亏缺是影响液流速率的两个主要气象因素. Kim 等^[43]指出,风速是研究液流速率变化不可忽视的影响因素. 本研究通过相关性分析和多元回归分析得出各气象因子的影响程度依次为: 太阳辐射,水汽压亏缺,相对湿度和大气温度. 研究区纬度较高,太阳辐射较强,对植被蒸腾作用的影响大. 夜间太阳辐射为零,但液流速率不为零,主要是由于白天蒸腾作用强烈,较低的

土壤导水率使得水分无法送到树冠上部,而夜间水势差变小,根压作用增大,促进水分疏导,从而产生液流弥补白天的水分消耗,与 Ford 等^[32]的研究结果相一致。

4 结论

(1)油松液流速率呈现规律性的昼夜变化和季节变化,在诸多影响因子中受太阳辐射、水汽压亏缺和大气湿度的影响较大。

(2)土壤水分胁迫的强弱影响油松蒸腾耗水的多少,同时,蒸腾耗水量能定性反映土壤受水分胁迫的程度。油松的蒸腾耗水量 8 月最高,4 月最低,与土壤水分胁迫程度相一致。同一时期,表层土壤由于降雨入渗的作用,受到的水分胁迫较小,随土层深度的增加,土壤水分胁迫加剧。

(3)油松液流速率在寒潮期间和降雨前后呈现相似的变化趋势,干旱期间通过降低液流速率,减少蒸腾耗水量,应对干旱胁迫,表明油松具有较强的环境适应能力。油松作为主要的造林树种之一,其植被面积的增加有利于区域生态修复和改善区域微气候。然而从长远看,研究区不同程度的土壤水分胁迫现状是否会对油松树种的健康生长造成影响,仍有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 高光耀,傅伯杰,吕一河,等. 干旱半干旱区坡面覆被格局的水土流失效应研究进展[J]. 生态学报, 2013, **33**(1): 12-22.
- [2] 王延平. 陕北黄土区陡坡地土壤水分植被承载力研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2009. 16-30.
- [3] 杨朝瀚. 黄土丘陵沟壑区几种主要水土保持型植被水分生态特征研究[D]. 北京: 中国林业科学研究院, 2006. 21-24.
- [4] 王进鑫,黄宝龙,王明春,等. 不同供水条件下侧柏和刺槐幼树的蒸腾耗水与土壤水分应力订正[J]. 应用生态学报, 2005, **16**(3): 419-425.
- [5] 曹恭祥,王绪芳,熊伟,等. 宁夏六盘山人工林和天然林生长季的蒸散特征[J]. 应用生态学报, 2013, **24**(8): 2089-2096.
- [6] 周海光,刘广全,焦醒,等. 黄土高原水蚀风蚀复合区几种树木蒸腾耗水特性[J]. 生态学报, 2008, **28**(9): 4568-4576.
- [7] Clearwater M J, Luo Z W, Mazzeo M, *et al.* An external heat pulse method for measurement of sap flow through fruit pedicels, leaf petioles and other small-diameter stems[J]. *Plant, Cell & Environment*, 2009, **32**(12): 1652-1663.
- [8] Dragoni D, Lakso A N, Piccioni R M. Transpiration of apple trees in a humid climate using heat pulse sap flow gauges calibrated with whole-canopy gas exchange chambers[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, **130**(1-2): 85-94.
- [9] Steppe K, De Pauw D J W, Doody T M, *et al.* A comparison of sap flux density using thermal dissipation, heat pulse velocity and heat field deformation methods[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, **150**(7-8): 1046-1056.
- [10] Bush S E, Hultine K R, Sperry J S, *et al.* Calibration of thermal dissipation sap flow probes for ring-and diffuse-porous trees[J]. *Tree Physiology*, 2010, **30**(12): 1545-1554.
- [11] Lubczynski M W, Chavarro-Rincon D, Roy J. Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 1. Theory and application[J]. *Tree Physiology*, 2012, **32**(7): 894-912.
- [12] Reyes-Acosta J L, Vandegehuchte M W, Steppe K, *et al.* Novel, cyclic heat dissipation method for the correction of natural temperature gradients in sap flow measurements. Part 2. Laboratory validation[J]. *Tree Physiology*, 2012, **32**(7): 913-929.
- [13] Er-Raki S, Khabba S, Erraji T, *et al.* Evaluation of the Sap Flow Measurements Determined with Heat Balance Method for Citrus Orchards in Semi-Arid Region[J]. VIII International Symposium on Sap Flow, 2012, **951**: 259-268.
- [14] Lundblad M, Lagergren F, Lindroth A. Evaluation of heat balance and heat dissipation methods for sapflow measurements in pine and spruce[J]. *Annals of Forest Science*, 2001, **58**(6): 625-638.
- [15] 马玲,赵平,饶兴权,等. 乔木蒸腾作用的主要测定方法[J]. 生态学报, 2005, **24**(1): 88-96.
- [16] Du S, Wang Y L, Kume T, *et al.* Sapflow characteristics and climatic responses in three forest species in the semiarid Loess Plateau region of China[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2011, **151**(1): 1-10.
- [17] 朱仲龙,贾忠奎,马履一,等. 休眠前期玉兰树干液流的变化及其对环境因子的响应[J]. 应用生态学报, 2012, **23**(9): 2390-2396.
- [18] 李炜,司建华,苗政. 林分耗水的尺度扩展研究进展[J]. 生态学杂志, 2012, **31**(3): 714-723.
- [19] 王华,欧阳志云,郑华,等. 紫玉兰树干液流对北京市综合环境变量的响应[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(3): 571-576.
- [20] 崔建国. 黄土半干旱区林木水分生理特性与土壤水分关系研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2012. 10-15.
- [21] 杨磊,卫伟,陈利顶,等. 半干旱黄土丘陵区人工植被深层土壤干化效应[J]. 地理研究, 2012, **31**(1): 71-81.
- [22] 杨磊,卫伟,莫保儒,等. 半干旱黄土丘陵区不同人工植被恢复土壤水分的相对亏缺[J]. 生态学报, 2011, **31**(11): 3060-3068.
- [23] Green S, Clothier B, Jardine B. Theory and practical application of heat pulse to measure sap flow[J]. *Agronomy Journal*, 2003, **95**(6): 1371-1379.
- [24] Nadezhdina N, Cermák J, Ceulemans R. Radial patterns of sap flow in woody stems of dominant and understory species: scaling errors associated with positioning of sensors[J]. *Tree Physiology*, 2002, **22**(13): 907-918.
- [25] 刘庆新,孟平,张劲松,等. 基于热扩散方法测定树木蒸腾

- 的潜在误差分析[J]. 应用生态学报, 2011, **22**(12): 3343-3350.
- [26] Granier A. Evaluation of transpiration in a Douglas-fir stand by means of sap flow measurements[J]. Tree Physiology, 1987, **3**(4): 309-319.
- [27] Von Allmen E I, Sperry J S, Smith D D, *et al.* A species-level model for metabolic scaling of trees II. Testing in a ring-and diffuse-porous species[J]. Functional Ecology, 2012, **26**(5): 1066-1076.
- [28] Bleby T M, Colquhoun I J, Adams M A. Hydraulic traits and water use of *Eucalyptus* on restored versus natural sites in a seasonally dry forest in southwestern Australia [J]. Forest Ecology and Management, 2012, **274**: 58-66.
- [29] 李思静, 查天山, 秦树高, 等. 油蒿(*Artemisia ordosica*)茎流动态及其环境控制因子[J]. 生态学杂志, 2014, **33**(1): 112-118.
- [30] Chirino E, Bellot J, Sánchez J R. Daily sap flow rate as an indicator of drought avoidance mechanisms in five Mediterranean perennial species in semi-arid southeastern Spain [J]. Trees-Structure and Function, 2011, **25**(4): 593-606.
- [31] Chen L X, Zhang Z Q, Zeppel M, *et al.* Response of transpiration to rain pulses for two tree species in a semiarid plantation[J]. International Journal of Biometeorology, 2014, **58**(7): 1569-1581.
- [32] Ford C R, Goranson C E, Mitchell R J, *et al.* Diurnal and seasonal variability in the radial distribution of sap flow: predicting total stem flow in *Pinus taeda* trees [J]. Tree Physiology, 2004, **24**(9): 951-960.
- [33] Chang X X, Zhao W Z, He Z B. Radial pattern of sap flow and response to microclimate and soil moisture in Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) in the upper Heihe River Basin of arid northwestern China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **187**: 14-21.
- [34] 聂立水, 李吉跃, 翟洪波. 油松、栓皮栎树干液流速率比较[J]. 生态学报, 2005, **25**(8): 1934-1940.
- [35] 林平, 李吉跃, 马达. 北京山区油松林蒸腾耗水特性研究[J]. 北京林业大学学报, 2006, **28**(S1): 47-50.
- [36] Xia G M, Kang S Z, Li F S, *et al.* Diurnal and seasonal variations of sap flow of *Caragana korshinskii* in the arid desert region of north-west China [J]. Hydrological Processes, 2008, **22**(8): 1197-1205.
- [37] Dougherty R L, Lauenroth W K, Singh J S. Response of a grassland cactus to frequency and size of rainfall events in a North American shortgrass steppe [J]. Journal of Ecology, 1996, **84**(2): 177-183.
- [38] Zeppel M, Macinnis-Ng C M O, Ford C R, *et al.* The response of sap flow to pulses of rain in a temperate Australian woodland [J]. Plant and Soil, 2008, **305**(1-2): 121-130.
- [39] Zhao W Z, Liu B. The response of sap flow in shrubs to rainfall pulses in the desert region of China [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2010, **150**(9): 1297-1306.
- [40] Levitt J. Responses of plants to environmental stresses, vol 2 [M]. New York: Academic Press, 1980.
- [41] 池波, 蔡体久, 满秀玲, 等. 大兴安岭北部兴安落叶松树干液流规律及影响因子分析[J]. 北京林业大学学报, 2013, **35**(4): 21-26.
- [42] Huang L, Zhang Z S, Li X R. Sap flow of *Artemisia ordosica* and the influence of environmental factors in a revegetated desert area: Tengger Desert, China [J]. Hydrological Processes, 2010, **24**(10): 1248-1253.
- [43] Kim D, Oren R, Oishi A C, *et al.* Sensitivity of stand transpiration to wind velocity in a mixed broadleaved deciduous forest [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2014, **187**: 62-71.

CONTENTS

Ozone Source Apportionment at Urban Area during a Typical Photochemical Pollution Episode in the Summer of 2013 in the Yangtze River Delta	LI Hao, LI Li, HUANG Cheng, <i>et al.</i> (1)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient VOCs in Winter and Spring in Xiamen	XU Hui, ZHANG Han, XING Zhen-yu, <i>et al.</i> (11)
Temporal and Spatial Characteristics of Atmospheric NO ₂ over Hainan Island and the Pollutant Sources in Recent 10 Years	FU Chuan-bo, CHEN You-long, DAN Li, <i>et al.</i> (18)
Composition of Organic Carbon/Elemental Carbon and Water-soluble Ions in Rice Straw Burning	HONG Lei, LIU Gang, YANG Meng, <i>et al.</i> (25)
Gas Chromatography with a Pulsed Discharge Helium Ionization Detector for Measurement of Molecular Hydrogen(H ₂) in the Atmosphere	LUAN Tian, FANG Shuang-xi, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (34)
Partial Pressure of CO ₂ and CO ₂ Degassing Fluxes of Huayankou and Xiaolangdi Station Affected by Xiaolangdi Reservoir	ZHANG Yong-ling, YANG Xiao-lin, ZHANG Dong (40)
Distribution of Biogenic Organic Dimethylated Sulfur Compounds and Its Influencing Factors in the East China Sea in Summer	LI Jiang-ping, ZHANG Hong-hai, YANG Gui-peng (49)
Remote Sensing Estimation of Total Suspended Matter Concentration in Xin'anjiang Reservoir Using Landsat 8 Data	ZHANG Yi-bo, ZHANG Yun-lin, ZHA Yong, <i>et al.</i> (56)
Spatio-temporal Characteristics and Source Identification of Water Pollutants in Wenruiang River Watershed	MA Xiao-xue, WANG La-chun, LIAO Ling-ling (64)
Effect of Hydrochemistry Characteristics Under Impact of Human Activity: A Case Study in the upper Reaches of the Xijiang River Basin	YU Shi, SUN Ping-an, DU Wen-yue, <i>et al.</i> (72)
Annual Variation of Different Phosphorus Forms and Response of Algae Growth in Meiliang Bay of Taihu Lake	WANG Ming, WU Xiao-fei, LI Da-peng, <i>et al.</i> (80)
Distribution of Transferable Nitrogen in Poyang Lake Sediments and Its Response to the Variation of River-Lake Relationship	SHEN Hong-yan, ZHANG Mian-mian, NI Zhao-kui, <i>et al.</i> (87)
Effect of Environmental Factors on Macroinvertebrate Community Structure in the Huntai River Basin in the Huntai River Basin	LI Yan-li, LI Yan-fen, XU Zong-xue (94)
Effects of Outbreak and Extinction of Algal Blooms on the Microbial Community Structure in Sediments of Chaohu Lake	DIAO Xiao-jun, LI Yi-wei, WANG Shu-guang (107)
Impacts of Algal Blooms Accumulation on Physiological Ecology of Water Hyacinth	WU Ting-ting, LIU Guo-feng, HAN Shi-qun, <i>et al.</i> (114)
Speciation and Spatial-temporal Variation of Mercury in the Xiaolangdi Reservoir	CHENG Liu, MAO Yu-xiang, MA Bing-juan, <i>et al.</i> (121)
Spatial Distribution of Mercury in Soils of a Typical Small Agricultural Watershed in the Three Gorges Reservoir Region	WANG Ya, ZHAO Zheng, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (130)
Temporal and Spatial Variation of Mercury in Water of Agro-forestry and Livestock Compound Watershed in the Three Gorges Reservoir Area	ZHAO Zheng, WANG Ya, MU Zhi-jian, <i>et al.</i> (136)
Effect of External Condition on the Static Migration and Release of Dibutyl-phthalate in the Soil of the Fluctuating Zone of the Three Gorges Reservoir to the Overlying Water	SONG Jiao-yan, MU Zhi-jian, WANG Qiang, <i>et al.</i> (143)
Ultraviolet-Visible(UV-Vis) and Fluorescence Spectral Characteristics of Dissolved Organic Matter(DOM) in Soils of Water-Level Fluctuation Zones of the Three Gorges Reservoir Region	GAO Jie, JIANG Tao, LI Lu-lu, <i>et al.</i> (151)
Characterization of Chromophoric Dissolved Organic Matter(CDOM) in Zhoushan Fishery Using Excitation-Emission Matrix Spectroscopy(EEMs) and Parallel Factor Analysis(PARAFAC)	ZHOU Qian-qian, SU Rong-guo, BAI Ying, <i>et al.</i> (163)
Pollution Characteristics and Distribution of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Organochlorine Pesticides in Groundwater at Xiaodian Sewage Irrigation Area, Taiyuan City	LI Jia-le, ZHANG Cai-xiang, WANG Yan-xin, <i>et al.</i> (172)
Risk Assessment and Analysis of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Surface Sediments of Xinglin Bay Suburb Rivers of Xiamen	CHENG Qi-ming, HUANG Qing, LIAO Zhen-ni, <i>et al.</i> (179)
Comparative Analysis of Two Different Methods for Risk Assessment of Groundwater Pollution: A Case Study in Beijing Plain	WANG Hong-na, HE Jiang-tao, MA Wen-jie, <i>et al.</i> (186)
Transportation and Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Water-Soil from the Riparian Zone of Daye Lake, China	ZHANG Jia-quan, LI Xiu, ZHANG Quan-fa, <i>et al.</i> (194)
Arsenic Removal by Coagulation Process and the Field Expanding Experiments for Yangzonghai Lake	CHEN Jing, ZHANG Shu, YANG Xiang-jun, <i>et al.</i> (202)
Efficient Oxidative Degradation of Tetrabromobisphenol A by Silver Bismuth Oxide	CHEN Man-tang, SONG Zhou, WANG Nan, <i>et al.</i> (209)
Removal of Tetracycline by a Kind of Nano-Sized Amorphous Carbon	WU Yi-xiao, LI Ai-min, WANG Di-hua, <i>et al.</i> (215)
Adsorption Behavior of Anionic Dyes onto Magnetic Chitosan Derivatives	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, ZHAO Yan, <i>et al.</i> (221)
Forming Mechanism of Humic Acid-Kaolin Complexes and the Adsorption of Trichloroethylene	ZHU Xiao-jing, HE Jiang-tao, SU Si-hui (227)
Impact on the Microbial Community of Municipal Sewage in the ANAMMOX System During the Cooling Process	ZHAO Zhi-rui, MIAO Zhi-jia, LI Duo, <i>et al.</i> (237)
Application of FISH-NanoSIMS Technique in Environmental Microbial Ecology Study	CHEN Chen, BAI Yao-hui, LIANG Jin-song, <i>et al.</i> (244)
Influence of Microcystin-LR on Cell Viability and Surface Characteristics of <i>Pseudomonas putida</i>	DENG Ting-jin, YE Jin-shao, PENG Hui, <i>et al.</i> (252)
Screening, Combination of Microbial Deodorizer and the Optimization of Its Deodorizing Conditions	ZENG Su, LI Nan-hua, SHENG Hong-chan, <i>et al.</i> (259)
Distribution and Enrichment Characteristics of Organochlorine Pesticides in Water and Halobios from Qingbang Island in Zhoushan, China	ZHANG Ze-zhou, XING Xin-li, GU Yan-sheng, <i>et al.</i> (266)
Levels of Polychlorinated Biphenyls in Tibetan and Yi Adolescents' Hair from Liangshan Prefecture, Sichuan Province	ZHOU Ying, SUN Yi-ming, JIN Jun, <i>et al.</i> (274)
Effects of Single and Co-Exposure of Cu and Chlorpyrifos on the Toxicity of Earthworm	XU Dong-mei, WANG Yan-hua, WANG Nan, <i>et al.</i> (280)
Effect of Exogenous Selenium on Accumulation and Chemical Forms of Cadmium in Cucumber(<i>Cucumis sativus</i> L.)	XIONG Shi-juan, LIU Jun, XU Wei-hong, <i>et al.</i> (286)
Pollution Characteristics of Platinum Group Elements in Road Rust in Xiamen	HONG Zhen-yu, HONG You-wei, YIN Li-qian, <i>et al.</i> (295)
Spatial Distribution of Se in Soils from Different Land Use Types and Its Influencing Factors Within the Yanghe Watershed, China	SHANG Jing-min, LUO Wei, WU Guang-hong, <i>et al.</i> (301)
Immobilization Impact of Different Fixatives on Heavy Metals Contaminated Soil	WU Lie-shan, ZENG Dong-mei, MO Xiao-rong, <i>et al.</i> (309)
Form Tendency and Bio-availability Dynamics of Cu and Zn in Different Farm Soils After Application of Organic Fertilizer of Livestock and Poultry Manures	SHANG He-ping, LI Yang, ZHANG Tao, <i>et al.</i> (314)
Analysis of Composition Characteristics of Municipal Solid Waste in South China	ZHANG Hai-long, LI Xiang-ping, QI Jian-ying, <i>et al.</i> (325)
Sewage Sludge Conditioning by Bioleaching Combined with Fenton-like Oxidation	LIU Chang-geng, ZHANG Pan-yue, JIANG Jiao-jiao, <i>et al.</i> (333)
Applicability of Bisphenol A Detection by a Planar Waveguide Fluorescent Biosensor	XU Wei-qi, ZHANG Yong-ming, ZHOU Xiao-hong, <i>et al.</i> (338)
A New "Turn-on" Fluorescent Probe for Visual Detection of Hydrogen Sulfide	LIU Chun-xia, MA Xing, WEI Guo-hua, <i>et al.</i> (343)
Analysis of Sap Flow Characteristics of the Chinese Pine in Typical Loess Plateau Region of China	ZHANG Han-dan, WEI Wei, CHEN Li-ding, <i>et al.</i> (349)
Simultaneous Production of Hydrogen and Volatile Fatty Acid from <i>Macrocystis pyrifera</i>	ZHAO Xiao-xian, FAN Xiao-lei, GUO Rong-bo, <i>et al.</i> (357)
Behaviors of Engineered Nanoparticles in Aquatic Environments and Impacts on Marine Phytoplankton	LI Man-lu, JIANG Yue-lu (365)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2015年1月15日 第36卷 第1期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 1 Jan. 15, 2015

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市 2871 信箱(海淀区双清路 18 号, 邮政编码: 100085) 电话: 010-62941102, 010-62849343 传真: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街 16 号 邮政编码: 100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京 399 信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国 内 定 价: 120.00 元

国外发行代号: M 205

国 内 外 公 开 发 行