

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第33卷 第5期 Vol.33 No.5 2013

中国生态学学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报 (SHENTAI XUEBAO)

第33卷 第5期 2013年3月 (半月刊)

目 次

前沿理论与学科综述

- 氮沉降对森林土壤有机质和凋落物分解的影响及其微生物学机制 王晶苑, 张心昱, 温学发, 等 (1337)
工业大麻对重金属污染土壤的治理研究进展 梁淑敏, 许艳萍, 陈 裕, 等 (1347)
最佳管理措施评估方法研究进展 孟凡德, 耿润哲, 欧 洋, 等 (1357)
灌木年轮学研究进展 芦晓明, 梁尔源 (1367)

个体与基础生态

- 华北落叶松夜间树干液流特征及生长季补水格局 王艳兵, 德永军, 熊 伟, 等 (1375)
土壤干旱胁迫对沙棘叶片光合作用和抗氧化酶活性的影响 裴 斌, 张光灿, 张淑勇, 等 (1386)
湖北石首麋鹿昼间活动时间分配 杨道德, 李竹云, 李鹏飞, 等 (1397)
三种杀虫剂亚致死浓度对川硬皮肿腿蜂繁殖和搜寻行为的影响 杨 桦, 杨 伟, 杨春平, 等 (1405)

种群、群落和生态系统

- 三沙湾浮游动物生态类群演替特征 徐佳奕, 徐兆礼 (1413)
滇西北高原纳帕海湿地湖滨带优势植物生物量及其凋落物分解 郭绪虎, 肖德荣, 田 昆, 等 (1425)
安徽新安江干流滩涂湿地草本植物区系及物种多样性 杨文斌, 刘 坤, 周守标 (1433)
湿地芦苇根结合好气细菌群落时空分布及其与水质因子的关系 熊 薇, 郭逍宇, 赵 霖 (1443)
三种温带树种叶片呼吸的时间动态及其影响因子 王兆国, 王传宽 (1456)
不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应 周 洁, 张志强, 孙 阁, 等 (1465)
不同生态区域沙地建群种油蒿的钙组分特征 薛苹苹, 高玉葆, 何兴东 (1475)
藏北高寒草甸植物群落对土壤线虫群落功能结构的影响 薛会英, 胡 锋, 罗大庆 (1482)
铜尾矿废弃地土壤动物多样性特征 朱永恒, 沈 非, 余 健, 等 (1495)
环丙沙星对土壤微生物量碳和土壤微生物群落碳代谢多样性的影响 马 驿, 彭金菊, 王 芸, 等 (1506)
基于生态水位约束的下辽河平原地下水生态需水量估算 孙才志, 高 翳, 朱正如 (1513)

景观、区域和全球生态

- 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等 (1524)
不同护坡草本植物的根系特征及对土壤渗透性的影响 李建兴, 何丙辉, 谌 芸 (1535)
京沪穗三地近十年夜间热力景观格局演变对比研究 孟 丹, 王明玉, 李小娟, 等 (1545)
窟野河流域河川基流量变化趋势及其驱动因素 雷泳南, 张晓萍, 张建军, 等 (1559)
模拟氮沉降条件下木荷幼苗光合特性、生物量与 C、N、P 分配格局 李明月, 王 健, 王振兴, 等 (1569)
铁炉渣施加对稻田甲烷产生、氧化与排放的影响 王维奇, 李鹏飞, 曾从盛, 等 (1578)

资源与产业生态

- 食用黑粉菌侵染对茭白植株抗氧化系统和叶绿素荧光的影响 闫 宁, 王晓清, 王志丹, 等 (1584)

- 佛手低温胁迫相关基因的差异表达 陈文荣,叶杰君,李永强,等 (1594)
美洲棘薺马对不同蔬菜寄主的偏好性 朱亮,石宝才,官亚军,等 (1607)
茉莉酸对棉花单宁含量和抗虫相关酶活性的诱导效应 杨世勇,王蒙蒙,谢建春 (1615)
造纸废水灌溉对毛白杨苗木生长及养分状况的影响 王烨,席本野,崔向东,等 (1626)
基于数据包络分析的江苏省水资源利用效率 赵晨,王远,谷学明,等 (1636)

研究简报

- 太岳山不同郁闭度油松人工林降水分配特征 周彬,韩海荣,康峰峰,等 (1645)
基于 TM 卫星影像数据的北京市植被变化及其原因分析 贾宝全 (1654)
薇甘菊萎焉病毒感染对薇甘菊光合特性和 4 种酶活性的影响 王瑞龙,潘婉文,杨娇瑜,等 (1667)
第七届现代生态学讲座、第四届国际青年生态学者论坛通知 (I)
中、美生态学会联合招聘国际期刊主编 (i)

期刊基本参数:CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 338 * zh * P * ¥ 90.00 * 1510 * 34 * 2013-03



封面图说:美丽的油松松枝——油松又称红皮松、短叶松。树高可达 30m,胸径达 1m。其树皮下部灰褐色,裂成不规则鳞块;针叶 2 针一束,暗绿色,较粗硬;球果卵形或卵圆形,长 4—7cm,有短柄,与枝几乎成直角。油松适应性强,根系发达,树姿雄伟,枝叶繁茂,有良好的保持水土和美化环境的功能,是中国北方广大地区最主要的造林树种之一,在华北地区无论是山区或平原到处可见,人工林很多,一般情况下在山区生长最好。在山区生长的油松,多在阴坡、半阴坡,土壤湿润和较肥沃的地方。

彩图及图说提供:陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

DOI: 10.5846/stxb201209141295

周洁, 张志强, 孙阁, 方显瑞, 查同刚, 张燕, 王小平, 陈俊崎, 陈吉泉. 不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应. 生态学报, 2013, 33(5): 1465-1474.

Zhou J, Zhang Z Q, Sun G, Fang X R, Zha T G, Zhang Y, Wang X P, Chen J Q, Chen J Q. Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1465-1474.

不同土壤水分条件下杨树人工林水分利用效率对环境因子的响应

周洁¹, 张志强^{1,*}, 孙阁², 方显瑞¹, 查同刚¹, 张燕¹, 王小平³,
陈俊崎³, 陈吉泉⁴

(1. 北京林业大学水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2. Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, U.S.A.;

3. 北京市林业碳汇工作办公室, 北京 100085; 4. Landscape Ecology & Ecosystem Science, University of Toledo, Toledo, OH 43606-3390, U.S.A.)

摘要:运用涡度相关(Eddy covariance, EC)开路系统和微气象观测系统,于2007年对位于北京市大兴区永定河沙地杨树(*Populus euramericana*)人工林与大气间碳、水和能量交换进行了连续测定。通过分析总生态系统生产力(GEP)、蒸发散(ET)以及水分利用效率($WUE = GEP/ET$)随相对土壤含水量(REW)的变化趋势,探讨杨树人工林不同土壤水分条件下水分利用效率对气象因子以及下垫面因素的响应,为杨树人工林经营管理提供理论依据。研究结果表明:当 $REW < 0.1$ 时, GEP 和 ET 受到严重水分胁迫的影响维持在较低水平,环境因子对 GEP 、 ET 和 WUE 的影响较小;当 $0.1 < REW < 0.4$ 时, GEP 和 ET 随着土壤体积含水量(VWC)的增加而增大, WUE 随VWC的增大而减小; $REW > 0.4$ 时,气象因子是影响碳固定和水分损耗的主要原因,由于 ET 对气象因子变化的响应较 GEP 更为敏感,因此, WUE 随空气饱和水汽压差(VPD)的增大而减小。沙地土壤保水能力较差,不能保证土壤水分被植物有效利用,因此当VWC处于5.2%—8.8%($0.1 < REW < 0.4$)范围时,碳固定与水分消耗达到最高效率。研究表明杨树人工林 WUE 随降水变化而变化,未来气候变化和变异有可能影响杨树林耗水和生产力之间的关系。

关键词:总生态系统生产力; 生态系统蒸发散; 生态系统水分利用效率; 涡度相关; 土壤相对含水量; 杨树人工林

Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions

ZHOU Jie¹, ZHANG Zhiqiang^{1,*}, SUN Ge², FANG Xianrui¹, ZHA Tonggang¹, ZHANG Yan¹, WANG Xiaoping³, CHEN Junqi³, CHEN Jiquan⁴

1 Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Eastern Forest Environmental Threat Assessment Center, USDA Forest Service, Raleigh, NC 27606, U.S.A

3 Forestry Carbon Sink Management Office, Beijing, 100085, China

4 Landscape Ecology & Ecosystem Science, University of Toledo, Toledo, OH 43606-3390, U.S.A

Abstract: An open path eddy-covariance (EC) system and a microclimate monitor system were employed to continuously measure the carbon, water, and energy exchange between a poplar (*Populus euramericana*) plantation and the atmosphere during the growing season of 2007. The study site was located on dried flood plain dominated by sandy soils in Daxing

基金项目:国家林业行业科研专项(201204102);北京市教育委员会共建项目;北京市林业碳汇工作办公室观测运行基金;教育部重点项目(105027);高等学校博士专项科研基金(20040022013);中美碳联盟USCCC国际合作项目资助

收稿日期:2012-09-14; 修订日期:2013-01-16

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zhqzhang@bjfu.edu.cn

District, southern Beijing, China. The objectives of our study were to a) qualify the dynamics of carbon, water fluxes and water-use efficiency (*WUE*) at an ecosystem level under various soil water conditions and b) examine the effects of environmental factors influencing *WUE* under different soil moisture conditions.

We found that there was a significant relationship between gross ecosystem productivity (*GEP*) and evapotranspiration (*ET*) under different soil water. When relative extractable soil water (*REW*) was less than 0.1, both *GEP* and *ET* maintained at a low level and did not change with the variation of environmental factors. *GEP* and *ET* increased as soil water contents (*VWC*) increased, but the greater effect of *VWC* on *ET* over *GEP* resulted in negative correlation between *WUE* and *VWC* when $0.1 < \text{REW} < 0.4$. When *REW* was higher than 0.4, climate factors showed a significant influence on the variation of *GEP* and *ET* through stomata. Air temperature (T_a) and photosynthetically active radiation (*PAR*) were the main factors for the variation of *GEP* while air temperature (T_a) and saturated vapor pressure deficit (*VPD*) showed a significant effect on changes of *ET*. *WUE* decreased with the increasing *VPD* due to the higher sensitivity of *ET* to *VPD* than *GEP*. *VWC* was between 5.2% and 8.8% ($0.1 < \text{REW} < 0.4$) in this fast-growing poplar plantation, vegetation could utilize soil water efficiently and reached high rates of water use efficiency and carbon sequestration. We concluded that soil water condition was a key factor influencing *WUE* of the poplar plantation. Assessment of forest carbon sequestration and water consumption under a climate change environment must consider future precipitation regime in the study region.

Key Words: eddy covariance, evapotranspiration, water use efficiency, gross ecosystem productivity, poplar plantation, relative extractable soil water

杨树是我国人工林造林面积最大的树种^[1],它被广泛用于用材林、城市绿化以及碳汇造林等诸多方面。杨树生长快,易于繁殖,拥有较高的生产力和生物量,但同时也通过蒸腾和截留作用消耗着大量的水分,是耗水相对较高的树种之一。水是限制陆地生物活动的重要因子之一^[2],尤其在干旱半干旱地区水资源对陆地生物影响更为突出^[3]。生态系统水分利用效率(*WUE*)作为表征生态系统消耗单位水量所获得生产力的指标^[4],能够更好地量化生态系统碳固定和水分消耗的关系。因此,正确分析水分对杨树人工林 *WUE* 的影响对深入了解杨树人工林生产能力和资源损耗的关系,以及对实施植树造林政策、进行森林管理有着重要意义。

随着环境问题的日益突出,气候变化对生态系统碳水循环及其耦合关系的影响得到广泛关注。全球通量网(*FLUXNET*)的建立为生态系统碳水通量研究提供了大量信息^[5-6]。研究者对不同生态系统 *WUE* 的变化趋势及影响因子进行了分析,结果显示,影响 *WUE* 变化的因素大致分为三类,即植被因素、环境因素和区域差异因素^[7-12]。近年来,国外对杨树人工林碳水通量及其关系进行了相关研究。Migliavacca 等运用涡度相关法对杨树人工林 *WUE* 进行了季节和年际变化的分析,认为随着干旱的到来,生态系统蒸发散(*ET*)变化不大,而总生态系统生产力(*GEP*)却有较大下降,因此 *WUE* 减小^[13]。然而,国内对杨树人工林生态系统尺度 *WUE* 的研究还较为有限,并且多数研究将杨树生态系统碳水通量分开研究^[14-15],并未在生态系统尺度分析两者的耦合关系。

本文运用涡度相关技术,于2007年对位于北京市大兴区永定河沿河沙地杨树人工林进行了连续动态测定,通过研究 *GEP* 和 *ET* 随相对土壤含水量(*REW*)的变化趋势,探讨杨树人工林生态系统不同土壤水分条件下碳水通量的环境响应。本文主要研究目的在于:(1)了解不同水分条件下,生态系统碳-水间的耦合关系;(2)分析水分亏缺对总生态系统生产力、蒸发散及两者关系的影响;(3)探讨碳水通量与环境因子、植物自身气孔行为的关系,以期认识各因子在不同水分条件下对碳-水通量及其关系的调控作用,旨在为提高水分利用效率的杨树集约栽培和经营管理提供理论依据。

1 材料及方法

1.1 研究区概况

试验地位于北京市南郊大兴区榆垡镇大兴林场,属暖温带亚湿润气候区。年平均气温为 11.6℃,极端最

低气温-27.4℃,极端最高温度40.6℃;多年平均降雨为556mm(1990—2009年),其中7—9月份降雨占全年降雨总量的60%—70%(大兴气象站,116°15'07"E,39°31'50"N,1956—2000年观测数据)。试验区为海河水系永定河洪积区,地势平坦,平均海拔30m,坡度<5°。土壤为冲积性沙壤土,通透性好,保肥蓄水能力差,土壤pH值为8.25—8.39,容重1.43—1.47g/cm³。地下水位年平均降幅达3.9%。

试验区主要为集约栽培的欧美107杨树人工纯林,75%为2002年种植,其余为1998年、2001年和2003年种植,株行距为2 m×2 m,林分均匀整齐。2007年林木平均胸径为12.2cm,平均树高为13m,叶面积指数为2.66m²/m²。林下植物种类较少,多为草本植物,少有灌木,优势种为灰绿藜(*Chenopodium glaucum*),伴生有紫花苜蓿(*Medicago sativa*),黄香草木樨(*Melilotus officinalis*),猪毛菜(*Salsola collina*),蒺藜(*Tribulus terrestris*)等。

1.2 试验方法

该试验区下垫面平坦均匀,符合涡度相关法观测要求。利用涡度相关法在试验站点中心架设一高22.5m的观测塔。主要观测仪器包括净辐射仪(REBS, Seattle, WA)、日照强度计(LI200 X-L, Li-Cor, NE)、光量子传感器(LI190 SB-L, Li-Cor, NE)、H₂O/CO₂红外气体分析仪(LI-7500, Li-Cor, NE)、三维超声风速仪(CSAT3, CS, USA),以上各仪器安装高度均为18m;气压计(CS105, CS, USA)和翻斗式自动雨量计(TE525-L, CS, USA)安装高度分别为21m和22.5m;空气温湿度传感器(HMP45C probe, CS, USA)在5、10、15、20m高度处各安装一套;土壤温度传感器(TCAV107, CS, USA)和土壤热通量板(HFT3, Seattle, WA)均置于地表以下5、10、20cm处;土壤水分观测仪TDR(CS616, CS, USA)位于地表以下5cm和20cm处。所有气象资料均采用数据采集器(CR5000, CS, USA)每30min自动记录1次。

1.3 数据处理和计算

1.3.1 数据处理及生态系统GEP、ET和WUE的计算方法

由于气象、地形、植被和仪器系统等的影响,涡度相关系统观测获得的数据必须进行质量控制和质量分析。为了简化流程并将大量数据处理程序化,运用EC-processor程序^[16]自动实现涡度相关系统数据的剔除、坐标转换、质量控制和质量分析。潜热通量和显热通量数据经过WPL矫正^[17],消除水热传输造成的CO₂通量变化的密度效应,然后通过三维坐标旋转矫正三维风速,从而使得垂直风向风速的平均值为零,水平风速方向与主导方向一致。

本研究将WUE定义为GEP和ET的比值。用涡度相关技术观测的碳通量为净生态系统碳交换量(NEE),它与净生态系统生产力(NEP)的绝对值相等,但符号相反。即:GEP=-NEE+R_e,式中R_e为生态系统呼吸总量。在以往的研究中经常使用仅将温度作为生态系统呼吸影响因子的^[18]公式,然而,由于土壤呼吸的复杂性,只考虑温度因素不足以正确的描述土壤呼吸对环境的响应^[19],本研究采用Law model指数方程^[20]来计算生态系统呼吸,同时考虑温度与土壤水分的综合影响。

1.3.2 冠层导度(G_s)的计算方法

ET对环境因子的响应主要受到冠层导度(G_s)的影响,本文根据Penman-Monteith方程计算植被在冠层尺度对水汽的导度^[21]:

$$G_s^{-1} = \left(\frac{\Delta}{\gamma} \cdot \frac{R_n}{\lambda E} - \frac{\Delta}{\gamma} - 1 \right) \cdot r_a + \frac{\rho C_p}{\gamma} \cdot \frac{VPD}{\lambda E} \quad (1)$$

式中,G_s为冠层导度(m/s),Δ为空气饱和水汽压差随温度的变化斜率(kPa/K),γ为干湿球常数(kPa/K),R_n为观测高度的净辐射(W/m²),λE为涡度相关技术观测的潜热通量(W/m²),r_a为大气边界层的空气动力学阻抗(s/m),ρ为空气密度(kg/m³),C_p为在恒定压力下的空气热容(kJ kg⁻¹ K⁻¹),VPD为空气饱和水汽压差(kPa)。其中,r_a是根据Monin-Obukhov的相似理论和中性条件下的假设来估算的,

$$r_a = \frac{\ln[(z-d)/z_0] \cdot \ln[(z-d)/z_{0v}]}{\kappa^2 \mu} \quad (2)$$

式中, Z 为风速的观测高度 (m), d 为零平面位移 (m), z_0 为动量粗糙度 (m), z_{0v} 为水汽压的粗糙度 (m), κ 为卡门常数, 一般取值为 0.4, μ 为观测高度的风速 (m/s)。本文零平面位移 d 假定为 0.8 倍冠层高度, z_0 为 0.1 倍冠层高度, z_{0v} 为 0.01 倍冠层高。

1.3.3 相对土壤含水量 (REW)

由于土壤质地不同, 土壤含水量并不是最好的衡量生态系统水分多寡的标准, 相对土壤含水量 (REW) 成为衡量土壤水分的良好指标。即: $REW = (VWC - VWC_{min}) / (VWC_{max} - VWC_{min})$, 式中 VWC 为土壤体积含水量 (%), VWC_{min} 和 VWC_{max} 为研究中最小和最大土壤体积含水量 (%)。研究认为, 当 $REW < 0.4$ 时, 生态系统受到土壤水分胁迫的影响^[22-23]。

1.3.4 能量闭合

对系统内能量闭合程度分析是检验 EC 法观测数据质量的有效手段^[24-26], 本文采用潜热通量和显热通量之和 ($LE+Hs$) 与可提供能量 ($Rn-G$) 两者的线性回归方程方法, 对 2007 年该生态系统经质量控制后的 30min 数据进行能量闭合分析, 所得回归直线斜率为 0.78 ($R^2 = 0.84$, $N = 13950$, $P < 0.0001$), 验证结果说明该站点的涡度相关法观测数据是可靠的^[25]。

2 结果与分析

2.1 环境因子季节变化特征

图 1 为研究区 2007 年环境因子季节变化特征图。从图中看出, 研究区冬季寒冷干燥, 夏季高温多雨, 各环境因子具有明显的季节变化特征。2007 年日平均气温变化范围为 -9.7 — 29.4 ℃, 其中, 最高温度出现在 7 月份, 年平均气温为 12.9 ℃, 高于多年平均温度 11.6 ℃ (1990—2009 年), 此外, 5 月份气温比多年同期平均水平高 (2 ± 0.5)℃ (1990—2009 年)。2007 年为湿润年, 年降雨量为 661 mm, 略高于多年平均降雨量 556 mm

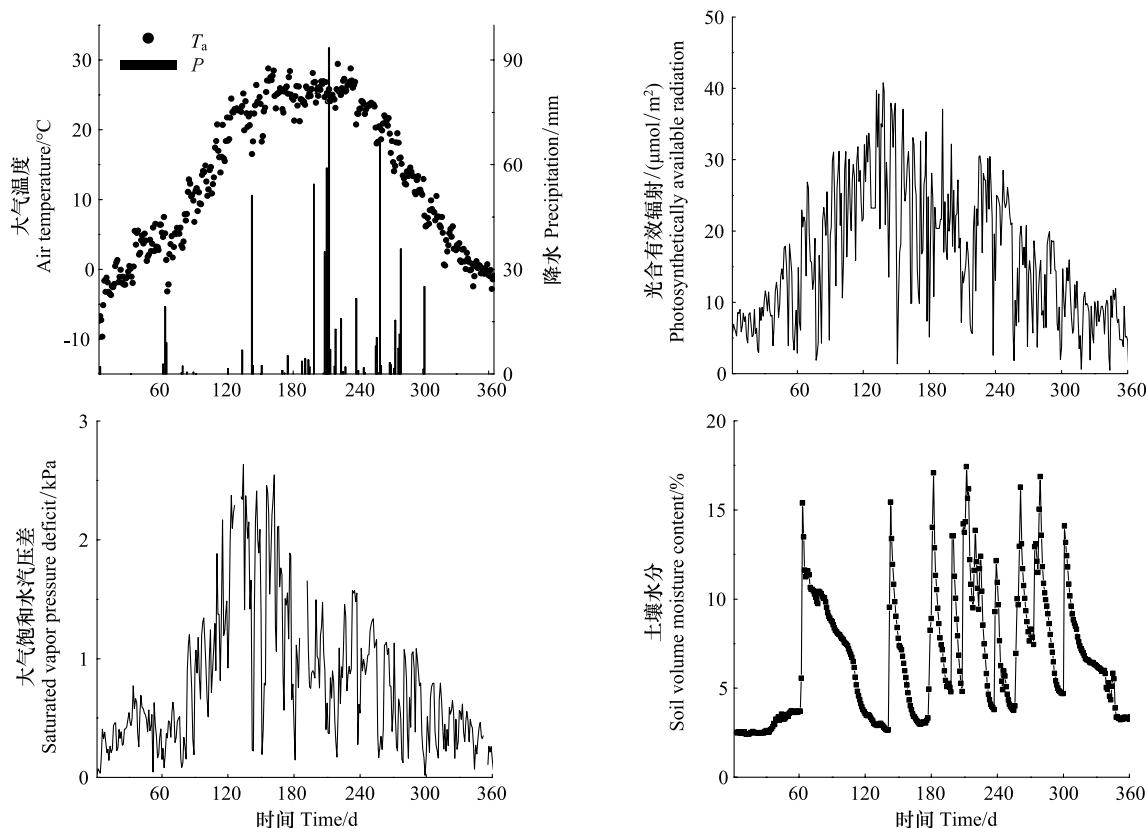


图 1 研究地 2007 年降雨量、光合有效辐射、大气温度、土壤体积含水量 (20cm) 和大气饱和水汽压差的季节变化

Fig. 1 The seasonal variation of precipitation (P), photosynthetically available radiation (PAR), air temperature (T_a), soil volume moisture content (VWC ; 20cm) and saturated vapor pressure deficit (VPD) at the polar plantation in Daxing site of Beijing in 2007

(1990—2000年),主要集中在7—9月份,然而,该研究区6月经历了高温少雨天气,月降雨量为6.4mm,仅为多年平均水平的10%(1990—2009年)。光合有效辐射(PAR)从冬季到夏季逐渐增加,随后逐渐降低。大气饱和水汽压差(VPD)在温度较低的冬季达到极小值,在高温干旱条件下达到极大值。土壤水分(VWC)与降雨量变化较为一致,生长季保持在4.5%—15.0%之间,6月份出现夏季干旱,土壤水分仅为3%。

2.2 土壤水分对水分利用效率的影响

GEP 和 *ET* 之间存在线性相关性,二者斜率可做为衡量生态系统水分利用效率的标准^[27]。基于2007年生长季日尺度数据进行的相关分析发现,*GEP* 和 *ET* 在不同土壤水分条件下存在较为显著的线性相关性($REW < 0.1$: $R^2 = 0.86$, $P < 0.001$; $0.1 < REW < 0.4$: $R^2 = 0.51$, $P < 0.001$; $REW > 0.4$: $R^2 = 0.52$, $P < 0.001$),*GEP* 随 *ET* 的增加而增大,但两者斜率(*WUE*)随着土壤水分的增加而逐渐减小($REW < 0.1$: 2.1; $0.1 < REW < 0.4$: 1.7; $REW > 0.4$: 1.5)(图2)。表1可知, $REW < 0.1$,生态系统由于受到了严重的水分限制,*GEP* 和 *ET* 维持在较低水平,随着土壤水分的增加,生态系统*GEP* 和 *ET* 明显增大,但*GEP* 的增加幅度小于*ET*,导致*WUE* 减小。 $0.1 < REW < 0.4$, 生态系统*GEP* 与未受土壤水分胁迫条件下*GEP* 相似,但*ET* 却低于水分充足条件,因此*WUE* 表现出增加趋势,说明土壤水分并未被植物有效利用。

相关研究得到相似结果,认为干旱胁迫对蒸散的影响快于光合^[28-29]。光合作用除受到气孔的限制外,还受到内部CO₂扩散阻力(运送和羧化作用阻力)的影响,因此,在水分胁迫条件下植物的*WUE* 值高^[30]。但其他研究却发现,随着夏季干旱的到来,*ET* 值变化不大,而*GEP* 却有较大的下降,因此*WUE* 随水分胁迫有减小趋势^[13, 31-32]。还有研究认为,随土壤水分含量的减小,*ET* 和 *GEP* 同时减小,因此*WUE* 变化不大^[33]。Migliavacca 认为,造成上述差异的原因主要与地下水位的高低有关^[13],即使干旱,只要地下水位和植被根部相近,土壤也能为植被提供足够的水分来补偿不断消耗的水分。在本研究中,沙地具有保水能力差的特性,较差的土壤保水能力导致充足的土壤水分并未被植物有效利用,而通过蒸散回到大气中,因此造成在土壤水分胁迫条件下,*WUE* 反而高的结果。

表1 3种土壤水分条件下生态系统平均总初级生产力、蒸发散和水分利用效率对比

Table 1 Comparison of gross ecosystem productivity (*GEP*), evapotranspiration (*ET*) and water-use efficiency among different water conditions in the growing season of 2007

指标 Index	$REW < 0.1$	$0.1 < REW < 0.4$	$REW > 0.4$
总生态系统生产力均值 Gross ecosystem productivity (<i>GEP</i>)/(g C m ⁻² d ⁻¹)	3.5 ± 0.7	6.5 ± 1.2	6.5 ± 1.7
生态系统蒸发散均值 Ecosystem evaporation (<i>ET</i>)/(kg H ₂ O m ⁻² d ⁻¹)	1.2 ± 0.4	2.7 ± 1.0	3.2 ± 1.2
水分利用效率均值 Ecosystem water-use efficiency (<i>WUE</i>)/(gC kg ⁻¹ H ₂ O)	2.8 ± 0.9	2.6 ± 0.8	2.0 ± 0.9

2.3 不同土壤水分条件下水分利用效率对环境因子的响应

环境因素是影响生态系统碳水耦合的重要驱动因子。为了进一步分析该生态系统碳固定和水分蒸散的控制机制,该文分别探讨不同土壤水分条件下碳水通量对环境因子的响应特征。生态系统*GEP* 和 *ET* 的变化主要受到气象因子和下垫面条件的影响,气象因子主要包括:气温(T_a)、大气饱和水汽压差(*VPD*)、光合有效辐射(*PAR*);下垫面因子为土壤水分(*VWC*)和土壤温度(T_s)。对生长季半小时数据,采用多元线性逐步回

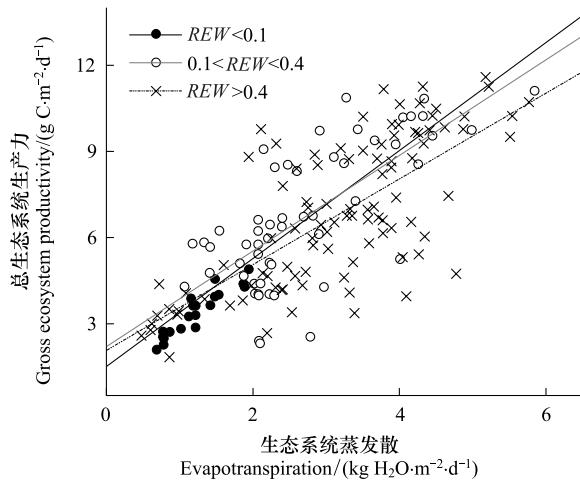


图2 2007年生长季(5—10月)不同土壤水分条件下总生态系统生产力和生态系统蒸发散关系图

Fig. 2 Relationship between gross ecosystem productivity (*GEP*) and evapotranspiration (*ET*) at different water conditions in growing seasons of 2007

归分析中自后淘汰变量法,得到不同土壤水分条件下,生态系统 GEP 、 ET 和 WUE 与各因子的综合模型,

$$0.1 < REW < 0.4: \quad GEP = 0.843 VWC - 2.306, R^2 = 0.601, P < 0.0001$$

$$ET = 0.687 VWC - 2.158, R^2 = 0.627, P < 0.0001$$

$$WUE = -1.402 VWC + 8.022, R^2 = 0.481, P < 0.0001$$

$$REW > 0.4: \quad GEP = 0.107 T_a + 0.162 PAR + -0.952, R^2 = 0.732, P < 0.0001$$

$$ET = 0.032 T_a + 0.172 VPD - 0.525, R^2 = 0.792, P < 0.0001$$

$$WUE = -0.977 VPD + 3.602, R^2 = 0.671, P < 0.0001$$

$REW < 0.1$, 生态系统 GEP 和 ET 维持在较低水平, 各环境因子与其没有显著的相关性($R^2 < 0.2, P > 0.1$), 综合模型显著性较差($P = 0.095$)。说明在极度干旱条件下, 较低的土壤水分限制了植物的生理活动。由方程可以看出, 当 $0.1 < REW < 0.4$ 时, 生态系统 GEP 和 ET 分别与 VWC 呈正相关, 生态系统 WUE 与 VWC 呈负相关。当生态系统未受到土壤水分胁迫时, 生态系统 GEP 主要受到 T_a 和 PAR 的影响, ET 主要受到 T_a 和 VPD 的影响, 而 WUE 则主要与 VPD 呈负相关。

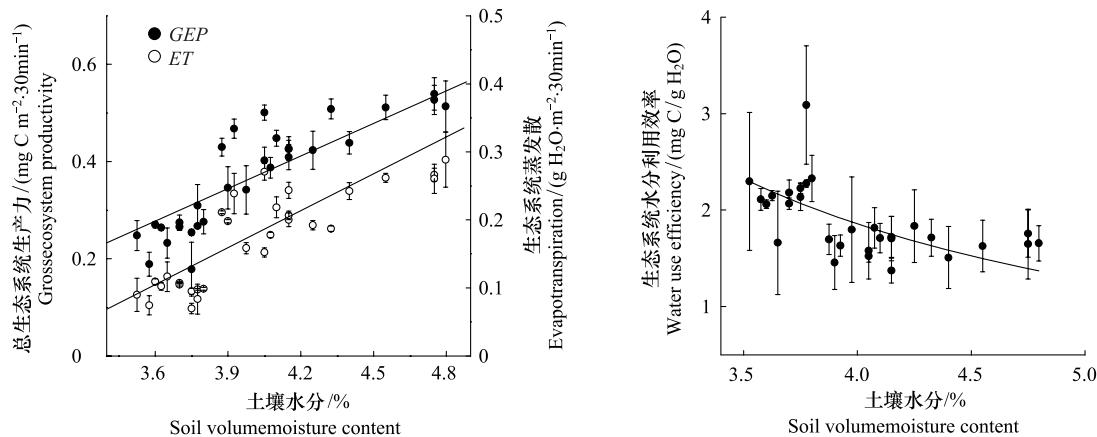


图3 $0.1 < REW < 0.4$ 条件下, 土壤水分对生态系统总生产力, 蒸发散和水分利用效率的影响, 误差线为标准差

Fig. 3 The effects of soil volume water moisture content in 20cm depth (VWC, 20cm) on gross ecosystem productivity (GEP), evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) at $0.1 < REW < 0.4$ conditions in the growing season of 2007, the error bar represent the SD

$0.1 < REW < 0.4$, 生态系统 GEP 和 ET 主要受到土壤水分影响, 而气候因子对生态系统碳固定和水分蒸发散影响不显著($R^2 < 0.35, P > 0.1$)。这一结果与宋霞等对亚热带人工林水分利用效率的研究较为一致, 研究显示, 夏季干早期, GEP 和 ET 对土壤湿度变化较为敏感, 而与净辐射之间没有显著的相关性^[34]。虽然 GEP 和 ET 随着 VWC 的增加而增大, 但由于 ET 对土壤水分变化更为敏感, 导致 ET 随 VWC 增大幅度大于 GEP (图3), 因此 WUE 随 VWC 增大而减小(图3)。土壤水分胁迫对气孔导度造成影响^[35], 而气孔导度对 ET 的影响快于 GEP ^[28-29], 因此 WUE 随着 VWC 的减小而增大。

当 $REW > 0.4$ 时, 生态系统 GEP 和 ET 主要受到气象因子的影响, 各因子通过控制气孔对冠层蒸散以及碳固定产生影响, 因此各气象因子与冠层导度的相关性是研究其与生态系统碳水通量及两者关系的关键。如图4所示, 冠层导度与气温(T_a) ($R^2 = 0.65, P < 0.001$) 和光合有效辐射(PAR) 呈显著的正相关关系($R^2 = 0.43, P < 0.001$)。 VPD 综合反映了大气中的湿度和温度状况, 其与 G_s 的关系如图4b所示, G_s 随着 VPD 的变化呈二次方关系($R^2 = 0.43, P < 0.001$), 当 $VPD < 1.5\text{kPa}$ 时, G_s 随 VPD 的增加而增大, 当 $VPD > 1.5\text{kPa}$ 时, G_s 随 VPD 的增大有减小趋势, 说明高 VPD 对 G_s 产生了抑制。有研究认为 G_s 与 VPD 呈现负的对数函数关系^[36], 但影响冠层导度的因素众多, 当 VPD 较小时, VPD 的增大并未限制植物气孔活动, 而此时 T_a 和 PAR 等气象因子对 G_s 有促进作用, 但随着 VPD 增大到一极值, 气孔会因为叶片水势的降低以及蒸腾的增加而闭合, 导致 G_s

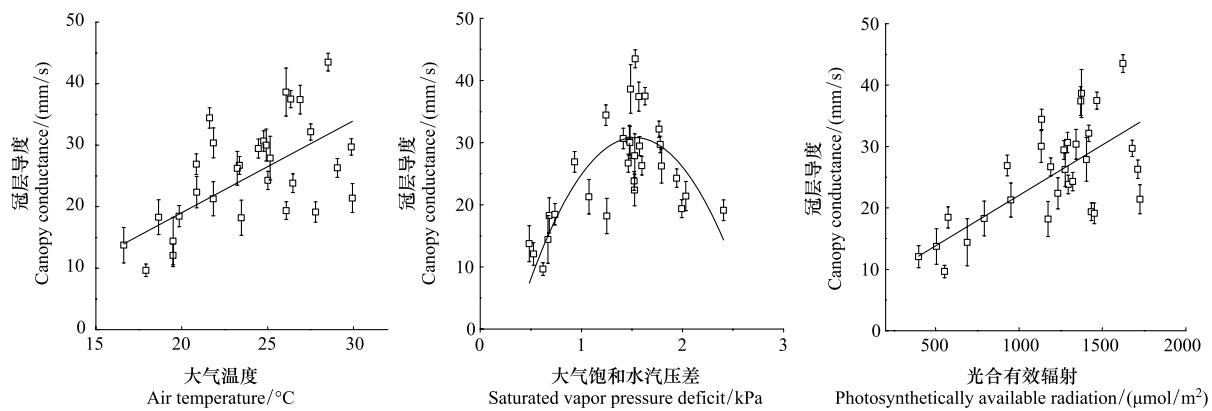
图4 $REW>0.4$ 条件下冠层导度与气象因子关系图,误差线为标准差

Fig. 4 Relationship between canopy conductance (G_s) and climatic variables at $REW>0.4$, the error bar represent the SD

减小。

$REW>0.4$ 条件下各因子对生态系统 GEP 和 ET 的影响如图 5 所示, 生态系统 GEP 分别与 T_a 和 PAR 呈显著的正相关关系 (T_a : $R^2=0.89$, $P<0.001$; PAR : $R^2=0.87$, $P<0.001$), 随其增加而增大(图 5)。生态系统 ET 和 T_a 呈显著的正相关关系 ($R^2=0.73$, $P<0.001$), 而 VPD 作为水汽蒸发的驱动力, 直接控制着地面的蒸发和植被的蒸腾速率, 当 $VPD<1.5\text{kPa}$ 时, ET 随着 VPD 的增加而变大, 但当 $VPD>1.5\text{kPa}$ 后, 高 VPD 会抑制冠层导度, 导致 ET 略有降低(图 5)。WUE 与 VPD 显示出显著负相关性 (图 5), 这一变化趋势与大多研究结果相似^[8, 10]。随着 VPD 的增大, 生态系统 GEP 和 ET 同时增大, 但生态系统 ET 对 VPD 的影响更为敏感, 因此导致 WUE 随 VPD 的增大而减小。但也有研究认为, WUE 与 VPD 的负相关性仅限于温带植被在夏季生长

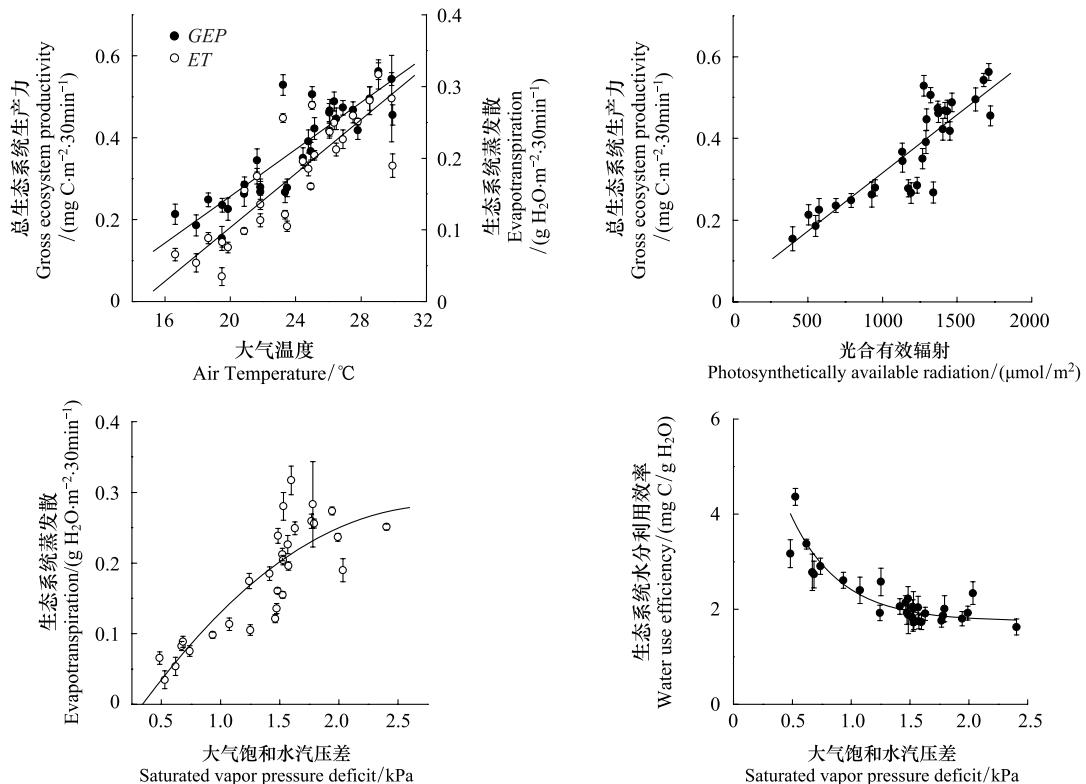
图5 $REW>0.4$ 条件下各气象因子对生态系统总生产力, 蒸发散和水分利用效率的影响, 误差线为标准差

Fig. 5 The effects of climatic factors on gross ecosystem productivity (GEP), evapotranspiration (ET) and water use efficiency (WUE) at $REW>0.4$ conditions in the growing season of 2007, the error bar represent the SD

季适用,在较寒冷地区和其他季节,温度和物候对 WUE 的影响占主导地位^[39]。

3 结论

通过分析北京大兴区永定河沙地杨树人工林生态系统 GEP、ET 和 WUE 的变化情况,讨论了不同土壤水分条件下气象因子和下垫面因素对 GEP、ET 和 WUE 的影响。研究发现,即使生态系统受到水分限制,杨树人工林仍然为碳汇。无论是否受到土壤水分胁迫,GEP 和 ET 都显示出较为显著的相关性。

当 $REW < 0.1$ 时,生态系统处于严重水分胁迫状态,土壤水分限制了植物的生理活动,植物受到水分胁迫的影响而关闭气孔,GEP 和 ET 维持在一较低水平,且不随各气象因子的变化发生改变。当生态系统处于土壤水分胁迫期间($0.1 < REW < 0.4$),随着土壤含水量的增加,植物气孔张开,冠层导度逐渐增大,生态系统 GEP 和 ET 受到 VWC 的影响随之迅速增大。未受水分胁迫时($REW > 0.4$),生态系统 GEP 和 ET 主要受到气象因子的影响,并与之呈正相关关系。

较差的土壤保水能力导致土壤水分对 ET 的影响大于 GEP,而气孔对蒸腾的直接控制导致 ET 对冠层导度的响应快于 GEP,因此当生态系统处于土壤水分胁迫期间($0.1 < REW < 0.4$),WUE 随着土壤含水量的增加而降低,未受水分胁迫时($REW > 0.4$),WUE 与 VPD 呈负相关关系。土壤水分胁迫期间,相似的 GEP 与较高的 WUE 说明,当 VWC 处于 5.2%—8.8% ($0.1 < REW < 0.4$) 范围时,土壤水分能够被植物有效利用,达到碳固定对水分消耗的最大效率。

本研究从较小时间尺度对比了不同水分条件下 GEP、ET 和 WUE 对各环境因子的响应,并未从不同时间尺度分析各环境因子与碳水通量之间的关系。此外,影响生态系统碳水耦合的因素很多,除了植被内部驱动力气孔行为控制和外部驱动力环境因子影响外,土壤蒸发也对 WUE 的变化产生很大作用。因此,在未来的研究中,要加强不同时空尺度对比分析,以及土壤蒸发对 ET 的影响研究,进一步了解杨树人工林生态系统碳水循环机理。

References:

- [1] Chinese Forestry Society. National Poplar Commission. Forest resource, timber production and poplar culture in China. In: 1st International Conference on the Future of Poplar, Rome, 2003. <http://www.fao.org/forestry/site/20587/en/>.
- [2] Sala O E, Parton W J, Joyce L A, Lauenroth W K. Primary production of the central grassland region of the United States. *Ecology*, 1988, 69 (1): 40-45.
- [3] Imanuel N M. Desert ecosystems: environment and producers. *Annual Review Ecology and Systematics*, 1973, 4: 51-58.
- [4] Yu G, Wang Q, Zhuang J. Modeling the water use efficiency of soybean and maize plants under environmental stresses: application of a synthetic model of photosynthesis-transpiration based on stomatal behavior. *Journal of Plant Physiology*, 2004, 161 (3): 308-318.
- [5] Baldocchi D D. Assessing the eddy covariance technique for evaluating carbon dioxide exchange rates of ecosystems: past, present and future. *Global Change Biology*, 2003, 9 (4), 479-492.
- [6] Barr A G, Black T A, Hogg E H, Griffis T J, Morgenstern K, Kljun N, Theede A, Nesic Z. Climatic controls on the carbon and water balances of a boreal aspen forest, 1994—2003. *Global Change Biology*, 2006, 12 (3), 1-16.
- [7] Veron S V, Paruelo J M, Sala O E, Lauenroth W K. Environmental controls of primary production in agricultural systems of the Argentine Pampas. *Ecosystems*, 2002, 5 (7): 625-635.
- [8] Law B E, Waring R H, Anthoni P M. Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem and an evaluation of two generalized models. *Global Change Biology*, 2000, 6 (2): 155-168.
- [9] Nogueira A, Martinez CA, Ferreira LL, Prado CHBA. Photosynthesis and water use efficiency in twenty tropical tree species of differing succession status in a Brazilian reforestation. *Photosynthetica*, 2004, 42 (3): 351-356.
- [10] Tang J, Paul V B, Brent E E, Ankur R D, Kenneth J D, Eileen V C. Sap flux-upscaled canopy transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency in an old growth forest in the Great Lakes region of the United States. *Geophysical Research*, Vol. 111, G02009.
- [11] Yu G R, Song X, Wang Q F. Water-use efficiency of forest ecosystems in eastern China and its relations to climatic variables. *New Phytologist*, 2008, 177(4): 927-937.
- [12] Kuglitsch F G, Reichstein M, Beer C, Carrara A, Ceulemans R, Granier A, Janssens IA, Koestner B, Lindroth A, Loustau D, Matteucci G, Montagnani L, Moors EJ, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Rebmann C, Schulze ED, Seufert G, Verbeeck H, Vesala T, Aubinet M, Bernhofer

- C, Foken T, Grunwald T, Heinesch B, Kutsch W, Laurila T, Longdoz B, Miglietta F, Sanz M J, Valentini R. Characterisation of ecosystem water-use efficiency of european forests from eddy covariance measurements, *Biogeosciences Discuss*, 2008, 5 (6), 4481-4519.
- [13] Migliavacca M, Meroni M, Manca G, Matteucci G, Montagnani L, Grassi G, Zenone T, Teobaldelli M, Goded I, Colombo R, Seufert G. Seasonal and interannual patterns of carbon and water fluxes of a poplar plantation under peculiar eco-climatic conditions. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2009, 149 (9) : 1460-1476.
- [14] Wei Y, Zhang X D, Jiang Z P, Zhou J X, Tang Y X, Wu L X, Huang L L, Gao S H. Study on the seasonal dynamic of Net Ecosystem Exchange over a poplar plantation of Yueyang city in Hu nan province. *Forest Research*, 2010, 23 (5) : 656-665.
- [15] Peng Z H, Wang Y, Ren H Q, Sun Q X, Zhou J X. Research on the variation of carbon flux and the relationship of environmental factors and carbon flux of populous forest ecosystem in the reaches of Yangtze River in Anqing. *Forest Research*, 2009, 22 (2) : 237-242.
- [16] Noormets A (2008). <http://www4.ncsu.edu/~anoorme/ECP/> [EB/OL].
- [17] Webb E K, Pearman G I, Leuning R. Correction of flux measurements for density effects due to heat and water vapour transfer. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1980, 106 (447) : 85-100.
- [18] Lloyd J, Taylor J A. On the temperature dependence of soil respiration. *Funcional Ecology*, 1994, 8(3) , 315-323.
- [19] Wen X F, Yu G R, Sun X M, Li Q K, Liu Y F, Zhang L M, Ren C Y, Fu Y L, Li Z Q. Soil moisture effect on the temperature dependence of ecosystem respiration in a subtropical *Pinus* plantation of southeastern China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2006, 137(3/4) : 166-175.
- [20] Fang X R, Zhang Z Q, Zha T G, Tan J R, Wang X P, Chen J Q, Chen J Q, Sun G. Ecosystem and soil respiration of a poplar plantation on a sandy floodplain in Northern China. *Acta Ecologica Sinica*, 2012, 32 (8) : 2401-2409.
- [21] Monteith J L. Evaporation and environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 1965, 19: 205-234.
- [22] Granier A, Bre'da N, Biron P, Villette S. A lumped water balance model to evaluate duration and intensity of drought constraints in forest stands. *Ecological Modelling*, 1999, 116 (2) : 269-283.
- [23] Bernier P Y, Bre'da N, Granier A, Raulier F, Mathieu F. Validation of a canopy gas exchange model and derivation of a soil water modifier for transpiration for sugar maple (*Acer saccharum* Marsh.) using sap flow density measurements. *Forest Ecology and Management*, 2012, 163 (1) : 185-196.
- [24] Mahrt L. Flux sampling errors for air craft and towers. *Journal of Atmospheric and ocean technology*, 1998, 15,416-29.
- [25] Wilson K, Goldstein A, Falge E, Aubinet M, Baldocchi D, Berbigier P, Bernhofer C, Ceulemans R, Dolman H, Field C, Grelle A, Ibrom A, Law B E, Kowalski A, Meyers T, Moncrieff J, Monson R, Oechel W, Tenhunen J, Valentini R, Werma S. Energy balance closure at FLUXNET sites. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113(1) , 223-43.
- [26] Williams D G, Cable W, Hultine K, Hoedjes J C B, Yepez E A, Simonneaux V, Er-Raki S, Boulet G, De Bruin H A R, Chehbouni A, Hartogensis O K, Timouk F. Evapotranspiration components determined by stable isotope, sap flow and eddy covariance techniques. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 125(3) , 241-258.
- [27] Law B E, Falge E, Gu L, Baldocchi D D, Bakwin P, Berbigier P, Davis K, Dolman A J, Falk M, Fuentes J D, Goldstein A, Grelle A, Hollinger D, Janssens I, Jarvis P, Jensen N O, Katul G, Mahli Y, Matteucci G, Monson R, Munger W, Oechel W, Olson R, Pilegaard K, Paw U K T, Thorgeirsson H, Valentini R, Verma S, Vesala T, Wilson K, Wlfysy S. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest METeorology*, 2002, 113(1) : 97-120.
- [28] Huber S C, Rogers H H, Mowry F L. Effects of water stress on photosynthesis and carbon partitioning in soybean [*Glycine max* (L.) Merr.] plants grown in the field at different CO₂ levels. *Plant Physiology*, 1984, 76 (1) : 244-249.
- [29] Nijs I, Impens I, Behaeghe T. Effects of long-term elevated atmospheric CO₂ concentration on *Lolium perenne* and *Trifolium repens* canopies in the course of a terminal drought stress period. *Canada Journal of Botony*, 1989, 67 (9) : 2720-2725.
- [30] Liang N, Maruyama K. Interactive effects of CO₂ enrichment and drought stress on gas exchange and water-use efficiency in *Alnus firma*. *Environmental and Experimental Botany*, 1995, 35 (3) : 353-361.
- [31] Reichstein M., Tenhunen J D, Roupsard O, Ourcival J M, Rambal S, Dore S, Valentini R. Ecosystem respiration in two Mediterranean evergreen Holm Oak forests: drought effects and decomposition dynamics. *Functional Ecology*, 2002, 16 (1) : 27-39.
- [32] Teskey R O, Gholz H L, Cropper J. Influence of climate and fertilization on net photosynthesis of mature slash pine. *Tree Physiology*, 1994, 14 (11) : 1215-1227.
- [33] Granier A, Reichstein M, Breda N, Janssens I A, Falge E, Ciais P, Grunwald T, Aubinet M, Berbigier P, Bernhofer C, Buchmann N, Facini O, Grassi G, Heinesch B, Ilvesniemi H, Keronen P, Knohl A, Kostner B, Lagergren F, Lindroth A, Longdoz B, Loustau D, Mateus J, Montagnani L, Nys C, Moors E, Papale D, Peiffer M, Pilegaard K, Pita G, Pumpanen J, Rambal S, Rebmann C, Rodrigues A, Seufert G, Tenhunen J, Vesala T, Wang Q. Evidence for soil water control on carbon and water dynamics in European forests during the extremely dry year: 2003. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2007, 143 (1/2) : 123-145.

- [34] Song X, Yu G R, Liu Y F, Sun X M, Lin Y M, Wen X F. The variation and effect of environmental factors on Water-use efficiency of subtropical plantation. *Science in China Ser. D Earth Sciences*, 2006, 36 (supplementary issue I) : 111-118.
- [35] Law B E, Waring R H, Anthoni P M. Measurements of gross and net ecosystem productivity and water vapour exchange of a *Pinus ponderosa* ecosystem and an evaluation of two generalized models. *Global Change Biology*, 2000, 6 (2) : 155-168.
- [36] Tang J, Paul V B, Brent E E, Ankur R D, Kenneth J D, Eileen V C. Sap flux-upscaled canopy transpiration, stomatal conductance, and water use efficiency in an old growth forest in the Great Lakes region of the United States. *Geophysical Research*, Vol. 111, G02009.
- [37] Dewar R C. A simple model of light and water use evaluated for *Pinus radiata*. *Tree Physiology*, 1997, 17(4) : 259-265.
- [38] Berbigier P, Bonnefond J M, Mellmann P. CO₂ and water vapour fluxes for two years above Euroflux forest site, *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108(3) : 183-197.
- [39] Goulden M L, Daube BC, Fan S M, Sutton D J, Bazzaz A, Munger W, Wofsy S C. Physiological responses of a black spruce forest to weather. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102 : 28987-28996.

参考文献：

- [14] 魏远,张旭东,江泽平,周金星,汤玉喜,吴立勋,黄玲玲,高升华. 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. *林业科学研究*, 2010, 23 (5) :656-665.
- [15] 彭镇华,王妍,任海青,孙启祥,周金星. 安庆杨树林生态系统碳通量及其影响因子研究. *林业科学研究*, 2009, 22 (2) : 237-242.
- [20] 方显瑞,张志强,查同刚,谭炯锐,王小平,陈俊琦,陈吉泉,孙阁. 永定河沿河沙地杨树人工林生态系统呼吸特征. *生态学报*, 2012, 32 (8), 2401-2409.
- [34] 宋霞,于贵瑞,刘允芬,孙晓敏,林耀明,温学发. 亚热带人工林水分利用效率的季节变化及其环境因子的影响. *中国科学:D辑 地球科学*, 2006, 36(增刊I) : 111-118.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 33, No. 5 March, 2013 (Semimonthly)
CONTENTS

Frontiers and Comprehensive Review

- The effect of nitrogen deposition on forest soil organic matter and litter decomposition and the microbial mechanism WANG Jingyuan, ZHANG Xinyu, WEN Xuefa, et al (1337)
Advances and the effects of industrial hemp for the cleanup of heavy metal pollution LIANG Shumin, XU Yanping, CHEN Yu, et al (1347)
A review for evaluating the effectiveness of BMPs to mitigate non-point source pollution from agriculture MENG Fande, GENG Runzhe, OU Yang, et al (1357)
Progresses in dendrochronology of shrubs LU Xiaoming, LIANG Eryuan (1367)

Autecology & Fundamentals

- The characteristics of nocturnal sap flow and stem water recharge pattern in growing season for a *Larix principis-rupprechtii* plantation WANG Yanbing, DE Yongjun, XIONG Wei, et al (1375)
Effects of soil drought stress on photosynthetic characteristics and antioxidant enzyme activities in *Hippophae rhamnoides* Linn. seedlings PEI Bin, ZHANG Guangcan, ZHANG Shuyong, et al (1386)
Diurnal activity time budget of Père David's deer in Hubei Shishou Milu National Nature Reserve, China YANG Daode, LI Zhuyun, LI Pengfei, et al (1397)
Sublethal effects of three insecticides on the reproduction and host searching behaviors of *Sclerodermus sichuanensis* Xiao (Hymenoptera: Bethyidae) YANG Hua, YANG Wei, YANG Chunping, et al (1405)

Population, Community and Ecosystem

- Seasonal succession of zooplankton in Sansha Bay, Fujian XU Jiayi, XU Zhaoli (1413)
Biomass production and litter decomposition of lakeshore plants in Napahai wetland, Northwestern Yunnan Plateau, China GUO Xuhu, XIAO Derong, TIAN Kun, et al (1425)
The flora and species diversity of herbaceous seed plants in wetlands along the Xin'anjiang River from Anhui YANG Wenbin, LIU Kun, ZHOU Shoubiao (1433)
Spatial-temporal variation of root-associated aerobic bacterial communities of *phragmites australis* and the linkage of water quality factors in constructed wetland XIONG Wei, GUO Xiaoyu, ZHAO Fei (1443)
Temporal dynamics and influencing factors of leaf respiration for three temperate tree species WANG Zhaoguo, WANG Chuankuan (1456)
Environmental controls on water use efficiency of a poplar plantation under different soil water conditions ZHOU Jie, ZHANG Zhiqiang, SUN Ge, et al (1465)
An analysis of calcium components of *Artemisia ordosica* plant on sandy lands in different ecological regions XUE Pingping, GAO Yubao, HE Xingdong (1475)
Effects of alpine meadow plant communities on soil nematode functional structure in Northern Tibet, China XUE Huiying, HU Feng, LUO Daqing (1482)
Soil fauna diversity of abandoned land in a copper mine tailing area ZHU Yongheng, SHEN Fei, YU Jian, et al (1495)
Effects of ciprofloxacin on microbial biomass carbon and carbon metabolism diversity of soil microbial communities MA Yi, PENG Jinju, WANG Yun, et al (1506)
Estimation of ecological water demands based on ecological water table limitations in the lower reaches of the Liaohe River Plain, China SUN Caizhi, GAO Ying, ZHU Zhengru (1513)

Landscape, Regional and Global Ecology

- The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming SU Yongxian, ZHANG Hong'ou, CHEN Xiuzhi, et al (1524)
Root features of typical herb plants for hillslope protection and their effects on soil infiltration LI Jianxing, HE Binghui, CHEN Yun (1535)

- The dynamic change of the thermal environment landscape patterns in Beijing, Shanghai and Guangzhou in the recent past decade ...
..... MENG Dan, WANG Mingyu, LI Xiaojuan, et al (1545)
- Change trends and driving factors of base flow in Kuye River Catchment
..... LEI Yongnan, ZHANG Xiaoping, ZHANG Jianjun, et al (1559)
- Photosynthetic characteristics, biomass allocation, C, N and P distribution of *Schima superba* seedlings in response to simulated
nitrogen deposition LI Mingyue, WANG Jian, WANG Zhenxing, et al (1569)
- Effect of iron slag adding on methane production, oxidation and emission in paddy fields
..... WANG Weiqi, LI Pengfei, ZENG Congsheng, et al (1578)
- Resource and Industrial Ecology**
- Antioxidative system and chlorophyll fluorescence of *Zizania latifolia* Turcz. plants are affected by *Ustilago esculenta* infection
..... YAN Ning, WANG Xiaoqing, WANG Zhidan, et al (1584)
- Analysis of cold-regulated gene expression of the Fingered Citron (*Citrus medica* L. var. *sarcodactylis* Swingle)
..... CHEN Wenrong, YE Jiejun, LI Yongqiang, et al (1594)
- Hosts preference of *Echinothrips americanus* Morgan for different vegetables ... ZHU Liang, SHI Baocai, GONG Yajun, et al (1607)
- Induction effects of jasmonic acid on tannin content and defense-related enzyme activities in conventional cotton plants
..... YANG Shiyong, WANG Mengmeng, XIE Jianchun (1615)
- Effects of irrigation with paper mill effluent on growth and nutrient status of *Populus tomentosa* seedlings
..... WANG Ye, XI Benye, CUI Xiangdong, et al (1626)
- Water use efficiency of Jiangsu Province based on the data envelopment analysis approach
..... ZHAO Chen, WANG Yuan, GU Xueming, et al (1636)
- Research Notes**
- Characteristics of precipitation distribution in *Pinus tabulaeformis* plantations under different canopy coverage in Taiyue Mountain
..... ZHOU Bin, HAN Hairong, KANG Fengfeng, et al (1645)
- Driving factor analysis on the vegetation changes derived from the Landsat TM images in Beijing JIA Baoqun (1654)
- Effects of *Mikania micrantha* wilt virus infection on photosynthesis and the activities of four enzymes in *Mikania micrantha* H. B. K.
..... WANG Rui long, PAN Wanwen, YANG Jiaoyu, et al (1667)

《生态学报》2013 年征订启事

《生态学报》是由中国科学技术协会主管,中国生态学学会、中国科学院生态环境研究中心主办的生态学高级专业学术期刊,创刊于1981年,报道生态学领域前沿理论和原始创新性研究成果。坚持“百花齐放,百家争鸣”的方针,依靠和团结广大生态学科研工作者,探索自然奥秘,为生态学基础理论研究搭建交流平台,促进生态学研究深入发展,为我国培养和造就生态学科研人才和知识创新服务、为国民经济建设和发展服务。

《生态学报》主要报道生态学及各分支学科的重要基础理论和应用研究的原始创新性科研成果。特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评价和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大16开本,300页,国内定价90元/册,全年定价2160元。

国内邮发代号:82-7,国外邮发代号:M670

标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路18号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生态学报

(SHENTAI XUEBAO)

(半月刊 1981年3月创刊)

第33卷 第5期 (2013年3月)

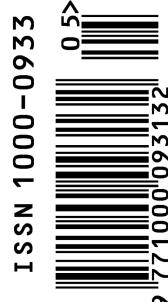
ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 33 No. 5 (March, 2013)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	王如松
主 管	中国科学技术协会
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路18号 邮政编码:100085
出 版	科学出版社 地址:北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717
印 刷	北京北林印刷厂
发 行	科学出版社 地址:东黄城根北街16号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局
国 外 发 行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京399信箱 邮政编码:100044
广 告 经 营	京海工商广字第8013号
许 可 证	

Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn
Editor-in-chief	WANG Rusong
Supervised by	China Association for Science and Technology
Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
Domestic	All Local Post Offices in China
Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 90.00 元