

夏玉米日蒸发蒸腾量计算方法的试验研究^{*}

康燕霞, 蔡焕杰, 王 健, 丁端锋

(西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 根据实测资料, 对波文比计算的蒸发蒸腾量和蒸渗仪实测的蒸发蒸腾量日变化进行比较及分析。结果表明, 波文比所测蒸发蒸腾量与太阳净辐射的相关性比较好, 蒸渗仪所测值与太阳净辐射的相关性不明显。蒸发蒸腾量的日变化曲线呈单峰型, 早晚小, 中午大, 夜间为负值。蒸渗仪受自身因素影响, 变化比较敏感。两种方法计算平均值比较接近。波文比的计算值比蒸渗仪的测量值更能精确地反应短时段作物的蒸发蒸腾规律。

关键词: 波文比能量平衡; 蒸渗仪; 蒸发蒸腾量; 日变化

中图分类号: S513 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-7601(2006) 02-0110-05

作物蒸发蒸腾是发生在土壤—植被—大气系统这一相当复杂的系统内的连续过程, 它不仅是农作物生长发育至关重要的水分供应和能量来源, 而且决定着农田边界层的状况, 是SPAC水分运移的关键环节, 因此研究作物蒸发蒸腾很有意义^[1]。

目前, 确定作物蒸发蒸腾量的主要方法有空气动力学法, 波文比能量平衡法, 遥感法, 水量平衡法。但是它们的着重点不同, 并且每一种方法都有其优缺点。本文通过试验的方法, 对波文比能量平衡法和蒸渗仪水量平衡法进行分析, 讨论他们的优缺点^[1,2]。

1 试验区概况

试验于2004年6~10月在西北农林科技大学灌溉试验站进行, 供试作物为夏玉米。该站位于东经108°04', 北纬34°20', 所处地理位置属于暖湿温带季风半湿润气候区, 年均温度为12.9℃, 多年平均降水量635.1 mm, 年均日照时数2 163.8 h, 年均蒸发量1 440 mm, 年均无霜期210 d。站内地形平整, 土层深厚, 土壤类型为中壤土。站内安置有面积2.5 m×2.5 m, 深度为3 m大型称重式土壤蒸渗仪和波文比自动气象站。

2 蒸发蒸腾量计算与测量方法

2.1 波文比—能量平衡法^[3]

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

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \frac{c_p \rho \Delta T}{\epsilon \lambda}} = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (2)$$

$$H = \frac{R_n - G}{1 + \frac{\epsilon \lambda}{c_p \rho \Delta T}} = \frac{R_n - G}{1 + \frac{1}{\beta}} \quad (3)$$

$$\beta = \frac{c_p \rho \Delta T}{\epsilon \lambda} \quad (4)$$

式中, R_n 为到达地表面的净辐射通量; G 为土壤热通量; λE 为汽化潜热通量; λ 为水的汽化潜热系数; H 为显热输送通量; $\epsilon = 0.622$ 为水汽分子与干空气分子的重量比, P 、 c_p 为气压和定压比热, β 为波文比, ΔT 为温度差, Δe 为水汽压差。

2.2 水量平衡法(大型称重式蒸渗仪)

$$ET_L = E_1 - E_2 + P + W - E_g \quad (5)$$

式中, E_1 、 E_2 分别为蒸渗仪测定时段始、末重量折算水深(mm); P 和 W 分别为测定时段内的降水量和灌溉水量; E_g 为该时段内土体排水量。 ET_L 为运用蒸渗仪测量出的蒸发蒸腾量。

3 结果分析

3.1 蒸渗仪蒸发蒸腾量的日变化

玉米是6月19日种植选取有代表性的两天7月4日(天晴)苗期和7月20日(天晴)拔节期进行分析。从图1蒸渗实测蒸发蒸腾量日变化曲线可知, 蒸渗仪所测得的蒸发蒸腾量从总的趋势上来看都有一个白天增大, 夜间减小的趋势, 并且变幅不大, 都在0.25~−0.1 mm之间波动。但是蒸渗仪所测蒸发

* 收稿日期: 2005-10-10

基金项目: 高等学校博士点基金(20020712020); 高校青年教师奖资助项目

作者简介: 康燕霞(1981—), 女, 甘肃临洮人, 硕士, 研究方向为节水灌溉理论与新技术。Email: yanxiakang@126.com

通讯作者: 蔡焕杰(1962—), 男, 河北藁城人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业节水与水资源领域方面的研究。E-mail: huanjie@tom.com。

蒸腾量的值在较小时段内不稳定,没有规律性,并且增大和减小的时间每天都不同。从图1还可以看出蒸发蒸腾量7:00左右开始上升,13:00左右达到最大0.17 mm(7月4日)、0.23 mm(7月20日),之后开始降低,夜间负值多于正值。从理论上来说蒸发蒸腾量的值应该都是正值,不应该出现负值。经分析,原因有以下三个方面:第一,蒸渗仪的测量原理是水量平衡,采用的方法是称重法,计算过程采用的是前后两次的重量差。玉米在进行蒸发蒸腾过程的同时也进行着光合作用,会形成干物质,这使得蒸渗仪所测值有上下起伏的变化,导致负值的出现。第二,风速也会影响测量结果。研究表明,当加入蒸渗仪的负荷不均匀分布时,称重系统表现出易变性,说

明大风和偏载对测量结果有一定的影响^[4~6]。从能量平衡和空气动力学方面也能说明这个问题。能量方面,太阳净辐射的变化规律是一定的,不会影响到测量结果的起伏变化;从空气动力学的方面来说,气压和温度的变化也是有规律的,只有风速的变化容易出现起伏情况。第三,根系吸水速率、蒸腾速率的大小对测量结果也有影响。当蒸腾速率大于根系吸水速率时,测量结果就会变小;当蒸腾速率小于根系吸水速率时,测量结果就会变大,这也会造成计算结果上下起伏。夜间,尤其是晴朗微风,地面的有效辐射强,降温显著,有利于形成露水,空气温度减小,湿度增强,也会影响蒸渗仪的测量值。

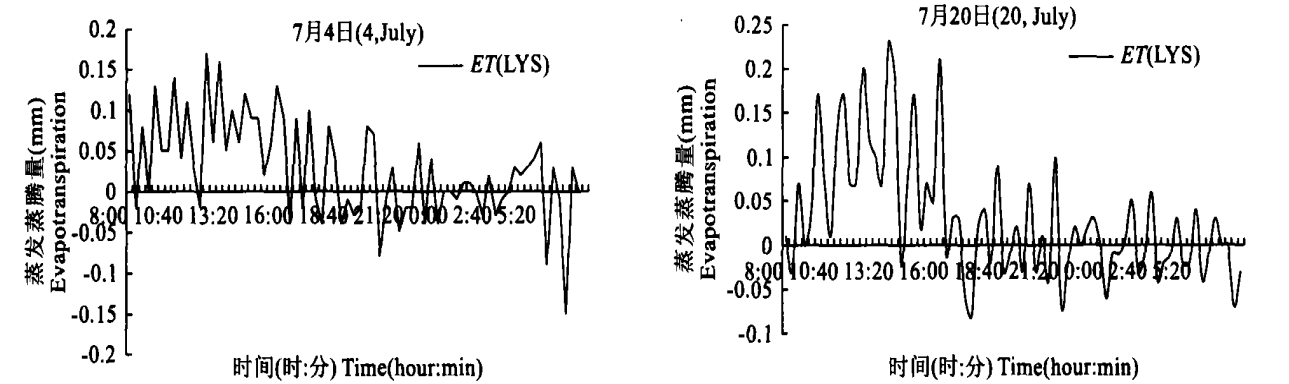


图1 蒸渗仪蒸发蒸腾量的日变化曲线图

Fig.1 Daily variation of evapotranspiration measured by Lysimeter

3.2 波文比蒸发蒸腾量的日变化

波文比的理论依据是能量平衡原理,蒸发蒸腾量日变化呈典型单峰型。图2为波文比蒸发蒸腾量

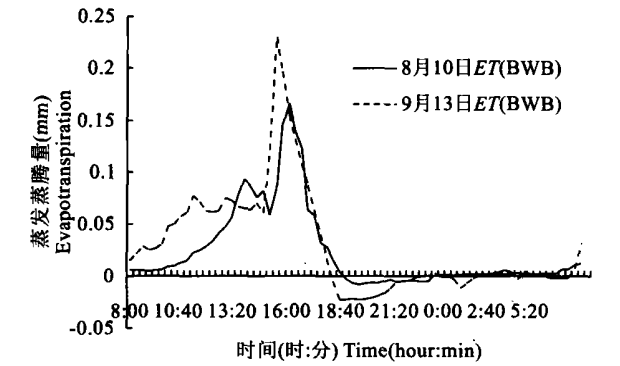


图2 波文比蒸发蒸腾量的日变化曲线图

Fig.2 Daily variation of evapotranspiration measured by Bowen ratio

腾的值有回落现象,16:00时左右增大到最大0.17 mm(8月10日)、0.23 mm(9月13日),之后开始迅速减小,20:00左右减小到最小,然后变化比较平缓。在13:00~16:00之间,蒸发蒸腾量的变化速率有减慢的趋势,这主要是太阳净辐射过于强烈,引起叶片气孔关闭所致,即所谓的“午休”现象。如果日照强度大并且日照时数长时午休现象会比较明显。“午休”时间以及强度的大小主要受太阳净辐射强度的影响。

3.3 波文比和蒸渗仪蒸发蒸腾量的日变化比较

波文比采用能量平衡原理进行计算,只考虑太阳辐射的影响。蒸渗仪运用水量平衡原理,模拟的是大田作物的正常生长情况,和作物的生长情况基本一致。从图3可以看出,蒸渗仪和波文比总的变化趋势基本一致,都是从6:00时左右开始增大,15:00左右增大到最大,之后慢慢减小,在20:00时左右减小到最小。但是同时可以看出,受自身因素的影响,蒸渗仪所测之值变化比较敏感,起伏不定。从图

的日变化曲线。由图2可知,从6:00时开始,蒸发蒸腾量的值迅速增大,13:00~16:00时之间蒸发蒸

3 还可以看出, 蒸渗仪所测之值在波文比计算之值的周围波动, 这说明波文比计算出的蒸发蒸腾量的

平均值和蒸渗仪测量出的蒸发蒸腾量的平均值比较相近。

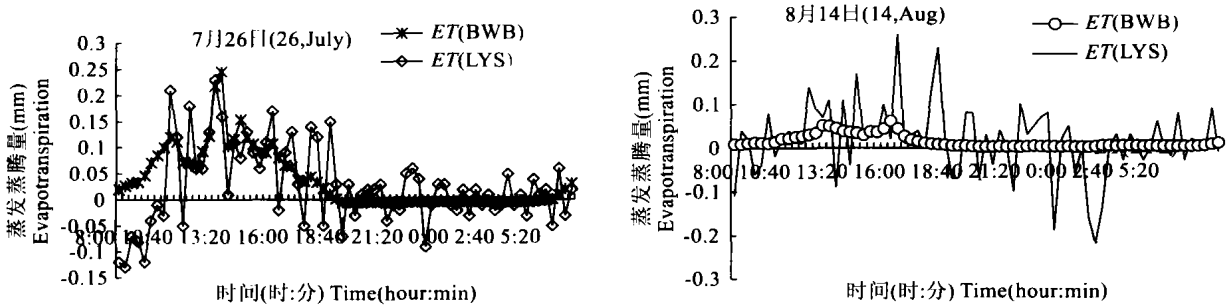


图 3 蒸渗仪与波文比蒸发蒸腾量的日变化曲线

Fig. 3 Daily variation of evapotranspiration measured by Lysimeter and Bowen ratio

3.4 太阳净辐射与蒸发蒸腾量的日变化

作物蒸发蒸腾的主要能量来源是太阳净辐射, 图 4 为太阳净辐射与蒸发蒸腾量的日变化曲线。从图 4 可以看出太阳净辐射呈单峰型, 随着太阳辐射的增加, 其净辐射迅速增加, 凌晨 6 : 00 左右开始慢慢增加, 能量由大气层流向土壤表层, 13 : 00 左右达到最大, 此后又迅速减小, 在 20 : 00 时左右净辐射由正值变为负值, 即大气层流向土壤的能量不断减少, 变为土壤层流向大气层, 之后趋于稳定。例如 7 月 3 日在 6 : 00 净辐射开始增加, 8 : 00 太阳净辐射为 $222.7 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 慢慢增大到 $391.28 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 之后, 突然减小到 $111.53 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 之后开始迅速增加, 13 : 00 时达到最大值 $640.13 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 然后慢慢减小, 20 : 00 时由正值变为负值, 到 23 : 00 时达到最小 $-26.594 \text{ J}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$, 在次日凌晨 6 : 00 左右开始增大。太阳辐射随着天气状况、季节的影响, 峰值的大小以及峰值出现的时间会有变化。

波文比所测蒸发蒸腾量和太阳净辐射的变化曲线基本一致, 例如 7 月 3 日从早晨 6 : 00 左右蒸发蒸腾量开始慢慢增加, 在 13 : 00 左右达到最大 $0.28 \text{ mm}/20 \text{ min}$, 之后慢慢减小, 在 20 : 00 由正值变为负值。波文比的测量原理是能量平衡, 主要受太阳辐射的影响, 没有考虑其它因素, 因此波文比所测蒸发蒸腾量与太阳净辐射有很好的相关关系。

从图 4 看到, 蒸渗仪和太阳净辐射关系不明显。虽然作物的蒸发蒸腾过程主要是受到太阳净辐射的影响, 但是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

气动力学方面的因素。由于作物在生长的过程中吸收土壤中的水分, 向大气散失水分这两个过程进行的速度并不是相等的, 有快慢之分, 从而导致蒸渗仪所测的值变化不稳定, 有上下起伏的现象出现。所以和太阳净辐射的关系不是很明显, 但是这不能说明他们之间没有关系或者是蒸渗仪测量不准确^[7~9]。

3.5 波文比的日变化

波文比是显热通量与潜热通量之比, 是反映作物吸收净辐射能量分配给潜热和显热的比例, 波文比大, 显热通量大于潜热通量, 这说明能量主要是用来进行显热交换, 用来进行蒸发蒸腾的能量比较小。图 5 是 8 月 9 日, 8 月 30 日波文比日变化曲线。可以看出, 波文比日变化曲线呈单峰型。8 月 9 日天阴, 波文比在早晨 6 : 00 左右慢慢增大, 在 11 : 40 增大到最大 0.041, 之后慢慢减小, 18 : 00 左右开始由正值变为负值, 22 : 00 减小到最小 -0.063 , 波文比一直在 $0.04 \sim -0.06$ 之间变化, 波文比小于 1, 这说明 8 月 9 日这天能量在 17 : 00 之前主要是用来进行蒸发蒸腾, 17 : 00 之后潜热通量变为负值, 能量主要用来进行显热交换。8 月 30 日天晴, 波文比在早晨 8 : 00 左右增大到最大 0.093, 之后慢慢减小, 在 21 : 40 减小到最小 -0.092 , 波文比在 $0.1 \sim -0.1$ 之间变化, 能量在 17 : 00 之前也主要用来进行蒸发蒸腾。由于气候、天气的变化, 波文比的变化有所差别。从图 5 可以看出在 18 : 00~5 : 00 之前, 潜热变为负值, 显热占主导地位。5 : 00~17 : 00 之间能量的支出主要是潜热交换, 净辐射主要用于蒸发蒸腾。

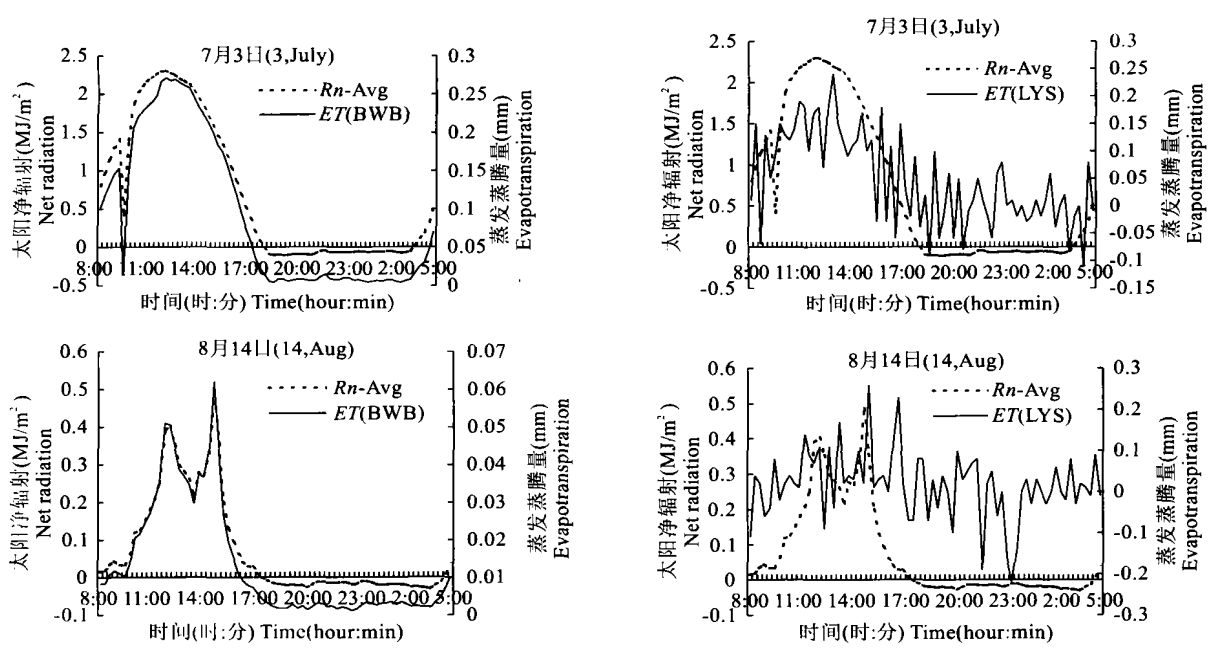


图4 太阳净辐射与蒸发蒸腾量的日变化曲线

Fig. 4 Daily variation of solar radiation and evapotranspiration

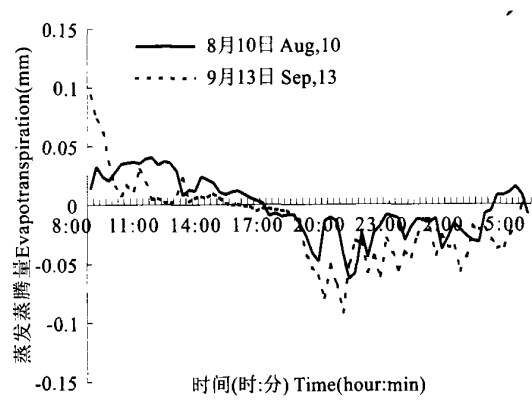


图5 Bowen比的日变化曲线图

Fig. 5 Daily variation of Bowen ratio

4 结 论

- 1) 波文比所测蒸发蒸腾量与太阳净辐射的相关性比较好, 蒸渗仪所测值与太阳净辐射的相关性不明显。
- 2) 波文比与蒸渗仪所测值在每 20 min 的变化有差别, 主要是测量的理论依据以及影响因素的差别。波文比计算出的蒸发蒸腾量的蒸发蒸腾量可以很好地模拟出短时段内蒸发蒸腾量的变化规律。蒸渗仪受到风速、蒸腾速率和根系吸水速率、干物质形成的影响, 测量结果出现上下起伏的现象, 不能很好地反映出蒸发蒸腾规律的日变化规律。

- 3) 蒸发蒸腾量的日变化曲线呈单峰型, 从早晨 6 点开始, 蒸发蒸腾量的值慢慢地开始增大, 在中午 12:00 时~14:00 时之间增大到最大, 之后慢慢减小, 到 20:00 左右变为负值, 之后变化比较平缓。
- 4) 蒸渗仪测量之值的大小围绕在波文比计算之值的周围, 波文比计算出的蒸发蒸腾量的平均值和蒸渗仪测量的蒸发蒸腾量的平均值比较相近。

参 考 文 献:

[1] 陈 凤. 作物蒸发蒸腾量的测量及作物系数变化规律的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2003.

[2] 孙卫国, 申双和. 农田蒸散量计算方法的比较研究[J]. 南京气象学院学报, 2000, 23(1): 101-105.

[3] 张小由, 龚家栋, 周茂先. 柽柳灌丛热量收支特性与蒸散研究[J]. 高原气象, 2004, 4(2): 228-232.

[4] 周茅先, 肖洪浪, 张小由. 额济纳绿洲柽柳群落蒸散特征的初步分析[J]. 中国沙漠, 2004, 24(4): 479-483.

[5] 杨秀海, 刘晶森. 西藏改则地区冬夏地表热平衡特征[J]. 西藏科技, 2002, 106(2): 48-54.

[6] 司建华, 冯 起, 张小由. 极端干旱条件下柽柳种群蒸散量的日变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(3): 380-384.

[7] 许 迪, 刘 钰. 测定和估算田间作物腾发量方法研究综述[J]. 灌溉排水, 1997, 16(4): 54-59.

[8] 王 健, 蔡焕杰, 陈 凤. 夏玉米田蒸发蒸腾量与棵间蒸发的试验研究[J]. 水利学报, 2004, (11): 108-113.

[9] 刘昌明, 张喜英. 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.

(英文摘要下转 129 页)

Effects of water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in jointing-booting stage

GUO Xiang-ping, ZHANG Lie-jun, WANG Qin, WANG Wei-mu, HAO Shu-rong
(*Department of Modern Agricultural Engineering, Nanjing 210098, China*)

Abstract: The pot experiment was conducted to study the effects of water stress on photosynthetic and physiological characteristics of rice in early jointing-booting stage. It was found that the diurnal variation of net photosynthetic rate showed double-peak curve in the treatment of water stress followed by rewatering, while it was single-peak curve in CK. Under the treatment of 5-days mild stress, net photosynthetic rate (P_n), transpiration rate (T_r) and stomatal conductance (C_s) of the second leaf from the top were higher than those of CK; under the treatment of 10-days mild stress or 5-days severe stress, the values of these parameters were lower before midday depression of photosynthesis (MDP) but higher after MDP than those of CK; but under 10-days severe stress, they were always lower than those of CK. Under the treatment of mild stress, the contents of total chlorophyll ($a+b$), chlorophyll a, chlorophyll b and carotenoid were all higher than those of CK, indicting that there was an over-compensation effect; but under the treatment of severe stress, they were lower than those of CK. In the early stage of rewatering after stress, the content of malondialdehyde (MDA) was less than that of CK, but in the later stage it was larger than that of CK, suggesting that rewatering accelerated the senescence of rice leaves. The yield and accumulation of dry matter were close to those of CK under 5-days stress, but were lower than those of CK under 10-days stress.

Key words: rice; water stress; rewatering; diurnal variation of photosynthesis; chlorophyll

(上接第 113 页)

A study on calculation method of diurnal evapotranspiration of summer corn

KANG Yan-xia, CAI Huan-jie, WANG Jian, DING Duan-feng
(*Key Laboratory of Agriculture Soil and Water Engineering in Arid and Semi-arid Areas of Ministry of Education, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract: Based on the experimental data from cornfields, this paper compared the daily change of evapotranspiration calculated by Bowen ratio-energy balance and that calculated by lysimeter. The results showed that the evapotranspiration calculated by Bowen ratio was highly related to solar radiation, but that calculated by lysimeter was not evidently related to solar radiation. The diurnal variation curve of evapotranspiration showed the single apex type, it was high in midday, low in the morning and evening, and minus in the night. The results of lysimeter were sensitively affected by its own factors. It was ideal to use the average value of the two methods. The calculated value of Bowen ratio was more accurate than the measured value of lysimeter in describing the evapotranspiration rule of crops in short period.

Key words: Bowen ratio-energy balance; lysimeter; evapotranspiration; diurnal course