

测定农田蒸发的试验研究^{*}

谢 贤 群

(中国科学院 地理研究所)
(国家计划委员会)

提 要: 本文阐述了中国科学院禹城综合试验站1986—1988年测定农田蒸发的联合观测试验概况, 比较和评述所用的微气象学方法、水量平衡法、遥感技术和以Lysimeter为主的器测法等测试结果的优缺点及适用性。并给出了几种主要作物田的蒸发耗水量。

主题词: 农田蒸发

蒸发是地理学研究的水热平衡诸要素之一, 而且几乎所有有关农业和水资源问题的研究和解决都离不开蒸发量的测量。但蒸发的测量又最为困难, 所以蒸发测定的方法学研究成为蒸发研究的主要内容。近年来, 随着微气象学、水文学和生物科学的发展, 从不同角度推动农田蒸发研究的开展^[1—3]。70年代以后由于遥感技术的发展, 国外开始应用红外遥感技术来测定一定区域内的农田蒸发^[4]。中国科学院禹城综合试验站自1979年建站以来已形成了以研究水平衡、水循环为主的综合试验体系, 多次进行过测量农田蒸发的田间试验, 1985年秋安装了一台面积为3 m², 深度为2m的大型原状土自动称重土壤蒸发渗漏仪(Lysimeter), 1986—1988年集中了水文、气象、土壤、植物生理和遥感技术等多学科的测定农田蒸发手段, 进行了连续3年的农田蒸发联合观测试验, 取得了大量的数据资料, 为综合评价和确定适宜的农田蒸发测定方法和模式以及研究各种作物田上的农田蒸发耗水规律, 提供了有意义的试验依据。本文即介绍联合观测试验的概况, 并就主要测量方法和结果作一简要分析和评述。

一、试验概况

(一) 试验方法和仪器

1986—1988年的蒸发联合观测试验中采用了下述方法和仪器设备:

1) 微气象技术 包括波文比—能量平衡法, 空气动力学技术—多层梯度法, 与红外遥感技术相联系的空气动力学阻抗—能量平衡联合法。采用的仪器为, CN—11型净辐射仪、CN—81型土壤热流板、电动通风热电偶温湿度梯度仪、轻便风速仪、热线微风仪、红外测

本文1989年8月20日收到, 1990年2月5日收到修改稿。

* 国家自然科学基金资助课题。

温仪等。

2) 水量平衡法 包括大田水量平衡法和零通量面法。利用中子水分探测仪和负压计进行土壤含水量和土壤水势的测定。

3) 红外遥感技术 应用SE—590型多光谱仪、ER—2007型红外测温仪对作物进行光谱特性测定和表面温度测量, 从而推算出一个计算蒸发量的遥感模式。

4) 植物生理测定技术 利用LI—1600型稳定态气孔计及叶面积仪测定作物叶片的气孔阻抗及水汽传导率以计算作物蒸腾。

5) 器测法 主要有大型原状土自动称重蒸发渗漏仪(Lysimeter), ГПН—2000型水力蒸发器, 20 m²、5 m²和3 m²的水面蒸发池以及各种类型和规格的水面蒸发皿(器)等。

(二) 场地、项目及时间

蒸发联合观测是在中国科学院禹城综合试验站进行, 试验田面积约200亩, 主要观测场地设置在农田南部的Lysimeter附近, Lysimeter距南端边界约150m, 距东西端田界约50m及70m。南端田界处有一排稀疏的农田防护林, 林高约10m, 在Lysimeter附近安装了净辐射仪、温湿度梯度仪、通风干湿球温度表、轻便风速仪、土壤热流板、中子水分仪探测孔、负压计等, 并在其附近进行作物表面的红外温度遥感测量, 作物光谱信息测量和作物叶片气孔测量等。在试验田北部有一座60m气象铁塔, 铁塔下进行全套农田辐射平衡各分量的测量, 铁塔上从0.5m到32m, 设置了7层温度梯度和风速测量仪器, 在铁塔附近用热线微风仪和512—B型温湿度管进行作物冠层内到植株以上3m左右高度的风速梯度和温度梯度测量。

联合观测的时间安排为, 冬小麦每年从10月下旬起观测, 冬季封冻期间停测, 次年春季小麦返青后按小麦不同生育期分成若干时段, 每时段取5天为一个观测周期, 观测日从日出到日落每隔2小时观测一次, 每次观测15—20分钟, 观测时上述各观测项目均同步测量。大豆、棉花、玉米等作物的观测从6月下旬开始至9月下旬结束, 项目同小麦。

二、测量结果与分析

联合观测试验中以Lysimeter测量的蒸发量为相对标准, 依次对其它各种测定农田蒸发量的方法进行比较分析。

(一) 波文比—能量平衡法

波文比—能量平衡法的计算公式为:

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \frac{C_p \cdot P}{\varepsilon \cdot \lambda} \cdot \frac{K_H}{K_w} \cdot \frac{\partial T / \partial z}{\partial e / \partial z}} = \frac{R_n - G}{1 + \beta} \quad (1)$$

式中, λE 为蒸发耗热通量, R_n 为净辐射通量, G 为土壤热通量, ε 为水汽分子对于空气分子的重量比, C_p 是空气定压比热, P 是大气压力, λ 是汽化潜热, K_H 和 K_w 分别为显热和潜热的湍流交换系数, $\partial T / \partial z$ 和 $\partial e / \partial z$ 分别是空气温度和水汽压的垂直梯度, β 为波文比。

假设 $K_H = K_w$ ，并以有限差分形式，代替 (1) 式中的微分，则公式 (1) 即为下述计算式：

$$\lambda E = \frac{R_n - G}{1 + \frac{C_p \cdot P}{e \cdot \lambda} + \frac{\Delta T}{\Delta e}} \quad (2)$$

应用波文比—能量平衡公式计算的1986和1987年小麦生育期间的小时蒸发量与用 Lysimeter 实测的蒸发量点绘于图1中，图中大部分点子聚集在1:1直线下方，表明计算的蒸发量偏低，但两者间仍有较好的相关，相关系数为0.80，标准差为0.202，回归系数 $a = 0.193$ ， $b = 0.8241$ ，经统计，计算的蒸发量比 Lysimeter 实测值平均偏低20%左右。

作者曾在另文中分析了用波文比—能量平衡方法计算农田蒸发量的精度及误差¹⁾，指出产生偏差的原因是：1) 净辐射、土壤热通量和温湿度梯度的测量误差，2) 公式中假设 $K_H = K_w$ 的误差，3) 观测点迎盛行风向的风浪区长度 (fetch) 引起的误差，4) Lysimeter 本身的观测误差。作者用误差统计公式对波文比—能量平衡公式进行了统计检验和误差分析，作出了对该方法的综合评价，得出：

1. 为保证波文比—能量平衡公式计算的蒸发量的精确度，必须注意在观测前后对净辐射仪进行检定，使仪器精度在5%之内。

2. 必须特别注意温湿度梯度的观测精度，应研制和使用仪器精度误差小于 0.1°C 和 0.1hPa 的温湿度梯度传感器。否则，将可能使计算的蒸发量产生大于30%的计算误差。

3. 在强烈逆温下， $K_H \neq K_w$ ，因此必须考虑公式中假设 $K_H = K_w$ 的补充订正。

4. 观测点必须设置在水平均匀性良好的田块中央，必须注意迎盛行风向的风浪区长度应是在仪器安装高度的100倍以上。否则将会使计算的蒸发量产生大于30%的误差。

5. 注意对 Lysimeter 内作物的各种田间管理及耕作措施应与其周围农田的保持一致，使器内作物生育状况与农田的作物长势一样，以免引起 Lysimeter 的测量值偏大或偏低。

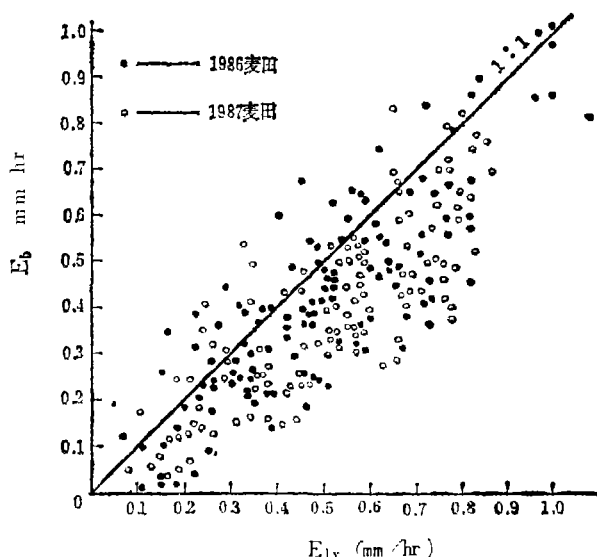


图1 波文比—能量平衡公式计算的蒸发量 (E_b) 与用 Lysimeter 测量的蒸发量 (E_L) 之比较，
Relation between evapotranspiration values
 E_b estimated with Bowen ratio energy balance
formula and Lysimetrically measured E_L .

1) 谢贤群：波文比—能量平衡法计算农田蒸发的精度检验，待发表。

(二) 与红外遥感技术相联系的空气动力学阻抗—能量平衡法

空气动力学阻抗—能量平衡法的基本公式为:

$$\lambda E = R_n - G - \rho C_p (T_s - T_a) / r_a \quad (3)$$

式中 T_s 为作物表面温度, T_a 为空气温度, r_a 为中性层下的空气动力学阻抗, 在联合观测试验中作者采用了国内外 5 种测定农田蒸发量的空气动力学阻抗公式, 并着重讨论了陈镜明提出的剩余阻抗公式〔5-6〕和谢贤群的改进公式〔7〕, 它们分别为:

陈镜明的剩余阻抗公式:

$$\begin{aligned} \lambda E &= R_n - G - \rho C_p \frac{T_s - T_a}{r_{bh} + r_a} \\ r_{bh} &= 7.5 \times (\bar{I}/\bar{U})^{-1/2}, \\ r_{sc} &= r_{sm} \cdot \phi_H \end{aligned} \quad (4)$$

式中 r_{bh} 为剩余阻抗, \bar{I} 为作物叶子特征尺度, \bar{U} 为作物冠层内的平均风速, r_{sm} 为中性层结下的空气动力学阻抗, ϕ_H 为层结稳定度的订正函数。

谢贤群的改进公式为:

$$\begin{aligned} r_{sc} &= r_{sm} + \frac{\phi_H}{u_*^2 \kappa} \\ &= r_{sm} \left(1 + \frac{\phi_H}{\ln \frac{z-b}{z_0}} \right) \end{aligned} \quad (5)$$

式中 r_{sc} 为经过层结稳定度订正后的空气动力学阻抗, z_0 为下垫面粗糙度, κ 为卡尔曼常数, u_* 为摩擦速度, d 为零平面位移。

各种公式的计算结果列于表 1 中, 由表知, 陈镜明的剩余阻抗公式 (4) 和作者的改进公式 (5) 的平均相对偏差均比较低。

表 1 各种空气动力学阻抗模式计算的蒸发量与实测蒸发量的相关系数和平均相对偏差

The relative coefficients and mean errors between the values of E_s , estimated with different aerodynamic resistance models and E_l , —Lysimetrically measured

计 算 公 式	相关系数	离 差	回归系数	平均相对偏差	统计个例
Brown-Rosenberg 公式 (中性层结)	0.8439	0.2917	$a = 0.0499$ $b = 0.8688$	16.9%	198
Verma-Rosenberg 公式	0.8493	0.2592	$a = 0.0499$ $b = 0.8619$	15.4%	198
Hatfield公式	0.8484	0.2639	$a = 0.0358$ $b = 0.9056$	16.0%	198
谢贤群改进公式	0.8695	0.2560	$a = 0.0168$ $b = 0.9056$	13.8%	198
陈镜明剩余阻抗公式	0.8782	0.2550	$a = 0.0095$ $b = 0.9113$	12.7%	198

此外, 作者还对本文公式(4)、(5)在不同稳定度层结下的结果作了分析。得出这二种在我国改进和发展的公式在各种稳定度状况下均有较高的计算精度¹⁾。由此作者认为应用与遥感技术相联系的空气动力学阻抗—能量平衡模式计算农田蒸发量有较好的应用前景。

(三) 空气动力学技术中的多层梯度公式

空气动力学技术—多层梯度法计算公式为^[8]:

$$\begin{aligned} \lambda E &= -u_*^2 \lambda \frac{dq}{du} \\ H &= -\rho C_p u_*^2 \frac{dT}{du} \\ u_* &= k(z-d) \frac{du}{dz} / \phi_a \end{aligned} \quad (6)$$

式中 u_* 为摩擦速度, z 为参考高度, d 为零平面位移, dq 、 dT 、 du 分别为水汽、温度和风速随高度的变化, k 为卡尔曼常数, ϕ_a 为动量交换的稳定度订正函数, H 为显热交换通量, ρ 是空气密度。

图2为用空气动力学技术—多层梯度公式计算的蒸发量与 Lysimeter 实测蒸发量的比较。经统计其平均偏差为 21%。公式(6)只有在稳定层结下才有较好的结果^[8], 而且必须要有至少4个高度的风速和温湿度资料, 因此多层梯度公式的局限性较大, 据统计分析, 在不稳定层结下, 计算值与实际观测值的平均偏差可高达40%以上。

(四) 大田水量平衡法

大面积农田水量收支具有如下的平衡关系:

$$P + I + E_g = R_s + P_a + P_r + E \pm \Delta W_s \quad (7)$$

在试验田中设置多个雨量观测点求得降雨量 P , 实测各抽水点的灌水量 I , 通过地下水位观测点求得日潜水蒸发量 E_g (实际上是地下水补

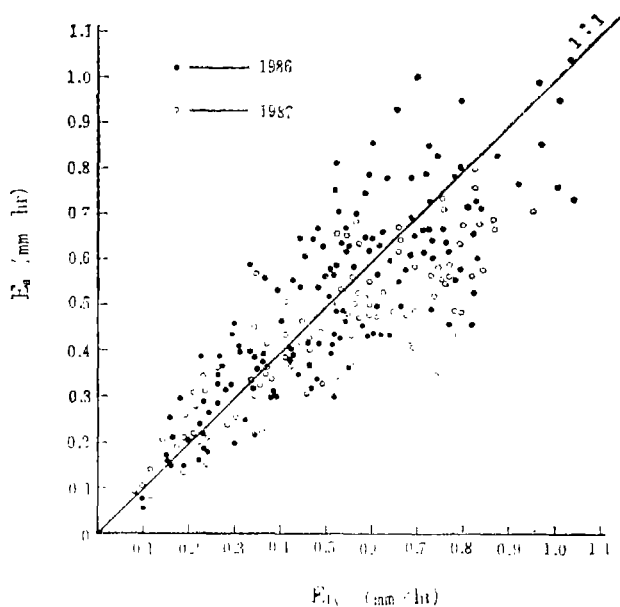


图2 多层梯度公式(6)计算的蒸发量与 Lysimeter 实测蒸发量的比较
Aerodynamic layers gradient model—estimated E_e compared with Lysimeterically measured E_l .

1) 谢贤群, 几种测定农田蒸发量的空气动力学阻抗—能量平衡模式的比较, 待发表。

给土壤水量), 通过径流观测场求得排出农田的地表径量 R , 由地下水位观测求得降雨和灌溉和补给地下水量 P_a 和 P_i , 通过 5 日间隔的土壤含水量测定, 获得土壤水分变化量 ΔW_s , 用公式 (7) 可计算出 5 日时段内农田实际蒸发量 E 。

表 2 列出了 1987 年春季禹城试验站 5 km^2 小区麦田内用水量平衡公式计算的月蒸发量与用 Lysimeter 实测蒸发量之比较。表中除了 3 月份水量平衡法计算的蒸发量偏大外, 其余各月二者均很接近, 这说明大田水量平衡法计算的蒸发量具有一定的准确度。

表 2 大田水量平衡法计算的蒸发量 (E_w) 与 Lysimeter 测量的蒸发量 (E_L) 之比较
Field water balance formula--estimated E_w
compared with Lysimetrically measured E_L

	3 月	4 月	5 月	6 月上旬 (5 天)
E_L (mm)	16.33	140.86	174.31	22.79
E_w (mm)	82.4	152.55	172.77	25.45
$\frac{\Delta E}{E_L}$ (%)	77.2%	8.3%	-0.9%	11.7%

(五) 红外遥感模式

在作物生长期中对作物进行其光谱特性、热红外信息及微气象参数的观测, 利用下述计算作物总蒸发的红外遥感模式¹⁾:

$$\lambda E = \frac{\rho C_p}{\gamma} [\Delta (T_a - T_s) + d] \left/ \left[r_a + \frac{1 + \left(\frac{T_d - T_{d0}}{T_d - T_s} \right)^{-1}}{A \cdot I + B \cdot Q_{*0}} \right] \right. \quad (8)$$

式中 γ 为干湿表常数, Δ 为空气温度下的饱和水汽压斜率, T_0 为作物活动面温度, d 为水汽饱和差, r_a 为空气阻抗, T_d 为不灌水条件下的作物冠层温度, T_s 为充分灌水时作物冠层温度, I 为用作物光谱推算出的叶面积指数, Q_{*0} 为作物活动面上的光辐射强度, A 和 B 为待定系数, 不同作物有不同的系数。

应用公式 (8) 计算了 1987 年大豆田和 1988 年小麦田的农田蒸发量, 并与 Lysimeter 的测量值进行了比较, 如图 3, a 和 b 所示。

1) 张仁华, 利用作物光谱、冠层表面温度的总蒸发计算模式, 待发表。

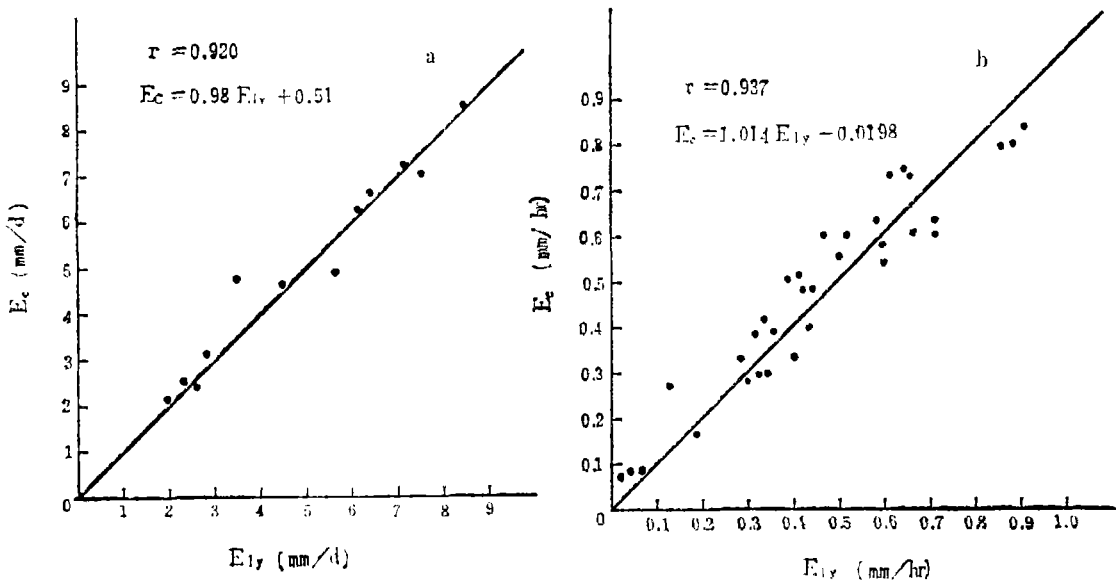


图 3 公式 (8) 计算的蒸发量(E_c) 与Lysimeter实测蒸发量(E_{ly}) 关系

a——大豆田, 1987.

b——小麦田, 1988.

Relation between evapotranspiration values (E_c) estimated with
formula (8) and Lysimeterically measured (E_{ly})

a. Soybean field, 1987.

b. Wheat field, 1988

三、Lysimeter测定的各种作物田的蒸发耗水量

1. 禹城试验站Lysimeter的特点

良好的大型Lysimeter被普遍认为是一种测定农田蒸发的相对标准仪器^[9-11]。禹城试验站设计安装的Lysimeter具有下述特点: 1) 是原状土而不是回填的扰动土, 可使器内的土壤特性与器外大田的保持一致。2) 它的面积较大, 表面积为 3 m^2 , 按照一般的种植密度, 可在器内种植小麦1000株左右, 种植棉花和玉米20株以上, 器的深度为 2 m , 也可保证作物根系可达之深度。这样器内植株的数量和植物冠丛的结构、生理生态特征可与器外的大田作物十分近似, 3) 有优良的称重系统, 自动平衡天平装置能称重 20 t , 并能灵敏地反映出 40 g 重量的变化, 相当于蒸发器内原状土土柱内 0.017 mm 水分量的变化, 具有很高的分辨率和精度, 可以自动记录各时段的重量变化, 求出短时段内的蒸发量。

2. Lysimeter测量的各种作物田的农田蒸发耗水量

表3给出了用Lysimeter实测的冬小麦、大豆、棉花和夏玉米田的蒸发耗水量。

对冬小麦, 除了1987—1988年为麦棉套种田, 小麦植株密度比往年正常麦田少一半, 因

表 3 不同作物田各生育期的蒸发耗水量 (mm)
The water consumed values of evapotranspiration on various crops' field in their growing season (mm)

冬	年 份	苗 期 —拔节	拔 节 —抽穗	抽 穗 —成熟	生育盛期	全生育期	降 水 量		差 值		产 量
		10月下 —3月下	4 月	5 月— 6 月上	4 月— 6 月上	10月下— 6 月上	1—6月	全生 育期	1—6月	全生 育期	
小	1986	—	82.1	249.7	331.8	—	40.3	103.2	291.5	—	300kg
麦	1986—1987	195.1	123.7	202.7	326.4	521.5	90.6	116.7	235.8	404.8	300kg
	1987—1988	116.2	70.3	104.5	174.8	291.0	71.9	131.7	99.9	159.3	180kg
大	年份	全生育期	降水量				年份	全生育期	降水量		
		6 月下— 9 月中	6 月下— 9 月中	差 值	产 量			6 月上— 10 月中	6 月上— 10 月中	差 值	产 量
	1986	358.1	196.4	161.7	120kg	棉 花	1988	474.7	424.9	49.8	50kg
	1987	376.1	300.3	75.8	130kg	夏玉米	1989	6 月下— 9 月中 323.7	6 月下— 9 月中 158.9	164.8	500kg

而总蒸发耗水量较少外, 1986和1987年小麦春季生长盛期(4月—6月上旬)的蒸发耗水量均在300mm以上, 而此时期的降水量却不到100mm, 1986年降水量只有40.3mm, 仅占蒸发耗水量的12.1%, 1987年春季降水量为同时期小麦田总蒸发耗水量的27.8%, 1986—1987年春季的小麦全生育期总蒸发耗水量为521.5mm, 而全生育期的降水量仅116.7mm, 蒸发耗水量与降水量之差为404.8mm。即使在麦棉套作田上, 小麦的植株密度减少一半, 小麦生育盛期和全生育期的蒸发量也几乎比全部是小麦田的总蒸发量少一半左右, 可是1987—1988年麦棉套作田上蒸发耗水量与降水量之差在春季生育期也达到100mm左右, 全生育期差值达159.3mm。

对大豆和棉花这样的夏季作物而言, 由于禹城夏季正值雨季, 在正常或雨水偏多的情况下, 大豆和棉花的蒸发耗水量与降水量相差不大。如1987年大豆的蒸发耗水量为376.3mm, 全生育期降水量为300.3mm, 二者仅差76mm; 1988年棉花的蒸发耗水量为474.7mm, 而该年夏季雨水偏多, 仅7月份降水量就达286.1mm, 全生育期降水量为424.9mm, 蒸发量与降水量仅差49.8mm; 但在夏季降水较少的年份, 如1986年夏季, 大豆的总蒸发耗水量与降水量的差异, 就比较人, 高达182.7mm; 1989年夏季, 夏玉米的总蒸发耗水量与降水量的差也高达164.8mm。

参 考 文 献

- (1) Monteith, J.L.: Evaporation and Environment, Symposium of the Society for Experimental Biology, Vol.19, 205-231, Cambrige University Press, 1965.
- (2) Tanner, C.B.: Energy Balance Approach to Evapotranspiration from Crops, Soil Sci. Soc. Amer. Proc., 24, 1-9, 1960.
- (3) Cooper, J.D.: Measurement of Moisture Fluxes in Unsaturated Soil in Thetford Forest Report, No. 66, Wallingford OXON, 1980.
- (4) Hatfield, J.L.: A. Perriet and K.D. Jackson, Estimation of Evapotranspiration at One-time-of-day Using Remotely Sensed Surface Temperature, Agric. Water Manage., Vol. 7, 341-350, 1983.
- (5) 陈镜明: 现用遥感蒸散模式中的一个重要缺点及改进, 科学通报, 第6期1988年。
- (6) 陈镜明, 唐登银: 遥感方法和蒸散计方法估算农田蒸散量的比较, 科学通报, 第20期, 1988年。
- (7) 谢贤群: 一个改进的测定农田蒸发量的能量平衡-空气动力学阻抗模式, 气象学报, 46(1), 1988年。
- (8) Biscoe, P.V. and J.L. Monteith: Barley and Its Environment, J. Appl. Ecology, Vol. 12, 227-247, 1975.
- (9) 唐登银、程维新, 洪嘉旌: 我国蒸发研究的概况与展望, 地理研究, 3(3), 1981年。
- (10) Black, T.A.: Hydraulic Load Cell Lysimeter Constnuction and Tests, Soil Sci. Soc. Amer. Proc. Boston, 1968.
- (11) McIlroy, I.C.: The Aspendale Multiple Weighed Lysimeter Installation, Division of Meteorological Physics Paper, CSIRO, Melbourne, Technical Paper, No. 14, 1963.

EXPERIMENTAL STUDY FOR DETERMINING EVAPOTRANSPIRATION OF THE FIELD

Xie Xianqun

(Institute of geography, Chinese Academy of Sciences and
State planning Commission of the People's Republic of China)

Subject terms: evapotranspiration

Abstract

The author related the general situation about combined measurement experiment of the field evapotranspiration in Yucheng Experimental Station,

Chinese Academy of Sciences during 1986--1988, and introduced the observation object, methods and the instrumentation, etc. in this paper. The author compared and evaluated the following methods: (1) Lysimeter's method, (2) Bowen ratio-energy balance approach (BREB), (3) energy balance-aerodynamic resistance method in relation to remotely sensed technique, (4) aerodynamic technique-layer gradient method. The results are as follows.

1. The calculated value of evapotranspiration (ET) of the field by BREB method is 20% lower than the measured values with Lysimeter. The observed differences between BREB-estimated and lysimetrically-measured ET values may stem from four of the following causes: (1) underestimation or overestimation of R_a , G , Δt and Δe , (2) non-equality of K_b and K_r , (3) insufficient fetch, (4) overestimation of actual ET by Lysimeter. The author evaluated the applicability of the calculating ET values by BREB method.

2. The author considers that Dr. Chen Jimin's excess resistance model and author's removed formula are better than other aerodynamic resistance-energy balance formulas, the relative error is about 14% in all stability conditions, compared with Lysimeter.

3. The relative error of aerodynamic technique-layer gradient formula is about 21% in stable condition, while in unstable condition, the error is larger.

4. The author analysed the ET of some crop fields, the value of ET of the wheat field is more than 500 mm in the whole growing period (1987), the difference between ET and rainfall is about 400mm, the ET of wheat in spring is more than 300mm, but the rainfall only a few, the difference is over 200mm, so, the irrigation is necessary during the wheat growing season.

Even though the ET of cotton and soybean are large (about 300-400mm), as it is rainy season in summer, yet the rainfall is large too, the difference between both ET and rainfall is only less than 100mm. If it is drought in summer (for example in 1986), the difference between ET and rain is more than 100mm and irrigation is necessary for these crops.