

## 气温增加对长江流域参照蒸散发的影响研究\*

王加虎<sup>1</sup>, 郝振纯<sup>1</sup>, 姜彤<sup>2</sup>, 施雅风<sup>2</sup> 曾涛<sup>1</sup>

(1: 河海大学水资源开发教育部重点实验室, 南京 210098;

2: 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008)

**提 要** 本文以联合国粮农组织推荐的改进彭曼-蒙特斯公式为基础, 通过日气温计算年蒸发总量并验证, 用典型年预测全流域年平均气温增加时, 参照蒸散发的变化情况。研究表明: 长江流域的年蒸发量将随年平均气温的上升而增加; 上游增幅大于中下游, 各月增幅相近; 气温增幅的年内分布不容忽视, 考虑到年内气温不等量增长后的计算结果相对更为合理。研究结果表明: 当流域年平均气温升高 $1^{\circ}\text{C}$ 时, 流域上、中下游参照蒸散发分别将增加5%和4%。研究中未考虑气温日较差的变化。

**关键词** 气温增加 参照蒸散发 长江流域

**分类号** P423

随着人口的增加和社会经济的发展, “温室效应”将导致全球平均气温的升高。未来温度升高, 水循环加快, 将会改变水资源在时空上的分布, 从而影响水资源系统的规划设计、运行管理等<sup>[1]</sup>。水是生物维持生命的基本要素, 而蒸发则是生物赖以生存的下垫面丧失水分的重要过程, 在陆面水文循环中有举足轻重的作用。

气候学家已经提出多种全球气候模型 (Global Climate Models) 和通过环流模型 (General Circulation Models) 来模拟全球气候的变化趋势。但是受现有科技水平和资料的限制, 目前仅能给出大尺度的月平均气温和降水情景。相对于气温来说, 降水与蒸发的变化与水资源研究的关系更加明晰, 因此有必要明确蒸发在温度增加时的变化趋势<sup>[2]</sup>。目前, 各种气候变化模型计算的结果相差很大, 但结论基本趋于一致: 当大气中  $\text{CO}_2$  浓度倍增时, 全球温度将上升 $1\text{--}4^{\circ}\text{C}$ <sup>[3]</sup>。本文按照温度升高趋势, 重点研究四种升温幅度 (分别为:  $0.5^{\circ}\text{C}$ 、 $1.0^{\circ}\text{C}$ 、 $1.5^{\circ}\text{C}$ 、 $2.0^{\circ}\text{C}$ ) 下, 长江流域的蒸发变化。

表征蒸发的量包括水面蒸发、陆面蒸发等多种。计算水面蒸发的常用方法包括 Penman、Morton、Thorntwaite 等多种<sup>[4-5]</sup>, 相比而言, 前两种方法考虑的气象因素较多, 从理论上讲, 计算结果相对更为可靠<sup>[6]</sup>。通常的蒸发是指一个区域内各种下垫面条件下的总蒸发, 不仅包含气象因素, 还要考虑地表植被、土壤供水等下垫面因素<sup>[7]</sup>, 研究时需要考虑的不确定因素很多, 而且未来的下垫面情景预测非常困难, 因此本文的研究的重点是仅考虑气候因素的参考作物蒸发蒸腾量, 在温度升高时的变化趋势, 它接近于水面蒸发, 简称为参考蒸散发, 也常被称做蒸发能力、蒸发力或可能蒸散发量<sup>[8-9]</sup>。

\*国家重点基础研究发展规划研究项目 (G199043400), 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-331) 和中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新工程所专项基金 (S220007) 联合资助。  
2003-11-10 收稿; 2004-12-20 收修改稿。王加虎, 男, 1975 年生, 博士生。

本文使用 FAO (联合国粮农组织) 推荐的改进彭曼-蒙特斯公式<sup>[10]</sup>作为参照作物蒸发蒸腾量的计算方法<sup>[11]</sup>, 它不仅有整套的计算和简化处理方法, 便于在全球范围内相互比较, 而且可以直接考虑土壤类型、植被等因素计算广义蒸发, 便于下一步的研究. 所以尽管成熟的水面蒸发计算方法很多, 本文仍然选用参考蒸散发作为研究对象的主要原因.

## 1 实测资料分析

随着气温的增加, 分子运动变得活跃, 能量交换也相应加剧, 导致蒸发和降水都相应增加. 为了定性得到蒸发量随气温增加的变化趋势, 本文对长江流域均匀分布的 117 个气象观测站 1951-2002 年间气温和 20cm 蒸发皿实测数据进行了分析. 研究中, 长江流域以宜昌为界, 分为长江上游和中中下游地区.

气温-蒸发的关系式中, 以线性关系最为常见, 也可以用其他关系拟合. 因为本文分析的数据中, 年均温度的变化范围不大, 全流域平均  $1.99^{\circ}\text{C}$ , 58% 的测站变幅在  $2^{\circ}\text{C}$  以下, 变幅  $3^{\circ}\text{C}$  以下的测站有 97%, 见表 1, 不同公式的拟合效果没有太明显的差别; 再加上测站较多, 不便于逐站分析比较, 所以对所有测站都统一使用线性的气温-蒸发关系式来拟合.

表 1 1951-2002 年实测年均温度 (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

Tab.1 Statistics of observed annual temperature 1951-2002

项目	上游			中下游			流域平均变幅
	变幅	最大	最小	变幅	最大	最小	
温度	1.91	4.17	1.32	2.09	2.85	1.38	1.99
站点		木里	西昌		常州	平江	

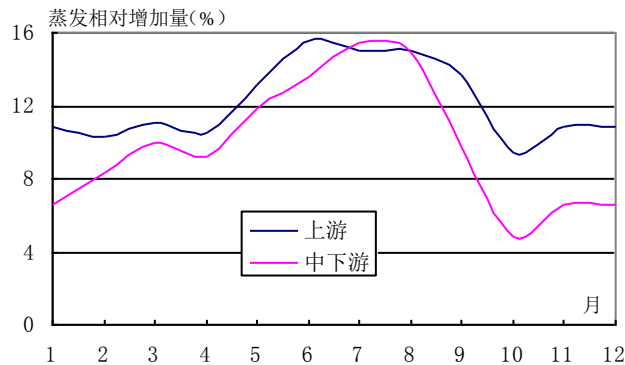


图 1 升温  $1^{\circ}\text{C}$  时上、中下游蒸发相对增加量年内分布

Fig.1 Monthly distribution of relative enhancement of evaporation (%) due to  $1^{\circ}\text{C}$  increase of temperature

首先需要确定分析时使用的时段: 以年为时段单位, 117 站平均的气温-蒸发相关系数仅为 0.41; 以季节为时段单位, 117 站平均的相关系数为 0.52 (春夏秋冬依次为 0.58、0.71、0.34、0.45); 以月为时段单位, 117 站平均的相关系数为 0.56, 比前两个方案有所提高, 尤其是 5-8 月的相关关系都在 0.7 以上, 但 10-12 月和 1 月的很差, 导致全年平均的相关关系仍然偏低. 如果冬季以季为分析单位, 其他时段以月为分析单位, 这样全年平均的气温-

蒸发相关关系达到 0.6, 勉强合格, 此时长江流域上中下游蒸发在不同温度增幅下的变化趋势表 2.

分析结果表明: 各站蒸发量随温度的变化趋势基本统一, 都是正相关, 只有 9 个测站 (占全部测站的 7.7%) 蒸发量的变化趋势相反, 且主要集中在秋、冬两季, 表 2, 不影响流域上蒸发的总体变化趋势; 上游气温-蒸发的相关关系普遍好于中下游, 单位升温时蒸发量的相对增加量也比中下游大, 图 1; 从年内分布来看, 6-9 月天气较热的时候蒸发量在升温时的相对增加量比较大, 中下游的年内变化更剧烈.

表 2 升温时蒸发相对增加量实测资料分析结果

Tab.2 relative enhancement of evaporation under increasing temperature

时段	上游					中下游				
	相关系数	四种方案下蒸发相对增加量 (%)				相关系数	四种方案下蒸发相对增加量 (%)			
		$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$		$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$
2 月	0.66	5.1	10.3	15.4	20.5	0.51	4.2	8.3	12.5	16.7
3 月	0.69	5.6	11.1	16.7	22.3	0.58	5	10	15	20
4 月	0.68	5.3	10.5	15.8	21.1	0.53	4.6	9.2	13.7	18.3
5 月	0.72	6.6	13.1	19.7	26.3	0.7	5.9	11.8	17.7	23.6
6 月	0.73	7.8	15.6	23.4	31.2	0.69	6.8	13.6	20.4	27.3
7 月	0.7	7.5	15	22.5	29.9	0.83	7.7	15.5	23.2	31
8 月	0.74	7.5	15	22.5	30	0.78	7.5	14.9	22.4	29.8
9 月	0.64	6.9	13.7	20.6	27.5	0.52	4.9	9.8	14.6	19.5
10 月	0.45	4.7	9.4	14.1	18.8	0.21	2.4	4.8	7.3	9.7
冬季	0.53	5.4	10.8	16.1	21.5	0.33	3.3	6.6	9.9	13.2
年均	0.63	6.1	12.2	18.3	24.3	0.53	4.9	9.8	14.7	19.6

表 3 实测资料分析结果中蒸发-温度负相关的测站 (单位: %/°C)

Tab.3 Negative correlation of temperature and evaporation

测站名称	逐季节拟合				逐年拟合
	春	夏	秋	冬	
常州			-2.87	-3.12	
东山				-3.32	
东台			-9.41	-0.62	
广水					-39.19
景德镇				-0.79	
南岳			-19.42		-7.12
平湖			-0.86	-2.89	
五峰					-7.72
中甸		-8.96	-4.41		-77.89

## 2 参照蒸散发的计算及简化方法

影响蒸发的因素很多,包括气温、辐射、水汽梯度等,要分析温度与蒸发的相关关系,必须先尽量剔除或削弱温度以外因素的影响,或者建立一个温度与蒸发之间比较直接的关系. FAO 推荐的参照蒸散发计算方法中,需要最高、最低气温;湿度;最大、最小相对湿度;风速和日照.考虑到实际应用时,往往很难包含全部的参数数据,FAO 推荐了一整套资料缺测条件下的简化方法,该方法需要的最小资料是测站位置(经度、纬度、海拔)和最高、最低气温资料<sup>[12]</sup>.这正符合了本文研究的需要:用气温来拟合对蒸发有明显影响的其他气象因素,从而得到气温与蒸发之间更直接的关系以进行分析.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)} \quad (1)$$

当资料缺测时,FAO 推荐对几个影响蒸发的主要因素做如下处理:

(1) 土壤热通量:它反映了计算单元下边界的能量交换,由于土壤温度滞后于空气温度,所以计算时应考虑前一段时期的温度状况.当计算时段  $\Delta t$  超过一天时,辐射的影响深度  $\Delta z$  决定于时段长度,几天以内  $\Delta z$  只有 0.1-0.2m,几个月时  $\Delta z$  或许可以达到 2m.当  $\Delta t$  为 1-10d 时,  $G$  相对很小,可以忽略.

(2) 大气压:FAO 推荐公式中,使用海拔推测大气压.经学者比较,在  $ET_0$  计算时使用海拔换算的大气压与使用实测大气压,二者对结果的影响很小.

(3) 日照:当日照资料缺乏时,FAO 推荐用公式 2 计算短波辐射,该公式引入了一个大水体对温度影响的修正系数  $k_{R_s}$ ,FAO 推荐在内陆地区(气温不受大水体影响)取 0.16;沿海地区取 0.19,不适用于海岛,且计算的  $R_s$  不得大于  $R_{s0}$ ,适用时段应为几天或更长.

$$R_s = k_{R_s} \sqrt{T_{\max} - T_{\min}} R_a \quad (2)$$

郝振纯等研究发现当进行逐日计算时,  $k_{R_s}$  不仅与大水体的位置有关,还与季风、地形等有关,是一个与时间和区域都相关的值,其变幅也超出了 FAO 推荐的范围,约为 0.11-0.28,并给出了逐月平均的  $k_{R_s}$  在全国的分布数据,作为最小资料时计算  $ET_0$  的依据.

(4) 相对湿度:当资料缺乏时 FAO 推荐用公式 3 计算实际水汽压.在充分灌溉的农田,每日的露点近似最低温度;但在干旱地区露点将比最低温度低 2-3℃;用此式之前需要对照当地数据验证.

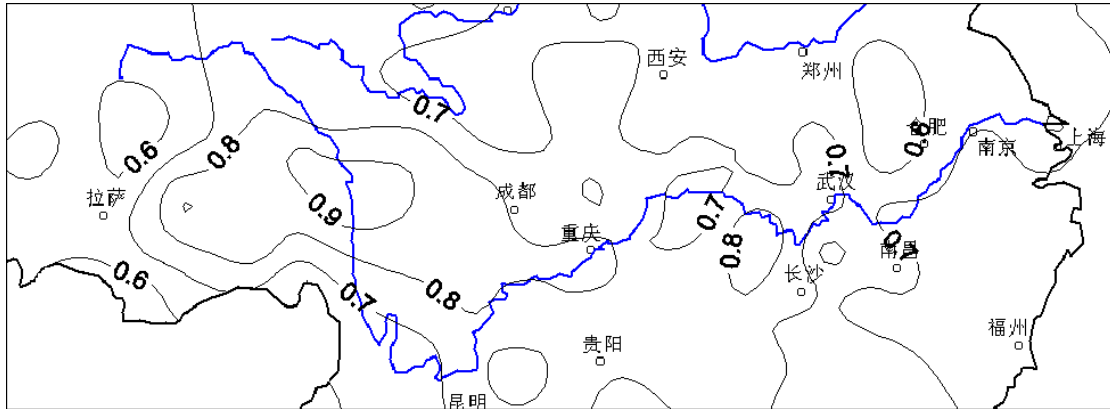
$$e_a = e^s(T_{\min}) = 0.611 \exp\left(\frac{17.27T_{\min}}{T_{\min} + 273.3}\right) \quad (3)$$

郝振纯等引入了变量  $dT_{\text{dew}}$  来描述不同地区露点与最低温度的差值,并通过多年实测资料,得到  $dT_{\text{dew}}$  在全国的逐月分布数据,作为最小资料时计算  $ET_0$  的依据.

(5) 风速:当资料缺乏时 FAO 推荐用平均风速来代替,但要参考地区和季节.本文利用全国多年月平均风速分布资料,作为计算  $ET_0$  的依据.

### 3 参照蒸散发的验证

参照蒸散发计算公式中参考作物的定义是：高 0.12m、表面阻抗 70s/m、反射率 0.23 的作物，近似于高度一致、生长旺盛、完全遮蔽地面、供水充分的草地.参考作物蒸发蒸腾量与实测蒸发的相同点是都反映了影响蒸发的气象因素、变化趋势一致；不同点在于实测



蒸发与水面蒸发之间需要存在蒸发皿换算系数，参照蒸散发更接近于水面蒸发.

图2 全部测站换算系数分布

Fig.2 conversion ratio of evaporation between measured evaporation pan and water surface

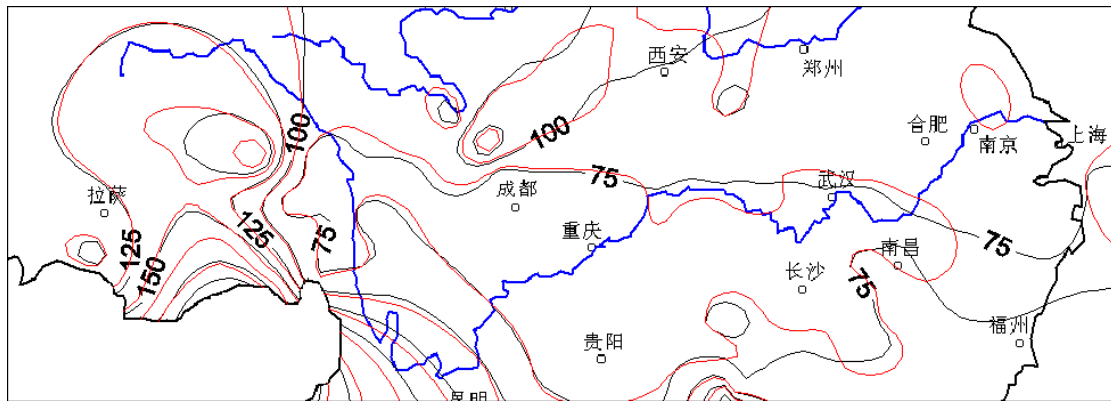


图3 参照蒸散发计算值与实测蒸散发趋势比较——3月

Fig.3 Calculated and measured values of reference evaporation (March)

要利用实测资料对参照蒸散发计算结果进行验证，必须先率定二者之间的换算系数.影响换算系数的因素很多，首先是蒸发皿系数，本文采用的实测蒸发资料是 20cm 蒸发皿的数据，蒸发皿系数（转换到水面蒸发）约为 0.6 左右；其次是参照蒸腾量与水面蒸发的比值；再次就是气温-蒸发计算模式在不同条件下的适应性.

通过资料分析，全部测站平均的实测值到参照蒸散发的换算系数是 0.71，测站的换算系数与位置的关系不太明显.换算系数的大小比较集中，在均值±10%以内有 85%的测站.这说明参照蒸散发计算公式在不同的地区稳定性良好.

通过逐月、逐季节和逐年的计算与实测蒸发量趋势图可以看出：参照蒸散发计算值除以 0.71 后，与 20cm 蒸发皿观测值趋势基本一致，参照图 3-图 6；其中冬季的相似程度最高，随着气温的升高变化趋势的一致性略有下降；上游与中下游之间拟合精度没有太明显的差别.计算公式在年内的不同时间具有较好的适应性.

以上验证表明：FAO 参照蒸散发在最小资料下的计算结果能够较好的反映蒸发力的变化，在不同的地区和时间有很好的稳定性，可以用于气温变化对蒸发力影响的趋势研究.

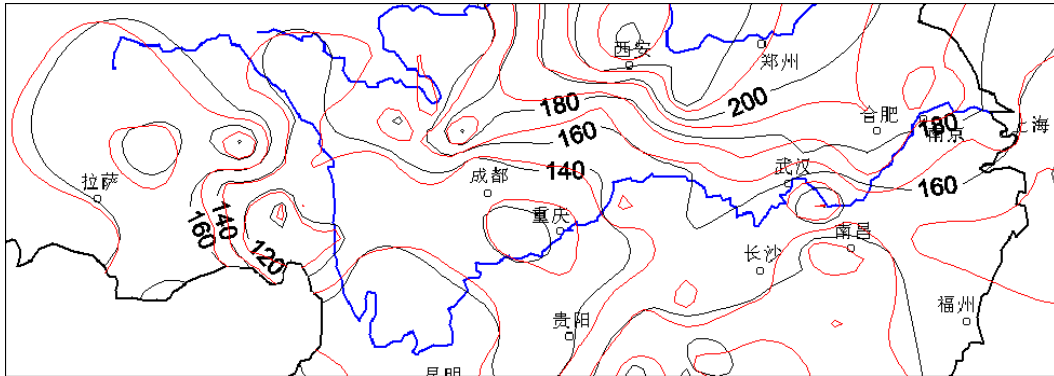


图 4 参照蒸散发计算值与实测蒸散趋势比较——6月

Fig.4 Calculated and measured values of reference evaporation (June)

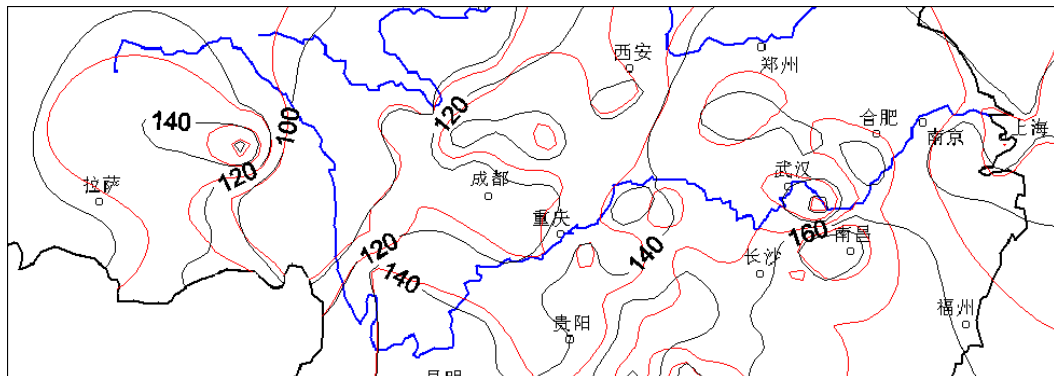


图 5 参照蒸散发计算值与实测蒸散趋势比较——9月

Fig.5 Calculated and measured values of reference evaporation (September)

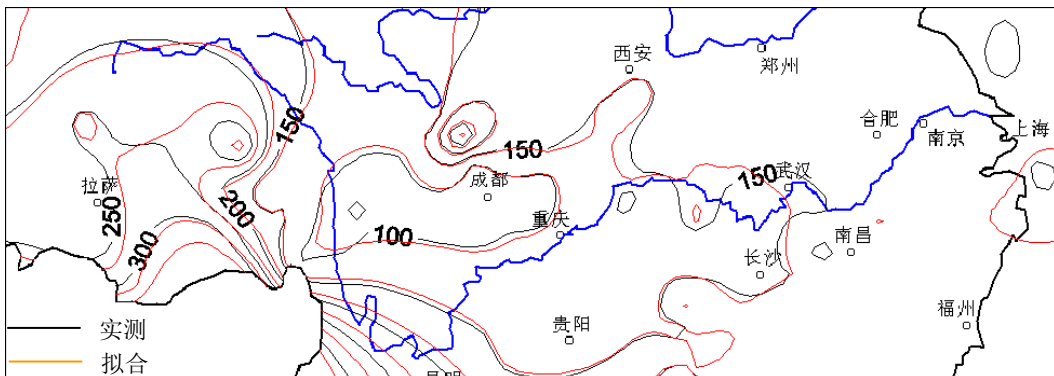


图 6 参照蒸散发计算值与实测蒸散趋势比较——冬季

Fig.6 Calculated and measured values of reference evaporation (Winter)

#### 4 气温等量增长时的参照蒸散发变化

分析气温等量增长时的参照蒸散发变化, 即假定当年平均气温有  $\Delta t$  的增加时, 年内每一天的平均气温和最高、最低气温都随之改变  $\Delta t$ . 计算时, 选择过去最近 10 年 (1992-2002 年) 的实测温度资料作为典型年, 分别计算年平均气温四种增幅下的年参照蒸散发, 以 10 年的平均值来分析不同方案下蒸发总量与典型年的相对变化 (表 4).

从计算结果可以看出: 长江流域年平均温度在同等增幅下, 参照蒸散发的增幅自东向西递增; 从年内分布来看, 6-9 月天气较热的时候蒸发量在升温时的相对增加量比较大, 中下游的年内变化相对更剧烈.

表 4 等量增温时参照蒸散发相对增加量分析结果 (单位: %)

Tab.4 Relative enhancement of reference evaporation under equate increasing temperature

时段	上游				中下游			
	$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$	$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$
2 月	2.2	4.5	6.7	8.3	1.8	3.6	5.1	6.8
3 月	2.3	4.9	6.8	9.6	2.0	4.2	6.3	8.2
4 月	2.1	4.5	6.8	8.6	2.0	4.1	6.1	7.9
5 月	2.9	5.6	8.1	10.7	2.4	5.0	7.3	10.4
6 月	3.2	6.8	9.7	13.9	2.8	6.0	9.1	12.2
7 月	3.0	6.2	9.9	13.2	3.4	6.4	10.0	13.9
8 月	3.1	6.7	9.2	12.4	3.0	6.7	10.0	12.3
9 月	2.8	5.7	8.9	11.1	1.9	4.4	6.5	7.8
10 月	2.2	4.1	6.0	7.6	1.0	2.0	3.0	4.1
冬季	2.3	4.4	7.2	9.0	1.4	2.9	4.2	5.6
年均	2.6	5.2	7.8	10.2	2.0	4.3	6.3	8.4

#### 5 年气温变率分析

研究表明: 从季节分布看, 中国未来 10-50a 的增温趋势是: 冬季比夏季大, 年较差有缩小的趋势. 为了定量得到这一变化趋势, 本文对各站的年气温变率进行了分析, 即比较同一时间段的平均温度与相应的全年平均气温的相关关系, 选用线性公式来表示.

首先需要确定分析时使用的时段长: 以季节为时段单位, 117 站平均的相关系数为 0.65 (春夏秋冬依次为 0.72、0.51、0.63、0.72); 以月为时段单位, 117 站平均的相关系数仅为 0.48, 且每个月的相关性都比较差. 这一方面是因为年平均气温变化幅度很小; 另一方面研究选取的时间段越短, 随机性的干扰越大, 因此本文以季节为时间单位进行年气温变率分析. 以重庆站春季为例, 把 1951-2002 年的春季平均气温与相应的年平均温度点图, 拟合趋势线后得到斜率为 1.44, 即认为在该站当年平均温度增加 1℃时, 春季要增温 1.44℃. 全部测站的分析统计结果表 5.

分析结果表明：当年平均气温增加时，天气热的时候（夏、秋）增温幅度小于年均增温，天气冷时（冬、春）增温幅度大于年均增温，全流域平均值的年内分布中，增温幅度的差异高达 1.09 倍，这充分说明增温幅度的年内分布不容忽视.对于不同地区来说，相同季节的地区差异也非常明显：在春、冬季从沿海到内陆逐渐增加（图 7）；夏、秋季沿纬度方向增加的趋势更加明显（图 8）。

表 5 年气温变率分析统计

Tab.5 Variability of annual temperature

时段	上游		中下游		全流域	
	相关系数	增长率	相关系数	增长率	相关系数	增长率
春	0.65	1.11	0.66	1.09	0.65	1.10
夏	0.50	0.69	0.42	0.62	0.46	0.66
秋	0.58	0.87	0.57	0.86	0.57	0.87
冬	0.66	1.33	0.66	1.43	0.66	1.38
年均	0.60		0.58		0.59	

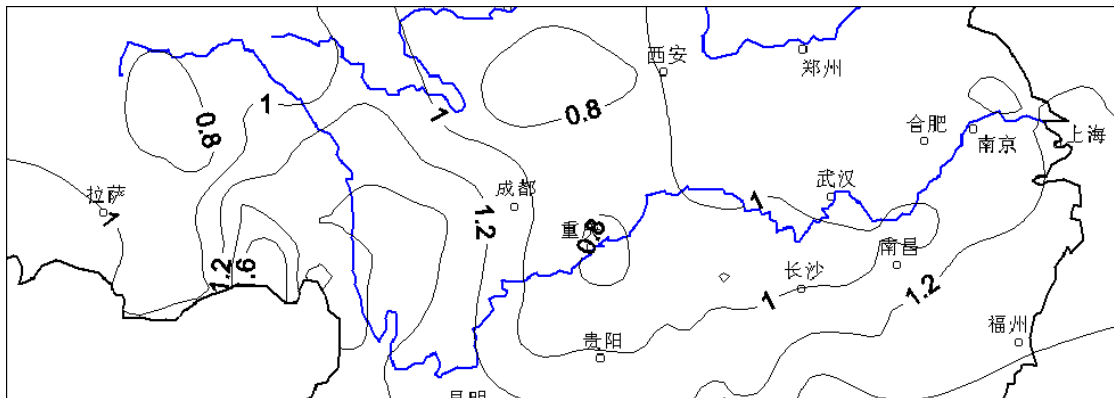


图 7 当年均气温升高 1°C 时，春季气温增加量分布（单位：°C）

Fig.7 Temperature enhancement in Spring under increasing annual temperature of 1°C

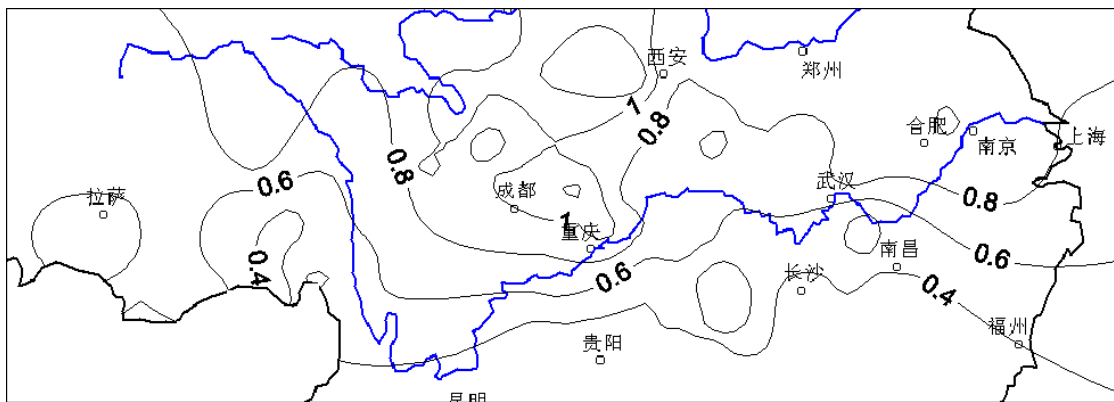


图 8 当年均气温升高 1°C 时，夏季气温增加量分布（单位：°C）



Fig.8 Temperature enhancement in Summer under increasing annual temperature of 1°C

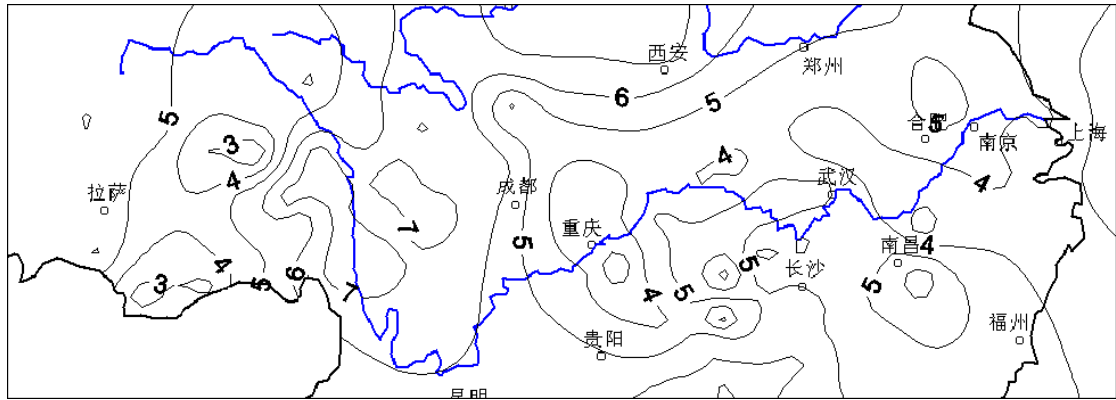


图9 年均升温 1°C 时, 3 月的蒸发量增幅分布

Fig.9 Temperature enhancement in March under increasing annual temperature of 1°C

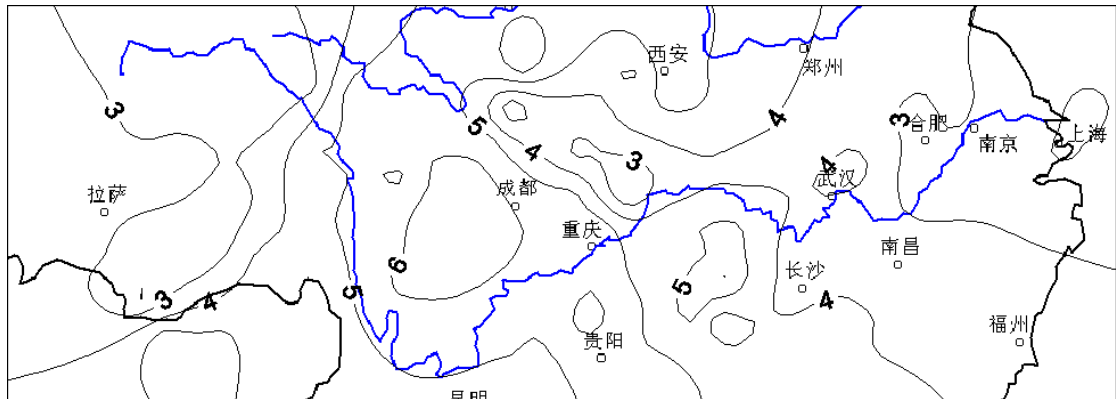


图10 年均升温 1°C 时, 6 月的蒸发量增幅分布

Fig. 10 Temperature enhancement in June under increasing annual temperature of 1°C

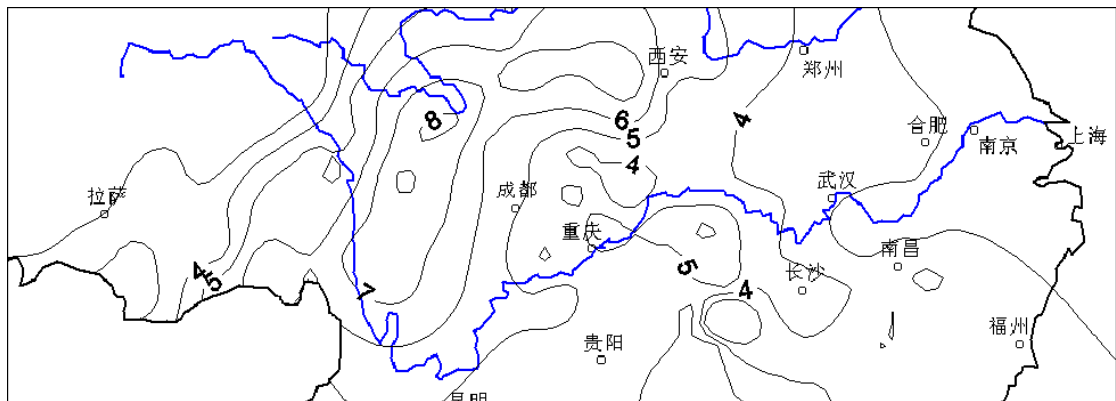


图11 年均升温 1°C 时, 9 月的蒸发量增幅分布

Fig. 11 Temperature enhancement in September under increasing annual temperature of 1°C

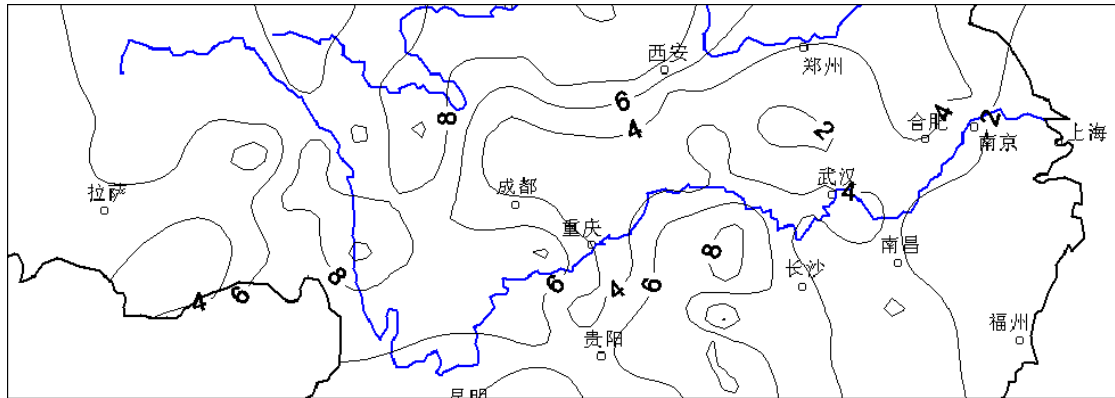


图 12 年均升温 1℃时, 冬季的蒸发量增幅分布

Fig. 12 Temperature enhancement in Winter under increasing annual temperature of 1℃

## 6 气温不等量增长时的参照蒸散发变化

本文使用的温度-蒸发计算模式中, 是通过逐日计算再累加的方法来预测年蒸发量的, 在计算不同的增温方案时, 应该考虑年内的温度变化分布. 利用上述的分析结果, 在气温-蒸发计算模式中引入气温变率的年内分布, 即当年平均气温增加时, 按照不同季节调整气温增幅. 典型年和增温方案不变, 以 10a 的滑动平均值来分析不同方案下年蒸发量与典型年的相对变化(表 6).

表 6 不等量增温时参照蒸散发相对增加量分析结果 (单位: %)

Tab.6 Relative enhancement of reference evaporation under non-equate increasing temperature

时段	上游				中下游			
	$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$	$E_{T+0.5}$	$E_{T+1.0}$	$E_{T+1.5}$	$E_{T+2.0}$
2月	2.8	5.1	8.0	10.6	2.1	4.3	6.8	8.7
3月	3.1	5.7	8.7	11.7	2.6	5.4	7.5	10.7
4月	2.8	5.8	8.1	11.2	2.5	4.5	7.1	9.1
5月	2.2	4.4	6.4	8.4	1.8	3.3	5.0	7.0
6月	2.7	5.0	7.9	10.5	2.0	4.0	5.7	8.2
7月	2.3	4.7	7.4	10.2	2.4	4.3	6.7	9.5
8月	3.2	6.1	9.7	12.2	2.9	6.1	9.3	12.5
9月	2.9	5.5	8.7	11.1	1.9	4.1	6.2	8.1
10月	2.0	4.0	5.7	7.4	1.0	2.0	3.0	3.9
冬季	3.3	6.7	10.1	13.2	2.2	4.3	6.7	8.9
年均	2.8	5.5	8.4	11.1	2.2	4.3	6.5	8.7

考虑气温增幅的年内分布后, 单位升温时蒸发量的增加趋势在年内的分布变得平坦, 各月的增幅都比较接近年均值, 不同月份之间的差别变小. 图 9-12 是 3 月、6 月、9 月和冬季 (1、11、12 三个月平均) 的增幅分布图, 从地区分布来看: 各月的分布不尽相同, 但

总体趋势是中游增幅较大, 上游和中下游沿海地区增幅相对较小。蒸发相对增加量与地形、季风的关系还需要更深入的研究。

## 7 结论

本文得到了三种不同方法和条件下蒸发在升温时的变化趋势, 分别是实测资料分析、等量增温和不等量增温时的蒸发相对增加量, 其中后两种方法得出的结果比较接近, 但比实测资料分析出的结果要小得多。

考虑到 20cm 蒸发皿实测数据受所处环境(局地的温度、湿度等)影响比较大, 50a 来, 随着社会经济的发展, 大多数原布设在郊区的站点逐渐城镇包围, 不可避免的受到“热岛效应”等局部人为活动的影响, 从而降低了资料前后的一致性, 因此, 可以认为实测的蒸发资料包含一定下垫面变化的因素在内。此外, 50a 气温资料的有效变化幅度仅有 1-3°C, 如果没有相当高的相关系数, 就进行约 1 倍长度的外推, 这种做法本身就值得商榷。因此本文用实测资料进行气温与蒸发关系的分析, 仅用于得到定性的变化趋势, 得出的定量结果, 因为分析的过程中相关系数偏低, 可信度不高。

通过以上分析可以看出: 长江流域在年平均气温增加时, 年蒸发量也随之增加; 其中上游增幅大于中下游, 不同月份的增幅相近。但要注意增幅均以相对值给出, 如果要得到蒸发的绝对增加量, 还必须考虑各时段多年平均的蒸发量基数; 气温增幅的年内分布不容忽视, 气温不等量增长时的计算结果相对要更合理。

已经有研究表明: 气温的日较差也将随气温的增加而变化。而本文的气温-蒸发计算模式中, 是利用逐日最高、最低气温计算的, 在两类计算方案中, 均假定逐日最高、最低气温的变化规律与日平均气温一致, 这在一定程度上影响了分析结果。在以后的研究中, 日气温特征值的定量变化还需要加强。

致谢 国家气候中心资料室提供了长江流域 117 个气象站的观测数据, 特此致谢。

## 参 考 文 献

- 1 吕新苗 吴绍洪 等. 全球环境变化对我国区域发展的可能影响评述. 地理科学进展. 2003. 22(3)
- 2 郭生练. 气候变化与水面蒸发计算. 武汉水利电力大学学报, 1994, 27(1)
- 3 IPCC. Climate Change 2001: Impacts, Adaptation & Vulnerability. Cambridge: Cambridge University Press, 2001
- 4 钱学伟, 李秀珍. 陆面蒸发计算方法述评. 水文, 1996, 6
- 5 Doorenbos J, Pruitt W O. Guidelines for predicting crop water requirements, Irrigation and Drainage Paper 24, Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1975:179
- 6 Burman R D, Wright J L, Jensen M E. Changes in climate and estimated evaporation across a large irrigated area in Idaho. *Trans ASAE*, 1975, 18 (6): 1089-1091, 1093
- 7 Jensen M E, Burman R D, Allen R G. (ed). Evapotranspiration and Irrigation Water Requirements. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practices No. 70. *Am Soc Civil Engrs*, New York, 1990: 360
- 8 李爱贞, 刘厚凤编著. 气象学与气候学基础. 气象出版社, 2001
- 9 邱新法, 曾燕等. 陆面实际蒸散研究. 地理科学进展, 2003, 22: (2)
- 10 Penman H L. Vegetation and hydrology. Tech Comm No. 53, Commonwealth Bureau of Soils, Harpenden, England. 1963:125
- 11 Allen R G, Smith M, Perrier A, *et al.* An update for the definition of reference evapotranspiration. *ICID Bulletin*, 1994, 43(2):

1-34

12 Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage paper 56

## Study on Reference Evaporation in the Yangtze River Catchment under Increasing Temperature

WANG Jiahu<sup>1</sup>, HAO Zhenchun<sup>1</sup>, JIANG Tong<sup>2</sup>, SHI Yafeng<sup>2</sup> & ZENG Tao<sup>1</sup>

(1: *Water Resources Development & Utilization Laboratory, Hehai University, Nanjing 210098, P.R.China*

2: *Nanjing Institute of Geography and Limnology, CAS, Nanjing 210008, P.R.China; )*

### Abstract

A method based on Penman-Monteith equation recommended by FAO is established in this paper to calculate total reference evaporation of year through daily temperature. After being validated, the method is used to get the change of Yangtze River's reference evaporation under increasing temperature. The study shows: Reference year-evaporation will enhance together with temperature. The relative enhancement in upper reaches of the Yangtze river is bigger than in middle and lower reaches of the Yangtze. The relative enhancement is similar in different month. The distributing of temperature enhancement in a year shouldn't be omitted and the result under this circs is more accurate. The relative enhancement of reference evaporation by 1°C is about 5% in upper reaches of the Yangtze river and 4% in middle and lower reaches.

**Keywords:** Increasing temperature, reference evaporation, Yangtze River