

文章编号:1673-8411 (2018) 01-0001-05

洞庭湖流域夏季降水特征及旱涝年份大气环流分析

黎焱隆, 章新平, 尚程鹏

(湖南师范大学资源与环境科学学院, 湖南 长沙 410081)

摘要:基于洞庭湖流域 96 个气象站点 1961–2015 年逐月降水数据和 NCEP/NCAR 再分析资料,对洞庭湖流域 55 年夏季降水的时空变化与典型夏涝年、夏旱年的大气环流特征进行分析。结果表明:55a 间流域夏季降水存在明显的年际和年代际变化特征,存在准 3a 和 20a 周期。流域夏季平均降水量呈现由中北部平原地区向四周山区递增的空间分布特征。从大气环流和水汽输送及辐合形势来看,典型夏涝(旱)年,对应着西北太平洋副热带高压面积偏大、强度偏强和流域上空水汽的异常辐合(辐散)。

关键词:洞庭湖流域;夏季降水;大气环流;水汽输送

中图分类号:P448

文献标识码:A

Characteristics of summer precipitation in Dongting Lake basin and analysis of atmospheric circulation in drought and flood years

Li Yanyi, Zhang Xinping, Shang Chengpeng

(School of Resources and Environmental Sciences, Hunan Normal University, Changsha Hunan 410081)

Abstract: Based on the monthly precipitation data and NCEP/NCAR reanalysis data of 96 meteorological stations in the Dongting Lake basin for 1961–2015 years, this paper analyzed the temporal and spatial variations of the summer precipitation in the Dongting Lake in 55 years and the characteristics of the atmospheric circulation in the typical summer flood years and summer drought years. The results showed that there are distinct interannual and interdecadal variabilities in summer precipitation in 55yr and there are quasi 3yr and 20yr cycles. The average summer precipitation in the basin had a spatial distribution characteristic of increase from the middle north plain to the surrounding mountainous area. From the situation of atmospheric circulation, water vapor transport, and convergence, the typical summer flood (drought) year corresponds to the large area of the subtropical high in the Northwest Pacific, the strong intensity, and the anomalous convergence of the water vapor above the river basin.

Keywords: Dongting Lake basin; summer precipitation; atmospheric circulation; water vapor transport

降水是对社会经济活动和生态系统具有直接而且深刻影响的气候要素,其异常变化往往使社会系统产生显著的敏感性反应。近百年来,伴随着全球气候变暖,极端天气气候事件的发生频率增加^[1-3],其中最具影响力的是大范围持续少雨干旱和流域性超强降水。在东亚季风区,夏季风爆发多始于 4 月,到 7 月趋于鼎盛,对应着我国人口和经济密集的江淮地区梅雨期,降水的异常变化不论干旱或是区域性极端降水增多^[4-6],其影响都是严重的,因而其规律性和成因受到广泛的关注。

学者对我国夏季降水的时空变化特征的研究已经取得了不少成果^[7-10]。申乐琳^[11]等人对近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征的研究中发现,西太平洋副热带高压南侧的东南季风与北方冷槽的偏北风及其异常水汽输送是我国东部夏季降水异常的主要成因;黄荣辉^[12]等人对我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系进行了分析,结果表明我国东部季风区夏季降水的时空变化存在两种主模态,两种主模态的年代际变化与东亚上空夏季水汽输送通量的时空变化密切相关;

收稿日期:2017-10-09

作者简介:黎焱隆(1991-),男,硕士研究生,主要研究方向为气候变化。

吕俊梅^[13]等人对近百年来中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因进行了探究,发现太平洋年代振荡、北极涛动和北极海冰三个因子对中国东部夏季降水年代际变化起到协同作用。我国夏季降水的影响因素除了东亚夏季风外^[14-16],太平洋海温异常^[17-19],西风急流^[20],台风活动^[21,22]也起到重要作用。

洞庭湖流域介于东经(107°16'~114°17')与北纬(24°38'~30°26')之间,南起南岭北止长江,西面武陵山东临罗霄山脉,东南西三面环山,向北开口,构成独特的“马蹄”形地形格局,地貌形态复杂多样,流域面积总计 26.2 万 km²,约占整个长江流域面积的 14%(图 1)。受亚热带季风和地形的影响,降水时空分布不均匀,旱涝灾害频发,尤其当夏季异常降水发生,造成的影响甚为严重^[23,24]。如 1998 年夏季,短时间内集中降雨导致的百年一遇的特大洪水对流域内人民群众生命财产安全造成重大损失^[25];2011 年洞庭湖区遭遇 50a 一遇连续性季节干旱,造成直接经济损失近百亿^[26]。对洞庭湖流域现有的气候变化研究^[27-29]主要聚焦于大范围降水的时空特征文以基于 1961–2015 年 96 站夏季(5–7 月)降水最新资料序列,从区域气候变化的视角,分析了洞庭湖流域降水时空变化基本特征。在此基础上,探讨洞庭湖流域降水与东亚季风区水汽通量散度及可降水量场之间的相关关系,并选取典型夏涝年、夏旱年就大气环流形势和水汽输送差异进行比较分析,取得了一些新的结果,这些结果可能有助于洞庭湖流域夏季降水异常成因的认知。

1 研究数据

本文采用的数据包括:(1) 洞庭湖流域 96 个气象站点的逐月降水数据,时间序列为 1961–2015 年。根据流域的气候特点,本文划定 5–7 月为夏季,常年平均为 1961–2015 年夏季降水的多年平均值;(2)NCEP/NCAR 月平均再分析资料,要素有 8 层等压面(1000~300hPa)上的纬向风分量 u 、经向风分量 v 和比湿 q ,地面气压场、500hPa 位势高度场,水平分辨率为 2.5°×2.5°。

2 研究方法

2.1 旱涝等级划分

本文根据洞庭湖流域各年夏季降水的分布特点,中国气象局降水量距平百分率划分标准及各学者的相关研究^[30,31],将旱涝程度划分为大涝、偏涝、

表 1 旱涝程度等级划分

等级	距平百分率 (D_P)	旱涝类型
1	$30\% \leq D_P$	大涝
2	$20\% \leq D_P < 30\%$	偏涝
3	$-20\% < D_P < 20\%$	正常
4	$-30\% < D_P \leq -20\%$	偏旱
5	$D_P \leq -30\%$	大旱

正常、偏旱、大旱 5 个等级,见表 1。

2.2 水汽通量及水汽通量散度^[32]

水汽通量指单位时间流经某一单位截面积的水汽质量,水汽通量散度是指单位时间内在某区域辐合或辐散的水汽含量,散度为正表示该地水汽辐散,散度为负则表示水汽辐合。纬向水汽通量 Q_u 和经向水汽通量 Q_v 的计算公式分别为:

$$Q_u = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q \times u dp \quad (1)$$

$$Q_v = \frac{1}{g} \int_{p_s}^{p_t} q \times v dp \quad (2)$$

式中: q 为比湿,单位 $g \cdot kg^{-1}$; g 为重力加速度,单位 $m \cdot s^{-2}$; p_s 为地面气压,单位 hPa; p_t 为气柱顶气压,本文取 300hPa。水汽通量散度 D 的计算公式为:

$$D = \frac{\partial Q_u}{a \cos \varphi \partial \lambda} + \frac{\partial Q_v}{a \partial \varphi} \quad (3)$$

式中: a 为地球半径; φ 和 λ 分别表示经度和纬度。

2.3 功率谱分析^[33]

功率谱是功率谱密度函数的简称,它定义为单位频带内的信号功率。它表示了信号功率随着频率的变化情况,即信号功率在频域的分布状况。功率谱表示了信号功率随着频率的变化关系。功率谱表达式如下

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} (A_n^2/2) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (4)$$

其中 A_n 是周期信号中频率为 $n\Omega_0$ 谐波分量的幅值, $P_n = A_n^2 \cdot 2^{-1}$ 的频率是 $n\Omega_0$ 谐波分量的功率。

3 结果与分析

3.1 洞庭湖流域夏季降水的空间分布特征

3.1.1 夏季平均降水量和夏季降水标准差的空间分布

通过对流域各站点 55a 的逐年夏季降水量的统计,得到洞庭湖流域夏季平均降水量和夏季降水标准差的空间分布(图 1)。

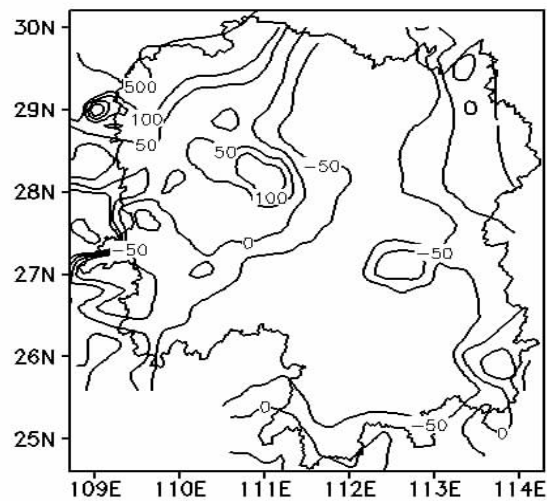


图 1 洞庭湖流域夏季平均降水量距平等值线图(单位:mm)

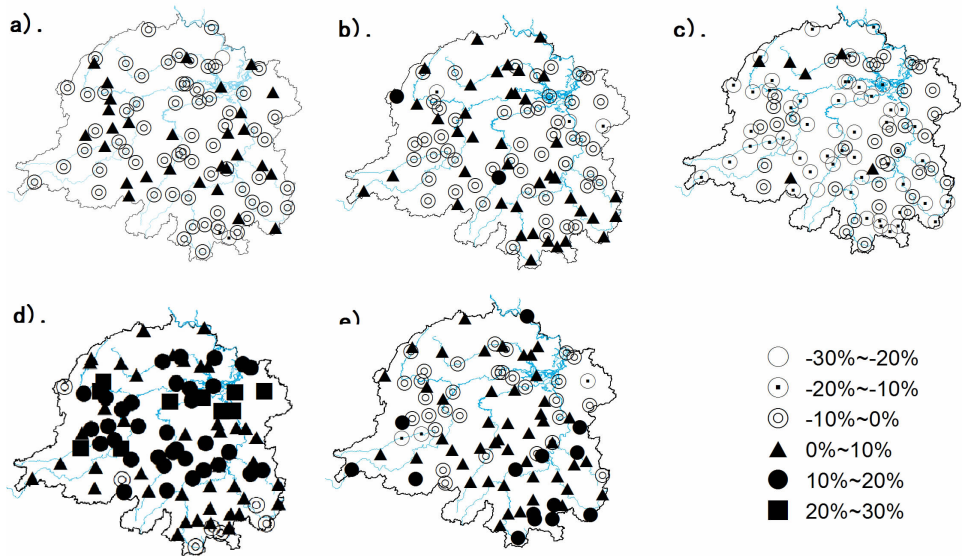
从夏季降水量的空间分布来看,降水量的低值中心位于流域中部一带,高值中心则主要出现在西北部山区地带与西南部丘陵地区。夏季平均降水量的最大值出现在五峰站,达到 1245.3mm,这与该站高海拔的地形抬升作用有关;夏季平均降水量的最

小值位于流域中部的衡南站,仅 470.7mm,该站地处流域中部平原地区,夏季较难发生冷暖气流交汇,因此降水量相对偏少。夏季平均降水量主要分布在 540~640mm,站点数约占流域总站点数的 46%。

从夏季降水量的离散程度来看,流域内各站点降水量标准差的空间分布大致从西北向东南方向递减。全流域的平均标准差为 238mm,流域西北部来凤站降水的标准差最大,达 353mm;流域中部部的武冈站的标准差最小为 119.7mm。整体上看,夏季降水标准差的空间分布和夏季平均降水量的空间分布相似,即降水偏多的地方,标准差值偏大,发生旱涝灾害可能性较大,而降水偏少的地方,标准差值偏小,发生旱涝灾害可能性较小。

3.1.2 洞庭湖流域夏季降水的时间变化特征

洞庭湖流域夏季的平均降水量具有明显的年代际变化特征,通过对流域内各站点每 10a 降水距平百分率的统计,分别得到洞庭湖流域夏季不同年代际降水距平百分率的空间分布(图 2)和站点统计(表 2)。



注:a-c:20 世纪 60 年代,70 年代,80 年代;d、e:20 世纪 90 年代,21 世纪 00 年代

图 2 洞庭湖流域夏季不同年代际降水距平百分率的空间分布

表 2 洞庭湖流域夏季不同年代际降水距平百分率的站点统计(站数(占总站数的百分率))

降水距平百分率(%)	20 世纪				
	60 年代	70 年代	80 年代	90 年代	00 年代
10~20		1 (1.0%)		30 (31.3%)	5 (5.2%)
0~10	18 (18.7%)	32 (33.3%)	10 (10.4%)	56 (58.3%)	35 (36.5%)
-10~0	64 (66.7%)	51 (53.2%)	30 (31.3%)	10 (10.4%)	47 (48.9%)
-20~-10	14 (14.6%)	12 (12.5%)	53 (55.2%)		9 (9.3%)
-30~-20			3 (3.1%)		

由图 2 和表 2 可知,按年代划分,流域夏季降水量呈现偏少与偏多相间出现的特征,1990 年代是夏季降水量最多的年代。

图 3 给出了洞庭湖流域平均 55a 夏季降水距平百分率的年际和年代际变化。从年际变化来看,夏季降水年际变化大其中,2002 年夏季降水异常偏多,流域平均降水量达 803.96mm,比常年平均偏多 34.59%,为近 55a 来降水最多的年份,而 1985 年夏季降水为历年最少,降水量只有 416.2mm,比常年平均偏少 30.32%。根据旱涝标准表 1,55a 中夏季降水共出现偏涝及大涝年份共 5a,偏旱及大旱年份共 6a。从年代际变化来看,自 20 世纪 80 年代后,洞庭湖流域夏季降水波动增大,结合图 4 的功率谱分析结果表明,洞庭湖流域夏季降水存在一个准 20a 周期的变化与一个准 3a 周期,通过 0.05 置信度检验。

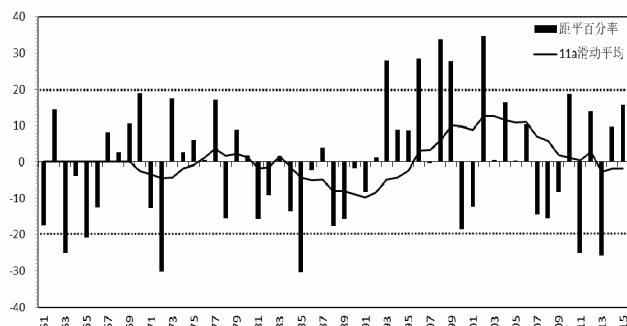


图 3 洞庭湖流域夏季降水距平百分率的年际和年代际变化

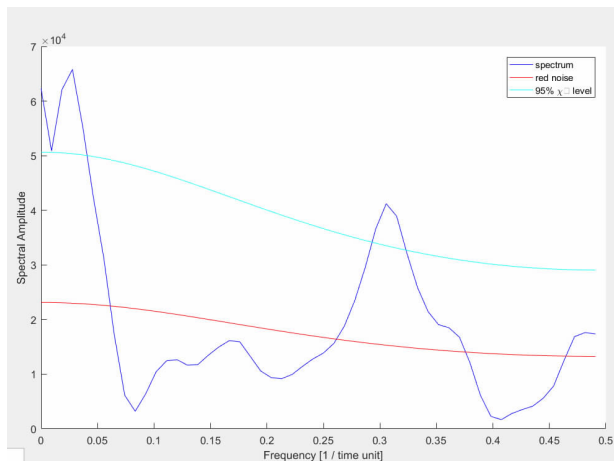


图 4 洞庭湖流域夏季降水的频率谱分析

3.2 典型夏涝、夏旱年的平均大气环流

为了分析典型夏旱涝年和夏旱年大气环流背景,根据旱涝标准选择 1993、1996、1998、1999、2002 年作为典型夏涝年及 1963、1965、1972、1985、2011、2013 年作为典型夏旱年。图 5 给出了典型夏涝年和夏旱年的平均大气环流形势。

从图 5 (见彩页) 可以看出,在典型夏涝年,500hPa 高度距平场上,中高纬地区存在着 3 个正距平中心和 3 个正距平中心,为 3 波型;在典型夏旱年,基本为 1 波长波形,东半球中高纬基本为负距平控制,西半球则为正距平控制。可以看出夏涝年和夏旱年位势距平分布具有相反特征,在涝年,欧亚地区 and 低纬度热带海洋地区为显著的正距平控制,气压高度偏高,而在旱年,欧亚地区 and 低纬度热带海洋地区被显著的负距平控制,气压高度偏低,反应欧亚大陆高压强度在涝(旱)年偏弱(强),中高纬冷空气偏弱(强)。

对应的 500hPa 高度场上,在典型夏涝年,588hgpm 高度线表示西北太平洋副热带高压控制面积大,强度强,,副高中心约位于 130°E,25°N。欧亚大陆高压脊偏弱,而典型旱年,不存在 588hgpm 高度线,反应了西北太平洋副热带高压偏弱。

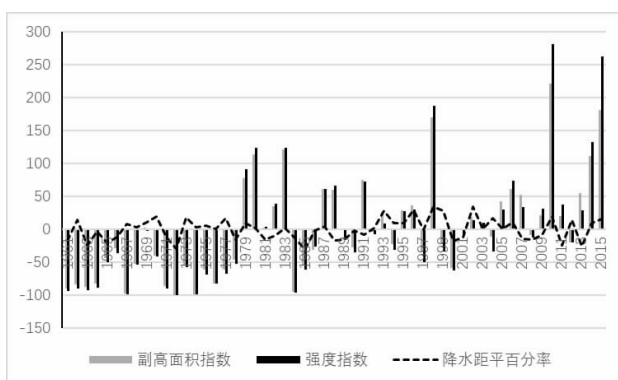


图 6 洞庭湖流域夏季降水与同期西太平洋副热带高压强度指数与面积指数

经统计,洞庭湖流域夏季降水量与西北太平洋副热带高压面积指数、强度指数在显著相关(图 6),相关性分别达到 0.28,0.32 通过过信度 95%的显著性检验。流域夏季降水偏多的年份,西太平洋副热带高压面积偏大,强度偏高;流域夏季降水偏少的年份,西太平洋副热带高压面积偏小,强度偏低。

综上,夏季流域降水偏多(偏少)年份,对应西北太平洋副热带高压偏强(偏弱)。

3.3 典型夏涝、夏旱年的平均水汽输送特征

降水的产生需水汽条件和水汽发生凝结的动力条件。图 7(见彩页)出了流域典型夏涝年、夏旱年整层水汽通量和水汽通量散度距平的分布。

在典型夏涝(旱)年(图 7,见彩页),流域内具有明显的水汽辐合(辐散)异常,水汽通量散度距平可达 $-(+)2 \times 10^{-5} \text{ kg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}$ 以上,当水汽辐合时,水汽

来源于西北太平洋副热带高压西侧东南偏南气流, 与孟加拉湾到南海地区上空西南气流的汇合。

4 结论

利用逐月降水数据和 NCEP/NCAR 再分析数据, 研究了洞庭湖流域近 55a 来夏季降水的时空分布特征, 分析了典型夏季降水异常年份平均的大气环流形势和水汽输送特征, 得到以下主要结论:

(1) 洞庭湖流域夏季降水量自湘江中游一带向东南和西北逐渐递增, 夏季降水标准差和夏季平均降水量有着基本一致的空间分布。洞庭湖流域夏季降水量存在准 3a 和准 20a 周期。20 世纪 60 年代降水偏少, 70 年代较 60 年代降水增多, 80 年代夏季降水最少, 90 年代是 55a 间夏季降水最多的十年, 进入 21 世纪以来夏季降水又呈减少。

(2) 洞庭湖流域夏季降水异常与欧亚地区上空大气环流形势的关系密切。典型夏涝(旱)年时, 欧亚大陆高压偏弱, 冷空气偏弱, 西北太平洋副高偏强(弱), 形势有利于冷暖气流在 30N 附近区域汇合。

(3) 洞庭湖流域夏季水汽输送主要来自西南水汽通道及西太平洋暖湿气流, 在典型夏涝(旱)年, 流域内出现显著的水汽辐合(辐散)。

参考文献:

- [1] EASTERLING D R, EVANS J L, GROISMAN P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2000, 81 (3): 417–425.
- [2] QIN D, PLATTNER G K, TIGNOR M, et al. Climate Change 2013: The Physical Science Basis [M]. Cambridge, UK and New York: Cambridge University Press, 2014.
- [3] FU G, YU J, YU X, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009 [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 48–59.
- [4] 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 589–606.
- [5] 黄荣辉, 蔡榕硕, 陈际龙, 等. 我国旱涝气候灾害的年代际变化及其与东亚气候系统变化的关系[J]. 大气科学, 2006, (5): 730–743.
- [6] 罗红磊, 何洁琳, 李艳兰, 等. 气候变化背景下影响广西的主要气象灾害及变化特征[J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 10–14.

- [7] 黄荣辉, 陈际龙. 我国东、西部夏季水汽输送特征及其差异[J]. 大气科学, 2010, 34(6): 1035–1045.
- [8] 黄琰, 封国林, 董文杰. 近 50 年中国气温、降水极值分区的时空变化特征[J]. 气象学报, 2011, 69(1): 125–136.
- [9] 吴林, 覃峥嵘, 黄大贞, 等. 华南区域季节性降水的差异分析[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(3): 5–7+11.
- [10] 肖伟军, 陈炳洪, 刘云香. 近 45a 华南夏季降水时空演变特征[J]. 气象研究与应用, 2009, 30(1): 12–14+22.
- [11] 申乐琳, 何金海, 周秀骥, 等. 近 50 年来中国夏季降水及水汽输送特征研究 [J]. 气象学报, 2010, 68(6): 918–931.
- [12] 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系[J]. 大气科学, 2011, 35(4): 589–606.
- [13] 吕俊梅, 祝从文, 据建华, 等. 近百年中国东部夏季降水年代际变化特征及其原因[J]. 大气科学, 2014, 38(4): 782–794.
- [14] 黄荣辉, 顾雷, 陈际龙, 等. 东亚季风系统的时空变化及其对我国气候异常影响的最近研究进展 [J]. 大气科学, 2008, (4): 691–719.
- [15] 黄荣辉, 刘永, 冯涛. 20 世纪 90 年代末中国东部夏季降水和环流的年代际变化特征及其内动力成因[J]. 科学通报, 2013, 58(8): 617–628.
- [16] 周连童, 黄荣辉. 关于我国夏季气候年代际变化特征及其可能成因的研究 [J]. 气候与环境研究, 2003, (3): 274–290.
- [17] 刘宣飞, 袁慧珍, 管兆勇. ENSO 对 IOD 与中国夏季降水关系的影响[J]. 热带气象学报, 2008, (5): 502–506.
- [18] 金祖辉, 陶诗言. ENSO 循环与中国东部地区夏季和冬季降水关系的研究[J]. 大气科学, 1999, (6): 663–672.
- [19] 黄荣辉, 吴仪芳. The Influence of ENSO on the Summer Climate Change in China and Its Mechanism [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 1989, (1): 21–32.
- [20] 杜银, 张耀存, 谢志清. 东亚副热带西风急流位置变化及其对中国东部夏季降水异常分布的影响[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 581–592.
- [21] 苏丽欣, 黄茂栋, 黄晴晴等. 近 10a 西北太平洋海域登陆台风的环境场特征分析[J]. 气象研究与应用, 2007(4): 11–13+19.
- [22] 李华实, 廖胜石, 李露芳, 等. 1409 超强台风“威马逊”近海急剧加强特征及成因分析 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 47–51+132.
- [23] 宋佳佳, 薛联青, 刘晓群, 等. 洞庭湖流域极端降水指数变化特征分析[J]. 水电能源科学, 2012, 30(9): 17–19.
- [24] 王克林, 章春华, 易爱军. 洞庭湖区洪涝灾害形成机理与生态减灾和流域管理对策[J]. 应用生态学报, 1998, (下转第 23 页)

- tion of Working Groups I, II, and III to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [R]. Watson R T, et al, eds. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge University Press, 2001. 183–239.
- [2] IPCC, Climate Change 2007 The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change [M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2007. 30–33.
- [3] 李秀存, 张永强, 李耀先. 厄尼诺与广西异常气候关系研究[J]. 气象研究与应用, 2000, 21(3): 29–32.
- [4] 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.
- [5] 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈等. 中国气候变化的检测及预估 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2007, 1(1): 1–10.
- [6] 黄雪松, 赵江洁, 李艳兰, 等. 20 世纪 90 年代以来广西重大水旱灾害回顾 [J]. 气象研究与应用, 2007, 28(4): 17–19.
- [7] 张允锋. 近 2000a 中国重大历史事件与气候变化的关系 [J]. 气象研究与应用, 2008, 29(1): 20–22.
- [8] 杨明. 近 50 年中国气候变化特征研究 [D]. 南京: 南京信息工程大学, 2008.
- [9] 周仕鹏. 兴仁县气候变化及农业气象灾害分析 [J]. 气象研究与应用, 2012, 33(S1): 185–187.
- [10] 黎琮炜, 覃卫坚, 高安宁. 1961–2013 年广西洪涝灾害时空分布特征及成因 [J]. 气象研究与应用, 2015, 36(1): 80–85.
- [11] 罗红磊, 何洁琳, 李艳兰, 等. 气候变化背景下影响广西的主要气象灾害及变化特征 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(1): 10–14.
- [12] 何洁琳, 谢敏, 黄卓, 等. 广西气候变化事实 [J]. 气象研究与应用, 2016, 37(3): 11–15.
- [13] 黄荣辉, 杜振彩. 全球变暖背景下中国旱涝气候灾害的演变特征及趋势 [J]. 自然杂志, 2010, 32(4): 187–189.
- [14] 黄梅丽, 丘平珠, 黄雪松等. 广西气候变暖及其对农业的影响 [J]. 山地农业生物学报, 2008, 27(3): 200–206.
- [15] 广西壮族自治区气候中心. 广西气候 [M]. 北京: 气象出版社, 2007. 32–40.
- [16] 蒋丽娟. 广西春夏季旱涝的等级划分及时空分布特征分析 [J]. 气象研究与应用, 2008, 29(3): 14–17.
- [17] 林宝亭, 梁祥毅, 王远超. 玉林市近 60 年旱涝的变化特征 [J]. 广东气象, 2012, 24(6): 42–44.
- [18] 王成, 吴善材, 邓明, 等. 开平市近 50 年气候变化特征 [J]. 广东气象, 2011, 33(2): 35–36.
- [19] 欧阳细美, 欧阳彩虹, 吴瑕, 等. 1961—2013 年南雄降水和旱涝的变化特征分析 [J]. 广东气象, 2014, 36(6): 24–27.
- [20] 王艳秋, 邢俊江, 张丽娟等. 黑龙江省旱涝低温指标及其气候分析应用 [J]. 自然灾害学报, 2008, 17(5): 142–146.
- [21] 李秀梅, 李奇穗, 田茂. 眉山市汛期 (5~9 月) 旱涝指数及其特征分析 [J]. 乐山师范学院学报, 2011, 26(5): 10–12.
- [22] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术 [M]. 北京: 气象出版社, 1999. 42–106.
- [23] 陈特固, 曾侠, 张江勇, 等. 全球变暖背景下的广东省降水量及旱、涝变化趋势 [J]. 广东气象, 2009, 25(1): 89–96.
- [24] 薛宇峰. 近 50 年来湛江、韶关气候变化的小波分析 [J]. 广东气象, 2006(1): 29–32.
-
- (上接第 5 页)
- (6): 3–10.
- [25] 李吉顺, 王昂生. 1998 年长江流域洪涝灾害分析 [J]. 气候与环境研究, 1998, (4): 103–110.
- [26] 吉红霞, 吴桂平, 刘元波. 极端干旱事件中洞庭湖水面变化过程及成因 [J]. 湖泊科学, 2016, 28(01): 207–216.
- [27] 王国杰, 姜彤, 王艳君, 等. 洞庭湖流域气候变化特征 (1961–2003 年) [J]. 湖泊科学, 2006, 18(5): 470–475.
- [28] 李景刚, 黄诗峰, 李纪人, 等. 1960–2008 年间洞庭湖流域降水变化时空特征分析 [J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2010, 8(4): 275–280.
- [29] 徐卫红, 葛德祥, 李娜, 等. 1960~2011 年洞庭湖流域降水量变化特征 [J]. 湿地科学, 2016, 14(1): 108–112.
- [30] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究 [J]. 应用气象学报, 1997, (1): 27–34.
- [31] 章明亮, 李燕欣. 国内常用旱涝指标的分类研究 [J]. 气象科技, 1993, (03): 81–87.
- [32] 文宝安. 物理量计算及其在暴雨分析预报中的应用——水汽通量与水汽通量散度 [J]. 气象, 1980, (06): 34–36.
- [33] 黄嘉佑, 李黄. 气象中的谱分析 [M]. 甘肃: 气象出版社, 1984: 13–17.