

黄河流域旱涝年夏季蒸发计算及其变化

朱超群 高国栋

(南京大学大气科学系)

提 要: 根据我国北方的热量平衡观测资料,建立了计算感热—潜热比的经验模式,用于计算黄河流域旱涝年(1972、1975、1986、1988年)及一般年(1971、1974、1985、1987年)夏季陆面蒸发,并分析其变化特点以及与旱涝的关系。

关键词: 黄河流域 夏季旱涝 陆面蒸发

陆面蒸发或蒸发耗热是水分平衡和热量平衡的重要分量,计算分析旱涝年的蒸发及其与旱涝的关系,对揭示旱涝的水热特征及其物理成因有重要意义。

确定陆面蒸发的方法可分为直接测量和间接计算二种。直接测量法(如用称重式蒸散仪^[1])比较精确可靠,但只能用于少数专门研究。因此陆面蒸发主要通过间接的理论或经验方法计算。许多学者在这方面已有不少研究^[2-5],且取得了一定进展。但由于影响陆面蒸发的因素十分复杂,所以大范围(如一个流域)月蒸发的计算,现在还处于试验研究阶段。高国栋等^[5]计算分析我国209个站的月蒸发,但在计算月蒸发时采用年自然景观参数,这样可能导致一定的计算误差;此外要精确地确定某地的年自然景观参数也是较困难的。

本文试图根据能量平衡—波文比方法计算8年夏季月蒸发量,以揭示旱涝年的蒸发特征。

1 计算方法和资料概况

在近地面层垂直方向上的感热通量和潜热通量可写成如下形式

$$H = -\rho C_p U_* K Z \frac{\partial T / \partial Z}{\phi_h(\xi)} \quad (1)$$

$$LE = -\rho L U_* K Z \frac{\partial q / \partial Z}{\phi_q(\xi)} \quad (2)$$

所以,感热与潜热之比(下用 β 表示)

$$\beta = \frac{\phi_q(\zeta) C_p P \Delta T}{\phi_h(\zeta) 0.622 L \Delta e} \quad (3)$$

式中 C_p —空气的定压比热； P —地面气压； L —汽化热， ΔT 和 Δe —分别为垂直方向上的位温差和水汽压差； $\phi_q(\zeta)$ 、 $\phi_h(\zeta)$ —分别表示无因次比湿梯度和位温梯度，其它符号的意义都是常用符号。

根据 Dyer 的研究^[6]，在不稳定条件下， $\phi_q(\zeta) = \phi_h(\zeta)$ ；Monin 和 Yaglom 等^[11]研究结果表明在各种稳定状况下， $\phi_q(\zeta) = \phi_h(\zeta)$ 。因此，(3)式可写成

$$\beta = \frac{C_p P \Delta T}{0.622 L \Delta e} \quad (4)$$

利用北京和郑州三年(1935.1—1935.12)每月五次(01、07、10、13、16、19时)0.5m和2.0m高度上的温度和水汽压资料，根据(4)式计算 β 值。计算时当 ΔT 和 Δe 很小(本文采用 $|\Delta T| \leq 0.1^\circ \text{K}$ ， $|\Delta e| \leq 0.1 \text{hpb}$)时，取 $\beta = 1$ ^[7]。

根据经验^[15]，水汽压随高度的变化可用下式表示：

$$e = e_0 \cdot 10^{-\frac{Z}{\alpha}} \quad (\alpha \text{ 为经验常数})$$

上式对 Z 求导，并以差分代替微分，同时取 $\Delta Z = 2 \text{m}$ (即地面与2m之差)，于是有

$$\Delta e = c' \cdot e \quad (c' \text{ 为经验常数})$$

因此根据(4)式可知， $\beta = f(\Delta T/e)$ 。北京、郑州的实际资料分析表明，暖季月份月平均 β 与 $\Delta T/e$ 有较好的线性关系(图1)，且可以用下式表示：

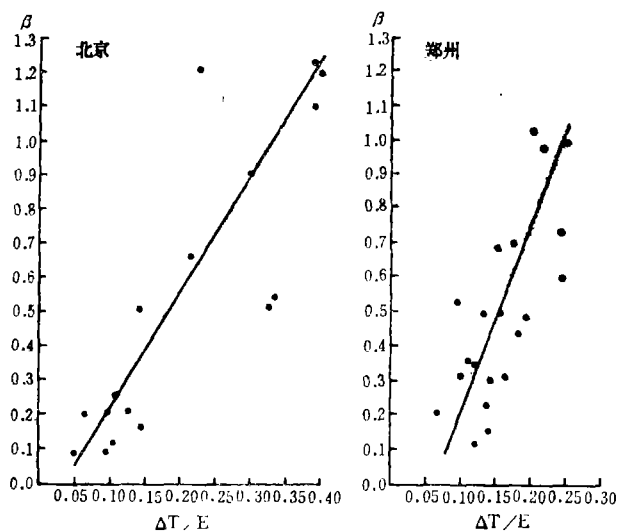


图1 月平均 β 与 $\Delta T/E$ 的相关图

Empirical relationship between the monthly Bowen ratio β and $\Delta T/E$ (ΔT represents the temperature difference of 0-cm soil and 2-m air, E is the vapour pressure at 2 m.)

$$\begin{aligned} \text{北京 (4—9月)} \quad \beta &= -0.057 + 2.862\Delta T/E \quad (r=0.845) \\ \text{郑州 (4—10月)} \quad \beta &= -0.125 + 3.959\Delta T/E \quad (r=0.783) \end{aligned} \quad (5)$$

根据相关系数的显著性检验^[10], 北京 (样本数 $n=17$)、郑州 ($n=21$) 相关系数分别大于 0.606、0.549, 即在 0.01 水平上显著。(5) 式中 ΔT 表示月平均零 cm 土壤温度与 2m 气温之差, E 为 2m 处水汽压。

根据地面能量平衡方程

$$R_n = LE + H + G \quad (6)$$

并利用

$$H = \beta \times LE$$

得到月蒸发耗热量的计算公式

$$LE = \frac{1}{1 + \beta} (R_n - G) \quad (7)$$

式中 R_n ——净辐射量, 根据经验方法计算^[8、13]; G ——土壤热交换量, 利用北京和郑州的经验式确定^[9]。

本文根据黄河流域 35°—40°N、105°—120°E 及其周围地区的 30 多个气象站¹⁾ 的月降水量, 月平均气温和水汽压、0 cm 土壤温度, 以及 30 年 (1951—1980 年) 平均降水量资料, 计算夏季月份 (5—8 月) 蒸发 (β 取北京与郑州经验式的平均值)。

由于在研究区域内¹⁾, 东西部降水量差异较大, 因此将研究区域分成 1、2、3 区, 各区选取 6 个站代表 (表 1)。

表 1 35°—40°N 各区台站
The stations in each area (areas no.1—3)

1 区 (115°~120°E)	2 区 (110°~115°E)	3 区 (105°~110°E)
沧州 潍坊	郑州 安阳	鄂托克旗 榆林
惠民 济南	运城 石家庄	延安 平凉
菏泽 天津	太原 介休	银川 盐池

2 结 果 分 析

2.1 经验式适用性

(5) 式是根据北京、郑州的热量平衡资料确定的经验式, 因此首先讨论在研究区域内该式是否适用。

由于缺少大范围月蒸发实测资料, 因此只能与《中国水分气候图集》^[12]的结果作比

1) 站点分布示意图略——编者注。

较。(5)式计算值列于表2。结果表明计算误差一般为10%左右,少数站超过20%。因此

表2 夏季(6—8月)蒸发总量(mm)及计算误差
The evaporation amounts in summer computed with Eqs.5
and 7 and their errors (%)

地 名	北京	济南	潍坊	郑州	石家庄	太原	安阳	延安	平凉
(5)式结果	270	281	270	221	273	241	236	191	240
“图集”	244	263	265	213	237	218	209	185	180
误差(%)	11	7	2	4	15	10	13	3	30

可以认为(5)式的计算结果与“图集”结果比较接近,在研究区域内基本适用。

2.2 旱涝概况

影响旱涝的因素较复杂,因而评定旱涝的方法较多,气象界常用降水距平百分率作旱涝指数,且以汛期(本文取5—8月)连续3个月或以上平均降水距平 $R \geq 20\%$ 作为洪涝, $R \leq -20\%$ 定为干旱^[14]。因此,根据各区平均降水距平(表3)可以确定1988年2、3区洪涝,1972、1975年各区均干旱,1986年1、2区干旱。为便于下文分析,图3给出了旱涝年中部份典型月降水距平水平分布。由图可见,1988年5月,兰州以东的黄河流域降水距平

表3 5—8月各区平均降水距平(%)
Avaraged precipitation departures (%) in each area

年	1988				1972				1975				1986			
月	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
1区	64	-67	26	-32	8	-64	-4	-47	-39	-18	-2	-49	-35	8	-45	-42
2区	64	-2	57	54	-38	-62	-9	-31	-70	-48	-10	-18	33	-32	-61	-52
3区	188	53	32	11	-27	-18	-46	-11	-24	-17	-2	-42	-56	132	-40	-37

几乎都在100%以上,银川附近达350%以上;7月105°E以东地区基本上都是正距平,最大超过140%。1986年7、8月整个黄河流域大范围降水偏少,尤其7月较常年年减少40%以上,2个雨量最少的中心减少80%以上。

2.3 涝月蒸发特征

1988年5—8月各区平均月蒸发耗热量为14.2—25.1KJ·cm⁻²,蒸发距平(相对于8年平均值)为-12%—10%(表4)。各月蒸发耗热量都是自沿海向内陆减少,与多年平均状况相似。比较表3和表4,表明3区蒸发随降水增加而增多;2区5月蒸发和降水距平同

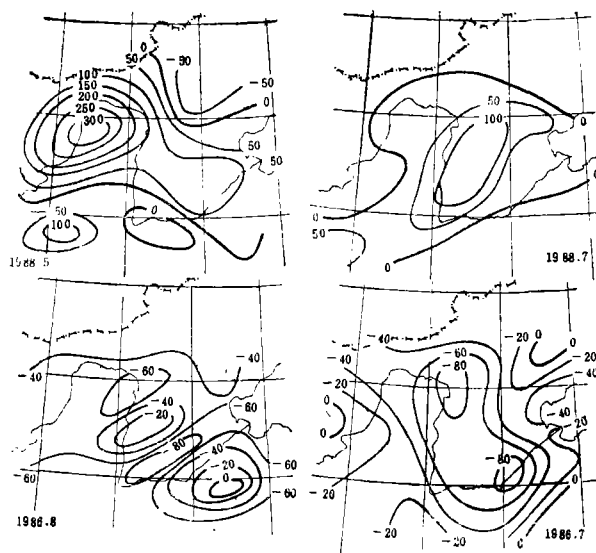


图 2 降水距平分布

Distribution of precipitation departures (%) from the thirty-year averages

表 4 1988年各区平均月蒸发耗热量和蒸发距平

Monthly evaporation heat amounts ($\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$) and their departures (%) from the eight-year averages for 1988

月	蒸发(耗热)量 ($\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)				蒸发距平 (%)			
	5	6	7	8	5	6	7	8
1区	19.2	20.9	22.2	25.1	1	7	-12	0
2区	16.3	18.0	18.0	15.9	3	3	-9	-12
3区	14.2	15.1	18.0	15.5	10	7	3	4

号,但7、8月二者异号,降水距平大于50%,蒸发分别减少9%和12%。1区的蒸发距平与降水距平似乎没有明显的一致规律。这是因为1区夏季涝月与旱月相间出现,而月蒸发量多少,不仅取决于当月降水量多少及降水强度,还与前月降水状况有关。

蒸发距平分布(图4)表明,5月蒸发正距都在降水正距平范围内,蒸发的正距平中心区($>25\%$)与降水正距平中心($>350\%$)都在银川附近;黄河下游地区降水距平大约为56—115%,但蒸发距平较小,甚至为负值。7月蒸发正距平中心位于银川、呼和浩特一带降水正距平区;处在黄河下游的1区,降水距平大多数站为30—70%,但蒸发距平为-7—

-21%。

由以上分析表明，洪涝月份在研究区域的东部蒸发减少，而在西部蒸发增加。这是因为西部地区长年降水偏少，蒸发主要受水分来源影响，洪涝月给蒸发以有利的水分条件；东部地区长年降水较多，使洪涝月水分过多，而热量条件较差，反而使蒸发有减少的趋势。

2.3 旱月蒸发特征

干旱年5—8月蒸发耗热量列于表5。结果表明，1972年和1975年各月蒸发耗热量都是1区最大，3区最小，即自东向西减少，与多年平均状况相似；但典型旱年1986年的7、8月蒸发耗热量以2区为最小。显然这是由于2区6—8月持续干旱，特别是7、8月降水距平小于-50%所致。干旱年蒸发量与多年平均的差值（表6）基本上都是负值，即旱年蒸发减少，最大减少7.1KJ·cm⁻²。

表 5 干旱年5~8月蒸发耗热量 (KJ·cm⁻²)
Monthly evaporation heat amounts for the drought year

年	1972				1975				1986			
	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
1区	18.8	22.6	25.1	26.4	19.7	22.6	23.4	24.3	17.2	23.0	27.2	30.1
2区	16.3	19.3	20.1	20.9	16.3	18.0	20.1	21.8	17.2	15.1	15.5	15.9
3区	12.6	15.5	16.7	15.1	12.6	13.8	17.2	16.3	12.8	15.1	17.6	16.3

表 6 干旱年与多年平均月蒸发耗热差 (KJ·cm⁻²)
The departures of evaporation from the eight year averages for the years 1972, 1975 an 1986

年	1972				1975				1986			
	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
1区	-0.8	0.0	-0.4	0.4	0.0	0.0	-2.1	-1.7	-2.5	0.4	1.7	4.2
2区	-0.8	-0.4	-2.5	-1.3	-0.8	-1.7	-2.5	-0.4	0.0	-4.6	-7.1	-6.3
3区	-0.4	1.3	-0.8	-1.3	-0.4	-0.4	-0.4	0.0	0.0	0.8	0.0	0.0

蒸发距平的水平分布（图5），表明典型旱月蒸发负距平大致位于降水负距平区内。

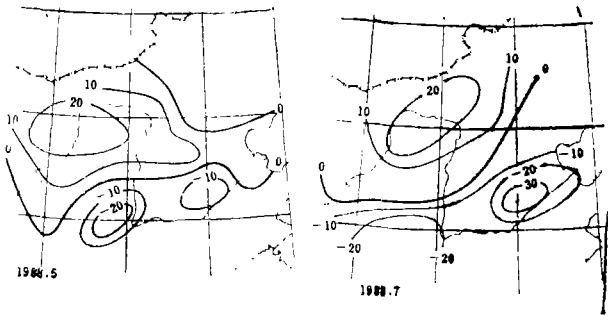


图 3 1988年蒸发距平图
Distribution of evaporation departures
for May and July, 1988.

1986年7月二者最大负距平中心基本都在太原附近；8月，蒸发负距平也都在较大的降水负距平区，最大蒸发负距平($< -10\%$)出现在最大降水负距平区（呼和浩特附近）。

2.4 旱涝对蒸发的影响

干旱年和洪涝年水分条件及热量状况不同，致使旱涝年蒸发有明显差别。表7表示早年与涝年（1988年）蒸发耗热差。结果表明，5—8月平均差值，3区小于零，即夏季蒸发早年小于涝年，平均偏小 $1.2\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$ ；1区则相反，早年大于涝年；2区各年不一致。1区与3区的这种差别是由于它们的降水量不同引起的。

表7 早年与涝年月蒸发耗热差值 ($\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)

Monthly differences of evaporation heat amounts between the drought and flood year ($\text{KJ}\cdot\text{cm}^{-2}$)

年	1972				1975				1986			
月	5	6	7	8	5	6	7	8	5	6	7	8
1区	-0.4	1.7	2.9	1.3	0.4	1.7	1.3	-0.8	-2.1	2.1	5.0	5.0
2区	0.0	1.3	2.1	5.0	0.0	0.0	2.1	5.9	0.8	-2.9	-2.5	0.0
3区	-1.7	0.4	-1.3	-0.4	-1.7	-1.3	-0.8	-0.8	-1.3	0.0	-0.4	0.8

图6表示北京、大同、西安等22个站6—8月平均降水距平和蒸发距平的相关图。由图可见，涝年（1988）点子很分散，表示二者之间不存在简单的相关关系；干旱年（1986、1972）也较分散，但二者间相互关系的基本趋势是比较清楚的，即在干旱年夏季平均蒸发随降水增加而增大。

综上所述，主要有以下几点结果

1) 根据8年夏季平均计算结果，表明经验式（5式）的计算误差一般10%左右，少数站 $>20\%$ 。

2) 洪涝月份，东部的1区，当降水距平大于50%时蒸发为负距平；3区正好相反，蒸发和降水均为正距平，即蒸发随降水增加而增加。

3) 干旱月份，蒸发负距平中心与降水负距平中心水平分布一致。

4) 旱涝年相比较，夏季平均蒸发3区早年小于涝年，1、2区早年大于涝年（2区

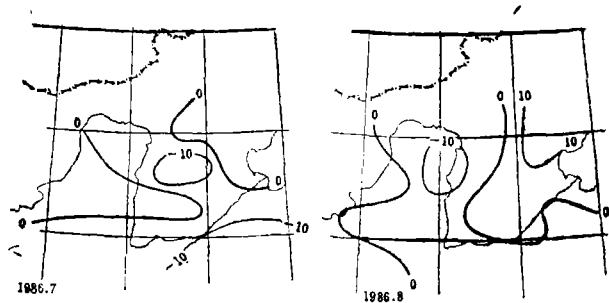


图4 1986年7、8月蒸发距平

Distribution of evaporation departures from the eight-year averages for July and August, 1986.

1986年例外)

5) 22个站 6—8 月平均蒸发距平表明, 黄河流域早年蒸发随降水距平增加而增大, 但涝年的关系显得无规律, 这可能是由于洪涝对蒸发的影响在研究区域东部和西部不一致的结果。

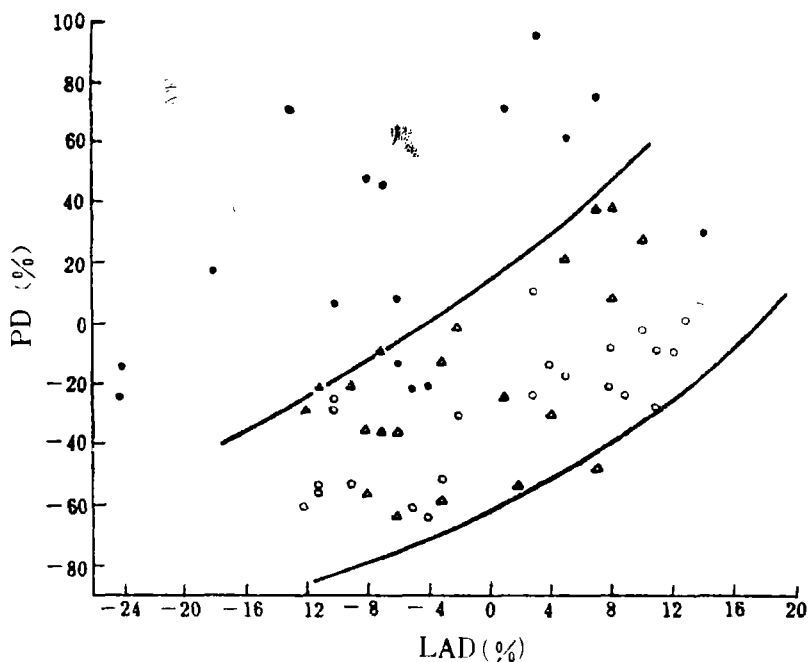


图 5 6—8 月平均降水距平 (PD) 和蒸发距平 (LAD) 相关图

(•—1988, ○—1982, △—1986)

Relationship between the Summer-Averaged precipitation and
evaporation departures

参 考 文 献

- 〔1〕 古藤田一雄、甲斐憲次、中川慎治.筑波大学水理実験センター報告, 1983, (7): 75—85.
- 〔2〕 斐步祥.气象科技, 1985, (2): 69—74.
- 〔3〕 傅抱璞.大气科学, 1981, 5 (1): 23—31.
- 〔4〕 刘振兴.气象学报, 1956, 27 (1): 337—344.
- 〔5〕 高国栋、陆瑜蓉.气象学报, 1980, 38 (2): 165—176.
- 〔6〕 Dyer, A.J. Q J R Met Soc, 1967, 93 (398): 501—508.
- 〔7〕 Högström, U. Q J R Mer Soc, 1974, 100 (426): 624—639.
- 〔8〕 翁笃鸣.气象学报, 1964, 34 (2): 304—315.
- 〔9〕 朱超群、高国栋.气象科学, 1992, 100—106.
- 〔10〕 中国科学院数学研究所数理统计组.回归分析方法.北京: 科学出版社, 1974.19—22.
- 〔11〕 蒙根苦、李兴生等译.微气象学.北京: 科学出版社, 1984.28—29.

- (12) 陆渝蓉、高国栋. 中国水分气候图集. 北京: 气象出版社, 1984. 11—12.
- (13) 李世奎等. 农业气候资源及其区划. 北京: 农业出版社, 1985. 98.
- (14) 陈菊英. 中国旱涝的分析和长期预报研究. 北京: 农业出版社, 1991. 26—27.
- (15) 特维尔斯戈伊等编著, 仇永炎等译. 气象学教程 (第1册). 高等教育出版社, 1958. 165—167.

CHARACTERISTICS OF THE EVAPORATION FOR THE SUMMER DROUGHT AND FLOOD PERIODS IN THE YELLOW RIVER VALLEY

Zhu Chaoqun Gao Guotong

(Department of Atmospheric Sciences, Nanjing University)

Subject terms: Yellow river valley; Drought/flood in summer; Evaporation from land

Abstract

In this paper, an empirical equation for estimating the quotient between the monthly sums of sensible and latent heat fluxes is proposed on the basis of the heat balance data measured during 1958—1960 period at Beijing and Zhenzhou. And the monthly evaporation sums for the months from May to August are estimated with the equation by using an eight-year routine meteorological data in the Yellow River Valley. Finally the relationship between the monthly evaporation and precipitation deviation (%) is discussed. The main results are found as following:

1) The errors of the total evaporation in summer computed with Eq. 5 and Eq. 7 to those obtained from «Atlas of water Climatology of China» are about 10% for most of the stations in Tab. 2.

2) The monthly evaporation amounts for the drought years (1972, 1975, 1986) range from 12.6 to 30.1 $\text{KJ} \cdot \text{cm}^{-2}$ and those for the flood year (1988) is from 14.2 to 25.1 $\text{KJ} \cdot \text{cm}^{-2}$.

3) The summery evaporation amounts in the drought year are greater than that in flood year in area 1, but on the contrary, those for the drought year in area 3 are less.

4) The evaporation amounts in summer increase with increasing precipitation sums for the drought year, but do not show consistent trend for the flood year. This is because the effects of precipitation deviation on evaporation in the eastern part of the studied area are different from those in the western part for the flood summer.