

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

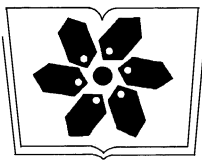
Acta Ecologica Sinica



第31卷 第9期 Vol.31 No.9 **2011**

中国生态学会
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

(SHENGTAI XUEBAO)

第 31 卷 第 9 期

2011 年 5 月 (半月刊)

目 次

EAM 会议专刊述评——气候变化下旱区农业生态系统的可持续性	李凤民, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, 等 (I)
第二届生态系统评估与管理(EAM)国际会议综述	李朴芳, 赵旭喆, 程正国, 等 (2349)
应对全球气候变化的干旱农业生态系统研究——第二届 EAM 国际会议青年学者论坛综述	赵旭喆, 李朴芳, Kadambot H. M Siddique, 等 (2356)
微集雨模式与降雨变律对燕麦大田水生态过程的影响	强生才, 张恒嘉, 莫非, 等 (2365)
黑河中游春小麦需水量空间分布	王 瑶, 赵传燕, 田风霞, 等 (2374)
祁连山区青海云杉林蒸腾耗水估算	田风霞, 赵传燕, 冯兆东 (2383)
甘肃小陇山不同针叶林凋落物量、养分储量及持水特性	常雅军, 陈 琦, 曹 靖, 等 (2392)
灌水频率对河西走廊绿洲菊芋生活史对策及产量形成的影响	张恒嘉, 黄高宝, 杨 斌 (2401)
玛纳斯河流域水资源可持续利用评价方法	杨 广, 何新林, 李俊峰, 等 (2407)
西北旱寒区地理、地形因素与降雨量及平均温度的相关性——以甘肃省为例	杨 森, 孙国钧, 何文莹, 等 (2414)
黑河河岸植被与环境因子间的相互作用	许莎莎, 孙国钧, 刘慧明, 等 (2421)
干旱胁迫对高山柳和沙棘幼苗光合生理特征的影响	蔡海霞, 吴福忠, 杨万勤 (2430)
树锦鸡儿、柠条锦鸡儿、小叶锦鸡儿和鹰嘴豆干旱适应能力比较	方向文, 李凤民, 张海娜, 等 (2437)
胡杨异形叶绿素荧光特性对高温的响应	王海珍, 韩 路, 徐雅丽, 等 (2444)
柠条平茬处理后不同组织游离氨基酸含量	张海娜, 方向文, 蒋志荣, 等 (2454)
玛河流域扇缘带盐穗木土壤速效养分的“肥岛”特征	涂锦娜, 熊友才, 张 霞, 等 (2461)
摩西球囊霉对三叶鬼针草保护酶活性的影响	宋会兴, 钟章成, 杨万勤, 等 (2471)
燕麦属不同倍性种质资源抗旱性状评价及筛选	彭远英, 颜红海, 郭来春, 等 (2478)
光周期对燕麦生育时期和穗分化的影响	赵宝平, 张 娜, 任长忠, 等 (2492)
水肥条件对新老两个春小麦品种竞争能力和产量关系的影响	杜京旗, 魏盼盼, 袁自强, 等 (2501)
猪场沼液对蔬菜病原菌的抑制作用	尚 斌, 陈永杏, 陶秀萍, 等 (2509)
不同夏季填闲作物种植对设施菜地土壤无机氮残留和淋洗的影响	王芝义, 郭瑞英, 李凤民 (2516)
不同群体结构夏玉米灌浆期光合特征和产量变化	卫 丽, 熊友才, Baoluo Ma, 等 (2524)
脱硫废弃物对碱胁迫下油菜幼叶细胞钙分布及 Ca^{2+} -ATPase 活性的影响	毛桂莲, 许 兴, 郑国琦, 等 (2532)
过去 30a 玛纳斯河流域生态安全格局与农业生产力演变	王月健, 徐海量, 王 成, 等 (2539)
基于 RS 和转移矩阵的泾河流域生态承载力时空动态评价	岳东霞, 杜 军, 刘俊艳, 等 (2550)
毛乌素沙地农牧生态系统能值分析与耦合关系	胡兵辉, 廖允成 (2559)
民勤绿洲农田生态系统服务价值变化及其影响因子的回归分析	岳东霞, 杜 军, 巩 杰, 等 (2567)
青岛市城市绿地生态系统的环境净化服务价值	张绪良, 徐宗军, 张朝晖, 等 (2576)
基于 3S 技术的祖厉河流域农村人均纯收入空间相关性分析	许宝泉, 施为群 (2585)
专论与综述	
全球变化下植物物候研究的关键问题	莫非, 赵 鸿, 王建永, 等 (2593)
区域气候变化统计降尺度研究进展	朱宏伟, 杨 森, 赵旭喆, 等 (2602)
干旱胁迫下植物根源化学信号研究进展	李冀南, 李朴芳, 孔海燕, 等 (2610)
山黧豆毒素 ODAP 的生物合成及与抗逆性关系研究进展	张大伟, 邢更妹, 熊友才, 等 (2621)
旱地小麦理想株型研究进展	李朴芳, 程正国, 赵 鸿, 等 (2631)
小麦干旱诱导蛋白及相关基因研究进展	张小丰, 孔海燕, 李朴芳, 等 (2641)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 306 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 35 * 2011-05



封面图说: 覆膜-垄作燕麦种植——反映了雨水高效利用和农田水生态过程的优化(详见强生才 P2365)。

彩图提供: 兰州大学干旱与草地生态教育部重点实验室莫非 E-mail: mofei371@163.com

祁连山区青海云杉林蒸腾耗水估算

田风霞^{1,2}, 赵传燕^{3,*}, 冯兆东¹

(1. 兰州大学西部环境教育部重点实验室; 2. 兰州大学西部环境与气候变化研究院;
3. 兰州大学干旱与草地农业生态教育部重点实验室, 兰州 730000)

摘要: 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 林在祁连山区水量平衡中起着重要的调节作用, 合理并准确地估算其冠层蒸腾量, 对于了解该区的水平衡和水分平衡具有重大意义。以位于祁连山中段大野口关滩森林站的青海云杉纯林为研究对象, 结合研究区微气象梯度观测塔自动记录的常规气象资料 (气温、空气相对湿度、风速等) 以及太阳辐射、大气中 CO₂ 浓度、土壤热通量等, 应用改进的 Penman-Monteith 修正式对研究区青海云杉林 2008 年生长季的冠层蒸腾量进行估算, 并采用单变量敏感性分析法对模拟结果进行分析。结果表明: 青海云杉林 2008 年生长季 (5—9 月) 的总蒸腾量为 148.8 mm, 平均日蒸腾量为 0.97 mm; 冠层蒸腾量主要受太阳辐射的影响, 使得日蒸腾量在典型晴天高达 2.19 mm, 而在阴雨天仅为 0.016 mm; 气温对冠层蒸腾量的作用也十分重要, 随气温的变化, 日蒸腾量从 5 月开始逐渐增大, 在 7 月中上旬达最大值, 从 7 月下旬到生长季结束其值逐渐减小; 模型输入参数对模拟蒸腾量的影响强弱顺序为: 林冠层截获的净辐射 > 叶面积指数 > 气温 > 风速 > 大气相对湿度; 当模型输入参数在 ±10% 变动时, 模拟结果的变化范围均在 ±10% 以内, 说明该模型的模拟结果比较稳定。在积累了大量相关基础数据的条件下, 通过该改进的 Penman-Monteith 修正式估算森林蒸腾耗水量仍是一种获得满意结果的便捷方法。

关键词: 青海云杉林; 冠层蒸腾; Penman-Monteith 修正式; 单变量敏感性分析

Model-based estimation of the canopy transpiration of Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest in the Qilian Mountains

TIAN Fengxia^{1,2}, ZHAO Chuanyan^{3,*}, FENG Zhaodong¹

1 MOE Key Laboratory of Western China's Environmental Systems, Lanzhou University

2 Research School of Arid Environment and Climate Change, Lanzhou University

3 MOE Key Laboratory of Arid and Grassland Ecology, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China

Abstract: The canopy transpiration of forests is one of the most important components in the water balance and it is nevertheless the least-understood component primarily because systematic data from field environment are unavailable and difficult measure. Modeling thus remains to be an effective tool in estimating the canopy transpiration of forests. Qinghai spruce (*Picea crassifolia*) forest plays an important role in regulating the water balance in the Qilian Mountains through its effects on different hydrological components (including rainfall interception, canopy transpiration, and soil infiltration) and again the canopy transpiration of the forest is the least-understood component. This study aimed at estimating the canopy transpiration of Qinghai spruce forest of the Qilian Mountains based on the meteorological and the energy influx data observed at Guantan Forest Station (100°15'0.8" E, 38°32'1.3" N) within the Qilian Mountains. Specifically, this study simulated the canopy transpiration of the Qinghai spruce forest during the growing season of 2008 using an improved Penman-Monteith equation and the univariate sensitivity analysis was performed to test the sensitivity of variables affecting the canopy transpiration. The results indicate that the total transpiration of Qinghai spruce forest in the growing season (from May to September) of 2008 is 148.8 mm and the daily canopy transpiration rate ranges between 0.016 and 2.19 mm with a mean daily transpiration rate is 0.97 mm at the research station. The highest monthly canopy transpiration occurs in

基金项目: 国家自然科学基金项目 (91025015, 30770387)

收稿日期: 2010-04-30; 修订日期: 2010-06-17

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: nanzhr@lzb.ac.cn

June (37.9 mm) and the lowest in September (17.3 mm). The modeled daily canopy transpiration increased at the beginning of May and reached minimal value towards end of the growing season. It is noticeable that the daily canopy transpiration reached its maximum in the middle of July, but the maximal monthly transpiration occurred in June probably because of more rainy and cloudy days in July that effectively lowered both air temperature and solar radiation, thus lowering the monthly canopy transpiration. Sensitivity analysis showed that among the factors affecting the canopy transpiration, the sequential order of the importance is as follows: net radiation intercepted by canopy > leaf area index > daily air temperature > wind speed > relative humidity. Apparently, the net radiation intercepted by canopy and the leaf area index are two most crucial factors and thus the accuracy of the simulated results are dictated by the accuracies of these two parameters. The instrumental error of measuring the net radiation was $\pm 10\%$ in the study. The leaf area index was obtained from digital hemispherical photograph that demonstrated the best way to get the leaf area index in the forest. Our sensitivity analysis showed that $\pm 10\%$ changes in the net radiation resulted in a maximal change of ± 0.22 mm ($\pm 10\%$) in the daily canopy transpiration rate. The $\pm 10\%$ changes in the estimated leaf area index can result in a maximal change of 0.16 mm ($+7.22\%$) or -0.15 mm (-6.90%) in the daily canopy transpiration rate. We consider that less than $\pm 10\%$ change in the estimated daily canopy transpiration resulted from about $\pm 10\%$ change in any of the contributing factors and thus the model-based estimation of the daily canopy transpiration is acceptable.

Key Words: *Picea crassifolia* forest; canopy transpiration; improved Penman-Monteith equation; univariate sensitivity analysis

森林约占陆地面积的 30%^[1],其水量平衡在陆地水循环中具有举足轻重的地位。森林蒸散发是森林生态系统水量平衡中的一个重要分量,影响着区域气候和全球水循环^[2],其中作为森林蒸散发重要组成部分之一的冠层蒸腾在土壤-植被-大气水分传输过程中起着重要作用。因此,合理并准确地估算森林冠层蒸腾量,对于了解大范围的水分循环具有重大意义。

青海云杉(*Picea crassifolia*)是我国青藏高原东北边缘的特有树种,主要分布在祁连山和贺兰山两大山系,其在祁连山的分布面积占总面积的 94.6%^[3]。目前,有关青海云杉林的生境特征^[4]、空间分布格局^[5-7]、生物量^[8-9]、土壤呼吸^[10-12]和水源涵养功能^[13-15]的研究已有较多报道,但对该群落的蒸腾耗水研究甚少。常国梁等^[16]采用 Li-1600 稳态气孔计,对青海大通退耕还林混交林(其中包括青海云杉、紫果云杉、华北落叶松等)典型天气的蒸腾进行了实测。于洋、刘敏等^[17-19]运用 Grainer 热扩散式探针(TDP)法对青海大通青海云杉人工林生长季的树干茎流进行了连续观测,并分析了其影响因子。但这些研究工作仍然停留在单株树木尺度的蒸腾耗水上。

如何准确测定植被耗水量一直是植物学、生态学、水文学等多个学科的研究难点,国内外学者多采用蒸渗仪法、快速称重法、整树容器法、风调室法、液流法等对植被蒸腾耗水进行观测^[20-24]。但在自然状态下,将植物蒸腾和土壤蒸发分项测定有一定的技术困难,所以对林木蒸腾耗水的定量研究没有取得显著进展。此外,从单株树木耗水量外推到林分尺度的总耗水量仍然是一个挑战性的问题。目前,在估算长时期林分尺度的蒸散时多采用 Penman-Monteith 模型,由于该模型综合考虑了影响蒸散的大气物理特性和植物生理机制,具有很好的物理依据,能比较清楚地反映蒸散的变化过程及其影响机制,已在我国森林蒸散研究中得到成功应用^[25-27]。由于 Penman-Monteith 模型将植被冠层和土壤看成一层(常被称为“大叶模型”或单层模型),无法将冠层蒸腾与土壤蒸发区分开来,所以本研究首先对该模型进行修正和改进,以便将土壤蒸发部分分解出来,然后采用其修正式对祁连山区青海云杉林 2008 年生长季(5—9 月)的蒸腾量进行估算。

祁连山区现有水源涵养林 43.61 万 hm^2 ,青海云杉(*Picea crassifolia*)是其主要的建群树种,面积占水源涵养林总面积的 24.74%,占乔木林总面积的 75.72%^[28],其生态水文服务功能举足轻重。因此,研究青海云杉林的冠层蒸腾对青海云杉林的水量平衡甚至祁连山区水量平衡的研究具有重大意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

祁连山地处青藏、黄土两大高原和蒙新荒漠的交汇处(97°24′—103°46′ E, 36°43′—39°42′ N), 试验区位于由中国科学院寒区旱区环境与工程研究所在祁连山中段建立的大野口关滩森林站内(100°15′0.8″ E, 38°32′1.3″ N; 海拔 2835 m)。气候类型属于高寒半干旱、半湿润山地森林草原气候。年均气温 0.5 ℃, 年均降水量 368 mm, 年平均水面蒸发量 1051 mm, 平均相对湿度 60% (1994—2004 年)^[29]。森林站内设有一个超级样地, 样地大小为 100 m × 100 m, 且下垫面地势平坦。超级样地内主要生长着高约 15—20 m 的青海云杉纯林, 多为中龄和近成熟林, 郁闭度约为 0.6, 林地表面覆盖有厚约 10 cm 的苔藓, 植被生长情况良好。土壤类型为森林灰褐土, 土壤厚度平均约 120 cm。

1.2 实验设计

超级样地内立有一座 24 m 高的微气象梯度观测塔, 在观测塔上分别安装风、温、湿、降雨观测传感器以及气压表和辐射四分量计, 分别测定风速、气温、空气相对湿度、降雨量、气压、太阳总辐射、森林反射辐射、林内短波辐射、林内地面反射辐射以及地面和天空的长波辐射。在观测塔 20.25 m 高处布设有一套开路式涡动相关系统, 可以观测空气定压比热、空气密度以及大气中 CO₂ 浓度等。在观测塔北部 6 m 处的土壤剖面上, 布设有土壤热通量板以及土壤温度和土壤水分传感器, 可分别测定土壤热通量和土壤温湿度。具体的观测量及所用传感器型号、生产厂家、仪器精度和架高/埋深序列见表 1。上述观测量均由数据采集器每 30 min 自动记录其平均值, 观测时间为 2008 年 1 月 1 日至 2008 年 12 月 31 日, 且所有观测量数据均来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc.westgis.ac.cn)。

表 1 大野口关滩森林站观测量及所用传感器型号、生产厂家、测量精度和架高/埋深序列

Table 1 The series of observables, sensor models, manufacturers, precision and setting height/depth in Guantan Forest Station

观测量 Observables	传感器 Sensor models	生产厂家 Manufacturers	测量精度 Precision	架高(埋深) Setting height(depth)/m
气温 Air temperature	HMP45C	Vaisala (芬兰)	± 0.2 ℃	1.92, 9.90, 23.75
相对湿度 Air humidity	HMP45C	Vaisala (芬兰)	± 2%	1.92, 9.90, 23.75
风速 Wind speeds	014A	MetOne (美国)	± 0.11 m/s	2.24, 10.00, 23.80
降雨 Rainfall	52202	R. M. Young (美国)	± 1%	20.00
气压 Atmospheric pressure	CS105	Campbell (美国)	± 0.5 mb	0.50
土壤热通量 Soil heat flux	HFP01	Campbell (美国)	± 2%	0.05, 0.15
土壤湿度 Soil moisture	CS616	Campbell (美国)	± 2%	0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80, 1.20
土壤温度 Soil temperature	107	Campbell (美国)	± 0.2 ℃	0.05, 0.10, 0.20, 0.40, 0.80, 1.20
总辐射和反射辐射 Total and reflected radiation	CM3	Campbell (美国)	± 10%	1.68, 19.75
长波辐射 Long-wave radiation	CG3	Campbell (美国)	± 10%	1.68, 19.75
风速和气温的脉动 Fluctuations of wind speeds and air temperature	CSAT3	Campbell (美国)	—	20.25
水汽脉动 Fluctuation of water vapor	LI-7500	LI-Cor (美国)	—	20.25

1.3 数据处理

为了计算青海云杉林每日的冠层蒸腾耗水量, 首先将每 30 min 的观测量数据转换为日平均数据。太阳辐射是植被蒸腾的主要能量来源, 但由于夜间树木气孔的关闭和很小的辐射通量, 所以本文假定当林冠层上方的净辐射量小于或等于土壤热通量时, 青海云杉林的蒸腾量为零, 只计算其它时段(白天)的蒸腾量。由于受降雨、降雪、雾霜等不利气象条件及电源不足等影响, 自动气象站和涡动相关系统所观测的数据系列在全年连续观测期间均有不同程度的缺失。对于缺失的日辐射数据, 本文采用 Mahmood 和 Hubbard^[30] 所提出的方法进行估算。对于空气定压比热、空气密度和大气 CO₂ 浓度, 则采用数据缺失日前后两天的日平均值对其进

行线性插值。

1.4 冠层蒸腾量(ET_c)的计算

本研究将青海云杉林的整个冠层看成一个大叶,忽略冠层内部复杂的反馈机制。在假定动量、热量和水汽输送的边界层阻力相差较小(不考虑温度层结问题)的条件下,将林冠层截获的净辐射(冠层上方的净辐射与透过冠层到达林下地表的净辐射之差, R_{nc})代替蒸散面的净辐射(R_n)并考虑气压订正,则用于计算冠层蒸腾量的 Penman-Monteith 修正式为^[31-32]:

$$\lambda ET_c = \frac{\frac{P_0}{P} \Delta R_{nc} + \rho_a c_p (e_s - e_a) / r_a}{\frac{P_0}{P} \Delta + \gamma (1 + r_c / r_a)} \quad (1)$$

式中, ET_c 为冠层蒸腾量(mm/d); λ 为汽化潜热(2.45 MJ/kg); Δ 为饱和水汽压—温度曲线的斜率(kPa/°C); R_{nc} 为林冠层截获的净辐射(MJ·m⁻²·d⁻¹); ρ_a 为空气密度(kg/m³); c_p 为空气定压比热(MJ·kg⁻¹·°C⁻¹); γ 为干湿球常数(kPa/°C); e_s 为冠层上方的饱和水汽压(kPa); e_a 为冠层上方的实际水汽压(kPa); r_a 为冠层表面的空气动力学阻力(s/m); r_c 为冠层气孔阻力(s/m); $\frac{P_0}{P}$ 为气压订正, P 为当地的实际大气压(kPa), P_0 为标准大气压(kPa)。

饱和水汽压-温度曲线的斜率(Δ)和干湿球常数(γ)可分别通过式(2)和式(3)获得:

$$\Delta = \frac{4098 \left[0.6108 \exp \left(\frac{17.27T}{T+237.3} \right) \right]}{(T+237.3)^2} \quad (2)$$

$$\gamma = \frac{c_p P}{\varepsilon \lambda} \quad (3)$$

式中, T 为一天中最高温和最低温的平均值(°C); ε 为水汽与干空气分子比,0.622。冠层上方的饱和水汽压(e_s)和实际水汽压(e_a)的计算如下:

$$e_s = \frac{e_s(T_{\max}) + e_s(T_{\min})}{2} \quad (4)$$

$$e_a = \frac{e_s(T_{\min}) \frac{RH_{\max}}{100} + e_s(T_{\max}) \frac{RH_{\min}}{100}}{2} \quad (5)$$

式中, $e_s(T_{\max})$ 为一天中最高温时的饱和水汽压(kPa), $e_s(T_{\max}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.257T_{\max}}{T_{\max} + 237.3} \right)$; $e_s(T_{\min})$ 为一天中最低温时的饱和水汽压(kPa), $e_s(T_{\min}) = 0.6108 \exp \left(\frac{17.257T_{\min}}{T_{\min} + 237.3} \right)$; $RH_{\max}$ 和 $RH_{\min}$ 分别为一天中空气相对湿度的最高值和最低值(%); $T_{\max}$ 和 $T_{\min}$ 分别为一天中的最高和最低气温(°C)。

Penman-Monteith 模型假定大气为中性层结,故用于计算冠层表面空气动力学阻力(r_a)的公式可表示为^[33]:

$$r_a = \frac{4.72 \left[\ln \left(\frac{z-d}{z_0} \right) \right]^2}{1 + 0.54u_z} \quad (6)$$

式中, z 为冠层上方测量风速的高度(23.8 m); d 为零平面位移,经计算分析知 $d = 12.75$ m; z_0 为林冠层粗糙度(m), $z_0 = 0.075H$, H 为平均树高(18 m); u_z 为 z 高度处的风速(m/s)。

由于把青海云杉林的整个冠层看成一个大叶,则其冠层气孔阻力(r_c)可表示为^[34]:

$$r_c = \frac{r_{\min}}{LAI_{\text{active}} \left(1.4 - 0.4 \frac{\rho_{(\text{CO}_2)}}{330} \right)} = \frac{r_{\min}}{0.5LAI \left(1.4 - 0.4 \frac{\rho_{(\text{CO}_2)}}{330} \right)} \quad (7)$$

式中, $r_{\min}$ 为植被单叶最小有效气孔阻力, 在充分供水条件下, 其值为 100 s/m ; LAI 为叶面积指数, 作者采用半球摄影技术求得研究区超级样地内 LAI 的平均值为 2.97 ; $\rho_{(\text{CO}_2)}$ 为青海云杉林内平均大气 CO_2 浓度 (mg/m^3)。

2 结果分析

2.1 生长季林冠日蒸腾量的变化特征

根据用于计算冠层蒸腾的 Penman-Monteith 修正式, 估算研究区青海云杉林 2008 年生长季内的日蒸腾量 (ET_c), 经计算知整个生长季的总蒸腾量为 148.8 mm 。同时, 在 Excel 中作出研究期间内日蒸腾量和日降雨量的变化图, 并添加日蒸腾量的变化趋势线(图 1)。

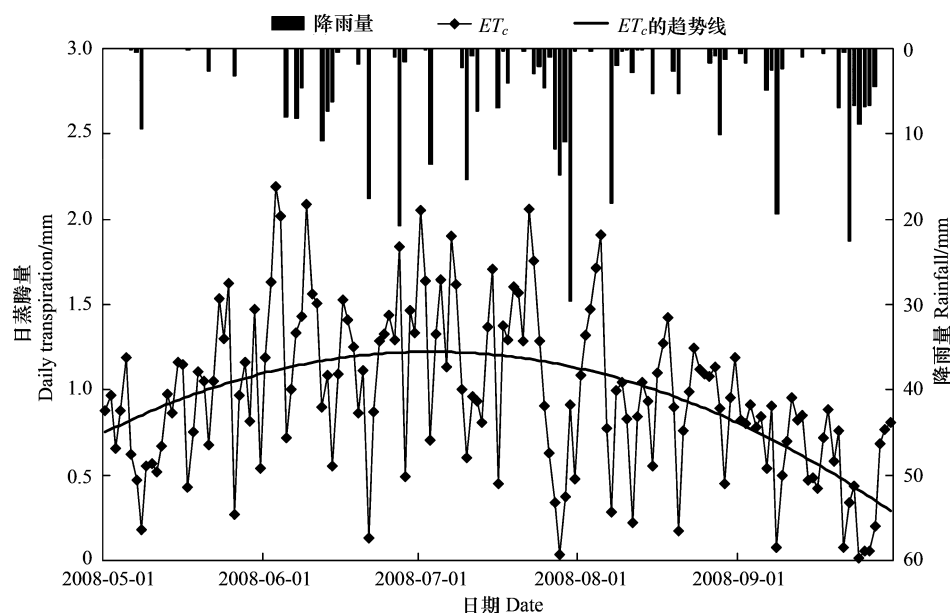


图 1 生长季内青海云杉林的日蒸腾量变化及日降雨量

Fig. 1 Daily canopy transpiration changes of Qinghai spruce forest and daily rainfall during the growing season of 2008

从图 1 可以看出, 在 2008 年的整个生长季内, 青海云杉林的日蒸腾量变化不大, 基本在 1.0 mm 上下波动, 最高可达 2.19 mm/d , 最低可为 0.016 mm/d , 平均日蒸腾量为 0.97 mm 。由日蒸腾量的变化趋势线可知, 生长季开始后(5 月初), 青海云杉林的日蒸腾量逐渐增大, 在 7 月中上旬达最大值, 从 7 月下旬到生长季结束其日蒸腾量逐渐减小。

这是因为从 5 月开始, 研究区内气温不断升高、降雨量逐渐增多, 青海云杉生长迅速, 故其蒸腾量逐渐增大。而 7 月下旬降雨量大且集中, 致使太阳辐射减少、气温降低, 进而抑制青海云杉的蒸腾作用。加之, 8 月份气温开始回落, 青海云杉的生长受到限制, 所以其蒸腾作用亦随之逐渐减弱。另外, 在气温升高的同时, 研究区内的太阳辐射也在增强, 而光照对植物的蒸腾作用起着关键作用, 不仅可以提高叶片温度使其高于大气温度, 增大叶内外的蒸汽压差, 而且促使植物气孔开放, 减少内部阻力, 从而增强蒸腾作用, 故使得典型晴天青海云杉林的日蒸腾量最大可达 2.19 mm 。当阴天降雨时, 不仅太阳辐射弱且气温较低, 不利于树木蒸腾, 致使青海云杉林的日蒸腾量仅为 0.016 mm 。除此之外, 阴雨天森林内的空气相对湿度较大, 在一定气孔开度条件下, 叶片和大气之间的水汽压差较小, 也遏止树木的蒸腾作用。所以, 虽然研究区内 7 月份的日均温和日平均太阳辐射强度均高于 6 月, 但由于 7 月份的阴雨天较多(月降雨量为 128.7 mm), 致使 7 月份青海云杉林的林冠蒸腾量为 35.8 mm , 低于 6 月份的蒸腾量(37.9 mm)。

2.2 模拟结果的敏感性分析

植物的蒸腾强度不仅取决于叶量、叶的构造特点和生理功能, 还受环境中许多生态因子的综合影响, 其中

最重要而又很容易发生变化的是气象因子,主要有太阳辐射、空气湿度、大气水汽压差、大气温度、风速等。本研究用于计算冠层蒸腾的 Penman-Monteith 修正式,其模型输入参数主要有林冠层截获的净辐射(R_{nc})、气温(T)、空气相对湿度(RH)、冠层上方的风速(u_z)以及青海云杉林的叶面积指数(LAI)。为验证上述因子对青海云杉林冠层模拟蒸腾量的影响程度,本研究采用单变量(其他参数不变)敏感性分析法,即当单个模型输入参数在一定范围内变化时,分析模型模拟结果的变化幅度,对当模型输入参数变化 $\pm 10\%$ 后模拟结果的变化幅度作了分析,结果见表2。

表2 模型对各输入参数变化的敏感性分析

Table 2 Analysis of the model's sensitivity to inputting parameters

	模型中各输入参数增加 10% Inputting parameters increased by 10%				
	$T / ^\circ\text{C}$	$u_z / (\text{m/s})$	$R_{nc} / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	$RH / \%$	LAI
模拟蒸腾量的变化幅度/% Change rates of simulated transpiration	6.02	-4.31	10.0	-0.005	7.55
	模型中各输入参数减小 10% Inputting parameters decreased by 10%				
	$T / ^\circ\text{C}$	$u_z / (\text{m/s})$	$R_{nc} / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$	$RH / \%$	LAI
模拟蒸腾量的变化幅度/% Change rates of simulated transpiration	-5.79	4.73	-10.0	0.005	-7.17

T 为日平均气温; u_z 为冠层上方风速; R_{nc} 为林冠层截获的净辐射; RH 为空气相对湿度; LAI 为叶面积指数

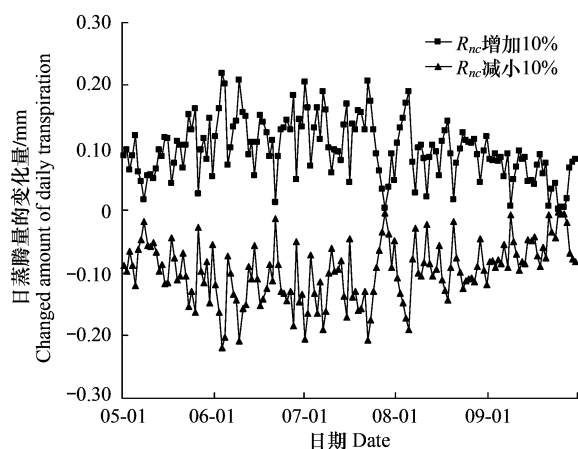
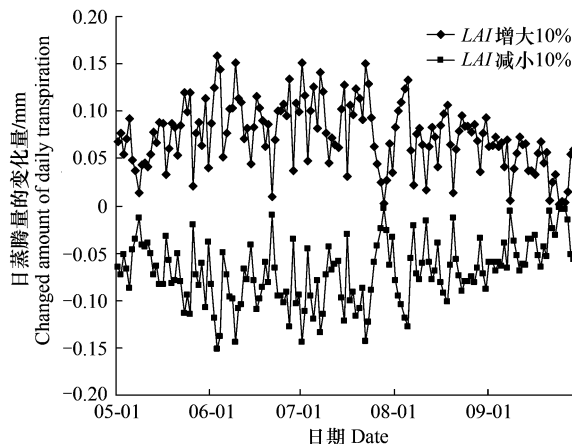
表2中的分析结果表明,林冠层截获的净辐射以及反映森林下垫面特征的叶面积指数对模拟结果的影响最大,是决定模型模拟值的主要参数。当林冠层截获的净辐射增加10%时,总模拟蒸腾量增大10%,反之,总模拟蒸腾量减小10%,而叶面积指数则是通过改变冠层的气孔阻力来影响模拟值,叶面积指数增大意味着森林冠层的气孔阻力减小(公式(7)),所以模拟蒸腾量增大。气温和风速对模拟结果的影响次之,当其参数值变动 $\pm 10\%$ 时,模拟蒸腾量的变化幅度分别为 $\pm 6\%$ 和 $\pm 5\%$ 左右,其中气温升高增大了叶片与周围空气的水汽压差,因此促进了青海云杉林蒸腾速率的提高,而大风不仅通过降低叶温使蒸腾减弱,也促使叶片迅速失水导致气孔关闭使蒸腾减弱。空气相对湿度对模拟结果的影响最小,几乎不影响模拟蒸腾量的变化,这表明研究区生长季内,林地长期处于湿润状态,树木生长一般不存在水分不足的问题,能够满足 Penman-Monteith 方程构建时的前提假设(下垫面水分充分供应)。

2.3 R_{nc} 和 LAI 对林冠蒸腾量的影响

由于敏感性分析结果已表明,林冠层截获的净辐射(R_{nc})以及反映森林下垫面特征的叶面积指数(LAI)是决定 Penman-Monteith 修正式模拟蒸腾量的主要参数,对 R_{nc} 和 LAI 变动 $\pm 10\%$ 时的模拟蒸腾量作了分析,图2和图3分别展现了 R_{nc} 和 LAI 变动 $\pm 10\%$ 时日蒸腾量的增减量变化。

由图2可知,当林冠层截获的净辐射(R_{nc})增加10%时,模拟蒸腾量随之增大,当 R_{nc} 减小10%时,模拟蒸腾量亦随之减小,并且日蒸腾量的增减量大小相同。结合图1和图2可知,在整个生长季内, R_{nc} 变动 $\pm 10\%$ 前后的日蒸腾量的变化趋势基本一致。 R_{nc} 变动前,晴天的日蒸腾量远高于阴雨天的日蒸腾量,而当 R_{nc} 变动 $\pm 10\%$ 时,日蒸腾量的增减量也是晴天($\pm 0.22 \text{ mm}$)大于阴雨天($\pm 0.0015 \text{ mm}$),且增减量占日蒸腾量的10%。

由图3不难看出,当青海云杉林的叶面积指数(LAI)变动 $\pm 10\%$ 时,模拟蒸腾量随 LAI 的增大而增大,随 LAI 的减小而减小,模拟蒸腾量在晴天的增减量大于阴雨天,且增减量的变化趋势与 LAI 变动前的日蒸腾量的变化趋势一致。模拟蒸腾量虽然随 LAI 的增大(减小)而增大(减小),但当 LAI 增大10%时,日蒸腾量最大可增加 0.16 mm ,生长季的总模拟蒸腾量增加 11.2 mm (7.55%),而当 LAI 减小10%时,日蒸腾量最大可减小 0.15 mm ,生长季总模拟蒸腾量减小 10.7 mm (7.17%)。这表明虽然 LAI 也是影响模拟蒸腾量的重要因子,但当其在一定幅度变动时并不能引起蒸腾量同等程度的变化。

图2 R_{nc} 变动 $\pm 10\%$ 时青海云杉林日蒸腾量的变化Fig. 2 Changes of daily transpiration of Qinghai spruce forest when R_{nc} increased or decreased by 10%图3 LAI 变动 $\pm 10\%$ 时青海云杉林日蒸腾量的变化Fig. 3 Changes of daily transpiration of Qinghai spruce forest when LAI increased or decreased by 10%

3 结论与讨论

本文采用改进的 Penman-Monteith 修正式,估算祁连山区青海云杉林 2008 年生长季的日蒸腾量。模拟结果表明,太阳辐射对树木的蒸腾作用起着关键作用,不仅可以通过改变叶内外的蒸汽压差,而且可以通过控制植物气孔的开放程度,使得青海云杉林典型晴天的日蒸腾量(2.19 mm)远高于阴天降雨时的日蒸腾量(0.016 mm)。由于研究区研究期间内的阴雨天比较多(67d),占整个生长季天数的 43.8%,进而抑制了青海云杉林的蒸腾作用。加之,研究区位于高海拔的山区,气温相对较低,不利于树木蒸腾耗水,故整个生长季的蒸腾耗水量仅为 148.8 mm,低于刘敏等^[18]在青海省大通县的测定值。

采用单变量敏感性分析法对模型模拟蒸腾量的分析表明,林冠层截获的净辐射和林地叶面积指数对模拟结果的影响最大,其次是气温和风速,而空气相对湿度的影响最小。当模型输入参数在 $\pm 10\%$ 变动时,模拟蒸腾量的变化幅度均 $\leq 10\%$,说明该模型的模拟结果比较稳定。加之,研究区内的林冠层截获的净辐射、气温、空气相对湿度、冠层上方风速均可通过仪器观测准确获得。本文采用 Penman-Monteith 修正式估算的青海云杉林生长季的蒸腾量有很大的可信性。此外,本文中叶面积指数的测定是采用半球摄影技术获得的,而该技术已被证明是针叶林分中观测冠层结构比较理想的手段^[35],所以叶面积指数测定的准确性也能够保证。但是对于特定的研究区, LAI 测点的疏密程度则影响着 LAI 的测定精度,故今后还需开展对 LAI 的加密观测工作。

正如数据处理小节中所提到的,本文在采用 Penman-Monteith 修正式估算青海云杉林生长季的日蒸腾量时,首先假定当林冠层上方的净辐射量小于或等于土壤热通量时其蒸腾量为零,而实际上该时段内的蒸腾量并不为零。所以,应用 Penman-Monteith 修正式,在缺乏树木蒸腾量实测资料的情况下,仅靠常规气象数据无法连续估算森林的夜间蒸腾量。以后的工作还需要结合其它途径的蒸腾观测来建立青海云杉林夜间蒸腾量估算的计算关系,比如目前国际上多采用的液流法。总之,在积累了大量相关基础数据的条件下,通过该模型估算森林蒸腾耗水量仍是一种获得满意结果的便捷方法。

致谢:本文所用数据来源于“中国西部环境与生态科学数据中心”(http://westdc. westgis. ac. cn)

References:

- [1] Food and Agriculture Organization (FAO). State of the World's Forests. Rome: FAO, 2005: 166-166.
- [2] Garratt J R. Sensitivity of climate simulations to land-surface and atmospheric boundary-layer treatments — a review. Journal of Climate, 1993, 6 (3): 419-448.
- [3] Liu X C. Qinghai Spruce (*Picea crassifolia*). Lanzhou: Lanzhou University Press, 1992: 1-3.

- [4] Zhao C Y, Bie Q, Peng H H. Analysis of the niche space of *Picea crassifolia* on the northern slope of Qilian Mountains. *Acta Geographica Sinica*, 2010, 65(1): 113-121.
- [5] Hao H, Liu X M, Song C F, Liu J Q, Sheng D J, Peng J T, Zhang Y S. Spatial distribution pattern of predominant species in moss-*Picea crassifolia* forest in northern slope of Qilian Mountains. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2005, 30(4): 9-12.
- [6] Di H, Liu J Q, Ding G M, Zhang Y S, Zhang Y P. Analysis on the distribution pattern of grass-*Picea crassifolia* forest dominant population in the northern slope of Qilian Mountains. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 2009, 34(3): 5-8, 32-32.
- [7] Zhang L J, Zhao W Z, He Z B. Characteristics in *Picea crassifolia* forest fractal dimension and its influencing factors. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [8] Liu X C. Biomass determination of *Picea crassifolia* of Haxi forest in Qilian Mountains. *Journal of Gansu Forestry Science and Technology*, 1992, 14(1): 7-10.
- [9] Chang X X, Che K J, Song C F. Preliminary studies on the biomass of *Picea crassifolia* forest community in Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 1996, 11(1): 19-23.
- [10] Luo L F, Niu Y, Wang Y L, Miao Y X, Chang Z Q, Cheng C X. Effects of temperature on soil respiration in *Picea crassifolia* forest of Qilian Mountains. *Scientia Silvae Sinicae*, 2007, 43(10): 117-121.
- [11] Chang Z Q, Shi Z M, Feng Q. Effect of temperature in different communities on soil respiration in Qilian Mountains. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2005, 26(2): 85-89.
- [12] Peng J Z, Chang Z Q, Feng Q. Influence of temperature and soil moisture on soil respiration of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2008, 22(3): 165-169.
- [13] Dang H Z, Zhao Y S, Chen X W, Li J J, Da G W, Zhu Y W. Soil water characteristics in *Picea crassifolia* forestry lands in Qilian Mountains. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(7): 1148-1152.
- [14] Jin B W, Wang J Y, Chang Z Q, Ge S L. A study on hydrologic function of canopy of *Picea crassifolia* in Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16(Supplement 1): 39-42.
- [15] Liu M X, Che K J. Analysis of hydrological effects from litter of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains. *Journal of Gansu Agricultural University*, 2004, 39(4): 434-438.
- [16] Chang G L, Zhao W Q, He K N, Shi C Q. Water consumption of forests in project area of returning farmland to forests in Datong county, Qinghai province. *Science of Soil and Water Conservation*, 2005, 3(1): 58-65.
- [17] Yu Y, Wen S Z, Qin J, Liu M, He K N. Sap flow changes of *Picea crassifolia* and *larix principis-rupprechtii* and relation to environmental factors in loess alpine area. *Journal of Central South University of Forestry & Technology: Natural Science Edition*, 2009, 29(6): 18-23.
- [18] Liu M, He K N, Yu Y, He Y Y. Relation between stem flow character of Qinghai spruce and its affecting factor. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2009, 29(4): 26-30.
- [19] Liu M, He K N, Yu Y. Study on stem flow of Qinghai spruce. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2009, (1): 1-3, 6-6.
- [20] Edwards W R N. Precision weighing lysimetry for trees, using a simplified tared-balance design. *Tree Physiology*, 1986, 1(2): 127-144.
- [21] Lu G M, Meng P, Ma X L, Song Z M, Zhang J S, Li C Y, Ma M C. Study on the plant transpiration and system evapotranspiration within an agroforest system of forest belt-fruit tree-crop. *Journal of China Agricultural University*, 1996, 1(5): 103-109.
- [22] Ladefoged K. Transpiration of forest trees in closed stands. *Physiologia Plantarum*, 1963, 16(2): 378-414.
- [23] Ansley R J, Dugas W A, Heuer M L, Trevino B A. Stem flow and porometer measurements of transpiration from honey mesquite (*Prosopis glandulosa*). *Journal of Experimental Botany*, 1994, 45(6): 847-856.
- [24] Hatton T J, Moore S J, Reece P H. Estimating stand transpiration in a *Eucalyptus populnea* woodland with the heat pulse method: measurement errors and sampling strategies. *Tree Physiology*, 1995, 15(4): 219-227.
- [25] Yu X X, Chen G W, Zhao Y T, Zhou Y M, Niu J Z. Evapotranspiration calculation of the sub-alpine forest ecosystem in the upstream of Yangtze River. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2002, 16(5): 14-16.
- [26] He K N, Tian Y, Zhang G C. Modeling of the daily transpiration variation in locust forest by Penman-Monteith equation. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(2): 251-258.
- [27] Zhang Y, Xu T W, Yang P L, Ren S M. Simulation of daily transpiration of poplar forest based on Penman-Monteith model. *China Rural Water and Hydropower*, 2006, (9): 18-20, 24-24.
- [28] Wang J Y, Liu X D, Jin B W, Wang Y L, Liu Z J. Research on change law of hydrologic *picea crassifolia* forests in Qilian Mountains. *Journal of Northwest Forestry University*, 2001, 16 (Supplement 1): 43-45.
- [29] Niu Y, Liu X D, Zhang H B, Ge S L. The water balance of *Picea crassifolia* forest in Qilian Mountains based on spatial data structure. *Remote Sensing Technology and Application*, 2006, 21(4): 344-348.

- [30] Mahmood R, Hubbard K G. Effect of time of temperature observation and estimation of daily solar radiation for the Northern Great Plains, USA. *Agronomy Journal-Abstract*, 2002, 94(4): 723-733.
- [31] Rowntree P R. Atmospheric parameterization schemes for evaporation over land; basic concepts and climate modeling aspects // Schmugge T J, Andre J C, eds. *Land Surface Evaporation: Measurement and Parameterization*. New York: Springer-Verlag, 1991: 5-29.
- [32] Kang S Z, Liu X M, Xiong Y Z. *Theory of water transport in soil-plant-atmosphere continuum and its application*. Beijing: China WaterPower Press, 1994: 122-147.
- [33] Thom A S, Oliver H R. On penman's equation for estimating regional evaporation. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 1977, 103(436): 345-357.
- [34] Morison J I L, Gifford R M. Stomatal sensitivity to carbon dioxide and humidity: a comparison of two C_3 and two C_4 grass species. *Plant Physiology*, 1983, 71(4): 789-796.
- [35] Chen J M, Rich P M, Gower S T, Norman J M, Plummer S. Leaf area index of boreal forests: theory, techniques, and measurements. *Journal of Geophysical Research*, 1997, 102(D24): 29429-29443.

参考文献:

- [3] 刘兴聪. 青海云杉. 兰州: 兰州大学出版社, 1992: 1-3.
- [4] 赵传燕, 别强, 彭焕华. 祁连山北坡青海云杉林生境特征分析. *地理学报*, 2010, 65(1): 113-121.
- [5] 郝虎, 刘兴明, 宋采福, 刘建泉, 盛殿军, 彭吉廷, 张元山. 祁连山北坡苔藓-青海云杉林优势种空间分布格局研究. *甘肃林业科技*, 2005, 30(4): 9-12.
- [6] 邸华, 刘建泉, 丁国民, 张元山, 张义鹏. 祁连山北坡草类-青海云杉林优势种群分布格局分析. *甘肃林业科技*, 2009, 34(3): 5-8, 32-32.
- [7] 张立杰, 赵文智, 何志斌. 青海云杉 (*Picea crassifolia*) 种群格局的分形特征及其影响因素. *生态学报*, 2008, 28(4): 1383-1389.
- [8] 刘兴聪. 祁连山哈溪林场青海云杉林生物量的测定. *甘肃林业科技*, 1992, 14(1): 7-10.
- [9] 常学向, 车克钧, 宋彩福. 祁连山林区青海云杉林群落生物量的初步研究. *西北林学院学报*, 1996, 11(1): 19-23.
- [10] 罗龙发, 牛赞, 王艺林, 苗毓鑫, 常宗强, 成彩霞. 祁连山青海云杉林温度变化对土壤呼吸的影响. *林业科学*, 2007, 43(10): 117-121.
- [11] 常宗强, 史作民, 冯起. 气温对祁连山不同植被状况土壤呼吸的影响. *中国农业气象*, 2005, 26(2): 85-89.
- [12] 彭家中, 常宗强, 冯起. 温度和土壤水分对祁连山青海云杉林土壤呼吸的影响. *干旱区资源与环境*, 2008, 22(3): 165-169.
- [13] 党宏忠, 赵雨森, 陈祥伟, 李进军, 达光文, 朱有文. 祁连山青海云杉林地土壤水分特征研究. *应用生态学报*, 2004, 15(7): 1148-1152.
- [14] 金博文, 王金叶, 常宗强, 葛双兰. 祁连山青海云杉林冠层水文功能研究. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊1): 39-42.
- [15] 刘旻霞, 车克钧. 祁连山青海云杉林枯落物层水文效应分析. *甘肃农业大学学报*, 2004, 39(4): 434-438.
- [16] 常国梁, 赵万启, 贺康宁, 史长青. 青海大通退耕还林工程区的林木耗水特性. *中国水土保持科学*, 2005, 3(1): 58-65.
- [17] 于洋, 文仕知, 秦景, 刘敏, 贺康宁. 青海云杉、华北落叶松边材液流变化规律及其与气象因子的关系. *中南林业科技大学学报: 自然科学版*, 2009, 29(6): 18-23.
- [18] 刘敏, 贺康宁, 于洋, 贺永元. 青海云杉茎流特性及其影响因子研究. *水土保持通报*, 2009, 29(4): 26-30.
- [19] 刘敏, 贺康宁, 于洋. 青海云杉树干液流研究. *水土保持应用技术*, 2009, (1): 1-3, 6-6.
- [21] 陆光明, 孟平, 马秀玲, 宋兆民, 张劲松, 李春友, 马明川. 林-果-农复合系统中植物蒸腾及系统蒸散的研究. *中国农业大学学报*, 1996, 1(5): 103-109.
- [25] 余新晓, 程根伟, 赵玉涛, 周杨明, 牛健植. 长江上游暗针叶林生态系统蒸散计算. *水土保持学报*, 2002, 16(5): 14-16.
- [26] 贺康宁, 田阳, 张光灿. 刺槐日蒸腾过程的 Penman-Monteith 方程模拟. *生态学报*, 2003, 23(2): 251-258.
- [27] 张岩, 许廷武, 杨培岭, 任树梅. 基于 Penman-Monteith 模型的杨树日蒸腾模拟. *中国农村水利水电*, 2006, (9): 18-20, 24-24.
- [28] 王金叶, 刘贤德, 金博文, 王艺林, 刘志娟. 祁连山青海云杉林调节林内水分变化研究. *西北林学院学报*, 2001, 16(增刊1): 43-45.
- [29] 牛赞, 刘贤德, 张宏斌, 葛双兰. 基于空间数据结构的祁连山青海云杉林水量平衡. *遥感技术与应用*, 2006, 21(4): 344-348.
- [32] 康绍忠, 刘晓明, 熊运章. *土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用*. 北京: 水利水电出版社, 1994: 122-147.

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 31, No. 9 May, 2011 (Semimonthly)

CONTENTS

Guest Editorial from EAM Workshop—Sustainability of agricultural ecosystems in arid regions in response to climate change	
..... LI Fengmin, Kadambot H. M Siddique, Neil C Turner, et al (I)	
Overview on the 2 nd international workshop on ecosystem assessment and management (EAM)	
..... LI Pufang, ZHAO Xuzhe, CHENG Zhengguo, et al (2349)	
Arid agricultural ecology in response to global change: Overview on Young Scholar Forum of the 2 nd International Workshop on	
EAM	ZHAO Xuzhe, LI Pufang, Kadambot H. M Siddique, et al (2356)
The effects of micro-rainwater harvesting pattern and rainfall variability on water ecological stoichiometry in oat (<i>Avena sativa</i> L.)	
field	QIANG Shengcai, ZHANG Hengjia, MO Fei, et al (2365)
Spatial variation of water requirement for spring wheat in the middle reaches of Heihe River basin	
..... WANG Yao, ZHAO Chuanyan, TIAN Fengxia, et al (2374)	
Model-based estimation of the canopy transpiration of Qinghai spruce (<i>Picea crassifolia</i>) forest in the Qilian Mountains	
..... TIAN Fengxia, ZHAO Chuanyan, FENG Zhaodong (2383)	
Litter amount and its nutrient storage and water holding characteristics under different coniferous forest types in Xiaolong Mountain,	
Gansu Province	CHANG Yajun, CHEN Qi, CAO Jing, et al (2392)
Effect of irrigation frequency on life history strategy and yield formation in Jerusalem artichoke (<i>Helianthus tuberosus</i> L.) in oasis	
of Hexi Corridor	ZHANG Hengjia, HUANG Gaobao, YANG Bin (2401)
The evaluation method of water resources sustainable utilization in Manas River Basin	
..... YANG Guang, HE Xinlin, LI Junfeng, et al (2407)	
Correlation of topographic factors with precipitation and surface temperature in arid and cold region of Northwest China: a case	
study in Gansu Province	YANG Sen, SUN Guojun, HE Wenying, et al (2414)
The relationship between riparian vegetation and environmental factors in Heihe River Basin	
..... XU Shasha, SUN Guojun, LIU Huiming, et al (2421)	
Effects of drought stress on the photosynthesis of <i>Salix paraqulesia</i> and <i>Hippophae rhamnoides</i> seedlings	
..... CAI Haixia, WU Fuzhong, YANG Wanqin (2430)	
The comparison of drought resistance between <i>Caragana species</i> (<i>Caragana arborescens</i> , <i>C. korshinskii</i> , <i>C. microphylla</i>) and two	
chickpea (<i>Cicer arietinum</i> L.) cultivars	FANG Xiangwen, LI Fengmin, ZHANG Haina, et al (2437)
Response of chlorophyll fluorescence characteristics of <i>Populus euphratica</i> heteromorphic Leaves to high temperature	
..... WANG Haizhen, HAN Lu, XU Yali, et al (2444)	
Free amino acid content in different tissues of <i>Caragana korshinskii</i> following all shoot removal	
..... ZHANG Haina, FANG Xiangwen, JIANG Zhirong, et al (2454)	
“Fertile Island” features of soil available nutrients around <i>Halostachys caspica</i> shrub in the alluvial fan area of Manas River watershed	
..... TU Jinna, XIONG Youcai, ZHANG Xia, et al (2461)	
Analysis of the activities of protective enzymes in <i>Bidens pilosa</i> L. inoculated with <i>Glomus mosseae</i> under drought stress	
..... SONG Huixing, ZHONG Zhangcheng, YANG Wanqin, et al (2471)	
Evaluation and selection on drought-resistance of germplasm resources of <i>Avena</i> species with different types of ploidy	
..... PENG Yuanying, YAN Honghai, GUO Laichun, et al (2478)	
Ecophysiological mechanism of photoperiod affecting phenological period and spike differentiation in oat (<i>Avena nuda</i> L.)	
..... ZHAO Baoping, ZHANG Na, REN Changzhong, et al (2492)	
Effects of water and fertilization on relationship between competitive ability and seed yield of modern and old spring wheat varieties	
..... DU Jingqi, WEI Panpan, YUAN Ziqiang, et al (2501)	

- Inhibitory effect of biogas slurry from swine farm on some vegetable pathogen SHANG Bin, CHEN Yongxing, TAO Xiuping, et al (2509)
- Effects of different summer catch crops planting on soil inorganic N residue and leaching in greenhouse vegetable cropping system WANG Zhiyi, GUO Ruiying, LI Fengmin (2516)
- Photosynthetic characterization and yield of summer corn (*Zea mays* L.) during grain filling stage under different planting pattern and population densities WEI Li, XIONG Youcai, Baoluo Ma, et al (2524)
- Effects of desulfurization waste treatment on calcium distribution and calcium ATPase activity in oil-sunflower seedlings under alkaline stress MAO Guilian, XU Xing, ZHENG Guoqi, et al (2532)
- The evolution between ecological security pattern and agricultural productive force in Manas River Basin for the past 30 years WANG Yuejian, XU Hailiang, WANG Cheng, et al (2539)
- Spatio-temporal analysis of ecological carrying capacity in Jinghe Watershed based on Remote Sensing and Transfer Matrix YUE Dongxia, DU Jun, LIU Junyan, et al (2550)
- The coupling relationship and emergy analysis of farming and grazing ecosystems in Mu Us sandland HU Binghui, LIAO Yuncheng (2559)
- Dynamic analysis of farmland ecosystem service value and multiple regression analysis of the influence factors in Minqin Oasis YUE Dongxia, DU Jun, GONG Jie, et al (2567)
- Environment purification service value of urban green space ecosystem in Qingdao City ZHANG Xuliang, XU Zongjun, ZHANG Zhaohui, et al (2576)
- The spatial relationship analysis of rural per capital revenue based on GIS in Zulihe River basin, Gansu Province XU Baoquan, SHI Weiqun (2585)

Review and Monograph

- The key issues on plant phenology under global change MO Fei, ZHAO Hong, WANG Jianyong, et al (2593)
- Recent advances on regional climate change by statistical downscaling methods ZHU Hongwei, YANG Sen, ZHAO Xuzhe, et al (2602)
- Current progress in eco-physiology of root-sourced chemical signal in plant under drought stress LI Jinan, LI Pufang, KONG Haiyan, et al (2610)
- ODAP biosynthesis: recent developments and its response to plant stress in grass pea (*Lathyrus sativus* L.) ZHANG Dawei, XING Gengmei, XIONG Youcai, et al (2621)
- Current progress in plant ideotype research of dryland wheat (*Triticum aestivum* L.) LI Pufang, CHENG Zhengguo, ZHAO Hong, et al (2631)
- Recent advances in research on drought-induced proteins and the related genes in wheat (*Triticum aestivum* L.) ZHANG Xiaofeng, KONG Haiyan, LI Pufang, et al (2641)

2009 年度生物学科总被引频次和影响因子前 10 名期刊★

(源于 2010 年版 CSTPCD 数据库)

排序 Order	期刊 Journal	总被引频次 Total citation	排序 Order	期刊 Journal	影响因子 Impact factor
1	生态学报	11764	1	生态学报	1.812
2	应用生态学报	9430	2	植物生态学报	1.771
3	植物生态学报	4384	3	应用生态学报	1.733
4	西北植物学报	4177	4	生物多样性	1.553
5	生态学杂志	4048	5	生态学杂志	1.396
6	植物生理学通讯	3362	6	西北植物学报	0.986
7	JOURNAL OF INTEGRATIVE PLANT BIOLOGY	3327	7	兽类学报	0.894
8	MOLECULAR PLANT	1788	8	CELL RESEARCH	0.873
9	水生生物学报	1773	9	植物学报	0.841
10	遗传学报	1667	10	植物研究	0.809

★《生态学报》2009 年在核心版的 1964 种科技期刊排序中总被引频次 11764 次,全国排名第 1;影响因子 1.812,全国排名第 14;第 1—9 届连续 9 年入围中国百种杰出学术期刊;中国精品科技期刊

编辑部主任 孔红梅

执行编辑 刘天星 段 靖

客座编辑 Guest Editors LI Fengmin XIONG Youcai Neil Turner Kadambot Siddique

生 态 学 报

(SHENGTAI XUEBAO)

(半月刊 1981 年 3 月创刊)

第 31 卷 第 9 期 (2011 年 5 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA

(Semimonthly, Started in 1981)

Vol. 31 No. 9 2011

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	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
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学会 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	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
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	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel:(010)64034563 E-mail:journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
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	Foreign	China International Book Trading Corporation Add:P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



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 70.00 元