

# 1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温和降水事件的变化规律

许建伟<sup>1, 2</sup> 彭保发<sup>1, 2</sup> 郭蓉芳<sup>3</sup> 王夏青<sup>1, 2</sup>

(1 湖南文理学院资源环境与旅游学院, 常德 415000; 2 洞庭湖生态经济区建设与发展湖南省协同创新中心, 常德 415000; 3 湖南省常德市气象局, 常德 415000)

**摘要:** 洞庭湖生态经济区是我国重要的粮食基地和生态环境保护的关键区, 研究该区域的极端气温、降水事件对防灾减灾、应对气候变化具有重要意义。基于站点观测数据分析了1960—2018年洞庭湖生态经济区极端气温、降水事件的变化规律, 得出如下结论: 该区域极端气温指数呈现出显著的变化规律, 冷夜日数(TN10p)、霜冻日数(FD)、冰冻(ID)日数等冷指数显著减少, 暖夜日数(TN90p)、夏季日数(SW)、热带夜数(TR)、持续暖期指数(WSDI)等暖指数显著增加。强降水事件的降水量和发生频次均增加, 强降水量(R95p)以18.85 mm/10 a的速度增加, 大雨日数(R20mm)与暴雨日数(R50mm)分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加。复合高温热浪事件和夏季极端高温干旱事件发生的频次和持续时间在近20年明显增加, 21世纪10年代平均每年分别发生1.08次和5.41次。

**关键词:** 洞庭湖生态经济区, 极端气候事件, 时间变化特征

DOI: 10.3969/j.issn.2095-1973.2020.03.014

## Variation of Extreme Temperature and Precipitation Events of the Dongting Lake Ecological Economic Zone in 1960–2018

Xu Jianwei<sup>1, 2</sup>, Peng Baofa<sup>1, 2</sup>, Guo Rongfang<sup>3</sup>, Wang Xiaqing<sup>1, 2</sup>

(1 Hunan University of Arts and Science, Changde 415000

2 Hunan Province Cooperative Innovation Center for the Construction and Development of Dongting Lake Ecological Economic Zone, Changde 415000

3 Changde Meteorological Bureau, Changde 415000)

**Abstract:** Dongting Lake Ecological Economic Zone (DT Lake) is not only an important grain base but also a key region of ecological environment protection in China. It is necessary to investigate extreme temperature and precipitation events for disaster prevention and mitigation, climate change adaption in this region. Based on station observations, variation of extreme temperature and precipitation events in 1960–2018 over DT Lake was analyzed and conclusions are as following: extreme temperature indices show significant change with cold indices such as TN10p, FD and ID are decreasing, warm indices such as TN90p, SU, TR and WSDI are increasing. Both amount and frequency of heavy precipitation increase, as R95p, R20mm and R50mm increase at the rate of 18.85 mm/10a, 0.36 d/10a and 0.19 d/10a, respectively. Frequency and duration of compound heat wave and summer extreme warm dry events obviously increase in the last 20 years. On average, 1.08 compound heat waves and 5.41 extreme warm dry events occur in each year in 2010s.

**Keywords:** Dongting Lake Ecological Economic Zone, climate extreme, temporal variation characteristics

### 0 引言

相对于平均气候的变化, 极端气候事件的变化对人类社会和自然生态环境的影响更大, 20世纪80年代以来, 中国极端天气气候灾害的影响范围逐渐扩大, 影响程度日趋严重, 直接经济损失不断增加<sup>[1]</sup>, 因而

受到广泛关注。随着气候变暖, 我国不同地区的极端气温事件发生了显著变化, 总体表现为极端暖指数显著增加, 极端冷指数显著减小<sup>[2-5]</sup>, 例如湖南省暖昼指数和暖夜指数分别以0.68 d/10 a、2.73 d/10 a的速度增加, 而冷昼指数和冷夜指数分别以-0.45 d/10a、-2.46 d/10a的速度减小<sup>[4]</sup>。我国处于东亚季风区, 受极端降水的影响较大, 在全球变暖的背景下极端强降水事件呈现出明显的变化规律, 全国平均暴雨和极端

收稿日期: 2019年6月27日; 修回日期: 2019年11月28日  
第一作者: 许建伟(1987—), Email: xjw\_huas@163.com

强降水事件频率和强度有所增长，特别是长江中下游和东南地区、西北地区有较明显增长，而华北、东北中南部和西南部分地区减少<sup>[6-7]</sup>。平均降水和极端降水呈现相反的变化趋势，加剧了不同气象灾害的威胁，如西南地区总降水量减少、但极端强降水增加，从而面临洪涝和干旱的双重威胁<sup>[8]</sup>。长江中下游地区是极端降水事件频发的区域，近52年来该区域极端降水率以9.3 mm/10 a的速率显著增加，使该区域面临更加严峻的灾害风险<sup>[6,9]</sup>。

目前关于极端气温和降水事件开展了大量研究，大部分研究往往只考虑单变量的极端事件，例如极端降水和极端气温等，忽略了变量之间的相互作用。复合极端事件（Compound extreme events）是多种气候驱动因子或致灾因子共同作用下形成的高影响气候事件<sup>[10]</sup>，比单一极端气候事件的危害性更强，对生态系统、粮食安全、森林火灾和人体健康等方面都具有深远影响，因而受到越来越多的关注<sup>[10-13]</sup>。例如风暴潮和强降水的同时发生会导致沿海地区的洪涝灾害<sup>[14]</sup>。传统的高温热浪事件仅考虑白天的最高气温，而夜间的持续高温会加剧白天热浪的危害，因此基于日最高气温和最低气温的复合高温热浪事件对人体健康、农业病害、电力和水资源供给具有更大的影响<sup>[15]</sup>。持续高温和降水偏少会导致极端高温干旱事件<sup>[16-17]</sup>，而极端高温干旱事件对粮食生产具有较大的不利影响<sup>[12-13]</sup>。

洞庭湖生态经济区（以下简称洞庭湖区）位于东亚季风区，极端天气气候事件频发。20世纪90年代以来，由极端气温、降水事件导致的旱、涝灾害加剧，对该区经济社会发展和生态系统造成了重大影响<sup>[18-20]</sup>。例如，2008年初洞庭湖发生冰冻灾害，导致湖面结冰，部分区域结冰厚度达到10 cm，给越冬候鸟造成严重伤害。在全球持续升温的背景下，未来洞庭湖区极端降水的强度和频率可能进一步增加，旱涝灾害风险将进一步加剧。因此，研究洞庭湖区极端气温、降水事件的变化规律对保障经济社会安全、保护生态环境具有重要意义。

## 1 资料与方法

### 1.1 研究区域

2014年4月14日，中华人民共和国国务院正式批复同意《洞庭湖生态经济区规划》。洞庭湖区，包括岳阳、常德、益阳3市，长沙市望城区和湖北省荆州市，总面积为6.05万 km<sup>2</sup>，区域范围如图1所示。该区域是我国重要的商品粮基地、养殖渔业区、长江主要的分洪、蓄洪区，人口、产业密集，也是长江流域主

要的湿地分布区，在粮食安全、防洪减灾、生态环境保护等方面具有重要意义。

### 1.2 数据

选取了洞庭湖生态经济区11个气象观测站点逐日气温和降水数据，数据来源于中国气象局国家气象信息中心（<http://data.cma.cn/>）。气象观测站点的分布如图1所示，包括荆门、石门、常德、监利、洪湖、南县、岳阳、沅江、安化、湘阴和平江等11个站点。首先对数据进行质量控制，选取数据完整的1960—2018年作为分析时段。

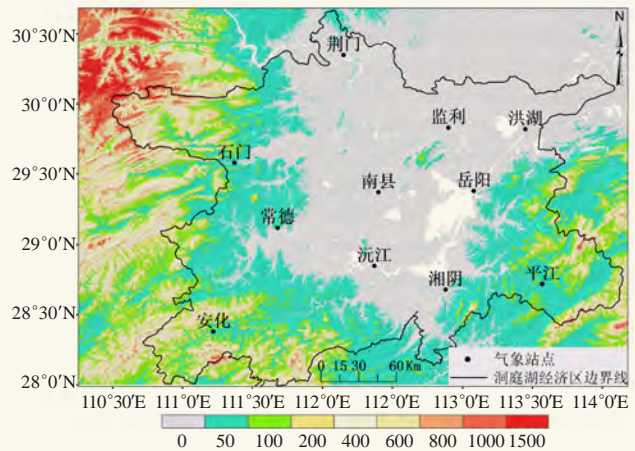


图1 洞庭湖区气象站点分布

Fig. 1 Meteorological stations of Dongting Lake Ecological Economic Zone

### 1.3 极端气温和降水指数

极端气候指数的定义方法有多种，文中采用的是气候变化检测和指标专家组（ETCCDI）规定的27个极端气温和降水指数的标准，具体定义和计算方法见网址：[http://etccdi.pacificclimate.org/list\\_27\\_indices.shtml](http://etccdi.pacificclimate.org/list_27_indices.shtml)。从中选取15个极端气温指数和9个极端降水指数（表1）。另外分析了2个复合极端指数，分别为复合高温热浪事件和极端高温干旱事件。

高温热浪事件对人体健康、电力供给等具有重要影响，传统的高温热浪的定义仅考虑了最高气温。复合高温热浪比传统的高温热浪对人体健康的危害更大。为研究复合高温热浪事件，将至少连续3 d最高气温和最低气温同时分别高于最高和最低气温90%分位值定义为一次复合高温热浪事件。两次高温热浪事件之间间隔至少连续2 d，要求最高气温、最低气温分别或同时低于90%分位值。根据以上定义，可以计算一年中复合高温热浪事件发生的次数、持续时间和强度，具体计算方法参考Li等<sup>[15]</sup>的方法。

根据Lu等<sup>[13]</sup>的定义方法，将日平均气温高于90%

表1 极端气温和降水指数的定义  
Table 1 Definition of extreme temperature and precipitation indices

极端指数	英文缩写	单位	定义
最高气温最大值	TXx	℃	每年日最高气温的最大值
最低气温最大值	TNx	℃	每年日最低气温的最大值
最高气温最小值	TXn	℃	每年日最高气温的最小值
最低气温最小值	TNn	℃	每年日最低气温的最小值
冷夜指数	TN10p	d	每年日最低气温小于基准期内10%分位数的日数
暖夜指数	TN90p	d	每年日最低气温大于基准期内90%分位数的日数
冷昼指数	TX10p	d	每年日最高气温小于基准期内10%分位数的日数
暖昼指数	TX90p	d	每年日最高气温大于基准期内90%分位数的日数
霜冻日数	FD	d	每年日最低气温<0℃的日数
冰冻日数	ID	d	每年日最高气温<0℃的日数
夏季日数	SU	d	每年日最高气温>25℃的日数
热带夜数	TR	d	每年日最低气温>20℃的日数
持续暖期指数	WSDI	d	每年至少连续6 d最高气温>基准期内90%分位数的天数
持续冷期指数	CSDI	d	每年至少连续6 d最低气温<基准期内10%分位数的天数
气温日较差	DTR	℃	每年日最高气温与最低气温的差的平均值
日最大降水量	RX1day	mm	每年最大的1 d降水量
五日最大降水量	RX5day	mm	每年最大的连续5 d降水量
强降水量	R95p	mm	每年大于基准期内95%分位数的日降水量之和
中雨日数	R10mm	d	每年日降水量≥10 mm的日数
大雨日数	R20mm	d	每年日降水量≥20 mm的日数
暴雨日数	R50mm	d	每年日降水量≥50 mm的日数
连续干日	CDD	d	每年日降水量连续<1 mm的最大日数
连续湿日	CWD	d	每年日降水量连续≥1 mm的最大日数
降水强度	SDII	mm/d	年降水量与降水日数(日降水量≥1 mm)的比值

分位值、同时日降水量低于10%分位值的连续日数(≥1 d)定义为一次极端高温干旱事件,可以计算每年发生极端高温干旱事件的频次,每次事件持续的日数和一年中出现极端高温干旱的总日数。Lu等<sup>[13]</sup>分析了全国小麦和玉米生长季期间的极端高温干旱事件,而洞庭湖区的主要粮食作物是水稻,因此分析了该区域对水稻生长有重要影响的夏季发生的极端高温干旱事件。气温采用动态阈值,以某日为中心,选取该日前后10 d建立一个长度为21 d的滑动窗口,选取1960—2018年所有年份中该窗口的气温得到一个1239 d(21 d/a×59 a)的气温数据,以该样本中90%分位值作为该日极端高温的阈值。以此类推得到每日的气温阈值。与气温不同,降水发生的天数相对较少,因此选取1960—2018年所有夏季雨日(降水量>0 mm/d)降水量的10%分位值作为降水的阈值。

## 2 结果分析

### 2.1 极端气温指数的变化规律

洞庭湖区1960—2018年15个极端气温指数的年际变化规律如图2所示, TXx和TXn呈较弱的上升趋势,而TNx和TNn分别以0.21℃/10 a和0.55℃/10 a的速度

显著上升。TN10p显著减少,速率为-3.85 d/10a, TN90p显著增加,速率为9.86 d/10 a,表明夜间的气温显著增加。TX10p变化较小,而TX90p显著增加。FD以2.76 d/10 a的速率显著减小, ID呈不显著的减小趋势,近20年ID接近0 d,但2008年和2018年冬季气温偏低,导致ID突增。SU、TR和WSDI分别以2.92 d/10 a、3.05 d/10 a和2.40 d/10 a的速率显著增加。CSDI存在较大的年际变率,呈不显著的减小趋势。最低气温比最高气温的升温速率更快,导致DTR显著减小。总体而言,基于最低气温计算的极端气温指数变化较快,基于最高气温计算的极端气温指数变化相对较慢。TN10p、FD冷指数均显著减少,而TN90p、SU、TR和WSDI等暖指数显著增加。从极端气温指数变化趋势的空间分来看(图3),洞庭湖区11个站点的极端气温指数呈现出较为一致的变化趋势。

### 2.2 极端降水指数的变化规律

9个极端降水指数的年际变化如图4所示,极端降水指数存在较大的年际波动,变化趋势均没有通过0.05的显著性检验。RX1day、RX5day和R95p分别以2.64 mm/10a、2.28 mm/10a和18.85 mm/10a的速度增加(图4a~4c)。从R10mm、R20mm和R50mm的

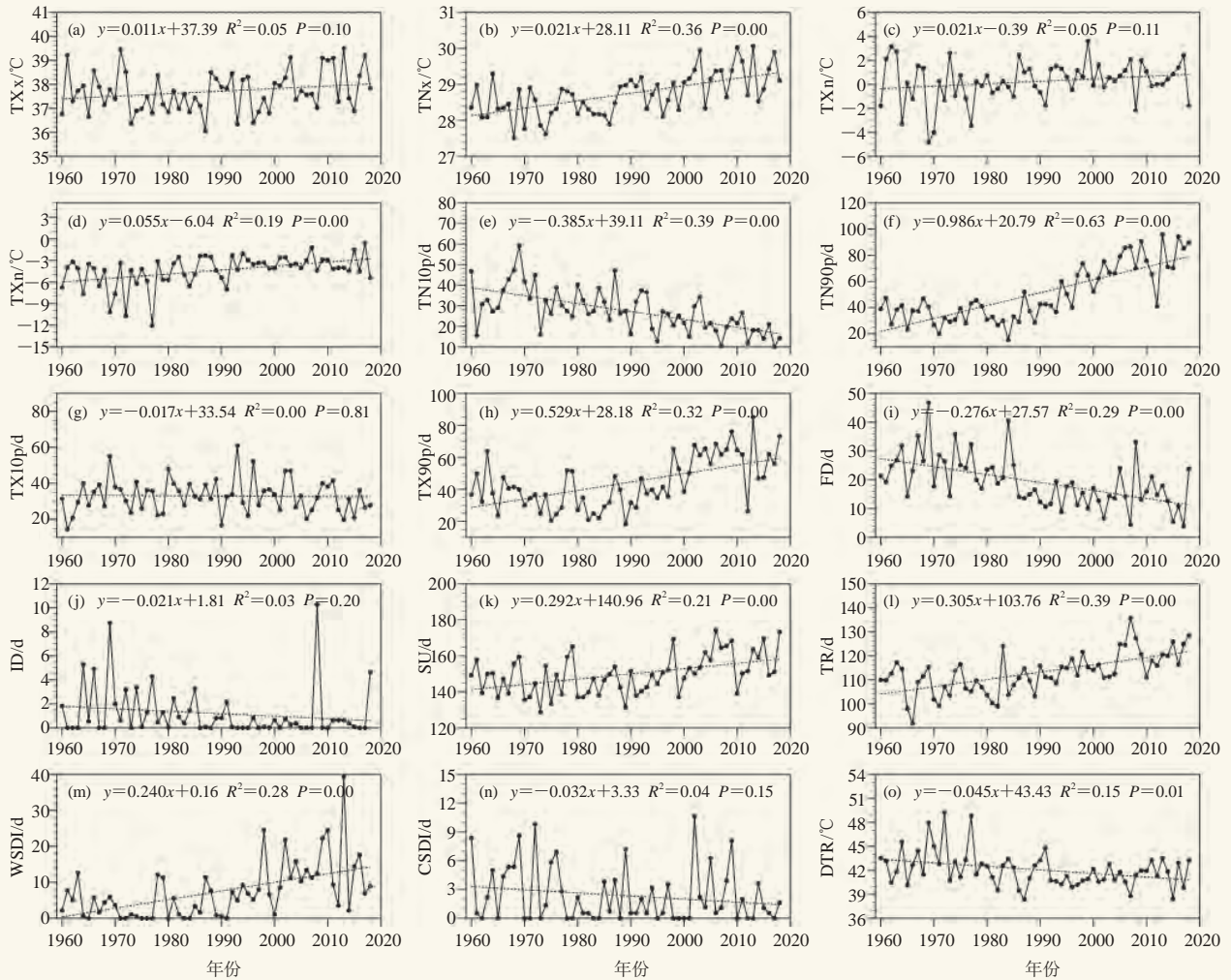


图2 1960—2018年洞庭湖区15个极端气温指数的年际变化

Fig. 2 Interannual variation of 15 extreme temperature indices in 1960—2018 over the DT Lake

变化规律来看，发生强降水的天数在增加，R20mm与R50mm分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加（图4d~4f）。CWD和CDD均呈减小趋势，表明降水在时间方面分布更加均匀（图4g~4h）。SDII的增加趋势较为明显，速率为0.25 mm/d/10 a（图4i）。总体而言，洞庭湖区的极端降水指数存在不显著的变化规律，强降水事件的降水量和发生频次均呈现增加趋势。

从变化趋势的空间分布（图5）来看，大部分站点的极端降水指数的变化趋势较为一致，但相比极端气温指数变化的一致性差。R95p、R20mm、R50mm、SDII均呈增加趋势，CDD呈减小趋势，其他4个极端降水指数均存在3个站点的变化趋势与整个区域的变化趋势相反。

### 2.3 气温和降水复合极端事件

复合高温热浪事件的年代际变化规律如图6所示。由于很多年份没有发生复合高温热浪事件，因此

采用10 a平均值的变化展示其变化规律。图6a显示，2000年之前，复合高温热浪事件发生的频次较低，平均每年发生0.16次，而在2000年之后，复合高温热浪事件明显增加，21世纪00年代和10年代平均每年发生0.94次和1.08次。20世纪60—80年代，复合高温热浪事件发生的频次较少，但其强度随着气温升高而增加，20世纪90年代强度出现最小值，随后增加（图6b）。复合高温热浪事件持续时间先减小、后增加，20世纪80年代出现最小值3.79 d，21世纪10年代达到最大值（4.45 d）。很多年份没有出现复合高温热浪事件，且各个站点计算得到的变化趋势并不显著，但近20年来复合高温热浪事件发生频次增加、强度增强的变化事实不容忽视。随着气温持续升高，未来复合高温热浪事件发生的频次、持续时间和强度均将进一步增加，对生态系统、人体健康、电力供给等产生的不利影响将加剧。

对比全国不同区域的变化显示，北方地区复合高

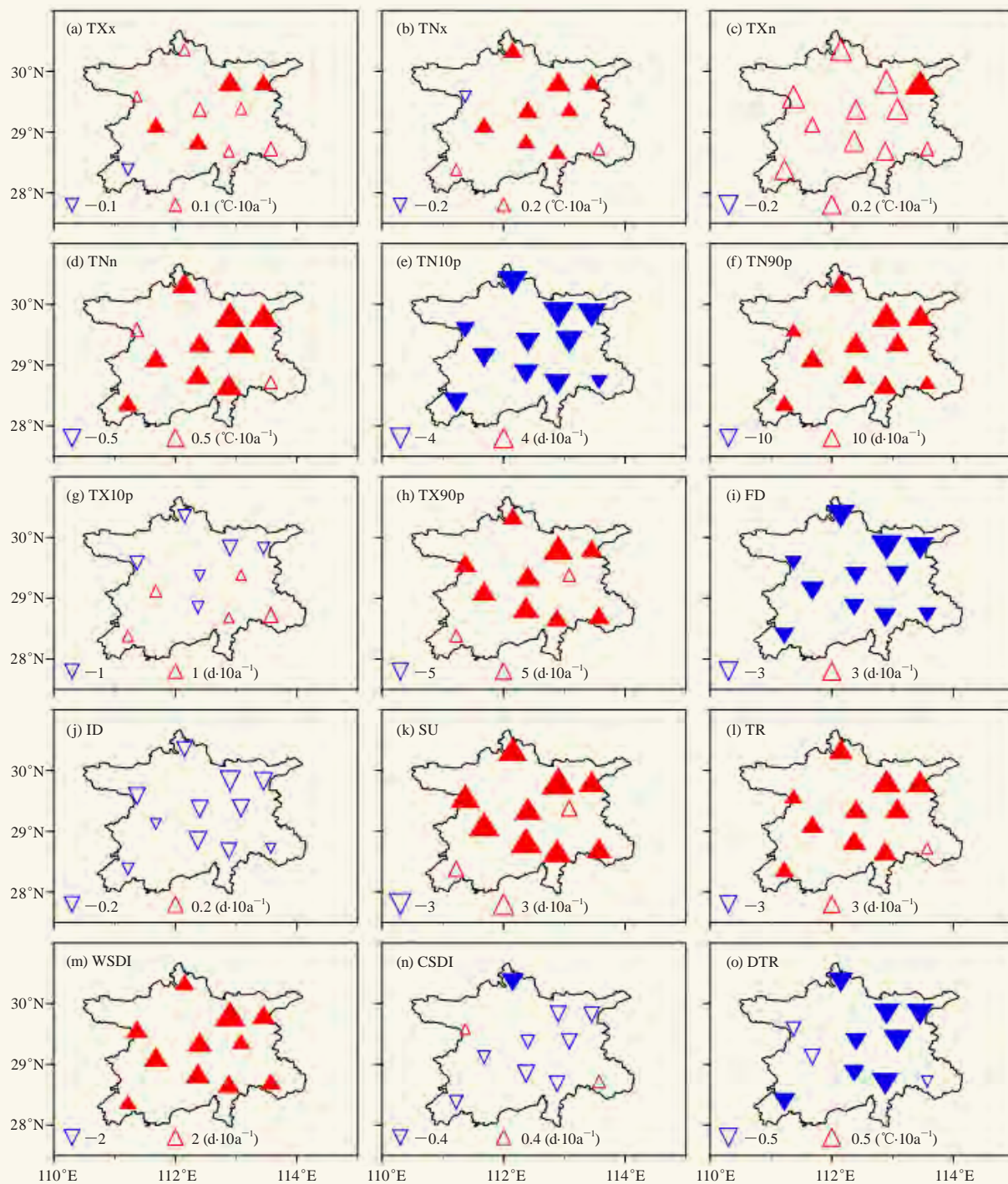


图3 1960—2018年洞庭湖区15个极端气温指数变化趋势的空间分布

(上三角表示增加, 下三角表示减小, 实心三角表示变化通过了0.05的显著性检验)

Fig. 3 Distribution of trends for 15 extreme temperature indices over the DT Lake in 1960—2018 (Up pointing triangle means increase, down pointing triangle means decrease. Filled triangle means trend passes the 0.05 significant test)

温热浪事件的强度增加较多, 而持续时间变化较小, 南方地区的持续时间增加较多。长江流域的复合高温热浪事件发生频次、强度和持续时间均较大, 且均表现出较快增加趋势<sup>[13]</sup>。洞庭湖区复合高温热浪事件的频率、强度在近20年明显增加, 持续时间增加相对较

慢, 具有一定的独特性。

图7为夏季极端高温干旱事件的年代际变化规律。极端高温干旱事件发生的频次从20世纪80年代起快速增加, 21世纪00年代和10年代平均每年发生5.74次和5.41次。从持续时间来看, 20世纪60—90年代呈

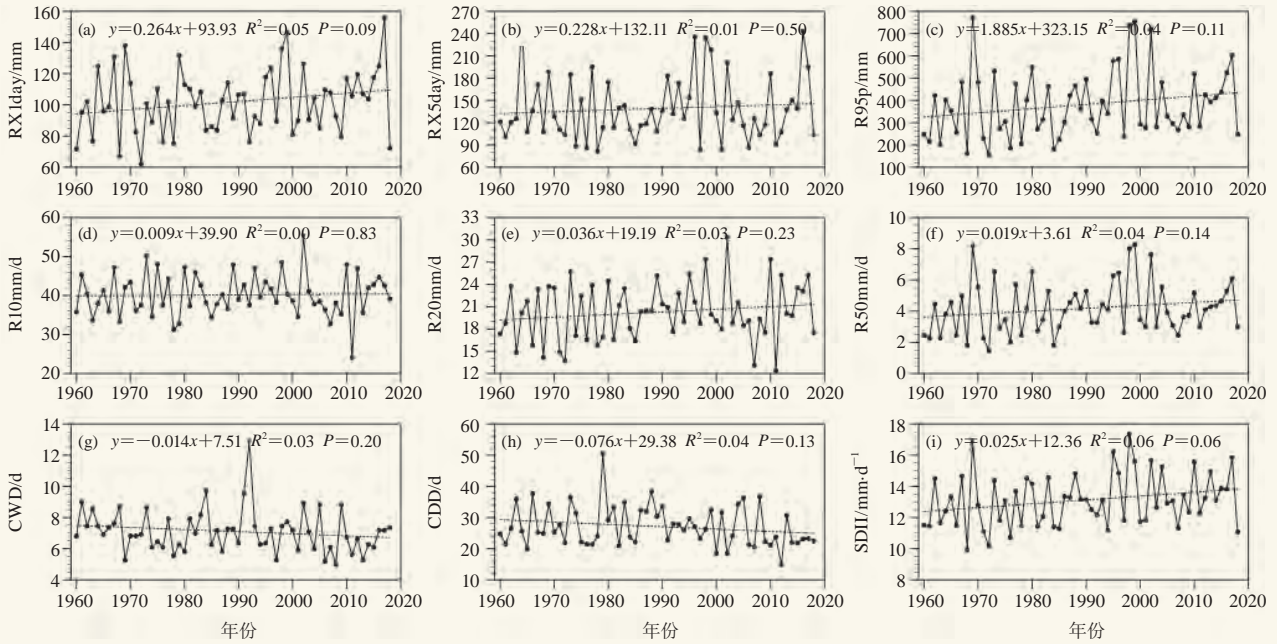


图4 1960—2018年洞庭湖区9个极端降水指数的年际变化  
Fig. 4 Interannual variation of 9 extreme precipitation indices in 1960—2018 over the DT Lake

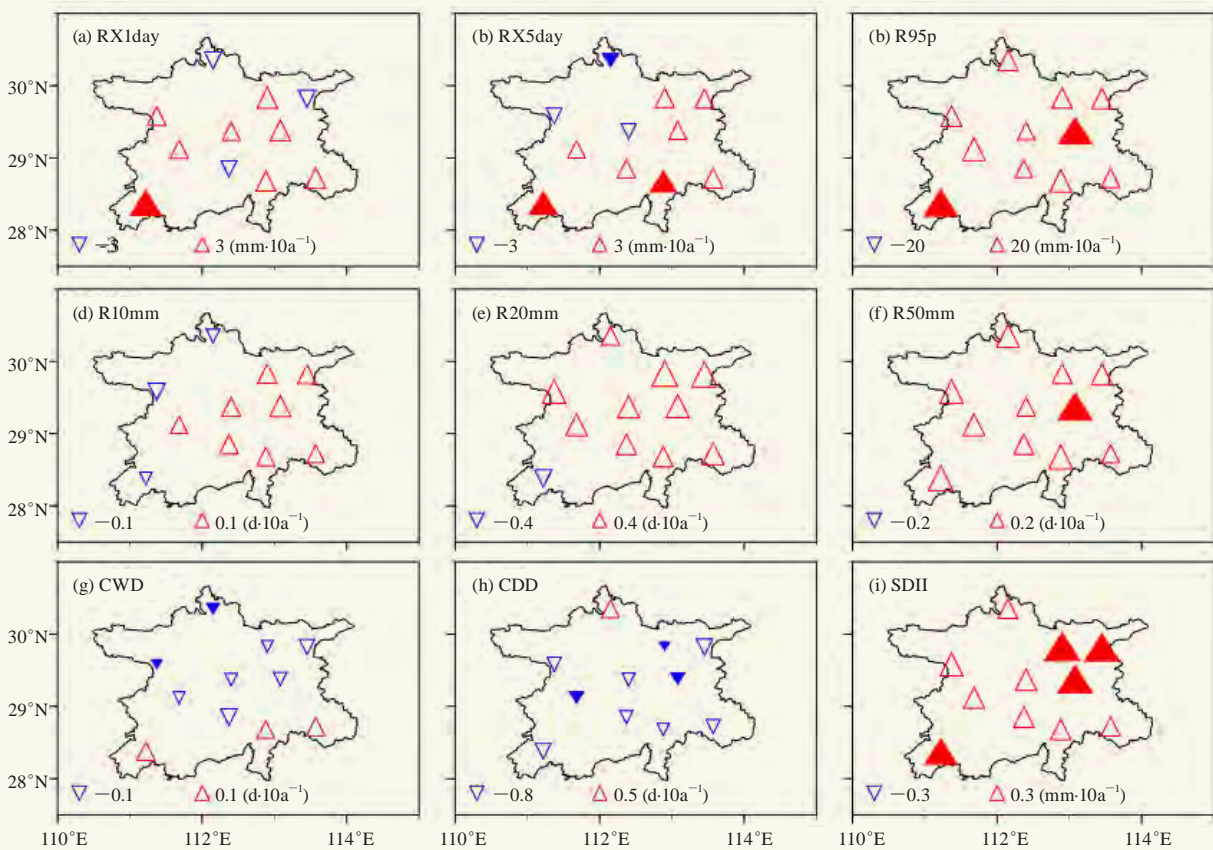


图5 1960—2018年洞庭湖区9个极端降水指数变化趋势的空间分布  
(上三角表示增加，下三角表示减小，实心三角表示变化通过了0.05的显著性检验)

Fig. 5 Distribution of trends for 9 extreme precipitation indices over the DT Lake in 1960—2018  
(Up pointing triangle means increase, down pointing triangle means decrease. Filled triangle means trend passes the 0.05 significant test)

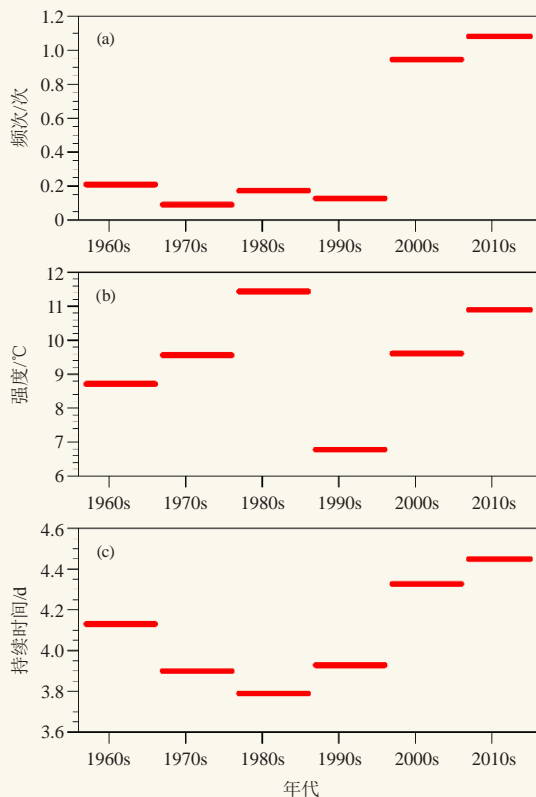


图6 1960—2018年复合高温热浪事件发生频次、强度和持续时间的年代际变化

Fig. 6 Interdecadal variations of frequency, intensity and duration of compound heat wave events in 1960—2018

减小趋势，之后快速增加，21世纪10年代平均每次事件持续2.71 d。20世纪90年代之前，夏季极端高温干旱事件发生的总日数变化较为平缓，之后由于发生频次和持续时间有较大增长，总日数亦明显增加，21世纪10年代平均每年达到14.69 d。从变化趋势的空间分布来看，大部分站点极端高温干旱事件的频次、持续时间和总日数均显著增加，东北部监利、洪湖、南县等站点的增加速率较大（图略）。Lu等<sup>[13]</sup>对小麦和玉米生长季的极端高温干旱事件的研究表明，1980—2015年极端高温干旱事件的频率出现显著增加，华北、西北和西南部分地区的发生频次较其他地区更多，且不同作物生长季发生的复合极端事件存在一定差异。小麦和玉米生长季的极端高温干旱事件的发生频次在2010年之后出现减小趋势，洞庭湖区夏季极端高温干旱事件也表现出相同的变化规律。

### 3 结论

1) 极端气温指数具有显著的变化特征，基于最低气温计算的指数变化较快，基于最高气温计算的指数变化相对较慢。冷夜日数、霜冻日数等冷指数显著减少，暖夜日数、夏季日数、热带夜数、持续暖期指

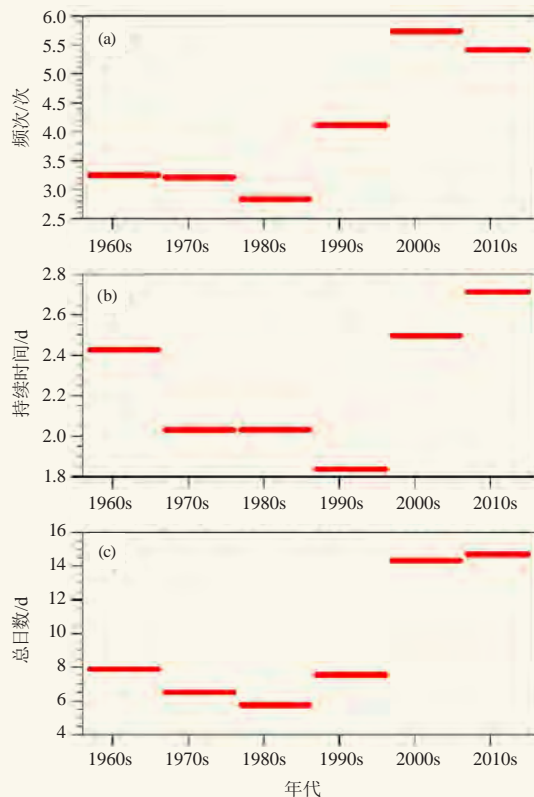


图7 1960—2018年夏季极端高温干旱事件的发生频次、持续时间和总日数的年代际变化

Fig. 7 Interdecadal variations of frequency, duration and day number of summer extreme warm dry events in 1960—2018

数等暖指数显著增加。11个站点的变化规律较一致。

2) 极端降水指数存在不显著的变化规律，强降水事件的降水量和发生频次均增加，强降水量以18.85 mm/10 a的速度增加，大雨日数与暴雨日数分别以0.36 d/10 a和0.19 d/10 a的速度增加，降水强度以0.25 mm/(d·10 a)的速度增加。大部分站点的变化趋势较为一致，少数站点存在相反的变化规律。

3) 复合高温热浪事件发生的频次、强度和持续时间在近20年明显增加，21世纪10年代平均每年发生1.08次，平均每次持续4.45 d。夏季极端高温干旱事件的频次、持续时间和总日数均显著增加，21世纪10年代平均每年发生5.41次，平均持续时间为2.71 d，总日数达到14.69 d。

### 参考文献

- [1] 秦大河, 张建云, 闪淳昌, 等. 中国极端天气气候事件和灾害风险管理及适应国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2015.
- [2] 刘青娥, 吴孝情, 陈晓宏, 等. 珠江流域1960—2012年极端气温的时空变化特征. 自然资源学报, 2015, 30(8): 1356-1366.
- [3] 孙玉燕, 孙鹏, 姚蕊, 等. 1961—2014年淮河流域极端气温时空特征及区域响应. 中山大学学报(自然科学版), 2019, 58(1): 1-11.
- [4] 朱歆炜, 叶成志, 彭晶晶, 等. 湖南省55a极端气温事件变化特征.

(下转98页)

表2 观鸟气象指数判别表

Table 2 Discriminating table of weather index for bird-watching

观鸟气象指数	判别指标	指数描述	服务提示
1	0	不适宜	天气不好, 建议您改日观鸟
2	1~15	不太适宜	天气不太好, 但愿您不会失望
3	16~20	基本适宜	天气还可以, 出去观鸟吧
4	21~25	比较适宜	天气不错, 欢迎您观鸟
5	26~30	很适宜	天气很好, 尽情观鸟吧

史资料的对比分析, 观鸟气象指数为1~5占比分别为14%、9%、19%、43%、15%, 即77%的时段适宜观鸟。

## 5 讨论

候鸟生活习性中最敏感的气象因子是气温, 候鸟因冬季北方寒冷而迁徙到相对温暖的东洞庭湖, 因此初冬至隆冬季节东洞庭湖候鸟最为集中。由于候鸟停留在东洞庭湖后并不会仅仅因为日平均气温持续上升或下降以及日最低气温的高低而成批飞走, 但对人体舒适度会产生影响。候鸟最为集中的时段是东洞庭湖一年中最冷的时段, 如果考虑日平均气温因子, 会因为兼顾人体舒适度等因素导致候鸟数量多的时候不适宜观鸟; 如果考虑日最低气温因子, 将导致最低气温在候鸟气象指数的设计比较困难。一次强冷空气过程后碧空的夜间辐射降温往往导致日最低气温很低, 但次日白天天气晴朗升温也适宜观鸟, 同时候鸟迁徙途中需要借助风力, 这也是一次强冷空气过后的晴冷天气东洞庭湖候鸟数量较多的原因之一, 而寒流南下

往往伴随气温的剧烈变化且早晨日最低气温很低, 对人类而言舒适度下降。如果强冷空气仅仅伴随风速加大, 气温因子将在观鸟气象指数中的风速因子中体现; 如果强冷空气伴随风速加大的同时出现降雨, 则气温因子在观鸟气象指数中的风速和降雨因子中同时体现; 如果强冷空气导致降雪、积雪甚至雨淞等则不适宜观鸟。因此, 为了便于业务推广应用, 本文设计了观鸟气象指数的时段, 影响因子取值规则中没有考虑气温因子。

鸟类调查表明, 城陵矶水位为24~25 m时最适宜候鸟栖息, 水位对东洞庭湖候鸟食物链至关重要, 对东洞庭湖观鸟产生很大影响。步行观鸟时日照和光线对观测一闪而过的鸟类品种产生影响。同时, 观测的鸟类品种和数量更多体现在观鸟者的技术水平, 与天气关系不大。随着生活水平的提高, 观鸟爱好者开展航调观鸟, 航调经验表明, 理想的航调天气为能见度高, 有高层云以减少地面的反射光, 没有雨、雪、雾, 风速低于40 km/h。

## 参考文献

- 付蓉, 王曼娜, 杨鹏, 等. 洞庭湖观鸟旅游发展现状及对策. 经济地理, 2008, 28(3): 523-526.
- 钟福生, 颜亨梅, 李丽平, 等. 东洞庭湖湿地鸟类群落结构及其多样性. 生态学杂志, 2007, 26(12): 1959-1968.
- 姚毅, 彭祥林. 洞庭湖水鸟监测与研究. 湖泊保护与生态文明建设——第四届中国湖泊论坛论文集. 合肥: 安徽科学技术出版社, 2014.
- 严明良, 沈树勤. 环境气象指数的设计方法探讨. 气象科技, 2005, 33(6): 583-588.
- 刘电英, 邹希云, 彭杰彪, 等. 洞庭湖湖面风速与湖区陆地风速的对比分析. 安徽农业科学, 2009, 37(32): 15902-15903.
- 沙漠与绿洲气象, 2016, 10(2): 82-88.
- 张延伟, 葛全胜, 姜逢清, 等. 北疆地区1961—2010年极端气温事件变化特征. 地理科学, 2016, 36(2): 296-302.
- 顾西辉, 张强, 孔冬冬. 中国极端降水事件时空特征及其对夏季温度响应. 地理学报, 2016, 71(5): 718-730.
- 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. 气候与环境研究, 2010(4): 337-353.
- Liu M, Xu X, Sun A Y, et al. Is southwestern China experiencing more frequent precipitation extremes? Environmental Research Letters, 2014, 9(6): 64002.
- 王蒙, 殷淑燕. 近52a长江中下游地区极端降水的时空变化特征. 长江流域资源与环境, 2015, 24(7): 1221-1229.
- Zscheischler J, Westra S, Den Hurk B V, et al. Future climate risk from compound events. Nature Climate Change, 2018, 8(6): 469-477.
- Hao Z, Singh V P, Hao F, et al. Compound extremes in hydroclimatology: a review. Water, 2018, 10(6): 718.
- Benari T, Boe J, Ciais P, et al. Causes and implications of the unforeseen 2016 extreme yield loss in the breadbasket of France. Nature Communications, 2018, 9(1): 1627.
- Lu Y, Hu H, Li C, et al. Increasing compound events of extreme hot and dry days during growing seasons of wheat and maize in China. Scientific Reports, 2018, 8(1): 16700.
- Wahl T, Jian S, Bender J, et al. Increasing risk of compound flooding from storm surge and rainfall for major US cities. Nature Climate Change, 2015, 5(12): 1093-1097.
- Li Y, Ding Y H, Li W, et al. Observed trends in various aspects of compound heat waves across China from 1961 to 2015. Journal of Meteorological Research, 2017, 31(3): 455-467.
- Sedlmeier K, Feldmann H, Schadler G, et al. Compound summer temperature and precipitation extremes over central Europe. Theoretical and Applied Climatology, 2018: 1493-1501.
- Hao Z, Hao F, Singh V P, et al. Changes in the severity of compound drought and hot extremes over global land areas. Environmental Research Letters, 2018, 13(12): 124022.
- 李景保, 余果, 欧朝敏, 等. 洞庭湖区农业水旱灾害演变特征及影响因素: 60年来的灾情诊断. 自然灾害学报, 2011, 20(2): 74-81.
- 廖玉芳, 赵辉, 彭嘉栋, 等. 洞庭湖区旱涝灾害加剧的气象成因. 灾害学, 2016, 31(1): 29-32, 54.
- 田玉刚, 覃东华, 杜渊会. 洞庭湖地区洪水灾害风险评估. 灾害学, 2011, 26(3): 56-60.

(上接95页)