文章编号:1674-7070(2012)06-0496-10

近50年来(1960—2007年)长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化的对比

郭媛[1,2]　王艳君[1]　刘长坤[1]

摘要

利用长江流域147个气象站点1960—2007年的地面观测数据,通过计算,对比分析了长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射的变化关系. 结果表明:长江流域近50年来蒸发皿蒸发量变化和太阳辐射变化呈显著正相关关系,二者均呈现显著下降趋势,蒸发皿蒸发量随太阳辐射的变化产生相应波动变化,而且中下游地区蒸发皿蒸发量变化受太阳辐射变化的影响程度更为明显;就季节变化而言,春夏秋冬4个季节长江流域蒸发皿蒸发量变化和太阳辐射变化同样呈现明显下降趋势,春、夏、秋3个季节二者变化关系高度相关,这三季对于流域全年蒸发皿蒸发量减少的贡献也最大;长江流域太阳辐射的显著下降是导致20 cm口径蒸发皿蒸发量持续降低的主要原因之一.

关键词

20 cm口径蒸发皿蒸发量;太阳辐射;气候变化;对比分析

中图分类号 P426.2;P467;P468.2

文献标志码 A

收稿日期 2011-06-23

资助项目 全球变化研究国家重大科学计划(2012CB955903);国家自然科学基金(40701028);国家重点基础研究发展计划项目(2010CB428401)

作者简介

郭媛,女,硕士生,主要从事气候变化对水资源影响的研究. gsguoguo@163.com

王艳君(通信作者),女,博士,副教授,主要从事气候变化对水文水资源影响的研究. yjwang78@163.com

1　南京信息工程大学　遥感学院,南京,210044

2　广西壮族自治区防雷中心,南宁,530000

0　引言

蒸发量是能量平衡和水量平衡的重要组成成分,其作为潜热通量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. 太阳总辐射是地球生态系统最主要和最直接的能量来源,影响到地球上所有的物理、生物和化学过程,也是地表辐射交换中辐射能量的收入部分,对地表辐射平衡、地气能量交换以及各地天气气候的形成都具有决定性意义[1]. 蒸发皿蒸发量作为反映蒸发能力的指标,受辐射、气温、湿度、风速等多种要素的影响. 由于这些要素之间是相互影响和互为关联的,作用机理复杂,对蒸发皿蒸发量下降原因的探求一直是近年来科学界致力解决的问题之一,有不少学者纷纷发表了各自的观点. 过去50年,全球许多地区观测的蒸发皿蒸发量都表现为稳定的下降趋势,如北半球的美国[2]、前苏联[3]、印度[4]、意大利[5]、中国[6-12]、委内瑞拉[13],南半球的澳大利亚[14]和新西兰[15]等. Moonen等[5]从全球温度日较差变小的事实出发,在理论上解释了近年来蒸发皿蒸发量的下降主要是由于太阳辐射量的减少造成. 与此同时,更多的研究表明,在1960—1990年间,地表太阳辐射呈现下降趋势[8-16]. Gilgen等[16]估算结果为太阳辐射在此期间下降了9 $W\cdot m^{-2}$,Romanou等[2]得出下降了7 $W\cdot m^{-2}$的结论.

前期开展的长江流域过去40多年来气温、降水、水面蒸发等气象要素的时空变化趋势分析表明,伴随气温明显上升,长江流域出现了降水增加、水面蒸发量下降等气候变化趋势[17-18],而过去50年以来的上游与中下游主要水文控制站(宜昌站、汉口站和大通站)径流趋势分析也表明,虽然上游径流变化趋势并不明显,但中下游的夏季径流和洪峰流量的增加趋势非常显著[18],这已对长江流域洪涝灾害产生重大影响[18-19],而水面蒸发减弱可能在一定程度上加重了降水增多引起的洪涝灾害威胁. 进一步对水面蒸发的气象影响因素分析表明,长江流域的水面蒸发减弱与太阳辐射和风速的下降密切相关,而与气温的相关性相对较小[20-21],但在蒸发的年内和年际尺度变化上,气温的影响的确也是非常显著的. 因此,随着长江流域气温的显著增暖,大范围水面蒸发量的减少无疑已经对区域水循环和水资源产生了重要影响,同时,大范围蒸发减弱可能已对气温增暖产生了一定贡

献[22]. 由于温室气体的排放,导致空气质量日益下降,直接影响太阳辐射到达地面的传输效果,加之现在城市化效应影响较为严重,长江沿岸自古为城市、人口聚集相对密集的地区,不少城市群落傍江而建,由此引发城市化效应对长江气候的改变.

考虑长江流域研究工作中单独将 20 cm 口径蒸发皿蒸发量变化和太阳辐射变化一起讨论的文章较少,在此背景下,本文拟在前人工作的基础上,结合气象站点资料,并计算太阳辐射量,综合分析近 50 年来在气候变化影响下,长江流域 20 cm 口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射变化之间的相关联系.

1 资料与方法

1.1 资料来源与处理

研究所用资料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 147 个均匀分布于长江流域内及周边地区的国家基准、基本气象站点收集的 20 cm 口径蒸发皿蒸发量、平均气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数、低云量、最高气温和最低气温等数据,气温日较差由最高气温和最低气温计算得到,时段为 1960—2007 年.

年资料统计按照自然年算法. 四季资料以 3—5 月为春季,6—8 月为夏季,9—11 月为秋季,12 月—次年 2 月为冬季来统计. 这些数据中以 20 cm 口径蒸发皿蒸发量的缺失率最高,为 8.4%,其他气象要素的缺失率均在 0.2% 以下,气温的缺失率最小,仅为 0.04%. 为了方便空间分析,以宜昌水文站为界,把长江流域分为上游和中下游地区(图 1). 在分析过程中,上下游地区的 20 cm 口径蒸发皿蒸发量实测站点的缺失值用 SPSS 软件处理,用缺失值相邻点的非缺失值的均数做替代.

1.2 方法

1.2.1 太阳辐射的计算

太阳辐射采用下式进行计算:

$$Q = Q_0(a + bs).$$

经验系数 $a = 0.15$ 和 $b = 0.5$,s 为太阳的单位矢量. 其中,Q_0 的计算公式为

$$Q_0 = \frac{TI_0}{\pi\rho^2}(\omega_0 \sin\varphi \sin\delta + \cos\varphi \cos\delta \sin\omega_0).$$

式中:Q_0 为天文辐射日总量(MJ·m^{-2}·d^{-1});T 为周期(24×60×60 s);I_0 为太阳常数(13.67×10^{-4} MJ·m^{-2}·s^{-1});ρ 为日地相对距离;ω_0 为日落时角(rad);φ 为地理纬度;δ 为太阳赤纬(rad).

日地相对距离 ρ 的计算公式:

$$\rho = \sqrt{\frac{1}{1 + 0.033\cos(2\pi J/365)}}.$$

式中:J 为年内的天数,从 1 月 1 日开始到 12 月 31 日结束,依次从 0 计数至 364.

太阳赤纬公式:

$$\delta = 0.409\sin(0.0172J - 1.39).$$

日落时角公式:

$$\omega_0 = \arccos(-\tan\delta \tan\varphi).$$

1.2.2 分析方法

1) Mann-Kendall 非参数检验方法

本文采用 Mann-Kendall 趋势检验方法,用于时间序列变化趋势的显著性检验[18-19]. 对于统计变量 MK 趋势值,大于 0 时,表示是上升趋势,小于 0 时,表示是下降趋势,当 MK 趋势值的绝对值大于 1.28、1.64、2.32 时,表明分别通过了置信度 90%、95%、

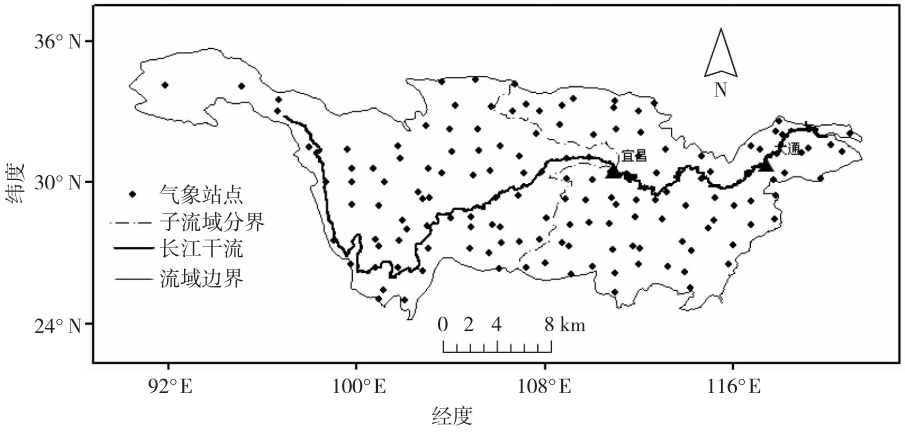


图 1 长江流域及气象站点分布

Fig. 1 Distribution of meteorological stations in Yangtze River basin

99%的显著性检验.

2) 相关分析法

本文用SPSS软件计算长江流域每个气象站点20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射分别在年际变化和季节变化的相关系数,以此分析得出20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射在年际变化和季节变化上的相关程度及其时空分布.

Pearson相关系数界定范围如下:

① $-1 \leqslant r < -0.8$ 为高度负相关;

② $0.8 \leqslant r < -0.5$ 为中度(显著)负相关;

③ $-0.5 \leqslant r < -0.3$ 为低度负相关;

④ $-0.3 \leqslant r < 0$ 为弱负相关;

⑤ $0 \leqslant r < 0.3$ 为弱正相关;

⑥ $0.3 \leqslant r < 0.5$ 为低度正相关;

⑦ $0.5 \leqslant r < 0.8$ 为中度(显著)正相关;

⑧ $0.8 \leqslant r \leqslant 1$ 为高度正相关.

3) 回归分析法

本文通过线性回归分别拟合20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射随着时间变化的关系,分别建立20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射变化的回归模型,得出决定系数R^2,并通过判断模型检验结果的显著性水平,以此判断模型是否具有显著的统计意义.

2 结果分析

2.1 1960—2007年长江流域20cm口径蒸发皿蒸发量的变化特征

2.1.1 20 cm口径蒸发皿蒸发量年际变化

蒸发皿蒸发量是反映蒸发能力的指标,主要受气压、气温、湿度、风力、辐射等气象因素的综合影响.根据统计计算得出长江流域147个站点实测20 cm口径蒸发皿蒸发量年平均数据值,1960—2007年蒸发皿蒸发量的年际变化总体呈下降趋势(图2),气候变化率为-33.88 mm/(10 a),通过了0.01显著性水平检验.

从变化过程分析,20世纪60—70年代长江流域蒸发皿蒸发量较为集中,自80年代开始,长江流域蒸发皿蒸发量在近50年来的均值上下呈现波动式减小,减少幅度为-33.88 mm/(10 a)(通过0.01显著性水平检验).上游地区60—70年代蒸发能力较强,从80年代开始,蒸发能力有明显的下降趋势,蒸发皿蒸发量接近50年来均值;中下游地区的蒸发能力同样在60、70年代较大,且在1960—1965年,长江流域上下游蒸发能力相当,80年代中下游地区蒸发能力陡然减弱,至90年开始在接近50年来均值基础上有缓慢波动上升,随后中下游地区蒸发能力下降幅度逐渐增大.总体来说,中下游地区蒸发能力的下降趋势要比上游地区明显得多.

从长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量MK趋势值分布(图3)来看,蒸发皿蒸发量变化趋势以明显减少为特点,且中下游地区蒸发皿蒸发量减少的趋势较之上游地区颇为明显.147个站点中,MK趋势值小于-1.28的站点有81个,其中上游地区站点32个,中下游地区站点49个;MK趋势值小于-1.64的站点有66个,其中上游地区站点22个,中下游地区站点44个;MK趋势值小于-2.32的站点有57个,其中上游地区站点20个,中下游地区站点37个.存在显著减少趋势的站点主要分布在金沙江流域下游地区、岷沱江干流地区、乌江流域、汉江干流地区、洞庭湖流域以及鄱阳湖水系下游地区和太湖流域,显著上升的地区主要集中在长江源区通天河流域和嘉陵江流域.

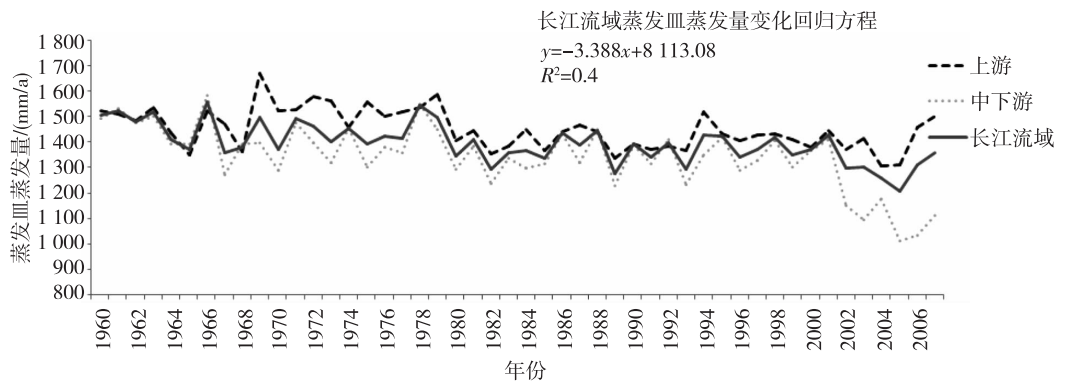


图2 长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量变化趋势

Fig. 2 Variation trend of 20cm pan evaporation in the Yangtze River basin

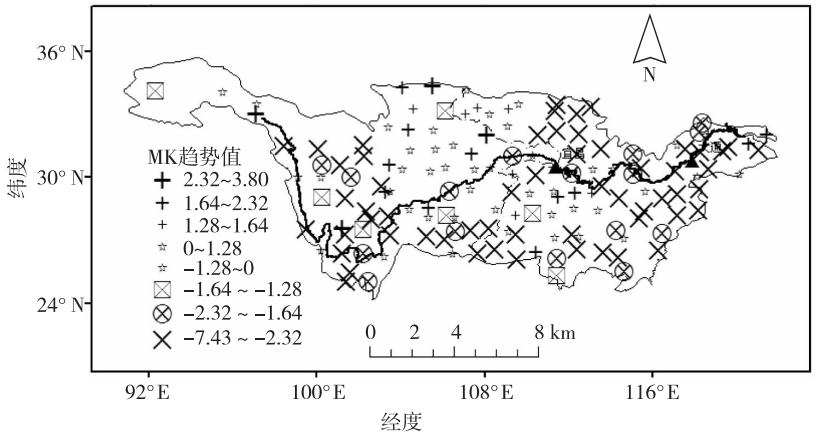


图 3　长江流域 20 cm 口径蒸发皿蒸发量 MK 趋势分布

Fig. 3　Distribution of MK trend of 20 cm pan evaporation in the Yangtze River basin

2.1.2　20 cm 口径蒸发皿蒸发量的季节变化

从季节变化的角度出发,5—8 月是长江流域蒸发皿蒸发量最大的时间段. 长江流域各季节蒸发皿蒸发量变化趋势的 MK 统计检验结果见图 4,上游和中下游地区蒸发皿蒸发量在 4 个季节的变化呈现不同程度的下降趋势. 近 50 年来春、夏、秋、冬四季蒸发皿蒸发量变化速率分别为 −0.67、−1.99、−0.77、−0.09 mm/(10 a),均通过了 99% 的置信度检验. 春季,上游地区蒸发皿蒸发量具有显著的下降趋势,MK 趋势值均小于 −2.32,中下游地区春季蒸发皿蒸发量呈现微弱的下降趋势,MK 趋势值为 −0.9,春季蒸发皿蒸发量减少趋势较为明显的区域主要集中在金沙江干流地区、乌江流域、嘉陵江流域、汉江流域,中下游地区的洞庭湖和鄱阳湖流域近 50 年来春季蒸发皿蒸发量减少趋势不是很明显. 夏季,蒸发皿蒸发量在中下游地区呈现明显的下降趋势,MK 趋势值小于 −2.32,而上游地区蒸发皿蒸发量下降趋势微弱,MK 趋势值仅为 −0.5. 秋冬两季蒸发皿蒸发量变化趋势与春季变化相同,在上游地区呈现较为显著的下降趋势(通过 90% 以上置信度检验),在中下游地区下降趋势微弱. 秋季蒸发皿蒸发量减少趋势明显的区域分布在金沙江流域南部地区、汉江流域、洞庭湖流域、鄱阳湖流域,冬季全流域蒸发皿蒸发量明显减少,为四季中最低,金沙江流域南部地区减少趋势相对明显.

由此看出,春季、夏季、秋季蒸发皿蒸发量存在显著减少趋势,其中夏季蒸发皿蒸发量减少幅度最大. 20 世纪 80 年代以来长江流域蒸发皿蒸发量减小主要是由于春、夏、秋三季蒸发量减小所致,冬季蒸发皿蒸发量变化影响相对较弱. 通过对比,长江流域蒸发皿蒸发量季节变化态势与年变化态势基本一致,均呈现下降趋势,其表现都是 20 世纪 60—70 年代蒸发量居多,80—90 年代偏少,转折年份出现在 70 年代末或 80 年代初.

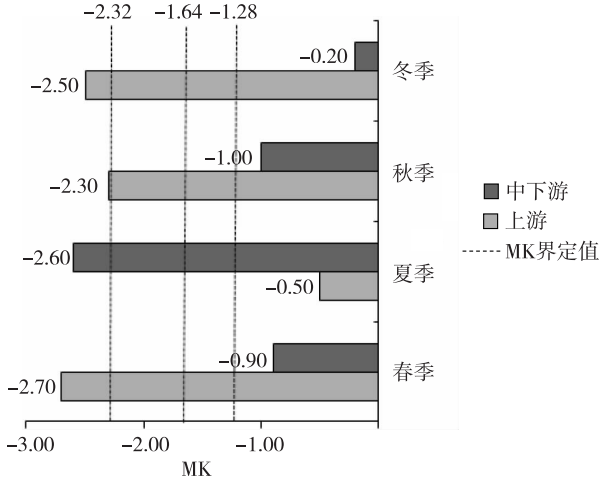


图 4　长江流域 20 cm 口径蒸发皿蒸发量季节变化 MK 趋势值

Fig. 4　Seasonal MK trend of 20 cm pan evaporation in the Yangtze River basin

2.2　1960—2007 年长江流域太阳辐射的变化特征

2.2.1　太阳辐射年际变化

一切到达地球表面的太阳辐射称为太阳总辐射,又称太阳辐射[20]. 分析近 50 年来各站点地面接收到的太阳辐射变化(图 5) 可知,从 20 世纪 80 年代开始,长江流域的太阳总辐射呈显著减少趋势,其气候变化速率为 −67.06 MJ·m^{-2}·(10 a)$^{-1}$(通过置信度为 99% 的显著性检验). 20 世纪 80 年代之前,太阳辐射维持在 4 100 MJ·m^{-2}·a^{-1}. 1963 年达到近 50 年来最高值约为 4 420 MJ·m^{-2}·a^{-1},1990 年达到近 50 年

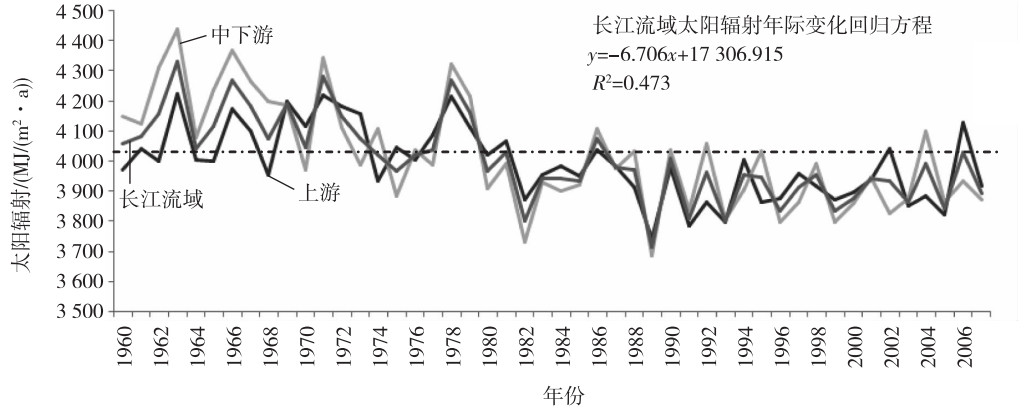


图 5 长江流域太阳辐射变化趋势

Fig. 5 Variation trend of global solar radiation in the Yangtze River basin

来最低,约为3 690 MJ·m^{-2}·a^{-1}. 长江流域太阳辐射自 1978 年之后迅速下降,1982 年降到近 50 年来太阳辐射均值以下,从 20 世纪 80 年代以后,长江流域到达地面的太阳辐射随时间推移明显减少,至 80 年代中后期,太阳辐射随时间变化有所增加,但仍未恢复到 50 年来的平均值.

通过计算统计长江流域 147 个站点太阳辐射年际变化的 MK 趋势值,近 50 年来长江流域太阳辐射变化呈现显著下降趋势(图 6). 存在显著减少趋势的站点主要分布在长江流域上游岷沱江流域、嘉陵江干流地区、乌江流域、中游汉江流域、洞庭湖流域以及下游太湖流域. 147 个站点中,MK 趋势值小于 -1.28 的站点有 118 个,其中上游地区站点 47 个,中下游地区站点 71 个;MK 趋势值小于 -1.64 的站点有 104 个,其中上游地区站点 42 个,中下游地区站点 62 个;MK 趋势值小于 -2.32 的站点有 94 个,其中上游地区站点 39 个,中下游地区站点 55 个. 由此看出,近 50 年来长江流域中下游地区太阳辐射年际变化减少趋势比上游地区明显.

2.2.2 太阳辐射的季节变化

4 个季节的太阳辐射下降幅度相比,依次是夏季 > 秋季 > 春季 > 冬季,长江流域各季节太阳辐射变化趋势的 MK 统计检验结果见图 7. 4 个季节的太阳辐射变化均呈现出显著的下降趋势,除了秋季之外,其他各季节太阳辐射下降趋势在中下游地区均显著于上游地区. 春季太阳辐射下降趋势明显的区域集中在金沙江流域干流地区,其次是汉江流域、洞庭湖流域北部和鄱阳湖流域北部地区;夏季长江流域的中下游地区太阳辐射的下降趋势明显于上游源头地区;秋季太阳辐射下降趋势在上游金沙江干流地区较为明显;冬季太阳辐射下降趋势明显的区域主要集中在长江中下游地区和金沙江流域南部.

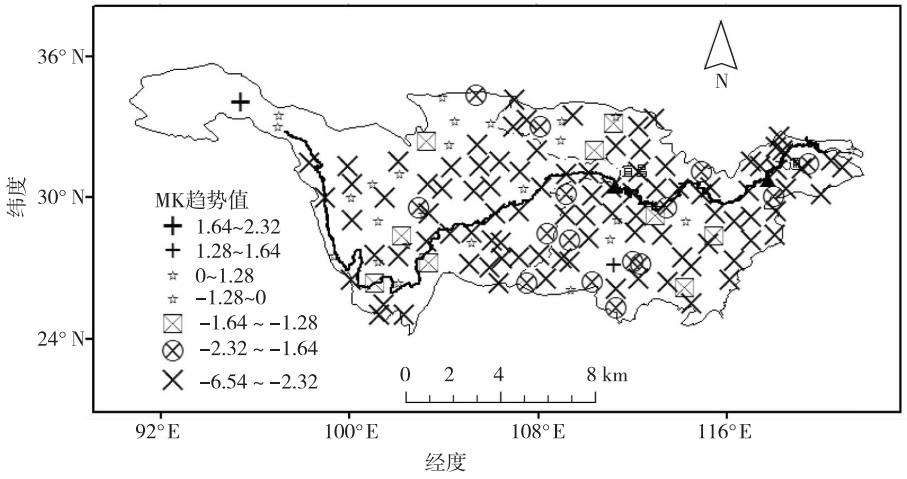


图 6 长江流域太阳辐射 MK 趋势分布

Fig. 6 Distribution of MK trend of global solar radiation in the Yangtze River basin

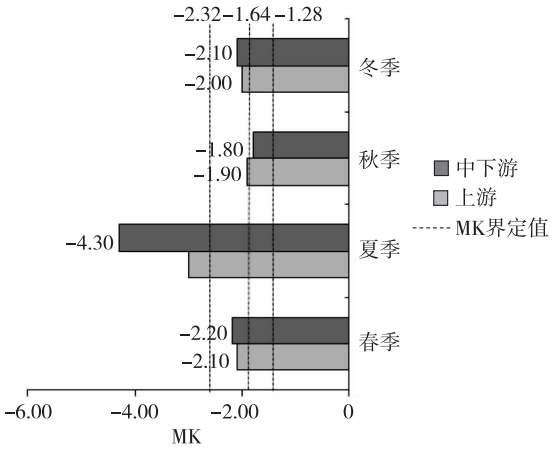


图7 长江流域太阳辐射季节变化MK趋势

Fig. 7 Seasonal MK trend of global solar radiation in the Yangtze River basin

2.3 1960—2007年长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射的变化关系

2.3.1 20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射的年际变化关系

据1960—2007年长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射年际变化相关系数分布(图8)显示:长江流域近50年来蒸发皿蒸发量变化与太阳辐射变化二者之间是正相关关系且关系高度显著.由前文得知:近50年来,长江流域蒸发皿蒸发量以-3.388 mm/a的速度减小的同时,太阳辐射以-6.706 $MJ\cdot m^{-2}\cdot a^{-1}$的速度减小,长江流域蒸发皿蒸发量变化和太阳辐射变化趋势一致.据统计计算结果,147个站点太阳辐射变化和蒸发皿蒸发量变化的Pearson相关系数均为正值,值域范围在0.5到0.8之间的站点数为72个,其中上游地区站点48个,中下游地区站点24个;而值域范围在0.8到1之间的站点数为75个,其中上游地区站点19个,中下游地区站点则有56个.正如图8中所示:中下游地区的洞庭湖流域、鄱阳湖流域、太湖流域蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化关系的高度相关性比上游地区显著.

从长江流域蒸发皿蒸发量和太阳辐射的变化关系来看,二者总体呈现的变化趋势相同,从局部变化来看,其变化态势也存在很好的一致性.20世纪60—70年代太阳辐射强的年份,蒸发皿蒸发力也强,70年代末和80年代初,太阳辐射明显减少,蒸发皿蒸发量同样出现相应的波动变化.在1963、1978、1980、1982、1994和1999年等太阳辐射发生转折变化的年份,蒸发皿蒸发量也发生了与其相似的转折变化,说明这一时期太阳辐射的变化已经对蒸发皿蒸发量变化产生了重要影响.

2.3.2 20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射的季节变化关系

分别计算长江流域近50年来春、夏、秋、冬4个季节20 cm口径蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化的相关系数并对比其时空分布(图9),可以明显看出4个季节蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化关系显著,且春、夏、秋3个季节二者变化关系高度相关,均呈现明显下降趋势,其中夏季蒸发皿蒸发量和太阳辐射变化相关性最为显著.就各月份而言,5—8月是蒸发皿蒸发量和太阳辐射最集中、最大的时间段,其次

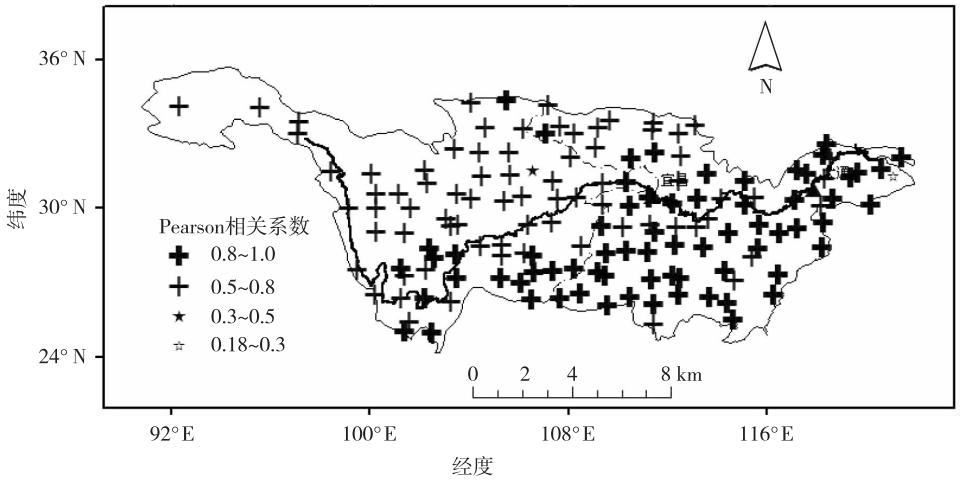


图8 长江流域20 cm口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射年际变化相关系数分布

Fig. 8 Correlation coefficient distribution in annual variation of 20 cm pan evaporation and global solar radiation in the Yangtze River basin

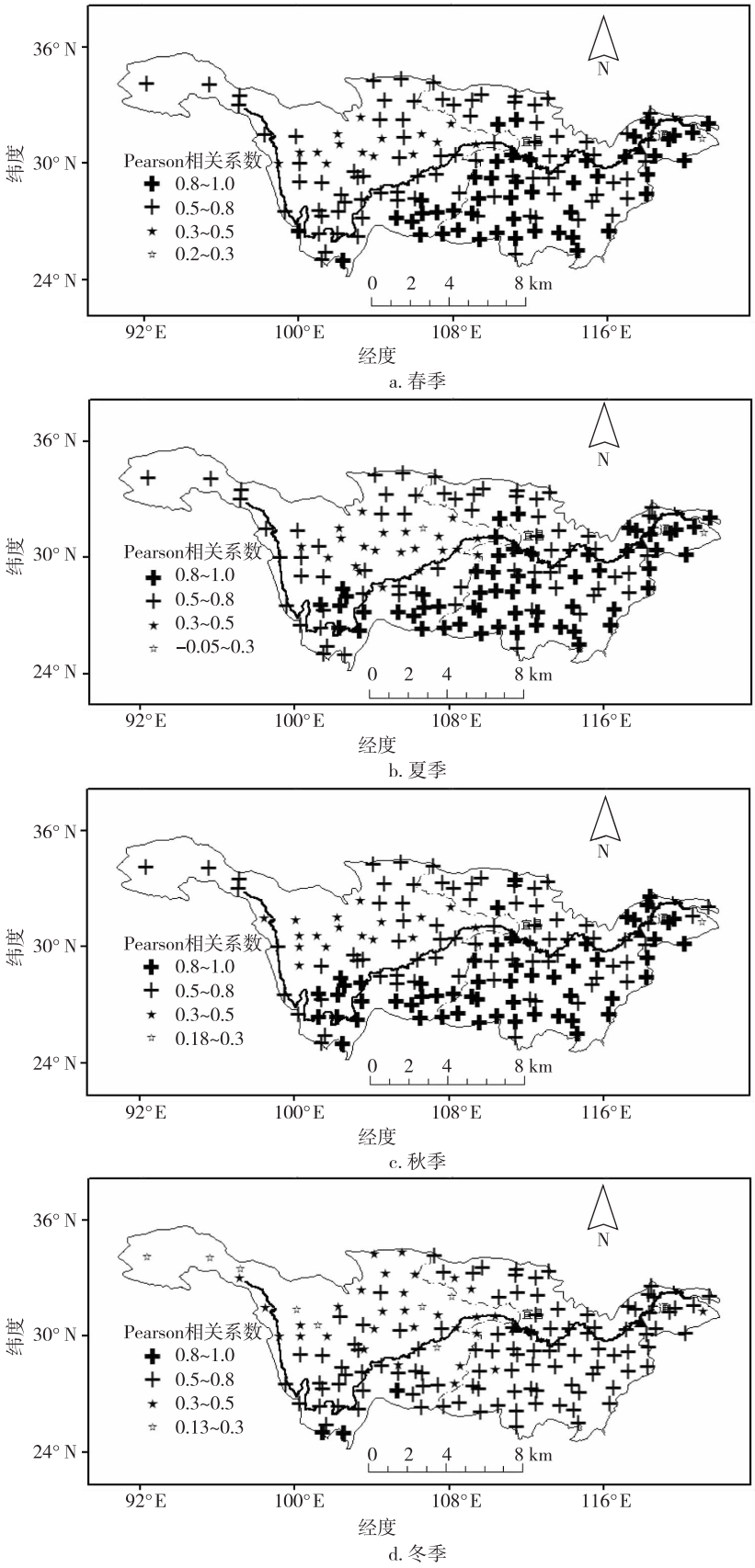


图 9　长江流域 20 cm 口径蒸发皿蒸发量和太阳辐射季节变化相关系数分布

Fig. 9　Correlation coefficient distribution between 20 cm pan evaporation and global solar radiation in the Yangtze River basin

在9—11月期间,太阳辐射和蒸发皿蒸发量变化关系显著相关,二者变化趋势呈现较为相似的波动变化.如图9所示,长江流域中下游地区蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化的相关性比上游地区明显,这与前文提到的蒸发皿蒸发量和太阳辐射的年际变化趋势较为相似.春季蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化Pearson相关系数在0.5~1.0之间的站点数有135个,其中呈显著正相关关系的站点数为86个(相关系数在0.5~0.8之间),呈高度显著正相关关系的站点有49个(相关系数在0.8~1.0之间),蒸发皿蒸发量受太阳辐射变化影响显著的地区主要分布在乌江流域、洞庭湖流域、太湖流域,其次为汉江、金沙江干流区域(图9a);夏季蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化Pearson相关系数在0.5~1.0之间的站点数有124个,其中呈显著正相关关系的站点数为65个(相关系数在0.5~0.8之间),呈高度显著正相关关系的站点有59个(相关系数在0.8~1.0之间);秋季蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化Pearson相关系数在0.5~1.0之间的站点数有137个,其中呈显著正相关关系的站点数为80个(相关系数在0.5~0.8之间),呈高度显著正相关关系的站点有57个(相关系数在0.8~1.0之间),夏季和秋季蒸发皿蒸发量受太阳辐射变化影响显著的地区的站点均集中在金沙江、乌江、洞庭湖、鄱阳湖、太湖流域地区(图9b和图9c);冬季蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化的相关程度较之春夏秋3个季节明显有所减弱(图9d),Pearson相关系数在0.5~1.0之间的站点数有109个,其中呈显著正相关关系的站点数为105个(相关系数在0.5~0.8之间),呈高度显著正相关关系的站点有4个(相关系数在0.8~1.0之间),长江中下游地区蒸发皿蒸发量变化受太阳辐射变化影响程度比上游地区要高.

3 结论

本文针对长江流域的特殊的地理位置和气候条件,利用147个站点的气象观测资料,通过计算太阳辐射并分析其变化趋势,并与20 cm口径蒸发皿蒸发量变化进行相关分析,至此得到了一些初步的成果与结论.

1)整个长江流域的蒸发能力在过去的近50年中(1960—2007)呈现下降趋势.20世纪60—70年代蒸发能力较大,自80年代开始,长江流域蒸发皿蒸发量在接近50年来均值上下呈现波动式减小,气候变化率为$-33.88\ mm\cdot(10\ a)^{-1}$.除夏季外,上游地区蒸发皿蒸发量减少趋势明显于中下游地区,春夏秋三季对于流域全年蒸发皿蒸发量减少的贡献最大.

2)1960—2007年长江流域的太阳辐射也呈显著下降趋势.从20世纪80年代开始,长江流域的太阳辐射以$-67.06\ MJ\cdot m^{-2}\cdot(10\ a)^{-1}$的速度下降,至80年代中后期,太阳辐射随时间变化有所增加,但仍未恢复到近50年的平均值.除秋季外,中下游地区太阳辐射减少趋势明显于上游地区.

3)分析了近50年来长江流域蒸发皿蒸发量与太阳辐射年际变化相关系数的变化规律,从中得出:长江流域近50年来蒸发皿蒸发量随太阳辐射的变化产生相应波动变化,二者呈显著正相关关系,呈现显著下降趋势,而且中下游地区蒸发皿蒸发量受太阳辐射的变化影响程度比上游地区所受的影响程度要大.

4)就季节变化而言,长江流域4个季节蒸发皿蒸发量与太阳辐射变化关系显著,且春、夏、秋3个季节二者变化关系高度相关,变化趋势呈现相似的波动变化,均呈现明显下降趋势,其中夏季蒸发皿蒸发量和太阳辐射变化相关性最为显著.

参考文献

References

[1] 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
QIU Xinfa,LIU Changming,ZENG Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years over the Yellow River basin[J]. Journal of Natural Resources,2003,18(4):437-447

[2] Romanou A,Liepert B,Schmidt G A,et al. 20th century changes in surface solar irradiance in simulations and observations[J]. Geophysical Research Letters,2007,34(5):1-5

[3] Peterson T C,Golubev V S,Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature,1995,337(6551):687-688

[4] Chattopadhyay N,Hulme M. Evaporation and potential evapotranspiration in India under conditions of recent and future climate change[J]. Agricultural and Forest Meteorology,1997,87(1):55-73

[5] Moonen A C,Ercoli L,Mariotti M,et al. Climate change in Italy indicated by agrometeorological indices over 122 years[J]. Agricultural and Forest Meteorology,2002,111:13-27

[6] Thomas A. Spatial and temporal characteristics of potential evapotranspiration trends over China[J]. Internation-

al Journal of Climatology, 2000, 20(4): 381-396

[7] Liu B H, Xu M, Henderson M, et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955—2000 [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109: 1-9

[8] Xu J. An analysis of the climatic changes in Eastern Asia using the potential evaporation[J]. Journal of Japan Society of Hydrology & Water Resources, 2001, 14(2): 151-170

[9] 左洪超,鲍艳,张存杰,等. 蒸发皿蒸发量的物理意义、近40年变化趋势的分析和数值试验研究[J]. 地球物理学报,2006,49(3):680-688
ZUO Hongchao, BAO Yan, ZHANG Cunjie, et al. An analytic and numerical study on the physical meaning of pan evaporation and its trend in recent 40 years[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2006, 49(3): 680-688

[10] 左洪超,李栋梁,胡隐樵,等. 近40年中国气候变化趋势及其同蒸发皿观测的蒸发量变化的关系[J]. 科学通报,2005,50(11):1125-1130
ZUO Hongchao, LI Dongliang, HU Yinqiao, et al. The relationship between climate change trends and pan evaporation in China in recent 40 years[J]. Chinese Science Bulletin, 2005, 50(11): 1125-1130

[11] 申双和,盛琼. 45年来中国蒸发皿蒸发量的变化特征及其成因[J]. 气象学报,2008,66(3):452-460
SHEN Shuanghe, SHENG Qiong. Changes in pan evaporation and its cause in China in the last 45 years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 66(3): 452-460

[12] 刘波,马柱国,丁裕国. 中国北方近45年蒸发变化的特征及与环境的关系[J]. 高原气象,2006,25(5):840-848
LIU Bo, MA Zhuguo, DING Yuguo. Characteristics of the changes in pan evaporation over Northern China during the past 45 years and the relations to environment factors [J]. Plateau Meteorology, 2006, 25(5): 840-848

[13] Quintana-Gomez R A. Changes in evaporation patterns detected in northernmost South America[C]// Proceedings of the 7th International Meeting on Statistical Climatology, Whistler, BC Canada, Institute of Mathematical Statistics, 1998

[14] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in Australian pan evaporation from 1970 to 2002[J]. International Journal of Climatology, 2004, 24(9): 1077-1090

[15] Roderick M L, Farquhar G D. Changes in New Zealand pan evaporation since the 1970s[J]. International Journal of Climatology, 2005, 25(15): 2031-2039

[16] Gilgen H, Wild M, Ohmura A. Means and trends of shortwave irradiance at the surface estimated from global energy balance archive data[J]. Journal of Climate, 1998, 11(8), 2042-2061

[17] 姜彤,苏布达,王艳君,等. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势[J]. 气候变化进展,2005,1(2):65-68
JIANG Tong, SU Buda, WANG Yanjun, et al. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River Basin from 1961 to 2000 [J]. Advances in Climate Change Research, 2005, 1(2): 65-68

[18] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years [J]. Science, 2002, 298(5597): 1410-1411

[19] Yue S, Pilon P, Cavadias G, et al. Power of the Mann-Kendall and Spearman's rhotests for detecting monotonic trends in hydrological series[J]. Journal of Hydrology, 2002, 259(1/2/3/4): 254-271

[20] Wang Y, Jiang T, Bothe O, et al. Changes of pan evaporation and reference evapotranspiration in the Yangtze River basin[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2007, 90(1/2): 13-23

[21] 曾燕,邱新法,刘昌明,等. 1960—2000年中国蒸发皿蒸发量的气候变化特征[J]. 水科学进展,2007,18(3):311-318
ZENG Yan, QIU Xinfa, LIU Changming, et al. Changes of pan evaporation in China in 1960—2000[J]. Advances in Water Science, 2007, 18(3): 311-318

[22] 任国玉,郭军. 中国水面蒸发量的变化[J]. 自然资源学报,2006,21(1):31-44
REN Guoyu, GUO Jun. Change in pan evaporation and the influential factors over China: 1956—2000[J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 31-44

[23] 杨宏青,陈正洪,石燕,等. 长江流域近40年强降水的变化趋势[J]. 气象,2005,31(3):66-68
YANG Hongqing, CHEN Zhenghong, SHI Yan, et al. Change trends of heavy rainfall events for last 40 years in the Changjiang valley[J]. Meteorological Monthly, 2005, 31(3): 66-68

[24] Gong L B, Xu C Y, Chen D L, et al. Sensitivity of the Penman-Monteith reference evapotranspiration to key climatic variables in the Changjiang basin[J]. Journal of Hydrology, 2006, 329(3/4): 620-629

[25] 黄忠恕,李春龙. 长江流域历史水旱灾害分析[J]. 湖泊科学,2003,15(增刊1):210-215
HUANG Zhongshu, LI Chunlong. Analysis on historical flood and drought disasters in the Changjiang River basin [J]. Journal of Lake Sciences, 2003, 15(sup1): 210-215

[26] 马晓波. 华北地区水资源的气候特征[J]. 高原气象,1999,18(4):520-524
MA Xiaobo. Climate characteristics of water resources in Nnorth China[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 520-524

[27] 宋正山,杨辉,张庆云. 华北地区水资源各分量的时空变化特征[J]. 高原气象,1999,18(4):552-566
SONG Zhengshan, YANG Hui, ZHANG Qingyun. The characteristics of temporal and spatial variation of water resource components over North China[J]. Plateau Meteorology, 1999, 18(4): 552-566

[28] 翁笃鸣. 中国辐射气候[M]. 北京:气象出版社,1997
WENG Duming. Radiation climate in China [M]. Beijing: China Meteorological Press, 1997

[29] 杜春丽,沈新勇,陈渭民,等. 43 a来我国城市气候和太阳辐射的变化特征[J]. 南京气象学院学报,2008,31(2):200-207
DU Chunli, SHEN Xinyong, CHEN Weimin, et al. Urban climate and solar radiation changes in China in recent 43 years[J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology, 2008, 31(2): 200-207

[30] 刘敏,沈彦俊,曾燕,等. 近50年中国蒸发皿蒸发量变化趋势及原因[J]. 地理学报,2009,64(3):259-269

LIU Min, SHEN Yanjun, ZENG Yan, et al. Changing trend of pan evaporation and its cause over the past 50 years in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2009, 64(3):259-269

[31] Ramanathan V, Vogelmann A M. Greenhouse effect, atmospheric solar absorption and the Earths radiation budget: From the Arrhenius-Langley era to the 1990s [J]. Ambio, 1997, 26(1):38-46

[32] Wilson C A, Mitchell J F B. Doubled CO_2 climate sensitivity experiment with a global climate model including a simple ocean [J]. Journal of Geophysical Research, 1987, 92(D11):13315-13343

[33] Brutsaert M, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox [J]. Nature, 1998, 396(6706):30

[34] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating? [J]. Science, 2002, 298(5597):1345-1346

[35] Cohena S, Ianetzb A, Stanhill G. Evaporative climate changes at BetDagan, IsraeJ, 1964—1998 [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2002, 111(2):83-91

Comparative analysis of variations of 20 cm pan evaporation and global solar radiation over the Yangtze River Basin during 1960—2007

GUO Yuan[1,2] WANG Yanjun[1] LIU Changkun[1]

1 School of Remote Sensing, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

2 Lightning Protection Center of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530000

Abstract Based on the ground-based observation data from 147 meteorological stations in nearly 50 years over the Yangtze River basin, applying climatology computational method for estimating global solar radiation, variation relationship between global solar radiation and 20 cm pan evaporation was contrasted and analyzed from 1960 to 2007. The main results are as follows: significant negative trend of global solar radiation and pan evaporation were detected in the upper, middle and lower reaches. Significant positive correlation existed between the global solar radiation and 20 cm pan evaporation, and the pan evaporation varies accordingly with the fluctuation of global solar radiation. The correlation coefficient between global solar radiation and pan evaporation in lower reach is higher than that in upper-middle reaches. In term of the seasonal variation, the research result indicates the same trend as the annual variation, and the variation of both global solar radiation and pan evaporation showed significant negative trend in four seasons of the whole basin, especially in spring, summer and autumn, which contributes most to the decrease of pan evaporation in a year. Therefore, the significant negative trends in global solar radiation over the basin can be considered one reason that causes the decrease in pan evaporation.

Key words 20 cm pan evaporation; global solar radiation; climate change; comparative analysis