

Bowen比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比

强小嫚^{1,2}, 蔡焕杰¹, 王健¹

(1. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 杨凌 712100;
2. 中国农业科学院农田灌溉研究所, 新乡 453003)

摘要: 为了更准确地估算作物蒸发蒸腾量, 该文结合 Bowen比仪和大型称重式蒸渗仪, 对 Bowen比-能量平衡法估算的冬小麦蒸发蒸腾量 (ET_b) 和蒸渗仪实测的冬小麦蒸发蒸腾量 (ET_l) 进行了分析研究。结果表明, Bowen比计算值 (ET_b) 和蒸渗仪实测值 (ET_l) 的变化趋势基本一致, 相关性比较好。Bowen比计算值 (ET_b) 和蒸渗仪实测值 (ET_l) 的日变化曲线都呈单峰型, 早晚小, 中午大, 夜间多为负值, Bowen比计算值的日变化比较稳定, 蒸渗仪实测值的日变化比较敏感。风速较大时, 蒸渗仪实测值日变化随风速的增大而减小的趋势比较明显, Bowen比计算值日变化受大的风速影响较小; 风速较小时, Bowen比计算值和蒸渗仪实测值的日变化与风速呈很弱的负相关关系。Bowen比计算值日变化和太阳净辐射日变化的关系比较密切, 蒸渗仪实测值日变化和太阳净辐射日变化的关系不是很明显。Bowen比计算值更能稳定地反映出冬小麦蒸发蒸腾量的日变化规律。

关键词: 蒸发蒸腾量, 作物, 大型称重式蒸渗仪, Bowen比-能量平衡法

中图分类号: S161.4, S512.1⁺1

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-2-0012-06

强小嫚, 蔡焕杰, 王健. Bowen比仪与蒸渗仪测定作物蒸发蒸腾量对比[J]. 农业工程学报, 2009, 25(2): 12-17.

Qiang Xiaoman, Cai Huanjie, Wang Jian. Comparative study of crop evapotranspiration measured by Bowen ratio and lysimeter[J]. Transactions of the CSAE, 2009,25(2): 12-17.(in Chinese with English abstract)

0 引言

作物蒸发蒸腾量是农田水分消耗的最主要形式, 它是制定流域规划、地区水利规划、以及灌排工程规划、设计、管理和农田灌排实施的基本依据。准确地估算作物蒸发蒸腾量对于研究作物生育期的水分消耗规律, 提高水分利用率, 发展节水农业有着十分重要的意义^[1]。因此, 作物蒸发蒸腾理论及其计算方法的研究历来受到国内外学者的高度重视。目前, 确定作物蒸发蒸腾量的主要方法有: 空气动力学法、土壤水量平衡法、蒸渗仪法、Bowen比能量平衡法、遥感法、涡度相关法等。以上几种方法在确定作物蒸发蒸腾量时都有其优点和不足之处, 在具体应用时要根据当地条件进行选择。目前国内外学者普遍采用大型蒸渗仪 (Lysimeter) 测定作物蒸发蒸腾量^[2], 但也有些学者认为蒸渗仪的测量误差要比原来所预想的大^[3], Allen (1994) 通过对比试验后提出, 要确保蒸渗仪内的作物生长状况与周围大田相同并最大限度减少在其周围由于人为踏踩产生的影响, 否则将会产生约30%以上的误差^[4]。因此, 利用微气象方法估算作物蒸发蒸腾量逐渐被许多科研工作者接受, 其中Bowen比能量平衡法与其他方法相比具有价格便宜, 简便易行等优点。

一般认为利用 Bowen比能量平衡法估算作物蒸发蒸腾量的误差在10%左右, 但是通过改进测量仪器和数据分析方法可以使误差进一步减小。Bland等人在大豆地中的试验结果表明在非平流情况下, Bowen比仪和蒸渗仪 (Lysimeter) 测量的蒸发蒸腾量呈现出较好的一致性, 而在平流条件下, Bowen比仪比Lysimeter测量值偏低^[5]。Grant等人在大麦地中采用 Bowen比仪、空气动力学法等测算结果与Lysimeter测量值比较, 也表明Bowen比法比较准确^[6]。本文以冬小麦为研究对象, 结合 Bowen比仪和大型称重式蒸渗仪, 对 Bowen比-能量平衡法估算的冬小麦蒸发蒸腾量和蒸渗仪实测的冬小麦蒸发蒸腾量进行了分析研究。以期来研究估算作物蒸发蒸腾量的实用方法。

1 试验材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西杨凌西北农林科技大学灌溉试验站, 东经108°04', 北纬34°20', 属暖温带季风半湿润气候区, 年均温度为12.9℃, 年均降水量635.1 mm, 年均蒸发量1440 mm, 年均日照时数2163.8 h, 年均无霜期210 d。站内地形平整, 土层深厚, 土壤质地为中壤土。1 m土层的田间持水量为23%~25% (占质量), 凋萎含水量为11%~12% (占质量)。冬小麦的品种为小堰22。2005年10月12日播种, 次年6月6日收获。小麦全生育期一共灌水3次, 为充分灌水。该地区属渭河三道台塬地区, 地下水埋藏较深, 约有28 m, 其向上补给量可以忽略不计。站内安置有大型称重式蒸渗仪和Bowen比自动气象站。本实验主要观测项目如下:

1) 土壤热通量、太阳净辐射、土壤温度、土壤含水量及气象要素等由Bowen比自动气象站测定。数据采集系

收稿日期: 2007-08-19 修订日期: 2009-01-20

基金项目: 教育部高校青年教师奖资助项目

作者简介: 强小嫚 (1983-), 女, 陕西西安人, 主要从事节水灌溉理论与新技术研究。新乡 中国农业科学院农田灌溉研究所, 453003。

Email: qiangxiaoman@126.com.

※通讯作者: 蔡焕杰 (1962-), 男, 河北藁城人, 教授, 主要从事农业节水和水资源高效利用方面的研究。杨凌 西北农林科技大学水建学院, 712100. Email: caihj@nwsuaf.edu.cn

统每 20 min 采集一次。

2) 冬小麦生长期期间的逐日蒸发蒸腾量采用田间安置的大型称重式蒸渗仪测定。蒸渗仪面积为 $2.5 \times 2.5\text{m}^2$ ，深 3m，质量约 23.8t，试验期间用数据采集系统自动采集记录，每 20 min 采集一次，测量精度为 0.032 mm。

1.2 蒸发蒸腾量计算与测量方法

1.2.1 波文比仪法（能量平衡法）

下垫面能量平衡方程为：

$$R_n = \lambda ET + H + G \quad (1)$$

式中 R_n ——到达表面上的净辐射通量， W/m^2 ； λET ——潜热通量， W/m^2 ，其中 λ ——水的汽化潜热 MJ/kg ； ET ——蒸发蒸腾量， mm/d ； H ——显热通量， W/m^2 ； G ——土壤热通量， W/m^2 。

根据波文比-能量平衡法，计算 λET 和 H 的公式为：

$$\lambda ET = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H = \frac{R_n - G}{1 + \frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

其中 $\beta = \frac{H}{\lambda ET} = \gamma \frac{\Delta T}{\Delta e} \quad (4)$

所以波文比仪法中蒸发蒸腾量可表示为：

$$ET = \frac{R_n - G}{\lambda(1 + \beta)} \quad (5)$$

式中 β ——波文比 (Bowen ratio)； γ ——干湿表常数， $\gamma = \frac{0.00163P}{\lambda}$ ， kPa/C ； ΔT ——两个高度温度差， C ； Δe ——两个高度水汽压差， kPa 。因此，只要知道两个高度的气温差 ΔT 及其相对应的水汽压差 Δe 以及 R_n 和 G 就可以计算出 ET 。

1.2.2 称重式蒸渗仪法（水量平衡法）

水量平衡法的基本原理是根据计算区域内水重的收

入和支出的差额来推算作物蒸发蒸腾量，水量平衡方程如下：

$$ET = E_1 - E_2 - E_g + P + W \quad (6)$$

式中 ET ——阶段内蒸发蒸腾量， mm ； E_1 、 E_2 ——分别为蒸渗仪测定时段始、末土壤含水量， mm ； E_g ——该时段内土体排水或深层渗漏量， mm ； P 、 W ——分别为测定时段内的大气降水量和灌溉水量， mm 。

2 结果与分析

2.1 冬小麦全生育期内波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 的对比分析

由图 1 (ET_b 和 ET_l 的逐日变化图和相关关系图) 可以看出，冬小麦整个生长过程中，波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 的变化趋势基本相同， ET_b 和 ET_l 的相关性较好， $R^2=0.9013$ 。蒸渗仪实测值 ET_l 变化幅度大，波文比计算值 ET_b 变化较稳定。由表 1 可知，全生育期内日均值 ET_b 和 ET_l 的平均相对偏差为 -2.08%。由图 1a 可知，4 月 5 日左右到 4 月 10 日左右 ET_l 较 ET_b 偏大，与表 1 对应起来，拔节~抽穗期日均值 ET_l 和 ET_b 的相对偏差为 -8.62%。

从以上分析可以看出，在小麦的整个生育期内波文比计算的蒸发蒸腾量与蒸渗仪实测的蒸发蒸腾量差别不大，均能较好地反映出冬小麦蒸发蒸腾量变化规律^[7]。

表 1 2005、2006 年冬小麦各生育期的 ET_b 和 ET_l

Table 1 ET_b and ET_l in winter wheat's growth stage in 2005 and 2006

时间 /月-日~月-日	生育阶段	天数 /d	ET_b / $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	ET_l / $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$	相对误差 /%
10-12-11-08	播种~分蘖	28	1.163	1.086	7.09
11-08-03-01	分蘖~返青	113	0.764	0.734	4.08
03-01-03-27	返青~拔节	26	2.527	2.492	1.40
03-27-04-17	拔节~抽穗	21	3.497	3.827	-8.62
04-17-05-05	抽穗~灌浆	18	4.534	4.847	-6.46
05-05-06-05	灌浆~收获	31	3.132	3.115	0.55
10-12-06-05	全生育期	237	1.832	1.871	-2.08

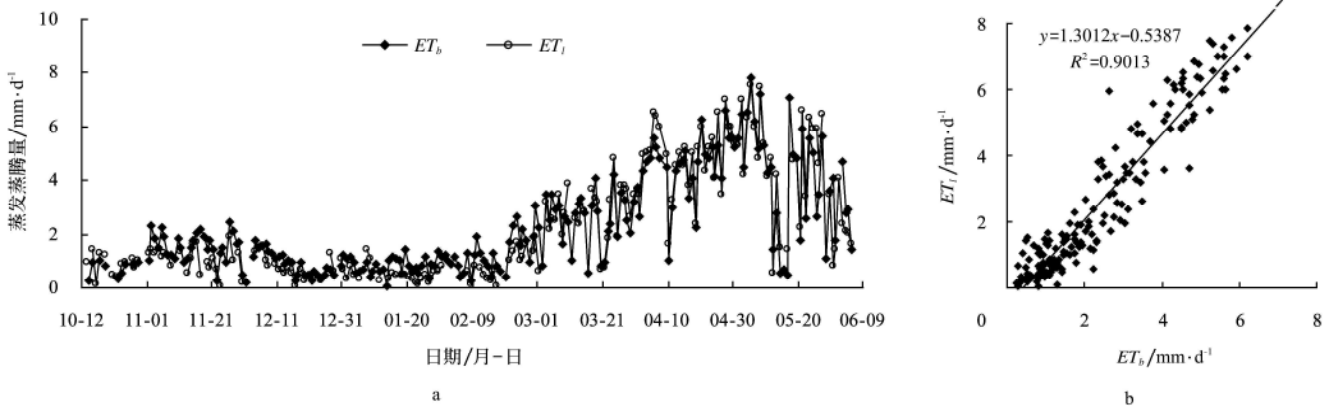


图 1 冬小麦 ET_b 及 ET_l 的变化过程及其关系曲线
Fig.1 Variations of ET_b , ET_l and $ET_b - ET_l$ relationship

2.2 不同生育期波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 的对比分析

分别选取冬小麦有代表性的生育期：返青~拔节、

拔节~抽穗期来进行波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 的分析。

由图 2、图 3 可以看出，在冬小麦的各生育期内， ET_b

与 ET_l 的变化趋势基本相同, 而且两者的相关性比较好。由图 2 可看出, 冬小麦在返青~拔节期 ET_b 与 ET_l 非常接近且相关性较好, $R^2=0.9007$ 。由波文比仪和蒸渗仪的测量原理可知, 波文比仪所测值代表的是一个面上的情况, 而蒸渗仪所测值代表的是一个点上(面积等于 6.25 m^2) 的情况^[8], 因而 ET_b 与 ET_l 可能会有一些偏差。同时波文比仪测定蒸发蒸腾量时的假定条件(下垫面条件均一、潜热通量交换系数与显热通量交换系数相等), 在实际条件下并不能完全达到, 所以也会产生一些误差^[9]。

由图 3 可以看出拔节~抽穗期中 4 月 5 日到 4 月 10

日 ET_b 较 ET_l 偏小, ET_b 与 ET_l 的相关性 $R^2=0.8595$ 。从数据分析来看可能由以下几点原因造成:(1) 波文比在计算过程中采用的是能量平衡原理, 其中土壤热通量、潜热通量和显热通量的测量准确与否会对计算结果造成一定的误差。(2) 在 4 月 5 日(拔节~抽穗期)进行了一次灌水, 蒸渗仪实测值增大, 而波文比仪所测的值代表的是一个区域值, 受周围的环境影响, 没有明显增大。所以从 4 月 5 日到 4 月 10 日蒸渗仪实测值都较波文比计算值偏大。本试验也说明冬小麦生长期, 波文比计算值和蒸渗仪实测值都可以运用。

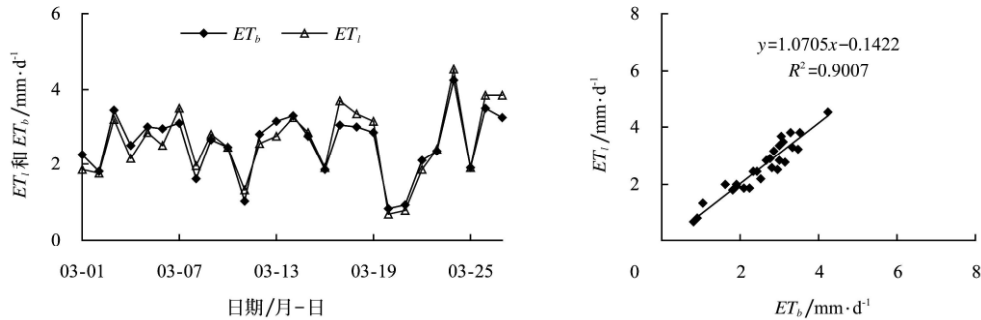


图 2 返青~拔节期 ET_b 及 ET_l 的变化及其关系曲线

Fig.2 Variations of ET_b , ET_l and ET_b - ET_l relationships from reviving to jointing

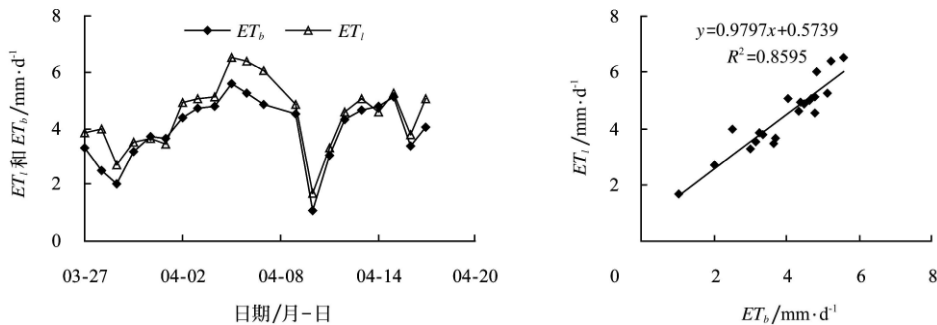


图 3 拔节~抽穗期 ET_b 及 ET_l 的变化及其关系曲线

Fig.3 Variations of ET_b , ET_l and ET_b - ET_l relationships from jointing to heading

2.3 波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 的日变化对比分析

选取冬小麦生长阶段有代表性的 2 天: 3 月 26 日(返青~拔节期, 晴天, 日照时数 8.6 h), 4 月 22 日(抽穗~灌浆期, 晴天, 日照时数 8.9 h) 进行分析。

从图 4 可以看出, (1) ET_b 与 ET_l 的日变化趋势基本一致, 日变化曲线均为单峰型。蒸发蒸腾量都是从 6:00 左右开始增大, 中午 13:00 左右达到峰值, 之后慢慢减小, 18:00 左右以后在零附近变动, 变化起伏较小。(2) 蒸渗仪实测值变化比较敏感, 波文比计算值变化比较稳定, 幅度较小。这是由于大的风速容易使蒸渗仪出现起伏变化的现象。而波文比采用的是能量平衡原理, 只考虑太阳辐射的影响, 因此它的变化比较稳定。(3) ET_b 与 ET_l 在白天基本都是正值, 夜间有负值的出现。对于波文比来说是由于计算值的大小与太阳净辐射有密切的关系, 夜间太阳净辐射为负值, 所以波文比计算值在夜间为负值; 而对于蒸渗仪来说是因为夜间露水的形成导致

实测值出现负值, 尤其是晴朗微风, 夜间降温显著, 空气温度降低, 湿度增强, 植物表面容易凝结露水, 从而使蒸渗仪实测值出现偏差。(4) 蒸渗仪实测值基本都在波文比计算值的周围波动, 由此也可以说明蒸渗仪实测值的平均值和波文比计算值的平均值比较接近。

由以上分析可以得出, 波文比法更能稳定地测量出冬小麦蒸发蒸腾量的日变化规律。

2.4 风速对蒸发蒸腾量日变化的影响

将风速分别与波文比计算值 ET_b 和蒸渗仪实测值 ET_l 进行了相关性分析, 两者之间呈现较弱的负相关关系。图 5 为风速与蒸发蒸腾量的日变化曲线, 其中, 图 5a 为大风情况下风速与 ET_b 和 ET_l 的日变化曲线, 图 5b 为微风情况下风速与 ET_b 和 ET_l 的日变化曲线。

由图 5a 可以看出, 大风对波文比计算值 ET_b 的影响较小, 对蒸渗仪实测值 ET_l 的影响比较大。在大风情况下, 尽管风速起伏不定, ET_b 日变化并没有受到很大影响, ET_b 日变化仍然呈单峰型。而大的风速对 ET_l 的影响比较大,

例如 4 月 8 日风速变化大小起伏不定，在 9：20 左右风速达到最大 6.7 m/s 时， ET_I 突然降到 -0.36 mm 左右，说明大风对 ET_I 有一定的影响。之后风速变化比较稳定， ET_I 日变化开始呈现单峰型，在 13：20 左右 ET_I 达到最大值，到凌晨 4：20 左右又刮起大风， ET_I 随之减小。由此说明当风速日变化起伏不定时，大风对蒸渗仪实测值 ET_I 的影响比较大。由图 5b 可以看出，当风速较小而且变化比较

稳定时，风速对 ET_b 和 ET_I 基本没有影响， ET_b 和 ET_I 的日变化都呈现单峰型。由此也说明大风和偏载对蒸渗仪测量结果有一定的影响，根据中国科学院禹城试验站的研究表明^[10]，当加入蒸渗仪的负荷不均匀分布时，蒸渗仪称重系统表现出易变性。而风速的大小对波文比计算值影响较小。

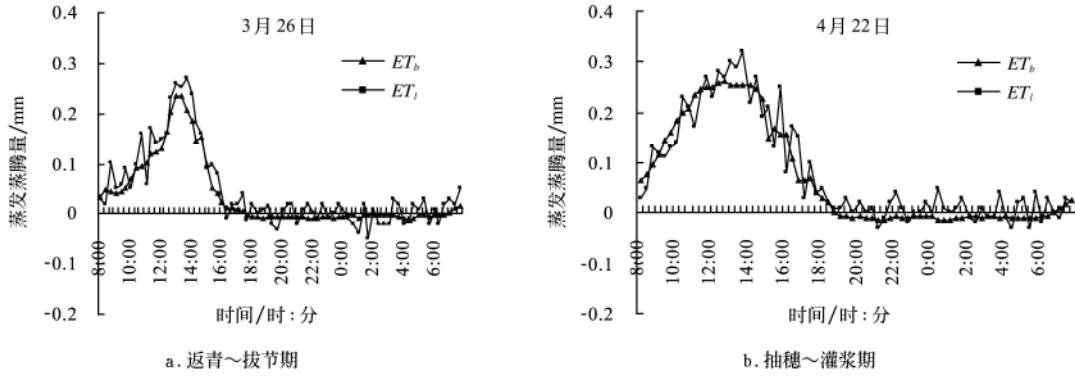


图 4 ET_b 与 ET_I 的日变化曲线
Fig.4 Diurnal variations of ET_b and ET_I

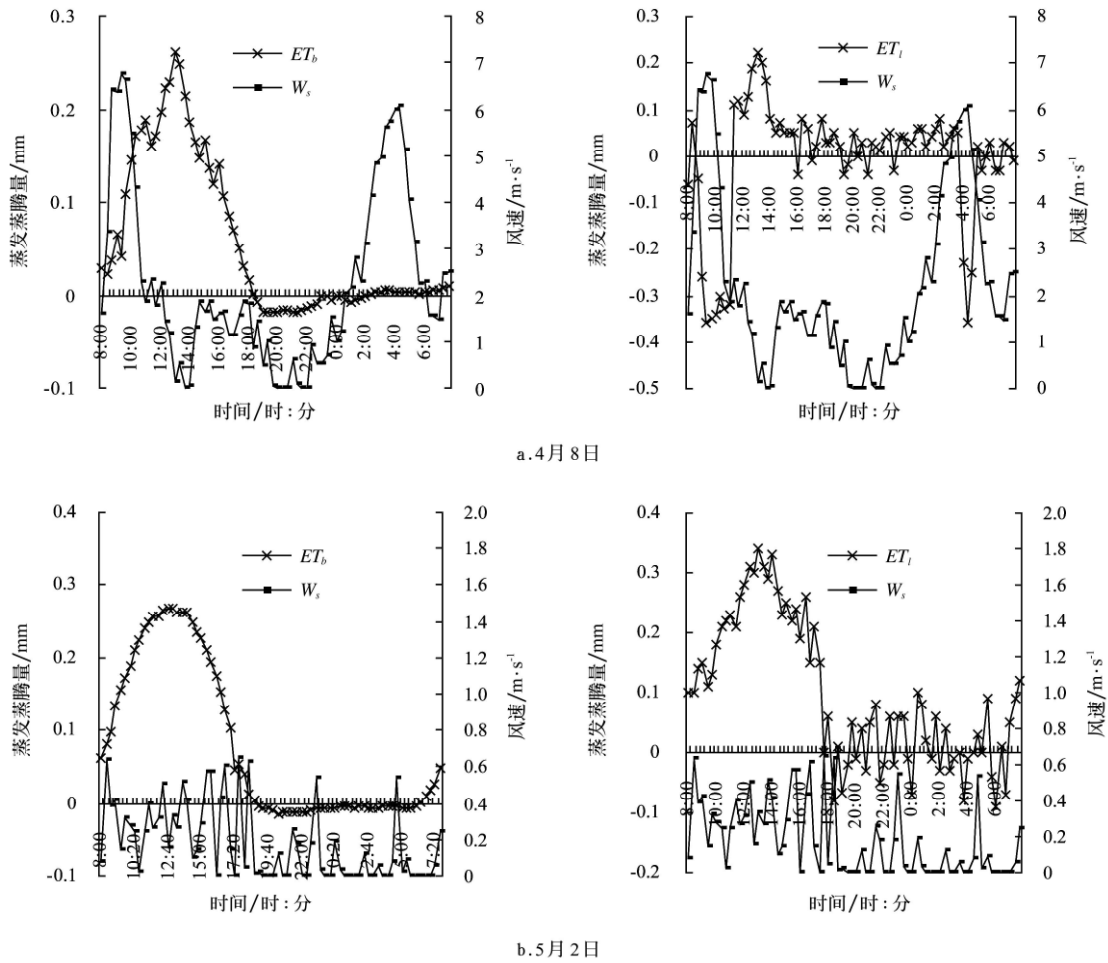


图 5 风速与蒸发蒸腾量的日变化曲线图
Fig.5 Diurnal variations of wind speed and evapotranspiration

2.5 太阳净辐射对蒸发蒸腾量日变化的影响

太阳净辐射是作物蒸发蒸腾的主要能量来源，选有

代表性的一天 4 月 22 日（晴天，日照时数 8.9 h）来分析太阳净辐射 R_n 对 ET_b 和 ET_I 的影响。 R_n 与 ET_b 和 ET_I 的日

变化曲线如图6所示。由图6可知,太阳净辐射和蒸发蒸腾量的总体变化趋势基本一致。在白天,随着太阳的升高,其净辐射增大,早上6:00左右开始缓慢增加,能量由大气层流向土壤表层,13:00达到最大,接着又逐渐减小直到下午18:00左右净辐射变为负值,即大气层流向土壤的能量不断减小,变为土壤层流向大气层,太阳净辐射为负值,之后变化趋于稳定。

波文比计算值 ET_b 和太阳净辐射 R_n 的变化趋势基本一致。由图6可知, ET_b 和 R_n 都是从早晨6:00左右开始增大,中午13:00左右达到峰值,之后慢慢减小,18:00左右以后 R_n 变为负值, ET_b 在零附近变动,两者变化都比较平缓。这是由于波文比的计算原理是能量平

衡,主要受太阳辐射的影响,因此波文比计算值与太阳净辐射有很好的相关关系。蒸渗仪测量值 ET_l 和太阳净辐射 R_n 的总体变化趋势基本一致,都是中午13:00左右达到最大,其他时间比较小。但是 ET_l 的变化起伏比较大,并没有受到 R_n 变化的影响。这是由于蒸渗仪的测量原理是水量平衡,模拟作物的正常生长,考虑的是作物生理学、农田气象学、空气动力学等方面的因素^[11]。在作物生长过程中除了风速对其的影响,还由于作物吸收土壤中的水分和向大气散失水分的这两个过程的速度并不相等的影响,从而导致蒸渗仪测量值变化起伏比较大。因此 ET_l 和 R_n 的关系不是很明显,但这并不能说明他们之间没有关系或是蒸渗仪测量不准确。

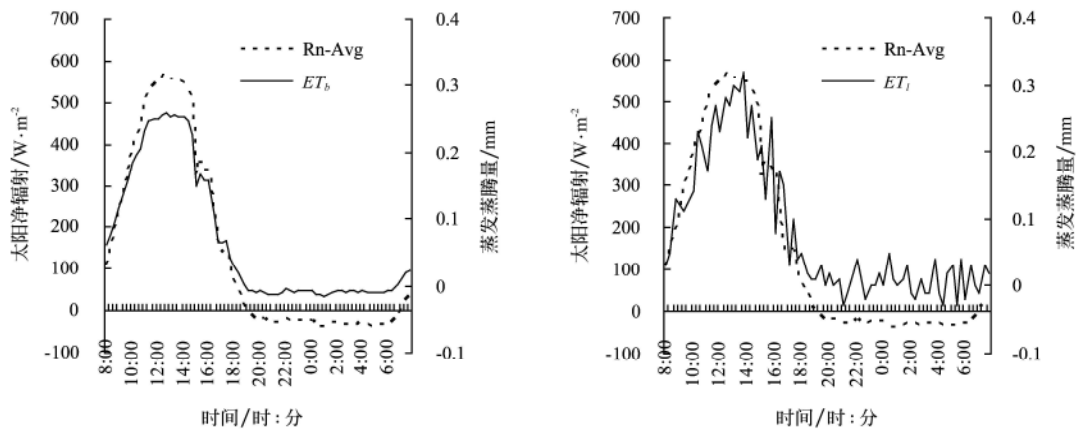


图6 太阳净辐射与蒸发蒸腾量的日变化曲线

Fig.6 Diurnal variations of net solar radiation and evapotranspiration

3 结论

1) 在冬小麦的整个生育期内,波文比计算值和蒸渗仪实测值的变化趋势基本一致,而且相关性比较好, $R^2=0.9013$ 。全生育期内日均值 ET_b 和 ET_l 的平均相对偏差为-2.08%。

2) 蒸发蒸腾量的日变化曲线呈单峰型,波文比计算值变化比较稳定,蒸渗仪实测值受自身因素和大风的影响变化比较敏感,起伏较大。波文比法更能稳定地测量出冬小麦蒸发蒸腾量的日变化规律。

3) 波文比计算值和太阳净辐射的关系密切,蒸渗仪实测值与太阳净辐射关系不是很明显。

4) 由于蒸渗仪隔断了与周围农田的水热交换,由此所导致的蒸渗仪内土壤水分供应与热交换与外界大田的不同,这可能使蒸渗仪实测值产生一些不可避免的误差。故有待进一步的研究。

[参考文献]

- [1] 陈凤. 作物蒸发蒸腾的测量及作物系数变化规律的研究[D]. 西北农林科技大学, 2004.
Chen Feng. Study on measuring crop evapotranspiration and crop coefficients changes[D]. Northwest A & F University, Thesis for Master Degree, 2004. (in Chinese with English abstract)
- [2] Jensen M E, Burman R D, Allen R G. Evapotranspiration and

- irrigation water requirements[R]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice, 1990, No.70: 332.
- [3] Casa A R, Russell B G, Lo Cascio B. Estimation of evapotranspiration from alfalfa in central Italy[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 104: 289-301.
- [4] Allen R G, Smith M, Perrier A, et al. An update for the definition of reference evapotranspiration[J]. ICID Bull, 1994, 43(2): 1-34.
- [5] Bland B L, Rosenberg N J. Lysimetric calibration of the Bowen ratio energy balance method for evapotranspiration estimation in the central great plains[J]. J Appl Met, 1974, 13: 227-236.
- [6] Grant D R. Comparison of evaporation measurements using different methods[J]. Quart J R Met Soc, 1975, 101: 543-550.
- [7] Richard W T, Steven R E, Terry A. H. The Bowen ratio-energy balance method for estimating latent heat flux of irrigated alfalfa evaluated in a semi-arid, advective environment[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2000, 103: 335-348.
- [8] 刘昌明, 张喜英, 由懋正. 大型蒸渗仪与小型棵间蒸发器结合测定冬小麦蒸发蒸腾的研究[J], 水利学报, 1998, (10): 36-39.
Liu Changming, Zhang Xiyang, You Maozheng. Determination of daily evaporation and evapotranspiration of winter wheat field by large scale weighing lysimeter and micro lysimeter[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1998, (10): 36-39. (in Chinese with English abstract)

- [9] 左大康, 谢贤群. 农田蒸发研究[M]. 北京: 气象出版社, 1991.
Zuo Dakang, Xie Xianqun. Nong tian zheng fa[M]. Beijing: China Meteorological Press, 1991. (in Chinese)
- [10] 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[J]. 水利学报, 2000, (3): 29–35.
Liu Shiping, Yang Jianfeng, Li Baoqing, et al. A new large weighing lysimeter and its application to hydrological process studies[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2000, (3): 29–35. (in Chinese with English abstract)
- [11] 康燕霞, 蔡焕杰, 王 健, 等. 夏玉米日蒸发蒸腾量计算方法的试验研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(2): 110–113.
Kang Yanxia, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. A study on calculation method of diurnal evapotranspiration of summer corn[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2006, 24(2): 110–113. (in Chinese with English abstract)

Comparative study of crop evapotranspiration measured by Bowen ratio and lysimeter

Qiang Xiaoman^{1,2}, Cai Huanjie¹, Wang Jian¹

(1. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;

2. Farmland Irrigation Research Institute, Chinese Academy of Agricultural Sciences, Xinxiang 453003, China)

Abstract: Crop evapotranspiration provides scientific basis for rational irrigation and water resources allocation. In order to estimate the crop evapotranspiration accurately, two evapotranspiration variables of winter wheat were analyzed. One was estimated by Bowen ratio-energy balance equation (ET_b), the other was measured by lysimeter (ET_l). The results indicated that the variations of ET_b were almost the same as those of ET_l . Variations of ET_b and ET_l were single peak curves. Their values were bigger at noon, and smaller in the morning and evening, and negative at night. The diurnal variation of ET_b was smaller than that of ET_l . Their diurnal variations were weakly negatively correlated with wind speed if the wind speed was small, but if the wind speed was big, the trend that ET_l decreases with the increase of wind speed was obvious. The ET_b was highly related to net solar radiation, while ET_l was not obviously related to net solar radiation. Crop evapotranspiration estimated by Bowen ratio represents the diurnal variation more steadily.

Key words: evapotranspiration, crops, large scale lysimeters, Bowen ratio-energy balance