

# 珠江三角洲地区近 30 年 降雨变化趋势及其与气溶胶的关系

李深林<sup>1,2</sup>, 陈晓宏<sup>1,2</sup>, 赖成光<sup>1,2</sup>, 吴孝情<sup>1,2</sup>

(1. 中山大学水资源与环境研究中心, 广东 广州 510275;

2. 华南地区水循环和水安全广东普通高校重点实验室, 广东 广州 510275)

**摘要:** 基于珠江三角洲地区 1980~2010 年  $0.5^\circ \times 0.5^\circ$  经纬度网格的逐月降水资料, 利用 Mann-Kendall 秩次相关法, 对珠江三角洲地区近 30 年的降雨趋势特征进行了分析。研究表明: 珠三角地区 2~4 月降雨量存在显著下降趋势, 而 6~9 月降雨量有显著的上升趋势。从气溶胶的角度对这种趋势产生的原因进行了分析, 针对珠三角地区 2~4 月和 6~9 月不同的降雨类型, 提出气溶胶物质的增多在一定程度上抑制了 2~4 月锋面雨的形成, 而对 6~9 月台风雨的产生也存在可能影响的假设, 并从降雨机制上进行了解释。

**关键词:** 降雨; 变化趋势; 珠三角地区; 气溶胶; 锋面雨; M-K 检验法

中图分类号: P468, X837

文献标识码: A

文章编号: 1000-0852(2016)04-0031-06

## 1 引言

降雨是一个地区气候环境特征的重要组成部分, 降雨量的大小及其时空分布是决定一个地区气候环境的重要因素。降雨趋势分析是处理长系列的降雨观测数据、掌握降雨多年动态及发现降雨规律的重要手段, 对指导气候、水文等方面的科学研究以及工农业生产具有重要意义。因此, 国内外众多学者对其进行了大量研究: 在全国尺度上, 任国玉等<sup>[1-2]</sup>根据 1951~1996 年地面气象记录资料, 计算了我国全年和季节降水量长期变化趋势特征指数, 并对降雨的时空分布及趋势变化空间特征进行了分析; 陈峪等<sup>[3]</sup>将全国按流域分为 10 个区域, 根据近 50 年的月降水资料, 分析了各流域年、季降水量的多年平均状态、年际变化特征以及长期变化趋势; 在大流域尺度上, 王兆礼等<sup>[4]</sup>研究了珠江流域近 40 年降雨量的时空演变特征; 张永领等<sup>[5]</sup>研究了长江流域夏季降雨的区域特征和演变规律。此外还有很多对单独行政区域角度上的研究<sup>[6-7]</sup>。国外研究方面, Chagon S A 对美国、Iwashima T 等对日本、Osborn T J 等对英国、Brunetti M 对意大利、Stone D A 等对

加拿大都进行过降雨变化趋势的研究<sup>[8-12]</sup>。

另一方面, 作为人类活动影响下变化剧烈而敏感的环境要素之一, 大气气溶胶物质也是近年来大气污染和环境变化研究领域中的重要对象之一, 其物理—化学—光学性质及其大气辐射效应一直是环境和气候科学领域研究人员关注的科学前沿<sup>[13]</sup>。不仅研究气溶胶物质本身具有很大的科学意义, 对气溶胶物质与其他气象环境因素的相关影响的研究也极为重要。

从研究区域来看, 基于特大城市群区域的降雨时空分布的研究较少。城市群是城市发展到成熟阶段的最高空间组织形式, 是在地域上集中分布的若干城市和特大城市集聚而成的庞大的、多核心、多层次城市集团, 是大都市区的联合体。不同于一般流域或区域, 特大城市群排放的高空悬浮颗粒物浓度远远高于其它区域, 而这些物质对特大城市群的多年连续降雨是否产生影响的研究尚不多见。

珠江三角洲地区位于广东省中南部, 珠江流域下游, 是由广州、深圳、佛山等 9 个城市组成的特大城市群。该地区人口高度密集, 经济高度发达, 是改革开放以来受高强度人类活动影响最为直接、最为显著

收稿日期: 2015-07-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41101511); 院士科技咨询项目(2015-ZD-07-04-03)

作者简介: 李深林 (1991-), 男, 湖南醴陵人, 博士研究生, 主要从事水文与水环境变化研究。E-mail: 403973199@qq.com

通讯作者: 陈晓宏 (1963-), 男, 湖北公安人, 教授, 博士生导师, 主要从事水文水资源研究。E-mail: eesexh@mail.sysu.edu.cn

的地区之一。气候变化,尤其是降雨的变化很可能对该区域的生产和生活带来巨大影响;与此同时,随着工业的迅速发展、能源消耗和机动车数量增加,珠三角地区污染物质的排放也迅速增加,并显著体现于大气中气溶胶物质的变化。对近几十年来降雨和气溶胶物质浓度变化及其内在关联的探究都显得意义重大。

## 2 研究区域及资料

珠江三角洲位于广东省中南部,是由西江、北江和东江三条河流形成的冲积平原。全境位于北纬  $21.7^{\circ}\sim 24^{\circ}$ 、东经  $112^{\circ}\sim 115.5^{\circ}$  之间,约  $5.6\times 10^4\text{km}^2$ ,包括广州、深圳、佛山、东莞、中山、珠海、惠州、江门、肇庆 9 个地级市。属于亚热带季风气候,多年平均气温  $22^{\circ}\text{C}$  左右,多年平均降雨约 1600mm,其中 4~9 月为雨季,降雨总量约占到全年的八成。

本文采用的降雨资料是从中国气象科学数据库共享服务网下载,由国家气象信息中心资料服务室利用全国国家级台站(基本、基准和一般站)的降水月值资料和由 GTOPO30 数据(分辨率为  $0.05^{\circ}\times 0.05^{\circ}$ )经过重采样生产的中国陆地  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$  的数字高程模型 DEM 加工处理后得到的中国地面降水月值  $0.5^{\circ}\times 0.5^{\circ}$  格点数据集。本研究从该数据集中选取珠江三角地区经纬度范围内( $21.5^{\circ}\sim 24^{\circ}\text{N}$ 、 $112^{\circ}\sim 115.5^{\circ}\text{E}$ )共记 28 个网格数据进行研究,除了部分海域面积,共有 22 个有效网格数据。考虑我国改革开放时间,选择的数据时间跨度从 1980 年到 2010 年,总共 31a。

## 3 方法

本文主要采用 Mann-Kendall 方法<sup>[14-15]</sup>进行降雨序列的趋势分析。

在时间序列趋势分析中,Mann-Kendall 非参数检验方法是世界气象组织推荐并已广泛使用的分参数检验方法,最初由 Mann 和 Kendall 提出。该方法是提取序列变化趋势的有效工具。Mann-Kendall 方法不需要样本遵从一定的分布,也不受少数异常值的干扰,适用于水文、气象等非正态分布的数据,计算简便。许多学者已不断运用该方法来分析降水、径流、气温和水质等要素时间序列的趋势变化。本次研究的研究对象为典型的降水时间序列,不遵从特定的分布,存在少数异常值(如 1983 年 3 月份降水明显异常),适合于运用 MK 方法进行趋势检验。

对于时间序列  $X=\{x_1, x_2, \dots, x_n\}$ ,定义统计变量  $S$  为

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+2}^n \text{sign}(x_j - x_k) \quad (1)$$

其中

$$\text{sign}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j - x_k > 0 \\ 0 & x_j - x_k = 0 \\ -1 & x_j - x_k < 0 \end{cases} \quad (2)$$

假设变量独立同分布,则统计量  $S$  近似服从正态分布,其均值为 0,方差为  $n(n-1)(2n+5)/18$ ,计算统计检验值  $Z$  公式为:

$$Z = \begin{cases} (S-1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ (S+1)/\sqrt{\text{Var}(S)} & S < 0 \end{cases} \quad (3)$$

若  $Z$  为正,说明序列有上升趋势,反之,有下降趋势。当样本数量  $n$  足够大时( $n > 10$ ), $Z$  近似服从标准化正态分布。原假设序列不存在趋势变化,对于给定的置信度水平  $\alpha$ ,可以通过查表,得到  $|Z|$  对应的的置信度水平  $\alpha_i, \alpha_i > \alpha$ ,说明在该置信度水平下,原假设可信度较高,序列趋势变化不显著;反之,原序列趋势变化显著。

## 4 降雨趋势分析结果

### 4.1 单月降雨趋势分析

分别对 1~12 月的单月降雨量序列进行 M-K 趋势检验,检验结果如表 1 所示。

单月降雨量趋势检验结果如表 1 所示,6 月份降雨量序列的 M-K 统计量为 2.28,超过 1.96,达到 95% 置信度水平,存在显著的上升趋势。8 月份和 12 月份降雨量呈现出上升趋势;2 月份、3 月份、4 月份、5 月份和 10 月份降雨量呈现下降趋势;1 月份、7 月份、9 月份和 11 月份降雨量基本呈现无趋势变化。

表1 单月降雨量M-K趋势检验结果  
Table1 M-K mutation test results of the single month precipitation

月份	1月	2月	3月	4月	5月	6月
M-K 统计量	0.27	-1.36	-0.79	-1.41	-1.00	2.28
趋势结果	不明显	下降	下降	下降	下降	显著上升
月份	7月	8月	9月	10月	11月	12月
M-K 统计量	-0.48	1.17	0.21	-1.05	-0.09	1.15
趋势结果	不明显	上升	不明显	下降	不明显	上升

### 4.2 多月降雨量趋势分析

连续月份降雨趋势检验结果如表 2 所示。为了充分了解连续月份降雨量呈现的趋势特征,本文除了对传统的年降雨量、旱季和雨季降雨量进行趋势分析之外,还对其他连续月份的总降雨量进行了趋势分析,并将具有显著趋势变化或代表性的结果列入表中。

表2 多月降雨参数M-K检验结果

Table2 M-K mutation test results of the precipitation in some months

	M-K 平均统计量	达到某置信度水平的样本比例			趋势结果
		>90%	>95%	>99%	
全年	-0.42	0	0	0	不明显
旱季	-1.39	32%	8%	0	下降
雨季	0.46	12%	4%	0	上升
2~4 月	-2.21	92%	76%	12%	显著下降
6~9 月	1.89	76%	44%	8%	显著上升
11~1 月	0.36	0	0	0	不明显

由表 2 可知。显著的趋势变化出现在 2~4 月和 6~9 月。其中:

(1) 2~4 月降水呈显著下降趋势。在珠江三角洲地区 22 个样本数据中,平均 M-K 检验值为-2.21,超过 95%置信度水平,其中 92%的样本检验值达到 90%置信度水平,76%和 12%的样本检验结果分别达到 95%和 99%置信度水平,呈现显著的下降趋势。

将 22 个样本检验结果通过克里金方法进行空间插值,如图 1-a 所示。在空间分布规律上,珠三角地区 2~4 月降雨量整体下降趋势明显,而且从东向西,下降趋势越发显著。珠三角绝大部分区域 2~4 月降雨量下

降趋势的置信度水平超过 95%,包括广州、佛山、肇庆、江门全境以及中山、东莞和惠州的大部分区域。东经 113°以西,北纬 23°附近的佛山西部、江门北部和肇庆南部地区趋势更加明显。相比而言,东经 113°以东、滨海一线地区的置信度水平则相对降低。

(2) 6~9 月降水量呈显著上升趋势。在珠江三角洲地区 22 个样本数据中,平均 MK 检验值为 1.89,接近 95%置信度水平,其中 76%的样本检验值达到 90%置信度水平,44%和 8%的样本检验结果分别达到 95%和 99%置信度水平,呈现显著的上升趋势。

同样将 22 个样本检验结果通过克里金方法进行空间插值,如图 1-b 所示。珠三角地区 6~9 月降雨量整体上升趋势明显。而且从西向东,上升趋势越来越显著的。珠三角大部分区域 6~9 月降雨量上升趋势的置信度水平超过 95%,包括广州、深圳、东莞、惠州、中山的全部以及佛山和珠海的部分区域,尤以东部沿海一带显著性程度高。而西部区域的置信度水平相对较低。

需要特别提出的是,6~9 月降雨量的上升趋势和 2~4 月降雨量的下降趋势的显著度分布呈现空间上的对称关系。前者从西往东,上升趋势越来越明显,尤以东部沿海上升趋势最为显著,后者从东往西,下降趋势越来越明显,以西部内陆下降趋势最为显著。

(3) 年降雨总量无明显变化。旱季(10月~翌年3月)降雨量呈现相对不显著的下降趋势,雨季(4~9月)降雨量呈较显著的上升趋势;11月~翌年1月降水无趋势变化。

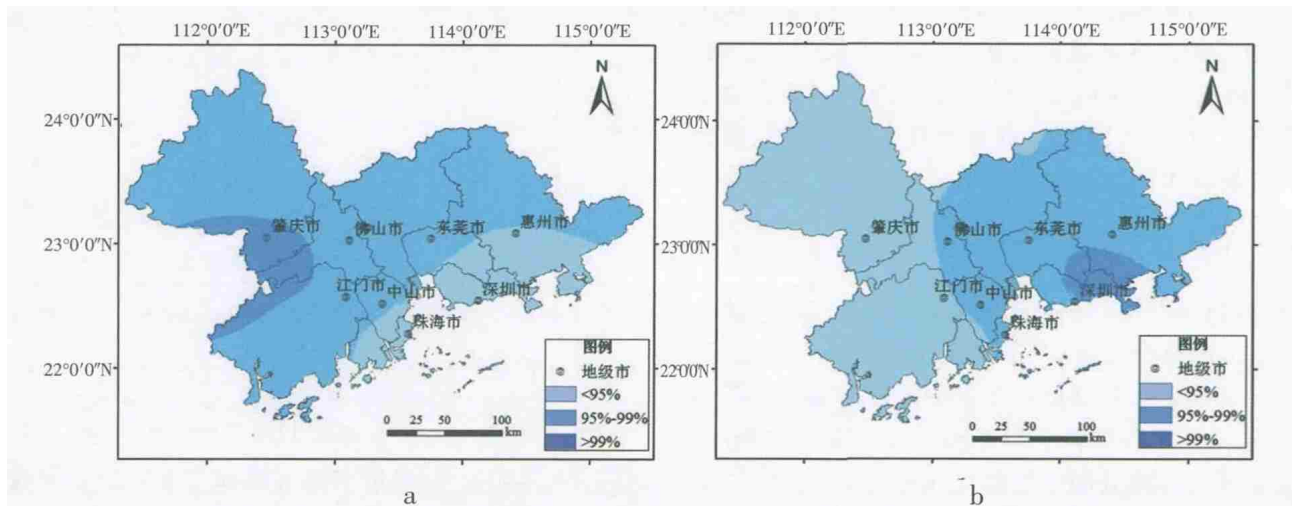


图 1 a: 2~4 月降雨量下降趋势置信度水平分布;b: 6~9 月降雨量上升趋势置信度水平分布  
Fig.1 (a): The distribution of the confidence of the precipitation declining trend from Feb. to Apr.;  
(b): The distribution of the confidence of the precipitation increasing trend from Jun. to Sept.

### 4.3 降雨量变化分析

由以上分析可知,2~4月降雨量显著下降,6~9月降雨量显著上升。分别计算珠江三角洲地区1980~

1989年、1990~1999年和2000~2009年三个阶段的2~4月和6~9月降雨量平均值及占平均年降雨量的比例。计算结果如图2所示。

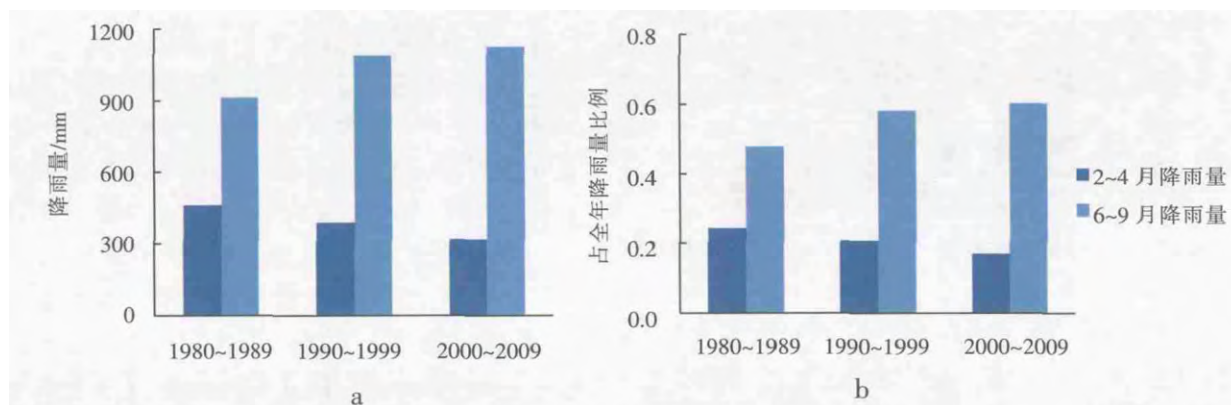


图2 珠三角地区2~4月及6~9月平均降水量及占全年比例柱状图

Fig.2 (a): The average precipitation from Feb. to Apr. and from Jun. to Sept.;

(b) The proportion of the precipitation from Feb. to Apr. and from Jun. to Sept. in the whole year.

无论从降雨量绝对值还是占全年降雨的比例,2~4月和6~9月降雨量的变化都十分明显。三个时间段内,2~4月平均降水量分别为462mm、389mm和320mm,占对应时段平均年降水量的比重分别为24%、21%、17%,最近10年对比最初10年降雨的绝对降幅为140mm,占全年比重下降近7%;6~9月降水量分别为911mm、1089mm和1124mm,分别占到对应时段平均年降水量的48%、58%、60%,最近10年对比最初10年降雨的绝对增幅超过200mm,占全年比重增加了12%。

降雨年内分布的这种变化可能带来巨大影响。2~4月以及6~9月份降雨量总和占到了全年雨量的70%~80%,其降雨量的变化对整年的降雨时间分布带来极大的改变,这必然会对生产生活带来巨大影响;2~4月降雨量的减少可能导致春旱,而且加重春季空气污染程度;6~9月降雨量的增加则将加剧珠三角地区中后汛期城市防洪抗涝的严峻形势。

### 5 珠三角地区气溶胶物质分布特征

气溶胶由固体或液体小质点分散并悬浮在气体介质中形成的胶体分散体系,其大小从分子簇到沙尘、孢粉不等。而气溶胶对降雨存在影响主要是因为直径小于0.1mm的气溶胶细粒子是雨滴形成的凝结核物质。长期稳定的气溶胶云即所谓的灰霾天气。

20世纪80年代初以来,工业的发展向大气中排放大量的空气污染物质。同时,珠三角城市群的发展对

边界大气输送和扩散造成影响,使平均逆温增强,风速减小,污染物扩散范围减小而更易集中在城市群区域内,导致珠三角空气中气溶胶物质显著增加<sup>[16-17]</sup>。80年代前珠三角地区工业发展仍在起步阶段,灰霾日数相对较少。80年代中后期到2000年是快速发展时期,灰霾日数居高不下<sup>[18]</sup>,佛山近些年的年平均灰霾日数就高达145.5d。吴兑等<sup>[19]</sup>对珠三角地区近50年的灰霾天气系列进行研究,表明,珠江三角洲地区在1954~1978年期间能见度非常好,每年能见度小于10km的灰霾天气不足40d。自20世纪80年代初开始,该地区的能见度急剧恶化,灰霾天气显著增加,最多1年超过200d(1997年),如图3所示。

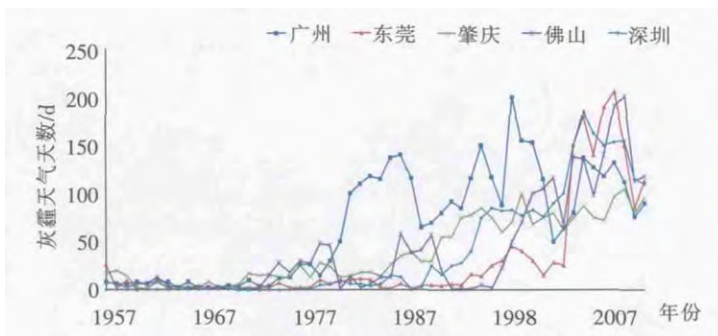


图3 珠江三角洲主要城市年内灰霾天数长系列趋势图<sup>[19]</sup>

Fig.3 The long-term trend of annual haze days in typical cities in the Pearl River delta area<sup>[19]</sup>

不仅如此,气溶胶污染在全年各个时期显著存在。根据李成才、毛节泰等对中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征的分析<sup>[20]</sup>,珠三角地区为气

溶胶光学厚度独立的大值中心。珠江口以西的珠江三角洲西侧,及广州、佛山、中山等地,全年处于重污染区。

综上所述,从20世纪80年代初以来的近30年中,珠三角地区空气中的气溶胶物质普遍增加。

## 6 气溶胶物质对降雨的影响

珠三角地区气溶胶物质的普遍增加可能在一定程度上促成了该地区降雨量的趋势变化。本研究发现,珠三角地区近30年来2~4月的降雨量显著下降,6~9月降雨量显著增加。而珠三角地区2~4月和6~9月分别处于两种不同的降雨天气系统控制之下。2~4月珠三角地区的主要降雨类型为锋面雨;6~9月,由热带气旋天气系统带来的台风雨为主要降雨类型。另一方面,根据相关研究成果<sup>[16-19]</sup>,近30年来,珠江三角洲地区空气中的气溶胶物质普遍增加。因此,从2~4月和6~9月不同的降雨类型出发,结合空气中气溶胶物质的变化,本文对这两个时段降雨趋势产生的可能原因进行

了探讨。

(1)气溶胶物质增多抑制锋面雨。2~4月由于西太平洋高压脊线向北移动,使得珠三角地区正好处于脊线边缘,北方干冷空气南下,与南海温湿空气在此相遇形成锋面。所以,锋面雨是这个时段主要的降雨类型。

气溶胶物质增多对锋面雨的抑制作用主要体现在两点:一方面,空气中气溶胶物质的增加增大了本地暖气团的整体密度。冷暖气团交会时,原本冷气团密度大而沉于地表,暖气团密度小而被抬升至高空。然而,由于气溶胶物质的影响,本地暖气团密度变大,对暖气团的爬升造成阻碍,使得暖气团无法爬升或者爬升高度降低,从而减少了其致雨的可能性;另一方面,凝结核物质增加导致云滴数量增加。每个云滴的形成都需要微粒作为它的凝集核,因此,空气中微粒数量的增加会导致云滴数量的增加,在水量相同的情况下,如果云滴数量越多,其平均体积将会变小。而云滴分子太小将对降雨产生抑制作用<sup>[21]</sup>,见图4。

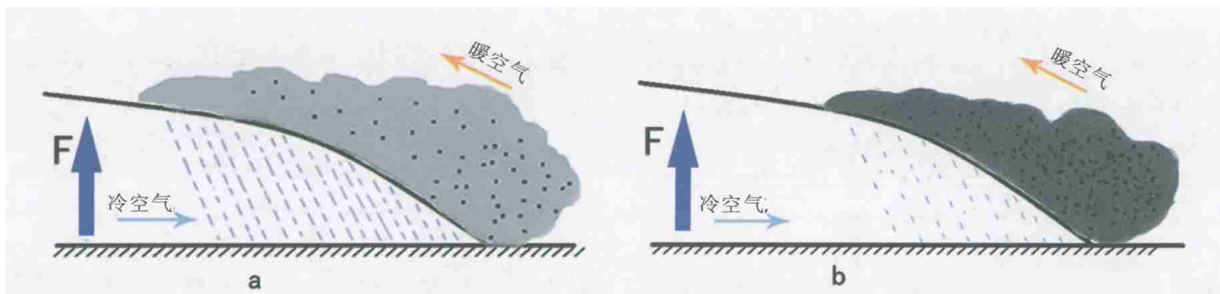


图4 锋面雨形成机理图

(a:含气溶胶物质正常的暖气团;b:含气溶胶物质较多的暖气团)

Fig.4 The formation mechanism of frontal rain

(a: The normal warm air mass; b: The warm air mass with too much aerosol)

(2)气溶胶物质对台风雨的影响。6~9月珠三角地区主要受台风雨控制,热带气旋从海上带来丰富的水汽,在气旋系统的动力机制作用下辐合上升至高空冷凝致雨。

气溶胶物质的增加并不会抑制气旋系统的致雨性,这点和锋面系统不同。首先,在动力抬升机制上,热带气旋系统拥有更为强力自主的上升动力,可以忽略本地气团密度变大带来的影响,在本地气团气溶胶物质增多的情况下,热带气旋系统仍能将其抬升到适当致雨高度。其次,在水滴凝结方面,气旋系统本身水汽充足,丰富的气溶胶物质不仅不会导致雨滴过小,反而可能为大量的水汽提供足够的凝结核,促进了台风雨的产生。这也可能是6~9月降雨量增加趋

势的原因之一。

## 7 结论

本文从我国特大城市群之一——珠江三角洲地区近30年的月降雨序列出发,对单月和连续月份的降雨量进行了趋势分析,在连续月份的降雨量趋势分析中,进行了多种组合的尝试,分析珠江三角洲降雨趋势;同时,选择在该时期内另一重要的、具有显著变化的大气要素——气溶胶物质的角度,对两者之间的影响关系进行了定性分析,得出结论如下:

(1)珠三角地区1980~2010年间,2~4月降水量存在显著下降趋势。M-K检验基本超过95%置信度水平。这30年间,前、中、后10年的2~4月平均降水量

分别为 462mm、389mm 和 320mm, 降幅达到 140mm。

(2) 珠三角地区 1980~2010 年间, 6~9 月降水量存在显著上升趋势。M-K 检验大都超过 95% 置信度水平。这 30 年间, 前、中、后 10 年 6~9 月的平均降水量分别为 752mm、932mm 和 1 029mm, 增幅达到近 300mm。

(3) 气溶胶物质的增多导致了本地暖气团爬升高度降低, 同时减小凝结雨滴的大小, 抑制了锋面雨的形成。这是珠三角地区 2~4 月降雨量显著减少的原因之一; 而大量的气溶胶物质为气旋雨提供了大量凝结合, 可能是 6~9 月降雨量增加的原因。

#### 参考文献:

- [1] 任国玉, 吴虹, 陈正洪. 我国降雨变化趋势的空间特征[J]. 应用气象学报, 2000, 119(3): 322-330. (REN Guoyu, WU Hong, CHEN Zhenhong. Spatial patterns of change trend in rainfall of China [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000, 119(3): 322-330. (in Chinese))
- [2] 任国玉, 封国林, 严中伟. 中国极端气候变化观测研究回顾与展望[J]. 气候与环境研究, 2010, 15(4): 337-353. (REN Guoyu, FENG, Guolin, YAN Zhongwei. Progresses in observation studies of climate extremes and changes in mainland China [J]. Climatic and Environmental Research, 2010, 15(4): 337-353. (in Chinese))
- [3] 陈峪, 高歌, 任国玉, 等. 中国十大流域近 40 多年降水量时空变化特征[J]. 自然资源学报, 2005, 20(5): 637-643. (CHEN Yu, GAO Ge, REN Guoyu, et al. Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China between 1956 and 2000[J]. Journal of Natural Resources, 2005, 20(5): 637-643. (in Chinese))
- [4] 王兆礼, 陈晓宏, 张灵, 等. 近 40 年来珠江流域降水量的时空演变特征[J]. 水文, 2006, 26(6): 71-74. (WANG Zhaoli, CHEN Xiaohong, ZHANG Ling, et al. Spatio-temporal change characteristics of precipitation in the Pearl River basin in recent 40 years[J]. Journal of China Hydrology, 2006, 26(6): 71-74. (in Chinese))
- [5] 张永领, 高全洲, 丁裕国, 等. 长江流域夏季降水的时空特征及演化趋势分析[J]. 热带气象学报, 2006, 22(4): 161-167. (ZHANG Yongling, GAO Quanzhou, DING Yuguo, et al. Analysis of time-spatial characteristics and evolutionary trends of summer precipitation in the Yangtze River catchment. [J]. Journal of Tropical Meteorology, 2006, 22(4): 161-167. (in Chinese))
- [6] 秦建国, 洪国喜, 张涛, 等. 无锡站年际降雨趋势、特征与预报分析[J]. 水文, 2013, 33(4): 92-96. (QIN Jianguo, HONG Guoxi, ZHANG Tao, et al. Trend, characteristics and forecasting analysis of inter-annual rainfall at Wuxi station[J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(4): 92-96. (in Chinese))
- [7] 张志才, 陈喜, 王文, 等. 贵州降雨变化趋势及机制特征分析[J]. 地球与环境, 2007, 35(4): 351-355. (ZHANG Zhichang, CHEN Xi, WANG Wen, et al. Analysis of rainfall trend and extreme events in Guizhou[J]. Earth and Environment, 2007, 35(4): 351-355. (in Chinese))
- [8] Chagon, S A. Comments on secular trends of precipitation amount, frequency, and intensity in the United States [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 1998, 79: 2550-2552.
- [9] Iwashima T, Yamamoto R. A statistical analysis of the extreme event: long-term trend of heavy daily precipitation [J]. Journal of Meteorological Society of Japan, 1993, 71: 637-640.
- [10] Osborn T J, Hulme M, Jones P D, et al. Observed trends in the daily intensity of United Kingdom precipitation [J]. International Journal Climatology, 2000, 20: 347-364.
- [11] Brunetti M, Maugeri M, Monti F, et al. Changes in daily precipitation frequency and distribution in Italy over the last 120 years [J]. Journal of Geophysical Research, 2004, 109, D05102, doi:10. 1029/2003JD004296.
- [12] Stone D A, Weaver A J, Zwiers E W. Trends in Canadian precipitation intensity [J]. Atmosphere Ocean, 1999, 37: 321-347.
- [13] 蒋哲, 陈良富, 王中挺, 等. 珠江三角洲对流层气溶胶时空变化特征分析[J]. 地球物理学报, 2013, 56(6): 1835-1842. (JIANG Zhe, CHEN Liangfu, WANG Zhongting, et al. The analysis of spatiotemporal variation characteristics of tropospheric Pearl River delta [J]. Chinese J .Geophys., 2013, 56(6): 1835-1842. (in Chinese))
- [14] Mann H B. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 1945, 13(3): 245-259.
- [15] Kendall M, Gibbons J. Rank Correlation Methods [M]. A Charles Griffin Title, 1990.
- [16] 陈燕, 蒋维楦, 郭文利, 等. 珠江三角洲地区城市群发展对局地大气污染物扩散的影响[J]. 环境科学学报, 2005, 25(5): 700-710. (CHEN Yan, JIANG Weimei, GUO Wenli, et al. Study on the effect of the city group development in Pear River delta on local air pollutant dispersion by numerical modeling [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(5): 700-710. (in Chinese))
- [17] 吴兑, 毕雪岩, 邓雪娇, 等. 珠江三角洲气溶胶云造成的严重灰霾天气[J]. 自然灾害学报, 2006, (6). (WU Dui, BI Xueyan, DENG Xuejiao, et al. Heavy haze weather resulting from aerosol cloud over Pearl River delta [J]. Journal of Natural Disasters, 2006, (6). (in Chinese))
- [18] 罗云, 炎利军, 朱建军. 佛山市近三十年气候及灾害性天气变化特征[J]. 广东气象, 2014, (2). (LUO Yun, YAN Lijun, ZHU Jianjun. Change characteristics of climate and disasterous weather in Foshan in recent 30 years [J]. Guangdong Meteorology, 2014, (2). (in Chinese))
- [19] 吴兑, 廖碧婷, 陈慧忠, 等. 珠江三角洲地区的灰霾天气研究进展[J]. 气候与环境研究, 2014, 19 (2): 248-264. (WU Dui, LIAO Biting, CHEN Huizhong, et al. Advances in studies of haze weather over Pearl River delta [J]. Climatic and Environmental Research, 2014, 19(2): 248-264. (in Chinese))
- [20] 李成才, 毛杰泰, 刘启汉, 等. 利用 MODIS 研究中国东部地区气溶胶光学厚度的分布和季节变化特征[J]. 科学通报, 2003, 48(19): 2094-2100. (LI Chengcai, MAO Jietai, LIU Qihan, et al. Study of the distribution of aerosol optical depth and its seasonal change characteristics, using data from MODIS [J]. Chinese Science Bulletin, 2003, 48(19): -2094-2100. (in Chinese))
- [21] Owen. B. Toon, How Pollution Suppresses Rain. Science, 2000, 287(10): 1763-1765.

- [9] 李国芳,陈阿平,华家鹏. 设计潮位计算中若干问题探讨[J]. 水电能源科学, 2006,24(3):35-38. (LI Guofang, CHEN Aping, HUA Jiapeng. Problems and improvements in design tidal level calculation[J]. Water Resources and Power, 2006,24(3):35-38. (in Chinese))
- [10] 龚政,张茜,赵亚昆,等. 江苏沿海无资料地区海堤工程设计潮位推算方法[J]. 水利水电科技进展, 2013,33(3):14-17. (GONG Zheng, ZHANG Qian, ZHAO Yakun, et al. A calculation method of design tide levels for seawalls at Jiangsu coast without tide level observation data [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2013,33(3):14-17. (in Chinese))
- [11] 李松仕,林永泉,胡美英. 福建沿海设计潮位查算图研制[J]. 水文, 2000,20(1):26-30. (LI Songshi, LIN Yongquan, HU Meiyong. developing of the calculating diagram on design high tide level in Fujian coastal areas [J]. Hydrology, 2000,20(1):26-30. (in Chinese))

### Analysis of Design High Tide Levels in Ningbo Coastal Area

CHEN Wangchun, XU Qiliang, WANG Ying

(Ningbo Hydrology Bureau, Ningbo 315020, China)

**Abstract:** Selecting 16 representative tidal stations in the Ningbo coastal area, annual maximum extreme value distribution method, annual highest tide level Pearson- distribution method, extreme difference ratio method, and high tide level synchronous correlation method were used to make frequency analysis. Then a chart of high tidal level in different coastal area according to the calculation results was developed, which can provide a construction reference for coastal engineering and design high tidal level of the area without observation data.

**Key words:** Ningbo coastal; design high tidal level; frequency analysis; calculation diagram

(上接第 36 页)

### Precipitation Change Trend in Pearl River Delta Area and Relation with Aerosol from 1980 to 2010

LI Shenlin<sup>1,2</sup>, CHEN Xiaohong<sup>1,2</sup>, LAI Chengguang<sup>1,2</sup>, WU Xiaoqing<sup>1,2</sup>

(1. Center for Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China; 2. Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong Higher Education Institutes, Sun Yat-sen University, Guangzhou 510275, China)

**Abstract:** Based on the monthly precipitation data in the Pearl River Delta Area from 1980 to 2010, a Mann-Kendall trend test was made in this paper. The results show that the rainfall in the Pearl River Delta Area has a significant declining trend from February to April and a significant decreasing trend from June to September. This paper analyzed the causes of this trend from the perspective of aerosol. The precipitation, which is from February to April, has different rainfall patterns, compared to the precipitation from June to September, this paper hypothesized the increase of aerosol substance, to some extent, inhibited the formation of frontal gland precipitation from February to April and may also has some influence in the typhoon rain from June to September. There is also an explanation of the hypothesis.

**Key words:** rainfall; trend of change; Pearl River Delta; aerosol; frontal gland precipitation; Mann-Kendall

(上接第 75 页)

### Ecological Characteristics of Phytoplankton in Haihe River Mouth

WANG Yufang, REN Jingang, WANG Yongxian, ZHOU Xiaocui, HUANG Lei

(Lower Reaches Management Bureau of HWCC, Tianjin 300061, China)

**Abstract:** The phytoplankton species and their community characteristics in May and August of 2014 were studied at the 9 sites in the Haihe River mouth. The results show that 48 species of phytoplankton were found in the Haihe River mouth, belonging to 33 genera, 21 families, 7 genera. The dominant species are diatoms, cyanobacteria and green algae, which is accounts for 75.83%. *Microcystis ichthyoblabe* Kutz and *skeletonema costatum* are main species. The average density of phytoplankton is  $1654.21 \times 10^4$  cells/L. The density is highest at Site No.3 in August. The average of biomass is 1.235 mg/L in May and 1.262mg/L in August. It is slightly higher in August. The average of Shannon-Wiener diversity index ( $H'$ ) is 0.97. The average of Margalef index ( $D$ ) is 2.24. The average of Pielou index ( $J$ ) is 0.25. The result indicates that the water body of the Haihe River mouth is medium pollution and mesotrophice level.

**Key words:** phytoplankton; ecological characteristics; Haihe River mouth