

水庫表面蒸發标准

A. П. 勃拉斯拉夫斯基 著
З. А. 維庫里納

張寶望

1958/7/21

水利电力出版社

水庫表面蒸發标准

A. П. 勃拉斯拉夫斯基 著
З. А. 維庫里納

电力工业部水力发电建設总局專家工作室 譯

水利电力出版社

1958年5月

本書是蘇聯國立水文研究所在制定水庫水面蒸發各因素的計算方法方面多年研究工作的總結。書中論述了水庫水文氣象情況各因素的計算方法，這些計算法可以根據水體的水量平衡和形態特征來估計蒸發情況。書中列出了水庫的總蒸發量圖和一些表、諾謨圖等，採用它們可以簡化計算過程。

本書論述了計算蒸發的公式，風速，空氣的濕度及溫度，水溫，按所制定的方法計算蒸發量的精確度的評價，水庫表面的蒸發，水生植物對水面蒸發的影響，計算蒸發量的一些建議和計算的實例等。

本書可供水庫設計和管理人員參考。

水庫表面蒸發標準

原 書 名	НОРМЫ ИСПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ
原 著 者	А. П. БРАСЛАВСКИЙ, З. А. ВИНУЛИНА
原 出 版 處	ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
原出版年份	1954
譯 者	電力工業部水力發電建設總局專家工作室
出 版 者	水利電力出版社（北京西郊科學路二里溝） 北京市書刊出版業營業許可証出字第105號
印 刷 者	水利電力出版社印刷廠（北京西城成方街13號）
發 行 者	新華書店

185 千字 787×1092 1/25 開 84/5 印張
1958年5月第一版 北京第一次印刷 印數 1—1,700
統一書號：15143·158 定價：(10)1.30元

水庫表面蒸發标准

A. П. 勃拉斯拉夫斯基 著
З. А. 維庫里納

电力工业部水力发电建設总局專家工作室 譯

水利电力出版社

1958年5月

本書是蘇聯國立水文研究所在制定水庫水面蒸发各因素的計算方法方面多年研究工作的總結。書中論述了水庫水文气象情况各因素的計算方法，这些計算法可以根据水体的水量平衡和形态特征来估計蒸发情况。書中列出了水庫的总蒸发量图和一些表、諾謨图等，采用它們可以簡化計算过程。

本書論述了計算蒸发的公式，风速，空气的湿度及溫度，水溫，按所制定的方法計算蒸发量的精确度的評價，水庫表面的蒸发，水生植物对水面蒸发的影响，計算蒸发量的一些建議和計算的实例等。

本書可供水庫設計和管理人員参考。

水庫表面蒸发标准

原 書 名	НОРМЫ КОПАРЕНИЯ С ПОВЕРХНОСТИ ВОДОХРАНИЛИЩ
原 著 者	А. П. БРАСЛАВСКИЙ, В. А. ВИНУЛИНА
原 出 版 处	ГИДРОМЕТЕОРОЛОГИЧЕСКОЕ ИЗДАТЕЛЬСТВО
原出版年份	1954
譯 者	電力工業部水力发电建設总局專家工作室
出 版 者	水利电力出版社（北京西郊科学路二里溝） 北京市書刊出版业營業許可証出字第 105 号
印 刷 者	水利电力出版社印刷厂（北京西城成方街 13 号）
发 行 者	新华書店

185 千字 787×1092 1/25 开 8 4/5 印張

1958年5月第一版 北京第一次印刷 印数 1—1,700

統一書号：15143·158 定价：(10)1.30元

序

苏联共产党第十九次代表大会关于1951~1955年苏联发展第五个五年计划的指示中提出了进一步发展水利建设事业。规定修建大量的人造蓄水池和利用一些大湖泊作为水库。在苏联各地修建着的水库，其规模有很大的差别；这些水库的面积随库盆形状，注入水库河流的水量和径流调节程度的不同有很大的变化，由几十和几百平方公里到几千平方公里。除了大型和中型水库之外，在苏联干旱地区还修建为数很多的小型水库（蓄水池），其总面积达几十和几百公顷。

在设计和管理水库时，水文资料中必须有表明水体非生产性水量损失的蒸发量资料。B. K. 达维道夫最先制定了最通用的小水体表面蒸发量算法，后来 B. Д. 查伊科夫又进一步改进了这个算法，B. Д. 查伊科夫对苏联境内小水体的蒸发量提出了一些建议。但是，上述作者们所制定的算法不能直接移用到大型水库，因为大型水库的水文气象情况与小水体有很大区别。在这种情况下，计算某一水体的蒸发量时，应考虑该水体的形态和水文特征（深度的分布，流动性等），并事先计算出决定水面蒸发量的各个因素（水温，空气湿度和水面上的风速）。到目前为止，由于资料缺乏，这些水文气象情况的因素还研究的不够，因此某些大水库蒸发量算法或是对于某一地区来说有局限性，或是缺乏足够的根据。在战后时期内，在湖泊和大水库上广泛地开展了水文气象研究工作，这项研究工作是由国立水文研究所，水文气象局的气象台和湖泊测站，以及一些设计机构进行的。这项研究工作所取得的新资料，同苏联科学家们对于蒸发过程，热量平衡和下垫面影响下气团的变化所进行的理论研究一样，可以使我們更加有根据地来解决现有的和设计中的水库的蒸发量计算问题。

本书中叙述了适用于不同规模水体条件下的风速，空气湿度和水

溫的計算法，推荐了蒸发量的計算公式，給出了位于苏联欧洲部分平原地区，中亞細亞和西西伯利亞地区的中型水庫的蒸发量图，并提出了实际应用所制定的方法的建議。

技术科学副博士 A.П. 勃拉斯拉夫斯基制定了水温計算法，风速計算法是由地理科学副博士 З.А. 維庫里納制定的，本書的其余各章是他們共同編写的。国立水文研究所湖泊和水庫科和国立水文研究所总实验站湖泊測站的工作人員們也参加了这项工作。

目 錄

第一章	計算蒸發的公式.....	7
第二章	風速.....	23
第三章	空氣的濕度及溫度.....	38
第四章	水溫.....	64
第五章	按所制定的方法計算蒸發量的精確度的評價.....	123
第六章	水庫表面蒸發.....	129
第七章	水生植物對水面蒸發的影響.....	144
第八章	按上述方法計算蒸發量的一些建議.....	151
第九章	計算的實例.....	159
附錄		171
參考書目		221



第一章

計算蒸發的公式

原始資料的分析，計算公式

為了確定蒸發的水量，現在提出了許多公式，其中大多數公式的結構如下：

$$E = (e_0 - e_z) f(w), \quad (1)$$

式中 e_0 ——在一定水溫下的飽和水汽張力；

e_z ——在水面上 z 高度上的空氣水汽張力；

$f(w)$ ——風的某一函數，即所謂“風的因子”。

公式(1)中的系數值是用經驗方法求得，也就是根據面積為20平方公尺和100平方公尺的蒸發池的觀測資料來求得。在不同作者的公式中，這些系數相互間相差很大，這主要是因為在蒸發池內觀測條件不同，在這種情況下水面以上氣象要素的觀測高度起着特別重大的作用。

儘管在現有公式[22, 53]中有所差別，但是，在同一時間內根據許多公式對某些水体所作的蒸發量計算，其結果是互相接近的，這就證明：對蒸發量與決定蒸發量因子之間的研究一般說來是十分令人滿意的。

應該認為，B. Д. 查伊科夫的公式[22]是現在所有經驗關係式中最好的公式；這個公式是根據其他作者所利用的觀測資料和1940～1948年間在蘇聯各地區蒸發站上所積累的補充材料得出來的。

B. Д. 查伊科夫公式的形式如下：

$$E = 0.15n(1 + 0.72\sqrt{w_{200}})(e_0 - e_{200}), \quad (2)$$

式中 E ——蒸發層厚度（以公厘計）；

- w_{200} ——在 200 公分高处的风速（以公尺/秒計）；
 e_0 ——該水温下的最大水汽張力（以毫巴計）；
 e_{200} ——在 200 公分高度上的空气湿度（以毫巴計）；
 n ——一个月中的日数。

目前在已扩大了蒸发站網中积累了补充的观测資料，在最近几年內也从过去曾进行过观测的各蒸发站上获得了新的資料。我們搜集这些資料和以往各年的观测資料却是为了校对計算公式的数值。

在1948年后的最近几年，各蒸发站的观测和过去几年的研究方法不同，它是按統一的方法进行的，特别是风速和空气湿度是在固定的高度上观测的，也就是在 0.2 和 2 公尺的高度上进行观测。后者有着重要的意义，因为在这种情况下就不須要將气象要素換算为該公式所規定的高度了。許多研究者〔15, 52, 53〕曾經指出，如果采用直接貼近水面处的气象要素的观测資料作为原始資料，那么蒸发和影响蒸发的条件之間的相关关系就更加密切了。但是，这种观测仅在有限的測站上进行过，甚至最近几年內在20公分高处进行观测所得到的較完整的資料也只能說明在水面以上該高度处的空气湿度，因为风速是在地面以上同样高处测量的。鉴于以后在空气湿度和风速的資料化为20公分高度时須要將这些要素換算为上述的高度（因为在控制气象站網上的标准观测是在較大的高度上进行的），所以利用 2 公尺高度上的观测資料作为原始資料是合理的，何况利用我們所制訂的方法可以确定的水面以上的气象要素的数值正是 2 公尺高度上的数值。

为了繪制蒸发同其支配因子之間的相关关系图，我們利用了 В. Д. 查伊科夫著作〔20〕中所引述的蒸发站观测資料和最近几年的研究成果。

由于在1936~1946年間各蒸发站主要是用压板测风器来观测风速，只在个别情况下才在一公尺的高度和更低的高度上进行观测，В. Д. 查伊科夫曾將风速資料換算到 2 公尺的高度，同时，在大多数情况下，为了这一目的可采用第 2 章內的方程式（5）进行計算。利用这个方程式，我們曾把所有各測站用压板测风器測得的风速資料換算到 2 公尺的高速。只有奥泽尔卡（Озерка）和福尔特·柯林茲（Форт.

Колинз)在美国],两个蒸发站例外,在这两个测站上并不符合风速随高度增加的对数分布规律,因此,上述测站的观测资料后来在计算中就未采用。所用各站的名称和分析用的补充资料的观测时期列在表 1 内:

表 1

顺序号	站名	位置		蒸发池面积 (平方公尺)	补充观测资料的时间
		纬度	经度		
1	契尔登	60°24'	56°31'	20	1949~1951
2	泽林诺戈尔斯克	60°16'	29°46'	100.20	1951~1952
3	瓦尔达依	57°59'	33°15'	100.20	1949~1951
4	维亚佐维莱	55°49'	48°31'	20	1949~1951
5	古比雪夫	53°14'	50°10'	20	1949~1951
6	柴尔硕夫	51°20'	48°17'	112	1949~1950
7	下捷维茨卡雅	51°33'	38°23'	20	1951
8	彼什诺伊湖	46°54'	51°40'	20	1949~1950
9	秋列尼湖	44°28'	47°29'	20	1949~1951
10	塞万湖	46°32'	44°57'	20	1950
11	卡拉-博加兹-果尔	41°03'	52°55'	20	1949~1951

对所有蒸发站1949~1952年期间的观测资料作了详细的分析,这些分析是分别地用每个蒸发站的资料绘制 $E=f(e_0-e_{200})$ 关系曲线图的方法进行的。

上述关系乃是一些通过坐标原点的直线。这些直线的倾角对各个蒸发站来说是不一样的,并且随着该站季平均风速的增加而增大。这些图上的点子大部分都相当接近直线。只有个别的点子例外,它们同直线的基本方向偏差很大,关于这一点不能用与其相应的风的条件来解释,因为对大多数用来绘制该测站的 $E=f(e_0-e_{200})$ 关系式的点子来说,在所有这类情况下风速都接近其平均值。根据这一点就认为某些时期中观测资料是没有用的,其中包括秋列尼湖和卡拉-博加兹-果尔两个测站1949年的资料及后者在1950年7~8月间的资料。由于与上述略微不同的另一个原因,对塞万湖蒸发站的观测资料也没有进行分析;该站资料证明,由于大气压力对蒸发过程的影响,高山

条件下的蒸发强度比平原地区的略大一些。

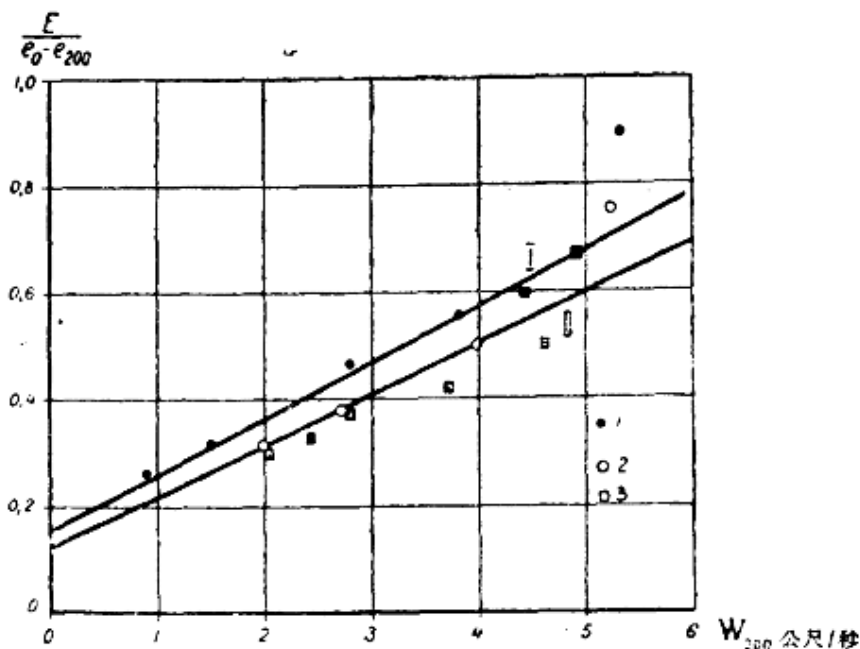


圖 1 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 关系曲线圖

1—1936~1948年期间所有各站按风速分类的综合观测资料；2—1949~1952年期间的同样资料；3—1949~1952年期间每个测站的平均观测资料。

在平原地区条件下倾角的正切，即 $E = f(e_0 - e_{200})$ 直线的比例 $\frac{E}{e_0 - e_{200}}$ ，随着风速的增加而有规律的增大。因此，在 $\frac{E}{e_0 - e_{200}}$ 和风速之间应存在着一定的关系，这个关系是以分析 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 曲线图（图 1）上各点分布情况的方法来确定的，在此图上繪有每个蒸发站的 $\frac{E}{e_0 - e_{200}}$ 数值，該值是直线 $E = f(e_0 - e_{200})$ 的倾角正切。除此以外，图 1 上还补充繪制了一些点子，这些点子是所有测站按风速分组的观测资料的重心。图 1 中各点的位置可以繪成一条直线，其分析式的形式如下：

$$\frac{E}{e_0 - e_{200}} = 0.13(1 + 0.72w_{200}), \quad (3)$$

由此，蒸发量可按以下公式求出：

$$E = 0.13(e_0 - e_{200})(1 + 0.72w_{200}) \text{ 公厘/日。} \quad (4)$$

所得出的关系式的参数值同 Б.Д. 查伊科夫公式非常接近，而风因子的表示式则完全与其符合。

为了將所得出的关系式与过去 Б.Д. 查伊科夫所得出的公式相比較，在图 1 中补充繪上了仅在 1936~1948 年期间所观测的資料中得出的所有点子的重心，根据这些重心繪出一条直綫，它表示蒸发和决定蒸发的条件之間的关系 (I)。該直綫的方向和我們所求出的关系直綫 (II) 虽略有偏差，但是，可由 Б.Д. 查伊科夫公式很好的加以說明。不論对关系直綫 (I) 与关系直綫 (II) 來說，在风速很大的情况下都发现有某些与观测資料不相符的現象。同时，在这种情况下，蒸发量的增大显然是由于实验不够完善的緣故，因为許多蒸发站的观测都証明，在风速很大时水会从蒸发池中濺出来。由于这个原因，直綫上面部分的位置就会发生某些不固定情况，但是主要的点子还是說明了上述关系式所表示的直綫方向。

自然会产生这样的疑問：所求得的关系式之間的差別是怎样产生的，为什么根据最近几年观测資料在一定风速下所求得的 $\frac{E}{e_0 - e_{200}}$ 比值經常偏小？

不可能把产生上述情况的原因完全归結为前几年和近几年进行观测的方法不同，虽然从 1948 年起各測站網中就采用了新的规范；按此规范蒸发池中的水温在 1 公分深度处測量，而风速在标准高度 200 公分处补充測量，这样就不用將压板测风器測得的观测資料換算到以上所述的高度。

但是，Б.Д. 查伊科夫对于在 1 公分深度处測得的水温資料和过去在 10 公分深度处測的水温資料所作的分析証明了，在这些深度中水温的差別并不大，为 $\pm 0.1^\circ$ ，并未超出測量精确度的限度。

1949~1952 年期间相应的观测資料証实了 Б.Д. 查伊科夫的結論。因此，沒有根据把各年蒸发池观测結果不同的原因归結于測量水温的方法不同。同样也不能用观测风速的条件来解釋这种差別。因为各个蒸发站在 1949~1952 年期间按压板测风器高度及在 200 公分高

度处所进行的同期观测结果证实了利用对数公式把测风器测得的风速资料换算到规定高度 200 公分是合理的，用各时期蒸发观测的不完善性来说明上述差别的可能性就要小些，因为资料的分析确定了不管是前几年或是近几年观测资料的质量都是十分令人满意的。其中也有一些是例外，就是上面已经谈过的，已经作废的和今后不予采用的那些观测资料。

以上所述证明，目前没有根据把某些分析用的资料认为是废品。但是，必须决定应该利用那个所求得的关系式来进行计算。所以必须较详细的研究 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 关系曲线图上点子的分布情况，并查明根据我们所未考虑到的任一因子，在点子的分布上有没有一定的倾向。

Б.Д.查伊科夫在分析 1936~1948 年期间蒸发站网的观测资料时发现，在一定风速和其他条件都相同的情况下，在国内干旱地区的水池所记录下来的蒸发量通常要比过湿地区的蒸发量大一些。所以，对于地理位置不同的各组点子来说，表示蒸发和决定蒸发的因子之间的关系直线的倾角正切也就不同。

考虑到点子一般来说不太分散，只有在进行区域的相应划分时才可能采用区域性的计算公式，而现有的蒸发站数量有限，进行区域划分是很困难的，Б.Д.查伊科夫认为在根据全部蒸发站平均观测资料确定了计算关系式的数值以后，就可以求出一般的计算关系式。

在绘制 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 关系曲线时对最新资料所作的适当分析也证明了，各组点子按其地理位置的分布有着一定的规律性。因此，就产生了这样的问题：在确定计算公式的数值时应该以各组中的那一组点子作为根据，在进行分析时是否可以將现有资料中的某些部分忽略不计。

为了解决这个问题，必须预先查明，为什么在不同的自然地理条件下蒸发池水文气象条件都一样时所求得的蒸发量并不相同。

考虑到在水文气象条件相同的情况下，位于干旱地区的蒸发池的

蒸发量通常是比較大的，在这种情况下可以認為水汽的水平輸送乃是影响蒸发的一个附加因子，由于空气普遍干燥，水汽的水平輸送具有很重要的意义。在 ГГИ-3000 型小型蒸发皿內水平平流的作用表現的最明显，对按國內各地区大量裝置的蒸发皿所确定的变换系数(R)进行簡單的比較，就証实了这一点。

变换系数是在同期中按蒸发池(E_0)和蒸发皿(E_H)測得的蒸发量的比值。В.И.庫茲聶佐夫(国立水文研究所)对这些蒸发量所作的分析証明了，当系数 R 的逐月变动很大时，对某一地区的蒸发量來說，其季节蒸发量相当稳定，但对整个区域來說，則是从北向南逐漸减小。

其中在苏联欧洲部分森林帶的系数 R 值約为 0.9，森林草原地区为 0.85，草原帶为 0.8，半沙漠区域为 0.75。这些数字証实了，由于蒸发皿表面蒸发比較强烈，系数 R 值就随着空气湿度差的增大而递减，显然，在小型蒸发皿的狭小表面上，不断通过干燥空气的現象是促进該过程的一个因素。

反之，在湿度大的地区內，水气的水平輸送不可能使蒸发量显著增大，因为蒸发皿上空所通过空气的一般特点是湿度很大。

这种情况也可用同一时期的观测資料来图解說明，这些資料是利用小型漂浮蒸发皿和裝置在各地区的小型地面蒸发皿进行观测得来的。这些观测工作是由国立水文研究所在美人湖(ОЗ·Красавица)和維謝洛夫水庫，以及水电設計院列宁格勒分院在齋桑湖上进行的。

为了根据按风速分組的資料来比較每两个蒸发皿的上述資料，曾繪制了图 2 上的 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 关系曲綫。

从图 2 可以看出，在湿度过大的地区內(美人湖)，当风速相同时，換算为單位水汽張力差 $\left(\frac{E}{e_0 - e_{200}}\right)$ 的蒸发量就地面蒸发皿和漂浮蒸发皿的数值來講是非常接近的。反之，在薩尔草原地区(維謝洛夫水庫)，特別是在哈薩克斯坦东部的干燥草原帶(齋桑湖)，用地面蒸发皿所測的單位水汽張力差的蒸发量，大大地超过漂浮蒸发皿所測

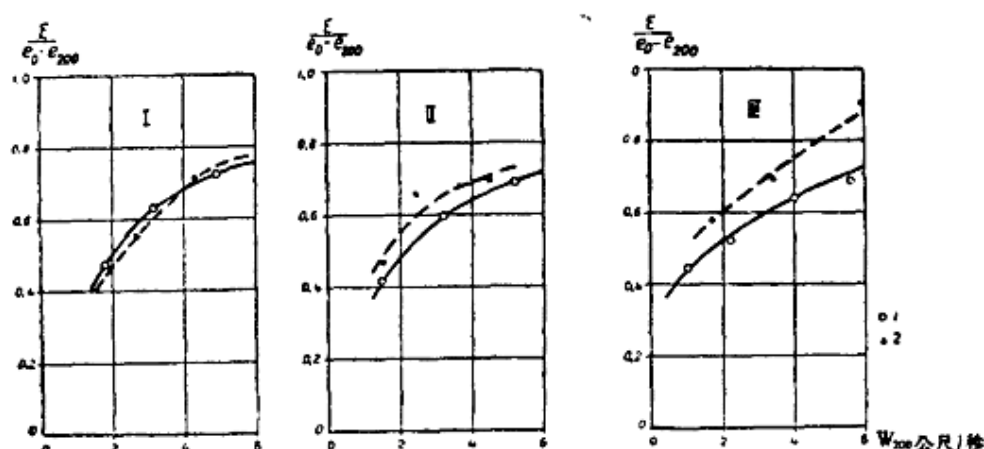


圖2 按照面積為 0.3 平方公尺的漂浮蒸發皿(1)和地面蒸發皿(2)的資料

所繪制的 $\frac{E}{e_0 - e_{200}} = f(w_{200})$ 关系曲綫

I—美人湖；II—維謝洛夫水庫；III—齊桑湖。

的蒸发量，可是在所研究的一切情况下，在一定的风速下各漂浮蒸发皿所测得的蒸发量在数值上非常接近。这就证明，在水面宽广的情况下，水汽平流对蒸发的影响不大；反之，在陆地上这种因子的影响就非常大，并且空气愈干燥其影响也就愈大。显然，上述的情况正说明了В.Д.查伊科夫所看出的苏联干燥地区各蒸发池记录的蒸发情况有某些偏高的事实。考虑到以上情况，并注意到按蒸发池资料导出的公式今后将用来计算水体之蒸发量，水体内的水汽的水平输送不能对蒸发有重大影响，因而，我们认为有可能用我们所求出的关系式(4)作为计算公式。此关系式(4)与湿度大的地区的蒸发池观测资料最为符合，并且同苏联干燥地区蒸发池的观测资料比较起来，按这个公式得出的蒸发量是偏小的。

在对按公式(4)所求出的蒸发量同观测到的蒸发量进行比较时看出，日蒸发量计算的平均误差(考虑整个观测期资料得出的为 ± 0.58 公厘，或为实测蒸发量的13.5%。从最近几年的观测资料中，以及从以前几年过湿地区的资料中确定的相应误差值为 ± 0.28 公厘，或11.6%。在绝大多数情况下(75%)，计算误差不超过实测蒸发量的8~10%。计算各月的蒸发量时各种数值的误差在确定整个季的蒸发