

文章编号: 1673-1719 (2005) 03-0099-07

长江流域 1961—2000 年蒸发量变化趋势研究

王艳君^{1,2,3}, 姜彤¹, 许崇育⁴, 施雅风^{1,5}

(1 中国科学院 南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008; 2 中国科学院研究生院, 北京 100039; 3 中国气象局 气候研究开放实验室, 北京 100081; 4 Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Oslo N-0316, Norway; 5 中国科学院 寒区旱区环境与工程研究所, 甘肃 兰州 730000)

摘要: 利用长江流域 115 个气象站点 1961—2000 年的观测数据, 计算了各站点的参照蒸发量和实际蒸发量, 并进行了 20 cm 蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量时空变化趋势分析。结果表明, 近 40 a 来, 长江流域蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的年平均变化均呈现显著下降趋势。就季节平均变化而言, 春季和秋季, 三者的变化趋势都不明显, 而夏季三者均具有显著的下降趋势, 冬季蒸发皿蒸发量和参照蒸发量均显著下降, 实际蒸发量却明显上升。蒸发量的变化趋势具有空间分布差异, 长江流域中下游地区蒸发量的变化趋势明显比上游地区显著, 尤其表现在夏季。尽管近 20 余年长江流域气温不断升高, 但太阳净辐射和风速的显著下降, 可能是导致蒸发量持续降低的主要原因。

关键词: 蒸发皿蒸发量; 参照蒸发量; 实际蒸发量; 时空分布; 长江流域

中图分类号: P461 **文献标识码:** A

1 引言

20 世纪是全球近千年来增暖幅度最显著的时期, 政府间气候变化专业委员会 (IPCC) 第三次评估报告指出, 21 世纪全球气候将继续变暖^[1]。随着全球气温升高, 水循环加快, 将改变全球水资源时空分布, 进而影响到生态环境和社会经济的发展^[2]。蒸发量既是地表能量平衡的重要组成部分, 又是水量平衡的重要组成部分^[3], 是决定天气与气候条件的重要因子, 在全球水循环和气候演变中具有举足轻重的作用。世界上凡有人口分布的绝大多数地区, 蒸发量在降水中所占的比例均超过径流, 全球陆地表面的蒸发量约是降水量的

60%~65%, 而径流约占降水量的 35%~40%^[4]。

蒸发量是指通过土壤-空气、水-空气或植被-空气界面进入到大气中的水量。蒸散量经常与蒸发量一词互换使用, 但前者更强调的是通过植被-空气界面进入到大气中的水量。潜在蒸发量是指充分供水下垫面 (即充分湿润表面或开阔水体) 蒸发/蒸腾到空气中的水量, 又称可能蒸发量或蒸发能力。实际蒸发量是指由下垫面实际进入大气中的水量。参照蒸发量是指具有固定作物高度 (0.12 m)、冠层阻力 (70 s/m) 和反照率 (0.23) 的假想作物蒸散到大气中的水量。

长江流域是我国社会经济高度发达的地区, 同时, 长江流域的洪涝灾害也是我国为患最严重、发

收稿日期: 2005-05-10; 修订日期: 2005-06-16

基金项目: 中国气象局气候变化专项 (CCSF2005-2-QH4); 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX3-SW-331); 中国科学院南京地理与湖泊研究所知识创新工程所长专项基金 (SS220007) 资助

作者简介: 王艳君 (1978-), 女, 博士生, 主要从事城市化与洪水研究. E-mail: yjwang78@163.com

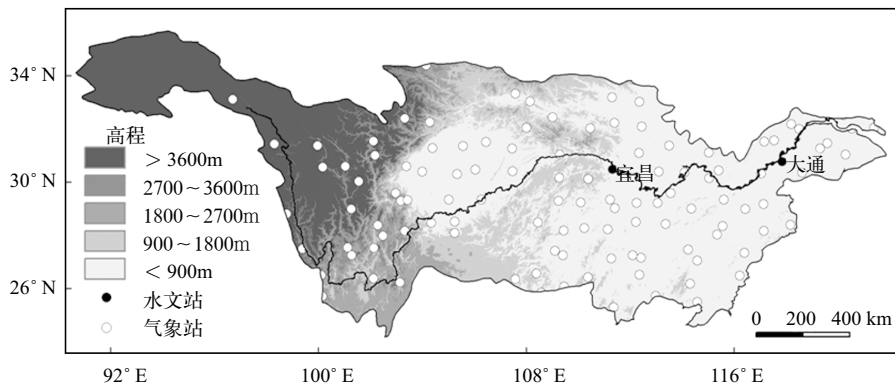


图1 长江流域地形及气象站与水文站点的分布

Fig.1 The topography of the Yangtze River Basin and locations of the observatory stations

生频率最高、抗灾难度最大、迄今无法根治的自然灾害。据统计, 1950–1990年间, 年年有灾, 平均每年受灾人口达1787万人, 死亡2518人, 直接经济损失17.74亿元^[5]。近些年长江流域洪灾频发, 20世纪90年代以来, 发生了6次大洪水事件, 这除了由于湖泊围垦造成蓄洪功能减弱等因素外, 也与全球变暖、水循环加快引发长江流域气候、水文特征的变化有关。张家诚等^[6]指出长江中游水田广布、河渠纵横、蒸发水源充足。Hu Qi^[7]利用修正的彭曼公式计算了1954–2000年长江夏季实际蒸发量, 认为长江中下游夏季蒸发呈显著下降趋势。本文以长江流域115个气象站点的日照时间、最高与最低气温、平均气温、水汽压、风速、20 cm 蒸发皿蒸发量等观测数据为基础, 计算了参照蒸发量和实际蒸发量, 分析了长江流域近40 a来的蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的变化趋势。这将有助于更好的理解全球变化的区域响应过程, 同时对长江流域水资源分配和洪水灾害的成因研究也有重要的意义。

2 数据与方法

研究中所用气象观测数据由中国气象局国家气象信息中心气象资料室提供, 其中包括115个均匀分布于长江流域的国家级基准、基本气象站点的日照时间、最高与最低气温、平均气温、水汽压、风速、20 cm 蒸发皿蒸发量等逐日数据。由于三分之

一的气象站点是在20世纪50年代后期才开始有资料记录, 因此所用观测数据时段为1961年1月1日至2000年12月31日。长江干流的宜昌和大通水文站径流资料由长江水利委员会水文局提供。为了便于空间分析, 以宜昌水文站为界, 把长江流域分为上游和中下游地区, 其中上游站点数为44个, 中下游站点数为71个(图1)。

参照蒸发量由联合国粮农组织推荐使用的彭曼–蒙特斯(Penman-Monteith)公式计算^[8], 实际蒸发量由下式计算^[9]:

$$ET_a = 1.251 \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} (R_n - G) - 1.522 \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

式中: ET_a 为实际蒸发量 (mm/d); Δ 为饱和水汽压–温度曲线斜率 (kPa/°C); γ 为干湿表常数 (kPa/°C); R_n 为地表净辐射 (MJ/(m²·d)); G 为土壤热通量 (MJ/(m²·d)); E_a 为干燥力 (mm/d)。

研究数据的均一性采用计算 Von Neumann ratio (N), Cumulative deviations ($Q/n^{0.5}$, $R/n^{0.5}$), Bayesian procedures (U , A) 等三种统计量^[10]的方法, 分别对115个气象站观测数据进行均一性检验。

趋势分析采用Mann-Kendall (以下简称MK)检验和线性回归方法进行。通过反距离权重插值法IDW (Inverse Distance Weighted), 将单站计算的蒸发量值绘制成空间分布图。IDW方法是根据相邻样点的空间相似性原理, 通过对每个单元附近的单站

值计算其平均来估计区域的值。

3 三种蒸发量变化趋势

近 40 a 长江流域不同地区蒸发皿蒸发量 (PE)、参照蒸发量 (ET_r) 和实际蒸发量 (ET_a) 变化趋势的 MK 统计检验结果见图 2。就其年蒸发量变化趋势而言,不论在全流域,还是上游和中下游地区,这三种年蒸发量均呈明显下降趋势。根据对 115 个站点的统计,蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势的站点数为 35 个,呈显著增加趋势的站点数为 12 个;参照蒸发量呈显著下降趋势的站点数为 76 个,呈显著增加趋势的站点数为 6 个;实际蒸发量呈显著下降趋势的站点数为 75 个,呈显著增加趋势的站点数为 7 个。

就其季节变化趋势而言,春季三种蒸发量总体呈现微弱的下降趋势,而蒸发皿蒸发量在上游地区具有显著的下降趋势;夏季除了蒸发皿蒸发量在上游地区呈现微弱的下降趋势外,三种蒸发量总体呈现明显的下降趋势;秋季蒸发皿蒸发量在全流域和上游地区呈现显著下降趋势,在中下游地区下降趋势微弱,参照蒸发量在全流域呈现显著下降趋势,但在上游地区和中下游地区下降趋势不明显,实际蒸发量在全流域及流域上游和中下游地区下降趋势均不明显;冬季蒸发皿蒸发量在全流域及流域上游和中下游地区均呈现显著下降趋势,参照蒸发量在全流域呈现显著下降趋势,但在上游和中下游地区下降趋势微弱,实际蒸发量在全流域和上游地区呈现显著的增加趋势,而在中下游地区呈微弱的增加趋势。

4 三种蒸发量变化趋势的空间分布

长江流域年和夏季蒸发皿蒸发量变化趋势的空间分布见图 3。图中空白部分代表蒸发量变化在统计上无显著意义的地区,斜线所示区域表示蒸发量呈现显著上升趋势,通过了 90% 或者 95% 的显著性检验,灰度所示区域表示蒸发量呈现显著下降趋势,通过了 90% 或者 95% 的显著性检验(下同)。

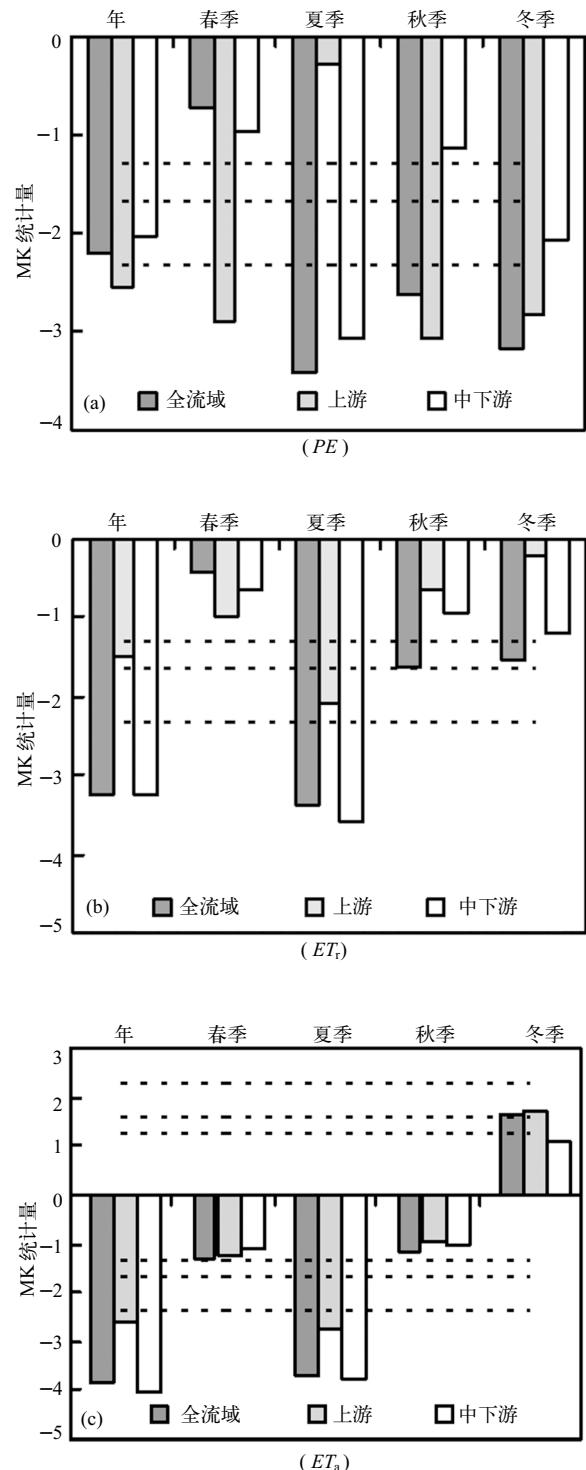


图 2 长江流域蒸发皿蒸发量 (a)、参照蒸发量 (b) 和实际蒸发量 (c) 的 MK 趋势 (虚线分别表示 90%、95%、99% 的显著性水平)

Fig. 2 MK trends of PE (a), ET_r (b) and ET_a (c) in the Yangtze River Basin (The dashed lines denote the threshold of 90%, 95% and 99% significance level)

由图可见,长江流域年(图3a)和夏季(图3b)蒸发皿蒸发量变化趋势的空间分布很相似。二者呈现显著下降趋势的地区主要分布在长江流域上游金沙江水系下游地区、中游汉江水系中游地区以及鄱阳湖水系下游地区、下游干流区;显著上升的地区主要集中在长江源区通天河水系;其他地区均无明显变化趋势。

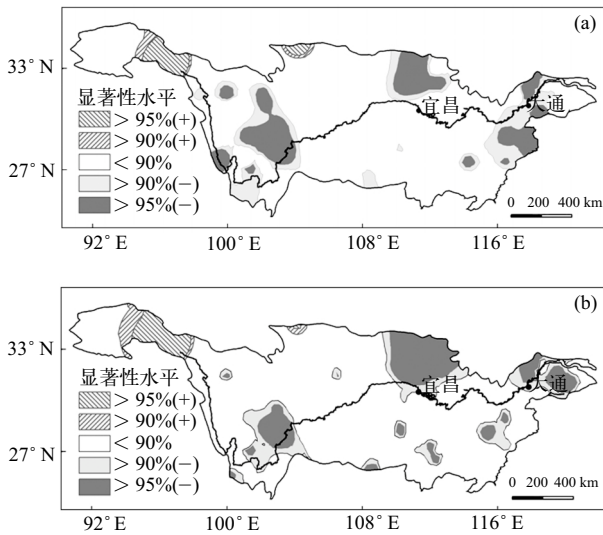


图3 长江流域年(a)和夏季(b)蒸发皿蒸发量(PE)变化趋势的空间分布
Fig.3 Spatial distribution for annual (a) and summer (b) PE in the Yangtze River Basin

长江流域年和夏季参照蒸发量变化趋势的空间分布见图4。由图可知,长江流域大部分地区年(图4a)与夏季(图4b)参照蒸发量均表现为显著下降趋势,其中夏季参照蒸发量呈现显著下降趋势的范围更广。年参照蒸发量显著下降的地区主要分布在长江流域上游干流区的上游地区、岷沱江水系、嘉陵江水系和乌江水系大部、长江中游干流区的中下游地区、洞庭湖水系大部、鄱阳湖水系以及下游干流区的中游地区。而夏季参照蒸发量除了金沙江水系外,其他地区基本都呈现显著下降趋势。

长江流域年和夏季实际蒸发量变化趋势的空间分布见图5。由图可见,年(图5a)与夏季(图5b)实际蒸发量变化趋势的空间分布相似,主要表现为显著下降的趋势,呈现显著下降趋势的地区主要分

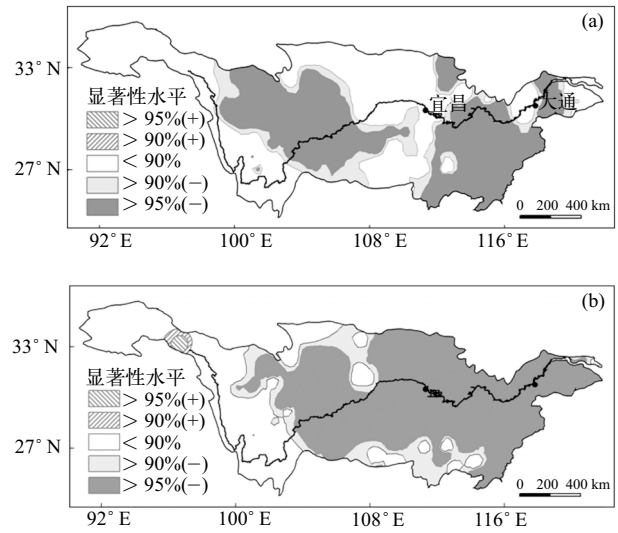


图4 长江流域年(a)与夏季(b)参照蒸发量(ETr)变化趋势的空间分布
Fig.4 Spatial distribution for annual (a) and Summer (b) ETr in the Yangtze River Basin

布在长江流域上游干流区的中上游地区、嘉陵江水系大部、岷沱江水系大部、乌江水系以及中下游地区的绝大部分地区,但夏季实际蒸发量表现为显著下降趋势的范围比年实际蒸发量更广。

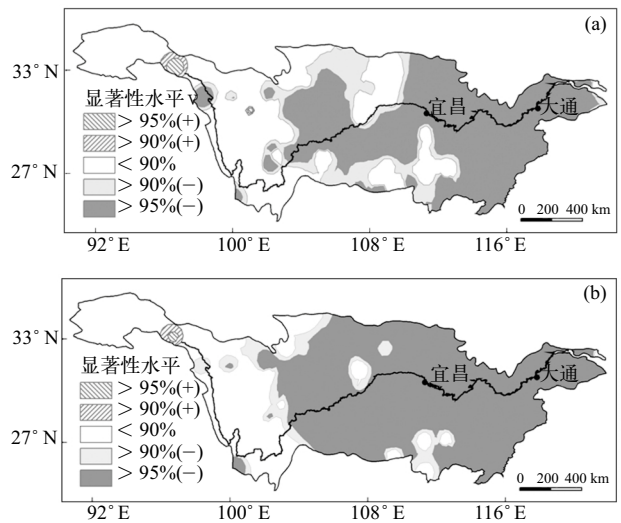


图5 长江流域年(a)与夏季(b)实际蒸发量(ETa)变化趋势的空间分布
Fig.5 Spatial distribution for annual (a) and summer (b) ETa in the Yangtze River Basin

5 与蒸发相关的要素趋势分析

蒸发机理复杂,影响因素多,主要有太阳辐射、气温、水汽压差以及风速等。目前,国内外学者的研究结果^[11-13]认为,尽管全球温度在上升,但蒸发量却在下降,这主要是由于太阳总辐射量下降引起的。本文对长江流域近40 a来的太阳净辐射、气温、水汽压差以及风速等要素进行了变化趋势分析,结果见图6。太阳净辐射(图6a)和风速(图6d)呈现显著下降的趋势,尤其在20世纪90年代;气温(图6b)呈显著上升趋势,在20世纪90年代上升幅度最大;水汽压差变化(图6c)不明显。因此,随着20世纪80年代以来全球变暖的影响,长江流域气温明显升高,但由于太阳净辐射和风速的显著下降,可能补偿了气温升高所引起的蒸发量的增量,从而导致了蒸发量的减少。这与上述国内外的有关研究结论一致。

6 讨论和结论

长江流域1961-2000年的40 a来的降水呈现增加趋势,尤其是中下游地区增加趋势明显^[14],而径流量也呈现增加的趋势^[15],但对二者的趋势进行MK统计分析得到,降水趋势统计量为0.63,而径流趋势统计量为1.07,径流的增加趋势比降水增加趋势明显,即径流增量大于降水增量。因此,根据水量平衡原理,以长江流域大通站以上区域降水量减去大通站径流深得到实际蒸发量(图略),表明40 a来流域实际蒸发量也呈现微弱下降的趋势,这与本文中所计算的实际蒸发量变化趋势一致。

通过对长江流域近40 a来的蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的统计计算,以及太阳净辐射、气温、水汽压差和风速的趋势分析,得到如下结论:

(1) 近40 a来,长江流域蒸发皿蒸发量、参照蒸发量和实际蒸发量的年平均变化均呈现显著下降趋势。就季节平均变化而言,蒸发皿蒸发量和参照蒸发量的变化较一致,春季和秋季均呈不明显的下降趋势,夏季和冬季呈现显著的下降趋势;实际蒸

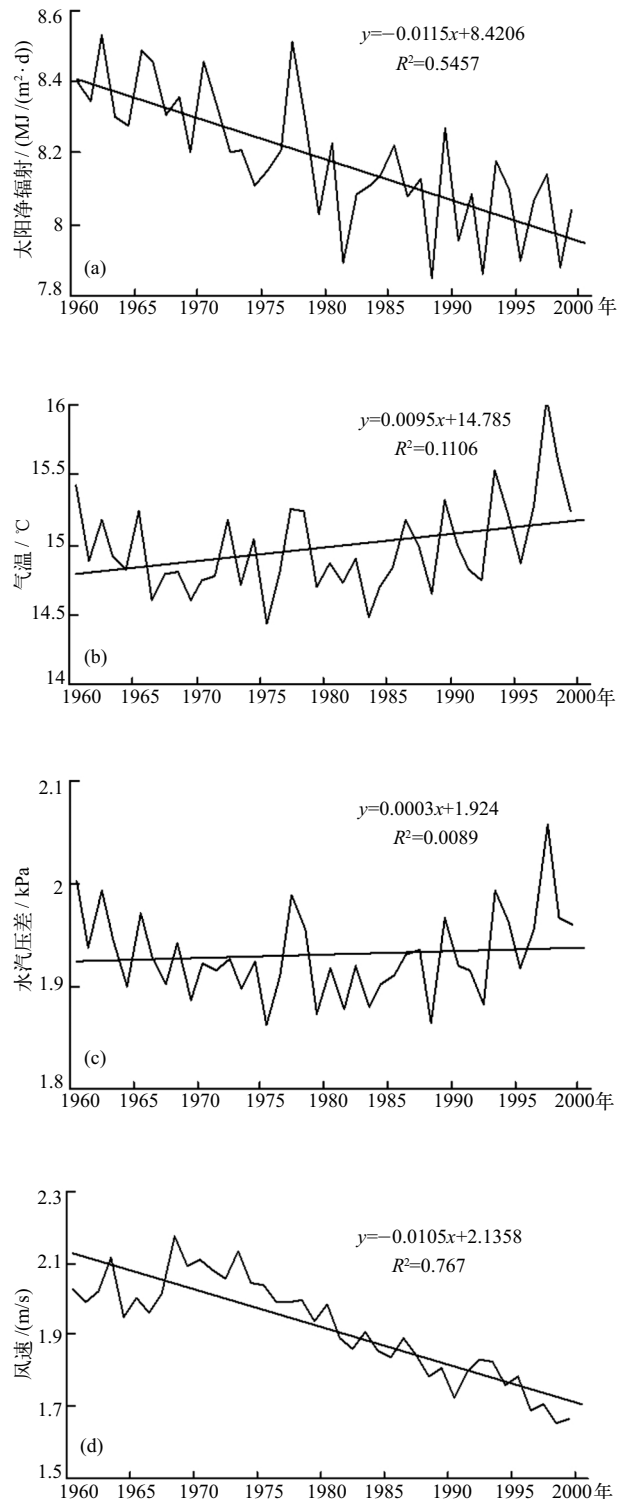


图6 长江流域太阳净辐射(a)、气温(b)、水汽压差(c)以及风速(d)的变化(曲线)及线性趋势(直线)
Fig.6 Variation (curve) and linear trends(straight line) of net radiation (a), air temperature (b), vapor pressure deficit (c) and wind speed (d) in the Yangtze River Basin

发量在春季和秋季变化不明显,夏季显著下降,但冬季明显上升。

(2) 蒸发量的变化趋势具有明显的空间分布差异,长江流域中下游地区的变化趋势显著于上游地区,尤其表现在夏季。

(3) 20世纪80年代以来,长江流域气温不断升高,但由于太阳净辐射和风速的显著下降,抵偿了气温升高所带来的蒸发的增量,反而使蒸发量减少,这也可能是蒸发量下降的主要原因。从水量平衡的角度来说,降水的增量小于径流增量,也证明了蒸发量呈下降趋势。■

参考文献

- [1] Houghton J T, Ding Y H, Griggs D G, *et al.* Climate Change 2001: The Science Basis. Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2001.
- [2] 江涛, 陈永勤, 陈俊合, 等. 气候变化对我国水文水资源影响的研究 [J]. 中山大学学报 (自然科学版), 2000, (增刊2): 151-157.
- [3] 邱新法, 刘昌明, 曾燕. 黄河流域近40年蒸发皿蒸发量的气候变化特征 [J]. 自然资源学报, 2003, 18 (4): 437-447.
- [4] 曾燕. 黄河流域实际蒸散分布式模型研究 [D]. 北京: 中国科学院研究生院博士论文, 2004.
- [5] 长江水利委员会. 长江流域水旱灾害 [M]. 北京: 中国水利电力出版社, 2002. 33-35.
- [6] 张家诚, 林之光. 中国气候 [M]. 上海: 科技出版社, 1985. 223-268.
- [7] Hu Qi. Centennial variations and recent trends in summer rainfall and runoff in the Yangtze River Basin, China [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15 (Suppl.): 97-104.
- [8] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration guidelines for computing crop water requirements [A]. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56 [C]. Rome: FAO, 1998. 15-64.
- [9] Qiu X F, Zeng Y, Miu Q L, *et al.* Estimation of annual actual evapotranspiration with conventional meteorological data [J]. Science in China (Series D), 2004, 47 (3): 239-246.
- [10] Buishand T A. Some methods for testing the homogeneity of rainfall records [J]. Journal of Hydrology, 1982, 58: 11-27.
- [11] Cohen S, Stanhill G. Evaporative climate changes at Bet-Dagan, Israel, 1964-1998 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111 (2): 83-91.
- [12] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107: 255-278.
- [13] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China [J]. International Journal of Climatology, 2000, 20: 381-396.
- [14] Su B D, Jiang T, Shi Y F, *et al.* Observed precipitation trends in the Yangtze River Basin from 1951-2002 [J]. Journal of Geographical Science, 2004, 14 (2): 204-218.
- [15] Shen H Y. The decadal scale variation of rainfall-runoff in the Yangtze River Basin [A]. Jiang T, King L, Gemmer M, *et al.* Climate Change and Yangtze Floods [C]. Beijing: Science Press, 2005. 235-244.

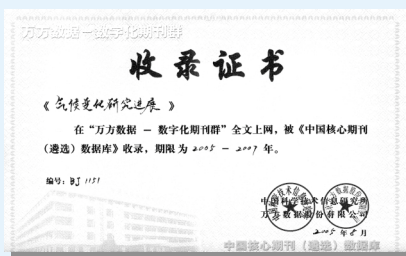
Trends of Evapotranspiration in the Yangtze River Basin in 1961-2000

WANG Yanjun^{1,2,3}, JIANG Tong¹, XU Chongyu⁴, SHI Yafeng^{1,5}

(1 Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing Jiangsu 210008, China; 2 Graduate School of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China; 3 Key Laboratory of Climate Change Research, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 4 Faculty of Mathematics and Natural Sciences, University of Oslo, Oslo N-0316, Norway; 5 Cold and Arid Regions Environmental and Engineering Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou Gansu 730000, China)

Abstract: Based on the measuring data from 115 meteorological stations between 1961 and 2000 in the Yangtze River Basin, pan evaporation (PE), reference evapotranspiration (ET_r) and actual evapotranspiration (ET_a) as well as their trends are calculated and analyzed. The results indicate that significant decreasing trends of PE , ET_r and ET_a are detected in the upper, middle and lower as well as the whole Yangtze River Basin, especially in summer. No significant trends for PE , ET_r and ET_a are detected in spring and autumn. PE and ET_r in winter show significant negative trends, while ET_a shows a significant positive trend in winter. The spatial distribution of this kind of negative trends over the middle and lower reaches of the Yangtze River is more significant than that over the upper reaches. However, at the same time the air temperature shows a significantly increasing trend, which will increase evapotranspiration. A thorough investigation shows that the significant decrease exists in net radiation and wind speed over the Basin, which, in turn, may cause the decrease in evapotranspiration after compensating the increase in air temperature.

Key words: pan evaporation; reference evapotranspiration; actual evapotranspiration; spatial and temporal distribution; the Yangtze River Basin



声明

为适应我国信息化建设,扩大作者与本刊的信息交流渠道,本刊已入网“万方数据—数字化期刊群”,同时被CNKI中国期刊全文数据库收录。所以,凡被本刊录用的文章,将一律纳入以上两个数据库,进入因特网提供信息服务。如果作者不同意文章被收录,请向本刊声明,编辑部将另作处理。本刊所付稿酬包含刊物内容上网服务报酬。

读者可登陆本刊网页了解有关信息:

<http://qhbhyjjz.periodicals.net.cn/default.html>

<http://qhbh.chinajournal.net.cn/>

《气候变化研究进展》编辑部
2005年9月