第14卷 第3期 南京气象学院学报 Vol.14 No.3
1991年9月 Journal of Nanjing Institute of Meteorology Sep. 1991

南京地区农田蒸散初步研究*

陈文军 周 英
（南京气象学院）

摘要 本文首先讨论自动供水蒸散器在南京地区的观测使用情况及存在问题，然后以实测的农田蒸散值为依据，比较了几种目前常用的农田蒸散计算方法在南京地区的适用性。最后确定冬小麦、赤豆等农作物在南京地区的农田需水量及作物系数。

关键词 实测，农田蒸散

农田蒸散是农业气象学研究的一项重要课题。同时，在地理、水文和农业等部门也受到广泛重视。农田蒸散的确定主要有器测和计算两种。由于器测对仪器的要求很高，故目前仍以计算法为主[1,2]。但是，不管计算方法的原理如何详尽合理，其结果还须以实测值作为检验标准。只有以实测资料为基础，才能不断改进和完善计算方法。因此，我们于1987年初从内蒙古气象局科研所引进两台自动供水蒸散器，测定农田蒸散。本文利用两年度的实测资料，对各种计算方法在南京地区的适用性作出评价，并给出冬小麦、赤豆等作物在南京地区的作物需水量和作物系数。

1 试验设计与资料来源

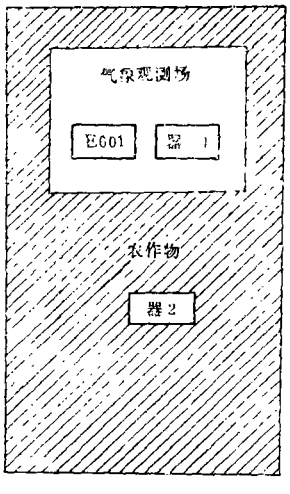

图1 试验场地设置示意图

本试验观测设在南京气象学院农业气象试验站，场地设置见图1。观测作物与草地的农田蒸散和水面蒸发。其中，器1进行草地观测，器2进行作物地观测，E601为水面蒸发测定仪器。观测时段为1987年6月至1989年5月，作物为冬小麦和赤豆，其种植时段见表1。文中用到的常规气象资料由农业气象试验站提供。

表1 观测作物种植时段

作物	赤豆	冬小麦
种植	1987.6—10	1987.11—1988.6
制度	1988.7—10	1988.11—1989.5

收稿日期：1989—12—25

*本研究在欧阳海教授的指导下完成，郑礼忠、童宏良、李旭辉、张耀军、夏国忠等同志参加了观测工作

2 自动供水蒸散器原理及在南京地区的使用情况与存在问题

自动供水蒸散器是在原自动供水土壤蒸发器[3]的基础上改造而成。原蒸发器根据马利奥特原理设计而成。该仪器要求量水筒严格密封，稍有漏气即会影响观测精度。另外，水从量水筒进入加水器时，由于水气交换，供水也会受到影响。自动供水蒸散器将原蒸发器的气压平衡控制改为浮子控制，从而较好地克服了原蒸发器的不足。自动供水蒸散器主要有四部分组成：蒸散器、加水器、溢流器和量水筒。其测定原理为：当蒸散器内水分蒸散时，加水器中水位下降，与加水器连通的浮子室内浮子下降，浮子针与浮子室顶端进水孔分离，供水开始，加水器内水位上升。当加水器内水位升至浮子针堵塞进水孔时，则停止供水。供水量可由水位管读得。当降水时，水分通过蒸散器进入加水器，加水器内的水上升，浮子针顶住进水孔，供水停止。多余水分则由溢流管进入溢流筒，溢流量可用量筒测得。蒸散量E为

$$E = A + X - Q \pm \Delta W \qquad (1)$$

式中，A为供水量，X为降水量，Q为溢流量，ΔW为蒸散器内土壤蓄水量的变化，减小时ΔW为正，增加则为负。若每日定时观测，ΔW＝0，

则

$$E = A + X - Q \qquad (2)$$

根据南京地区两年来的观测使用，效果尚好，观测结果见表2。

表2 实测农田蒸散月值

年	1987			1988							1989	
月	8	9	11	2	3	5	7	8	9	11	3	4
实测值（mm）	101.4	117.8	18.5	19.7	68.0	98.3	128.4	116.6	115.2	20.1	53.5	132.6

在观测中也存在着不少问题，例如：（1）由于自动供水蒸散器去掉了原蒸发器中的竖井，遇到降水（特别是较大降水）时，多余水分就不能及时溢流。如1987年7月18日下午暴雨倾盆，日雨量达129.9mm，蒸散器内多余水分来不及通过下供水筒流入溢流筒而外溢，观测精度受到严重影响。（2）仪器灵敏度较差。由于没有竖井，蒸散器钢板上下层水分交换不畅，特别是观测后期，土壤颗粒等杂质逐渐进入，将棕片与钢板孔隙堵塞，严重时甚至会将溢流管阻塞，造成雨后蒸散器内土壤长时间过饱和，以至在连续晴天气温较高的情况下，观测不到蒸散量，如1988年5月（见表3）。这样，水分供给主要靠降水，由降水量与蒸散和溢流之间取得平衡，仪器灵敏度差。短时段（如日）农田蒸散值不能代表实际值。而且在降水较多的暖季农田蒸散测值偏大，降水较少的冬季偏小。因此该仪器在干燥少雨的内蒙古地区使用效果较好，而在潮湿多雨的南京地区使用则存在不少问题。（3）该仪器的浮子室框架由生铁铸成，易碎裂，且无法用电焊焊接或502胶水粘合。若无备份，就会造成观测中断。因此最好改用不锈钢或铝来制作。另外，浮子针易生水垢，导致对进水孔阻塞不严，影响观测精度，故每隔一段时间要取

下，磨光。

表3　1988年5月中、下旬降水等项实测值

日　期	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21
降水量(mm)	1.5	/	/	/	/	/	/	/	19.1	/	5.1
溢流量(mm)	/	/	/	/	/	/	/	/	/	13.3	/
蒸散量(mm)	1.5	0.0	0.1	0.0	0.0	0.1	0.0	0.1	78.6	−13.3	5.1
气　温(°C)	17.5	19.2	18.0	18.9	21.7	23.4	25.0	24.7	22.2	19.6	17.9
日　期	22	23	24	25	26	27	28	29	30	31	
降水量(mm)	5.0	/	/	/	/	/	/	/	/	16.3	
溢流量(mm)	1.0	/	/	/	/	/	/	/	/	/	
蒸散量(mm)	4.0	0.0	0.0	0.0	0.1	0.0	0.0	0.0	0.0	16.3	
气　温(°C)	16.4	20.4	22.1	21.7	19.2	21.9	20.7	22.5	23.1	21.2	

对于以上问题，我们作了一些改进，于1989年3月15日开始，在降水时段用伞或篷布将蒸散器覆盖起来，雨后去掉。这样观测资料使用效果较好。而在此之前的资料其逐日观测值显然不能代表实际的农田蒸散，而对于较长时段，溢流虽有较明显的滞后性，但绝大部分都包含在时段当中，降水加供水与蒸散加溢流基本上能达到平衡。因此，按月或按作物生育期来划分所累积的农田蒸散值是基本可信的。当然，在夏秋多雨时节，观测值不免偏大，而长期无雨或少雨的冬春季节则偏小。为此，采用前期（此时仪器埋下不久，钢板上下水分交换较为通畅）的降水与溢流资料，求得它们之间的相关关系

$$\begin{cases} Q = 0.91 \times R - 7.6 & R > 8.3\,\text{mm} \\ Q = 0 & R \leqslant 8.3\,\text{mm} \end{cases}$$

$$r = 0.9838, \qquad n = 16$$

其中R为一次连续性降水过程（间隔不超过1天）的总降水量，Q为此次降水过程开始日至下次降水过程开始前一日的总溢流量，r为相关系数，n为样本数。

利用上式，即可对观测时段后期（主要是1988年）的观测资料进行修正，表2即为修正后的实测农田蒸散月值。

3　几种常用农田蒸散计算方法的计算结果与实测值的比较研究

目前，农田蒸散计算方法一般是先算大气蒸发力或水面蒸发力E_0，然后乘上作物系数即得农田蒸散值。常用的大气蒸发力计算方法有：

（1）　桑斯威特方法[4]

桑氏根据美国中西部半干旱地区多年田间试验结果得出用温度计算可能蒸散的经验公式

$$E_0=1.6\left(\frac{10T}{I}\right)^a$$

其中 $a=6.75\times10^{-7}I^3-7.71\times10^{-5}I^2+1.79\times10^{-2}I+0.49$

$$I=\sum_{i=1}^{12}\left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514}$$

式中E_0、T、I分别为蒸发力（mm）、月平均气温（℃）及热指数。

(2) 积温法

$E_0=0.10\Sigma T_{\geq10^\circ C}$，式中$\Sigma T_{\geq10^\circ C}$为气温大于、等于10℃的活动积温。系数0.10是根据苏联的情况得出的。张宝堃和朱岗昆等根据我国实际情况，将谢良尼诺夫蒸发力公式改为$E_0=0.16\ \Sigma T_{\geq10^\circ C}$。

(3) 布迪科法[5]

布迪科认为水面或潮湿表面的蒸发与水汽压饱和差成正比，即

$E_0=\rho D(q_s-q)=\rho' D(e_s-e)=26.51(e_s-e)$

这里D为外扩散系数（一般取0.63），q_s、e_s分别为蒸发面温度下的饱和比湿和饱和水汽压，q、e分别为2 m高处的实际比湿和实际水汽压。

(4) 彭曼方法[6]

$$E_0=\frac{\Delta\cdot R_n+\nu\cdot E_a}{\Delta+\nu}$$

式中R_n为辐射平衡（mm/d），E_a为干燥力（mm/d），Δ为温度-饱和水汽压曲线的斜率（mm/℃），ν为干湿球常数（mm/℃）。

陶祖文根据我国大型蒸发池和漂浮蒸发器的观测资料，得到上式中各项的经验表达式为

$$R_n=R_a(1-\alpha)-I$$

$$R_a=R_0[1+0.098(\lg h-2)][0.202+0.643\frac{n}{N'}]$$

$$I=s\sigma T_a^4(0.39-0.058\sqrt{e_d})(0.10+0.90\frac{n}{N})$$

式中R_a为总辐射（mm/d），α为反射率，土壤与植被α一般取0.20，I为有效辐射（mm/d），R_0为天文辐射（mm/d），h为拔海高度（m），n为日照时数（h），N′为实际最大可能日照时数（h），N为可能日照时数，s为辐射表面的灰体辐射系数取为1，σ为斯蒂芬-玻尔兹曼常数，T_a为气温（K），e_d为水汽压（hPa）。

$$E_a=0.16(1+0.51u_2)(e_s-e_d)$$

式中u_2为2m高处的风速(m/s)，e_s为饱和水汽压（hPa），e_d为实际水汽压(hPa)。

$$\Delta=\frac{e_a}{273.5+t_a}\left(\frac{6463}{273+t_a}-3.927\right)$$

式中 t_a为气温（℃），e_a为t_a时的饱和水汽压，$\nu=\frac{c_p\cdot p}{0.622\cdot L}$，$c_p$为空气定压比热，L为水汽凝结潜热，p为气压（hPa）。

利用上述公式，即可求得与农田蒸散实测月值相对应时段的大气蒸发力E_0，再乘上作物系数[7]，即可得各种常用方法计算的农田蒸散值（表4）。

表4　几种常用方法的计算结果与实测值

（7、8、9三个月的E值，用大豆的作物系数代替赤豆的而求得）

方法 \ E(mm) 年 月	1987			1988							1989	
	8	9	11	2	3	5	7	8	9	11	3	4
桑氏法	138.2	124.1	25.6	3.1	18.0	103.0	118.3	130.0	114.2	24.1	/	/
积温法(0.10)	82.3	81.5	23.0	1.0	8.9	75.2	67.2	79.7	77.5	19.1	18.6	53.9
积温法(0.16)	132.2	130.4	37.7	1.6	14.1	121.3	107.6	127.6	124.0	30.5	29.8	86.3
布氏法	97.1	117.5	24.1	29.8	52.4	105.4	101.5	170.7	82.9	69.3	66.7	75.2
彭曼法	95.8	95.8	21.3	17.6	55.8	102.8	93.3	113.2	79.7	26.3	63.4	75.2
实测值	101.4	117.8	18.5	19.7	68.6	93.3	128.4	116.6	115.5	20.1	53.5	102.6

各种方法计算结果与实测值的相对误差如表5。

表5　几种常用方法计算结果的相对误差

方法 \ 相对误差 年 月	1987			1988							1989		平均相对误差(%)	最大相对误差(%)
	8	9	11	2	3	5	7	8	9	11	3	4		
桑氏法	36.1	5.3	38.4	84.3	73.6	4.9	7.9	11.5	1.1	19.9	/	/	23.3	84.3
积温法(0.10)	18.5	30.8	27.5	94.9	87.0	23.5	47.5	31.6	32.8	4.9	65.2	47.4	42.5	94.9
积温法(0.16)	30.3	10.6	103.8	91.9	79.4	22.4	16.2	9.4	7.4	51.7	44.3	15.6	40.3	103.8
布氏法	4.2	0.3	30.3	51.3	23.6	7.2	20.9	46.4	28.3	244.7	28.4	26.7	42.7	244.7
彭曼法	5.5	18.7	16.7	10.6	18.7	4.6	22.7	2.9	31.0	30.2	18.5	28.1	17.3	31.0

由表5可知，几种常用方法中以彭曼法的平均相对误差和最大相对误差最小。其中各个月份又有所不同。一般来说，在11—4月份，各种计算方法的相对误差均较大（表6），特别是桑氏法、积温法和布氏法，彭曼法较之其它方法精度要高得多，故在11—4月份以使用彭曼法为好。在5—9月份，除积温法（0.10）的相对误差大于30%外，其它各法均小于20%。这说明积温法在南京地区采用0.16的系数较为合适，同时也表明在5—9月份南京地区用各种计算方法均可。不过，若是进行全年各月农田蒸散的计算，为统一起见，我们建议采用彭曼法为好。

表6 各时段相对误差比较

平均相对误差% 时段 / 方法	11—4月	5—9月
桑氏法	54.1	11.1
积温法(0.10)	54.5	30.8
积温法(0.16)	64.5	16.1
布氏法	67.5	17.9
彭曼法	20.3	14.2

4 冬小麦、赤豆等在南京地区的农田需水量及作物系数

根据实测资料，冬小麦、赤豆等作物各生育期及全生育期的农田需水量与作物系数即可求得（表7、8）。

表7 冬小麦农田需水量与作物系数

生育期	冬前	返青—拔节	拔节—抽穗	抽穗—成熟	全生育期
实测 E	23.6	33.0	61.1	200.9	318.6
计算 E_0	35.9	49.0	48.0	180.8	313.7
K	0.66	0.67	1.27	1.11	1.02
K*	0.83	1.01	1.24	1.19	1.00

表8 赤豆的农田需水量及作物系数

生育期	播种—开花	开花—结荚	结荚—成熟	全生育期
实测 E	199.1	38.7	173.8	412.5
计算 E_0	213.8	36.3	125.8	375.9
K	0.93	1.07	1.38	1.09
K*	0.73	1.09	1.19	0.96

表中E即为作物的农田需水量，E_0为大气蒸发力(用彭曼公式计算而得)，$K=E/E_0$为作物系数。K*是王道龙根据北京市东北旺农场试验观测结果求得的作物系数[7]。由表可见，冬小麦除拔节—抽穗外，K*均大于K，而赤豆除开花—结荚外，K*均小于K。这到底是因气候差异、作物生长状况不同等客观因素所致，还是由于仪器灵敏度差引起多雨时段测值偏大、少雨时段测值偏小等观测误差所致，尚有待进一步研究。用求得的作物系数K可以使前述各种计算方法的结果相对误差减小（表9）。可见，K值至少在总体水平上更能反映南京地区的作物需水特性。

表 9　改用K计算农田蒸散的相对误差

项目 / 方法	11—4 月份平均相对误差（%）	5—9 月份平均相对误差（%）	全年平均相对误差
桑氏法	44.3	17.3	28.1
积温法(0.16)	42.7	15.2	34.8
布氏法	44.3	14.7	28.8
彭曼法	20.8	6.8	13.8

5　结论与讨论

1.自动供水蒸散器改为浮子控制是一大进步，但由于去掉了竖井，降低了仪器的灵敏度，对于潮湿多雨的南京地区不太适宜。作为一种弥补办法，可用伞或篷布遮雨。

2.几种方法计算农田蒸散的结果表明：在南京地区采用积温法其系数取0.16为宜；寒冷季节各种方法的计算误差均较大，其中彭曼法为最小，温暖季节则各种方法的计算误差均较小，尤其是彭曼法。因此在南京地区彭曼法最适用。

3.文中所求得的作物系数可以提高各种计算方法所得结果的精度，说明K值至少在总体水平上比K*更能反映南京地区的作物需水特性。

4.文献[7]中大豆作物系数直接用于赤豆，必然存在问题，这可能是造成表 8 中K和K*差别较大的原因之一，有待改进。

总之，三年的试验研究表明，若能改进仪器灵敏度，采用自动供水蒸散器观测蒸散，不失为一种简便可行的研究方法。为在全国各不同气候区开展农田蒸散研究提供有利条件，它可以对不同作物和作物不同品种，以及各个年型的作物进行系统观测，得到有广泛可比性的作物需水量和作物系数资料，从而更好地指导农业生产，提高作物产量。

参　考　文　献

1　唐登银等.地理研究，1984；3（3）：84—97

2　程天文等.地理集刊，1980；12：74—83.

3　王积强.土壤，1982；14（4）：146—148

4　［日］坪井八十二等，侯宏森等译.新编农业气象手册，农业出版社，19[illegible]

5　郑飞思等.农业气象科学，1983；3（1）：51—54

6　阎祖文等.气象学报，1979；37（4）：79—87

7　王道龙.北京农业大学学报，1986；12（2）：211—217

A PRELIMINARY STUDY ON EVAPOTRANSPIRATION (ET) OF FARMLAND IN THE AREA OF NANJING

Chen Wenjun, Zhou Ying
(Nanjing Institute of Meteorology)

Abstract Discussion is first made of the application of automatic water supply ET equipment in the area of Nanjing and the problems thus arising. Then, based on farmland ET data, comparison is made between several current calculation methods in applicability for farmland ET. Finally, water requirement and crop coefficients for winter wheat, red bean, etc. are determined.

Key words actual measurement, farmland evapotranspiration