

太湖源雷竹林水汽通量变化及其对净辐射的响应

蔺恩杰¹, 江 洪^{1,2}, 陈云飞¹

(1. 浙江农林大学 浙江省森林生态系统碳循环与固碳减排重点实验室, 浙江 临安 311300; 2. 南京大学 国际地球系统科学研究所, 江苏 南京 210093)

摘要: 利用涡度相关观测技术研究了 2010 年 10 月至 2011 年 9 月浙江省临安市太湖源镇人工高效雷竹 *Phyllostachys violascens* 林生态系统的水汽通量变化特征, 同时结合常规气象观测数据, 分析了水汽通量对净辐射的响应。结果显示: 雷竹林全年水汽通量基本为正值, 夏季最高, 春秋季节变化特征相似, 冬季最低, 最高月份为 7 月, 最低月份为 1 月。实验区全年降水量为 1 201.72 mm, 蒸散量为 669.84 mm, 蒸散量占全年降水量的 55.74%, 较人工针叶林, 落叶松 *Larix gmelinii* 林, 红松 *Pinus koraiensis* 林, 柞树 *Xylosma racemosum* 林, 杂木林, 杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林等, 雷竹林蒸散量偏低。2 月、10 月和 12 月蒸散量略大于降水量, 其余月份蒸散量均小于当月降水量, 以 6 月份降水量与蒸散量差别最大。雷竹林水汽通量与当地净辐射有极显著的相关性, 其相关系数为 0.600~0.017。图 4 表 1 参 13

关键词: 森林生态学; 雷竹林; 涡度相关; 水汽通量; 净辐射; 太湖源

中图分类号: S718.5 **文献标志码:** A **文章编号:** 2095-0756(2013)03-0313-06

Water vapor flux variation and net radiation for a *Phyllostachys violascens* stand in Taihuyuan

LIN Enjie¹, JIANG Hong^{1,2}, CHEN Yunfei¹

(1. Zhejiang Provincial Key Laboratory of Carbon Cycling in Forest Ecosystems and Carbon Sequestration, Zhejiang A & F University, Lin'an 311300, Zhejiang, China; 2. International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, Jiangsu, China)

Abstract: Using eddy covariance technology, water vapor flux variation in a high-efficiency managed *Phyllostachys violascens* (Lei bamboo) ecosystem in the Zhejiang Modern Demonstration Zone was observed from October 2010 to September 2011. The precipitation and net radiation responses to water vapor flux were studied using a correlation analysis. Results showed that the annual water vapor flux was positive. The maximum water vapor flux occurred in July and the minimum in January with similar variation in spring and autumn. Annual evapo-transpiration of the Lei bamboo stand was 669.84 mm, which was slightly lower than other types of woodlands. Annual precipitation was 1 201.72 mm, which was about 55.74% of the annual precipitation (669.84 mm). Except in February, October, and December, evapo-transpiration was less than precipitation. The greatest difference between evapo-transpiration and precipitation appeared in June. There was also a high correlation ($r = 0.600-0.017$) between water vapor flux in a Lei bamboo stand and net radiation. [Ch, 4 fig. 1 tab. 13 ref.]

收稿日期: 2012-07-10; 修回日期: 2012-09-09

基金项目: 国家自然科学基金重大项目(61190114); 国家重点基础研究发展计划(“973”计划)项目(2011CB302705, 2011CB302705, 2010CB950702, 2010CB428503); 国家自然科学基金资助项目(41171324); 科技部重大国际合作项目(20073819)

作者简介: 蔺恩杰, 从事竹林水汽通量及水分生理研究。E-mail: linenjie0913@126.com。通信作者: 江洪, 教授, 博士生导师, 从事全球变化生态、生态系统碳—氮—水循环等研究。E-mail: jianghong_china@hotmail.com

Key words: forest ecology; *Phyllostachys violascens* stand; eddy covariance; water vapor flux; net radiation; Taihuyuan

雷竹 *Phyllostachys violascens* 是禾本科 Poaceae 竹亚科 Bambusoideae 刚竹属 *Phyllostachys* 竹种, 由早春打雷即出笋而得名。雷竹原产于浙江临安、安吉、余杭等地, 作为高经济效益的笋用竹现已在长江以南, 南岭以北的广大区域推广栽植。与一般常绿树种相比, 雷竹林全年光合能力强, 采伐期短, 更新代谢快。雷竹林是高效高产出的经济林种, 目前对其土壤养分、矿质元素以及土壤酶的研究相对较多^[1-4], 但未见与雷竹林生态系统水汽通量相关的研究报道。水汽通量, 又称水汽输送量, 是单位时间内通过单位面积的水汽量。森林水汽通量主要指林下地表蒸发通量、植被蒸腾通量和树冠层水分蒸发通量三者之和。水汽通量是生态系统物质循环与能量流动的重要参与者、重要环节与能量载体, 是生态系统能量闭合的重要影响因子。目前, 涡度相关技术已在全球范围内广泛应用于陆地生态系统物质和能量交换的观测, 并取得了很好的成效。该方法已成为国际通量观测网(FLUXNET)的标准方法^[5-7]。中国陆地生态通量观测网络(China FLUX)也已经利用该技术开展了广泛的观测。本研究以太湖源镇浙江省雷竹现代示范园区人工高效雷竹林为研究对象, 利用涡度相关观测技术研究了雷竹林 2010 年 10 月到 2011 年 9 月水汽通量的动态变化特征及其与净辐射之间的关系, 以期为当地竹林的合理灌溉提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验地设在浙江省临安市太湖源镇的浙江省雷竹现代示范园区内, 30.18°N, 119.34°E, 属于亚热带季风气候, 温暖湿润, 雨热同期, 春多雨, 夏湿热有梅雨期, 秋气爽, 冬干冷。全年降水量为 1 201.7 mm, 年平均气温 16.0 °C, 全年日照时数 1 900 h。土壤以红壤为主, 海拔 185 m, 坡向北偏东 35°, 坡度 2°~3°, 雷竹林建园历史 10 a。观测塔下雷竹林群落平均高度 4.5 m(钩梢后), 平均胸径为 4 cm, 以 2 年生竹和 3 年生竹为主, 总盖度为 80%, 立竹为 1.67 万株·hm⁻², 林下灌木草本较少, 有竹叶谷糠覆盖, 为人工经营的经济林。

1.2 观测仪器

观测竹林建有高 20.0 m 的微气象观测塔, 开路涡度相关系统的探头安装在 17.0 m 高度上, 由三维超声风温仪(CAST3, Campbell Inc., 美国产)和开路 CO₂H₂O 分析仪(Li-7500, LiCor Inc., 美国产)组成, 原始采样频率为 10 Hz, 数据传输给数据采集器(CR1000, Campbell Inc., 美国产)进行存储。

常规气象观测系统, 包括 3 层风速(010C, met one, 美国产), 3 层大气温度和湿度(HMP45C, Vaisala, Helsinki, 芬兰产)。安装高度分别为 1, 5, 17 m; 2 个 SI-111 红外温度计分别置于 1.5 和 5.0 m, 用于采集地表和冠层温度。净辐射仪(CNR4, Kipp & Zonen, 荷兰产)传感器安装高度 17.0 m, 用于采集上行/下行的长波/短波辐射、净辐射的数据。此外, 还有土壤热通量(HFP01, Hukseflux, 荷兰产)的观测深度为 3 和 5 cm; 土壤含水量(CS616, Campbell, 美国产)观测深度为 5, 50, 100 cm; 土壤温度(109, Campbell, 美国产)观测深度为 5, 50, 100 cm。常规气象观测系统数据采样频率为 0.5 Hz, 通过数据采集器(CR1000, Campbell Inc, 美国产)隔 30 min 自动记录平均风速、温度、气压、净辐射等常规气象信息。雨量筒分布于试验样地内, 记录降水量信息。

1.3 研究方法

1.3.1 计算公式 水汽通量(E)用实时测定的垂直风速与其浓度的协方差求的。公式为:

$$E=\overline{\rho w'q'}$$

其中: ρ 为干空气密度, q 为比湿脉动, w 为垂直风速; 横线为一段时间内的平均值; 撇号表示脉动。气体由大气圈进入生态系统则通量符号为负, 气体由生态系统进入大气圈, 则通量符号为正^[8]。

1.3.2 数据处理 采用的数据为通量观测的 30 min 平均值。数据处理采用目前普遍使用较成熟的方法, 主要包括 2 次坐标旋转矫正地形以及观测仪器的不水平, 使垂直方向的风速平均值为 0, 水平方向的风速与主导风向一致, 剔除恶劣天气、仪器故障等造成的不合理数据; 采用平均日变化法“MDV”插补缺失数据^[9]。

2 结果与分析

2.1 全年水汽通量各月的平均日变化特征

通过对全年水汽通量数据进行统计, 得到太湖源人工高效雷竹林生态系统的全年逐日逐半小时的水汽通量数据, 按月将每天同时刻水汽通量求平均值计算当月平均日变化, 结果如图 1 所示。

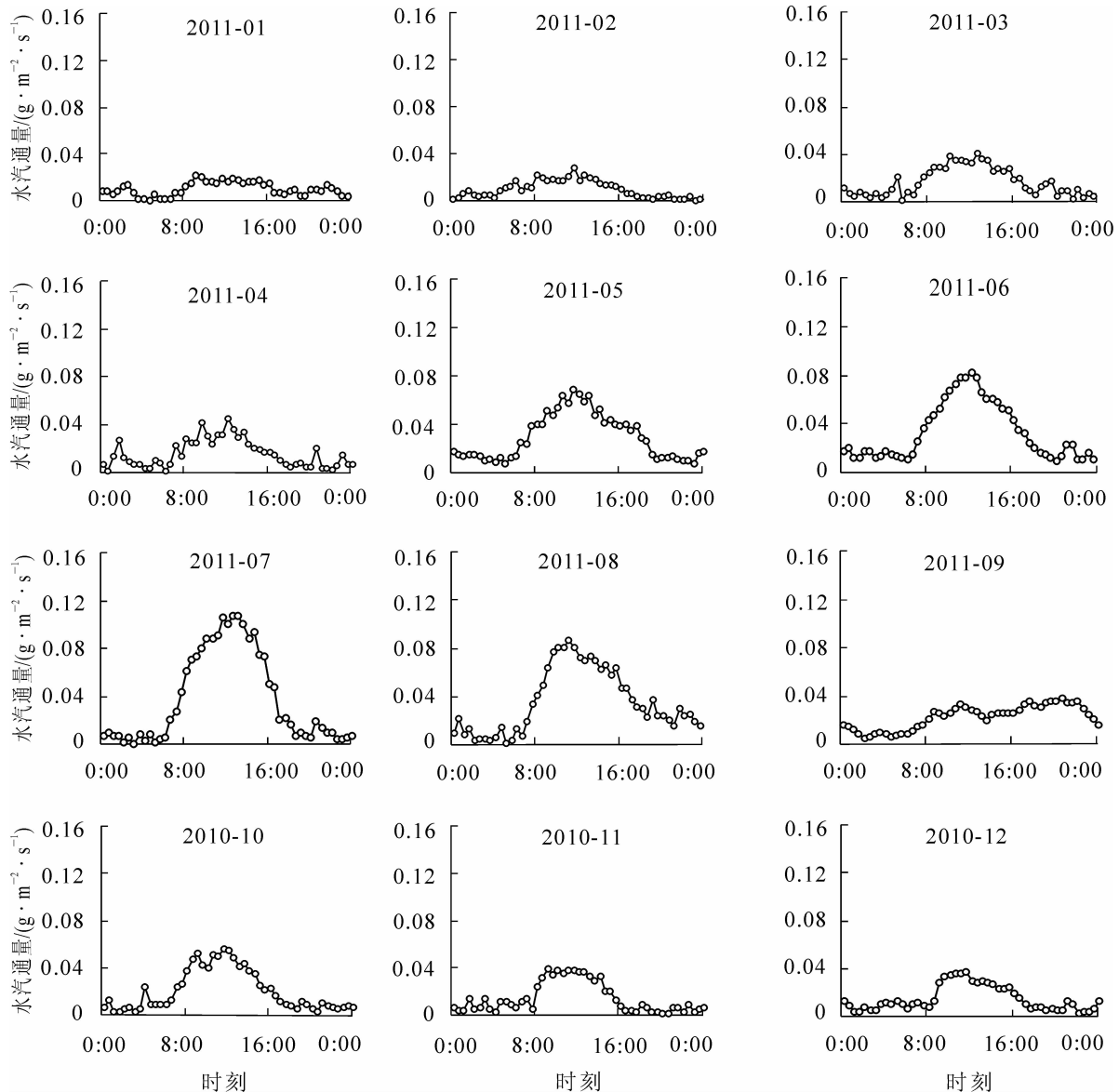


图 1 2010 年 10 月至 2011 年 9 月太湖源镇雷竹林水汽通量各月平均日变化分布

Figure 1 Mean diurnal change distribution of monthly water vapor flux in in *Phyllostachys violascens* forest in Taihuyuan (2010-10-2011-09)

从图 1 可见: 全年水汽通量基本均为正值, 即水汽输送方向是由竹林生态系统向大气输送, 且呈现单峰变化趋势。各月水汽通量日变化的最大值均出现在 12:00 到 14:00, 而夜间基本为 0。这是由于夜间温度较低, 光照较弱, 地表蒸发以及植被蒸腾都极其微弱。从 6:00 到 8:00 开始逐渐升高, 至最高点后逐渐降低, 17:00 至 19:00 趋近于 0, 波动较为平缓, 基本保持稳定。

3-5 月的水汽通量日变化曲线较其他月份波动较大, 主要是因为 3-5 月的气候较为多变, 温度变化较大, 使生态系统内的地表蒸发及植被蒸腾较为多变, 导致生态系统水汽通量日变化波动较大。9 月较 8 月和 10 月较为平缓, 且夜间水汽通量高于其他月份。主要是因为 9 月天气较为阴霾, 除 4-6 日和 13-15 日晴天, 其余均为阴雨天气, 雨量不大, 云层较厚。白天云层吸收光照热量, 使生态系统温度变化相对较小, 水汽通量无明显变化。夜间云层释放白天吸收的热量, 使生态系统内部温度较其他月份稍

高,水汽通量与白天相比也无明显变化,但比其他月份夜间水汽通量稍高。至凌晨 2:00 至 4:00,气温下降,水汽通量下降,趋近于 0。7 月较其余月份水汽通量较高,日最大值为 $1.107 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。原因是 7 月光照条件较为充足,气温较高,植被冠层以及地表蒸发量均较大,植物蒸腾作用旺盛。

2.2 全年水汽通量季节变化特征

通过对全年数据的计算,得到了太湖源人工高效雷竹林生态系统的全年逐日逐半小时的水汽通量数据,按季节计算平均日变化,结果如图 2 所示。从图 2 可以看出:夏季水汽通量变化有极强的规律性,日变化曲线为单峰,且曲线较为平滑,20:00 至次日凌晨 6:00 维持在 $0 \sim 0.01 \text{ g} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$,6:00 至 12:00 逐渐升高,至 12:00 左右达到最大值之后逐渐降低,到 19:00 至 20:00 趋于稳定。春秋冬季的水汽通量日变化特征与夏季相比较,变化规律类似,但规律性相对较差。曲线波动较大,不够平滑。由于气候条件影响,本实验区生态系统的夏季水汽通量明显大于春秋冬季,春秋季节基本相同,略大于冬季。

2.3 降水量与蒸散量

蒸散量是生态系统内土壤蒸发和植被蒸腾的总耗水量,是全年水汽通量的总和。蒸散量主要受蒸发势、土壤供水状况、植被状况等因素制约。通过雨量筒测得 2011 年 10 月至 2011 年 9 月各月降水量总和,计算各月水汽通量总和。所得结果如图 3 所示。图 3 中:2 月、10 月和 12 月蒸散量略大于降水量,其余月份蒸散量均小与降水量。其中 6 月降水量远大于蒸散量,6 月进入雨季,降水量较大,而蒸散量并未受到较大影响。

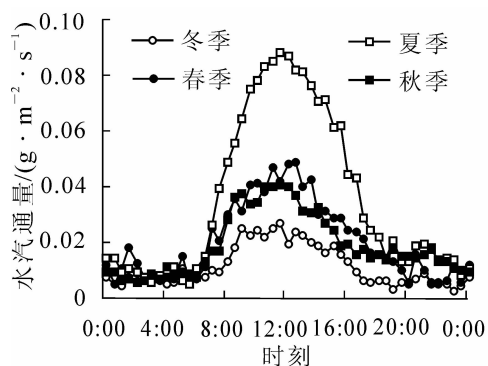


图 2 2010 年 10 月至 2011 年 9 月太湖源镇雷竹林水汽通量各季节平均日变化特征

Figure 2 Mean diurnal change distribution of quarterly water vapor flux in *Phyllostachys violascens* forest in Taihuyuan (2010-10-2011-09)

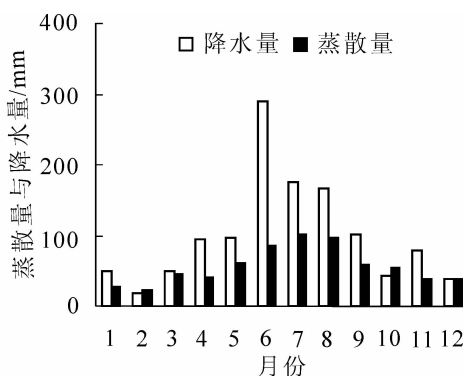


图 3 2010.10 月至 2011 年 9 月太湖源镇雷竹林蒸散量与降水量对比

Figure 3 Contrast between evapotranspiration and precipitation in *Phyllostachys violascens* forest in Taihuyuan (2010-10-2011-09)

各季度降水量与蒸散量,及其占全年降水量与蒸发散量的比例如表 1 所示。夏季降水量为 632.2 mm,占全年降水量(1 201.7 mm)的 50%以上,春秋季降水量基本相同,各占 20%左右,以冬季最低,仅占全年降水量的不到 10%。夏季蒸散量亦为全年最高,约占 42%,春秋季次之,各占 22%,冬季最

表 1 各季度降水量与蒸散量,以及其占全年降水量与蒸发散量的比例

Table 1 Contrast between evapotranspiration and precipitation at every quarter

季节	月份	降水		蒸散	
		降水量/mm	比例/%	蒸散量/mm	比例/%
冬	12, 1, 2	106.22	8.84	89.00	13.29
春	3, 4, 5	241.75	20.12	147.25	21.98
夏	6, 7, 8	632.20	52.61	282.30	42.14
秋	9, 10, 11	221.55	18.44	151.30	22.59
全年		1201.72		669.84	

低,占13%。可见:蒸散量同降水量在季节尺度上的变化情况有极强的响应关系。全年蒸散量(669.8 mm)占全年降水量(1 201.7 mm)的55.74%,比实际情况略低,主要由于夜间降水或露水对水汽通量的观测有较大影响,易导致低估通量值^[10],处理数据时,对缺失数据进行人为插补也可能导致最终所得的蒸散量较实际情况略小。

千烟洲人工针叶林全年蒸发散量为 $736.10 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。辽东山区后楼水库集水区邻域范围内的年蒸发散量分别是落叶松 *Larix gmelinii* 幼龄林为 $720.00 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,落叶松中龄林 $751.00 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,红松 *Pinus koraiensis* 幼龄林 $762.00 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,红松中龄林 $826.00 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,柞树 *Xylosma racemosum* 林 $677.0 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,杂木林 $741.00 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[11]。湖南会同杉木 *Cunninghamia lanceolata* 林多年的年均蒸散量为 $1\,049 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ ^[12]。而雷竹林全年蒸散量仅为 $669.84 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。

2.4 净辐射与水汽通量在季节尺度上的相关性

雷竹林全年净辐射为 $2\,928.924 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,其各季度水汽通量对净辐射的响应如图4所示。

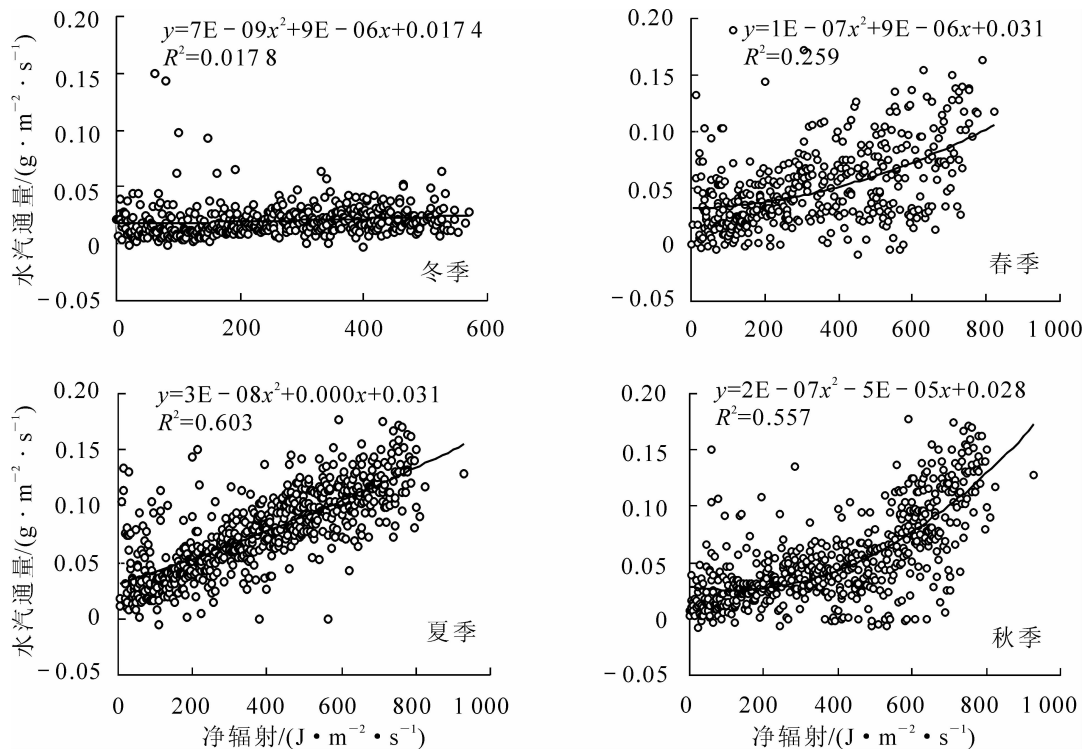


图4 各季度水汽通量对净辐射的响应拟合曲线

Figure 4 Quarterly response of water vapor flux to R_n

从图4的拟合曲线中,可以直观地看出夏季水汽通量对净辐射的响应最为明显,相关性系数较大,为0.603 9,秋季稍次之,相关性系数为0.557 4。冬季和春季相关性系数均较小。春季为0.259 1,因为春季气候多变,天气变幻无常,气温波动较大,对水汽通量有一定的影响,故从图中反映出各点较为分散,但仍表现出一定的正相关性。与吉喜斌等的研究相符^[13]。冬季相关性系数最小,为0.017 8,因冬季水汽通量普遍较低,但当地雷竹林经营模式为冬季覆盖谷糠,为地表层人为保温,可提高提早第2年笋产量,覆盖谷糠前人为浇水,使地表层大量储水升温,影响正常情况下的地表蒸发量,表现出冬季水汽通量与净辐射相关性较小。通过相关性的显著性检验,水汽通量与净辐射之间有极显著相关性。

3 小结

全年水汽通量基本为正值,夏季明显大于春秋冬季,春秋季节变化特征相似,冬季最低。全年最高月份为7月,全年最低月份为1月。

季节尺度上,夏季水汽通量明显大于春秋冬季,春秋季节基本相同,略大于冬季。夏季平均日变化曲线呈单峰型,规律性较强。春秋冬季则略有波动。

各月水汽通量日变化的最大值均出现在 12:00 到 14:00, 而夜间基本为 0。从 6:00 到 8:00 开始逐渐升高, 至最高点后逐渐降低, 17:00 至 19:00 趋近于 0, 基本保持稳定。

雷竹林全年蒸散量为 $669.84 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 较其他林型低。全年降水量为 $1201.72 \text{ mm} \cdot \text{hm}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 全年蒸散量占全年降水量的 55.74%。2 月、10 月和 12 月蒸散量略大于降水量, 其余月份蒸散量均小于当月降水量, 以 6 月差别最大。水汽通量与净辐射之间有极显著的相关性。雷竹林全年净辐射为 $2928.924 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$, 净辐射作为影响水汽通量的最主要因子, 其大小直接影响当地雷竹林生态系统的水汽通量情况, 雷竹林生态系统的水汽通量状况与当地净辐射表现出较好的正相关性。相关系数为 0.600~0.017。

参考文献:

- [1] 徐祖祥, 陈丁红, 李良华, 等. 临安雷竹种植条件下土壤养分的变化[J]. 中国农学通报, 2010, **26** (3): 247 – 250.
XU Zuxiang, CHEN Dinghong, LI Lianghua, *et al.* A study on the change in soil nutrients under the condition of bamboo shoot planting in Lin'an [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2010, **26** (3): 247 – 250.
- [2] 姜培坤, 徐秋芳, 储家森, 等. 雷竹早产高效栽培过程中土壤养分质量分数的变化[J]. 浙江林学院学报, 2006, **23** (3): 242 – 247.
JIANG Peikun, XU Qiufang, CHU Jiamiao, *et al.* Soil nutrients in response to intensive management of *Phyllostachys praecox* [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2006, **23** (3): 242 – 247.
- [3] 姜培坤, 俞益武, 张立钦, 等. 雷竹林地土壤酶活性研究[J]. 浙江林学院学报, 2000, **17** (2): 132 – 136.
JIANG Peikun, YU Yiwu, ZHANG Liqin, *et al.* Study on enzyme activities of soil under *Phyllostachys praecox* forest [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2000, **17** (2): 132 – 136.
- [4] 杨芳, 徐秋芳. 不同栽培历史土壤养分与重金属含量的变化[J]. 浙江林学院学报, 2003, **20** (2): 111 – 114.
YANG Fang, XU Qiufang. Changes in nutrients and heavy metal contents in soils under *Phyllostachys praecox* stands with different cultivation histories [J]. *J Zhejiang For Coll*, 2003, **20** (2): 111 – 114.
- [5] BALDOCCHI D D, VALENTINI R, RUNNING S, *et al.* Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems [J]. *Global Change Biol*, 1996, **2** (3): 159 – 168.
- [6] LEE X. On micrometeorological observation of surface-air exchange over tall vegetation [J]. *Agric For Meteorol*, 1998, **91** (1-2): 39 – 49.
- [7] FALGE E, BALDOCCHI D, OLSON R. Gap filling strategies for long term energy flux data sets [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, **107** (1): 71 – 77.
- [8] 李菊, 刘允芬, 杨晓光, 等. 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系[J]. 生态学报, 2006, **26** (8): 2449 – 2456.
LI Ju, LIU Yunfen, YANG Xiaoguang, *et al.* Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (8): 2449 – 2456.
- [9] 于贵瑞, 孙晓敏. 中国陆地生态系统碳通量观测技术及时空变化特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 174.
- [10] BERBIGIER P, BONNEFOND J M, MELLMANN P. CO₂ and water vapour fluxes for two years above Euro flux forest site [J]. *Agric For Meteorol*, 2001, **108** (3): 183 – 197.
- [11] 张德成, 殷明放, 白冬艳, 等. 测算辽东山区主要林分类型的蒸发散量[J]. 西北林学院学报, 2007, **22** (4): 25 – 29.
ZHANG Decheng, YIN Mingfang, BAI Dongyan, *et al.* Account evapo-transpiration of some important forest types in Liaoning Eastern Mountainous Area [J]. *J Northwest For Univ*, 2007, **22** (4): 25 – 29.
- [12] 赵梅芳, 项文化, 田大伦, 等. 基于 3-PG 模型的湖南会同杉木人工林蒸发散估算[J]. 湖南农业科学, 2008 (3): 158 – 162.
ZHAO Meifang, XIANG Wenhua, TIAN Dalun, *etal.* The evapotranspiration estimation of planted chinese fir in Huitong of Hunnan Province based on the 3-PG model [J]. *Hunan Agric Sci*, 2008 (3): 158 – 162.
- [13] 吉喜斌, 康尔泗, 赵文智, 等. 黑河流域山前绿洲灌溉农田蒸散发模拟研究[J]. 冰川冻土, 2004, **26** (6): 713 – 719.
JI Xibin, KANG Ersi, ZHAO Wenzhi, *et al.* Simulation of the evapotranspiration from irrigational farmlands in the oases of the Heihe River Basin [J]. *J Glaciol Geocryol*, 2004, **26** (6): 713 – 719.