

# 土壤蒸发观测方法的研究\*

信 迺 詮

(中国农业科学院农业气象研究室)

土壤蒸发过程受各种条件(气象、土壤、植被等)的影响,要想在自然条件下获得蒸发量的绝对数值实属不易。但是,蒸发量的确定对土壤学、气象学及其他水文气象学科中很多实际问题的解决具有重要意义。土壤改良措施的规划,不同天气与气候条件下灌溉定额和灌溉时期的估计,农田土壤水分预报以及抗旱保墒等措施,都需要大量的土壤蒸发资料。此外,蒸发资料也广泛地应用在气候理论和土壤水热收支的研究中。因为蒸发的水量和蒸发所消耗的热量,对于各地区不同土壤条件下的水热状况表现出极大的不同。

近年来在国外,特别是苏联在各种自然地理区域的不同条件下,对各种测定土壤蒸发的方法都作了相当详尽的分析和鉴定<sup>[7,8,19]</sup>,英<sup>[20,21]</sup>、法<sup>[22]</sup>等国也作了相应的研究。在国内,这方面的研究较少。自解放后,由于生产上的迫切需要,引起有关部门的重视,先后也发表了一些结果和论文<sup>[1-3]</sup>。

中国农业科学院农业气象研究室,从1955年起就比较系统地开展了土壤蒸发观测方法的试验研究。1955—1959年在北京对称量蒸发器法(换土蒸发器、波波夫蒸发器和ГГИ-500型蒸发器等)、水量平衡法<sup>[12]</sup>以及热量平衡法<sup>[5,7,11]</sup>和乱流扩散法进行了对比试验。1958—1959年为了鉴定波波夫蒸发器、ГГИ-500型蒸发器和水量平衡法在我国各种不同土壤、气候条件下适应情况和在应用上所存在的问题,前后选择南京,广州,陕西涇阳、三原,甘肃黄羊镇以及辽宁锦州六个农业气象试验站进行观测试验,现已获得初步结果,汇报发表如下。

## 一、计算方法

目前,国内外研究土壤蒸发的方法很多。我们仅对下列几种主要方法进行了研究。

### (一) 称量蒸发器法

1. 换土蒸发器法: Виткевич 土壤蒸发器用以测定裸间土壤蒸发量的变化,每日换土一次,因此我们简称为换土蒸发器。

蒸发量( $E$ )的计算,是根据两次称重差值( $K$ )为蒸发的重量(克),换算为毫米时,则蒸发量决定于下式:

$$E = \frac{10 \cdot K}{\pi R^2} \quad (1)$$

式中 $E$ 为蒸发量(毫米), $K$ 为两次称重差值(克), $R$ 为圆筒半径, $\pi$ 等于3.1416。

\* 参加此项工作的还有中国农业科学院农业气象研究室巫新民(1957—1958),中国科学院地理研究所卢其尧(1955—1956),戴贵鈞(1957),中央气象局朴京益(1957—1958),金仰高(1958),李杏珍(1957)等;广州、南京、涇阳、三原、黄羊镇和锦州农业气象试验站(1958—1959)也参加试验观测,一并致谢。

2. 波波夫土壤蒸发器法: 该仪器构造和规格见“农业气象学”(Венцкевич 著)。

蒸发量的计算公式:

$$E = (K + Z) - d \quad (2)$$

式中  $E$  为蒸发量(毫米),  $K$  为两次称重差值(克),  $Z$  为降水量(毫米),  $d$  为渗透量(毫米)。

3. ГГИ-500 型土壤蒸发器法: 该仪器构造和规格见“实用农业气象学”(Гольцов 等著)。

蒸发量的计算公式:

$$E = 20 \cdot (W_1 - W_2) + Z - d \quad (3)$$

式中  $E$  为五日内蒸发总量(毫米),  $W_1 - W_2$  为前后两次称重差值(公斤),  $Z$  为降水量(毫米),  $d$  为渗透量(毫米)。

## (二) 水量平衡法

土壤蒸发量可根据土壤水量平衡方程式算出。土壤水量平衡方程式为:

$$W_H + A - B = W_K \quad (4)$$

$W_H$  为某一时期开始时一定土层中水分储藏量,  $W_K$  为某一时期终了时土层中的水分储藏量,  $A$  为水分收入部分,  $B$  为水分支出部分。在土壤水量平衡中的收入部分( $A$ )包括降水量减径流量  $\gamma(1 - \sigma)$ ,  $\sigma$  为径流系数( $\sigma = \frac{f}{\gamma}$ ), 由土壤下层上升的水分( $e$ )和由水汽凝结的水分( $L$ )所组成; 支出部分( $B$ )包括有土壤蒸发( $E$ )、植物蒸腾( $T$ )和渗透进入下层的水分( $U$ )所组成。因此, 土壤水量平衡方程式写为:

$$W_H + [\gamma(1 - \sigma) + L + e] - (E + T + U) = W_K \quad (5)$$

这里所用单位均以毫米表示。

如果在式(5)中, 一些要素略去不计, 式(5)可写为:

$$E = \gamma - f - \frac{\partial W}{\partial t} \quad (6)$$

此处  $\frac{\partial W}{\partial t}$  为土壤水分储藏量在时间上的变化,  $f$  为径流量。

## (三) 热量平衡法

此法是以活动面热量平衡方程为基础的, 用这种方法测定土壤蒸发量的计算公式为:

$$E = \frac{(R - B)\Delta e}{\Delta e + b\Delta t} \quad (7)$$

式中  $R$  为辐射差额(卡/厘米<sup>2</sup>, 分),  $B$  为土壤热通量(因次与  $R$  相同),  $b$  为系数, 等于 0.64, 并决定  $\Delta e$  和  $\Delta t$  的因次,  $\Delta e$  和  $\Delta t$  为  $Z_1$  和  $Z_2$  两高度湿度差和温度差。

## (四) 乱流扩散法

实质在于计算单位时间内通过单位面积的垂直水汽量, 即相当于地面被蒸发的水量。计算公式为:

$$E = aK_1\Delta e \quad (8)$$

式中,  $\Delta e$  为  $Z_1$  和  $Z_2$  两高度湿度差,  $K_1$  为 1 米高度上乱流交换系数,  $a$  为决定于  $\Delta t$  的系

数,等于 2.1,可用下式求得

$$a = \frac{0.41 \epsilon^2 Z_0^2}{(1 - \epsilon)^2 (Z_1^2 - Z_0^2)(Z_2^2 - Z_{0.5}^2)} \quad (9)$$

式中  $\epsilon$  为大气稳定度参数,  $Z_0$  为表面粗糙度参数,  $Z_{0.5}$  为 0.5 米,  $Z_1 = 1$  米,  $Z_2 = 2$  米。

大气稳定度参数  $\epsilon$  表示近地面空气层的热状况,并且与温度差和风速平方之比  $\left(\frac{\Delta t}{u_1^2}\right)$  成比例。

## 二、試驗結果

換土蒸发器在苏联文献中沒有詳細規格。1955 年我們設計出 4 种形式,根据对比观测(表 1),平均离差值 № 1、2 两型均为 0.16 毫米, № 3、4 两型则为 0.15 毫米,即口径大的样本誤差比口径小的样本誤差小。但是口径大的称量誤差却比口径小的小得多。№ 3、4 两型为 0.13 毫米,而 № 1、2 两型为 0.20 毫米,前者比后者小 1/3。所以口径大的蒸发器测得蒸发量要比口径小的稳定可靠,接近自然实际蒸发量的程度增高。

表 1 換土蒸发器規格和样本誤差

代 号	口 径 (厘米)	深 度 (厘米)	平均离差值 (毫米)	称重誤差 (毫米)
1	8	10	0.16	0.20
2	8	20	0.16	0.20
3	10	10	0.15	0.13
4	10	20	0.15	0.13

表 2 資料中,各型換土蒸发器蒸发总量比較,以 3 号最大,1 号最小,相差 3.0 毫米,約占 4 种型式平均总量的 10%。在同属 10 厘米深度下,口径由 8 厘米增至 10 厘米,蒸发总量增加 3.0 毫米。而在 20 厘米下,口径由 8 厘米增至 10 厘米,蒸发总量几乎是一致的。可見,当深度較浅时,口径增大的影响才能表现出来;而深度增加时,则口径的影响可被深度所緩和。

表 2 各型換土蒸发器波波夫蒸发器蒸发总量的比較

代 号	口 径 (厘米)	深 度 (厘米)	土壤蒸发总量 (毫米)	11 天中土壤蒸发总量 (毫米)
1	8	10	29.4	13.2
2	8	20	30.1	13.6
3	10	10	32.4	15.2
4	10	20	30.0	14.4
波波夫蒸发器			—	12.4

从表 2 中还可看出,各型換土蒸发器所得蒸发总量均比波波夫蒸发器数字为高。显然,波波夫蒸发器所得蒸发总量偏差是比較大的,这主要是蒸发器壁与自然土层隔絕影响所致。

1956年我們在冬小麦灌溉地上选用蒸发器法(內筒截面积为500平方厘米,高80厘米)、水面蒸发校正法<sup>1)</sup>和換土蒸发器(3号)进行了比較試驗。4月初到6月下旬稈間土壤蒸发总量差异不大(图1)。蒸发器法所得蒸发总量后期有些偏高,水面蒸发校正法和換土蒸发器測得蒸发总量比較一致,前者为75.2毫米,后者为73.6毫米。两者相差仅为1.6毫米,是微不足道的。而从变化过程来看(表3),也是相当稳定,两者差异多数情况下变动在4—6毫米之間,由此得出結論,換土蒸发器測定麦田稈間土壤蒸发量精度是令人滿意的。

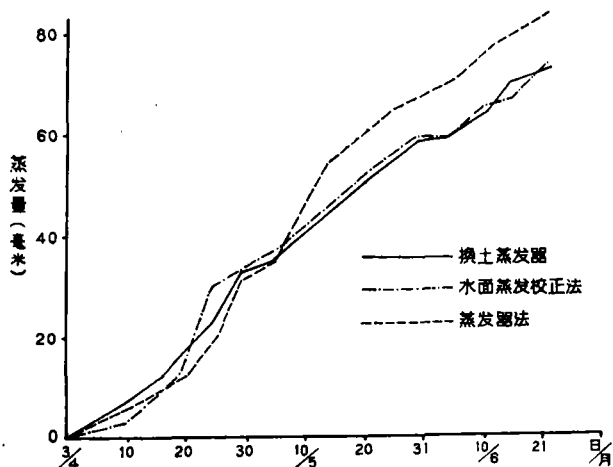


图1. 蒸发器法、水面蒸发校正法和換土蒸发器測定冬小麦灌溉田稈間土壤蒸发累积值的比較(北京)

表3 水面蒸发校正法和換土蒸发器測得稈間土壤蒸发器計值(毫米)

日期 (日/月)	3/4	9	19	25	30	5/5	11	21	26	31	5/6	11	15
水面蒸发校正法	5.21	15.03	33.43	37.17	39.86	46.44	55.89	58.06	62.62	65.36	69.44	71.11	75.28
換土蒸发器	6.23	11.41	22.56	32.22	34.91	41.00	50.80	53.34	58.55	59.47	64.53	69.52	73.59
差值	-1.12	+3.62	+10.87	+4.95	+4.75	+5.44	+5.09	+4.72	+4.07	+5.89	+4.91	+1.59	+1.69

注: 10.87 可能是測量上的誤差。

1957年我們应用热量平衡法、水量平衡法和波波夫蒸发器进行对比試驗。从表4中发现,热量平衡法和水量平衡法所得蒸发量差异甚小,变动过程也相当稳定。而波波夫蒸发器所得蒸发量比前二种方法大为偏低。从5月2日到6月2日計31天的計算結果,如果热量平衡法以100%計,相应水量平衡法为93.8%,波波夫蒸发器为81.1%。从9月20日到11月1日計約40天的观测計算也得类似結果,热量平衡法作为100%計,而水量平衡法和波波夫蒸发器分別为104.2和66.9%。由此得出:热量平衡法和水量平衡

表4 热量平衡法、水量平衡法和波波夫蒸发器測定土壤蒸发量的比較

日期	天 数	热量平衡法 (毫米)	水量平衡法 (毫米)	波波夫蒸发器 (毫米)
5月2日—6月2日	31	37.1	34.8	30.5
	(%)	100	93.8	81.1
9月20日—11月1日	40	54.2	56.5	36.3
	(%)	100	104.2	66.9

1) 水面蒸发器校正法,在一段时间內,从置于株間和裸地上的水面蒸发器中求得蒸发量 $e_1$ 和 $e_2$ 其比值( $\beta = e_1/e_2$ )为 $\beta$ 再乘以同时期裸地土壤蒸发量 $E_n$ ,即得稈間土壤蒸发量( $E_n = \beta \cdot E_n$ )。

法是比较接近的,而波波夫蒸发器在未换土情况下,随时间增长测定蒸发量准确性颇为降低。

从图 2 中看出,水量平衡法和波波夫蒸发器在初期(换土后 1—15 天)两者差异甚小,蒸发量的增长趋势十分一致。随着时间增长,至 18 日以后,波波夫蒸发器逐日蒸发量随土壤水分减少而下降,造成这种现象的主要原因,是金属蒸发器网底的影响。虽然设计网底的目的是为了沟通蒸发器筒内外的水热交换,但实际上却起着阻碍作用,使蒸发器筒内土柱水分储藏量减少,导致蒸发量比自然条件下实际蒸发量偏低。

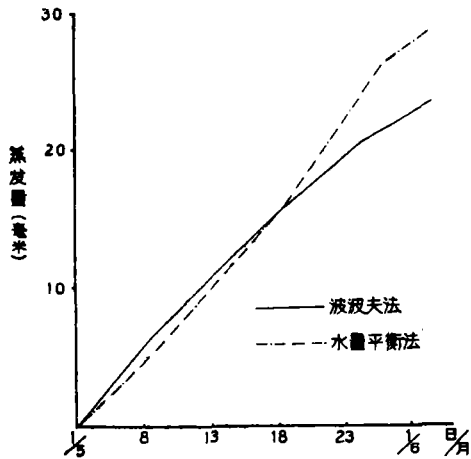


图 2 水量平衡法和波波夫蒸发器测定土壤蒸发量累积值的比较(北京)

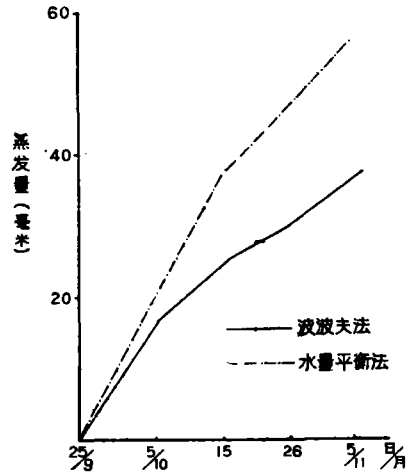


图 3 水量平衡法和波波夫蒸发器在较长时期未换土情况下测定土壤蒸发量累积值的比较(北京)

在北京干旱季节,由于换土时间延长(大于 20 日),产生比自然条件下蒸发量偏低现象更为严重。从图 3 中看出,9 月 25 日至 11 月 5 日期间,两套波波夫蒸发器的平均值与水量平衡法比较,相差极为悬殊,以 40 日总量计算,水量平衡法为 56.5 毫米,而波波夫蒸发器平均仅为 36.3 毫米,两者相差为平均值的 43.2%。如果再考虑波波夫蒸发器的称量误差(每日 5 克,相当 0.1 毫米),则其差值就更大了。由此表明,在较长时期内,特别是在干旱季节和干旱地区,如果不确定蒸发器最适宜的换土时间和次数,测得蒸发量精度将大大降低。

1958 年我们仿制出苏联 ГИИ-500 型蒸发器,同时,在短时期又增设乱流扩散法进行方法比较试验。从观测结果看出(表 5),几种方法差异不大,其中热量平衡法和水量平衡法接近,乱流扩散法稍有偏低,而蒸发器法,尤其是波波夫蒸发器偏低为甚。

表 5 热量平衡法、乱流扩散法、水量平衡法和蒸发器法测定土壤蒸发量的比较

日期	天数	热量平衡法 (毫米)	乱流扩散法 (毫米)	水量平衡法 (毫米)	蒸发器法	
					ГИИ-500	波波夫
5月21日—6月1日	11	13.2	12.6	13.0	12.4	12.6
6月11日—6月21日	10	14.1	—	15.0	13.2	12.0

同样,从北京 1958 年 6 月至 10 月中旬观测资料中看出, ГПИ-500 型和波波夫蒸发器在 15 日更换一次土样情况下,水量平衡法和 ГПИ-500 型蒸发器在整个期间蒸发量的增长趋势十分接近(图 4)。从 106 天蒸发量累积资料中看出,二者相差为 14.3 毫米,如以每 5 日计算,二者相差仅为 0.68 毫米。在考虑每次称量误差时(每次 0.2 毫米),则二者差异程度是较小的。如果在同一时间,以 ГПИ-500 型和波波夫蒸发器相比较,后者远远偏低。从 106 天蒸发量累积计算,二者相差 94.8 毫米,相当整个时期 ГПИ-500 型蒸发量总和的 24.3%。

在广州,南京,陕西涇阳、三原和甘肃黄羊镇农业气象试验站观测中均表现波波夫蒸发器所得蒸发量比 ГПИ-500 型蒸发器偏低的现象。但是,在不同的土壤、气候条件下,差异程度是不同的。现分别讨论如下。

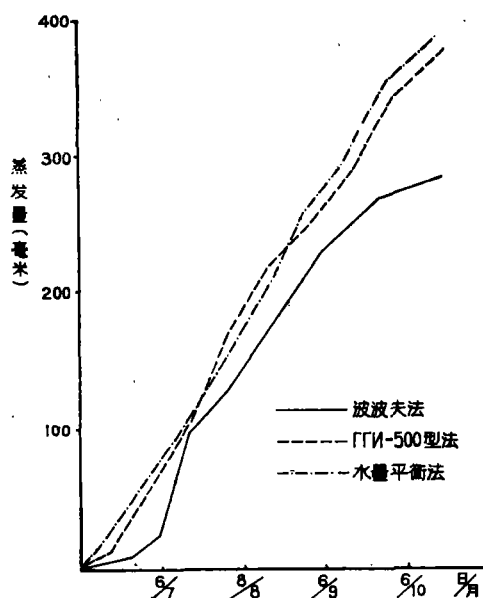


图 4 水量平衡法 ГПИ-500 和波波夫蒸发器测定土壤蒸发量累积值的比较(北京)

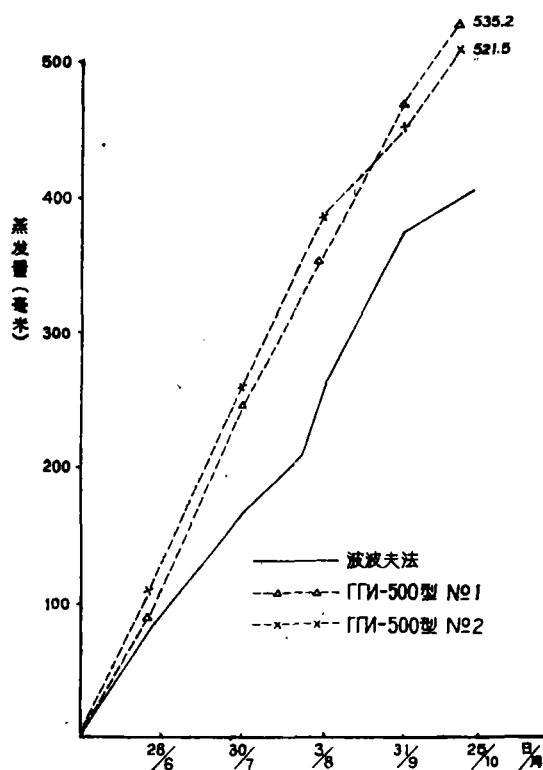


图 5 ГПИ-500 (№1, 2) 和波波夫蒸发器测定土壤蒸发量累积值比较(广州)

1. 广州地区为亚热带气候。气温高,雨量充沛且高度集中在 6—10 月。因此,从 ГПИ-500 型蒸发器所得蒸发量均比北方为高。但是,就广州地区 ГПИ-500 型与波波夫蒸发器所得蒸发量相比较(图 5),二者差异较大,从 6 月 4 日至 10 月 21 日的蒸发量累积过程中,6 月 4 日至 7 月 1 日差异较小,至 7 月 6 日之后,波波夫蒸发器所测得的蒸发量比 ГПИ-500 型蒸发器有显著偏低的趋势。观测期间,ГПИ-500 型蒸发器(蒸发量总和为 521.5 毫米)与波波夫蒸发器(总和 404.3 毫米)相差达 117.2 毫米,即相当 ГПИ-500 型蒸发器所得蒸发量总和的 22.4%。所以,我们认为在多雨条件下,波波夫蒸发器测得蒸发量精度大为降低,故不宜使用。

2. 陕西涇阳、三原和甘肃黄羊镇的试验结果,有相当的一致性。现以涇阳为代表,分

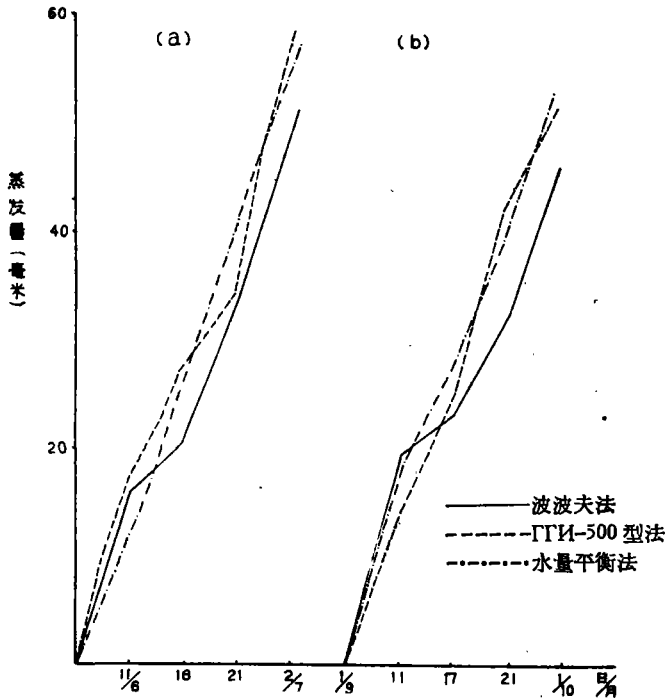


图6 水量平衡法 ГГИ-500 型和波波夫蒸发器测定土壤蒸发量累积值的比较(涇阳)

析如下。从6月1日至7月2日(干旱季节)比较结果看出(图6a),水量平衡法、ГГИ-500型和波波夫蒸发器所得蒸发量之间相差不大,特别是表现在6月21日以前,至7月2日以后,波波夫蒸发器所得蒸发量比水量平衡法和 ГГИ-500型蒸发器有偏低的现象。

图6b中是9月初至10月初(比较湿润季节)的观测结果,波波夫蒸发器所得蒸发量仍然偏低。仅根据9月份一个月的统计,水量平衡法和 ГГИ-500型蒸发器结果相一致,而波波夫蒸发器与水量平衡法和 ГГИ-500型蒸发器比较,月相差分别为6.3和7.3毫米。

从1959年甘肃黄羊镇5—11月的观测结果,亦证实波波夫蒸发器所得蒸发量较其他方法偏低的现象。如果设水量平衡法以100%计,而 ГГИ-500型蒸发器为98.2%,波波夫蒸发器为93.4%。在陕西三原农业气象试验站也观测到这种现象,这进一步证实,我们过去的试验结论<sup>[3]</sup>:即在干旱的气候条件下,使用波波夫蒸发器的最适宜换土时期为15—20日;当换土时间超过20日的情况下,所得蒸发量较自然条件下实际蒸发量有显著偏低。此同苏联 Б. В. 波拉科夫(Полаков)试验结论中所指出的一样,即波波夫蒸发器在炎热条件下,蒸发器筒内土柱要比周围自然条件下相应土层干燥,导致蒸发量的偏低。

3. 锦州气候纯属东北寒温带类,气温低,湿度大,夏季多雨。从1959年土壤蒸发试验中得出,水量平衡法和 ГГИ-500型蒸发器所得结果相近,而波波夫蒸发器所得蒸发量偏高。如果水量平衡法以100%计, ГГИ-500型蒸发器为90.5%,而波波夫蒸发器却为

131%，显然后者是偏高的。分析其原因，主要是夏季多雨，波波夫蒸发器筒内水分渗透受蒸发器网底所阻，不能保持正常的水分交换，不免会产生部分“附加”蒸发（图7）。

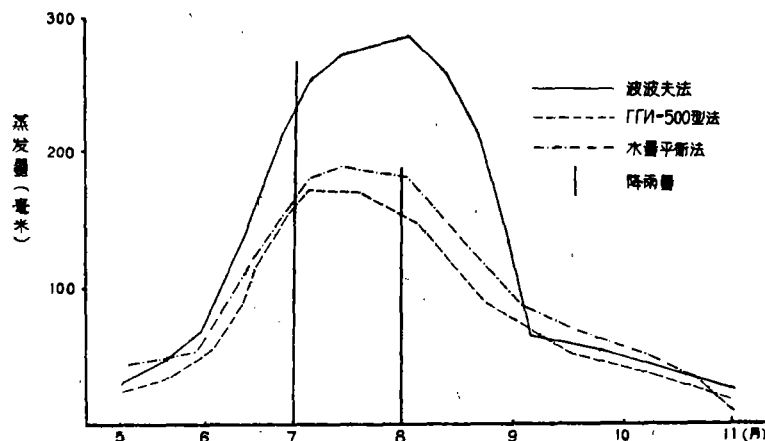


图7 水量平衡法 ГГИ-500 型和波波夫蒸发器测定土壤蒸发量年变化的比较(锦州)

由以上各地区观测试验结果可以得出，水量平衡法和 ГГИ-500 型蒸发器所得蒸发量，二者比较接近，随时间增长变化也相当稳定。所以，不难得出这样的结论，即在不同条件下，使用 ГГИ-500 型蒸发器测得蒸发量的精度都比波波夫蒸发器为高，特别是在处在季节和干旱少雨地区。

### 三、问题讨论

#### (一) 称量蒸发器法

自十九世纪后半期苏联就创造出多浪特 (Дорандт) 式给水蒸发器，在二十世纪为雷卡契夫 (Рыкачев) 蒸发器和波波夫 (Попов) 土壤蒸发器所代替，到 1951 年苏联国立水文研究所 В. Ф. 雷卡契夫<sup>[9]</sup> 在瓦尔达依水文试验站根据多年大量的试验资料分析结果，设计出 ГГИ-500 型 (和 ГГИ-1000 型) 土壤蒸发器，目前在水文气象站和农业气象试验站推广使用。

使用蒸发器法比其他方法具备以下优点：(1) 在测定土壤蒸发量准确度方面，不比其他方法精度低；同时，在观测技术上也比其他方法简单易行。(2) 使用蒸发器法可以测定各种地段和不同土壤气候条件下的蒸发量；同时，也可以分别测定农田植物蒸腾和裸间土壤蒸发量，而其他方法只能测定农田总蒸发量。但是，称量蒸发器法在测定土壤蒸发方面也存在一定缺点，主要是蒸发器筒内土柱与周围自然条件下土壤隔绝，阻碍了正常的水热交换，由此而产生的蒸发器筒内外物理状况的差异，从而影响测定土壤蒸发量的准确性。所以，关于蒸发器法测定土壤蒸发量精度问题，至今还有不同意见<sup>[11,15]</sup>。

1. 热状况：为了查明 ГГИ-500 型蒸发器由于金属壁的影响在蒸发量上的偏差，1958 年 7 月我们在北京进行了蒸发器筒内外土壤温度的观测。

从表 6 中看出：(1) ГГИ-500 型蒸发器筒内与筒外自然条件下土壤温度状况，筒内稍有偏高（主要是在中午），并出现在土壤下层；(2) 由于蒸发器金属壁是良导体，所以白天增温和夜间辐射冷却都比筒外土壤迅速而强烈，因而，造成蒸发器筒内外热状况的差



表 6 ГГИ-500 型蒸发器筒内和自然条件下土层土壤温度的比较

深度 (厘米)	平均土壤温度 (°C)									
	ГГИ-500 型蒸发器筒内					自然条件下土层				
	1时	7时	13时	19时	日平均	1时	7时	13时	19时	日平均
5	23.1	25.0	38.4	29.9	29.1	24.4	23.7	36.7	30.4	28.8
10	23.6	23.3	32.6	30.8	27.6	25.9	24.0	30.7	29.5	27.5
20	25.4	23.8	30.8	30.7	27.7	26.6	23.1	27.9	29.7	26.9
40	26.3	25.2	25.6	26.3	25.9	25.2	24.3	24.1	24.3	24.5

异。其中对 ГГИ-500 型蒸发器而言,热状况差异还属较小。在苏联欧洲南部地区也发现这一重要事实。因此,认为蒸发器金属壁由此而产生热状况的差异并非是影响土壤蒸发量的重要因素。

2. 水分状况: 蒸发器筒内的水分状况,是以降水和土壤的热状况为转移的。在湿润多雨地区,蒸发器土柱经常处于湿润,Л. А. 拉祖莫娃<sup>[16]</sup> (Разумова) 在总结农业气象试验站应用波波夫蒸发器的经验时指出,在过湿和过干燥地区,波波夫蒸发器是不适用的。同样,С. Ф. 菲多罗夫<sup>[17]</sup> (Фодоров) 于 1950 年在砂质弱灰化土壤上进行蒸发试验的结论中指出,深度较短浅的蒸发器筒内土柱的水分状况与自然条件下比较,会发生很大的偏差。金属蒸发器筒内外水分状况差异原因,亦与自然地理区域的土壤、气候条件和仪器结构有密切关系。从我们所得不同地区对波波夫和 ГГИ-500 型蒸发器的观测表明,各地蒸发器在 15 日换土一次的情况下,蒸发器筒内外水分状况有较小的差异。从图 8 和表 7 中的观测资料看出,在北京、陕西涇阳干旱少雨季,ГГИ-500 型蒸发器和自然条件下的水分储藏量差异较小,波波夫蒸发器较大;而在广州地区,相差都是比较大的。这主要是降雨的影响。

同样,在降雨后,也观测到蒸发器筒内土柱表层较自然土层水分储藏量偏高的现象,

表 7 ГГИ-500 型蒸发器筒内和自然条件下水分储藏量的比较

地点	日期	水分储藏量(毫米)			
		深度 (厘米)	$W_1 - W_2$	深度 (厘米)	$W_1 - W_2$
广 州	7月1日		- 3.1		15.2
	16日		- 4.3		-22.0
	8月6日	0-20	-18.3	0-50	-14.1
	17日		-17.7		-42.0
	9月16日		-18.2		-31.5
	10月1日		-10.4		14.3
涇 阳	6月1日		- 4.3		- 8.9
	16日		- 3.6		- 5.8
	7月2日		- 1.9		- 7.8
	30日		6.9		-
	9月1日		8.1		12.0
	17日		0.7		3.0
	10月1日		1.4		0.4

注:  $W_1$ —ГГИ-500 型蒸发器筒内;  $W_2$ —自然条件下。

逐渐影响下层，所以在图 9 中出现曲线变化垂直交错趋势。至于蒸发器内水分差异程度这与地区降雨特点关系密切，例如，在广州雨季 15 天内蒸发器筒内比筒外自然土层少 25.8%；而在陕西涇阳降雨季节，即出现蒸发器筒内水分高于自然土层的相反情况。

制定蒸发器适宜的换土时间和次数，对减小蒸发器筒内外物理状况的差异，导致接近自然条件下实际蒸发量是很重要的。

此外，我国气候特征之一是降雨量多集中在夏季各月，这与苏联不同，所以，波波夫和 ГИ-500 型蒸发器等在雨季使用所存在的问题也是较多的，主要有：

(1) 在降暴雨时，有大量雨水从蒸发器筒内向四周溢出，1958 年我们曾增设测量蒸发器筒内溢出水量的装置<sup>[6]</sup>。

(2) 各地区降雨量过大时。原配置集水器容积小，不适宜我国使用。因此，需根据我国各地降水特点，适当增大集水器容水量的容积。

(3) 蒸发器集水器构造的影响，在集水量微小时，不易测出。

(4) ГИ-500 型蒸发器所配置专门的雨量筒，在多雨季节和地区地面集水，容易抬高，再经风吹便会倾斜，承雨面积改变，造成降水量的偏差。

(5) 换土蒸发器体积小，下缘为死底，在降雨条件下不能使用。

**(二) 水量平衡法**

用水量平衡法测定年平均土壤蒸发量，可以得到令人满意的结果<sup>[10,12,13]</sup>，对于确定短时间内(旬、月)土壤蒸发量精度问题主要取决于地表径流和土壤水分交换对土壤水分储藏量计算误差的影响。在湿润不足地区，增加取土重复次数与取土深度可以提高蒸发量测定准确性。但是，由于反复测定土壤湿度，工作是相当繁重的，而且在测定土壤湿度过程中也会增大系统误差和偶然误差，因此，必须找出最适宜的取土重复次数与深度。根据我们研究(表 8)以取土 5 次重复变异系数最小，为 1.8%；3—4 次重复变异系数范围很接近，在 3.1—2.4% 之间；取土重复 2 次误差增大，达 4.9%。由此认为，应用水量平衡法测定蒸发量取土重复不能少于 3—4 次，这样对湿润不足地区，所得蒸发量精度可达 20% 左右。

关于取土深度问题，我们以 100 和 60 厘米土层，算出蒸发量误差进行比较，结果列入表 9 中。

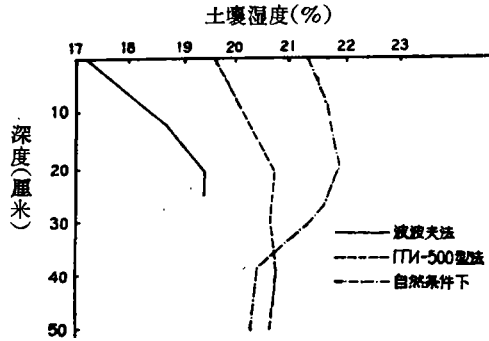


图 8 ГИ-500 型、波波夫蒸发器筒内和自然条件下土壤湿度垂直变化的比较(北京)

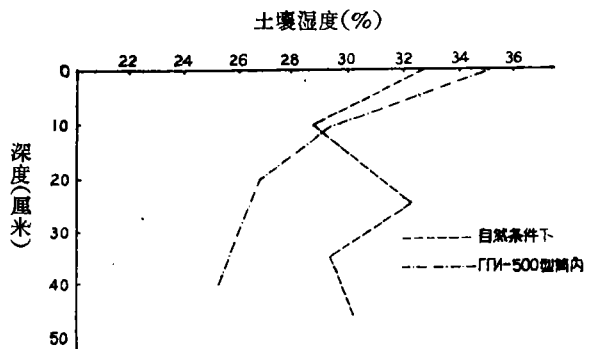


图 9 在降雨后 ГИ-500 型蒸发器筒内和自然条件下土壤湿度的垂直分布(北京)

表 8 取土次数对試驗精度的关系

处理	土壤湿度 % (土层厘米)							土壤含水量 (公方/公頃)	各次平均数 $\bar{x}$	标准差 $S$	变异系数 ( $S/\bar{x}$ ) (%)
	0—5	10	20	30	40	50	60				
重复 1 次	14.3	22.2	16.7	20.5	21.8	22.6	17.9	1808			
重复 2 次	17.0	20.3	21.5	21.1	21.0	24.0	23.8	1994	1901	93.0	4.9
重复 3 次	13.6	20.3	23.1	22.0	21.6	23.5	22.2	1984	1929	60.4	3.1
重复 4 次	15.7	16.8	18.4	16.9	22.7	23.3	23.7	1861	1912	45.9	2.4
重复 5 次	13.8	19.7	20.4	21.1	20.5	21.8	24.0	1912	1912	35.5	1.8

表 9 按不同土层深度計算得到的蒸發总量

处 理	按 1 米土层計算 得到的总蒸發量 (公方/公頃)	按 60 厘米土层計算 得到的总蒸發量 $n$ (公方/公頃)	按 60 厘米計算占 按 100 厘米計算 的百分数
1	4.404	3.702	84
2	3.953	3.505	89
3	3.467	2.954	85
4	2.784	2.317	83
		平均	85

表 9 資料表明,按 60 厘米計算所得蒸發总量占按 1 米土层計算的 85% 左右;这說明土壤水分在 60 厘米以下是有变化的。所以,在計算土壤蒸發量时,必須至少考虑 1 米以下土层的水分資料,否則計算結果会导致較大的錯誤。

此外,在我国降雨过多季节和地区,水量平衡法不宜使用。如果使用,則須考虑地表径流和計算土壤中水分交換等因素。

### (三) 热量平衡法

热量平衡法是以能量不灭定律及符合近地气层水分和热量湍流輸送的机械作用条件为基础的。大家一致認为是最有理論依据的<sup>[11,17,18]</sup>,因为这一計算公式中不包括任何經驗参数,所以,測得結果比其他方法精度为高。据研究热量平衡法比乱流扩散法測量蒸發量的相对誤差小 50—150%<sup>[17]</sup>。在确定 5 日內蒸發量时,將比乱流扩散法精度 (20%) 提高 1.5 倍即 8% 左右。所以,許多研究者認为热量平衡法是最可靠的,目前在土壤蒸發研究中,經常以热量平衡法作为最基本的标准方法。

但是,也正如許多研究者所指出的,热量平衡法需要进行輻射差額、土壤热交換和梯度觀測与計算,显然比其他方法繁重而复杂<sup>[15]</sup>。同时,在測量总時間(时、日)蒸發量时,热量平衡法也会产生較大的偶然誤差。这种偶然誤差决定于  $\Delta t$  与  $\Delta e$  和測量  $R$  与  $B$  中的誤差,据研究,假如式(7)中  $R-B$  的絕對值小于 0.2 卡/厘米<sup>2</sup>·分,而  $\Delta t$  和  $\Delta e$  小于 0.1,那么,測出  $E$  值的平均相对誤差,在中午为 10%,在 9 时和 15 时 20%,而在 6 时和 18 时則达 100%。可見这种方法不适于夜晚使用。此外,也需要精密的仪器設備和一定專門的技术水平。我們認为目前在我国气象台站广泛使用是不确切的,也是不可能的。所以,建議在科学研究单位和具有日射觀測的台站在进行土壤蒸發研究中对比試驗使用为宜。

### (四) 乱流扩散法

M. P. 斯特魯杰尔和 H. M. 魯欣<sup>[17]</sup>分析指出,用乱流扩散法測量每日蒸發量,精度

可达 15—20%，随時間延长和在每日观测时增加观测次数和重复，精度还可提高。互尔达依水文实验站研究<sup>[15,19]</sup>乱流扩散法与小型水力蒸发器\*<sup>[9]</sup>(ГПИ-51)所得蒸发量結果是非常相符的。这种方法测定蒸发量的精度是比较高的。

1955 年，为了減輕資料整理和計算的繁杂，苏联地球物理观象台 (ГГО) 已設計出專門的图表<sup>[11]</sup>，对在水文气象台站使用提供了有利条件。

但是，也应指出，在测定蒸发量时，参数  $\Delta u$ 、 $\Delta t$  和  $\Delta e$  是随時間和空間变化的。測量会产生較大的偶然誤差。同时，在风速小和土壤下垫面不均一以及降雨条件下，乱流扩散法的应用也会受到限制。

总之，在我国各地目前尚无适宜测定土壤蒸发的方法以前，学习国外，特别是学习苏联的方法和經驗是十分必要的。但是，也应指出，由于我国疆域辽阔，地形、土壤和气候条件的复杂性，一些国外方法（特别是經驗方法）和經驗系数，在我国各种条件下未必适用，所以，必須結合我国特点，有計劃的在我国具有代表性地区，建立研究基地，对現有方法加以科学的研究测定，以此来建立适合我国各种不同条件下的方法。

#### 四、結 論

1. 換土蒸发器以 3 号規格測得蒸发量精度較高。在保証三个重复和无降雨条件下，适宜测定裸間土壤蒸发量。对不同处理情况下，比較蒸发速度，亦有相对意义。

2. 在干旱气候条件下，波波夫蒸发器仍有相对的使用意义。虽然測得蒸发量精度較低，但若能掌握适宜的換土時間，在較長時間內測定不同处理（如耕作与未耕作等）相对蒸发速度，仍有比較价值。

3. ГПИ-500 型蒸发器在任何土壤、气候条件下，所得土壤蒸发量精度均比波波夫蒸发器为高。

4. 波波夫蒸发器不适于雨季和多雨过分湿润的地区使用。在比較干旱条件下，換土時間不得超过 20 天，所得蒸发量精度仍比 ГПИ-500 型蒸发器稍有偏低。

5. 波波夫和 ГПИ-500 型蒸发器筒內和自然土层热状况和水分状况观测表明：(1) 白天表土层土壤温度的变化，蒸发器筒內高于自然土层；夜間相反，即蒸发器筒內低于自然土层。对于 ГПИ-500 型蒸发器深层（40 厘米以下）土壤温度比較，白昼均出現蒸发器筒內高于自然土层的現象。(2) 波波夫和 ГПИ-500 型蒸发器筒內土柱和自然土层比較，在湿润多雨季节和地区（特别是降雨后），均出現蒸发器筒內較自然土层水分儲藏量偏高現象。反之，在干旱少雨条件下，出現蒸发器內比自然土层偏低的現象。

6. 在干旱少雨地区应用水量平衡法测定土壤蒸发量，必須保証取土重复在 4 次和深度 1 米以下。在湿润多雨地区和地下水位較高情况下使用水量平衡法，必須要計算地表径流和土壤水分交換等因素，否則，不宜使用。

7. 用热量平衡法和乱流扩散法测定土壤蒸发量精度較高。在有条件情况下，可以作为鉴定其他方法最基本的方法。

\* ГПИ-51 小型水力土壤蒸发器 (гидравлического почвенного испарителя) 面积为 2,000 平方厘米，高度 150 厘米，是一种測量土壤蒸发量精度較高的仪器。

## 参 考 文 献

- [1] 朱崗昆、楊淑章: 气象记录在經濟建設中的应用(II) 中国各地蒸发量的初步研究。气象学报, 26卷, 1—2期, 1955。
- [2] 刘振兴: 論陆地蒸发量的計算。气象学报, 27卷, 4期, 1956。
- [3] 信迺詮: 用苏联波波夫土壤蒸发器观测试驗的初步总结。土壤通报, 1959, 第1期。
- [4] 中国农科院农业气象研究室: 用苏联 ГГИ-500 型土壤蒸发器观测试驗的初步总结(全国农业气象會議文件, 1959)。
- [5] 中央气象科学研究所: 热量平衡观测方法。1957。
- [6] 信迺詮、戴貴均、李杏珍: 对“波波夫土壤蒸发器的設計”一文的意見。黄河建設, 1958, 第3期。
- [7] Будыко М. И.: Испарение в естественных условиях. л., 1948。
- [8] Пушкарев В. Ф.: Исследование методов наблюдений над испарением с почвы. Труды гги, Вып. 45(99), 1954。
- [9] Урываев В. А.: Экспериментальные гидрологические исследования на Валдае. Гидрометеоздат. л., 1953。
- [10] Константинов А. Р.: Сопоставление различных методов определения испарения. Труды гги, Вып. 45(99), 1954。
- [11] Будыко М. И. и Тимофеев М. П.: О методах определения испарения. Метеорология и гидрология, № 9, 1952。
- [12] Фялишова А. К.: Определение испарения с почвы методом водного баланса. Труды гги, Вып. 48(102), 1955。
- [13] Смирнов В. А.: Опыт определения запасов влаги в почве и ее расхода на орошаемом поле яровой пшеницы по наземным метеорологическим наблюдениям. Труды гги, Вып. 48(102), 1955。
- [14] Производство градиентных наблюдений и расчет составляющих теплового баланса. Методические указания гидрометеорологическим станциям, № 5 гго гидрометеоздат, л. 1954。
- [15] Константинов А. Р.: Основы методики расчета испарения в естественных условиях. Труды цип, Вып. 48(102), 1955。
- [16] Разумова Л. А.: Основные итоги агрогидрологических исследований гидрометслужбы. Труды цип, Вып. 18(45), 1949。
- [17] Струзер Л. Р. и Русия Н. П.: Сравнение различных методов определения с сельскохозяйственных полей. Труды гги, Вып. 57(111), 1956。
- [18] Константинов А. Р.: Обоснование методики расчета испарения по данным метеорологических станций. Труды гги, Вып. 54(108)。
- [19] Константинов А. Р. и Пушкарев В. Ф.: Междудеятельственный комитет по проведению международного геофизического года при президиуме академии наук СССР, “Некоторые проблемы метеорологии”, № 1, 1960。
- [20] Penman, H. L.: The physical bases of irrigation control. Rpt, 13th Int. Hort. Congr., 2, 1953。
- [21] Penman, H. L.: Evaporation an introductory survey. Neth. Journ. Agr. Sci., 4.1, 1956。
- [22] Turc, I.: Баланс почвенной влаги. 1958. Гидрометеорологическое издательство。

## ИЗУЧЕНИЕ МЕТОДОВ НАБЛЮДЕНИЙ НАД ИСПАРЕНИЕМ С ПОЧВЫ

Щин Лай-цюань

(Агрометеорологическая лаборатория Академии с.-х. наук Китая)

(Резюме)

В статье коротко изложены методы определения испарения с почвы: 1) весовой испарительный метод, 2) метод водного баланса, 3) метод турбулентной диффузии, 4) метод теплового баланса. Кроме того, приведены результаты опытов с помощью испарителей Попова, Виткевича и “ГГИ-500”。