

内蒙古半干旱草原能量物质 交换的微气象方法估算*

朱治林 孙晓敏 张仁华
唐新斋 苏红波 唐登银

(中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101)

516 A

摘 要 根据 1998 年 5~8 月和 1999 年 8 月在中国科学院内蒙古草原生态系统定位试验站进行微气象观测的资料, 作者分析了该地区能量平衡及其各分量的基本特征。结果表明: (1) 净辐射通量的转化形式有明显的季节性变化, 5~6 月份, 净辐射能大部分用于感热交换, 而后期则多用于潜热交换, 5~8 月份的日波文比值分别为 1.26, 1.42, 0.41 和 0.20; (2) 观测期间, 波文比的日变化特征表现为, 早晚变化大不稳定, 而白天则相对稳定; (3) 用涡度相关方法观测的感热和潜热通量之和与同期的净辐射相比较, 前者的结果偏小 15% 左右, 两种方法观测到的潜热通量的差异达平均 35% 左右; (4) 半干旱草原 CO_2 通量有明显的日变化, 在生长旺期, 白天 CO_2 通量强度可达到 $1.5 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 以上, 但在生长后期, 1998 年和 1999 年 8 月份的白天 CO_2 通量强度分别为 $0.38 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 和 $0.2 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 左右; 其差异与草地土壤水分和植物长势有关。

关键词: 感热通量; 潜热通量; CO_2 通量; 微气象方法; 半干旱草原

1 前言

全球气候变暖, 土地荒漠化等环境问题日益受到人们的关注, 在一些草原地区, 由于过渡放牧或开垦农田已经对草原的生态系统造成了难以恢复的破坏。地-气之间的能量、水分和物质(气体)交换及其随时空变化的特征, 在研究生态环境问题方面扮演着一个重要角色。由于每个地区的经纬度和下垫面状况不同, 使得如何更准确地测定和估算下垫面各种热通量的大小一直是微气象学的一个重要研究领域, 并且已经形成了许多理论和方法, 如波文比-能量平衡法、梯度扩散法、涡度相关法、表面温度-阻抗法等。中国科学院地理科学与资源研究所长期以来都很重视下垫面的能量和水分交换的研究, 在理论和方法上取得了大量成果^[1~3], 另外还自行研制了自动换位式波文比观测系统和热线脉动风速仪等高精度仪器^[4,5]。

内蒙古半干旱温带草原是我国重要的畜牧业基地, 它在影响我国北方气候方面起着特殊的作用。为了对该地区的能量、水分和物质(本文主要指 CO_2) 交换特征做一些深入研究, 中国科学院地理科学与资源研究所及有关单位于 1998 年 5~8 月和 1999 年

2000-10-13 收到, 2001-07-16 收到再改稿

* 国家自然科学基金资助项目 49790020 和中国科学院地理科学与资源研究所知识创新项目 CX10G-C00-05-02 共同资助

8 月中旬, 在中国科学院草原生态系统定位试验站内及周围不同草场样地进行了多学科多方法的联合观测。用于下垫面能量物质交换的微气象观测方法主要包括波文比-能量平衡方法和涡度相关方法。本文将根据观测到的资料, 初步分析该地区的能量、水分和物质 (CO_2) 交换的基本特征。

2 原理与方法

2.1 波文比-能量平衡法 (BREB)

根据能量平衡和边界层扩散理论, 下垫面能量平衡方程可表达为如下形式:

$$R_n = H + LE + G, \quad (1)$$

$$H = \rho c_p k_h \Delta t / \Delta z, \quad (2)$$

$$LE = (1/\gamma) \rho c_p k_w \Delta e / \Delta z, \quad (3)$$

式中, R_n 是辐射平衡; H 是感热通量; G 是土壤热通量; LE 是潜热通量, 其中 L 是水的汽化潜热, E 是蒸发量; ρ 和 c_p 分别为空气密度和定压比热; γ 为干湿球常数; k_h 和 k_w 分别为感热和潜热的扩散系数; Δt , Δe 和 Δz 分别为某两个高度上的温度差、水汽压差和高度差。将 (2) 式与 (3) 式相除, 并假设 $k_h = k_w$, 那么波文比 (感热通量与潜热通量之比) 可表达成如下形式:

$$\beta = H / LE = \gamma \Delta t / \Delta e. \quad (4)$$

如果是用干湿球方法测定空气湿度, 经过适当的数学变换, 波文比可表示为如下形式:

$$\beta = [(1 + s/\gamma) \Delta t_w / \Delta t - 1]^{-1}, \quad (5)$$

式中, Δt_w 为湿球温度差, s 为温度在 $(t_{w1} + t_{w2})/2$ 时饱和水汽压曲线随温度变化的斜率。

从 (5) 式中可以看出, 波文比的计算可以变成通过测定某两个高度上的干湿球温差和湿球温度来计算。如果计算出 β , H 和 LE 就可以用简单的下式计算:

$$LE = (R_n - G) / (1 + \beta), \quad (6)$$

$$H = \beta (R_n - G) / (1 + \beta). \quad (7)$$

2.2 涡度相关法 (EC)

近地面层通量的测定和计算大多是以梯度-扩散理论为基础。澳大利亚著名的微气象学家 Swinbank^[6] 在 1951 年首次提出了涡度相关理论, 但由于当时技术方面的原因, 不能快速地感应和记录物理量的脉动, 所以用该方法估算通量的研究工作只是停留在理论上。随着计算机及其相关测量技术的高速发展, 目前在技术上已经可以实现某些物理量的快速感应和记录, 这就为该方法的应用提供了坚实的物质基础。涡度相关法被公认为是目前测定近地面通量的最好方法之一, 甚至被用作是检验其他方法的“标准”^[7]。现简单介绍该理论, 并给出潜热通量和感热通量的计算公式。

根据通量定义的物理含义, 在几乎不带有假设的条件下, 某物理属性 S 的垂直湍流输送通量可严格的表示为

$$F_s = \overline{w's'}, \quad (8)$$

这里 w' 为空气瞬时垂直速度脉动量, s' 为物理属性 S 的脉动量, 上横线表示在某一时间间隔里的平均。该公式的物理含义可以理解为在某一时段内, 同时测定大量的垂直风速和有关的物理量 (如温度), 然后再分别计算它们与其在该时段内的平均值之差 (即脉动), 最后求出两项脉动值相互乘积的平均值。以该公式为基础, 我们可以推导出计算 H 和 LE 的计算公式:

$$H = \rho c_p \overline{w'T'}, \quad (9)$$

$$LE = \rho L \overline{w'q'}, \quad (10)$$

$$F_{CO_2} = (AP/T) \overline{w'c'}, \quad (11)$$

这里, T' , q' 和 c' 分别是温度、比湿和 CO_2 浓度的脉动值, A 是常数, P 是大气压, 其他符号的物理意义同前。

3 场地、仪器和观测方法

两年的所有观测都是在中国科学院内蒙古草原生态系统定位研究站 ($43^{\circ}33'N$, $116^{\circ}47'E$, 1300 m) 的草地上进行的。该观测场地比较宽阔, 场地周围的下垫面均匀性比较好。观测场内的下垫面是恢复性沙地针茅和冷蒿等草, 但北面的草地已退化并有裸露的沙土。1998 和 1999 年的天气特别是降水量有明显的差别, 1998 年属多雨年, 降雨量大且集中, 而 1999 年为干旱少雨年。根据项目的要求, 主要观测只在 5~8 月份规定的时间内进行。

使用的仪器包括能量平衡-波文比观测系统和涡度相关观测系统。前者所包括的主要仪器有: 净辐射表, 土壤热通量板, 数据采集器和换位式波文比仪。由中国科学院地理科学与资源研究所研制的这套温湿度换位测量系统能消除仪器的系统误差, 野外观测精度为 $\pm 0.05^{\circ}C$ 、分辨率为 $0.01^{\circ}C$ 。其两个观测高度分别距地面约 0.5 m 和 1.7 m, 净辐射表安装高度为 2 m, 两块土壤热通量板埋深距地面约 1 cm。该观测系统为自动采集, 每 15 s 采集一组数据, 每 5 min 自动将两个高度上的传感器换位一次同时输出一组平均值。

涡度相关系统所使用的仪器包括三维超声温度风速仪, 红外水汽和二氧化碳气体分析仪。它们分别用于快速测定垂直脉动风速和脉动温度, 空气中水汽含量脉动和 CO_2 浓度的脉动量。仪器安装在波文比观测系统的附近, 相距约 5 m, 传感器高度约为 2 m, 下垫面条件同前。利用高速数据采集器进行数据采集, 采样频率为 20 Hz/通道, 每 10 min 输出一组计算值。

4 结果与分析

4.1 能量平衡分量和波文比的日变化

图 1a 和 1b 分别是 1998 年 5 月 30 日和 1998 年 7 月 25 日用波文比-能量平衡方法观测到的能量平衡各分量的日变化情况。比较两幅图可以看出, 随着太阳高度角的变大, 净辐射的增强, 潜热通量和感热通量也随之变大; 但在 5 月份, 由于土壤比较干,

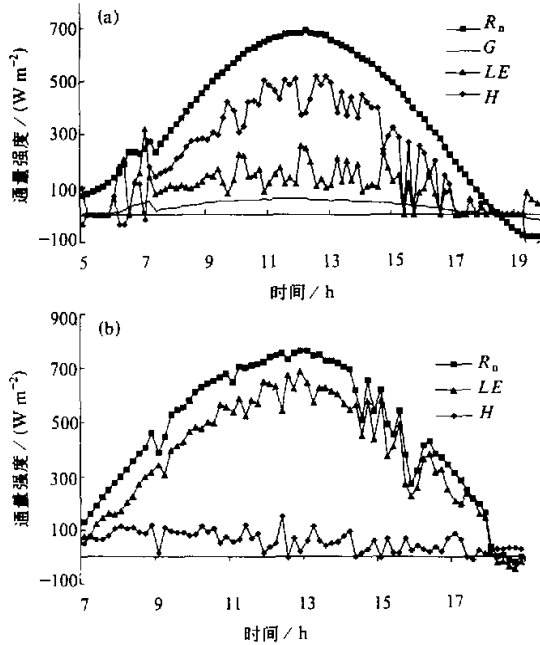


图1 能量平衡分量的日变化
(a) 1998年5月30日; (b) 1998年7月25日

蒸发小, 所以净辐射能量大部分用于感热交换; 而在7月份, 由于前期的降水影响, 土壤水分比较充分, 此时的潜热通量大于感热通量, 但其各个分量基本上是以正午为中心对称分布的。

波文比是反映到达地面的太阳辐射进行能量转化的一个重要指标, 在某种程度上可以反映下垫面或土壤的干湿状况^[8,9]。图2是用两种方法计算的波文比在1998年5月22日随时间的日变化情况。在日出和日落前后, 净辐射处于正负转换之际, 即 R_n 趋于0, 此时 H 和 LE 也趋于0或很小, 因此其比值变化就非常不稳定, 但是由于它们一天之中所占比例很小, 对总体估算结果影响不大。白天数值比较稳定, 用BREB方法测定的

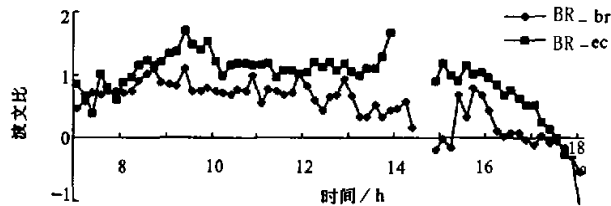


图2 两种方法计算的波文比日变化的比较(1998年5月22日)
BR_br 和 BR_ec 分别是用波文比方法和涡度相关方法计算的波文比

波文比要比用涡度相关方法方法计算的值小, 但总的变化趋势基本相同。说明两种方法之间存在一定的误差。根据1998年5月30日的统计结果, 用波文比-能量平衡方法估算的波文比白天的平均值为0.583, 而用涡度相关方法估算的值为0.981, 前者为后者的60%左右。其差别还是比较大的。

4.2 能量平衡日总量和日波文比的季节变化

为了对该地区能量平衡日总量情况有一个基本认识, 我们用BREB方法观测的白天资料, 以d为单位, 计算了每日(白天)能量平衡各分量的日均强度。图3是 H 、

LE 和 R_n 的日均强度随季节变化的情况。由于各种原因, 所观测的资料不连续, 但我们仍然可以看出各分量的总体变化趋势和平均情况。我们所观测到的净辐射、潜热通量和感热通量的日均最大值分别为 497 W m^{-2} , 436 W m^{-2} 和 343 W m^{-2} , 平均强度分别为 354 W m^{-2} , 209 W m^{-2} 和 145 W m^{-2} 。

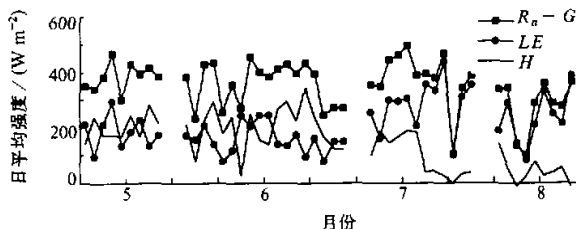


图3 能量平衡分量日均值的季节变化(1998年5~8月)

图4是根据每天的感热通量日均强度(H)与潜热通量日均强度(LE)之比而计算出来的日波文比随季节的变化趋势。从图中可以看出, 在5~6月份, 由于下垫面相对较干, H 所占的比例还比较大, 与 LE 处于同一量级, 许多天 H 是 LE 的1~3倍; 而在7月份和8月份, 由于有比较大的降水, 下垫面非常潮湿, 有充足的水分供应蒸发, 所以波文比非常小。根据分月资料进行统计得到1998年5~8月份的日波文比平均值分别为1.26, 1.42, 0.41和0.20。

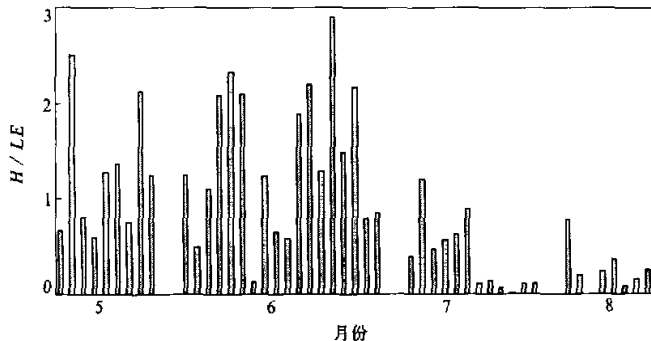


图4 日波文比(H/LE)值随季节的变化(1998年5~8月)

4.3 两种观测方法的结果比较

由于计算理论、观测仪器和观测方法等多方面原因, 到目前为止很难找到一种能特别精确的测定地气之间热交换的方法, 或说还没有一种标准仪器, 因此各种方法之间必然存在着一定的误差, 有时误差还相当大, 这两种方法也不例外^[10]。图5是根据在白天同一时刻用BREB方法观测到的 $R_n - G$ 或 $(H + LE)_{br}$, 与用涡度相关方法观测到的感热与潜热通量之和 $(H + LE)_{ec}$ 绘制的散点图。从图中可以看出, 两种方法得到的结果一致性比较好, 但大部分点并非分布在1:1线两侧。根据所有白天的观测资料, 它们之间的线性回归方程为

$$Y = 0.8684X + 15.7, \quad (12)$$

式中 Y 为用涡度相关法测定的 $(H + LE)_{ec}$, X 为用波文比系统得到的 $R_n - G$ 或 $(H +$

LE_{br} , 相关系数 $R^2 = 0.7753$, 总样本数 $n = 1062$ 。

图 6 是根据用两种方法观测到的潜热通量 LE 所绘制的散点图, 根据图中点的分布情况看, 用波文比方法观测到的 LE_{br} 比用涡度相关方法观测得到的 LE_{ec} 要大。两种方法结果得到的线性回归方程为

$$Y = 0.653X - 23.1, \quad (13)$$

式中 Y 为用涡度相关方法测定的潜热通量 LE_{ec} , X 为用波文比方法测定的潜热通量 LE_{br} , 相关系数 $R^2 = 0.751$, 总样本数 $n = 1062$ 。

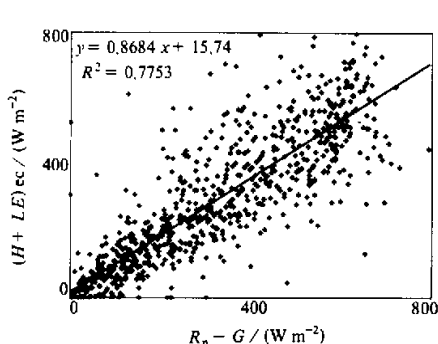


图 5 用 EC 法估算的 $(H + LE)$ 与用 BREB 方法观测的 $(R_a - G)$ 之比较 (1998 年 5~8 月)

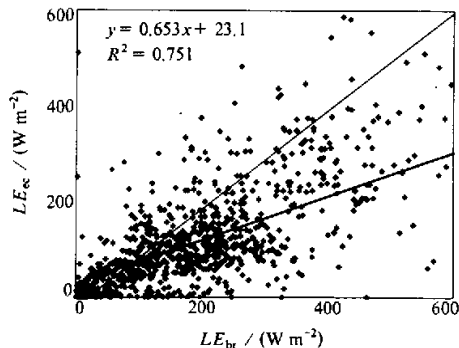


图 6 用 BREB 和 EC 两种方法计算的潜热通量的比较 (1998 年 5~8 月)

产生较大误差的原因比较复杂, 可能主要有以下几个方面: 1) 观测场地周围的非均匀性。在观测点北约 200 m 左右是退化的草地 (几乎无植被) 或裸露的沙地, 在有北风的情况下, 可能导致观测场地有局部的暖平流。2) 波文比方法的一个假设是感热通量和潜热通量的传导系数相等。但事实上它们经常并不相等, 这些都可能产生计算误差^[3]。3) 仪器本身观测误差。根据我们的对比观测, 发现用净辐射表观测的值比用短波和长波辐射表组成的四路法所计算的结果大 11% 左右。我们采用的干湿球探头或多或少要受到太阳辐射的影响, 另外, 涡度相关观测仪器对环境的要求也比较高, 潮湿和风沙等都会影响其观测精度, 这些问题的解决都将有赖于今后仪器和观测方法的不断改进。

4.4 CO₂ 通量的日变化

随着全球的变暖, CO₂ 这种微量气体越来越受到人们的重视。过去在我国, 一些科学家尝试使用 CO₂ 浓度梯度方法进行通量计算, 但由于实际大气中 CO₂ 的浓度梯度有时不是很大, 所以, 如果仪器的精度不够, 就会产生很大的误差。多年以来, 我们一直在用涡度相关方法直接测定 CO₂ 的通量, 由于仪器和天气等多方面的原因, 其观测结果也是有好有坏, 说明 CO₂ 的测定确实有一定的难度。尽管如此, 我们仍然可以了解其大的变化特征或趋势。

图 7a 和图 7b 分别是 1998 年 5 月 30 日和 1999 年 8 月 20 日 CO₂ 通量的日变化情况。在 1998 年 5 月 22 日, 草地处于生长旺期, 白天的 CO₂ 通量变化比较大。大约在

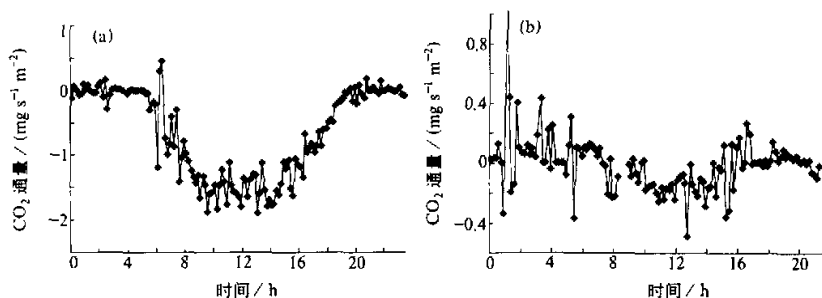


图7 CO₂通量的日变化
(a) 1998年5月30日; (b) 1999年8月20日

上午7时左右就开始有光合作用, CO₂ 通量方向向下; 在10~14时光合作用非常强, 期间平均强度达到 $1.5 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$; 在下午19时左右光合和呼吸保持平衡, 通量值在0附近变化; 而后由于植物的呼吸作用出现向上的通量。植被处于生长后期的1999年8月20日, 情况就无明显的日变化并且通量强度也比较小。其值在 $0.2 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 左右变化, 表明草地上虽有一定的光合和呼吸作用, 但由于此时已不是生长旺期, 所以值比较小。特别值得一提的是, 由于1998年是丰水年, 在相同季节 CO₂ 的通量强度要比1999年大, 根据1998年8月份仅有的几天过程资料计算, 其白天平均强度为 $0.38 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 左右, 但由于观测资料比较少, 很难分析其季节性的变化。这说明草地的 CO₂ 通量强度与土壤的水分状况和植物长势有一定的关系。

5 初步结论

根据以上的研究和分析, 我们可以得出以下几点基本结论:

(1) 内蒙古草原净辐射能用于感热和潜热交换的方式有明显的季节性变化特征, 其主要受下垫面水分的充足与否影响。5~8月份的日波文比分别为1.26, 1.42, 0.41和0.20。

(2) 波文比有明显得日变化, 在一天中, 早晚变化大且不稳定, 白天变化较稳定且比值较小。用BERB方法计算的波文仅为用涡度相关法计算值的60%左右。

(3) 涡度相关方法观测的感热与潜热通量之和与净辐射通量比较, 前者比后者小约15%, 用涡度相关方法估算的潜热通量比用BREB方法计算的值小35%左右。其误差来源主要受观测场地、仪器精度和方法的局限性影响。

(4) CO₂ 通量有明显的日变化, 在生长旺季, 生长和呼吸作用比较强, 白天最大通量强度超过 $1.5 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$; 但在草原生长后期, 生长和呼吸作用比较弱, 1998年和1999年8月份的白天 CO₂ 通量强度分别为 $0.38 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 和 $0.2 \text{ mg s}^{-1} \text{ m}^{-2}$ 左右。其差异与草地土壤水分和植物长势有关。

参 考 文 献

- 1 王树森, 朱治林, 孙晓敏, 拉萨地区农田能量物质交换特征, 中国科学 (D辑), 1996, 26(4), 359~364.
- 2 中国科学院北京农业生态系统试验站, 农田作物环境实验研究, 北京: 气象出版社, 1990.
- 3 朱治林, 用波文比-能量平衡方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.
- 4 孙晓敏, 朱治林, 张仁华, 生态系统中蒸发过程的精确测定-换位式波文比观测仪的介绍, 资源生态环境网络研究动态, 1995, 6(4), 44~47.
- 5 孙晓敏, 周树秀, 陈发祖, 热线脉动风速仪及其试验研究, 中国农业小气候研究进展, 北京: 气象出版社, 1993, 346~350.
- 6 Swinbank, W. C., The measurement of vertical transfers of heat and water vapor by eddies in the lower atmosphere, *J. Meteor.*, 1951, 8, 135~145.
- 7 陈发祖, 微气象学研究的若干进展——兼评湍度相关技术的作用, 中国农业小气候研究进展, 北京: 气象出版社, 1993, 18~25.
- 8 Blad, B. L. and N. J. Rosenberg, Lysimetric calibration of the Bowen Ratio-Energy Balance method for evapotranspiration, *Journal of Applied Meteorology*, 1974, 13, 227~236.
- 9 Steduto, P. and T. C. Hsiao, Maize canopies under two soil water regimes. Validity of Bowen Ratio-Energy Balance technique for measuring water vapor and carbon dioxide fluxes at 5-min intervals, *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 89, 215~228.
- 10 Neumann, H. H., G. den Hartog and K. M. King et. al, Energy budget measurements using eddy correlation and Bowen Ratio techniques at the Kinosheo Lake tower site during the Northern Wetlands Study, *Journal of Geographical Research*, 1994, 99, 1539~1549.

The Estimate of Energy and Mass Exchanges in Inner Mongolia Semi-Arid Grassland Using Micrometeorological Methods

Zhu Zhilin, Sun Xiaomin, Zhang Renhua, Tang Xinzhai,
Su Hongbo, and Tang Denyin

(Institute of Geographical Sciences and Natural Resources Research,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract In order to study the energy, water and CO₂ status of Semi-Arid Grassland, some micrometeorological methods were employed to measure at the Inner Mongolia Grassland Research Station, Chinese Academy of Sciences, from May to August, 1998 and in August, 1999. The main methods were Eddy Correlation (EC) and Bowen Ratio-Energy Balance (BREB). Based on the data, authors analyzed the basic characteristics of energy balance components in the area. Meanwhile, the results measured by the two methods were compared with each other. It shows that: (1) In 1998, the most of net radiation was used to the sensible exchange in May and June, and was used to latent exchange in July and August, the mean Bowen-Ratio for May, June, July, and August were 1.26, 1.42, 0.41, and 0.2, respectively. (2) During the observations, the diurnal variation characteristic of Bowen Ratio was bigger and unsteady at the sunrise and sunset, smaller and steady in the remainder of a daytime. (3) The sum of sensible and latent heat fluxes density measured by EC method was smaller than that by BREB method. (4) CO₂ flux density has an obvious diurnal change, in daytime of the growing stage, the maximum of CO₂ flux density were more than about 1.5 mg s⁻¹ m⁻², and in the late of growing stage (in August), the average of CO₂ flux density was about 0.38 mg s⁻¹ m⁻² and 0.2 mg s⁻¹ m⁻² in 1998 and in 1999, respectively. The differences are related to the soil moisture and growing status of grassland.

Key words: sensible heat flux; latent heat flux; CO₂ flux; micrometeorological method; semi-arid grassland