

# 中国极端干旱——空雨频率的主模态时空特征\*

谭云霞<sup>1</sup>, 黄菲<sup>1,2\*\*</sup>, 许士斌<sup>1</sup>, 王宏<sup>1</sup>

(1. 中国海洋大学物理海洋教育部重点实验室 青岛海洋科学与技术国家实验室, 山东 青岛 26610;

2. 宁波大学宁波市非线性海洋和大气灾害系统协同创新中心, 浙江 宁波 315000)

**摘要:** 利用国家气象中心的站点日降水观测资料, 定义一个季节内无降水日出现的频率——空雨频率作为极端干旱的表征指标, 对中国 487 个站点 1980—2014 年秋、冬、春三个连续季节的空雨频率进行季节-经验正交函数分解(S-EOF), 发现我国极端干旱随季节演变的时空分布主要表现为前四个主模态的特征, 累积方差贡献为 40.6%。第一模态为秋、冬、春三季连旱模态, 空雨频率呈现显著的上升趋势, 大部分地区为异常变旱, 冬季华南沿海变旱最显著。第二模态为秋与冬春干旱的反位相变化模态, 空雨频率出现明显的秋-冬-春季反位相的季节反差现象, 且存在弱的年代际振荡。第三模态为冬-春极端干旱反位相模态, 对冬春两季的代表性较好, 秋冬两季空雨频率的空间分布场为以长江流域为中心的极端变旱, 而春季空雨频率呈现反位相变化。空雨频率以 1998 年为突变点存在明显的年代际转折。第四模态为南北偶极型秋-冬-春反位相模态, 呈现出长江流域以南与长江流域以北三个季节空雨频率均为相反的位相分布。不同的模态反映不同季节、不同区域的空雨频率的变化, 充分表现出我国干旱分布的复杂性。

**关键词:** 空雨频率; 极端干旱指标; S-EOF; 三季连旱; 季节转相

中图分类号: P463.2

文献标志码: A

文章编号: 1672-5174(2019)02-014-06

DOI: 10.16441/j.cnki.hdxh.20180020

引用格式: 谭云霞, 黄菲, 许士斌, 等. 中国极端干旱——空雨频率的主模态时空特征[J]. 中国海洋大学学报(自然科学版), 2019, 49(2): 14-20.

TAN Yun-Xia, HUANG Fei, XU Shi-Bin, et al. Extreme drought in China——spatial and temporal characteristics of frequency of precipitation free day[J]. Periodical of Ocean University of China, 2019, 49(2): 14-20.

干旱是影响农牧业最严重的气象灾害之一<sup>[1-2]</sup>, 直接影响到人们的饮食来源, 全世界每年因干旱造成巨大的农业损失<sup>[3]</sup>。全球变暖导致总体地表面变旱, 干旱频率的增加扩大了干旱气候区域<sup>[4]</sup>, 近几十年旱涝特征表现为干旱地区更加干旱, 湿润地区更加湿润<sup>[5]</sup>。在亚洲中部, 极端干旱环境增加, 沙漠日益增大<sup>[6]</sup>。Zhang 等<sup>[5]</sup>研究表明, 北半球亚热带及热带地区降水普遍减少, 呈现出变旱的总趋势。邹旭凯等<sup>[7]</sup>用综合气象干旱指数研究中国 1951—2008 年干旱变化, 结果表明, 干旱变化最明显的地方在华中、东北和山东等地区。夏半年(4—9 月)中国大部分地区干旱呈增长趋势, 从 1979—2010 年, 干旱频率增长了 109%<sup>[8]</sup>。对于冬季, 1980 年代以来, 中国东亚区域近 20 年降水为异常显著负距平, 仅为气候平均的 50%<sup>[9]</sup>。冬春季华北等地区的极端干旱也越来越频繁发生<sup>[10]</sup>。

以往的研究中多用降水异常偏少作为表征干旱的指标, 且干旱具有发展速度慢、持续时间长、影响范围

广等特点<sup>[11]</sup>, 作为降水偏少的极端情况——无降水发生, 特别是持续长时间的无降水发生, 必然会造成极端干旱事件。因此从统计各地区不同季节无降水日数发生的频率, 即空雨频率的发生分布规律, 可以更好地从一个新的视角理解中国极端干旱的分布特征和发生规律。考虑到极端干旱发生的持续时间较长, 且可能存在跨季节的缓慢演变, 本文采用 Wang 和 An<sup>[12]</sup>提出的季节-经验正交函数分解(S-EOF)方法, 对空雨频率进行时空主模态特征分析, 探究我国不同区域、不同时间尺度极端干旱的变化特征, 并探究干旱异常的原因。

## 1 资料与方法

降水资料采用国家气象中心提供的站点日降水资料, 时间长度为 1980—2015 年。为保证资料的连续性和准确性, 剔除了大量缺测的站点, 最终选出 487 个站点。采用欧洲数据中心月平均再分析资料分析相关的大尺度环流特征, 包括 500 hPa 位势高度场、850 hPa 风场、1 000~

\* 基金项目: 国家自然科学基金项目(41575067; 41376008); 国家重大科学研究计划项目(2015CB953904)资助

Supported by the National Natural Science Foundation of China(41575067; 41376008); National Scientific Research of China (2015CB953904)

收稿日期: 2018-01-10; 修订日期: 2018-02-20

作者简介: 谭云霞(1991-), 女, 硕士生。E-mail: tanyunxia@stu.ouc.edu.cn

\*\* 通讯作者: E-mail: huangf@mail.ouc.edu.cn

100 hPa 垂直速度场,数据分辨率为  $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$ 。

本文将空雨频率作为极端干旱的指标,即无降水日的频率。空雨频率指标的建立:分别统计 1980—2014 年每年秋(+0,表示同年的秋季)、冬季(+0)、春季(+1,表示第二年春季)各季节的无降水日出现的天数,再除以该季节的总天数,即得到每年各季节的空雨频率。空雨频率的数值越大,表明极端干旱越强。

季节经验正交函数(S-EOF)分解方法是一种着重于季节演变的时空主模态分析方法,本文对全国 487 个站点空雨频率连续秋、冬、春三个季节的距平场进行 S-EOF 分解,得到中国极端干旱随三个季节演变的时空主模态特征,特别是可以抓住季节持续的极端干旱特征。采用 North 准则<sup>[13]</sup>检验 S-EOF 分解出来各模态的独立性;用 T 检验方法<sup>[14]</sup>检验要素相关场的显著性。

### 2 空雨频率的季节变化

从 1980—2014 年夏(JJA+0)、秋(SON+0)、冬

(DJF+0)、春(MAM+1)四个季节空雨频率的气候平均态(见图 1)来看,中国空雨频率的分布总体上表现为从南向北,从东南到西北逐渐增大的特征,但不同季节局部地区特征有所不同。夏季的空雨频率普遍偏低,只有在常年无降水的西北一带空雨频率才超过 0.7,东北、华中、华南地区的空雨频率大都在 0.6 之下,夏季高原东侧西南地区的西南涡为该地区带来频繁的降水,空雨频率最低,只有 0.2~0.4。秋、冬、春三个季节的空雨频率明显偏大,西北和内蒙地区甚至有的地方超过 0.9,呈现三季连旱型。随着时间的推移,夏季西南地区的空雨频率高值区东移。随着 5 月份夏季风的爆发,春季长江流域以南地区空雨频率显著减少。统计各季节空雨频率的区域均值分别为夏(0.58)、秋(0.74)、冬(0.80)、春(0.69),夏季的空雨频率明显低于其他三个季节,所以本文主要从秋、冬、春三个连续季节空雨频率的变化来分析中国极端干旱的变化。

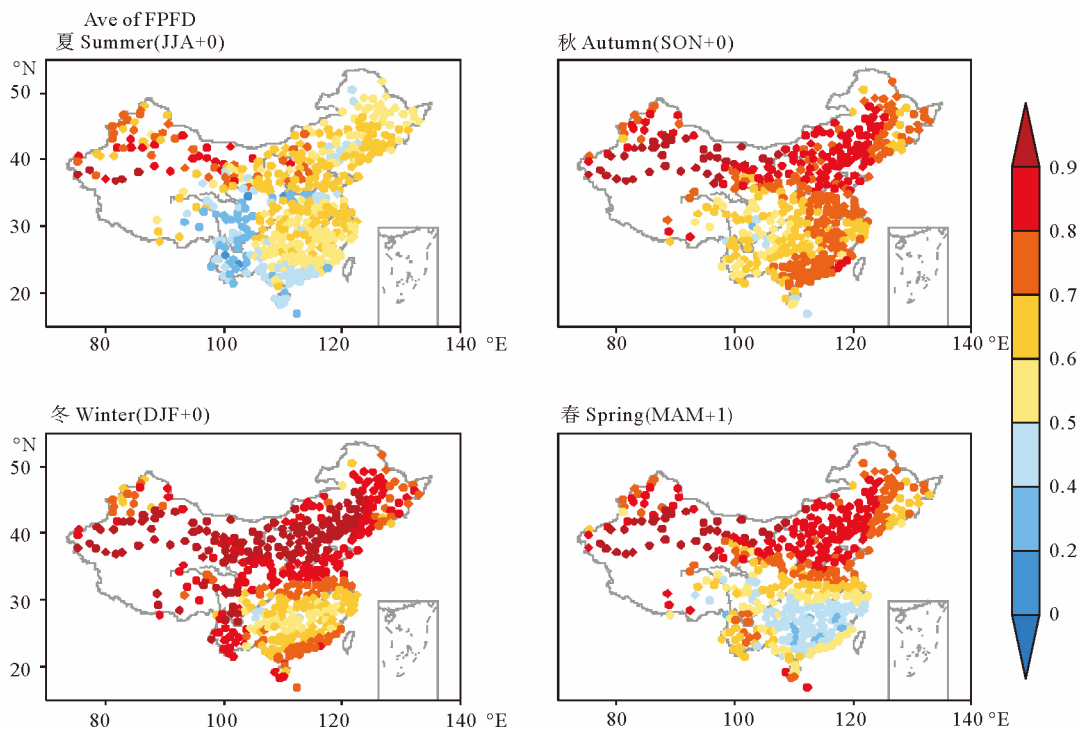


图 1 不同季节 1980—2014 多年气候平均的空雨频率分布

Fig. 1 Climatological mean of frequency of precipitation free day (FPFD) in Summer (JJA+0), Autumn (SON+0), Winter (DJF+0) and the next Spring (MAM+1)

### 3 空雨频率的时空主模态特征

#### 3.1 S-EOF 主模态的方差贡献及空间代表性

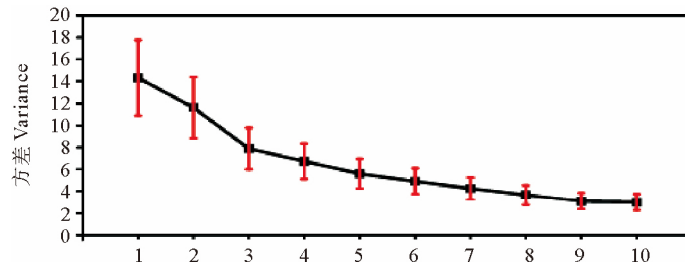
将 1980—2014 年秋(SON+0)、冬(DJF+0)、春(MAM+1)三个季节的空雨频率距平场进行 S-EOF 分解,通过 North 检验(见图 2(a))可以发现,前 10 个模态之间并不相互独立,反映出中国干旱分布的复杂性,不存

在非常显著的独立模态。但前四个模态与之后的模态的方差贡献率有较为明显的差异,前四个模态累积方差贡献为 40.6%,其中第一模态的方差贡献率为 14.3%,第二模态的方差贡献率为 11.6%,前两个模态之间方差贡献差异不大,表明这两个模态可能反映了同一年际年代际变化过程的不同位相特征。通过对模态物理意义的检验,第三模态(7.9%)和第四模态(6.7%)对空雨频率的

观测场具有很好的代表性,因此本文重点分析前四个主模态空雨频率变化的时空特征。

将前四个模态的主成分做加权平均,再与空雨频率观测场求相关(见图 2(b)),可以发现,对于全场 487 个站点,通过 95% 显著性检验的站点数分别为: 401(秋),470(冬),428(春)。由此可见,前四个模态可以较好地体现出我国 90% 以上的站点空雨频率异常分布特征,且显著相关的站点主要分布在华中、华南、华东等中国东部区域,表明前四个模态主要代表这些区域空雨频率的变化情况,而对西北、东北区域的代表性

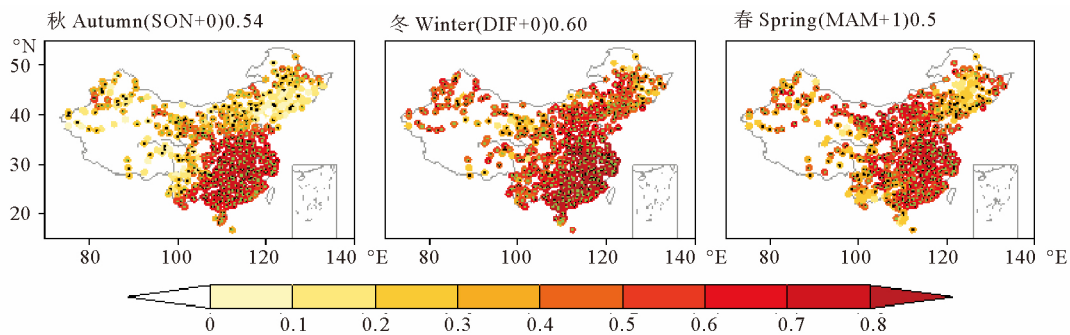
较差。三个季节相关系数的区域平均都超过 0.5,均通过了 99% 的显著性检验。秋季发生极端干旱的范围较集中;冬季发生极端干旱的范围最大,且前四个模态对冬季的代表性最好;对春季的代表性略差。空雨频率模态的空间分布场与观测数据的检测场进行空间相关分析(见表 1),第二模态对冬季的空间代表性略差(0.79),其他的各模态各季节的相关系数均大于或等于 0.87,说明前四个模态对空雨频率观测场具有很好的代表性。第一模态对冬季的代表性最好,空间相关系数达 0.98,具有高度一致性。



(误差棒表示抽样误差的标准差。Error bar represents the standard deviation of sampling error.)

图 2(a) 模态独立性检验-North 检验,前 10 个 S-EOF 模态解释的方差

Fig. (a) Variance contribution (%) of the first ten S-EOF modes with the independence of the modes test-North test



(黑点为过 95% 显著性检验的站,绿点为过 99% 显著性检验的站。0.54,0.60,0.51 分别为秋、冬、春 487 个站点相关系数均值。Black dot is as passing 95% significance level and green dot as 99%. 0.54,0.60,0.51 is spatial averaged correlation coefficient in autumn/winter/spring respectively.)

图 2(b) 前四个模态合成场( $\sum PC1-4 \times EOF1-4$ )与空雨频率异常场的相关场

Fig. (b) Correlation fields in autumn, winter and the next spring between modes1-4 combined field ( $\sum PC1-4 \times EOF1-4$ ) and frequency of FPPD

表 1 模态空间分布场(Mode)与模态物理意义检验场(Mode check)的空间相关系数

Table 1 Spatial correlation coefficients between the eigenvector of each mode of S-EOF and mode check patterns

	模态一 Mode 1	模态二 Mode 2	模态三 Mode 3	模态四 Mode 4
秋 Autumn(SON+0)	0.90	0.94	0.89	0.92
冬 Winter(DIF+0)	0.98	0.79	0.97	0.87
春 Spring(MAM+1)	0.90	0.90	0.93	0.87

### 3.2 三季连旱模态

对比图 3(b)和 3(c),模态检验过显著的区域主要分布在秋季的长江流域、冬季的华中华南地区、春季的

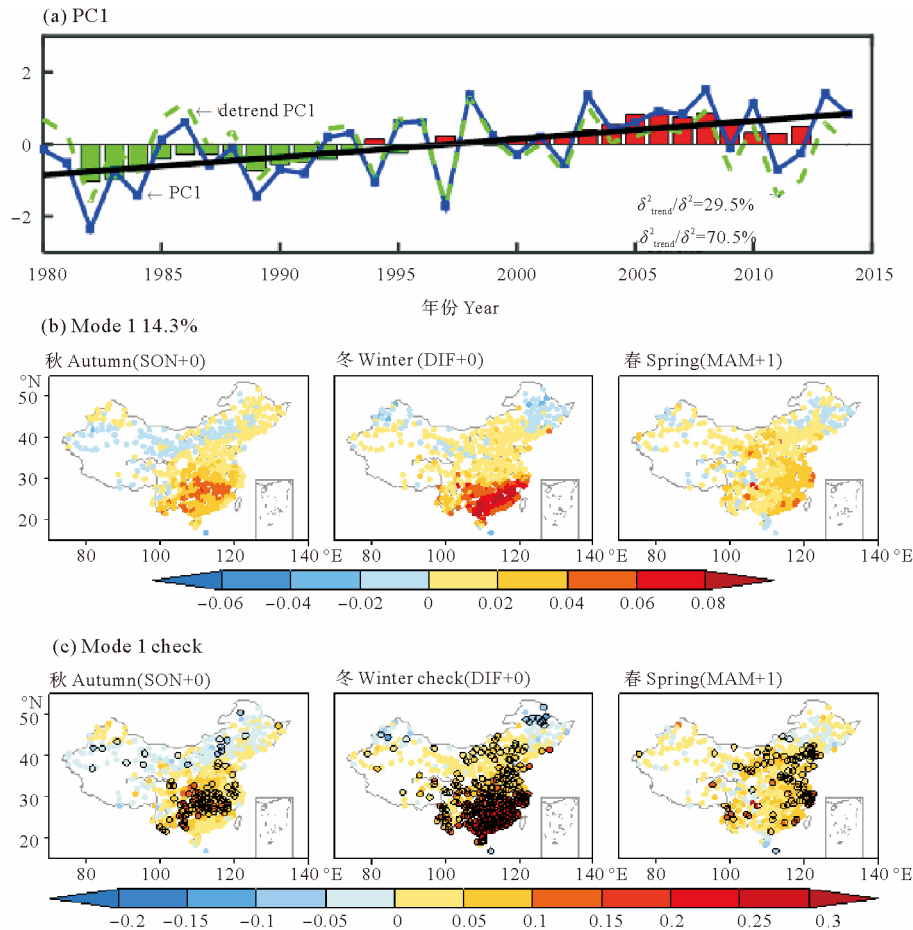
华中华北地区,表明第一模态主要表征出这些区域的空雨频率的变化。1980—2014 年我国秋、冬、春三个季节空雨频率的空间分布场基本呈现一致型的干旱分布特征,空雨频率高值区均分布在江南地区,冬季的极端干旱范围最大且强度最强,从秋季开始,一直持续到次年春季;时间序列(见图 3(a))呈现显著的振荡上升特征,在 1990s 中期存在显著的年代际转折,这可能与东亚季风的年代际减弱有关。其中线性趋势的方差贡献率为 29.5%,去趋势的年度变化方差贡献为 70.5%。综合时空特征看:秋、冬、春三个季节我国中南部和东部大部分地区均为空雨频率增多的变旱趋势,反映出三季连旱的特征,其中,华南沿海地区冬季变旱强度最

大,且从 1990s 中期开始显著加强。

### 3.3 秋-冬-春极端干旱反位相模态

由图 4(b)和 4(c)可知,第二模态对长江流域和华南地区的空雨频率代表性较好。空雨频率的空间分布最主要的特征表现为:秋季空雨频率强负异常与冬

春两季的正异常成明显的反位相分布状态。空雨频率三个季节变化最大的区域在长江流域,中心位于 30°N 附近。时间序列 PC2(见图 4(a))表现为年际年代际振荡,1980—1987 年和 2010—2014 年(前后阶段)多为正值,1988—2009 年(中间阶段)多为负值。综合时空变



(a) 标准化时间序列 PC1(蓝线),黑线是 PC1 的线性趋势,绿色虚线为去趋势的 PC1,柱状图为 5 年滑动平均的 PC1;(b) 空间分布型;(c) 对第一模态的检验,即 PC1 的 5 个大值年份与小值年份空雨频率的合成差值场,圆圈表示超过 95% 的显著性检验的站点。(a) The standardized time series principal component of the first mode (PC1). Blue line is PC1; Black line is the trend of PC1; Green line is the detrended PC1; Bar is five-years running mean of PC1. (b) Spatial pattern. (c) Composite difference fields of FPDF in different seasons between 5 maximum years and 5 minimum years of PC1. Black circle represents significant at the 95% confidence level.)

图 3 空雨频率异常场 S-EOF 分解的第一模态

Fig. 3 The first mode of S-EOF on anomaly FPDF

化看:前后两个年代际变化阶段(1987 年之前和 2010 年之后)江淮地区秋雨较强,空雨频率减少,冬春两季转为空雨频率增多、极端干旱增加的特征,春季华南沿海则干旱略有减轻。中间阶段的极端干旱特征则与前后阶段变化相反,呈现出秋季江淮地区变旱而冬春季干旱减轻的反位相变化特征。

### 3.4 冬-春极端干旱反位相模态

第三模态(见图 5)主要为秋冬季与春季的空雨频率的反位相变化,对冬季和次年春季的代表性较好,对秋季的代表性略差。秋冬两季空雨频率的空间分布场为以长江流域为中心的极端变旱,冬季长江流域的中

下游变旱最强。春季空雨频率出现显著的反相变化,表现为以长江流域为中心的空雨频率的减少,降水频繁。从时间序列来看,1980—1998 年,空雨频率主要在正值区振荡,1998 年之后,PC3 出现了明显的年代际转折,主要在负值区振荡。综合时空变化看:1980—1998 年,秋、冬季节以长江流域为中心,华中、华南地区表现为极端干旱异常,东北、西南地区为空雨频率偏低的多降水区域;春季空雨频率异常偏低,降水频繁。1999—2014 年,整体呈现反向变化,充分体现出我国位于东亚季风区干旱和降水的复杂性。



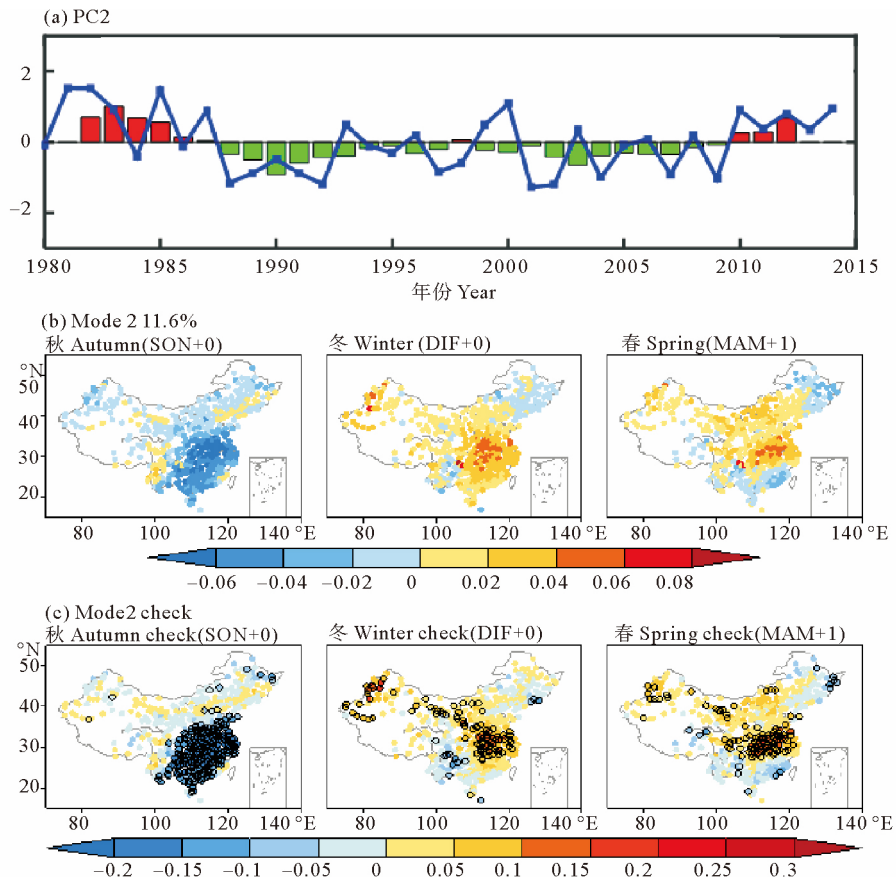


图 4 同图 3, 但为第二模态的空雨频率时空变化

Fig. 4 Same as in figure 3, but for the second mode

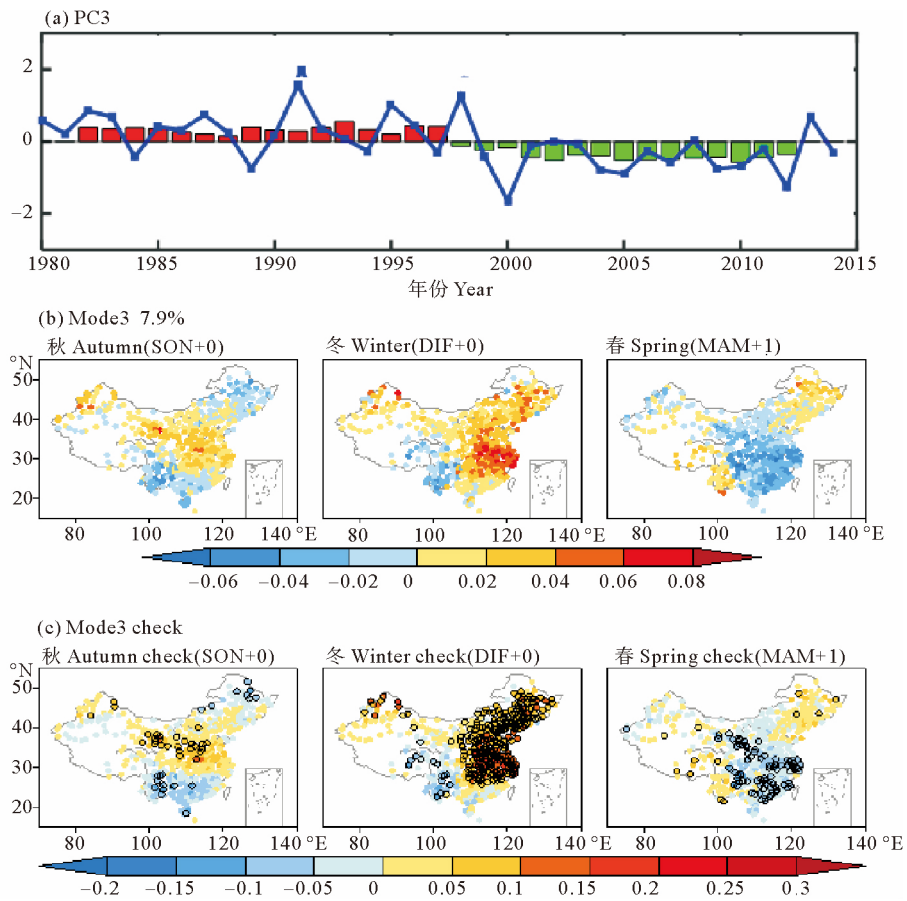


图 5 同图 3, 但为第三模态的空雨频率时空变化

Fig. 5 Same as in figure 3 but for the third mode

### 3.4 南北偶极型秋-冬-春反位相模态

第四模态(见图 6)主要表现为华中、华南空雨频率的反向变化,对秋季和春季的代表性较好,也可以体现出冬季西南地区的极端干旱异常。分析空雨频率的空

间分布场(见图 6(b))可以发现,秋季长江流域以南与长江流域以北呈现反位相变化,华南沿海地区秋季空雨频率的负异常与冬春两季华南沿海正异常的呈现反向变化。时间序列 PC4 则呈现不规律的年际振荡。

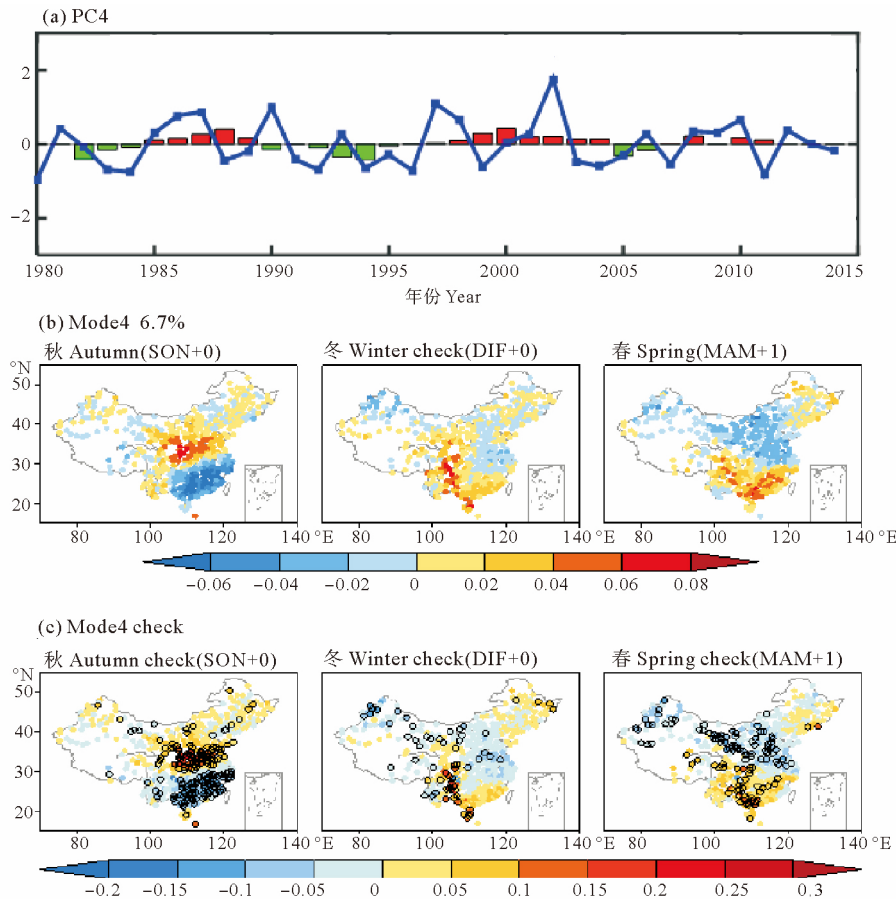


图 6 同图 3, 但为第四模态的空雨频率时空变化  
Fig. 6 Same as in figure 3 but for the fourth mode

## 4 结论

本文以空雨频率作为极端干旱指标,选取了我国 487 个站点,对 1980—2014 年秋(SON+0)、冬(DJF+0)、春(MAM+1)三个季节的空雨频率进行 S-EOF 分解,并对空雨频率的时空变化进行探究,得出以下主要结论:

- (1) 前四个模态为 S-EOF 分解的主模态,累积方差贡献为 40.6%,能体现出我国 90% 站点空雨频率的异常分布。前四个模态对空雨频率观测场的变化有很高的时空代表性,主要代表华中、华南和华东等大部分地区空雨频率的变化情况。
- (2) 方差贡献最大的是三季连旱模态,表明我国空雨频率呈现显著的上升趋势,华中、华南大部分地区为变旱异常,异常大值区位于 25°N 附近。三季连旱模态对冬季空雨频率的变化代表性最好,冬季华南沿海地区的变旱强度最大。
- (3) 秋-冬-春反位相变化模态主要代表了长江流域和华南地区的空雨频率时空变化。秋季空雨频率异常偏

少、冬春季异常偏多,出现明显的季节反差。异常区域位于 30°N 附近。空雨频率变化存在弱的年代际振荡。

(4) 冬-春反位相年代际转型模态对冬春两季的代表性较好。秋冬两季空雨频率的空间分布为以长江流域为中心的极端变旱,冬季长江流域的中下游变旱最强,春季空雨频率呈现反位相变化。时间序列表现为以 1998 年为界,1980—1998 年和 1998 年之后空雨频率明显的年代际转折。

华南华北反位相模态对秋季和春季的代表性较好,也可以体现出冬季西南地区的极端干旱异常。三个季节中,长江流域以南与长江流域以北空雨频率均为反位相变化。

本文在降水资料的选取时,剔除了大量缺测的站点,最终选出 487 个站点资料,站点数量相对较少;选取的前四个主模态,主要体现华中、华南等部分地区的空雨频率变化情况,对西北、东北地区的代表性略差,因此本文的研究主要反映了中国中东部地区极端干旱的时空分布特征。

## 参考文献:

- [1] Zhang Q, Chen L H, Wang R Y, et al. Climate change and food, food safety in Northwest China[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2012, 30(4): 509-513.
- [2] 顾颖, 刘静楠, 林锦. 近60年来我国干旱灾害情势和特点分析[J]. *水利水电技术*, 2010, 41(1): 71-74.  
Gu J, Liu J N, Lin J. Analysis on characteristics and situation of drought disasters during past 60 years in China[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2010, 41(1): 71-74.
- [3] 李茂松, 李森, 李育慧. 中国近50年来旱灾灾情分析[J]. *中国农业气象*, 2003, 24(1): 7-10.  
Li S M, Li S, Li Y H. Studies on drought in the past 50 years in China[J]. *Chinese Journal of Agrometeorology*, 2003, 24(1): 7-10.
- [4] Dai A G. Drought under global warming: A review[J]. *WIREs Climatic Change*, 2011, 2: 45-65.
- [5] Zhang X B, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. *Scientific Reports*, 2007, 448:461-465. doi: 10.1038/nature06025.
- [6] Wu Y P, Feng G L, Li B L. Interactions of multiple atmospheric circulation drive the drought in Tarim River Basin[J]. *Nature*, 2016, 6: 26470, doi: 10.1038/srep26470.
- [7] 邹旭恺, 任国玉, 张强. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究[J]. *气候与环境研究*, 2010, 15(4): 371-378.  
Zou X K, Ren G Y, Zhang Q. A study of the characteristics of the cluster extreme events in China[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2010, 15(4): 371-378.
- [8] Wang L Y, Yuan X, Xie Z H, et al. Increasing flash droughts over China during the recent global warming hiatus[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 30571. doi: 10.1038/srep30571.
- [9] Wang H J. The weakening of the Asian monsoon circulation after the end of 1970's[J]. *Adv Atmos Sci*, 2001, 18(3): 376-386.
- [10] 房世波, 齐月, 韩国军. 1961-2010年中国主要麦区冬春气象干旱趋势及其可能影响[J]. *中国农业科学*, 2014, 47(9): 1754-1763.  
Fand S B, Qi Y, Han G J. Meteorological drought trend in winter and spring from 1961 to 2010 and its possible impacts on wheat in wheat planting[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2014, 47(9): 1754-1763.
- [11] 张强, 张良, 崔显成. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. *地球科学进展*, 2011, 26(7): 763-778.  
Zhang Q, Zhang L, Cui X C. Progresses and challenges in drought assessment and monitoring[J]. *Advances in Earth Science*, 2011, 26(7): 763-778.
- [12] Wang B, An S. A method for detecting season-dependent modes of climate variability: S-EOF analysis[J]. *Geophysical Research Letter*, 2005, 32, L15710, doi: 10.1029/2005GL022709
- [13] North G R, Bell T L, Cahalan R F, et al. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions[J]. *Mon Weather Rev*, 1982, 110: 699-706.
- [14] 黄嘉佑. 气象要素场的显著性检验[J]. *气象*, 1989, 15(4): 3-8.  
Huang J Y. The significant test for meteorological element field[J]. *Meteorology*, 1989, 15(4): 3-8.

## Extreme Drought in China—Spatial and Temporal Characteristics of Frequency of Precipitation Free Day

TAN Yun-Xia<sup>1</sup>, HUANG Fei<sup>1,2</sup>, XU Shi-Bin<sup>1</sup>, WANG Hong<sup>1</sup>

(1. Physical Oceanography Laboratory, CIMST, Ocean University of China, Qingdao National Laboratory for Marine Science and Technology, Qingdao 266100, China; 2. Ningbo Collaborative Innovation Center of Nonlinear Hazard System of Ocean and Atmosphere, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** Based daily precipitation data at 487 observatory stations in China during 1980—2014 obtained from the National Meteorological Center, extreme drought variations in China in consequent seasons—autumn (SON+0)、winter(DJF+0)、spring(MAM+1) are explored. Frequency of precipitation free day (FPFD) is defined as an extreme drought index. The top four modes are leading modes of FPFD and on behalf of variation of nine-tenths observations in China. Representative sites mostly distribute in the central, southern and eastern China. Results show that the first mode appears coincident extreme drought in three seasons. Most areas in China become abnormal drought. Winter drought in the south China is of the biggest intensity. The second mode showed out-of-phase extreme drought patterns in autumn and winter-spring with weak decadal oscillation. The third mode mostly represents the distribution of FPFD in winter and spring, showing an opposite spatial pattern around the Yangtze River in winter and spring. This mode also appeared an obvious interdecadal shift in 1998. The fourth mode shows a dipole distribution in southern and northern China in the three seasons. Different modes can reflect the different variations of FPFD, which fully shows the complexity of extreme drought in China.

**Key words:** frequency of precipitation free day; extreme drought; S-EOF; continuous drought; seasonal phase variation

责任编辑 庞 旻