

# 三种方法测定高寒草甸生态系统蒸散比较

戚培同<sup>1,2</sup>, 古 松<sup>1,\*</sup>, 唐艳鸿<sup>3</sup>, 杜明远<sup>4</sup>, 吴力博<sup>1,2</sup>, 赵 亮<sup>1</sup>

(1. 中国科学院西北高原生物研究所, 西宁 810008; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049;  
3. 日本国立环境研究所, 筑波 3050053; 4. 日本国立农业环境技术研究所, 筑波 3058604)

**摘要:** 利用涡度相关技术 (Eddy covariance technique)、小型蒸渗仪 (Mini-lysimeter) 和波文比-能量平衡法 (BREB) 对 2005 年和 2006 年夏季 (7~8 月份) 青藏高原海北高寒草甸生态系统的昼间蒸散 ( $E$ ) 变化进行了对比观测研究。在观测期间, 存在能量不闭合现象, 涡度相关系统测定的湍流通量相当于有效能量的 73%。3 种不同方法测定的蒸散量之间具有较好的相关性, 涡度相关系统与小型蒸渗仪测定的蒸散量相关系数达 0.96, 与波文比法的结果相关系数为 0.95。然而, 波文比法计算的蒸散量最大, 比涡度相关系统的观测值高 43%; 小型蒸渗仪法的测定值次之, 比涡度相关法的观测值高 19%; 涡度相关法测算的蒸散值最小。研究结果表明, 利用涡度相关技术测定该高寒草甸生态系统的潜热通量, 可能会过小评价该生态系统的蒸散量。

**关键词:** 蒸散; 波文比; 涡度相关技术; 小型蒸渗仪; 高寒草甸

文章编号: 1000-0933 (2008) 01-0202-10 中图分类号: Q145, Q945, Q948 文献标识码: A

## Comparison of three methods for measurement of evapotranspiration in an alpine meadow

Q I Pei-Tong<sup>1,2</sup>, GU Song<sup>1,\*</sup>, TANG Yan-Hong<sup>3</sup>, DU Ming-Yuan<sup>4</sup>, WU Li-Bo<sup>1,2</sup>, ZHAO Liang<sup>1</sup>

1 Northwest Institute of Plateau Biology, Chinese Academy of Sciences, Xining 810008, China

2 Graduate School, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China

3 National Institute for Environmental Studies, Tsukuba, Ibaraki, 3050053, Japan

4 National Institute for Agro-Environmental Sciences, Tsukuba, Ibaraki, 3058604, Japan

Acta Ecologica Sinica, 2008, 28 (1): 0202 ~ 0211

**Abstract:** The daytime evapotranspiration ( $E$ ) was measured using the eddy covariance (EC) technique, the mini-lysimeter method, and the Bowen ratio-energy balance (BREB) method, in an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan plateau during the growing season of 2005 and 2006 (Jul -Aug). The energy imbalance with a slope of 0.73 was found in this study. Results showed a significant correlation between the  $E$  measured with the three methods, with the correlation coefficient of 0.96 between the EC technique and the mini-lysimeter method, and 0.95 between the EC technique and the BREB method. However, the value of  $E$  measured by the BREB was the largest, which was 43% higher than that by the EC; whilst the  $E$  measured with the mini-lysimeter had the medium value, which was 19% higher than that by the EC. The results suggest that the  $E$  may be underestimated using the EC in this alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau.

基金项目: 中国科学院“百人计划”资助项目 (0429091211); 日本环境厅全球环境研究基金 (S-1); 国家自然科学基金资助项目 (30770419)

收稿日期: 2007-02-04; 修订日期: 2007-10-22

作者简介: 戚培同 (1982~), 男, 河南信阳人, 硕士生, 主要从事全球变化和草地生态学研究。E-mail: qipeitong@163.com

\* 通讯作者 Corresponding author E-mail: gus@nwipb.ac.cn

**Foundation item:** The project was financially supported by Hundreds-Talent Program, Chinese Academy of Sciences (No. 0429091211); Global Environmental Research Program of the Ministry of Environment, Japan (S-1); National Natural Science Foundation of China (No. 30770419)

**Received date:** 2007-02-04; **Accepted date:** 2007-10-22

**Biography:** Q I Pei-Tong, Master candidate, mainly engaged in global changes and grassland ecology. E-mail: qipeitong@163.com

<http://www.ecologica.cn>

**Key Words:** evapotranspiration; bowen-ratio; eddy covariance technique; mini-lysimeter; alpine meadow

生态系统的蒸散包括植物蒸腾、植物体表面水分蒸发和植株间裸露土壤的蒸发,由诸多的环境和生物因子所控制,它不仅影响着植物的生长发育,而且在一定程度上制约着作物边界层的微气候状况。同时蒸散又是生态系统能量平衡中的重要组成部分,对一地的气候乃至全球的水循环亦产生巨大的影响。因此,蒸散成为全球陆地表层研究的重要内容<sup>[1]</sup>。

青藏高原被誉为“世界第三极”,平均海拔高度在4000m以上,面积约为250万km<sup>2</sup>。众所周知,青藏高原接收的太阳辐射明显高于同纬度其他地区,在7月和8月太阳总辐射可达22 MJ/(m<sup>2</sup>·d),但在强辐射的背景下,该生态系统又常年处在低温的环境中。而且高原的降水又集中在5~9月份的生长季节。在这种独特的生态环境中,导致了高寒草甸生态系统蒸散的特殊性。因此准确把握该生态系统的水分收支状况对于进一步揭示整个青藏高原高寒草甸生态系统的水分循环和能量平衡有着极为重要的意义。

生态系统的蒸散可以直接测定或通过计算求得,不同方法得出的结果也存在不同程度的差异。蒸渗仪(Lysimeter)是测定蒸散最传统,也是最为精确的方法之一。波文比能量平衡法(BREB)作为一种估算方法,因其方法与原理比较简单,在国内外应用的较多。近代,基于湍流理论的涡度相关技术广泛应用于CO<sub>2</sub>和H<sub>2</sub>O通量的观测中。然而,涡度相关法与能量平衡法所测定的结果常常存在能量不闭合现象,且涡度相关法测定的能量通量( $H + LE$ )( $H$ 为感热通量; $LE$ 为潜热通量)通常比能量平衡法测定结果( $R_n - G$ )偏低( $R_n$ 为净辐射通量; $G$ 为土壤热通量),即 $(H + LE) < (R_n - G)$ <sup>[2,3,4-9]</sup>。Wilson等<sup>[5]</sup>对全球通量观测网络(FLUXNET)中22个不同植被类型台站的50个观测点的涡度相关数据分析结果表明:能量闭合程度从0.53到0.99不等(能量闭合是指涡度相关法所观测 $(H + LE)$ 与 $(R_n - G)$ 的比值)。Gu<sup>[10]</sup>和Kato<sup>[11]</sup>等的研究表明,在青藏高原海北高寒草甸生态定位站利用涡度相关技术观测的结果同样存在着能量不闭合现象。为了正确评价涡度相关法在高寒草甸测定的水汽通量,本研究目的旨在通过小型蒸渗仪、波文比与涡度相关技术3种方法对青藏高原高寒草甸生态系统的蒸散量进行对比研究,定量分析3种方法所得结果的差异,为正确评价与利用涡度相关技术测定该生态系统的水分收支提供理论依据。

## 1 研究地区与方法

### 1.1 试验样地

该研究设置在中国科学院海北高寒草甸生态系统定位研究站(简称海北站)的矮嵩草(*Kobresia humilis*)草甸。该站位于青藏高原的东北隅,37°36'N,101°18'E,海拔3250m,年均气温为-1.7℃,无明显四季之分,仅有冷暖季之别。最冷月是1月份(-15℃),最热月是7月份(10℃)。平均降水量约600mm,主要集中于5~9月份,多年平均生物量为353.6g/m<sup>2</sup>。土壤类型为草毡寒冻锥形土,有机质含量丰富,土层较薄。土壤水分的变化主要受降水的影响。

### 1.2 研究方法与数据采集

涡度相关观测系统建于2001年8月,观测的项目包括生态系统水汽通量、辐射平衡及温度、湿度等气象因素,该套仪器的具体情况已有详细报道<sup>[12,13]</sup>。蒸散由H<sub>2</sub>O/CO<sub>2</sub>红外分析仪(Li-7500, Li-Cor, 美国)与三维超声风速仪(CSA T3, CSI美国)测定,传感器高度距地面2.2m,其他观测项目见表1。通量观测系统架设在地势平坦开阔的矮嵩草草甸上,周围具有足够大的“风浪区”。

蒸渗仪试验分别于2005年7月11日至8月25日和2006年7月15日至8月25日进行,利用小型蒸渗仪和EA35EDE-1型电子天平进行测定。小型蒸渗仪由2mm厚的铁皮制成,形状为圆柱形,内径30cm,高30cm。该试验设置在海北站矮嵩草草甸涡度相关观测系统附近,随机选取10个样点(即10个重复),分别安装蒸渗仪代表生态系统的蒸散。在操作时首先将上层10~15cm厚的草皮挖出(植物根部主要分布在10cm土层内),下层土按原状逐层装入桶内压实后放入圆坑内,并尽可能减少对植被的破坏。为了测定蒸渗仪的渗漏量,在桶底凿29个直径为0.5cm的小孔,底部放置两层细纱网,以避免桶内土壤漏出桶外。在蒸渗仪的

下方放置 5cm 高的盛水器,用于测定蒸渗仪的渗漏量。由于试验区地势平坦,植被状况均匀,降水强度较小,在本实验中不予考虑地表径流对蒸渗仪的影响。

表 1 观测要素和高度

Table 1 Meteorological and location

观测要素 Meteorological elements	仪器型号 Instrument model	安装高度 Location (cm)
净辐射 Net radiation	CNR-1, Kipp 和 Zonen, 荷兰	150
空气温度和湿度 Air temperature and humidity	HUMP45C, CSI, 美国	110, 220
土壤热通量 Soil heat flux	HFT-3, CSI, 美国	- 2
土壤含水量 Soil water content	TDR, CS615, CSI, 美国	5, 20, 50
降水量 Precipitation	TE525MM, CSI, 美国	70

电子天平 (EA35EDE-1型)由德国赛多利斯 (Sartorius)公司生产,每年由赛多利斯公司进行校正,最大称重为 35kg,精度为 0.5 g,相当于蒸渗仪 0.007mm 的蒸散量。

利用数据采集仪 (CR5000和 CR23X, Campbell, Inc.)连续记录水汽通量及相关气象数据,每间隔 15 min 输出 1次平均数据。

蒸渗仪的观测为每日 8:00和 20:00,同时选取典型晴天和阴天测定蒸散的日变化,从 8:00~20:00每间隔 2 h观测 1次。

### 1.3 计算方法及原理

目前测定实际蒸散的方法有蒸渗仪法、波文比能量平衡法、涡度相关法和空气动力学等方法。其中蒸渗仪法是直接测定生态系统蒸散最经典的方法。涡度相关法是近年发展起来的最为先进的方法之一,也是用来进行长期定位连续观测  $H_2O/CO_2$ 通量的理想手段。

#### 1.3.1 波文比能量平衡法 (BREB)

波文比 ( $\beta$ )定义为某一界面上感热通量与潜热通量的比值,为垂直方向上温度梯度和湿度梯度的函数。用公式表示为<sup>[14]</sup>:

$$\beta = \frac{H}{LE} = \frac{C_p K_h \frac{T_2 - T_1}{z}}{L K_w \frac{q_2 - q_1}{z}} = \frac{K_h \frac{T_2 - T_1}{z}}{K_w \frac{e_2 - e_1}{z}} \quad (1)$$

式中, $H$ 为感热通量; $LE$ 为潜热通量( $L$ 为水的汽化潜热系数; $E$ 为蒸散量); $\rho$ 为空气密度; $C_p$ 为空气定压比热; $K_h$ 和  $K_w$ 分别为热量湍流交换系数和水汽湍流交换系数; $T_1$ 、 $T_2$ 、 $e_1$ 、 $e_2$ 和  $z$ 分别为两个高度的温度、水汽压、比湿和高度差; $\beta = C_p P / L$ ,为干湿表常数; $C_p = 1.0061 \times 10^3 J/K \cdot kg$ ;  $L = 2.5 \times 10^6 J/kg$ ;  $P$ 为试验地气压。

根据相似性原理,在假定水汽湍流交换系数 ( $K_w$ )和热量湍流交换系数 ( $K_h$ )相等的条件下,即  $K_h = K_w$ ,可得:

$$\beta = \frac{C_p}{L} \frac{t}{q} = \frac{T}{e} \quad (2)$$

由公式可知,利用两个高度的温度和湿度的观测值通过 (2)式就可计算出波文比。

能量平衡方程是计算  $LE$ 的基础:

$$R_n = LE + H + G \quad (3)$$

式中, $R_n$ 为净辐射通量; $G$ 为土壤热通量。

将方程 (1), (2), (3)联立后可得:

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta) \quad (4)$$

本研究中温湿度观测的高度分别为 1.1m和 2.2m高度。温、湿度传感器 (HMP45C)在气温为 0~20 时

的误差为  $\pm 1\% \sim \pm 1.5\%$ , 相对湿度的误差在  $\pm 2\%$ , 该误差范围对本研究的计算结果不会造成太大影响。鉴于波文比能量平衡法在夜间应用的局限性在本文中只选择白天的数据进行分析。

### 1.3.2 涡度相关法

根据涡度相关技术原理, 潜热和感热通量可通过下列公式计算得出<sup>[14]</sup>:

$$H = C_p w T \quad (5)$$

$$LE = L w T \quad (6)$$

式中,  $q$  为空气比湿脉动值;  $w$  为垂直风速脉动值;  $T$  为温度脉动值。以上变量由 Li-7500 和超音波风速仪测得。

### 1.3.3 蒸渗仪法

根据蒸渗仪水量平衡原理, 可以得到蒸散量的计算公式<sup>[15]</sup>:

$$S = P + Q - R - E \quad (7)$$

式中,  $S$  为蒸渗仪内土壤水变化量;  $P$  为降水量;  $Q$  为渗漏量;  $R$  为地表径流量;  $E$  为蒸散量。

本试验中, 由于降水强度较小, 加之地势平坦,  $R$  可以忽略, 即  $R = 0$ 。由于测定深度未达到地下水位, 亦可以不考虑地下水对蒸渗仪的补给影响。

降水量由雨量筒直接测得, 渗漏量由蒸渗仪下部的盛水器测得。由于本研究蒸散量数据是在没有降水发生或在降水 24 h 后的所测, 根据渗漏量观测结果, 此时没有渗漏发生。因此土壤蓄存水量的变化量 ( $S$ ) 可通过 Sartorius 天平两次观测的差值求得。可用公式 (8) 计算出蒸散量:

$$E = S \quad (8)$$

此时, 8:00 ~ 20:00 的重量变化为白天的蒸散量, 夜晚的蒸散量取自 20:00 ~ 8:00 变化。

## 2 结果

### 2.1 能量闭合现状

如前所述, 许多研究指出<sup>[2,4~7]</sup>, 利用涡度相关技术测定的结果存在着能量的不闭合问题。能量闭合程度通常用涡度相关法测定的能量通量 ( $LE + H$ ) 与有效能量 ( $R_n - G$ ) 进行线性回归, 利用其斜率和截距分析能量闭合程度。Gu<sup>[10]</sup> 和 Katb<sup>[11]</sup> 等分别对海北站高寒草甸 2002 年的数据进行解析, 结果表明, 能量闭合程度大致为 0.70。本研究分别利用 2005 和 2006 夏季观测期间涡度相关法观测的昼间 (8:00 ~ 20:00) 数据分析了能量闭合状况 (图 1)。如图所示, 观测期间的能量闭合程度约为 0.73, 即涡度相关系统观测的能量通量 ( $LE + H$ ) 小于能量平衡法观测的有效能量 ( $R_n - G$ ), 然而二者存在较好的相关性, 相关系数达 0.92。

### 2.2 3种方法测定的蒸散日变化

在 2005 和 2006 年夏季观测期间, 3 种方法测定的蒸散日变化如图 2 所示, 数据为 2 h 间隔的累计蒸散量, 小型蒸渗仪数据为 10 个样点的平均值。从图中可以看出, 无论天气状况晴与否, 蒸散日变化都非常明显, 最高值出现在 12:00 ~ 14:00, 而且 3 种不同方法所测定的生态系统蒸散具有相同的日变化趋势。然而在整个观测期间, 三者观测值存在明显的差异, 波文比法计算的蒸散量最大, 蒸渗仪法的结果次之, 涡度相关法测定的值最低。

2005 年和 2006 年观测期间的涡度相关法、波文比法和小型蒸渗仪法三者之间的相关关系如图 3 所示, 数据

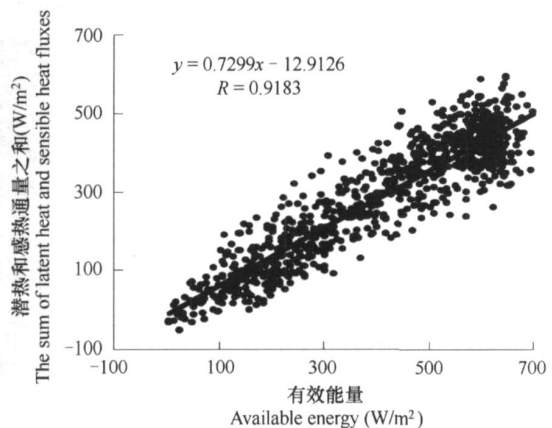


图 1 观测期间涡度相关系统观测的潜热和感热通量之和 ( $H + LE$ ) 和有效能量 ( $R_n - G$ ) 的关系

Fig 1 Relationship between the sum of latent heat and sensible heat fluxes ( $H + LE$ ) and available energy ( $R_n - G$ ) during the observation period

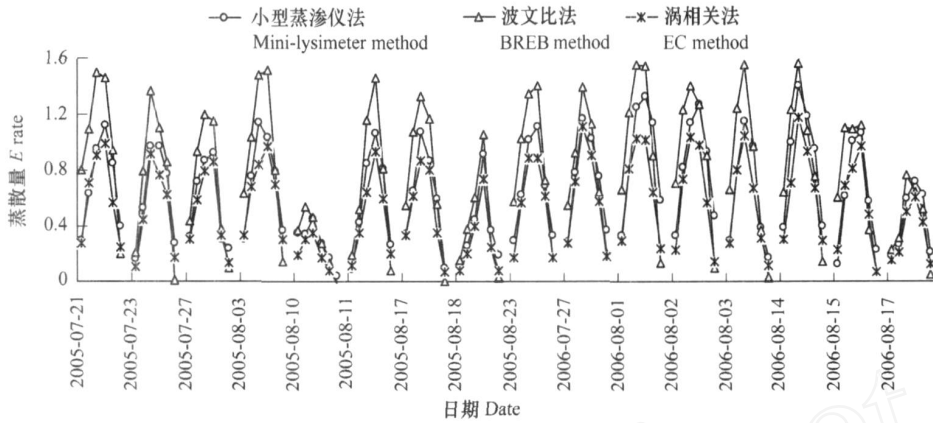


图 2 观测期间 3 种方法昼间蒸散 (E) 日变化

Fig 2 Comparison of diurnal variation in evapotranspiration (E) measured by EC, BREB and Mini-lysimeter methods during the observation period

为昼间 2 h 间隔的累积值。结果表明,小型蒸渗仪法与涡度相关法的相关性最好,相关系数达 0.96,但是涡度相关法测得的结果相当于小型蒸渗仪的 83% (图 3a)。涡度相关法与波文比法的相关系数达 0.95,但比波文比法结果低约 37%。(图 3b),波文比法与蒸渗仪法的直线回归关系如图 3c 所示,相关系数为 0.90 左右。

### 2.3 3 种方法测定的日蒸散变化

在 2005 和 2006 年夏季观测期间涡度相关法、波文比法与蒸渗仪法测定的昼间 (8:00 ~ 20:00) 日蒸散量变化如图 4 所示。3 种方法测定的日蒸散量具有相同的变化趋势,蒸散量的日最高值出现在降水丰沛、生物量最大、温度较高的时期 (7 月下旬到 8 月上旬)。利用图中数据对观测期间昼间日蒸散量进行统计,结果表明,波文比法计算的蒸散量累积值为 179.1mm,明显高于其它两种方法测定的结果,比蒸渗仪法测定的结果高出 20%,比涡度相关法测定的结果高出 43%。小型蒸渗仪测定的蒸散量为 148.7mm,比涡度相关法测算的结果 (125.4mm) 高 19%。

利用图 4 的数据进一步对涡度相关法、蒸渗仪法与波文比法三者之间的相关关系进行线性回归分析 (图 5),与图 3 结果相同,涡度相关系统与蒸渗仪以及波文比法测定结果有良好的相关性。然而,图 3 中的数据多为晴天时测定的,图 5 中的数据包括了阴天和多云天气,因此相关系数和斜率与图 3 略有差异。

## 3 讨论

### 3.1 能量闭合现状分析

涡度相关系统测定的蒸散结果比波文比能量平衡系统偏低,这与朱治林<sup>[16]</sup>和陈发祖<sup>[17]</sup>等在禹城站农田生态系统的研究结果相同,然而本文中波文比法测定的

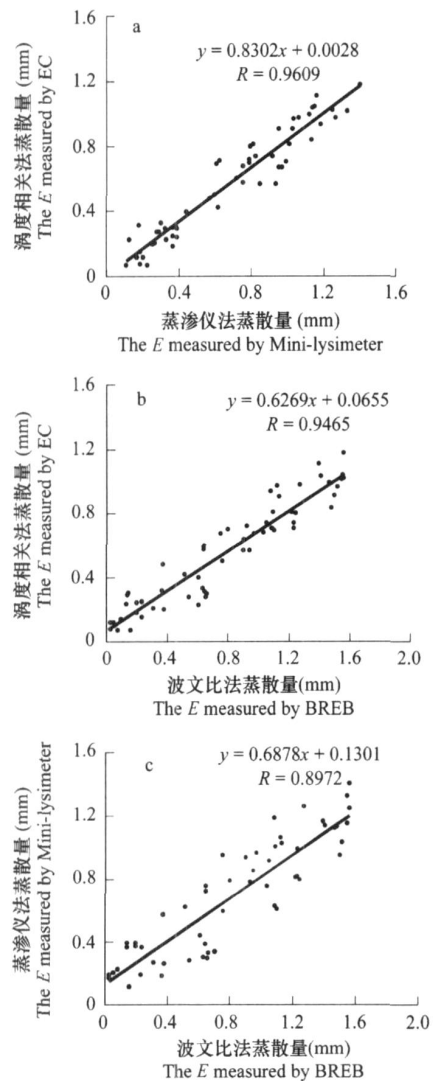


图 3 涡度相关、蒸渗仪和波文比法 3 种方法测定蒸散量的相关关系

Fig 3 Relationship between E measured by EC, Mini-lysimeter and BREB methods, respectively

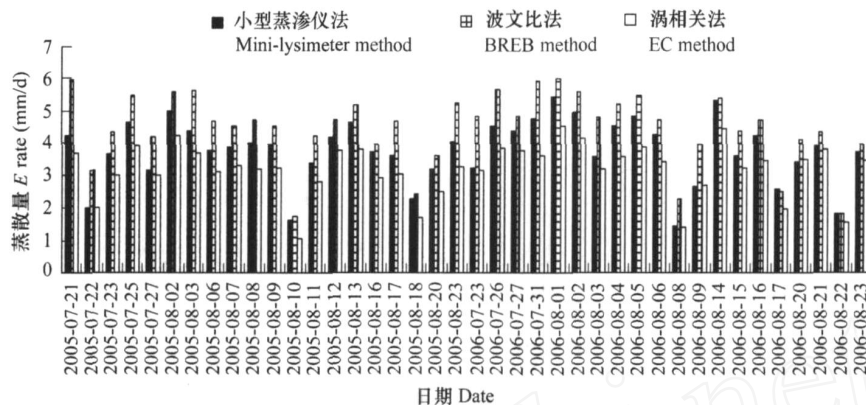


图 4 3种方法测定的日总蒸散量的比较

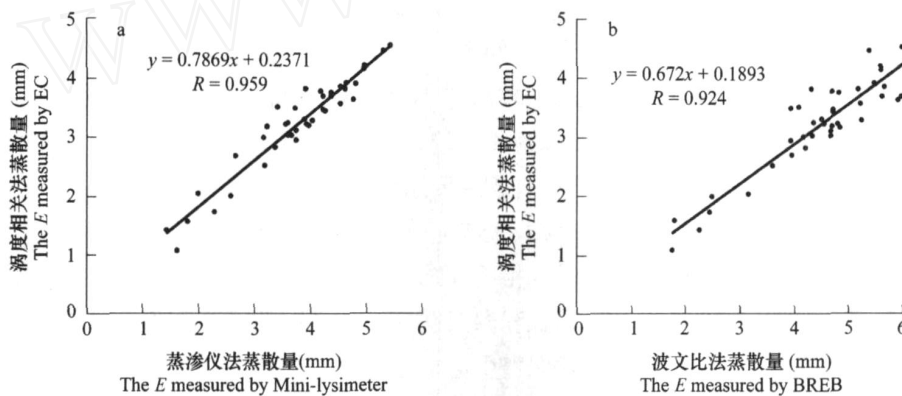
Fig. 4 Comparison of daily  $E$  measured by three methods during the observation period

图 5 涡度相关、蒸渗仪和波文比法 3种方法测定的日蒸散量的相关关系

Fig. 5 Relationship between the daily  $E$  measured by EC, Mini-lysimeter and BREB methods, respectively

蒸散量比涡度相关法结果高出 43%, 远高于陈发祖在禹城站农田生态系统的研究结果 (5% ~ 14%)。

波文比 能量平衡法测定的蒸散比涡度相关系统和蒸渗仪分别高出 43%和 20%, 而 Vema<sup>[18]</sup>和 Motha<sup>[19]</sup>在美国大平原中部 Nebraska农业试验站灌溉大豆和苜蓿试验地和朱治林<sup>[9]</sup>在禹城农业站小麦试验地的研究表明, 波文比法估算的蒸散量比蒸渗仪测定的结果偏低 20%, 这与本研究结论相反, 可能是由于他们在中性或稳定层结条件下进行的试验, 以及灌溉的影响。

由于本研究的涡度相关法测定的昼间蒸散相对于能量平衡法来说大致低 27% (图 1), 由此可以认为其原因之一是涡度相关法测定的蒸散量偏低。由图 3a可知, 涡度相关系统与蒸渗仪测定的蒸散量具有良好的相关性, 但前者的结果比后者低 19%。假设蒸渗仪测定的结果能够代表生态系统的实际蒸散量, 由此可以推断涡度相关系统测定的蒸散量过小地评价了生态系统的实际蒸散值。如果利用图 3a中涡度相关系统测定的感热通量和蒸渗仪测定的蒸散量 ( $H + LE$ ; 蒸散量  $E$ 转化为潜热通量)之和对涡度相关系统测定的有效能量 ( $R_n - G$ )进行校正, 那么能量闭合程度可达到 84% (图 6), 能量闭合度有了明显的提高。假设感热和潜热的相对通量损失相同, 因此可得出涡度相关系统测定的感热通量也比实际值偏低的结论, 这样另外一部分能量的损失可以认为是由于涡度相关系统过小地评价了感热通量而造成的。海北站高寒草甸生态系统的能量不闭合状况主要是由于该地区特殊的环境条件以及涡度相关系统自身的原因而导致湍流通量的观测值偏低。

### 3.2 观测系统对能量闭合的影响

本研究的能量闭合状况相当于 Wilson<sup>[5]</sup>报道的各类型生态系统的中间程度。虽然生态系统自身光合作用

用所消耗的能量和生态系统内部的储热可能会引起能量不闭合现象,但本实验站的植被相对较低矮(平均高度最高时约30cm),尚不足以导致如此明显的能量不闭合结果。因此,导致涡度相关系统感热和潜热通量损失的原因还有待于进一步探明。Morre<sup>[20]</sup>以及 Villalobos<sup>[21]</sup>等认为涡度相关系统测定的  $LE$  偏小,主要是由于超声风速仪和湿度仪的分离安装造成的。Sauer等<sup>[22]</sup>在玉米留茬田涡度相关技术测定的  $(H + LE)$  小于能量平衡法测定的  $(R_n - G)$ ,认为造成能量不闭合的原因是玉米留茬后的冻融交替造成土壤表层对潜热的影响以及涡度相关系统本身的测量误差造成的。高原上温度变化非常大,夏季的最低温度也时常出现低于零度的情况,高原上这种特殊的温度环境可能也是导致涡度相关系统能量损失的原因之一。

风速是影响能量不闭合的原因之一,高原上夜间由于强烈的地面辐射,常常形成逆温层,空气相对比较稳定,摩擦风速较低,可能会导致湍流通量观测上的误差,但本研究所用数据均为观测期间昼间的,摩擦风速相对较大,而且摩擦风速的变化对能量闭合程度并没有明显的影响,因此认为昼间风速并不是影响能量闭合的主要原因。

关于能量不闭合这一普遍存在的现象,至今尚没有充分的解释。但引起能量不闭合的原因很多,也很复杂,从观测系统方面可概括为以下几点:(1)涡度相关系统测定的通量面积与能量平衡系统所代表的面积不同而导致取样上的误差;(2)Li-7500、超声风速仪和温湿度传感器的分离安装,以及仪器本身的物理限制因素等都会导致涡度相关系统对高频信号的响应不足和低频信号损失的现象<sup>[23,24]</sup>;(3)仪器的精度和数据处理方法偏差,热流板的放置会改变周围的土壤环境,尤其是减少了水分的运动<sup>[25]</sup>;另外,热流板忽略了其上部土壤储存的热量;(4)开路式涡度相关系统仪器易受外界气象因子的干扰所产生的畸异值及数据处理方法中所产生的误差<sup>[26]</sup>;(5)平流影响:目前几乎所有的通量站点都或多或少的存在平流的影响<sup>[27]</sup>。总之,导致涡度相关系统测定青藏高原高寒草甸生态系统湍流通量偏低的原因还有待于进行深入的研究。

### 3.3 环境要素的影响

本研究中波文比法计算的蒸散量高于涡度相关系统(图2),这一结果与Lang等<sup>[28]</sup>在澳大利亚干旱区灌溉水稻地的结果一致,他们认为由于仪器对低频响应的不足,是仪器本身的物理限制造成的。另外,本研究的试验地位于青藏高原,接受的太阳辐射多,温度日较差大。而夏季天气多变,降水较多,土壤含水量高,昼间空气常处于不稳定状态,水汽压垂直梯度较小,可能是导致波文比系统误差增大的原因。

波文比成立的理论假设之一是水汽湍流交换系数( $K_w$ )和热量湍流交换系数( $K_h$ )相等,即  $K_h = K_w$ 。因此,对于大气层结稳定、平坦、均匀的下垫面来说,利用波文比能量平衡法计算潜热通量误差相对较小。但是,大量的研究结果表明, $K_h$ 和  $K_w$ 的比值是随着大气稳定度的变化而变化,此时用波文比法估算  $LE$  就会造成较大误差。特别是本研究的试验地位于青藏高原,晴天温度日变化剧烈,昼间对流现象明显,大气常常处于不稳状态,可能也是引起波文比法在计算蒸散量上偏高的原因。另外,高原上的清晨和傍晚,温度变化非常剧烈,波文比值( $\rho$ )多在“-1”左右变动,这时用波文比法计算的  $LE$  结果误差很大,且当  $\rho = -1$  时,公式(4)已无意义,此时波文比应用的局限性也加大了这种偏差。

图7是观测期间内典型的晴天(2005年7月21日)和阴天(8月18日)的净辐射( $R_n$ )、感热( $H$ )和潜热通量( $LE$ )的日变化(8:00~20:00),其中  $LE$  包括波文比法和涡度相关法测定的值。

由图可见:在晴天8:00时,涡度相关系统测定的潜热通量已经为正值( $LE > 0$ ),随着  $R_n$  的增大,潜热通

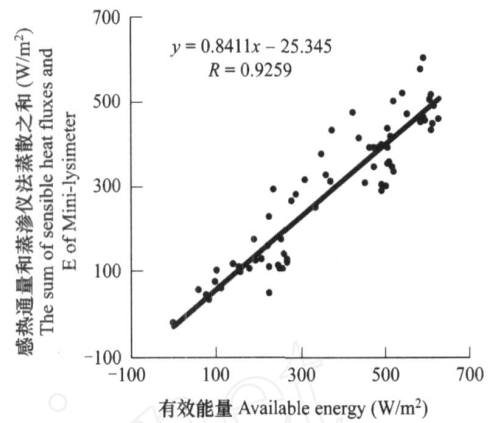


图6 涡度相关测定的感热通量和蒸渗仪法测定的蒸散量之和与有效能量的相关关系

Fig 6 Relationship between the sum of  $H$  measured by Eddy Covariance and  $E$  measured by Mini-lysimeter and  $(R_n - G)$

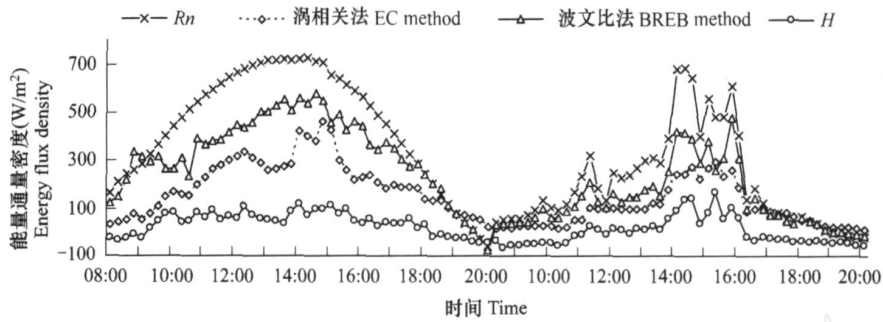


图7 2005年7月21日(晴天)和8月18日(阴天)  $R_n$ 、 $H$ 、波文比法和涡相关法测定的  $LE$  的日变化

Fig 7 Diurnal variation of  $R_n$ ,  $H$ , and  $LE$  measured by Eddy Covariance and BREB

量逐渐增加,其日变化与  $R_n$  基本一致,到 14:00 左右达到最高值。然而,感热通量变为正值的时间要比潜热通量迟,而转为负值的时间又比潜热通量早,即  $H$  保持正值的时间比潜热通量短,尤以阴天更为明显,这主要是由于高原上空气稀薄,大气逆辐射小,因此在夜间和傍晚降温迅速,使波文比法计算的潜热和感热通量偏高。特别是在清晨和傍晚,辐射平衡处于正负转换的时刻,波文比能量平衡法的应用会产生很大误差。此外,在昼夜交替时,涡度相关系统测定的  $LE$  和  $H$  也会出现剧烈变动,与实际情况不符<sup>[3]</sup>,此时无论波文比法还是涡度相关法测定的蒸散都有较大的误差存在,代表性不足<sup>[16]</sup>。因此,高原上特殊的辐射与温度环境加大了利用涡度相关系统测定生态系统湍流通量的误差。

#### 4 结论

3种不同方法测定青藏高原高寒草甸生态系统蒸散量的结果表明:3种方法测定的蒸散量之间具有良好的相关性,然而波文比能量平衡法的计算值最高,小型蒸渗仪次之,涡度相关系统的观测结果最低。

通过3种方法的对比研究,可以初步得出本研究中的高寒草甸生态系统能量不闭合现象主要是由于涡度相关系统自身的物理原因引起的结论,因此,由于高原上特殊环境条件,利用涡度相关系统可能导致过小评价该生态系统的潜热通量。

#### References:

- [1] Buman R, Pochop L O. Evaporation, Evapotranspiration and Climatic Data Development in Atmospheric Science, 22 Elsevier, 1994. 1-5.
- [2] Zhang Y Q, Shen Y J, Liu C M, *et al* Measurement and analysis of water, heat and  $CO_2$  flux from a farm land in the North China Plain Acta Geographica Sinica, 2002, 57(3): 333-342.
- [3] Wang X, Yin G C, Zhou G Y, *et al* Dry season energy balance of a Coniferous and Broad-leaved Mix forest at Dinghushan Mountain Southern China Journal of Tropical and Subtropical Botany, 2005, 13(3): 205-210.
- [4] Lee X H. On micrometeorological observations of surface—air exchange over tall vegetation Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91: 39-49.
- [5] Wilson K, Goldstein A, Falge E, *et al* Energy balance closure at FLUXNET sites Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 113: 223-243.
- [6] Kelliher F M, Hollinger D, Schulze E D, *et al* Evaporation from an eastern Siberian larch forest Agricultural and Forest Meteorology, 1997, 85: 135-147.
- [7] Constantin J, Incan M G, Raschendorfer M. 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.
- [8] Wu J B, Guan D X, Zhao X S, *et al* Characteristic of the Energy Balance in Broad-leaved Korean Pine Forest of Northeastern China Acta Ecologica Sinica, 2005, 25(10): 2520-2526.



- [ 9 ] Li Z Q, Yu G R, Wen X F, *et al* The valuation of energy-balance closure situation in ChinaFLUX. *Science in China, Series D*, 2004, 4 (Supp. D): 45-56.
- [ 10 ] GU S, Tang Y H, Cui X Y, *et al* Energy exchange between the atmosphere and a meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2005, 129: 175-185.
- [ 11 ] Kato T, Tang Y H, Gu S, *et al* Carbon dioxide exchange between the atmosphere and an alpine meadow ecosystem on the Qinghai-Tibetan Plateau, China. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2004, 124: 121-134.
- [ 12 ] ZHAO L, LI Y N, ZHAO X Q, *et al* Comparative study of the net exchange of CO<sub>2</sub> in types of vegetation ecosystems on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50 (9): 926-932.
- [ 13 ] Gu S, Tang Y H, Du M Y, *et al*, Short-term variation of CO<sub>2</sub> flux in relation to environmental controls in an alpine meadow on the Qinghai-Tibetan Plateau. *Journal of Geophysical Research*. 2004, 108: 4670-4679.
- [ 14 ] Wu J B, Guan D X, Zhang M, *et al* Comparison of Eddy Covariance and BREB methods in determining forest evapotranspiration-Case study on broad-leaved Korean pine forest in Changbai Mountain. *Chinese Journal of Ecology*, 2005, 24 (10): 1245-1249.
- [ 15 ] Liu S P, Yang J F, Li B Q, *et al* A New Large Weighing Lysimeter and its Application to Agro-Hydrological Process Studies. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2000, 3: 29-36.
- [ 16 ] Zhu Z L. The evapotranspiration quantity of the farmland measured by Bowen ratio-energy balance method comparison of the Lysimeter, Experimental study of the field evapotranspiration, Beijing: China Meteorological Press, 1991. 71-79.
- [ 17 ] Chen F Z, Sun X M, Wang X L, *et al* An Experimental Study on Water and Energy Balance of Wheat Field with High Ground Water Tables. *Geographical Research*, 1994, 13 (1): 32-41.
- [ 18 ] Vema S B, Rasenberg N J, Blad B L, *et al* Turbulent exchange coefficients for sensible heat and water vapor under advective conditions. *Applied Meteorology*, 1978, 17: 230-237.
- [ 19 ] Motha R P, Vema S B, Rosenberg N J, *et al* Exchange coefficients under sensible heat advection determined by eddy correlation. *Agricultural Meteorology*, 1979, 20: 273-280.
- [ 20 ] Moore C J. Frequency response corrections for eddy correlation systems. *Boundary-Layer Meteorology*, 1986, 37: 17-35.
- [ 21 ] Villalbos F J. Correction of eddy covariance water vapor flux using additional measurements of temperature. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1997, 88 (1-4): 77-83.
- [ 22 ] Sauer T J, Hatfield J L, Prueger J H, *et al* Surface energy balance of a corn residue-covered field. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89: 155-168.
- [ 23 ] Massman W J. A simple method for estimating frequency response correction for eddy covariance systems. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2000, 104: 185-198.
- [ 24 ] Guo J X, Mei X R, Lu Z G, *et al* Field EcapotranspiMeasurement Based on Eddy Covariance Technology. *Scientia Agricultura Sinica*, 2004, 37 (8): 1172-1176.
- [ 25 ] Baldocchi D, Falge E, Gu L, *et al* FLUXNET: a new tool to study the temporal and spatial variability of ecosystem-scale carbon dioxide, water vapor and energy flux densities. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2001, 82: 2415-2434.
- [ 26 ] Wen X F, Yu G R, Sun X M. Uncertainties in Long-term Studies of Net Ecosystem CO<sub>2</sub> Exchange with the Atmosphere Based on Eddy Covariance Technique. *Advance in Earth Sciences*, 2004, 19 (4): 654-663.
- [ 27 ] Paw U K T, Baldocchi D, Meyers T P, *et al* Corrections of eddy covariance measurements incorporating both advective effects and density fluxes. *Boundary-Layer Meteorology*, 2000, 97, 487-511.
- [ 28 ] Lang A R G, McNaughton K, Chen F Z, *et al* Inequality of eddy transfer coefficients for vertical transport of sensible and latent heats during advective inversions. *Boundary-Layer Meteorology*, 1983, 51: 159-177.

## 参考文献:

- [ 2 ] 张永强,沈彦俊,刘昌明,等. 华北平原典型农田水、热与  $\text{CO}_2$ 通量的测定. 地理学报, 2002, 5: 333 ~ 342.
- [ 3 ] 王旭,尹光彩,周国逸,等. 鼎湖山针阔混交林旱季能量平衡研究. 热带亚热带植物学报, 2005 13(3): 205 ~ 210.
- [ 8 ] 吴家兵,关德新,赵晓松,等. 东北阔叶红松林能量平衡特征. 生态学报, 2005, 25(10): 2520 ~ 2526.
- [ 9 ] 李正泉,于贵瑞,温学发,等. 中国通量观测网络 (ChinaFLUX)能量平衡闭合状况的评价. 中国科学 D辑地球科学, 2004, 4(增刊 ): 45 ~ 56.
- [ 12 ] 赵亮,李英年,赵新全,等. 青藏高原 3种植被类型净生态系统  $\text{CO}_2$ 交换量的比较. 科学通报, 50(9): 926 ~ 932.
- [ 14 ] 吴家兵,关德新,张弥,等. 涡动相关法与波文比 能量平衡法测算森林蒸散的比较研究. 生态学杂志, 2005, 24(10): 1245 ~ 1249.
- [ 15 ] 刘士平,杨建锋,李宝庆,等. 新型蒸渗仪及其在农田水文过程研究中的应用. 水利学报, 2000, 3: 29 ~ 36.
- [ 16 ] 朱治林. 用波文比 能量平衡法估算农田蒸发量与 Lysimeter的比较. 农田蒸发研究. 北京:气象出版社, 1991, 71 ~ 79.
- [ 17 ] 陈发祖,孙晓敏,汪西林,等. 高地下水埋深条件下的农田水热平衡试验研究. 地理研究, 1994, 13(1): 32 ~ 41.
- [ 24 ] 郭家选,梅旭荣,卢志光,等. 测定农田蒸散的涡度相关技术. 中国农业科学, 2004, 37(8): 1172 ~ 1176.
- [ 26 ] 温学发,于贵瑞,孙晓敏. 基于涡度相关技术估算植被-大气间净  $\text{CO}_2$ 交换量中的不确定性. 地球科学进展, 2004, 19(4): 658 ~ 663.