

Spatial-Temporal Changes of Precipitation Structure across the Pearl River Basin, China*

Juntai Peng^{1,2}, Qiang Zhang^{1#}, Xiaohong Chen²

¹Department of Water Resources and Environment, Sun Yat-sen University, Guangzhou

²Key Laboratory of Water Cycle and Water Security in Southern China of Guangdong High Education Institute, Sun Yat-sen University, Guangzhou

Email: pengjt@mail2.sysu.edu.cn, #zhangq68@mail.sysu.edu.cn

Received: May 3rd, 2012; revised: May 21st, 2012; accepted: May 27th, 2012

Abstract: Daily precipitation data over the Pearl River basin (1960-2005) from 42 rain gauges is used in this article. Precipitation indices such as annual total precipitation amount, annual total rainy days, annual precipitation intensity and annual mean rainy days are defined. These precipitation indices are analyzed using the modified Mann-Kendall method. Results show that: 1) Decreasing trend of precipitation is found mainly in the middle and upper Pearl River basin. Rainy-days are decreasing almost over the entire basin. Thus, the precipitation intensity of Pearl River basin is increasing, particularly in the middle and the eastern parts of the basin; 2) The occurrence and fractional contribution of wet periods with shorter durations (2 - 5 d) are tending to be predominant while longer durations are decreasing in recent decades; 3) Heavy storms are easy to occur in the eastern of the basin during shorter durations. Higher risk of floods and reduction of water yield in the lower basin will increase uncertainty of water supply in the Pearl River Delta and hence pose new challenges for water resources management.

Keywords: Precipitation Structure; Precipitation Duration; Precipitation Intensity; Hydrologic Cycle; Pearl River Basin

珠江流域降雨结构时空演变特征研究*

彭俊台^{1,2}, 张强^{1#}, 陈晓宏²

¹中山大学水资源与环境系, 广州

²中山大学华南地区水循环与水安全广东省普通高校重点实验室, 广州

Email: pengjt@mail2.sysu.edu.cn, #zhangq68@mail.sysu.edu.cn

收稿日期: 2012年5月3日; 修回日期: 2012年5月21日; 录用日期: 2012年5月27日

摘要: 本文利用珠江流域42个站点1960~2005年46年的日降雨资料, 分析了年降雨总量(ATP)、年降雨总天数(ATD)、年降雨强度(ATI)、年平均降雨历时(MWP)以及各降雨历时的发生率和贡献率等降水指标, 探讨了各种不同历时降雨的时空演变特征, 并运用了改进Mann-Kendall法检验了降雨序列变化的显著性。研究表明: 1) 珠江流域上游和中部地区降雨量呈现减少趋势, 降雨天数在整个流域范围内呈现减少趋势, 由此, 流域的降雨强度总体上呈现上升趋势, 特别是流域的中部和东部地区; 2) 流域短历时降雨(2~5 d)的发生率较高, 且占总降雨量的比重较大, 表明易于出现集中性的降雨, 而长历时降雨则出现下降趋势; 3) 珠江流域的暴雨多集中在流域东部地区, 而且暴雨在短历时降雨事件中的发生率和贡献率都比较高, 特别是流域下游的三角洲地区, 洪灾风险会显著提高, 增加水资源供给的不确定性, 加上经济的发展, 人口的增加, 需水的提高, 将为水资源管理与利用带来新的挑战。

*基金项目: 国家自然科学基金项目(项目编号: 41071020; 50839005)与新世纪优秀人才支持计划共同资助成果。

#通讯作者。

关键词: 降雨结构; 降雨历时; 降雨强度; 水文循环; 珠江流域

1. 引言

当前全球气温出现不同程度地生态环境上升, 导致区域乃至全球范围内水汽循环发生变异, 水文气象极端事件, 如旱涝灾害、台风等增多, 给人类社会与造成重要影响。降水结构的变化是水循环变异的重要指标, 对降水结构变化的研究也慢慢引起了关注, Zolina 等^[1]应用连续湿润天数的历时及其降水强度来研究欧洲极端降水, 得出连续湿润天数有变长的趋势, 其对应的降水强度增加。事实上, 最大连续降水天数也是极端降水的重要一方面, 某时期内持续时间最长的降水对当地的洪涝灾害形成有重要影响, 其他学者^[2-4]的研究也表明欧洲的极端降雨事件呈上升趋势, 也有研究表明^[5,6]美国的降雨也出现相同的趋势, 中国幅员辽阔, 各区域气候差异较大, 张强等^[7]通过 27 个降水极值指标的研究发现中国降水极值变化特征区域差异明显, 中国南方, 如长江中下游等区域, 降水极值仍呈上升趋势。由于降雨对洪水的产生有着重要的作用, 因此有众多学者研究了降雨的时空变化特性, 对于降雨天数的变化特征研究, 学者们往往集中在总降雨天数的研究上, 而对不同历时的连续性降雨少有涉猎, 然而, 长历时的连续性降雨对大洪水的产生会有显著的诱发作用。因此, 研究不同历时的连续性降雨的时空演变变化特征, 对了解降雨结构的时空演变特征有着重要的参考意义, 这也为研究降雨洪灾发生特性提供一种新的思考方向, 从一种新的角度考量降雨的变化趋势。对于连续性降雨结构的变化特征, 研究并不多^[1,2,8-10]。

对于珠江流域降水变化研究来讲, 已有一些研究工作, 张强等^[11,12]利用珠江流域 1960~2005 年 42 个雨量站的日降雨资料, 分析了降雨集中度的时空变化特征, 研究指出流域的西北部、南部和东南部的降水集中指数高, 流域的东北部和西南部的降雨集中程度较低。王兆礼等^[13]对近 40 年来珠江流域降水量的时空演变特征进行了分析, 认为流域总降水量呈微弱的增加趋势, 且具有明显的 11 年主周期振荡, 但不存在突变现象。而 Wang 等^[14]则利用 Mann-Kendall 趋势检验法研究了珠江流域中东江的最大降雨的趋势变化, 得出年极端降雨没有显著变化, 但月份降雨有些有显

著变化。这些学者从不同角度研究了珠江流域降雨时空变化规律, 但对降水结构的研究仍未开展, 这是本项目研究的主要目的与动机。本研究旨在通过探讨珠江流域降水结构的变化, 分析珠江流域区域水循环对区域气候乃至全球气候变化的响应特征与机理。

2. 研究区与数据

珠江流域地处在我国南方, 面积达 4.52×10^5 km²。流域地形以山地和丘陵为主, 占总流域面积的 94.5%; 平原面积小而分散, 仅占 5.5%。流域地势西北高而东南低。在气候上, 珠江流域属亚热带季风气候, 温和多雨。流域大部分地区年均温在 20℃ 以上, 年际变化不大, 多年平均雨量在 1000~2200 mm 之间。从径流量的角度说, 珠江流域是全国第二大水系, 汛期径流量(4~9 月)占全年的 80%。

本文所分析的数据是珠江流域 1960~2005 年 42 个站逐日降雨量资料, 数据的三性审查在之前的研究已做过^[11]。以日降雨量 $P \geq 1$ mm/d 作为降雨天, 以此排除个别非降雨引起的微量降雨。研究中定义的基本降水指标为: 年降雨总量(ATP)、年降雨总天数(ATD)、年降雨强度(ATI)以及年平均降雨历时(MWP), 定义见表 1。此外, 本为也分析了不同的连续降雨历时(WPs)的时空变化。

3. 研究方法

对于某序列趋势显著性检验, 本文运用改进的 Mann-Kendall 法进行检验。MK 检验^[15-17]是一种非参数的秩序检验法, 为世界气候组织所推荐, 在全球范围内得到广泛的应用^[18]。但是, 水文气象序列中存在自相关性, 这种自相关性对 MK 检验结果造成影响, Hamed 和 Rao^[17]于 1998 年改进了 MK 法(本文简称为

Table 1. Definition and unit of indexes of precipitation extremes in the Pearl River basin
表 1. 珠江流域极端降水指标及相应的定义与单位

降水指标	指标含义	单位
ATP	年总降水量	mm
ATD	年总降水天数	d
ATI	年总降水强度	mm/d
MWP	每年平均的连续降雨天数	d

MMK 法), 考虑了序列中不同延时的自相关性, 而这种改进的 MMK 法在水文序列中的运用显得更加稳健 [17,19]。

4. 结果

4.1. 珠江流域降水特征

表 2 显示了流域降雨的总体特征。珠江流域的多

年平均降雨量为 1500 mm, 平均每十年下降 2.01 mm; 多年平均降雨天数为 110 天, 平均每十年下降 1.40 d; 多年平均降雨强度为 13.50 mm/d, 每十年上升 0.14 mm/d; 多年的平均降雨历时为 2.22 天, 平均每十年下降 0.014 d。图 1 表示各降雨指标趋势变化的空间分布图, 其中绿色代表下降趋势, 红色代表上升趋势, 圆圈中有点的表示该趋势通过显著性检验。可以看出,

Table 2. Individual study site description and years of data used
表 2. 珠江流域各站基本资料

站名	序号	高程(m)	经度(E)	纬度(N)	ATP 均值	ATD 均值	ATI 均值	MWP 均值
威宁	1	112.8	104.28	26.87	905	101	8.91	2.05
沾益	2	130.2	103.83	25.58	1005	94	10.74	2.03
玉溪	3	128.1	102.55	24.33	923	91	10.18	2.05
泸西	4	120.5	103.77	24.53	933	95	9.84	2.08
蒙自	5	110.9	103.38	23.38	855	92	9.34	1.94
安顺	6	175.2	105.90	26.25	1355	117	11.59	2.06
兴义	7	170.1	105.18	25.43	1342	120	11.21	2.12
望谟	8	155.9	106.08	25.18	1237	98	12.73	1.87
罗甸	9	143.9	106.77	25.43	1145	96	11.96	1.92
独山	10	152.6	107.55	25.83	1324	122	10.87	2.17
榕江	11	138.7	108.53	25.97	1202	106	11.37	1.96
融安	12	302.5	109.40	25.22	1924	127	15.24	2.29
桂林	13	277.3	110.30	25.32	1894	125	15.10	2.32
南雄	14	190.1	114.32	25.13	1523	114	13.33	2.30
凤山	15	215.7	107.03	24.55	1531	109	14.05	2.15
河池	16	199.2	108.05	24.70	1500	114	13.20	2.13
都安	17	255.3	108.10	23.93	1731	119	14.55	2.23
柳州	18	195	109.40	24.35	1442	109	13.19	2.04
蒙山	19	227.5	110.52	24.20	1741	129	13.44	2.44
信都	20	189.4	111.53	24.42	1554	120	12.93	2.31
连州	21	185	112.38	24.78	1620	121	13.28	2.37
韶关	22	215.2	113.60	24.68	1555	115	13.47	2.39
佛冈	23	353.2	113.53	23.87	2165	127	16.99	2.64
连平	24	259.2	114.48	24.37	1763	122	14.41	2.58
寻乌	25	225.2	115.65	24.95	1618	119	13.56	2.50
那坡	26	191.2	105.83	23.42	1400	108	13.02	2.26
百色	27	147.5	106.60	23.90	1095	83	13.23	1.79
靖西	28	234.7	106.42	23.13	1643	122	13.49	2.36
来宾	29	185.1	109.23	23.75	1364	106	12.84	2.05
桂平	30	222.5	110.08	23.40	1713	127	13.51	2.46
梧州	31	192.9	111.30	23.48	1475	111	13.32	2.24
广宁	32	236.6	112.43	23.63	1708	120	14.26	2.46
高要	33	209.8	112.45	23.03	1651	114	14.55	2.39
广州	34	223.7	113.33	23.17	1727	108	16.00	2.33
河源	35	348.1	114.68	23.73	1944	116	16.70	2.59
增城	36	272.1	113.83	23.33	1909	111	17.21	2.37
惠阳	37	258.9	114.42	23.08	1726	104	16.59	2.31
龙州	38	165	106.85	22.33	1305	102	12.83	2.00
南宁	39	174.1	108.22	22.63	1314	102	12.86	2.01
罗定	40	163.5	111.57	22.77	1356	107	12.61	2.21
台山	41	315.3	112.78	22.25	1971	105	18.71	2.34
深圳	42	330.4	114.10	22.55	1941	99	19.64	2.26
Mean	-	450.1	-	-	1500	110	13.50	2.22

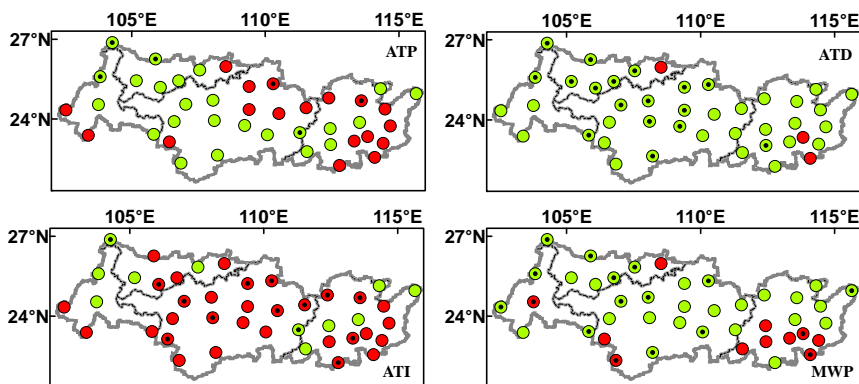


Figure 1. Spatial distribution of trends of precipitation indices across the Pearl River basin
图 1. 珠江流域各降雨指标空间分布图

流域 ATP 值有 24 个站点呈下降趋势，占站点总数的 57%，主要集中在流域的西部及中南部地区，沿着流域河道干流分布，这对流域干流的径流量将产生重要影响，其中有 4 个站点通过显著性检验，3 个分布在流域的西北端；而流域的中北部和东部地区的 ATP 值主要呈上升趋势，上升趋势的有 18 个站点，占总站点数的 42%，其中有 2 个站点通过显著性检验，由此得出，珠江流域 ATP 值以下降趋势为主导。流域 ATD 值多达 39 个站点(91%)呈下降趋势，基本覆盖了整个流域，其中 17 个站点通过显著性检验；而 ATD 呈上升趋势的站点仅有 3 个，且都没有通过显著性检验。流域 ATI 值有 11 个站点呈下降趋势，其中只有 2 个通过显著性检验；而呈上升趋势的站点较多，达 31 个，占站点总数的 74%，主要集中在流域中部及珠三角地区，其中有 12 个站点通过显著性检验。流域 MWP 值呈下降趋势的站点有 31 个，其中有 12 个站点通过显著性检验，有 11 个站点呈上升趋势，7 个主要集中在流域东部地区，仅有 4 个站点通过显著性检验。

基于以上分析，流域中西部地区降雨强度的增加、降雨量的减少以及降雨天数的减少，会增加该地区洪灾和旱灾的风险，特别是旱灾将更加显著。流域下游降雨强度以及降雨量的增加，会增加流域下游径流量，导致下游三角洲地区洪灾风险增高。张强等^[20]认为近年来珠江流域三角洲地区年径流量的增加与地区降雨强度的增加有密切关系，此外，由于珠江三角洲地区海拔较低，会致使洪灾的影响更显著。然而，由于人类活动的作用，珠江三角洲地区的年均水位却在减小，体现了人类活动对流域水文循环的影响作用^[20]。但是，珠江流域下游地区洪灾风险的提高对于区

域水资源管理和利用是不利的。

4.2. 不同历时降水事件的发生频率与对总降水量的贡献率

图 2 为珠江流域不同降雨历时的降水事件的发生频率及其对总降水量的贡献率的统计图。由图 2 可以看出，珠江流域各历时降水事件发生频率(蓝色柱体)随降雨历时的增加大致呈指数形式递减，1 d 历时的降水事件发生频率最高，约为 46.5%，而 ≥ 10 d 的降水事件的发生率为 0.75%。流域各降雨历时的贡献率与发生率的变化并不完全一致，2 d 历时降雨的贡献率最高，其雨量占年总降雨量的 20%，而 ≥ 10 d 的降水事件发生率虽然最低，但贡献率可达到 6%。短历时(1~2 d)的发生率虽然高达 71%，但贡献率只有 35%。由此表明，珠江流域主要以短历时降雨(1~4 d)为主，占年降雨总量的 50%，而其中 2 d 历时降雨的贡献率

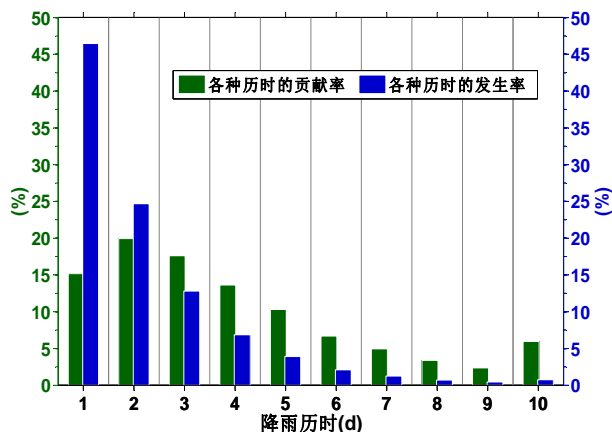


Figure 2. Occurrences and fraction contributions of WP durations across the Pearl River basin
图 2. 珠江流域各降雨历时统计图

就高达 20%。

流域不同区域各降雨历时的降水量对总降水量的贡献率与发生频率的变化略有不同，为了更好的研究降雨结构的变化规律，必须考虑水文事件的整体成因以及不同区域的不一致性。通过划分水文分区，可以从空间形成相对一致的水文区域，使分区内水文特性相似，保证水文事件的整体性，也区别了不同区域的不一致性，能让我们更好地认识水文规律。

水文分区的方法有很多，本文运用的是常用 K 均值聚类算法。根据 K 均值聚类算法，本文选取各站的经度、纬度、高程及 ATP、ATD、ATI 等地理特征因素为聚类因子，最后将整个珠江流域分别划分为四个区域。划分结果可见图 3。

各地区(图 4 和表 3)的历时降雨发生率和贡献率存在一些共性，各分区各历时降水发生频率随降水历时的增加大致呈指数递减，而且，各历时降雨贡献率较大的天数也基本出现在<5 d 内。但是，各分区之间也存在不同点，区域 I 短历时(1~2 d)的发生率约为 66%，贡献率约为 28%，比流域的平均水平低；区域 I 发生率与贡献率最高的历时为(2~3 d)。区域 II 短历

时降雨的发生率为 70%，贡献率为 35%，降雨情况与流域的平均水平很接近，长历时发生率与贡献率为 30%和 65%，表明区域 II 短历时的发生率和贡献率比区域 I 大，可知区域 II 降雨比区域 I 更集中。区域 III 与区域 IV 的降雨很接近，短历时的降雨的发生率为 74%左右，贡献率为 41%左右，比流域的平均水平高些，由此，从总体上来说区域 III 与 IV 降雨比区域 I 和 II 集中些。

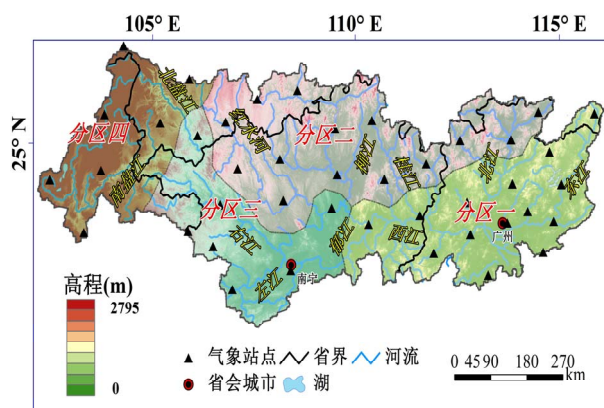


Figure 3. Homogenous sub-regions in the Pearl River basin
图 3. 珠江流域水文分区图

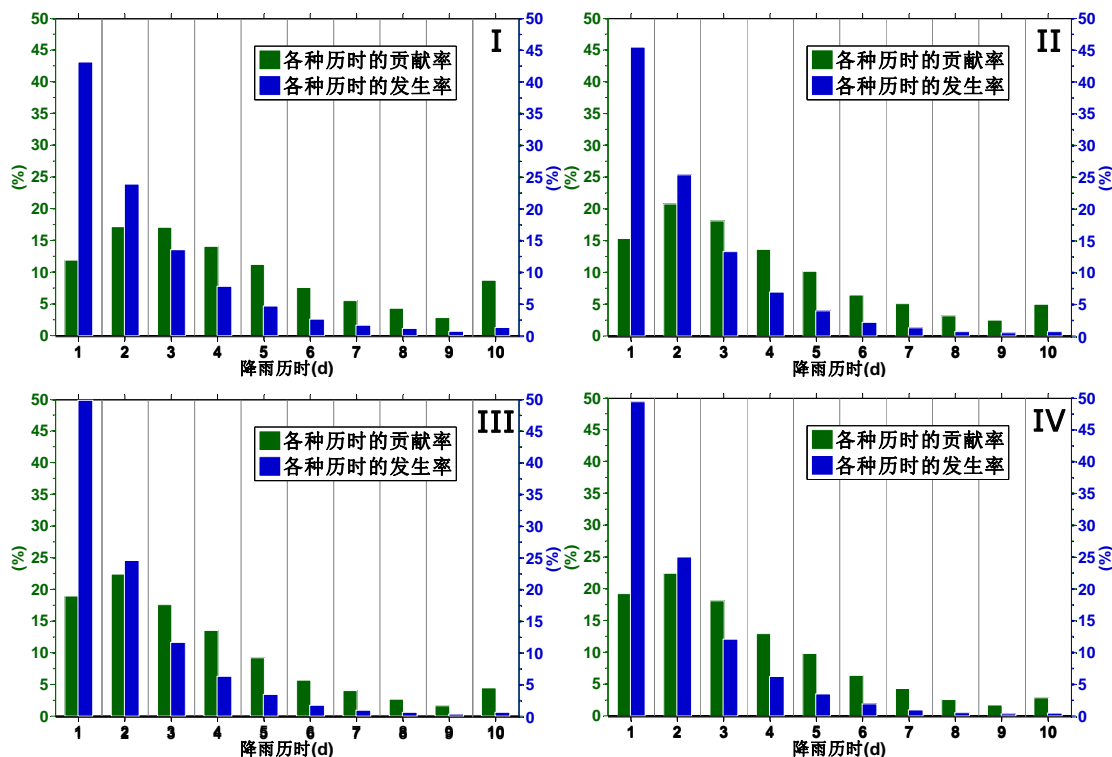


Figure 4. Occurrences and fraction contributions of WP durations within homogeneous precipitation regions I, II, III and IV over the Pearl River basin
图 4. 各分区降雨历时统计图

Table 3. Occurrences and fraction contributions of WPS with different durations within different homogeneous precipitation regions
表 3. 各降雨历时统计结果

降雨历时(d)		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
流域	发生率(%)	46.5	24.7	12.8	6.9	3.9	2.1	1.2	0.7	0.4	0.8
	贡献率(%)	15.2	19.9	17.6	13.6	10.3	6.7	4.9	3.4	2.4	6.0
区域 I	发生率(%)	43.1	23.9	13.5	7.7	4.6	2.6	1.6	1.0	0.6	1.3
	贡献率(%)	11.9	17.1	17.0	14.0	11.2	7.5	5.5	4.2	2.8	8.7
区域 II	发生率(%)	45.5	25.4	13.3	6.9	3.9	2.1	1.3	0.7	0.4	0.6
	贡献率(%)	15.4	20.8	18.1	13.6	10.1	6.4	5.1	3.1	2.4	4.9
区域 III	发生率(%)	50.2	24.5	11.7	6.2	3.4	1.7	0.9	0.5	0.3	0.6
	贡献率(%)	19.0	22.4	17.5	13.5	9.2	5.7	4.0	2.6	1.6	4.5
区域 IV	发生率(%)	49.5	25.0	12.0	6.2	3.4	1.9	0.9	0.5	0.3	0.4
	贡献率(%)	19.2	22.4	18.1	12.9	9.8	6.3	4.2	2.5	1.7	2.8

4.3. 时间变化趋势

图 5 和图 6 是各历时降雨的发生率和贡献率的时间演变特征。此分析首先对各种历时降雨的发生率和贡献率序列进行标准化处理,为了保证序列的连续性,对标准化序列进行 5 年的滑动平均处理,得到各历时发生率与贡献率的时间变化特征。图中的黄色表示增长趋势,浅蓝色表示下降趋势,颜色的深浅反应了变化的程度。由图 5 可知,在各降雨历时的发生率的变化并不是很清晰显著,但是,各历时降雨的发生率仍存在着一些变化。在 80 年代中期以前,长历时降雨的发生率出现了不同程度的增长,如 6~8 d 的降雨在 1965 年~1985 年间呈现较大的发生率;80 年代中期过后,有不同的变化,如 3~5 d 的降雨在 1985~1995 年间呈现出增长趋势,发生率较大;1995 年后,表现为 ≤ 3 d 的降雨出现增长趋势。从总体上来说,长历时降雨的发生率在减少,而短历时降雨的发生率在增大。这与 Zolina 等^[1]研究的欧洲的情况相反,表明不同流域降雨对全球气候变化响应的不同情况。

珠江流域的各历时的贡献率呈现了相似的变化趋势,从图 6 可以看出,在 80 年代中期之前,6~9 d 降雨历时对降雨总量有较大的贡献。在 1980~1990 年间,2~4 d 的降雨贡献率较高。在 1900~2000 年间,4~6 d 降雨历时的增长比较明显。2000 年之后, <4 d 的降雨的贡献率最高。

流域短历时降雨的发生率与贡献率的增加,表明了流域以短历时降雨为主要降雨形式,而且体现了降雨事件的集中性,从而反映了水文循环在珠江流域的集中变化。

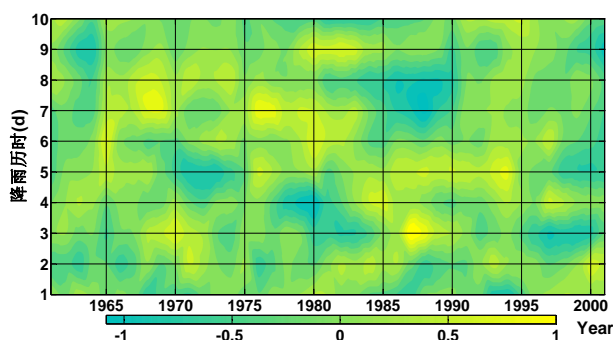


Figure 5. Temporal evolution of the normalized occurrences of anomalies in different WP durations

图 5. 珠江流域各历时降雨发生率时间趋势图

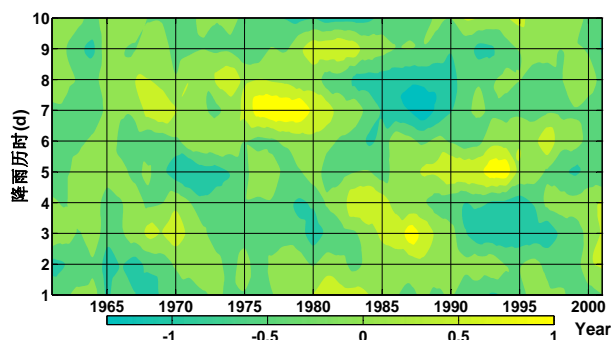


Figure 6. Temporal evolution of normalized fractional contribution anomalies in different WP durations

图 6. 珠江流域各历时降雨贡献率时间趋势图

4.4. 空间变化趋势

图 7 和图 8 为各降雨历时发生率和贡献率的空间分布图。首先将主要的降雨历时分成 1~2 d、3~5 d、6~8 d、9~10 d 等四种情况分别进行分析。对所有的序列进行标准化处理后进行趋势分析,并运用 MMK 法对各个站点进行显著性检验,置信度为 95%。图中

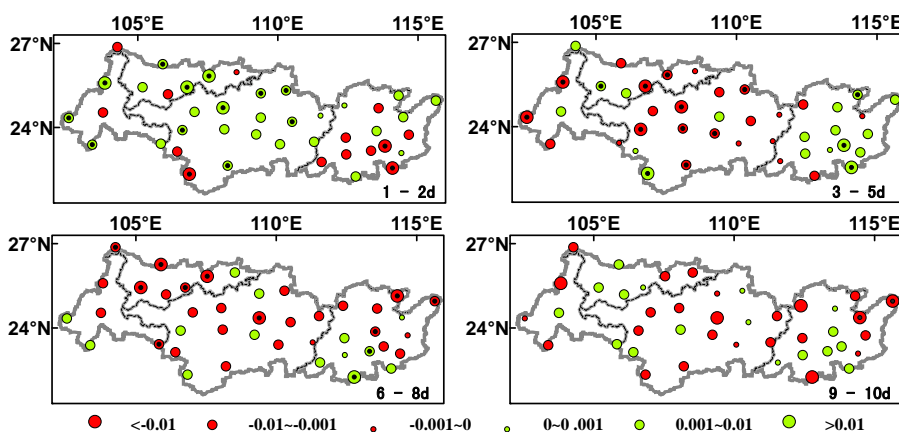


Figure 7. Spatial distribution of normalized occurrences of different WP durations over the Pearl River basin
图 7. 珠江流域各历时降雨发生率空间分布图

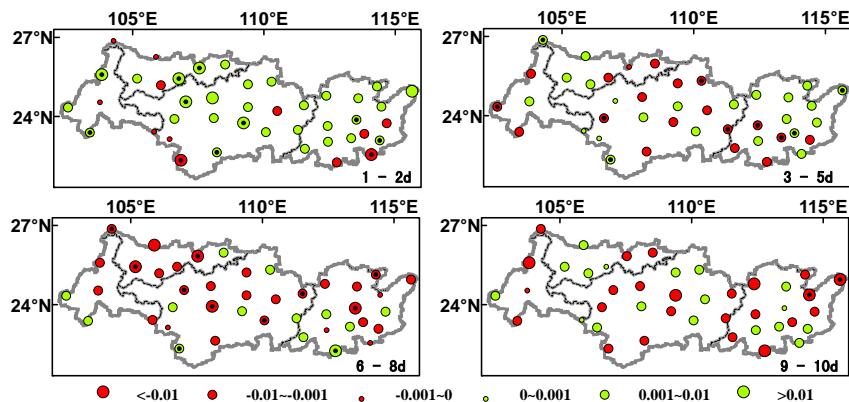


Figure 8. Spatial distribution of normalized fraction contributions of different WP durations over the Pearl River basin
图 8. 珠江流域各历时降雨贡献率空间分布图

红色圆圈代表下降趋势，圆圈大小反应了趋势变化的程度，圆圈中有黑点代表该趋势通过显著性检验，绿色圆圈代表下降趋势，其他与红色圆圈意义一样。

从图 7 中可以看出，流域中部与西部地区的降雨结构的变化趋势相对一致，而流域东部地区与它们的趋势有较大的差异。如 1~2 d 降雨历时的发生率，流域东部地区，在珠江三角洲地区呈下降趋势的站点居多，且有 2 个站点通过的显著性检验；而流域中西部地区总体上呈上升趋势，且有 12 个站点通过显著性检验。对于 3~5 d 降雨历时的发生率，流域东部呈上升趋势的站点占了绝大部分，表明流域东部 3~5 d 降雨历时的发生率呈比较明显的上升趋势，中西部地区则以下降趋势为主。对于地区 6~8 d 和 9~10 d 降雨历时的发生率，表现的趋势相对一致，即珠三角一带发达地区呈上升趋势，流域中西部及东部粤北的山区呈下降趋势，不同的是，6~8 d 的变化比较显著，而 9~10

d 降雨事件的变化只有 2 个站点通过显著性检验。

从图 8 可以看出，珠江流域的 1~2 d 降雨历时的贡献率呈上升趋势的站点较多，且有 8 个站点通过显著性检验，主要集中在流域中西部地区。对于 3~5 d 降雨历时的贡献率，呈现出特别的现象，并未在某些地区呈现一致性的规律，不管是东部，还是西部和中部，都出现上升或下降的趋势，只有粤北地区呈现比较一致的上升趋势；流域 6~10 d 和 9~10 d 降雨历时的贡献率与其发生率的变化趋势很相似，也表现为珠三角一带呈上升趋势，流域中西部及东部粤北的山区呈下降趋势，且 9~10 d 降雨事件的贡献率变化也不显著。

4.5. 强降雨结构性趋势分析

强降雨对大洪水的诱发有着重要的作用，因此，研究强降雨与各降雨历时的关系有着重要的意义。关于强降雨的定义，不同的学者给出不同的定义^[2]，有

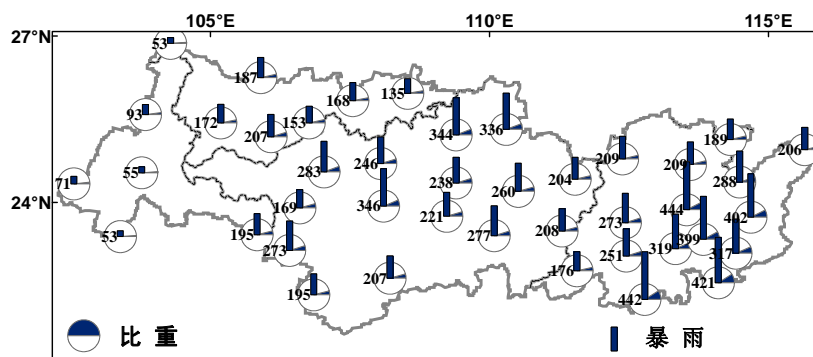


Figure 9. Spatial distribution of the number of heavy rain events and the percentage of the number of heavy rain events to the total number of rainy days
图 9. 暴雨次数及比重空间分布图

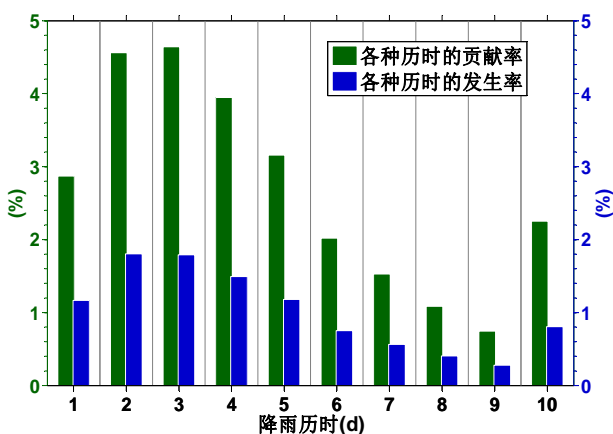


Figure 10. Occurrences and fraction contributions of different WP durations with heavy rain events across the Pearl River basin
图 10. 珠江流域各历时降雨 - 暴雨统计图

绝对值的定义，有相对值的定义法。本文根据国家规定的降雨强度划分标准，定义 ≥ 50 mm/d 的降雨为暴雨。

图 9 统计 1960~2005 年中暴雨发生的次数以及其占降雨总天数的比重。从图中可以看出，珠江流域暴雨次数明显是东多西少，最多的一个站点发生了 444 次，最少的为 53 次。暴雨次数最多的地区是广东，即珠江三角洲地区，其次是广西，云贵地区暴雨次数较少。

图 10 是各历时降雨中暴雨的发生率与贡献率。由图可以得到，暴雨在 2~4 d 的降雨中发生率较高，在 6~9 d 的降雨中发生率较低。更长的历时(10 d)的降雨的暴雨发生率也较高。总体上来说，暴雨在短历时(2~4 d)的降雨中出现更多。对于贡献率而言，分布与发生率的情况基本一致，短历时降雨(2~5 d)中暴雨的贡献率较大。由此表明，暴雨更多的是在短历时(2~5 d)中出现，且占年降雨总量的比重较高。这也表明短历

时降雨易于出现暴雨，诱发洪灾。

5. 结论

本文分析了各种不同历时的连续降雨的时空演变特征，重点分析了各历时降雨的发生率与贡献率的变化特点。通过以上的讨论，可以得到以下几点结论：

1) 珠江流域的年降雨总量(ATP)、年降雨总天数(ATD)、以及年平均降雨历时(MWP)呈现下降趋势，而年降雨强度(ATI)呈上升趋势，除了 ATP 的变化只有 10%的站点通过显著性检验，其他三类指标均有 40%左右的站点通过显著性检验。

2) 珠江流域中西部地区 ATP 值呈下降趋势，东部地区呈上升趋势。但是，整个流域 ATD 值基本呈现下降趋势。有 74%的站点的 ATI 值呈现上升趋势，表明流域降雨强度呈现上升趋势。

3) 流域短历时降雨的发生率呈现上升趋势，长历时降雨呈现下降趋势。从贡献率的角度看，近几年来流域短历时的贡献率也呈上升趋势。这与 Zolina 等学者分析的欧洲在近 60 年来，连续性降雨变得更长，降雨变得更丰富的现象并不一致。从总体上看，珠江流域降雨历时将变短，以短历时的降雨为主要降雨形式，而且降雨量也稍微变得丰富。这也表明了不同流域降雨事件对全球气候变化的不同响应。

4) 流域各历时降雨发生率随历时的增加呈指数递减的方式变化，而各历时降雨的贡献率的最大比重是 2~5 d，由此也表明流域以短历时降雨为主导。暴雨发生率与贡献率与不同降雨历时的关系表明，暴雨更易于发生在短历时中，如 2~5 d，而且对降雨总量的贡献也越大。这表明，珠江流域降雨将更加集中，

在短时间内易出现爆发性的降雨。珠江流域的暴雨多发地集中在流域东部地区，总体次数明显高于中西部地区，中西部地区出现的暴雨次数较少。

5) 流域的降雨结构的空分布分析表明，流域上游地区降雨量的减少会导致径流量的减少，也会影响下游发达地区水量的供给；此外，流域下游——珠江三角洲地区降雨强度的增加以及降雨量的增加会增大地区洪灾的风险，导致了下游地区的水资源供应的不确定性；这些将成为下游发达、人口密集的珠三角地区水资源管理与利用新的挑战。由此，本文也为全球气候变化导致的水文循环变化，社会发展带来的人口和需水增加，区域水资源安全和稳定的相互响应关系提供一个新的研究视角。

参考文献 (References)

- [1] ZOLINA, O., SIMMER, C., GULEV, S. K., et al. Changing structure of European precipitation: Longer wet periods leading to more abundant rainfalls. *Geophysical Research Letters*, 2010, 37(6), Article ID L06704.
- [2] TANK, A. M. G. K., KÖNNEN, G. P. Trends in indices of daily temperature and precipitation extremes in Europe, 1946-1999. *Journal of Climate*, 2003, 16(22): 3665-3680.
- [3] GROISMAN, P. Y., KNIGHT, R. W., EASTERLING, D. R., et al. Trends in intense precipitation in the climate record. *Journal of Climate*, 2005, 18(9): 1326-1350.
- [4] MOBERG, A., JONES, P. D., LISTER, D., et al. Indices for daily temperature and precipitation extremes in Europe analyzed for the period 1901-2000. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2006, 111(D22): 1-25.
- [5] GROISMAN, P. Y., KNIGHT, R. W. Prolonged dry episodes over the conterminous united states: New tendencies emerging during the last 40 years. *Journal of Climate*, 2008, 21(9): 1850-1862.
- [6] BROMMER, D. M., CERVENY, R. S. and BALLING, R. C. Characteristics of long-duration precipitation events across the United States. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(22): 2-6.
- [7] ZHANG, Q., XU, C.-Y., CHEN, X., et al. Statistical behaviours of precipitation regimes in China and their links with atmospheric circulation 1960-2005. *International Journal of Climatology*, 2011, 31(11): 1665-1678.
- [8] ZOLINA, O., SIMMER, C., KAPALA, A., et al. Seasonally dependent changes of precipitation extremes over Germany since 1950 from a very dense observational network. *Journal of Geophysical Research-Atmospheres*, 2008, 113(D6): 1-17.
- [9] KUNKEL, K. E., ANDSAGER, K. and EASTERLING, D. R. Long-term trends in extreme precipitation events over the conterminous United States and Canada. *Journal of Climate*, 1999 12(8): 2515-2527.
- [10] KUNKEL, K. E., EASTERLING, D. R., REDMOND, K., et al. Temporal variations of extreme precipitation events in the United States: 1895-2000. *Geophysical Research Letters*, 2003 30(17): 1-4.
- [11] ZHANG, Q., XU, C.-Y., GEMMER, M., et al. Changing properties of precipitation concentration in the Pearl River basin, China. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2009 23(3): 377-385.
- [12] ZHANG, Q., XU, C.-Y., BECKER, S., et al. Trends and abrupt changes of precipitation maxima in the Pearl River basin, China. *Atmospheric Science Letters*, 2009, 10(2): 132-144.
- [13] 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): 71-75.
Wang zhaoli, Chen xiaohong, Zhang ling, et al. Spatio-temporal change characteristics of precipitation in the Pearl River basin in recent 40 years. *Journal of China Hydrology*, 2006, 26(6): 71-75. (in Chinese)
- [14] WANG, W., CHEN, X., SHI, P., et al. Detecting changes in extreme precipitation and extreme streamflow in the Dongjiang River Basin in southern China. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2008, 12(1): 207-221.
- [15] MANN, H. B. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [16] KENDALL, M., GIBBONS, J. Rank correlation methods. A Charles Griffin Title, 1990.
- [17] HAMED, K. H., RAMACHANDRA, R. A. A modified Mann-Kendall trend test for autocorrelated data. *Journal of Hydrology*, 1998, 204(1-4): 182-196.
- [18] MITCHELL, J. M., DZERDZEEVSKII, B. and FLOHN, H. Climate change. WHO Technical Note 79, Geneva: World Meteorological Organization, 1966: 79.
- [19] DAUFRESNE, M., LENGFELLNER, K. and SOMMER, U. Global warming benefits the small in aquatic ecosystems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2009.
- [20] ZHANG, Q., JIANG, T., CHEN, Y. D., et al. Changing properties of hydrological extremes in south China: Natural variations or human influences? *Hydrological Processes*, 2010, 24(11): 1421-1432.