

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2011.06.007

气候变化下乌江流域蒸散发互补关系变化及成因辨识

赵玲玲^{1 2 3} 陈 喜⁴ 夏 军¹ 郭凤睿⁵

(1.中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环与地表过程重点实验室,北京 100101;
2.河南省濮阳市水利局,河南 濮阳 457000;3.中国科学院研究生院,北京 100101;
4.河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098;
5.海河水利委员会卫河务局,河南 濮阳 457000)

摘要:为了阐明气候变化下乌江流域蒸散发互补关系的变化及其成因,利用乌江思南以上流域 1961—2007 年的水文、气象资料,验证了该区域蒸散发量存在互补关系;采用蒸散发互补关系模型和两参数月水量平衡模型估算该区域蒸散发量,并分析了气候变化下该区域蒸散发互补关系的变化。结果表明:乌江流域蒸散发互补关系显著,基于互补关系估算的该流域 1961—2007 年该区域蒸散发量减少趋势显著,变化率为 1.65 mm/a;实际蒸散发、湿润环境蒸散发和蒸散发能力的显著下降趋势导致了 1961—2007 年该区域蒸散发互补关系表现为具有下降趋势的互补关系。1961—2007 年的年日照时数减少导致太阳辐射能量下降以及年降水量的减少致使可供蒸散发水量减少可能是造成蒸散发互补关系下降趋势的主要原因。

关键词:水资源;蒸散发互补关系;实际蒸散发量;气候变化;南方喀斯特;乌江流域

中图分类号: P426.2 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-1980(2011)06-0629-06

蒸散发既是地表能量平衡的重要组成部分,又是水量平衡的组成部分,而地表热量、水分收支状况在很大程度上决定着天气、气候的变化,进而决定着地理环境的形成和演变^[1]。此外,蒸散发也是水文循环的关键环节,因此蒸散发一直是地学、农学、生物学界的研究热点问题之一。蒸散发量取决于气象条件及下垫面特征,很难通过仪器测量区域蒸散发量,因此间接估算的方法应用较为广泛。

近年来蒸散发估算方法得到很大发展,主要方法有水量平衡法、互补相关理论、SPAC 理论和参考作物蒸发方法、定量遥感估算方法等^[2-4]。因气象因子具有长期观测资料,所以基于气象资料的蒸散发估算方法得到广泛重视。1963 年 Bouche^[5]提出:在 1~10 km² 大而均一的表面,外界能量保持不变,当水分充足时,表面上的实际蒸散发量 E_a 与潜在蒸散发量 E_p 相等。若供水不充分时,则实际蒸散发量减少,其减少率等于潜在蒸散发量的增加率,它们之间的互补关系为

$$E_a + E_p = 2E_w \tag{1}$$

式中 E_w 为湿润环境蒸散发量(E_w 定义为无平流条件下,净辐射能量保持不变,下垫面供水充分时的蒸散发总量)。在 Bouche 提出的实际蒸散发与潜在蒸散发互补关系基础上,根据基于该原理估算蒸散发量的模型有:AA 模型(the advection-aridity model)^[6]、CRAE 模型(the complementary relationship areal evapotranspiration model)^[7]、GG 模型(granger and gray)模型^[8]。近几十年,许多学者利用该类模型估算实际蒸散发量^[9-11]。

本文以贵州省内乌江思南以上流域为研究区,首先验证了研究区存在蒸散发互补关系,在此基础上,运用蒸散发互补关系模型结合水量平衡验证估算实际蒸散发量,并对 1961—2007 年实际蒸散发和蒸散发互补关系的变化趋势及其影响因素进行分析。

1 研究区域及资料

贵州省内乌江思南以上流域位于东经 104°~109°、北纬 26°~29°之间,贵州省西部,气候温暖湿润,属于

亚热带湿润季风气候,雨日较多,且降水集中,夏季降水占全年的45%以上,冬季仅占6%左右.该区域为高原山地地形,海拔在2000m以上,岩溶发育复杂,是分布面积最大的东亚岩溶区域中心,研究区总面积50791 km²,流域内喀斯特面积占70%以上.流域多年降水量1169 mm,多年平均径流深615 mm,多年蒸散发量554 mm.

本文采用的数据包括88个雨量站1973—1983年的逐日降水数据,26个蒸发观测站 $\varnothing$ 80蒸发皿平均年蒸散发量,思南水文站的径流资料及8个气象站点1961—2007年的气象资料.气象站点实测资料包括日最高最低气温、平均气温、相对湿度、风速、日照时数.各个站点的位置分布情况见图1.

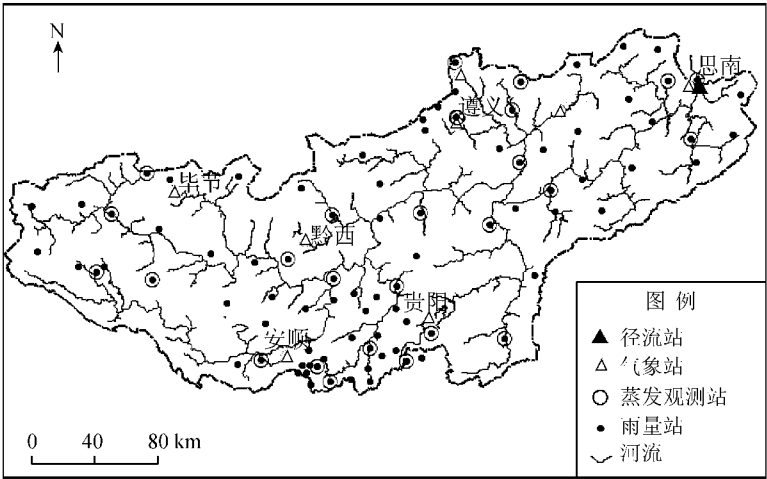
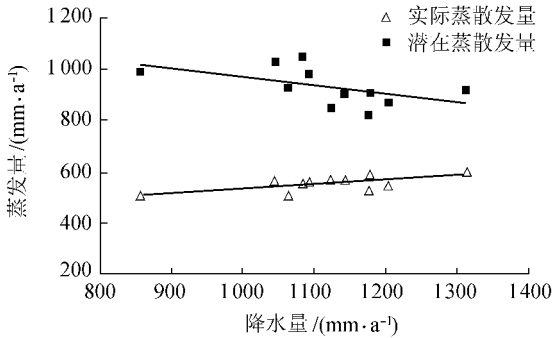


图1 研究区站点分布
Fig. 1 Gauging station distribution in study area

2 蒸散发互补关系的验证

邱新法等^[1]采用 $\varnothing$ 80蒸发皿年蒸散发量作为年潜在蒸散发量指标,用流域年降水量与流域年径流深之差代表流域年实际蒸散发量,以流域年降水量代表流域历年的湿润状况.验证了淮河流域、松花江流域、乌江流域及淮河流域蒸散发存在互补关系.本文采用流域内88个雨量站1973—1983年的降水量均值作为流域面平均降水量,采用26个蒸发观测站 $\varnothing$ 80蒸发皿平均年蒸散发量代表流域潜在蒸散发量,运用两参数月水量平衡模型^[12]估算流域实际蒸散发量,以模型效率系数和水量平衡综合最优为目标对模型进行优化,其中两参数取值为: $C=0.8$; $SC=576$.1973—1983年两参数月水量平衡模型水量平衡系数为0.98,模型效率系数为0.9.用年降水量反映流域湿润情况,得到研究区实际蒸散发量和潜在蒸散发量之间的关系如图2所示.



由图2可以看出,研究区潜在蒸散发量和实际蒸散发量的互补关系明显.事实上,图2表现出的是在一定干湿程度下蒸散发互补关系的部分片段,如果在研究时段内,研究区的干湿程度变化幅度足够大,能够覆盖从极端干燥到充分湿润的所有情形,则蒸散发的互补关系可以在一个流域内得到完整体现^[1].

3 实际蒸散发量估算方法与估算结果

3.1 基于蒸散发互补关系的AA模型

如果蒸散发互补关系式(1)中采用Penman公式计算 E_p , Priestley-Taylor公式计算 E_w ,则得到计算实际蒸散发量计算模型(AA模型):

$$E_p = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} e_a \tag{2}$$

$$E_w = \alpha \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} \tag{3}$$

$$E_a = (2\alpha - 1) \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} \frac{R_n}{\lambda} - \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} e_a \tag{4}$$

式中： Δ ——温度-饱和水气压曲线斜率， $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ； γ ——温度计常数， $\text{kPa}/^\circ\text{C}$ ； λ ——热通量， W/m^2 ； e_a ——空气干燥力， mm/d ； R_n ——地面净辐射能， $\text{MJ}/(\text{m}^2 \cdot \text{d})$ ； α ——经验系数，Priestley 和 Taylor 根据海洋和大范围饱和陆面的观测资料，推荐 α 值为 1.26，即认为海面或饱和陆面大尺度平流在蒸散发影响因素中占 26%。

3.2 模型参数修正及实际蒸散发量计算结果

根据许崇育等^[9-11]的研究结果，参数 α 与区域特征有关，可利用水量平衡原理进一步加以率定。由流域内 1973—1983 年 88 个雨量站的降水资料和思南水文站实测径流资料，运用水量平衡方程得到该流域多年平均实际蒸散发量为 554 mm，在流域中取 11 年水量平衡闭合差为 0 时的 α 值为最优值，此时思南以上乌江流域 AA 模型参数 α 取 1.096。

为了检验 AA 模型估算的实际蒸散发量的可靠性，将 AA 模型估算的实际蒸散发量与两参数月水量平衡模型^[12]估算的实际蒸散发量进行比较。分析显示：两模型估算实际蒸散发量的月相关系数为 0.92；以两参数月水量平衡模型估算的实际蒸散发量为基准值，AA 模型估算的年实际蒸散发量在 1973—1983 年期间的相对误差均在 10% 以内。所以 AA 模型估算的实际蒸散发量是合理可靠的。

图 3 为 AA 模型计算的研究区 1961—2007 年实际蒸散发量变化曲线，区域年蒸散发量拟合的趋势线通过了 0.01 显著性水平检验，呈现显著的下降趋势，乌江流域实际蒸散发量的减少变化率为 1.65 mm/a。

从季节性变化来看（图 4），春季、夏季、秋季蒸散发量呈现减少趋势和冬季呈现增加趋势，夏季和秋季区域蒸散发量下降趋势显著（通过了 0.01 显著性水平检验），变化率分别为 1.08 mm/a 和 0.37 mm/a。冬季增加趋势显著，春季区域蒸散发量减少趋势不显著（未通过 0.05 显著性水平检验）。

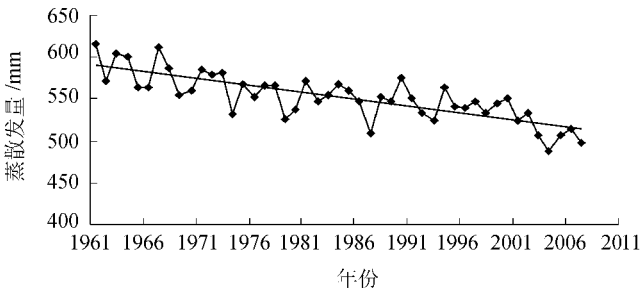


图 3 研究区年实际蒸散发量变化曲线
Fig. 3 Change curve of annual E_a in study area

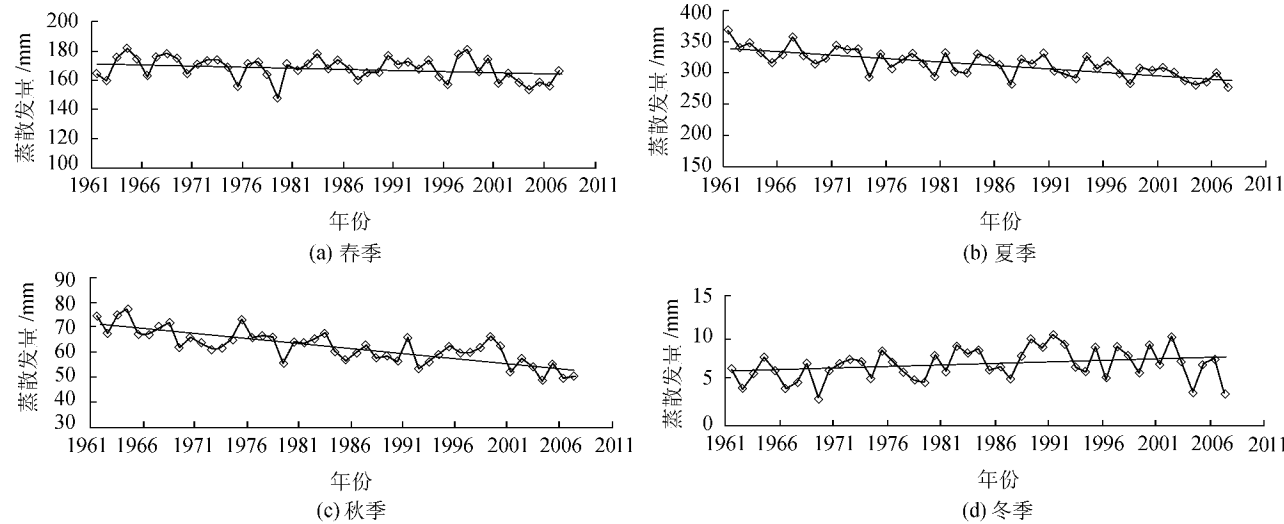


图 4 研究区实际蒸散发量季节变化曲线
Fig. 4 Seasonal change curves of E_a in study area

4 蒸散发互补关系变化及成因分析

4.1 蒸散发互补关系变化趋势

从图5可以看出,由于研究区1961—2007年期间潜在蒸散发量、湿润环境蒸散发量和实际蒸散发量呈下降趋势,下降速率分别为0.43 mm/a、1.05 mm/a和1.65 mm/a.由于潜在蒸散发量和实际蒸散发量的减少,导致该区域蒸散发互补关系在1961—2007年期间呈现明显下降趋势,这种趋势和当下的蒸发悖论理论相一致.根据蒸散发的互补关系,在外界能量保持不变的情况下,随着实际蒸散发量的减少,富余的能量使得潜在蒸散发量增加,从以上3种蒸散发量的变化趋势可以看出,实际蒸散发量减少速率大于潜在蒸散发量的减少速率,这一结果表明,潜在蒸散发量相对实际蒸散发量是在增加,但增加的速率没有减少的快,所以表现为较实际蒸散发量较少的减少.

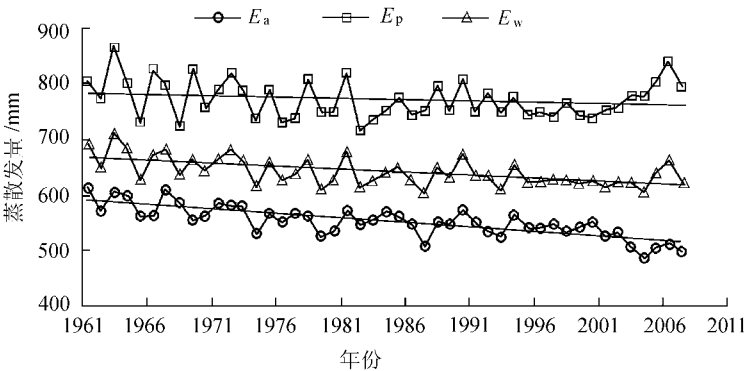


图5 研究区蒸散发互补关系变化趋势

Fig. 5 Change trend of complementary relationship of evapotranspiration in study area

蒸散发量取决于3个条件:供水条件、能量及水气输送的速度(动力条件)^[13].Budyko^[14]发现陆面长期平均蒸散发量主要由大气对陆面的供给(降水量)和需求(净辐射量或潜在蒸散发量)之间的平衡决定,提出了Budyko假设.Yang等^[15-16]基于Budyko假设,提出了蒸散发正比与蒸散发互补的统一解释,即在水分控制条件下存在互补关系,在能量控制条件下存在正比关系.所以研究区蒸散发互补关系的下降趋势主要是由于该区域湿润环境蒸散发量和潜在蒸散发量的减少造成的.

4.2 蒸散发互补关系变化原因分析

为了查明研究区各种蒸散发量的变化原因,首先采用统计的方法分析影响该区域各种蒸散发量的主要气象因子,然后对主要的气象因子的变化趋势进行分析,从而辨析该区域蒸散发互补关系的变化原因.由于蒸散发的动力条件受气温、湿度、风速、饱和差等多种要素的影响,运用统计的方法对影响蒸散发的气象因子(降水量、相对湿度、高温、低温、风速、日照时数)与各种蒸散发量(实际蒸散发量 E_a 、湿润环境蒸散发量 E_w 和潜在蒸散发量 E_p)的相关性进行分析,确定影响该地区蒸散发量的主要气象因子.

由逐月资料分析的气象因子和蒸散发的相关性见表1,可以看出,降水、风速和日照时数是影响蒸散发的主要气象因子.

表1 气象因子与蒸散发量简单相关、偏相关系数

参数	简单相关系数						偏相关系数					
	降水	相对湿度	日照时数	风速	高温	低温	降水	相对湿度	日照时数	风速	高温	低温
E_a	0.78	-0.29	0.76	0.15	0.88	0.87	0.53	-0.07	0.45	0.24	-0.18	0.25
E_w	0.75	-0.35	0.79	0.21	0.90	0.89	0.48	-0.13	0.41	0.38	-0.14	0.25
E_p	0.71	-0.44	0.83	0.26	0.91	0.89	0.47	-0.29	0.43	0.48	-0.16	0.30

用 t 检验方法对影响蒸散发的主要气象因子的变化趋势进行检验,贵州省处于湿润地区,供水条件充足,年雨量略有下降趋势(图6).以日照时数反映太阳总辐射的变化,图6中1961—2007年日照时数呈明显下降趋势, t 检验 p 值为-5.88,显著性水平0.01的临界值为2.67,所以日照时数下降趋势显著.对影响水汽

输送速度的主要影响因素风速进行分析发现,研究区风速变化不显著(未通过 0.05 显著性水平检验),所以该区域各种蒸散发量的减少趋势是由于日照时数减少导致提供给蒸散发的能量减少,最终使区域蒸散发互补关系呈现下降趋势。

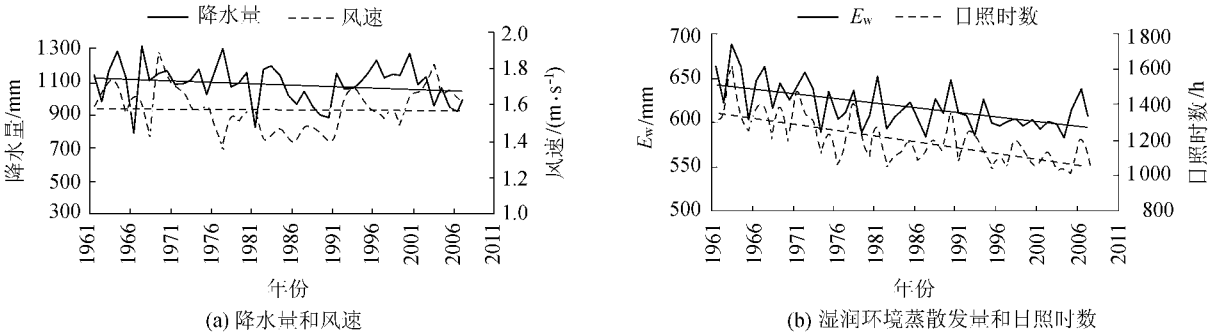


图 6 降水量、风速、湿润环境蒸散发量和日照时数变化曲线

Fig. 6 Change curves of precipitation , wind speed , wet environment evapotranspiration , and insolation duration

5 结 论

- a. 实测数据分析表明,研究区蒸散发存在显著互补关系,采用蒸散发互补关系模型估算实际蒸散发量与两参数月水量平衡模型估算量误差在 10% 以内,月相关系数为 0.92,表明蒸散发互补关系模型在该区域估算量合理可靠。
- b. 1961—2007 年期间,由于湿润环境蒸散发量和潜在蒸散发量呈现显著下降趋势致使研究区蒸散发互补关系表现为带有下降趋势的互补关系。
- c. 对影响蒸散发的气象因子与蒸散发的相关关系分析表明,降水、风速和日照时数与各蒸散发量的关系无论是简单相关还是偏相关都表现出较高的相关性,所以这 3 个因子是影响蒸散发的主要气象因子。
- d. 采用 t 检验法对降水、风速和日照时数的变化趋势分析显示,降水和风速下降趋势不显著,而日照时数下降趋势通过了 0.05 显著性水平检验,表明提供蒸散发能量的日照时数减少趋势明显,所以该区域带有下降趋势的蒸散发互补关系可能是日照时数减少的结果。

参考文献:

[1] 邱新法,曾燕,廖启龙,等.用常规气象资料计算陆面年实际蒸散量[J].中国科学:D 辑,2003,33(3):281-288.(QIU Xin-fa, ZEN Yan, MIU Qi-long et al. Calculated the actual land surface evapotranspiration with conventional meteorological data[J]. Science in China Series D, 2003, 33(3): 281-288.(in Chinese))

[2] 张瑞美,彭世彰,徐俊增,等.不同 e_a 计算方法对 Penman-Monteith 公式的影响[J].河海大学学报:自然科学版,2006,34(6):660-663.(ZHANG Rui-mei, PENG Shi-zhang, XU Jun-zeng et al. Influence of e_a on calculation of reference crop evapotranspiration with Penman-Monteith formul[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2006, 34(6): 660-663.(in Chinese))

[3] 刘晓帆,任立良,袁飞,等.双源蒸散发能力计算模型在半干旱区的适用性[J].河海大学学报:自然科学版,2009,37(2):138-142.(LIU Xia-fan, REN Li-ling, YUAN Fei et al. Applicability of two source potential evapotranspiration model in semiarid area[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2009, 37(2): 138-142.(in Chinese))

[4] 邓世赞,张友静,张子衡,等.基于 IDL 的 MODIS 影像地表蒸散发参数反演系统[J].河海大学学报:自然科学版,2010,38(4):447-451.(DENG Shi-zan, ZHANG You-jing, ZHANG Zi-heng et al. Inversion system of surface evapotranspiration parameters for MODIS data based on IDL[J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences, 2010, 38(4): 447-451.(in Chinese))

[5] BOUCHET R J. Evapotranspiration reele et potentielle, signification climatique[J]. General Assembly Berkeley, Int Ass Sci Hydrol, 1963, 62: 134-142.

[6] BRUTSAERT W, STRICKER H. An advection-aridity approach to estimate actual regional evapotranspiration[J]. Water Resource Research, 1979, 15(2): 443-449.

[7] NASH J E. Potential evaporation and the complementary relationship[J]. Journal of Hydrology, 1989, 111: 1-7.

[8] GRANGER R J, GRAY D M. Evaporation from natural no-saturated surfaces[J]. Journal of Hydrology, 1989, 111: 21-29.

[9] XU Chong-yo, SINGH V P. Evaluation of complementary relationship evapotranspiration models by water balance approach to estimate

- actual regional evapotranspiration in different climatic regions[J]. Journal of Hydrology 2005 308 :105-121.
- [10] 刘绍民,孙睿,孙中平等.基于互补相关原理的区域蒸散量估算模型比较[J].地理学报,2004,59(3):331-340.(LIU Shao-min,SUN Rui,SUN Zhong-ping,et al. Comparison of different complementary relationship models for regional evapotranspiration estimation[J]. Acta Geographica Sinica 2004 59(3):331-340.(in Chinese))
- [11] 尚松浩,孙丽艳,郝增超.互补相关原理在绿洲月蒸发量估算中的应用[J].水文,2008,28(3):67-69.(SHANG Song-hao,SUN Li-yan,HAO Zeng-chao. Using Complementary relationship to estimate monthly evapotranspiration in arid oasis[J]. Journal of China Hydrology 2008 28(3):67-69.(in Chinese))
- [12] 胡庆芳,王银堂,刘克琳等.基于改进的两参数月水量平衡模型的月径流模拟[J].河海大学学报:自然科学版,2007,35(6):638-642.(HU Qing-fang,WANG Yin-tang,LIU Ke-lin,et al. Monthly runoff simulation based on improved two-parameter monthly water volume balance model[J]. Journal of Hohai University :Natural Sciences 2007 35(6):638-642.(in Chinese))
- [13] 芮孝芳.水文学原理[M].北京:中国水利水电出版社,2004:104-105.
- [14] BUDYKO M I. Evaporation under Natural Conditions[M]. Jerusalem: English Translation by Isr Program for Sci Transl,1963.
- [15] YANG Da-wen,SUN Fu-bao,LIU Zhi-yu,et al. Interpreting the complementary relationship in non-humid environments based on the Budyko and Penman hypotheses[J]. Geophysical Research Letters 2006 33(18):L18402.
- [16] YANG Da-wen,SUN Fu-bao,LIU Zhi-yu,et al. Analyzing spatial and temporal variability of annual water-energy balance in non-humid regions of China using the Budyko hypothesis[J]. Water Resources Research 2007 43(4):W04426.

Variation of complementary relationship of evapotranspiration with climate changes and its cause analysis in Wujiang Basin

ZHAO Ling-ling^{1 2 3}, CHEN Xi⁴, XIA Jun¹, GUO Feng-rui⁵

(1. Key Laboratory of Water Cycle and Related Land Surface Processes, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

2. Puyang Municipal Bureau of Water Resources, Puyang 457000, China;

3. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China;

4. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

5. Weihe River Affair Bureau, Haihe River Conservancy Commission of the Ministry of Water Resources of China, Puyang 457000, China)

Abstract: To demonstrate the variation of the complementary relationship of evapotranspiration with climate changes in the Wujiang Basin and to determine its causes, the hydrological and meteorological data of the study area from 1961 to 2007 were studied, and it was verified that there existed a complementary relationship of evapotranspiration in the area. Based on the complementary relationship evapotranspiration model and the two-parameter monthly water volume balance model, the variation of the complementary relationship of evapotranspiration under climate changes in the study area was analyzed. The results indicate an obvious complementary relationship of evapotranspiration in the Wujiang Basin. The estimated evapotranspiration had a significantly decreasing trend in the basin from 1961 to 2007, with a rate of 1.65 mm per year. During this period, the complementary relationship of evapotranspiration in the study area showed a decreasing trend, which was caused by the significant decreasing trends of actual evapotranspiration and wet environment evapotranspiration. The main reason for the decreasing trend of the relationship is the reduction in solar irradiance caused by the shortening of insolation duration and the reduction in the evapotranspiration volume caused by the decrease of annual precipitation.

Key words: water resources; complementary relationship of evapotranspiration; actual evapotranspiration; climate change; South China Karst; Wujiang Basin