

## 千烟洲人工林水汽通量特征及其与环境因子的关系

李 菊<sup>1</sup>, 刘允芬<sup>2,\*</sup>, 杨晓光<sup>1</sup>, 李 俊<sup>1</sup>

(1. 中国农业大学资源与环境学院, 北京 100094; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

**摘要:**利用涡度相关技术研究了 2004 年千烟洲人工针叶林生态系统的水汽通量变化特征, 结合气象要素的观测, 进一步分析了净辐射、温度、水分、热量等环境因子对水汽通量的影响。结果表明: 全年各月各时刻的水汽通量大多为正值, 夏季大于春秋两季, 冬季最小。其中 7 月份为全年最高, 日最大值达到  $0.149 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 1 月份最低, 日最高值仅为  $0.021 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同天气条件下(晴天和多云)水汽通量的日变化有明显区别。全年蒸散量为 736.1mm, 占总降水量(1323.6mm)的 55.6%。除 7 月份和 10 月份外, 各月的蒸散量都要小于降水, 尤以 3、4 月份差别最大, 2004 年 10 月出现典型的秋旱, 但蒸散量和常年相差不大。水汽通量对净辐射、气温、地温、以及土壤热通量的变化都有很好的响应, 两种天气条件下都能达到显著水平, 可以用一元二次方程表达其间的关系。逐步回归分析显示晴天和多云时入选的变量不完全相同, 晴天主要是净辐射、温度(气温、地温)、水分(饱和水汽压差), 多云时包括净辐射、地温、土壤热通量和水分(空气相对湿度、土壤含水量)。可见气象条件在很大程度上制约着水汽通量的变化, 而以辐射和地温的影响最大。

**关键词:**水汽通量; 涡度相关; 人工林; 环境因子

**文章编号:** 1000-0933(2006)08-2449-08 **中图分类号:** Q948 **文献标识码:** A

## Studies on water vapor flux characteristic and the relationship with environment factors over a planted coniferous forest in Qianyanzhou station

LI Ju<sup>1</sup>, LIU Yun-Fen<sup>2,\*</sup>, YANG Xiao-Guang<sup>1</sup>, LI Jun<sup>1</sup> (1. College of Resources and Environmental Sciences, China Agricultural University, Beijing 100094, China; 2. Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China). *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(8): 2449 ~ 2456.

**Abstract:** Water vapor flux over a planted coniferous forest ecosystem near Qianyanzhou, Jiangxi Province was continuously measured with the eddy covariance technique for the year of 2004. How environmental variables, including net radiation, air temperature, soil moisture affect water vapor flux variation was studied in detail. Results showed that the maximum monthly water vapor flux occurred in July, and the maximum daily water vapor flux reached  $0.149 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . While January has the lowest monthly water vapor flux value, the maximum daily water vapor flux in January was only  $0.021 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ . The diurnal variation of water vapor flux showed different pattern for clear and cloudy days. Except in July and in October, water vapor flux for all other months was less than the precipitation. Although the monthly precipitation in October was only 0.6 mm, water vapor flux didn't show a significant decrease as compared with previous years. The annual total evapotranspiration was 736.1mm, which was about 55.6% of the annual precipitation (1323.6 mm). Regression analysis showed that daily water vapor flux was significantly

**基金项目:**国家重点基础研究发展规划资助项目(2002CB412501); 中国科学院知识创新工程重大资助项目(KZCX1-SW-01-01A2); 中国科学院地理科学与资源研究所知识创新工程主干科学计划资助项目(X10G-E01-03-05)

**收稿日期:** 2005-06-08; **修订日期:** 2005-12-18

**作者简介:** 李菊(1981~), 女, 安徽合肥人, 硕士生, 主要从事红壤丘陵区通量测定及方法应用研究. E-mail: tdsoljalj@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: liuyf@igsnr.ac.cn

**Foundation item:** The project was supported by National Basic Research Program of China (No. 2002CB412501); Knowledge Innovation Project of CAS (No. KZCX1-SW-01-01A2); Main Science Program of Knowledge Innovation Project of Institute of Geographical Science and Natural Resources Research, CAS (No. X10G-E01-03-05)

**Received date:** 2005-06-08; **Accepted date:** 2005-12-18

**Biography:** LI Ju, Master candidate, mainly engaged in flux observation and method applied over red earth zone. E-mail: tdsoljalj@163.com

correlated with net radiation, air temperature, soil temperature and soil heat flux under both clear and cloudy days, all in quadratic relationships. Partial linear regression analysis indicated that on clear days relative humidity and air vapor pressure deficit have a relatively larger impact on water vapor flux than other variables. While on cloudy days relative humidity and soil moisture content have a larger impact on water vapor flux, even though not in a significant level. We didn't find a significant relationship between wind speed and water vapor flux. Stepwise regression analysis demonstrated that different set of environmental factors controlled water vapor flux on days with different weather conditions. The most important environmental factors controlling water vapor flux were net radiation, air and soil temperature, and air vapor pressure deficit for clear days, and net radiation, soil temperature relative humidity, soil heat flux and soil moisture content for cloudy days. From this study, it was clear that these environmental variables, especially net radiation and soil temperature regulated water vapor flux over the planted coniferous ecosystem.

**Key words:** evapotranspiration; eddy covariance; planted coniferous forest; environment variable

水汽通量是生态系统水循环过程的重要特征参数,陆地/大气系统的水汽输送既是水循环的一个环节,同时又是潜热输送的载体,是能量平衡的重要影响因子以及水量平衡中重要的组成部分,反映了陆面过程中地气互作的有关信息。森林水汽通量主要指林下土壤表面蒸发、植被蒸腾和树冠截留水分蒸发 3 部分的总和,是森林植被水分状况的重要指标,热量耗散的一种形式,同时又是影响区域和全球气候的重要因素。

目前,微气象学的涡度相关方法已经广泛应用于陆地生态系统物质和能量交换的测定中<sup>[1-3]</sup>,成为通量观测网络 FLUXNET(Ameri-Flux、Euro-Flux、Asia-Flux、China-Flux)的标准观测方法。然而,目前国内外利用涡度相关方法对森林生态系统的通量研究主要集中在碳通量和能量通量研究上,水汽通量大都作为辅助观测项目,并未进行深入的研究和探讨<sup>[4-6]</sup>。位于亚热带红壤丘陵地区的千烟洲站作为 ChinaFlux 的组成部分,代表着人工林生态系统,2002 年秋季开始在此利用涡度相关技术对 CO<sub>2</sub>、水、热通量进行长期连续观测。本文将以此为研究对象,在 2004 年监测数据的基础上,分析水汽通量的全年动态,探讨制约该生态系统水汽通量的主要环境因子,为森林水汽收支的研究提供基础。

## 1 试区概况

试验在中科院千烟洲红壤丘陵综合试验站进行,该站位于江西省泰和县境内,属亚热带中部红壤丘陵区,地理坐标为 115°03'29.2"E, 26°44'29.1"N,海拔高度在 60~115m 之间,相对高差 20~50 m。站区多年平均气温 17.8℃,≥0℃活动积温 6543.8℃d,≥10℃活动积温 5948.2℃d;平均年降水量 1471.2 mm,年蒸发量 1259.9 mm,年均相对湿度 83%;年日照时数 1306h,太阳总辐射量 4 223MJ/m<sup>2</sup>,具有典型的亚热带季风气候特征。

试区主要土壤类型包括红壤、水稻土、潮土、草甸土等,成土母质多为红色砂岩、砂砾岩或泥岩,以及河流冲积物。现有林分基本为 1985 年前后营造的人工纯林,主要树种有马尾松(*P. massoniana*)、湿地松(*Pinus elliotii*)、杉木(*Cunninghamia lanceolata*),除此以外,还夹杂有木荷、柑橘等,常绿覆被占土地总面积的 76%。林分基本郁闭,林下植被有小灌木、蕨类和草本层。

## 2 材料和方法

### 2.1 试验场地和仪器

微气象观测塔建于 2002 年 8 月,四周的森林覆盖均在 90% 以上。塔的西边主要是成片的湿地松,东南以马尾松为主,东北以杉木为主,平均树高 12m。观测铁塔总高 45.04m(含避雷针 2m),涡度相关系统的观测仪器安装在铁塔的 2m、23m 和 39m。根据以前的研究结论<sup>[7]</sup>,本试验采用 23m 处(2 倍林冠高)开路系统观测数据进行分析,这个高度基本可以代表下垫面 1km<sup>2</sup> 范围内的状况。主要仪器是 LI-7500 红外分析仪(IRGA, Li Cor Inc., Lincoln, Nebraska, USA,观测大气中的二氧化碳和水汽浓度);CSAT3 三维超声风速仪(Campbell Scientific Ltd, USA,观测 3 维风速和空气温度)。同时在塔上不同高度(1.6、2、7、11、15、23、31、39、41m)安装有常规气象仪器(HMP45C, VAISALA,观测各个高度的温度、湿度、风速、水汽压等,41m 处同步输出辐射和降水数据)。另外,在相应位置安装仪器分别观测地表温度和地下 1、5、20、50、100 cm 的土壤温度,地下 5cm、20cm、

50cm 的土壤湿度以及地下 3cm、5cm 的土壤热通量。

数据采集器(CR10XTD、CR23XTD、CR5000)以 10Hz 频率采集观测数据,在采集实时数据的同时在线计算出通量数据并取 30min 平均值,全部观测数据保存到 PC 卡并由电脑实时下载。下载的通量数据包括实时数据和半小时平均数据,常规气象数据则包括半小时平均和日平均数据。

## 2.2 计算公式

水汽通量( $E$ )用实时测定的垂直风速与水汽浓度的斜方差求得。计算公式如下:

$$E = \rho \overline{w'q'} \quad (1)$$

式中, $\rho$  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。只要观测到水汽的湍流脉动量,即可计算出水汽通量的平均值。对于通量的符号规定为:气体由大气圈进入生态系统的通量值符号为负,反之为正。

## 2.3 数据处理

本研究采用的数据为通量观测的 30 min 的平均值。数据处理主要包括采用 3 次坐标轴旋转法校正 3 维风速使得垂直风向上的风速的平均值为零,水平风速方向与主导风向一致;剔除由于恶劣天气、仪器故障等原因造成的不合理的数据;采用平均日变化法“MDV”插补缺失数据<sup>[3]</sup>。

## 3 结果和分析

### 3.1 全年水汽通量分布特征

通过对全部时间段缺失数据的插补计算,得到了千烟洲人工林生态系统水汽通量全年逐日逐半小时的水汽通量数据,按月计算了日变化,结果如图 1 所示。从图中可以看出,全年各月各时刻的水汽通量大都为正值,即从森林向大气中释放,是一个水汽源,且夏季大于春秋两季,冬季最小。对比不同季节的日变化趋势发现,夏秋季节变化较冬春季节有规律,日变化曲线为单峰,且相对平缓;而冬春季节日变化幅度大,曲线较陡,除了一个顶峰之外,还有若干小峰。

全年各月水汽通量值的日变化呈现规律性,夜间接近于 0,表明此时土壤蒸发和叶片蒸腾极其微弱,从 6:00~8:00 开始逐渐升高,但冬春两季多有小幅波动;大多在 12:00~14:00 达全天最高值,而后逐渐下降;在 18:00~20:00 又接近 0,其后变化缓慢,基本维持在 0 附近。

另外,各月最大值在  $0.02 \sim 0.15 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$  之间,不同季节差异明显,但基本出现在正午时分,其中 7 月份水汽通量值明显高于其它各月,日最大值为  $0.149 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,这是因为当月的日平均光合有效辐射为  $364.56 \mu\text{mol m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,日平均温度  $27.94^\circ\text{C}$ ,都是全年的最高值,而降水量却仅有 103.5mm,植物生长受到抑制,而蒸腾旺盛。1 月最低,日最大值仅有  $0.021 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,与该月的气象条件和物候情况相对应。全年各月最小值基本为  $-0.001 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ,季节差异不显著,集中在夜间和凌晨,但是出现时刻各不相同。

图 2 对比了晴天和多云天气下水汽通量的日变化情况,从图中可以看出,尽管水汽通量的变化都表现为夏季最高,春秋季节次之,冬季最低,但晴天的这种区别更为显著,这与晴天时不同季节的辐射和温度状况差别较大一致。另外,晴天水汽通量值要大大高于多云天气,二者的日最大值相差 1/3。

计算全年水汽通量的总和可以得到微气象塔观测范围内蒸散情况。图 3 是逐月的蒸散量和降水量的对比图。除了 7 月和 10 月份以外,各月的蒸散量都要小于降水量,尤以 3、4 月份最为明显,这是因为尽管这两个月的降水充沛(占全年的 30.5%),植物处于快速生长期,但由于春季的辐射和温度都不算高,因而蒸腾并不旺盛。2004 年 10 月的降水量仅为 0.6mm,出现典型的秋旱,但蒸散量却未受明显影响,和常年相差不大。其原因将在下文作具体分析。全年蒸散量为 736.1mm,占全年降水量(1323.6mm)的 55.6%,比林间的小型蒸发皿和 E601 的测定的水面蒸发结果都要偏低,根据 Berbigier 的分析,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<sup>[4]</sup>;另外数据处理时采用的“MDV”法的插补结果与实际观测值相比偏低也应该是原因之一。

### 3.2 环境因子对人工林水汽通量的影响

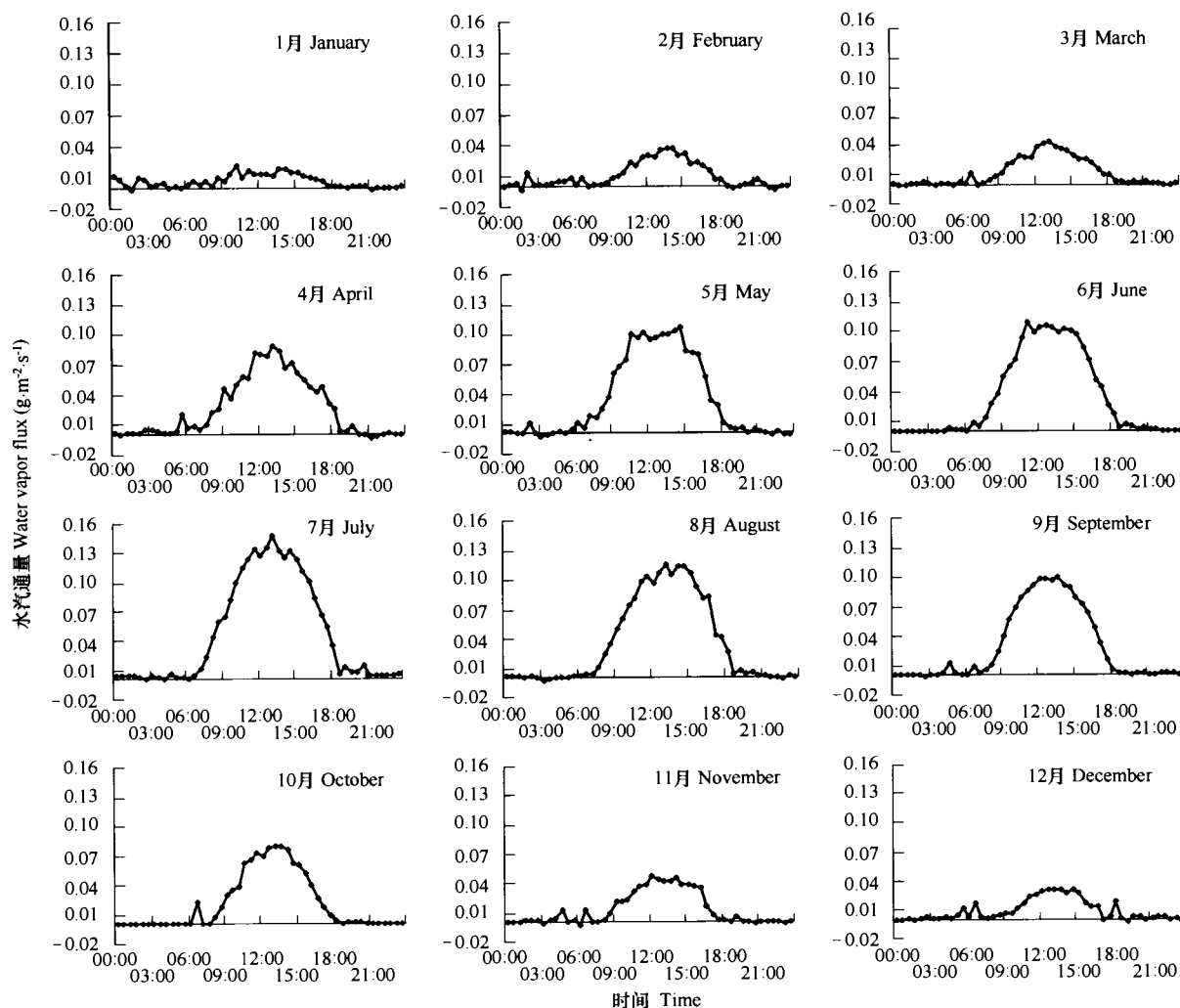


图1 2004年各月水汽通量平均日变化分布

Fig. 1 Mean diurnal change distribution of monthly water vapor flux in 2004

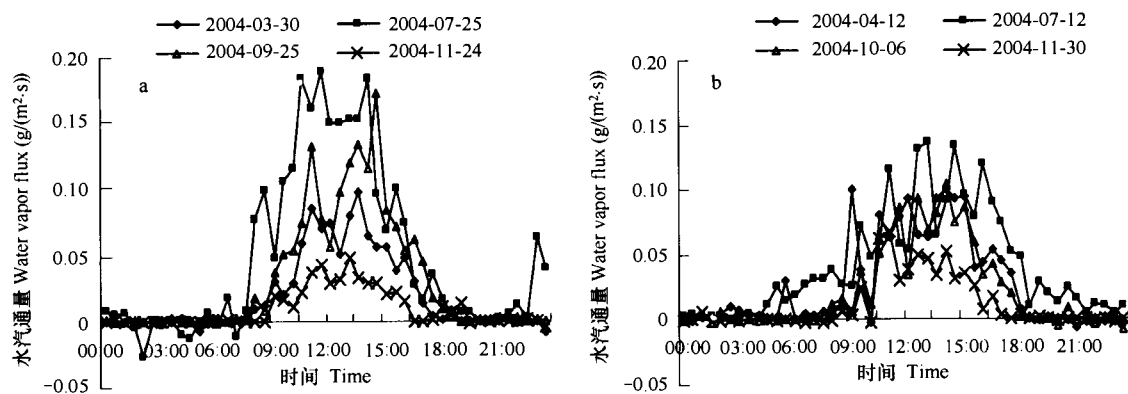


图2 不同天气条件下水汽通量的日变化

Fig. 2 Diurnal change of water vapor flux in different weather condition

对干烟洲人工林水汽通量影响较大的气象要素包括净辐射 ( $R_n$ )、温度(空气温度、土壤温度)、湿度(饱和水汽压差、水汽压、土壤湿度、空气相对湿度)、热量(土壤热通量)等。根据上文的结果,本文仅对 9:00 ~ 16:30

时间段的数据进行环境因子的控制机制分析,并将不同天气条件分开进行。

**3.2.1 净辐射( $R_n$ )** 净辐射是蒸散的驱动力。 $R_n$  在晴天和多云天气条件下变化并不完全一致,但两种天气状况时水汽通量对其都表现出良好的响应性。从图 4 得到的拟合曲线上看(通过  $F$  检验),晴天的相关系数比多云时要大,相关度高,这与 Paul 等和 Law 等的结果一致<sup>[4,8]</sup>。然而,即便是晴天, $R_n$  和水汽通量的  $R^2$  也仅为 0.55,这说明影响水汽通量的因素是多方面的。净辐射对人工林水汽通量的作用体现在全年各月,有研究表明,蒸散与净辐射呈正相关<sup>[9]</sup>,通过图 5 显示的生长季典型晴天的净辐射和水汽通量的日变化也能发现二者呈现同样的关系,水汽通量和净辐射的变化趋势类似,清晨日出后,随着净辐射的增大,水汽通量也逐渐增大,但值得注意的是,在午后净辐射达到全天的次高峰时,水汽通量值却并非如此,这是因为叶片的“蒸腾午休现象”<sup>[10]</sup>;中午,特别是炎热的夏季,叶片会在气温最高的 14:00 左右关闭部分气孔,以便减少水分的散失。因而水汽通量值也相应降低,午后又会出现小幅度的升高,但总的趋势为随着净辐射的降低水汽通量随之降低,直至夜间至凌晨达到最低值。

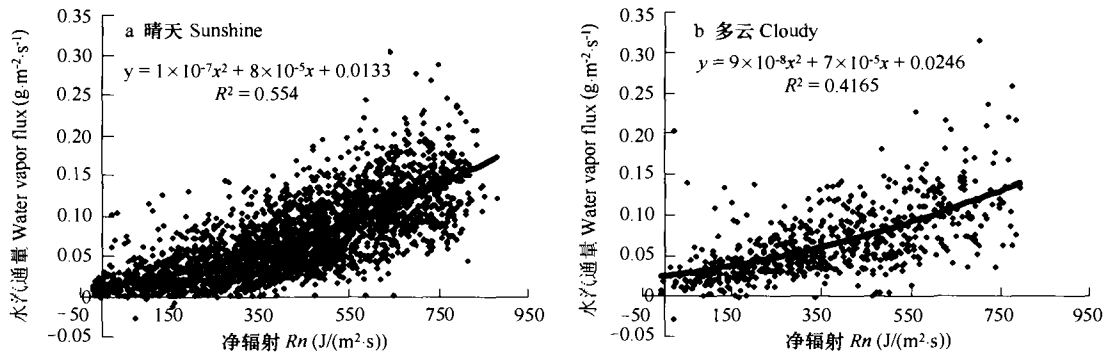


图 4 不同天气条件下水汽通量对净辐射的响应

Fig.4 The response of water vapor flux to  $R_n$  in different weather condition

**3.2.2 温度** 温度包括气温和土壤温度,通过分析发现,气温和地下 1cm 的土壤温度对水汽通量的影响较大,且晴天好于多云。简单相关分析的相关系数分别为:晴天,0.82 和 0.84;多云,0.75 和 0.78,都达到了显著水平。气温直接受辐射影响,它们的日变化趋势相同,只是气温的日最高值比辐射的日最大值要滞后,因而它对水汽通量的控制也与辐射类似。

土壤温度一般作为环境温度指标,土壤蒸发与其密切相关,以前的研究对森林生态系统的呼吸强度与土壤温度做了大量的工作,表明两者呈指数关系<sup>[11-13]</sup>,本文据此推导了水汽通量和土壤温度的方程,发现用一元二次多项式模拟的结果更好,晴天及多云天气时的方程(均经过  $F$  检验)分别为  $E = 0.0002 T_{1cm}^2 - 0.0006 T_{1cm} + 0.0143$ ,  $E = 0.0002 T_{1cm}^2 - 0.0025 T_{1cm} + 0.034$ 。式中, $T_{1cm}$  为地下 1cm 的土壤温度。

**3.2.3 湿度** 和湿度有关的环境因子包括空气相对湿度( $RH$ )、水汽压、饱和水汽压差( $VPD$ )和土壤湿度。

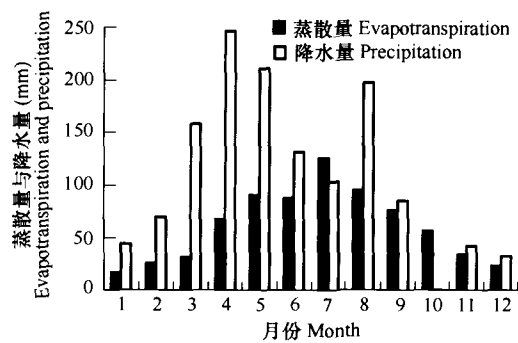


图 3 2004 年蒸散量和降水量的对比

Fig.3 The contrast between evapotranspiration and precipitation in 2004

图 5 显示的生长季典型晴天的净辐射和水汽通量的日变化也能发现二者呈现同样的关系,水汽通量和净辐射的变化趋势类似,清晨日出后,随着净辐射的增大,水汽通量也逐渐增大,但值得注意的是,在午后净辐射达到全天的次高峰时,水汽通量值却并非如此,这是因为叶片的“蒸腾午休现象”<sup>[10]</sup>;中午,特别是炎热的夏季,叶片会在气温最高的 14:00 左右关闭部分气孔,以便减少水分的散失。因而水汽通量值也相应降低,午后又会出现小幅度的升高,但总的趋势为随着净辐射的降低水汽通量随之降低,直至夜间至凌晨达到最低值。

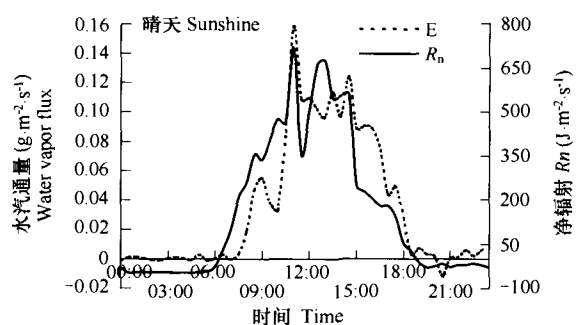


图 5 生长季晴天水汽通量和净辐射的日变化(2004-06-18)

Fig.5 Diurnal changes of  $R_n$  and water vapor flux in fine weather during growth season(2004-06-18)

在控制其它环境因子的情况下,对上述因素逐一进行偏相关分析(表 1),发现不同天气条件下的结果并不相同。晴天时,  $VPD$  和  $RH$  对水汽通量的影响相对明显,而多云时则是  $RH$  和土壤湿度的作用较大,但都达不到显著水平。

表 1 水汽通量和与湿度有关的环境因子偏相关分析结果

Table 1 The partial correlation analysis results of water vapor flux and moisture concerned environmental factors

|           | $RH$   | 水汽压 Water vapor pressure | $VPD$ | 地下 50cm 土壤湿度 Soil moisture under 50cm | $N$  |
|-----------|--------|--------------------------|-------|---------------------------------------|------|
| 晴天 Clear  | -0.160 | -0.115                   | 0.182 | —                                     | 2488 |
| 多云 Cloudy | -0.119 | —                        | —     | 0.114                                 | 554  |

空气相对湿度对植被的生长有着重大的影响。相对湿度降低,会增加土壤表面的蒸发和叶片蒸腾,因而它也是水汽通量的控制因子之一,具有相反的关系。由水汽压和  $RH$  得到的  $VPD$  是表征空气干燥程度的指标。多云时,空气湿度较大,空气潮湿,而当其达到一定值时,会形成水汽凝结,覆盖于叶片表面,堵塞气孔,大大降低其蒸腾损耗。土壤蒸发主要包括两种过程,一种是土壤表面的直接蒸发,另一种是在土壤内部水分进行的蒸发,再通过土壤中的孔隙扩散逸出土壤表面;第二种过程的速度和蒸发量都比第一种要小得多。一般来说,多云时的土壤水分要比晴天高,土壤蒸发主要是第一种过程,其受土壤含水量的影响更大,因而土壤湿度对水汽通量值的影响作用较大。

**3.2.4 热量和风速风向** 土壤热通量,又称热流密度,即单位时间通过单位横截面积的热流<sup>[14]</sup>。土壤热量最主要的来源是太阳辐射,平均每天辐射到每平方厘米的热量为  $1 \sim 2\text{kJ}$ 。

土壤温度与热通量直接相关。土壤温度的升降是由于土壤吸热或放热不同造成的。当土壤吸热时,土壤温度上升,放热时则下降。Fourie 热流定律(下式,其中  $J_T$  为土壤热通量,  $k$  表示土壤热导率)说明了土壤热通量与温度梯度成正比:

$$J_T = -k \frac{\partial T}{\partial Z} \quad (2)$$

拟合了不同天气条件下水汽通量对土壤热通量的响应曲线,相关系数分别达到了晴天 0.74 和多云 0.56,且显著相关,与其对温度的响应一致。

风速与水汽通量没有相关性,这可能与试验是在人工林进行,林内树木对风速具有明显的削弱作用有关。从风向和水汽通量的分布图(图 6)可以看出,  $150^\circ \sim 180^\circ$ 、 $300^\circ \sim 40^\circ$  的风向之间水汽通量最为集中,这与风向的年分布图一致,即北边和东南边的植被是水汽通量的主要贡献源区;但其它方向上的差别亦不是很明显,这也从一个侧面说明微气象塔的安装地点受干扰程度较低,能够代表相应区域内的通量状况。

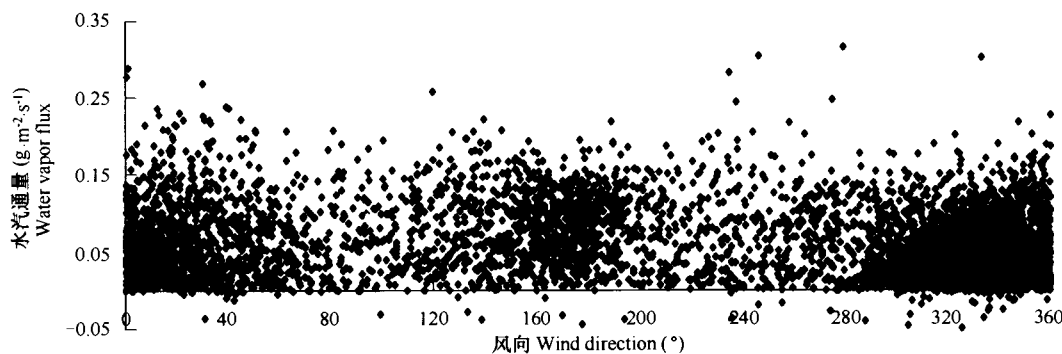


图 6 23m 高度水汽通量和风向分布之间的关系

Fig.6 The relationship between water vapor flux and wind direction at 23m

**3.2.5 水汽通量和主要环境因子的回归分析** 以上是影响森林生态系统水汽通量的最常见的环境因素,在森林生态系统中,这些要素同时发生着复杂变化,交织在一起制约着系统的水汽收支,仅仅分析其中单个因素

的影响规律并不能完全弄清水汽通量的控制机制。因此,对其中主要的几个因子进行了逐步回归分析,并通过  $t$  检验和  $F$  检验。结果如下:

晴天,  $R_n(x_1)$ 、地下 1cm 土壤温度( $x_2$ )、VPD( $x_3$ )、和空气温度( $x_4$ ) 入选回归方程,且达到 0.01 的显著性水平。土壤热通量没有入选的原因可能是它对水汽通量的影响受到地温的控制。 $E = 5.36 \times 10^{-5} x_1 + 0.004 x_2 + 0.013 x_3 - 0.002 x_4 - 0.043$

多云,  $R_n(x_1)$ 、地下 1cm 土壤温度( $x_2$ )、RH( $x_5$ )、土壤热通量( $x_6$ )和地下 50cm 土壤湿度( $x_7$ )入选回归方程,且达到 0.01 的显著性水平。气温没有入选的原因可能是它与水汽通量的相关性没有地温大,能够通过地温来表达。 $E = 5.52 \times 10^{-5} x_1 + 0.005 x_2 - 0.039 x_5 - 0.001 x_6 + 0.179 x_7 - 0.096$

上述结果表明,不同天气条件下水汽通量的控制机制并不完全相同,晴天主要是大气因素,而多云时土壤因素则有重要影响,多云天气时的影响因子比晴天更多更复杂,这与多云时的辐射和温度较低有关。总的来看,辐射和地温是影响水汽通量最主要的环境因素。这解释了 2004 年 10 月的蒸散量和常年相差不大的原因,2004 年 10 月的降水量仅为 0.6mm,是典型的秋旱,但蒸散量仍高达 56.9mm。原因主要有两点:一是当年 9 月份降水量充足,土壤中存贮了足量的水分,因此 10 月份的土壤水分含量不低,土壤蒸发和叶面蒸腾未受秋旱的明显影响;再者,净辐射和地下 1cm 土壤温度是水汽通量最直接的控制因子,而该月的辐射和地温都在正常范围之内,因此水汽通量和蒸散量也没有受到明显影响,表现为正常水平。

#### 4 小结

对千烟洲人工针叶林 2004 年水汽通量分布特征的观测结果表明,全年各月各时刻的水汽通量大都为正值,是一个水汽源,夏季大于春秋两季,冬季最小。其中 7 月份为全年最高,日最大值达到  $0.149 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ ; 1 月份最低,日最高值仅为  $0.021 \text{ g m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ 。不同天气条件下(晴天和多云)水汽通量的日变化有明显区别。

全年蒸散量为 736.1mm,占总降水量(1323.6mm)的 55.6%,除 7 月份和 10 月份以外,各月的蒸散量都要小于降水,尤以 3、4 月份最为显著,2004 年 10 月的降水量仅为 0.6mm,出现典型的秋旱,但蒸散量却未受明显影响,和常年相差不大。

水汽通量对净辐射、气温、地温、以及土壤热通量的变化都有很好的响应,且都可以用一元二次方程表达其间的关系。逐步回归分析显示晴天和多云时入选的变量不完全相同,晴天主要是净辐射、温度(气温、地温)、水分(饱和水汽压差),多云时包括净辐射、地温、土壤热通量和水分(空气相对湿度、土壤含水量)。可见气象条件在很大程度上制约着水汽通量的变化,而以净辐射和地温的影响最大。

有文献报道<sup>[3,17]</sup>,辐射、饱和水汽压差和土壤含水量是影响水汽通量的最主要因素,这与本文结论有所不同。从相关和回归分析结果来看,在晴天,饱和水汽压差作为仅次于辐射、地温的因子,同样是影响水汽通量变化的因素;而在阴天,空气相对湿度和土壤含水量也同样入选回归方程,但次于辐射和地温。这可能与千烟洲的气候特征有关,当地属于亚热带季风区域,四季分明,相对湿度高,且温度的年较差比湿度的年较差要大得多,因而当地的温度条件相对来说比水分条件更能影响蒸散情况,控制水汽通量的大小。结合 2004 年的气象条件,由于土壤的保湿贮水功能,并不存在土壤含水量极低的情况,所以它也不是最主要控制因子。

蒸散(水汽通量)作为重要的水分状况指标,对于了解水循环特征、探求生态系统物质流动和能量平衡规律,深入理解系统的结构与功能,格局与进程等问题均有着重要意义<sup>[15,16]</sup>,一直以来是水文学、气象学和生态学等学科研究的重点和热点问题。涡度相关法作为对水汽通量(蒸散)最先进、最直接的观测方法,已得到越来越广泛的认同和应用,并被作为实测值以检验相关蒸散模型的精度。但是,涡度相关法本身应用过程还存在着很多问题,如下垫面对通量的影响、数据的检验和修正等,本文只是对 1a 观测结果的分析,其中必然有一些偶然条件和不确定情况,因而不能够完全说明所有的问题,还需要通过进一步的观测和分析来解决和验证。

#### References:

- [1] Baldoccardo D, Valentini R, Running S, et al. Strategies for measuring and modeling carbon dioxide and water vapour fluxes over terrestrial ecosystems.

- Global Change Biology, 1996, 2(3): 159 ~ 168.
- [2] Lee X H. On micrometeorological observations of surface-air exchange over tall vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91: 39 ~ 49.
- [3] Falge Eva, Dennis Baldocchi, Richard Olson, *et al.* Gap filling strategies for long term energy flux data sets. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107: 71 ~ 77.
- [4] Berbigier Paul, Bonnefond Jean-Marc, Mellmann Patricia, *et al.* CO<sub>2</sub> and water vapour fluxes for 2 years above Euroflux forest site. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 108: 183 ~ 197.
- [5] Rannik üllar, Nuria Altimir, Jukka Raittila, *et al.* Fluxes of carbon dioxide and water vapour over Scots pine forest and clearing. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 111: 187 ~ 202.
- [6] Scott Russell L, Edwards Eric A, Shuttleworth W James, *et al.* Interannual and seasonal variation in fluxes of water and carbon dioxide from a riparian woodland ecosystem. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 122: 65 ~ 84.
- [7] Song X, Liu Y F, Xu X F, *et al.* Comparison Study on Carbon Dioxide, Water and Heat Fluxes of the Forest Ecosystem in Red Earth Hilly Zone over Winter and Spring. *Resource Science*, 2004, 26(3): 96 ~ 104.
- [8] Law B E, Falge E, Gu L v. Environmental controls over carbon dioxide and water vapor exchange of terrestrial vegetation. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2002, 113: 97 ~ 120.
- [9] Ji X B, Kang E S, Zhao W Z, *et al.* Simulation of the Evapotranspiration from Irrigational Farmlands in the Oases of the Heihe River Basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(6): 713 ~ 719.
- [10] Huang Z Y, Dong X J, Jiang G M, *et al.* Primary studies on the daily dynamic changes of photosynthesis and transpiration of *Salix psammophila*. *Acta Bot Boreal-Occident Sim*, 2002, 22 (4): 817 ~ 823.
- [11] Hollinger D Y, Kelliher F M, Schulze E D, *et al.* Forest-atmosphere carbon dioxide exchange in eastern Siberia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 90: 276 ~ 290.
- [12] Morén A S, Lindroth A. CO<sub>2</sub> exchange at the floor of a boreal forest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 101: 1 ~ 14.
- [13] Griffis T J, Black T A, Morgenstern K, *et al.* Ecophysiological controls on the carbon balances of three southern boreal forests. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2003, 117: 53 ~ 71.
- [14] Qin Y D. *Soil Physics*. Beijing: Higher Education Press, 2003.
- [15] Constatin J, Inclan M G, Raschendorfer M, *et al.* The energy budget of a spruce forest: field measurements and comparison with the forest-land-atmosphere model (FLAME). *Journal of Hydrology*, 1998, 212-213: 22 ~ 35.
- [16] Wang A Z, Pei T F. Research progress on surveying and calculation of forest evapotranspiration and its prospects. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2001, 12(6): 933 ~ 937.
- [17] Kumagai T, Saitoh T M, Sato Y, *et al.* Annual water balance and seasonality of evapotranspiration in a Bornean tropical rainforest. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 128: 81 ~ 92.

#### 参考文献:

- [7] 宋霞, 刘允芬, 徐小锋, 等. 红壤丘陵区人工林冬春时段碳、水、热通量的观测与分析. *资源科学*, 2004, 26(3): 96 ~ 104.
- [9] 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. *冰川冻土*, 2004, 26(6): 713 ~ 719.
- [10] 黄振英, 董学军, 蒋高明, 等. 沙柳光合作用和蒸腾作用日动态变化的初步研究. *西北植物学报*, 2002, 22 (4): 817 ~ 823.
- [14] 秦耀东, *土壤物理学*. 北京: 高等教育出版社, 2003.
- [16] 王安志, 裴铁璠. 森林蒸散测算方法研究进展与展望. *应用生态学报*, 2001, 12(6): 933 ~ 937.