

陆 面 蒸 发 公 式 的 检 验*

谭 冠 日

(中山大学气象系)

王 宇 方锡林 王永平 张天宏 温云红

(云南省气象局)

提 要

以云南省七个小流域的气象、水文资料,检验了三个含有下垫面参数的陆面蒸发公式,表明傅抱璞公式最佳。

作者提出了一个反映地形起伏的新参数——地形起伏度。藉助傅抱璞公式和地形起伏度计算山区全年陆面蒸发量的误差,一般小于 4%,个别最大误差达 13.1%,平均误差为 5%。

一、引 言

陆面蒸发是流域水量平衡和下垫面热量平衡的基本因子,是气候学和应用气候学所关注的问题。现今全国进行水资源评价和农业气候区划,蒸发量的确定尤为迫切。

陆面蒸发迄今不能在广大地域上准确观测,只能依赖于间接计算。

陆面蒸发决定于气象因素(主要是热量和水分状况)和地理因素(主要是地势、下垫面性质和特征)。人们在蒸发量计算公式中引入下垫面参数,以求更准确地计算陆面蒸发。由我国科学工作者提出以及在我国得到初步检验的有:

1. 巴格罗夫(H. A. Баргов)公式^[1]

他以 $1 - (E/E_0)$ 代表饱和差并假定蒸发量随降水量的变化率可以表示为

$$\frac{dE}{dr} = 1 - (E/E_0)^n \quad (1)$$

式中 E 是陆面蒸发, r 是降水量, E_0 是蒸发力,指数 n 是与下垫面性质有关的参数。

巴格罗夫本人对此公式并未加以检验^[2],高国栋等认为此式计算结果与水文图集尚接近^[3]。

刘振兴采取相似的基本假定,但作了修改^[4]:

$$\frac{dE}{dr} = (1 - E/E_0)^{\frac{1}{n}} \quad (2)$$

并求出显函数解

* 本文于 1982 年 8 月 11 日收到,1983 年 6 月 7 日收到修改稿。

$$\hat{E} = E_0 \left\{ 1 - \left[1 - \frac{1}{n} \left(\frac{1}{1 - \frac{1}{n}} - \frac{r}{E_0} \right) \right]^{1 - \frac{1}{n}} \right\} \quad (3)$$

\hat{E} 表示陆面蒸发的计算值, 以区别于实际值 E 。刘振兴公式是对巴格罗夫公式的修正。下面我们只检验刘振兴公式而不检验巴格罗夫公式。

2. 崔启武所提出的水热平衡联系方程是^[5]

$$E = \frac{Rr}{R + A + Lr} \quad (4)$$

式中 R 是净辐射, L 是蒸发潜热, A 是下垫面参数。利用 $R/L = E_0$ 的关系, 可将(4)式写成

$$\hat{E} = \frac{LE_0r}{L(E_0 + r) + A} \quad (5)$$

3. 傅抱璞公式^[6]

$$\hat{E} = E_0 \left\{ 1 + \frac{r}{E_0} - \left[1 + \left(\frac{r}{E_0} \right)^m \right]^{\frac{1}{m}} \right\} \quad (6)$$

式中 m 是决定于下垫面性质的参数。

以上公式的提出者没有提出确定下垫面参数的一般方法, 公式也未经实践检验和比较, 因此都还不便付诸应用。事实上, 下垫面性质复杂多样, 如何确定下垫面参数很为困难。

我们利用云南省不同性质下垫面上的气象、水文资料, 对上述三个公式进行检验和比较, 找出误差较小的公式, 探求确定下垫面参数的方法, 开拓公式实用的途径。

二、检验的思路和依据的资料

1. 在云南选择了六个闭合小流域, 它们都有气象站和尚较稠密的雨量站, 还有控制整个流域的径流站。这些流域的地理和气候条件各异, 不过, 云南毕竟是个高原, 各流域的地形起伏都较大。

我们以水量平衡方程来求取陆面实际蒸发量 E 。该方程为

$$r = f + E + \Delta S \quad (7)$$

就多年平均而言, $\Delta S = 0$; 就一个水文年度而言, $\Delta S \approx 0$ 。只要有降水量 r 和径流深 f , 便可得到蒸发量 E 。把这个蒸发量作为实际值, 去检验各个公式的蒸发量计算值的准确程度。径流深是以流域为单元确定的, 降水量 r 应该是流域内的面平均降水量, 简称面雨量。我们研究了流域内降水量随高程变化的规律, 以不同高程的面积为权重, 对相应高程的降水量加权求平均, 得到面雨量。

各流域的基本情况和资料见表 1。

三个公式都要用到的蒸发力 E_0 , 是根据专门研究过的彭曼修正式计算的^[7]。

2. 三个公式写成统一的形式为

$$\hat{E}_{i,j} = F_i(E_{0i,j}, r_{i,j}, M_{i,j}) \quad (8)$$

表 1 各流域概况及基本数据

流域名称	所在地	流域面积 (平方公里)	年降水量 (毫米)	平径流深 (毫米)	年蒸发量 (毫米)	年蒸发力 (毫米)	资料年数
三 岔	曲靖县	18.5	984.1	287.6	696.5	1207.0	8
勐 海	勐海县	1002.8	1275.0	520.0	755.0	1181.0	10
木 康	潞西县	217.6	2622.0	1666.0	956.0	1192.0	10
吊 草	下关市	5.4	1338.0	581.3	756.7	1576.0	6
黄 家	下关市	2.1	1222.0	416.2	805.8	1576.0	11
中 和 街	永仁县	528.0	1207.0	502.7	704.3	1622.0	13

式中 \hat{E} 是陆面蒸发的计算值, F 是公式的函数形式, M 是下垫面参数。字母的下标 $i=3, 5, 6$ 分别代表(3), (5), (6)式。 $j=1, 2, \dots, N$ 表示年代顺序。 $j=y$ 表示多年平均。

一个流域的下垫面性质只有极缓慢的改变, 因此下垫面参数应该基本上是一个常数, 故应 $M_{i,j} \approx M_{i,y}$, $M_{i,y}$ 也就是需要确定的 M_i 值。

若 $\Delta S=0$, 有了 $f_{i,j}, r_{i,j}$, 可从(7)式求出 $E_{i,j}$ 。结合 $E_{0i,j}$, 便可由(8)式反算出 $M_{i,j}$ 。

如果第 i 个公式比较完美, 各项资料又都准确, 则各年的参数 $M_{i,j}$ 应彼此接近, 其变差系数

$$C_{vi} = \frac{1}{M_{i,y}} \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{j=1}^N (M_{i,j} - M_{i,y})^2} \quad (9)$$

应比较小。 C_v 最小的公式应是较好的公式。

3. 尽管气象、水文资料经过审查, 但是, 面雨量和蒸发力都是计算出来的, 难免有误差。虽然用水量平衡方程求出陆面蒸发最直接且尚可靠, 但假定 $\Delta S \approx 0$ 而计算逐年陆面蒸发有时仍有较大误差, 应把误差较大的年份剔除, 才能求出可靠的 $M_{i,y}$ 值。对一个流域, 我们先取所有年份的平均 $M_{i,y}$ 代入(8)式, 结合逐年的 $E_{0i,j}, r_{i,j}$ 计算各年的 $\hat{E}_{i,j}$, 若它对于实际 $E_{i,j}$ (由水量平衡公式求出, 与公式 i 无关) 的相对误差

$$\delta_{i,j} = \frac{\hat{E}_{i,j} - E_{i,j}}{E_{i,j}}$$

超过 10%, 则此年剔除, 用其余年份资料再求 $M_{i,y}$, 重新计算 $\delta_{i,j}$ 。……如此循环, 直到剩下的 $\delta_{i,j}$ 都不超过 10%, 此时所保留的年份的 $M_{i,y}$ 才是最终的下垫面参数 M_i 。

4. 因资料误差大的年份, 各个公式的误差都会大。如果某一年只是某一个公式的误差大, 则问题是在公式本身而不在资料。一个公式因为 $\delta_{i,j} > 10\%$ 而剔除资料的年数 n 越多, 则该公式也越差。所以 n/N 也是公式好坏的一个标志。

用三个流域资料检验各公式的结果见表 2。

由上表看到, (3)式剔除资料年数最多, (5), (6)式剔除较少; (6)式的 C_v 又比(5)式小, 表明(6)式的下垫面参数最为稳定, 能较好反映下垫面变化极小这一实际情况。尤其是傅抱璞事先未对公式形式作任何假定, 而是由量纲分析原理和微分方程理论决定公式形式的, 立论较为严格。所以, 从上列三个小流域资料的检验和从理论角度看, 傅抱璞公式最佳。

表 2 各公式检验的情况

公 式	检 验 项 目	三 岔	吊 草	黄 家
刘振兴公式 (3)式	n/N	5/8	5/6	8/11
	C_v	0.123	0.111	0.104
崔启武公式 (5)式	n/N	1/8	3/6	4/11
	$ C_v $	0.252	0.282	0.561
傅抱璞公式 (6)式	n/N	2/8	3/6	5/11
	C_v	0.124	0.119	0.121

注：崔启武公式下垫面参数 A 恒为负数， C_v 按定义也将出现负数，故取绝对值来反映其波动的大小

要说明的是，三个公式的 \hat{E} 和下垫面参数 M 都不成线性关系， M 的 C_v 的大小与公式的误差并无简单的联系。

三、下垫面参数与下垫面状况的关系

傅抱璞对其公式的下垫面参数 m (也就是上文的 M) 作过讨论^[6]：在蒸发力 E_0 与降水量 r 一定的条件下，下垫面参数 m 越大，蒸发也越大。下垫面透水性差，植被少，地形坡度大因而径流强的地区， m 值小。当 m 出现最小值，即 $m=1$ 时，全部降水很快变成径流，来不及蒸发， $E=0$ 。反之，下垫面透水性好，植被多，地形平坦因而径流弱的地区， m 值大。当 m 出现极大，即 $m \rightarrow \infty$ 时，蒸发量视 E_0/r 而定。

为了寻求 m 和下垫面状况的关系，我们用六个小流域的 m 与植被百分率、地形平均坡度、流域最大蓄水量和平均高程等进行分析，发现 m 与平均坡度关系较好，但还不大理想。我们考虑，相同坡度的两个流域，地形起伏也可能不同，起伏大的径流强、蒸发小；起伏小的则相反。

我们提出了反映地形起伏的一个新度量——地形起伏度 U (简称起伏度)，比平均坡度能更细致地反映地形的起伏，它是这样决定的：在大比例尺地图上划出研究区域的边界，在边界内作出相等间距的经线和纬线。量出边界内经、纬线的总长度 L (厘米)，数出它们与地形等高线相交的交点总数 P ，并用下式定义地形起伏度 U ：

$$U = \frac{P \cdot \Delta h}{L/K} \quad (10)$$

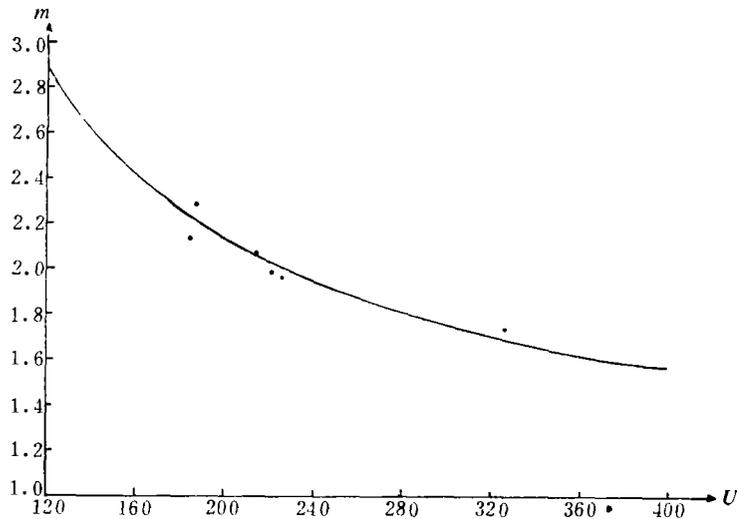
式中 Δh 是地形等高线的间距 (米)， K 是地图比例尺 (单位为厘米/公里)。起伏度 U 表示区域内任意方向上单位水平距离内平均的地形高度差，单位是米/公里。所作经纬线疏密要适当，过密则工作量太大，过疏则精度不够。

我们求出了六个小流域的起伏度 U ，与上文已算出的 m ，列于表 3，并作出散布图 (图 1)。

m 和 U 应该具有物理联系，并且符合傅抱璞公式的条件。根据图 1 和边界条件可以得出 m 和 U 的实验关系如下：

表 3 各流域的地形起伏度 U 和下垫面参数 m

流 域	三 岔	勐 海	木 康	吊 草	黄 家	中 和 街
起伏度 U	187	184	214	221	225	326
下垫面参数 m	2.294	2.132	2.071	1.992	1.962	1.738

图 1 下垫面参数 m 和地形起伏度 U 的关系

$$\hat{m} = \frac{a}{U} + 1 \quad (11)$$

式中 a 是由实际资料确定的常数。(11)式的意义是：当地形起伏度 U 较大时，径流强， \hat{m} 较小，由(6)式计算的蒸发量 \hat{E} 较小。当 U 极大，即 $U \rightarrow \infty$ 时，地形是绝壁，降水全部变成径流，此时(11)式使 $\hat{m} = 1$ ，由(6)式计算的 $\hat{E} = 0$ 。当起伏度较小时，径流弱， \hat{m} 较大，由(6)式计算的 \hat{E} 增大。当起伏度 U 极小，即 $U = 0$ ，地面水平，无径流，由(11)式得 $\hat{m} \rightarrow \infty$ ，此时按(6)式计算 \hat{E} 取决于 E_0/r ；当 $E_0/r \gg 1$ 时， $\hat{E} \approx r$ ；当 $E_0/r \ll 1$ 时， $\hat{E} \approx E_0$ 。可知，(11)式符合水热平衡的原理和(6)式的条件。

我们用前述六个小流域的 U 和 m 按最小二乘法求出(11)式的 $a = 225$ 。

下垫面参数 m 主要受起伏度 U 的影响，这是山地的必然结果。山地的起伏度对径流和蓄水量的影响，远远超过下垫面其他特征的影响，其他特征的影响在(11)式中是作为残差处理的。应该指出，在地势比较平缓的地区，植被、土壤等对径流、蓄水量的影响将显得较为重要，有些情况下甚至成为左右蒸发的决定性因素，这时下垫面参数 m 将是多个因子的函数，至于哪个因子最为重要，须根据具体情况而定。

四、拟合效果和客观验证

我们从以下三方面来验证上述研究结果的客观可靠性。

1. 由起伏度通过(11)式计算的 \hat{m} 所求得的蒸发量 \hat{E}_m ，对于实际的 m 所求得的蒸发量 E_m 的相对误差 δ_m (列于表 4)，代表(11)式的拟合误差。
2. 由起伏度通过(11)式计算的 \hat{m} 所求得的蒸发量 \hat{E}_m 对于实际蒸发量 (由水量平衡方程求得) 的相对误差 δ (也列于表 4)，代表(6)和(11)两式的总误差。

表 4 蒸发量计算的误差 (%)

流 域	三 岔	勐 海	木 康	吊 草	黄 家	中和街
(11)式拟合误差 δ_m	-2.6	2.9	-0.7	1.1	1.6	-3.5
(6)(11)式总误差 δ	-2.3	2.9	-0.7	12.7	-0.2	-3.2

3. 此项工作是应云南省水文总站为水资源评价的要求而进行的。上述工作完成后，水文总站提出第七个闭合流域——绥江流域，要求用前面的研究结果计算这个流域的蒸发量，藉以验证计算的可靠性。

绥江流域位于云南东北部，面积 322.8 平方公里。流域内有一个气象站，一个径流站，三个雨量站，有 7 年共同资料。全年面雨量 $r=1452.8$ 毫米，径流深 $f=926.5$ 毫米，年蒸发量 $E=526.3$ 毫米。由彭曼修正式求得年蒸发力 $E_0=961.6$ 毫米。

由地图算出起伏度 $U=297$ (米/公里)，代入(11)式求出下垫面参数 $\hat{m}=1.757$ 。将 r, E_0, \hat{m} 代入(6)式求得 $\hat{E}=595.4$ 毫米，对于实际值 E 的相对误差为 13.1%。

综合以上七个小流域，计算年蒸发量的相对误差，一般小于 4%，个别最大达 13.1%，平均为 5%。

由于选择具备可靠资料的闭合流域的困难，本文所根据的流域数目尚不够充分：且云南地形起伏大，所得结果对平缓地方不一定完全适合。

参 考 文 献

- [1] Багров, Н. А, О расчете испарения с поверхности суши. *Метеор. и Гидрол.* № 2. 1954.
- [2] Зубенок, Л. И, Испарение на континентах, Л., Гидрометеонздат, 1976.
- [3] 高国栋、陆渝蓉、李怀瑾，我国陆面蒸发量和蒸发耗热量的研究，气象学报，38 卷，2 期，1980。
- [4] 刘振兴，论陆面蒸发量的计算，气象学报，27 卷，4 期，1956。
- [5] 崔启武、孙延俊，论水热平衡联系方程，地理学报，34 卷，2 期，1979。
- [6] 傅抱璞，论陆面蒸发的计算，大气科学，5 卷，1 期，1981。
- [7] 云南省气象局农业气候区划办公室，应用彭曼公式计算全省各地水面蒸发量的初步结果，云南气象，1981 年第 3 期。

AN INSPECTION OF THE FORMULAE CALCULATING THE EVAPORATION FROM LAND SURFACE

TAN GUANRI et al.

(Department of Meteorology, Zhongshan University)

Abstract

On the basis of meteorological and hydrological data in seven catchments in Yunnan Province, three formulae [Eqs. (3), (5), (6)] calculating the evaporation from land surface are tested and compared. It is found that Fuh's formula [Eqs. (6)] is the best one among them.

A new parameter U , undulation of topography [Eqs. (10)], is defined. By virtue of Fuh's formula and the undulation of topography, the evaporation from land surface in the mountainous country can be calculated without much error.