

珠江流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其原因分析

王兆礼¹, 覃杰香¹, 陈晓宏²*

(1. 华南理工大学土木与交通学院, 广州 510641; 2. 中山大学水资源与环境研究中心, 广州 510275)

摘 要: 为探讨珠江流域蒸发皿蒸发量的时空变化特征, 该文利用 1960—2001 年 65 个气象站的小型蒸发皿观测资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验方法、完全相关系数法以及 GIS 空间分析技术分析了蒸发皿蒸发量的变化趋势及其可能原因。结果表明: 近 42 a 来整个珠江流域年蒸发皿蒸发量呈显著的减少趋势, 减少速率为 2.79 mm/a。四季中, 夏季 (6—8 月) 与秋季 (9—11 月) 蒸发皿蒸发量变化趋势不显著, 冬季 (12 月—次年 2 月) 和春季 (3—5 月) 均呈现明显下降趋势, 其中春季下降最为显著; 就各月份而言, 除 6、11、12 月 3 个月份呈不显著增加趋势外, 其余 9 个月份均呈不同程度的下降趋势。蒸发皿蒸发量的变化趋势存在区域差异性, 全流域仅有少数区域显示为增加趋势, 其他大部分地区均以显著减少为主, 减少速率最大的区域集中在西江中游、北江与东江下游。珠江流域蒸发皿蒸发量的减少主要是由热力因子日照时数、气温日较差和动力因子平均风速的减少引起的, 该结果可以为流域气候变化及水文循环研究提供参考。

关键词: 蒸发, GIS, 相关法, 特征, 珠江流域

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.11.013

中图分类号: S161.4

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2010)-11-0073-05

王兆礼, 覃杰香, 陈晓宏. 珠江流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其原因分析[J]. 农业工程学报, 2010, 26(11): 73—77.
Wang Zhaoli, Qin Jiexiang, Chen Xiaohong. Variation characteristics and impact factors of pan evaporation in Pearl River Basin, China[J]. Transactions of the CSAE, 2010, 26(11): 73—77. (in Chinese with English abstract)

0 引言

陆面蒸发既是地表热量平衡的组成部分, 又是水量平衡的组成部分, 地面热量、水分状况决定着地表生态环境的形成和演变, 因此陆面蒸发量的研究一直是国内外地学、水文学的焦点问题之一^[1-2]。人们预期, 全球变暖可能会使大气变干, 导致陆地上水体蒸发量上升。而实际结果却与此相反, 许多地区的蒸发皿蒸发量呈持续下降趋势^[3], 这一现象称为“蒸发悖论”(evaporation paradox)^[4], 由此引发了更多关于蒸发皿蒸发量变化趋势及其原因分析和蒸发皿蒸发量与实际蒸散(发)的关系研究^[3-7]。

与国外的研究结果一致, 中国的大部分地区也普遍存在蒸发皿蒸发量显著减少的趋势^[8-9], 而且影响蒸发皿蒸发量减少的主要气候因子存在明显的区域差异性^[10-11]。左洪超等^[12]对中国气候变化趋势的研究表明, 蒸发皿蒸发量与大气相对湿度的相关性最好; 而曾燕等^[13]则认为日照百分率减少造成的太阳总辐射减少是中国蒸发皿蒸发量减少的主要原因。王艳君等^[14]认为长江流域年平均太阳净辐射和风速的显著下降是年平均蒸发皿蒸发量显著下降的主要原因; 而黄河流域蒸发皿蒸发量的下降主要是由太阳总辐射的下降引起的^[15]。郭军等^[16]将黄淮海

流域蒸发皿蒸发量的减少趋势归因于平均风速和太阳辐射的影响; 杜军等^[17]认为藏北高原气温日较差显著减小和平均相对湿度的明显增加, 以及日照时数的减少可能是蒸发皿蒸发量显著下降的最主要原因。

珠江流域地处中国南方亚热带湿润地区, 在全球变暖的大环境下, 流域平均气温也呈显著的上升趋势, 上升速率为 0.10℃/10 a^[18], 该流域是否也存在“蒸发悖论”, 其主要影响因子有哪些是值得探讨的科学问题。然而, 以往的研究工作中, 涉及珠江流域蒸发皿蒸发量变化的研究还比较少见。鉴于此, 本文利用 1960—2001 年珠江流域及其周边地区蒸发皿蒸发量观测资料, 采用 Mann-Kendall 趋势检验方法以及 GIS 的空间分析功能对蒸发皿蒸发量进行趋势分析; 并根据同期气温、降水、湿度、风速、日照时数、气温日较差等气候要素资料, 采用完全相关系数法分析蒸发皿蒸发量变化趋势的主要影响因子, 以期对流域气候变化及水文循环研究提供参考和依据。

1 数据来源与研究方法

1.1 数据来源与预处理

数据为 1960—2001 年珠江流域及周边 65 个气象站 (如图 1 所示) 的逐日观测资料, 包括 20 cm 直径蒸发皿蒸发量、平均气温、平均相对湿度、降水量、平均风速、日照时数、低云量、平均气压、最高气温和最低气温, 来源于中国气象局。气温日较差由最高气温和最低气温计算。

年数据统计按照自然年算法, 即每年的 1—12 月之和。四季数据以 3、4、5 月为春季, 6、7、8 月为夏季, 9、10、11 月为秋季, 12 月至次年 1、2 月为冬季来统计。整个流域和 11 个子流域的蒸发皿蒸发量根据流域内所有

收稿日期: 2010-03-24 修订日期: 2010-11-09

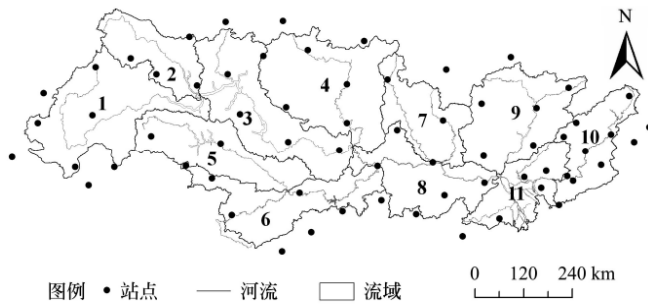
基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (50839005); 华南理工大学中央高校基本科研业务费专项资金 (2009ZM0186)

作者简介: 王兆礼 (1979—), 男, 江苏徐州人, 博士, 主要从事气候与土地利用变化引起的水文效应及 GIS 模拟等方面的研究。广州 华南理工大学土木与交通学院, 510641。Email: wangzhil@scut.edu.cn.

*通信作者: 陈晓宏 (1963—), 男, 湖北公安人, 博士, 教授, 主要从事水文水环境研究。广州 中山大学水资源与环境研究中心, 510275。

Email: eescxh@sysu.edu.cn.

实测站点采用 ArcGIS9.3 中的克里格方法 (Kriging) 插值生成 1 km 网格数据求均值而得。



注: 1—南盘江; 2—北盘江; 3—红水河; 4—柳江; 5—右江; 6—左江、浔江及郁江; 7—贺桂江; 8—黔浔江; 9—北江; 10—东江; 11—珠江三角洲

图 1 珠江流域气象站点分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations in Pearl River Basin

1.2 研究方法

1.2.1 Mann-Kendall 趋势检验方法

利用 Mann-Kendall 趋势检验方法(以下简称 M-K 法)分析蒸发皿蒸发量和各气候要素序列的变化趋势。M-K 检验是提取序列变化趋势的有效工具,被广泛应用于气候参数和水文序列的分析^[19]。它的两个重要参数是统计量 M 和趋势变化的斜率 β 。统计量 M 用来检验在给定显著水平时有序数据的秩变化趋势,当 M 为正时表示上升或增加的趋势,反之则为下降或减少趋势。斜率 β 表示了趋势变化的方向和程度,即变化速率。

1.2.2 完全相关系数

考虑到流域蒸发皿蒸发量普遍存在明显减少趋势^[20],为准确分析其主要影响因子,即因子既与蒸发皿蒸发量之间有较高的相关性,又随时间发生了显著变化,采用完全相关系数方法分析蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子,完全相关系数 R 的计算公式如下^[11]

$$R = r_e \cdot r_t \quad (1)$$

式中, R 为完全相关系数; r_e 为气候要素与蒸发皿蒸发量

的相关系数; r_t 为气候要素与时间的相关系数。因而,只有当某气候要素不仅与蒸发皿蒸发量相关性较强,且随时间发生显著变化时,它与蒸发皿蒸发量的完全相关系数才比较大。

2 结果与分析

2.1 珠江流域蒸发皿蒸发量变化特征

2.1.1 珠江流域平均蒸发皿蒸发量时间变化特征

表 1 为珠江流域及各子流域蒸发皿蒸发量变化趋势 M-K 统计值,从中可以看出,珠江流域年蒸发皿蒸发量 M-K 统计值为 -3.29,通过了 99% 的显著性检验,表明近 42 a 来年蒸发皿蒸发量呈显著的减少趋势;变化速率即斜率 $\beta = -2.79 \text{ mm/a}$,表明 42 a 来下降了约 117.2 mm。M-K 突变检测结果表明(图 2),原序列 M-K 统计值(UF)与反向序列 M-K 统计值(UB)曲线在 1975 年相交,且交点位于显著性水平线之间,UF 与 UB 都超过了信度线,表明年蒸发皿蒸发量于 1975 年发生了由多到少的突变,通过 95% 的显著性检验。流域 1960—2001 年平均蒸发皿蒸发量为 1 533.3 mm,其中 1975—2001 年平均值为 1 507.4 mm,比 1960—1974 年平均值 1 579.8 mm 低 72.4 mm,减少非常明显。

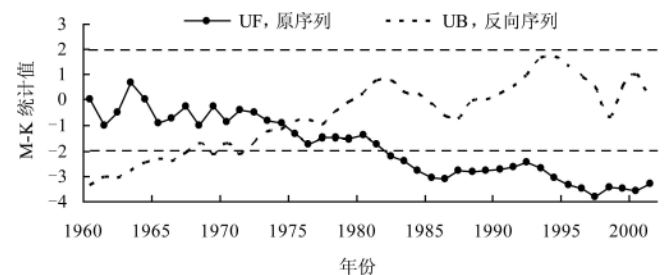


图 2 1960—2001 年珠江流域年蒸发皿蒸发量 Mann-Kendall 法 (M-K 法) 检测结果

Fig.2 M-K test results of annual pan evaporation during 1960-2001 in Pearl River Basin

表 1 珠江流域及各子流域 1960—2001 年蒸发皿蒸发量变化趋势 M-K 统计值 M

Table 1 M values by M-K for pan evaporation during 1960-2001 in Pearl River Basin

区域代码	1 月	2 月	3 月	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月	11 月	12 月	春	夏	秋	冬	年
1	0.59	-0.59	-0.02	-0.61	-1.97 [▲]	0.09	-1.80 [△]	0.41	0	-0.28	-0.48	0.28	-1.24	-0.61	-0.15	-0.17	-1.91 [△]
2	0	-0.22	-0.02	0	-0.69	0.93	-1.00	0.09	0.67	1.13	1.26	2.08 [▲]	-0.43	0.30	1.76 [△]	0.69	-0.33
3	-2.64 [★]	-1.43	-2.21 [▲]	-1.89 [△]	-2.21 [▲]	-0.65	-2.02 [▲]	-0.82	-1.21	-0.69	1.00	0.85	-3.03	-2.10 [▲]	-0.89	-1.43	-3.62 [★]
4	-2.49 [★]	-0.61	-1.95 [△]	-1.65	-1.47	-0.11	-1.97 [▲]	-0.76	-1.08	-0.78	1.21	1.02	-2.30 [▲]	-1.78 [△]	-0.65	-1.74 [△]	-2.84 [★]
5	-2.12 [▲]	-2.10 [▲]	-1.84 [△]	-1.89	-3.34 [★]	-0.48	-2.17 [▲]	-0.50	-1.56	-1.15	0.52	0.39	-3.58 [★]	-1.82 [△]	-0.95	-1.90 [△]	-4.18 [★]
6	-3.12 [★]	-1.91 [△]	-2.58 [★]	-2.28 [▲]	-3.71 [★]	-1.45	-2.75 [★]	-0.76	-1.84 [△]	-1.11	0.41	0.04	-3.29 [★]	-2.90 [★]	-1.45	-2.41 [★]	-4.31 [★]
7	-2.15 [▲]	-0.37	-1.86 [△]	-0.72	-0.80	0.43	-1.89 [△]	-0.65	-0.41	0.04	1.65 [△]	1.41	-1.08	-1.21	0.48	-0.48	-1.65 [△]
8	-2.32 [★]	-1.32	-1.89 [△]	-1.95 [△]	-1.91 [△]	-0.56	-2.23 [▲]	-0.43	-0.87	-0.28	1.00	0.15	-2.41 [★]	-2.23 [▲]	-0.04	-1.79 [△]	-3.06 [★]
9	-2.45 [★]	-1.21	-2.08 [▲]	-0.76	-0.93	0.82	-0.76	-0.72	-0.35	1.04	1.11	0.43	-1.24	-0.26	0.87	-1.54	-1.21
10	-2.32 [★]	-1.97 [▲]	-2.15 [▲]	-2.75 [★]	-1.39	-0.07	-1.86 [△]	-0.89	0.02	1.24	0.65	-0.35	-2.71 [★]	-1.41	0.93	-1.99 [▲]	-2.90 [★]
11	-2.02 [▲]	-1.45	-1.39	-2.08 [▲]	-1.47	-0.33	-1.91 [△]	-0.43	0.41	1.47	0.82	0.09	-2.25 [▲]	-1.26	1.32	-1.27	-1.76 [△]
12	-2.71 [★]	-1.82 [△]	-2.08 [▲]	-1.78 [△]	-2.10 [▲]	0.24	-2.23 [▲]	-0.63	-0.46	-0.11	1.34	0.37	-2.69 [★]	-1.63	-0.24	-1.74 [△]	-3.29 [★]

注: 区域代码: 1—南盘江; 2—北盘江; 3—红水河; 4—柳江; 5—右江; 6—左江、浔江及郁江; 7—贺桂江; 8—黔浔江; 9—北江; 10—东江; 11—珠江三角洲; 12—珠江流域。△、▲、★分别表示通过 90%、95% 和 99% 显著性检验。

就各季节蒸发皿蒸发量变化趋势而言,除夏季、秋季下降趋势不显著外,冬季和春季蒸发量变化态势与年

变化态势基本一致,呈现明显的下降趋势(表 1),且都通过 90% 以上的显著性检验,其中春季下降最为显著,

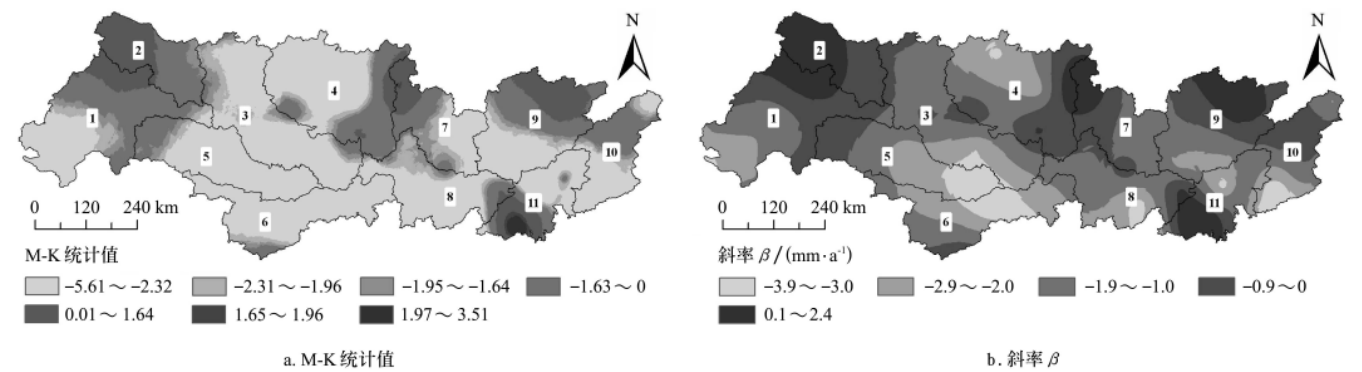
通过 99% 的显著性检验。

就各月份蒸发皿蒸发量变化趋势而言，除 6、11、12 月 3 个月份蒸发皿蒸发量呈不显著增加趋势外，其余 9 个月份均呈不同程度的下降趋势（表 1），其中 1 月份下降最为显著（通过了 99% 的显著性检验），其次为 3、5、7 月 3 个月份（通过了 95% 的显著性检验）。

2.1.2 珠江流域蒸发皿蒸发量空间变化特征

虽然整个珠江流域年蒸发皿蒸发量呈显著下降趋势，但存在明显的区域差异性（表 1 与图 3）。图 3a 与 3b 分别为珠江流域年蒸发皿蒸发量变化趋势、变化速率（斜率 β ）空间分布情况。从中可以看出：1）从全流域来看，仅有

少部分区域年蒸发皿蒸发量显示为增加趋势，主要集中在珠江流域的西北部、北江上游和珠江三角洲西南部，但变化速率较小。其他大部分区域均以显著减少为主，减少速率最大的区域集中在西江中游（包括红水河、柳江、右江、左江及郁江等子流域）、北江与东江下游地区，减少速率均在 2 mm/a 以上，最大地点达到 3.9 mm/a。2）从各分区来看，所有子流域年蒸发皿蒸发量都呈减少趋势，其中 3—红水河、4—柳江、5—右江、6—左江及郁江、8—黔浔江、10—东江流域 6 个子流域通过了 99% 的显著性检验。3）就各季节、各月份蒸发皿蒸发量变化趋势的空间分布而言，也都存在明显的区域差异性和空间异质性（表 1）。



注：图中 1—南盘江；2—北盘江；3—红水河；4—柳江；5—右江；6—左江、浔江及郁江；7—贺桂江；8—黔浔江；9—北江；10—东江；11—珠江三角洲

图 3 珠江流域年蒸发皿蒸发量变化趋势的空间分布
Fig.3 Spatial distributions of trends of annual pan evaporation identified by Mann-Kendall test

2.2 珠江流域蒸发皿蒸发量变化原因分析

2.2.1 影响因子的完全相关系数

虽然世界不同地区都有关于蒸发皿蒸发量减少趋势的报道，但是对于其归因仍然存在一些争论。这主要是由于影响蒸发皿蒸发量变化的因子很多，可分为动力因子、热力因子和水分因子 3 类^[11]。为深入分析珠江流域全流域及各子流域年蒸发皿蒸发量变化的主要影响因子，将主要气象因子分成上述 3 类采用完全相关系数法，利用式（1）分别计算各气象要素与蒸发皿蒸发量的完全相关系数（表 2）。表 2 显示，就珠江流域总体而言，热力因子中的日照

时数、气温日较差和动力因子平均风速与蒸发皿蒸发量的完全相关系数远大于其他要素，这表明它们既与蒸发皿蒸发量的相关性较强，且随时间发生了显著变化，因而日照时数、气温日较差、平均风速是影响珠江流域蒸发皿蒸发量减少因素中相关性最强的 3 类因子，其中日照时数的相关性最大。而降水、云量、气压、湿度、气温等对蒸发皿蒸发量变化趋势的影响较小。此外，从各分区来看（表 2），平均风速对蒸发皿蒸发量变化趋势的影响程度存在非常明显的区域差异性，对流域上游的影响不明显，而对中下游的影响非常明显。

表 2 珠江流域及各分区全年气候因子与蒸发皿蒸发量完全相关系数表

Table 2 Annual complete correlation coefficients between pan evaporation and its climatic factors in Pearl River Basin

区域 代码	水分因子			热力因子			动力因子	
	相对湿度	降水量	低云量	平均气温	日照时数	气温日较差	平均风速	平均气压
1	0.16	-0.04	-0.12	0.20	-0.37*	-0.26*	-0.13	-0.01
2	-0.05	0.01	-0.15	0.00	-0.31*	-0.25*	0.03	0.06
3	-0.07	0.00	-0.01	0.00	-0.64*	-0.33*	0.01	-0.03
4	0.10	-0.05	-0.02	0.04	-0.49*	-0.55*	-0.05	-0.01
5	-0.14	0.02	-0.03	-0.07	-0.65*	-0.30*	-0.38*	-0.23
6	0.07	-0.01	-0.03	-0.05	-0.59*	-0.39*	-0.41*	-0.04
7	0.10	-0.05	-0.05	0.10	-0.46*	-0.30*	-0.09	-0.01
8	0.00	0.02	-0.04	0.05	-0.48*	-0.21*	-0.22*	-0.01
9	-0.23	-0.11	-0.05	0.03	-0.46*	-0.35*	0.03	-0.09
10	0.19	-0.10	-0.05	-0.09	-0.55*	-0.50*	-0.39*	0.00
11	0.18	-0.12	-0.07	0.04	-0.53*	-0.33*	-0.20*	-0.12
12	0.13	-0.07	-0.10	0.04	-0.67*	-0.57*	-0.23*	-0.02

注：区域代码：1—南盘江；2—北盘江；3—红水河；4—柳江；5—右江；6—左江、浔江及郁江；7—贺桂江；8—黔浔江；9—北江；10—东江；11—珠江三角洲；12—珠江流域。*为完全相关系数远大于其他气候要素的值。

2.2.2 蒸发皿蒸发量变化趋势的原因初探

以上分析结果表明,珠江流域蒸发皿蒸发量的减少主要与日照时数、气温日较差和平均风速的减小有关,故弄清这 3 种气象因子呈现减少趋势的原因,即可解释蒸发皿蒸发量变化趋势的原因。

日照时数的下降表征了太阳辐射的下降, Stanhill 和 Cohen 认为云量和气溶胶的增加是近年来全球太阳辐射下降的主要原因^[21]。经分析,气温日较差减少主要是由于最低气温的增幅大于最高气温增幅引起的^[3]。Roderick 等^[4]将气温日较差减少归因于云量和气溶胶的增加,因为云量、气溶胶及各种污染物的增加减少了白昼到达地面的太阳辐射量,同时也减少了夜间地表长波辐射的损失。由此可见,日照时数、气温日较差的下降主要是由于太阳辐射的减少引起的,而太阳辐射的减少是由于云量和气溶胶的增加引起的。

许潇锋等^[22]利用常规观测的总辐射和散射辐射日曝辐量资料,结合美国国家航空航天局达德太空研究所(national aeronautics and space administration goddard institute for space studies, NASA GISS)的月平均平流层气溶胶光学厚度(AOD)产品,反演计算了广州、昆明等站 1961—2005 年 0.75 μm 对流层 AOD 数据(表 3)。由表 3 可以看出,1961—2005 年广州站(代表珠江流域下游)AOD 年变化值为 0.0057,45a 年来增加了 0.2565,呈显著的增加趋势,特别是 20 世纪 80 年代以来,AOD 增加非常明显;昆明站(代表珠江流域上游)AOD 也呈显著的增加趋势,虽然 20 世纪 90 年代以来,AOD 有所下降,但其均值仍大于 1961—1979 时期的均值。珠江流域 AOD 的变化趋势和蒸发量的变化趋势正好相反,而且突变时间(二者分别是 1979 年、1975 年)也非常相近。因此,珠江流域蒸发皿蒸发量的下降及其突变过程可能和 AOD 的显著增加相关。

表 3 1961—2005 年广州、昆明站气溶胶光学厚度(AOD)平均值、标准差、年变化值

Table 3 Mean value, standard deviation and annual increment of AOD at Guangzhou and Kunming stations from 1961—2005

站点	1961— 1979 年	1980— 1994 年	1995— 2002 年	1961— 2005 年	年变化值	增加值
广州	0.258	0.468	0.499	0.376	0.0057	0.2565
昆明	0.148	0.274	0.243	0.208	0.0011	0.0495

注:数据来源于参考文献[22]。

虽然年平均低云量与蒸发皿蒸发量的完全相关系数较小($R = -0.10$),但低云量与蒸发皿蒸发量存在显著的负相关关系(相关系数 $r_e = -0.37$,通过 95% 的显著性检验),而且低云量也存在微弱的增加趋势(没有通过 95% 的显著性检验),因而低云量的增加引起的太阳辐射减少可能是珠江流域蒸发皿蒸发量减少的一个原因。

Wang 等^[23]认为风速的减小是全球变暖情况下的大气环流变化所引起,在全球和亚洲变暖的背景下,近 50 a 来,亚洲纬向环流指数增强、经向环流指数减弱所引起的亚洲冬季风和夏季风减弱,导致了中国平均风速的减小。但是,另一方面,城市化发展导致大多数建在城镇

周边地区的气象站点附近的粗糙度增加也可能是引起观测到的风速下降的一个不可忽略的因素^[11],这似乎可以解释“平均风速对蒸发皿蒸发量的影响存在明显的区域差异性”这一现象。总而言之,平均风速减小的原因比较复杂,还有待进一步研究。

3 结论与讨论

1) 1960—2001 年珠江流域年蒸发皿蒸发量呈显著的减少趋势,变化速率 β 为 -2.79 mm/a ,42 a 来下降了约 117.2 mm。M-K 突变检测结果表明,蒸发皿蒸发量于 1975 年发生了由多到少的突变,通过 95% 的显著性检验。

2) 四季中,夏季(6—8 月)与秋季(9—11 月)蒸发皿蒸发量变化趋势不显著,冬季(12 月—次年 2 月)和春季(3—5 月)均呈现明显下降趋势,其中春季下降最为显著;就各月份而言,除 6、11、12 月 3 个月份呈不显著增加趋势外,其余 9 个月份均呈不同程度的下降趋势,其中 1 月份下降最为显著。

3) 珠江流域蒸发皿蒸发量的变化趋势存在区域差异性。整个珠江流域仅有少数区域显示为增加趋势,主要集中在流域的西北部、北江上游和珠江三角洲西南部;其他大部分地区均以显著减少为主,减少速率最大的区域集中在西江中游、北江与东江下游地区。

4) 完全相关分析表明,珠江流域蒸发皿蒸发量的减少主要与日照时数、气温日较差和平均风速的减小有关,其中与日照时数的相关性最大。

日照时数、气温日较差的减少可能是低云量及气溶胶浓度的增加导致的太阳辐射量的减少引起的;平均风速的减小则主要可能由全球变暖背景下亚洲冬季风和夏季风减弱导致中国平均风速的减小引起,但还有待进一步论证。

[参 考 文 献]

- [1] Fu Guobin, Stephen P, Charles, et al. A critical overview of pan evaporation trends over the last 50 years[J]. Climatic Change, 2009, 97(1/2): 193—214.
- [2] Roderick M L, Rotstayn L D, Farquhar G D. On the attribution of changing pan evaporation[J]. Geophysical Research Letters, 2007, 34, L17403.
- [3] Peterson T C, Golubev V S, Groisman P Y. Evaporation losing its strength[J]. Nature, 1995, 377: 687—688.
- [4] Roderick M L, Farquhar G D. The cause of decreased pan evaporation over the past 50 years[J]. Science, 2002, 298: 1410—1411.
- [5] Brutsaert W, Parlange M B. Hydrologic cycle explains the evaporation paradox[J]. Nature, 1998, 396: 30.
- [6] Ramanathan V, Crutsen P J, Kiehl J T, et al. Aerosols, climate and the hydrological cycle[J]. Science, 2001, 294: 2119—2124.
- [7] Ohmura A, Wild M. Is the hydrological cycle accelerating?[J]. Science, 2002, 298: 1345—2004.
- [8] Liu B, Xu M, Henderson M, et al. A spatial analysis of pan evaporation trends in China, 1955—2000[J]. J Geophys Res, 2004, 109(2): 2660—2668.
- [9] 丛振涛,倪广恒,杨大文,等. “蒸发悖论”在中国的规律分析[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 147—152.

- Cong Zhengtao, Ni Guangheng, Yang Dawen, et al. Evaporation paradox in China[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(2): 147—152. (in Chinese with English abstract)
- [10] Shen Shuanghe, Sheng Qiong. Characteristics and causes of changes of pan evaporation in China during 1957–2001[J]. *Acta Meteor Sinica*, 2009, 23(5): 575—584.
- [11] 刘敏, 沈彦, 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 Yan, Zeng Yan, et al. Change trend of pan evaporation and its cause analysis over the past 50 years in China[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 259—269. (in Chinese with English abstract)
- [12] 左洪超, 李栋梁, 胡隐樵. 近四十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 Yinjiao. Change trend of climate in China over the past 40 years and its relationship with the change of pan evaporation[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2005, 50(11): 1125—1130. (in Chinese with English abstract)
- [13] 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 Xinfu, Liu Changming, et al. Changes of pan evaporation in China in 1960–2000[J]. *Advances in Water Science*, 2007, 18(3): 311—318. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王艳君, 姜彤, 许崇育. 长江流域 20 cm 蒸发皿蒸发量的时空变化[J]. *水科学进展*, 2006, 17(6): 830—833.
Wang Yanjun, Jiang Tong, Xu Chongyu. Spatial-temporal change of 20 cm pan evaporation over the Yangtze River Basin[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(6): 830—833. (in Chinese with English abstract)
- [15] Liu Changming, Zeng Yan. Changes of pan evaporation in the recent 40 years in the Yellow River Basin[J]. *Water International*, 2004, 29(4): 510—516.
- [16] 郭军, 任国玉. 黄淮海流域蒸发量的变化及其原因分析[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 666—672.
Guo Jun, Ren Guoyu. Recent change of pan evaporation and possible climate factors over the Huang-Huai-Hai watershed, China[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 666—672. (in Chinese with English abstract)
- [17] 杜军, 边多, 鲍建华, 等. 藏北高原蒸发皿蒸发量及其影响因素的变化特征[J]. *水科学进展*, 2008, 19(6): 786—791.
Du Jun, Bian Duo, Bao Jianhua, et al. Changes of pan evaporations and its impact factors over northern Tibet in 1971–2006[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19(6): 786—791. (in Chinese with English abstract)
- [18] 王兆礼, 陈晓宏, 黄国如. 近 40 年来珠江流域平均气温时空演变特征[J]. *热带地理*, 2007, 27(3): 289—293.
Wang Zhaoli, Chen Xiaohong, Huang Guoru. Spatio-temporal change characteristics of mean temperature in the Pearl River Basin during 1961–2000[J]. *Tropical Geography*, 2007, 27(3): 289—293. (in Chinese with English abstract)
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [20] 谢平, 陈晓宏, 王兆礼, 等. 东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析[J]. *地理学报*, 2009, 64(3): 270—277.
Xie Ping, Chen Xiaohong, Wang Zhaoli, et al. Comparison of actual evapotranspiration and pan evaporation[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2009, 64(3): 270—277. (in Chinese with English abstract)
- [21] 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 consequence[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2001, 107(4): 255—278.
- [22] 许潇锋, 邱金桓, 牛生杰, 等. 近 45 年中国 12 个一级站大气气溶胶光学厚度变化特征[J]. *环境科学学报*, 2009, 29(3): 488—495.
Xu Xiaofeng, Qiu Jinhuan, Niu Shengjie, et al. Optical depth of the atmospheric aerosol at 12 stations in China over the past 45 years[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(3): 488—495. (in Chinese with English abstract)
- [23] Wang Huijun. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(3): 376—386.

Variation characteristics and impact factors of pan evaporation in Pearl River Basin, China

Wang Zhaoli¹, Qin Jiexiang¹, Chen Xiaohong^{2*}

(1. School of Civil and Transportation Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510641, China;

2. Center for Water Resources and Environment Research, SUN Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

Abstract: With the data of monthly 20 cm pan evaporation and its impact climatic factors at 65 meteorological stations in Pearl River Basin from 1960 to 2001, spatial-temporal change characteristics of pan evaporation are analyzed by using Mann-Kendall test method, complete correlation methods and geographic information systems. The results showed that there was a significant decreasing trend in the observations on pan evaporation in Pearl River Basin, with an average rate of 2.79 mm/a in the whole basin. In autumn and summer, pan evaporation had no apparent decline trend; but in spring and winter, there existed a significant decreasing trend. The spatial distribution of the change rate showed that the maximum decrease of annual pan evaporation mainly occurs in the south and middle of Pearl River Basin. On the attribution, the paper calculated the complete correlation coefficients of eight climate factors with pan evaporation. And decreases in the sunshine duration, diurnal temperature range and the average wind speed were found to be the main influencing factors leading to the decrease of pan evaporation. These can provide references for study of climate change and hydrologic cycle in Pearl River Basin.

Key words: evaporation, geographic information systems, correlation methods, characteristics, Pearl River Basin