

DOI:10.3969/j.issn.1004-6933.2014.04.010

1971—2010年上海市降水变化特征分析

张洁祥^{1,2,3}, 张雨凤^{1,2,3}, 李琼芳^{1,3,2}, 虞美秀^{1,2,3}, 任锦亮⁴, 李鹏程^{1,2,3}, 王凯燕^{1,2,3}

(1. 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;
2. 河海大学水文水资源学院, 江苏 南京 210098; 3. 河海大学国际河流研究所, 江苏 南京 210098;
4. 盐城市水利勘测设计研究院, 江苏 盐城 224000)

摘要:基于1971—2010年上海市徐家汇站的日降雨资料,采用一元线性回归法、Mann-Kendall 法和小波分析等方法,对上海市40年来的年代际降水、年降水、汛期与非汛期降水的变化和周期变化特征进行研究和分析,并对降水的频率特征和典型台风期间的暴雨特征进行了分析。结果表明:上海市年代际降水、年降水、汛期与非汛期降水均呈增加趋势;年降水和汛期降水的震荡周期吻合,主周期均为8a左右,汛期降水与年降水的变化趋势相似性很大,说明汛期降水量较大程度地决定年降水量;非汛期降水主周期为4a左右;小雨所占比例随年代逐渐减少,而暴雨所占比例随年代逐渐增多,台风期间的暴雨雨量高度集中,强度大。

关键词:降水变化;频率特征;暴雨特征;一元线性回归法;Mann-Kendall 检验法;小波分析;上海市

中图分类号:P457.6 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2014)04-0047-06

Analysis of precipitation variation characteristics in Shanghai City over period from 1971 to 2010

ZHANG Jiexiang^{1, 2, 3}, ZHANG Yufeng^{1,2,3}, LI Qiongfang^{1, 3, 2}, YU Meixiu^{1, 2,3}, REN Jinliang⁴,
LI Pengcheng^{1, 2, 3}, WANG Kaiyan^{1, 2, 3}

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing 210098, China
2. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China;
3. Institute of International Rivers Research Academy, Hohai University, Nanjing 210098, China;
4. Yancheng Survey and Design Institute of Water Resources, Yancheng 224000, China)

Abstract: Based on daily precipitation data at Xujiahui Station during the period from 1971 to 2010, the characteristics of precipitation in Shanghai City over the past 40 years were analyzed using methods including the linear regression analysis method, Mann-Kendall testing, and wavelet analysis. The variations of inter-decadal precipitation, annual precipitation, and precipitation in flood and non-flood seasons were studied, and the characteristics of precipitation frequency and rainstorms during typical typhoons were analyzed. The results show that the inter-decadal precipitation, annual precipitation, and precipitation in flood and non-flood seasons all have an increasing trend. There is a principal periodic oscillation of eight years for the annual precipitation and flood season precipitation. The variation trend of the flood season precipitation is similar to that of the annual precipitation, indicating that the flood season precipitation dominates the annual precipitation to a great extent. The non-flood season precipitation has a principal period of four years. The percentage of light precipitation gradually decreases over decades, while that of rainstorms gradually increases over decades. During the typhoons, the rainstorm was highly concentrated, with greater intensity.

Key words: precipitation variation; Mann-Kendall test; wavelet analysis; frequency analysis; typhoon rainstorm; Shanghai City

基金项目:国家自然科学基金(41171220);国家科技支撑计划课题(2012BAB03B03);水利部公益行业科研专项(201001069,201101052)
作者简介:张洁祥(1991—),女,硕士研究生,研究方向为水文水资源。E-mail:xiang20080520127@163.com
通信作者:李琼芳,教授。E-mail:qfli@hhu.edu.cn

近一个世纪以来,中国年平均地表气温明显增加,升温幅度约为 0.5 ~ 0.8℃,略高于全球气温的平均升幅^[1]。在全球增暖背景下,许多学者对中国不同地区的降水变化特征进行了分析^[2-7]。上海是我国最大的城市和经济中心,位于长江入海口南岸,属副热带季风气候。由于处于天气系统过渡带、中纬度过渡带和海陆相过渡带,受冷暖气流的交替作用十分明显,上海天气情况比较复杂,灾害性天气时有发生,每年汛期几乎都会受到热带气旋、暴雨的袭击,而且台风、暴雨、天文高潮等“三碰头”、“两碰头”现象时有发生,如,2005 年第 9 号台风“麦莎”影响上海市期间,同时遭遇汛期第 5 次天文高潮,出现了台风、暴雨、高潮“三碰头”的局面,造成水位猛涨,市区大面积积水,内涝严重,带来了巨大损失^[8]。笔者基于上海市徐家汇站 1971—2010 年的日降水量数据,对上海市 40 年来的年代际降水、年降水、汛期(5—10 月)与非汛期(11—次年 4 月)降水的变化和周期变化特征进行研究,并对降水的频率特征和典型台风期间的暴雨特征进行分析,以揭示上海市降水的变化特点。

1 资料和方法

选取上海市徐家汇雨量站(31.2°N,121.4°E) 1971—2010 年逐日降水量数据,分析上海市 40 年间降水的变化特征。文中的雨日指 1 d 内只要有降水(降水量大于等于 0.1 mm,包括“微量”),当日即被计算为雨日。对于降水强度,按照我国常用的分级标准^[9],分别定义 24 h 降水量小于 10 mm 为小雨、10 ~ 25 mm 为中雨、25 ~ 50 mm 为大雨、50 ~ 100 mm 为暴雨、100 ~ 200 mm 为大暴雨、大于 200 mm 为特大暴雨。对于降水频率,本文计算的是日降水频率,采用水文学方法计算。研究主要采用线性倾向估计法^[10]、Mann-Kendall 趋势分析法^[11]和小波分析法^[12]。

2 结果分析

2.1 年降水量特征分析

图 1 为上海市 1971—2010 年年降水量变化图。由图 1 可看出:上海市年降水量总体上呈明显上升趋势,线性倾向估计增幅每 10 年 73.8 mm, M-K 统计量为 1.99,通过置信水平为 95% 的显著性检验,上升趋势显著。由年代际均值可以看出:20 世纪 80 年代年降水量比 20 世纪 70 年代显著增加,90 年代也有增加但没有 80 年代明显,2000 年代增加且高于任何一个年代。上海市年降水量总体上呈显著上升趋势。

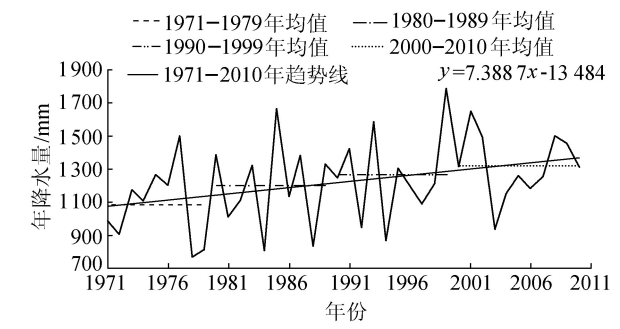


图 1 1971—2010 年上海市年降水量变化情况

上海市多年平均降水量为 1 222.8 mm,其中 1999 年为罕见的暴雨年,降水量为 1 793.7 mm,降水主要集中在当年的 6 月,该月降水量达 725.5 mm。最早年份发生在 1978 年,降水量为 771.1 mm,最小年降水量是多年平均降水量的 63%,年际间变化剧烈。降水有明显的季节性差异,夏季降水量占降水总量的 42.9%,其他季节降水量仅占降水总量的 57.1%。

图 2 为上海市年降水量小波周期分析实部图和方差图。图中信号的强弱通过小波系数的大小表示,等值线为正的用实线表示,代表降水量偏多;等值线为负的用虚线表示,代表降水量偏少。由图 2(a)可见,上海市年降水量主要存在 2 个时间尺度的波动变化,在 8 ~ 9 a 时间尺度上,周期震荡非常明显,而且直到 2010 年等值线未闭合,说明未来一段时间内年降水将继续偏多。此外还存在时间尺度为 2 ~ 3 a 左右的小尺度波动变化。图 2(b)中年降水量小波方差图有 3 个峰值,分别对应时间尺度 8 a、9 a 和 3 a。鉴于 8 a 和 9 a 两个峰值比较相似,说明主振荡周期约在 8 ~ 9 a。

2.2 汛期和非汛期降水的变化特征

2.2.1 汛期降水的变化特征

上海市全年降水在年内分配上汛期、枯期差异显著,根据 1971—2010 年降水资料统计,汛期多年平均降水日数为 69 d,占全年降水日数的 53.5%,降水量约为 822.4 mm,占全年降水量的 67.3%,而枯期降水量只占 32.7%。上海市的汛期也是大雨和暴雨的多发时段,全年几乎所有的大雨和暴雨都集中在汛期。统计上海市徐家汇雨量站 1971—2010 年日降水量数据可知,1971—2010 年,上海市共发生 18 次大暴雨和 1 次特大暴雨,几乎全部出现汛期,因此汛期的安全保障工作是全年防汛的重中之重。图 3 为上海市 1971—2010 年汛期降水量变化图。从其中的年代际均值可以看出,20 世纪 80 年代汛期降水量比 70 年代显著增加,90 年代稍有增加但没有 80 年代明显,2000 年代比 90 年代略有下降,但是仍高于 70 年代和 80 年代。可见,汛期降水

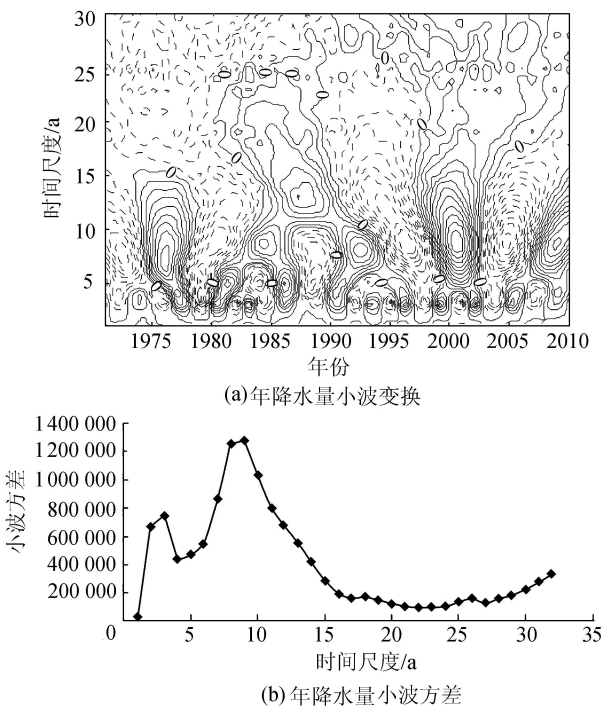


图2 上海市年降水量小波变换及方差

量总体上呈微弱上升趋势。上海市汛期降水总体上呈上升趋势,线性倾向估计增幅为每 10 a 40.9 mm, M-K 统计量为 1.13,未通过显著性检验,上升趋势不显著。

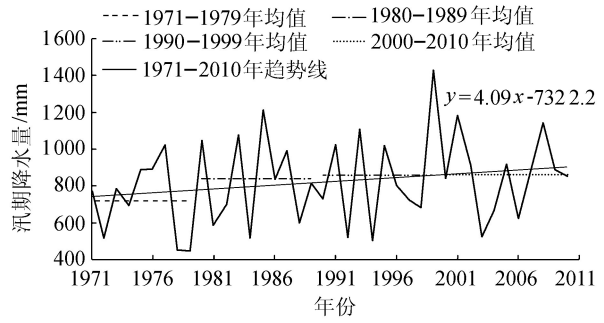


图3 1971—2010 年上海市汛期降水量变化

图 4 是 1971—2010 年上海市汛期降水日数的变化图。由图 3 和图 4 可知:汛期降水总量和降水总日数呈现出相反的变化,降水总量处于增加趋势,而降水日数则表现为减少趋势。表明随着时间的增加,更多的降水集中于较少的雨日上,即汛期降水更为集中。故近年来,上海市除增暖的气候变化特

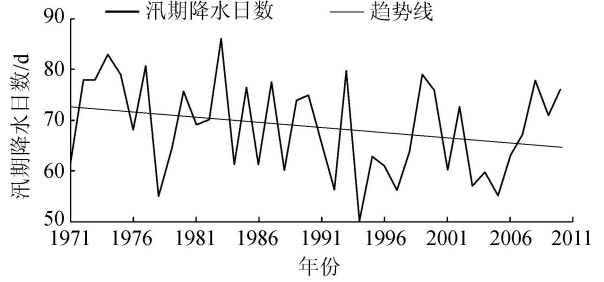


图4 1971—2010 年上海市汛期降水日数变化

征^[13]外,还表现为汛期降水更为集中,降水强度增强的特征。

图 5 为上海市汛期降水量小波周期分析实部图和方差图。通过图 5 可以看到汛期降水量序列主要存在两个时间尺度的波动变化,主周期为 8 a 左右,此外还存在时间尺度为 3 a 左右的小尺度波动变化。

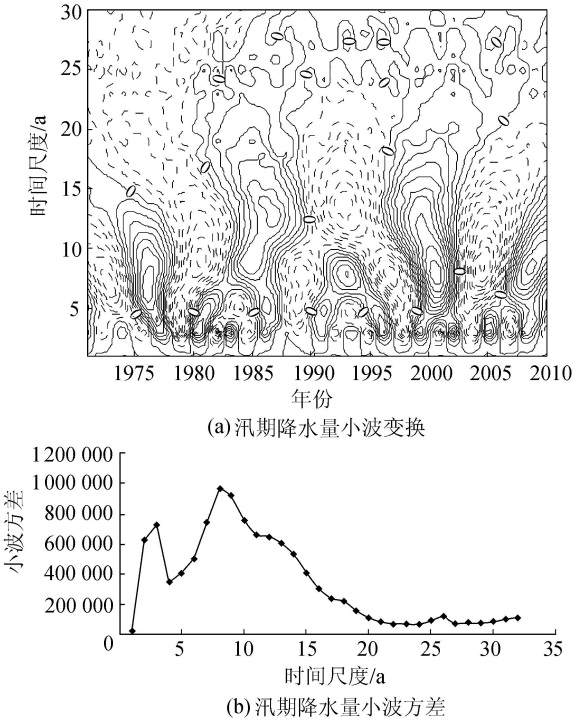


图5 上海市汛期降水量小波变换及方差

为分析年降水变化与汛期降水变化的关系,分别比较汛期降水量小波方差图与年降水量小波方差图,以寻找规律性。可知,年降水震荡周期与汛期降水震荡周期完全吻合,汛期降水与年降水的变化趋势相似性很大。汛期平均降雨量 822 mm,多年平均降雨量 1222 mm,故汛期降雨量占年降雨量的 68%。从而表明汛期降水的变化很大程度上决定年降水变化,年降水周期与汛期降水周期间具有相关性。

2.2.2 非汛期降水的变化特征

图 6 为 1971—2010 年上海市非汛期降水量变化图。由非汛期的降水年代际均值可以看出:20 世纪 80 年代非汛期降水量比 70 年代略有下降,90 年代明显增加且高出 80 年代许多,2000 年代明显增加且远远高于任何一个年代。所以非汛期降水总体上呈显著上升趋势。由图 6 可看出,上海市非汛期降水总体上呈明显上升趋势,非汛期降水线性倾向估计增幅为每 10 a 31.4 mm, M-K 统计量为 2.00,通过置信度为 95% 的显著性检验,上升趋势显著。

图 7 为上海市非汛期降水量小波周期分析实部图和方差图。通过图 7 可以看到非汛期降水量序列

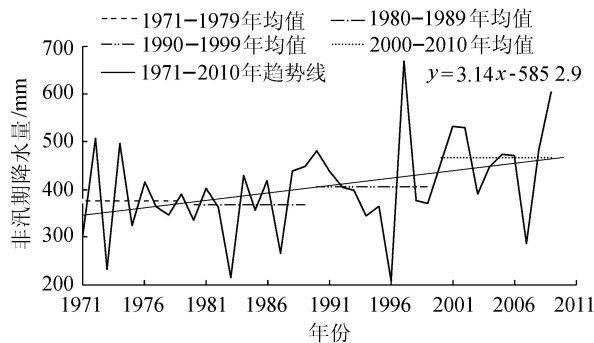


图6 1971—2010 年上海市非汛期降水量变化

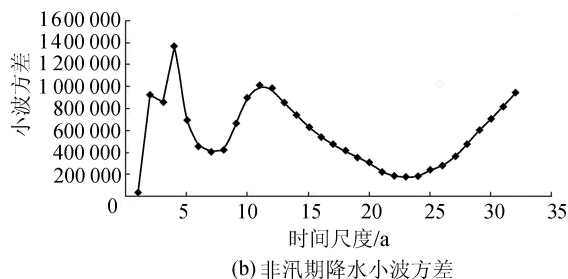
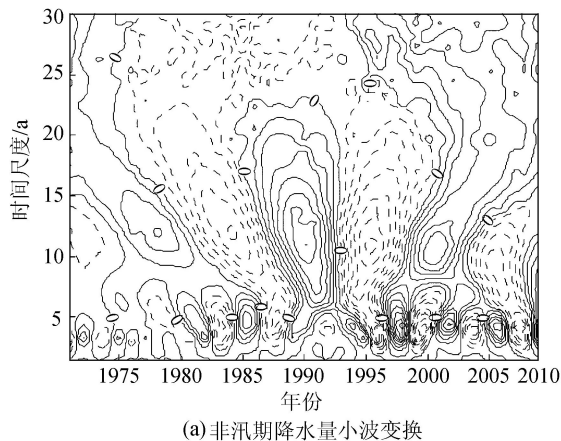


图7 上海市非汛期降水量小波变化及方差

主要存在两个时间尺度的波动变化,主周期为4 a左右,此外还存在时间尺度为11a左右的波动变化。

2.3 频率分析

图8为1971—2010年上海市逐日降水量频率曲线图。由图8可知:1971—2010年间,上海市65%为无雨天气,35%为有雨天气。降雨量小于10 mm的天气占25%。中雨及以上降雨等级所占比例为10%。其中中雨为7%,大雨为3%,暴雨为1%。由图9可知,从20世纪70年代到2000年代,降雨类型基本上以小雨为主,中雨次之,暴雨发生频率最少。在2000年代,大雨类型降雨比以往明显增加。从表1可以看出:20世纪70年代到2000年代,小雨类型降雨所占比例随年代逐渐减少,中雨和大雨类型降雨所占比例随年代是波动变化的趋势,而1980年代、1990年代和2000年代暴雨频率均比1970年代增加。暴雨类型降雨频率的增加,为以后上海市的防汛提供了压力。

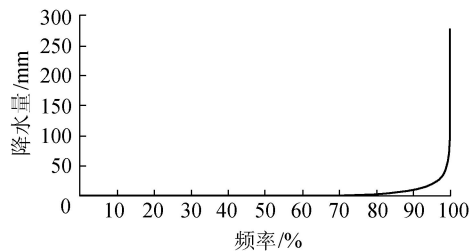


图8 1971—2010 年上海市逐日降水量频率曲线

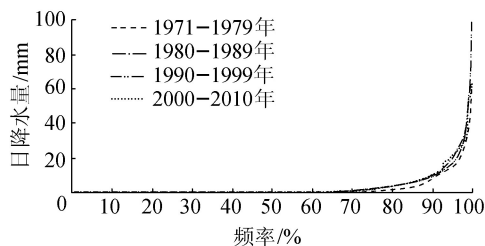


图9 1971—2010 年上海市日降水量频率

表1 上海市降雨类型年代际频率变化 %

降雨类型	年代际频率			
	1970 年代	1980 年代	1990 年代	2000 年代
小雨	90.40	90.20	90.20	89.60
中雨	7.01	6.01	6.81	6.25
大雨	1.99	2.19	1.79	2.59
暴雨	0.40	1.00	1.00	1.00

2.4 典型台风期间暴雨特征分析

上海市是我国受台风影响严重的城市之一,平均每年有2~3次台风影响,台风往往伴随暴雨。而由典型台风造成的暴雨,一般雨量较大,降水集中,对上海造成严重的洪灾。分析典型台风期间的暴雨特征,可以为上海市局部暴雨的防洪减灾工作提供决策依据。本研究分别选择上海市历史上规模大、破坏力强的8506号、9015号、9116号、9711号、0108号以及0509号等典型台风,对其期间的暴雨特征进行统计分析(表2)。由典型台风的起止时间可以知道,台风历时除了0108号其他基本上均在1周左右。每场台风的最大1 d降水量均达到暴雨级别。最大1 d降水量最大的0108号台风,竟达到278.0 mm,为特大暴雨级别,即为上海市历史上著名的“8.5”特大暴雨,2001年8月5日下午起至8月6日上午,上海市电闪雷鸣、暴雨如注,数万居民进水^[14]。除了9711号台风最大3 d降水量所占比例没有达到100%外,其他场次台风降水均在3 d内结束。说明台风期间降水十分集中,易形成局部洪涝灾害。

分别绘制每场台风的降水强度历时曲线(图10)并分析台风期间暴雨特性的变化。由图10可以看到,降雨强度最大的是0108号台风,0509号台风次之,降雨强度最小的是9711号台风。每场台风降

表 2 典型台风期间暴雨特征统计

台风编号	开始时间	结束时间	历时/d	总降水量/ mm	最大 1 d 降水量		最大 3 d 降水量	
					降水量/mm	所占比重/%	降水量/mm	所占比重/%
8506	1985-07-28	1985-08-03	7	155.2	115.3	74	154.5	100
9015	1990-08-29	1990-09-03	6	154.8	99.2	64	154.8	100
9116	1991-09-03	1991-09-09	7	165.9	91.0	55	165.9	100
9711	1997-08-17	1997-08-23	6	94.3	68.8	73	90.0	95
0108	2001-08-04	2001-08-06	3	288.8	278.0	96	288.8	100
0509	2005-08-04	2005-08-10	7	306.5	180.8	59	306.5	100

水强度基本上均在 3 d 之内就从最大值减少至最小值,3 d 之后减小速度变化很缓慢。说明台风期间暴雨的雨量高度集中、强度大。这进一步说明了台风期间降水的危害性。

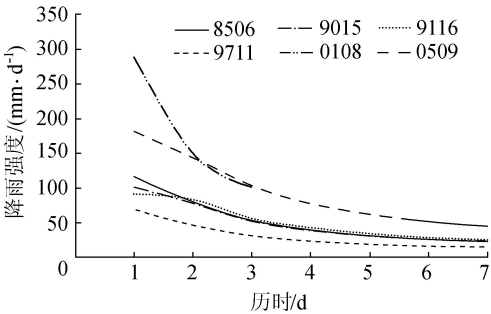


图 10 上海市典型台风期间降雨强度历时曲线

3 结 论

a. 在 1971—2010 年间,上海市年降水量呈增加趋势。降水季节性差异显著,主要集中在夏季。上海市年降水主振荡周期约在 8~9 a 之间,且未来一段时间内年降水将处于偏多时期。

b. 上海市汛期和非汛期降水均呈增加趋势。汛期的降水日数和降水量都远高于其他月份,降水日数占全年降水日数的 53.5%,降水量占全年降水量的 67.3%。汛期降水主周期为 8 a 左右。汛期降水和年降水变化趋势具有较大相似性,不同时间尺度的周期特征之间有不同程度的吻合,说明汛期降水量较大程度地决定了年降水量。并且历史上上海市大部分极端强降水天气都集中在汛期。非汛期降水主周期为 4 a 左右。

c. 在 1971—2010 年间,上海市大部分降雨天气为小雨天气,暴雨发生的频率小。但是小雨频率随年代际基本上逐渐减少,而暴雨频率则随年代际呈上升趋势,说明在未来一段时间内,上海市的降水强度会呈现增强趋势。典型台风期间的暴雨雨量高度集中,强度大。

参考文献:

[1] 丁一汇,任国玉,石广玉,等. 气候变化国家评估报告 (I):中国气候变化的历史和未来趋势[J]. 气候变化

研究进展,2006,2(1):3-8. (DING Yihui, REN Guoyu, SHI Guangyu, et al. National assessment report of climate change(I):climate change in China and its future trend [J]. Advances in Climate Change Research, 2006,2(1): 3-8. (in Chinese))

[2] 任国玉,吴虹,陈正洪. 我国降水变化趋势的空间特征 [J]. 应用气象学报,2000,11(3):322-330. (REN Guoyu, WU Hong, CHEN Zhenghong. Spatial patterns of change trend in rainfall of China[J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology, 2000,11(3):322-330. (in Chinese))

[3] ZHAI Panmao, ZHANG Xuebin, WAN Hui, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. Journal of Climate, 2005,18:1096-1108.

[4] 潘敖大,王珂清,曾燕,等. 长江三角洲近 46 a 气温和降水的变化趋势[J]. 大气科学学报,2011,34(2):180-188. (PAN Aoda, WANG Keqing, ZENG Yan, at al. Trends of temperature and precipitation variation in the Yangtze River Delta from 1961 to 2006[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2011,34(2):180-188. (in Chinese))

[5] 刘健,林琳,陈学群,等. 黄河三角洲地区降水时序变化特征研究[J]. 水资源保护,2012,28(1):22-28. (LIU Jian, LIN Lin, CHEN Xuequn, at al. Characteristics of variation of precipitation time series in Yellow River Delta [J]. Water Resources Protection, 2012,28(1):22-28. (in Chinese))

[6] LIU Dedi, GUO Shenglian, CHEN Xiaohong, et al. Analysis of trends of annual and seasonal precipitation from 1956 to 2000 in Guangdong Province, China[J]. Hydrological Sciences Journal,2012,57(2):358-369.

[7] 李鹏程,李琼芳,蔡涛,等. 北京天津地区近 51a 降水变化特征分析[J]. 水电能源科学,2010,28(10):6-9. (LI Pengcheng, LI Qiongfang, CAI Tao, at al. Feature analysis of 51 years precipitation change in Beijing and Tianjin area[J]. Water Resources and Power, 2010,28(10):6-9. (in Chinese))

[8] 陈璟. 台风降雨使上海成涝原因分析与排涝对策研究 [J]. 城市道桥与防洪,2007,4(4):86-87. (CHEN Jing. Analysis of waterlogging forming reason by typhoon and rainfall and study of waterlogging drainage

countermeasures in Shanghai [J]. Urban Roads Bridge & Flood Control, 2007,4(4):86-87. (in Chinese))

[9] ZHANG J,LIN Z. Climate of China[M]. New York: John Willey Sons,1992:376.

[10] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京:气象出版社,1999:43-47.

[11] 符淙斌,王强. 气候突变的定义和检测方法[J]. 大气科学,1992,16(4):482-493. (FU Congbin, WANG Qiang. The definition and detection of the abrupt climatic change [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1992,16(4):482-493. (in Chinese))

[12] 邵晓梅,许月卿,严昌荣. 黄河流域降水序列变化的小波分析[J]. 北京大学学报:自然科学版,2006,42(4):503-509. (SHAO Xiaomei, XU Yueqing, YAN Changrong. Wavelet analysis of rainfall variation in the Yellow River basin [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis, 2006, 42 (4): 503-509. (in Chinese))

[13] 徐家良,柯晓新,周伟东. 长江三角洲城市地区气候变化及其影响[C]//首届长三角科技论坛:气象科技发展论坛论文集. 杭州:浙江省科学技术协会,2004.

[14] 邵玲玲,黄炎. 上海“8.5”特大暴雨的成因和特点[J]. 气象,2002,28(8):47-50. (SHAO Lingling, HUANG Yan. Mechanism and characteristics of the severe heavy rainfall in Shanghai on 5 August 2001 [J]. Meteorological Monthly, 2002,28(8):47-50. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 12 - 16 编辑:彭桃英)

(上接第 42 页)

[11] 韩龙喜,张书农,金忠青. 复杂河网非恒定流计算模型:单元划分法[J]. 水利学报,1994(2):52-56. (HAN Longxi, ZHANG Shunong, JIN Zhongqing. Cell-dividing method in the calculation of unsteady flow for river network in plain area [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1994(2):52-56. (in Chinese))

[12] 张二骏,张东生,李挺. 河网非恒定流的三级联合解法[J]. 华东水利学院学报,1982,10(1):1-13. (ZHANG Erjun ZHANG Dongsheng,LI Ting. “Three Steps Method” to compute unsteady flow for river networks [J]. Journal of East China Technical University of Water Resources, 1982,10(1):1-13. (in Chinese))

[13] 溪梅成. 数值分析方法[M]. 合肥:中国科学技术大学出版社,1995:60-100.

[14] 卢士强,徐祖信. 平原河网水动力模型及求解方法探讨[J]. 水资源保护,2003,19(3):5-9. (LU Shiqiang, XU Zuxin. Hydrodynamic model for plain river networks and its solution [J]. Water Resources Protection, 2003, 19(3):5-9. (in Chinese))

[15] DEWEY R J. Application of stochastic dissolved oxygen model[J]. Journal of Environmental Engineering, 1984, 110(2):412-429.

[16] HU K M,PANG Y,WANG H,et al. Simulation study on water quality based on sediment release flume experiment in Taihu Lake, China[J]. Ecological Engineering,2011,37(4):607-615.

[17] 罗缙,逢勇,罗清吉,等. 太湖流域平原河网区往复流河道水环境容量研究[J]. 河海大学学报:自然科学版,2004,32(2):144-146. (LUO Jin, PANG Yong, LUO Qingji, et al. Study on water environment capacity for reversing current channels in plain river network region in Taihu Lake Basin [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences,2004,32(2):144-146. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 10 - 16 编辑:高渭文)

(上接第 46 页)

[20] 许海,朱广伟,秦伯强,等. 氮磷比对水华蓝藻优势形成的影响[J]. 中国环境科学,2011,31(10):1676-1683. (XU Hai,ZHU Guangwei,QIN Boqiang,et al. Influence of nitrogen-phosphorus ratio on dominance of bloom-forming cyanobacteria (Microcystis aeruginosa) [J]. China Environmental Science, 2011, 31 (10): 1676-1683. (in Chinese))

[21] 孟顺龙,裘丽萍,胡庚东,等. 氮磷比对两种蓝藻生长及竞争的影响[J]. 农业环境科学学报,2012,31(7):1438-1444. (MENG Shunlong, QIU Liping, HU Gengdong,et al. Effect of nitrogen and phosphorus ratios on growth and competition of two blue-green algae [J]. Journal of Agro-Environment Science,2012,31(7):1438-1444. (in Chinese))

[22] HAVENS K E, JAMES R T, EAST T L, et al. N : P ratios, light limitation, and cyanobacterial dominance in a subtropical lake impacted by non-point source nutrient pollution [J]. Environmental Pollution, 2003, 122 (3): 379-390.

[23] 高振美,张波,商景阁,等. 太湖流域小型水源性湖泊氮、磷时空分布及营养状态评价[J]. 环境污染与防治, 2012,34(1):9-14. (GAO Zhenmei,ZHANG Bo,SHANG Jingge,et al. Temporal and spatial distribution of nitrogen and phosphorus and evaluation of trophic status of a water supply lake in Taihu Basin [J]. Environmental Pollution and Control,2012,34(1):9-14. (in Chinese))

[24] 许秋瑾,郑丙辉,朱延忠,等. 三峡水库支流营养状态评价方法[J]. 中国环境科学,2010,30(4):453-457. (XU Qiujin,ZHENG Binghui, ZHU Yanzhong, et al. Nutrient status evaluation for tributary of Three Gorges Reservoir [J]. China Environmental Science,30(4):453-457. (in Chinese))

(收稿日期:2013 - 11 - 09 编辑:徐 娟)