

邹旭恺, 任国玉, 张强. 2010. 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, 15 (4): 371-378. Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. 2010. Droughts variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (4): 371-378.

基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究

邹旭恺 任国玉 张强

中国气象局气候研究开放实验室, 国家气候中心, 北京 100081

摘要 基于中国 606 个地面台站 1951~2008 年的逐日降水量和气温资料, 采用综合气象干旱指数 CI 统计分析了中国全国及十大江河流域近 60 年的干旱变化趋势。结果表明, 近 60 年来, 从整体来看, 中国干旱面积呈现出弱的增加趋势。干旱持续时间长的几个中心分别位于北方的辽河流域西部、黄河流域东部、海河流域、西南诸河流域东南部等地, 最长持续时间可达 4 个月以上; 北方江河流域干旱面积一般表现出增加趋势, 其中松花江流域、辽河流域、海河流域干旱面积出现显著的增加趋势, 辽河流域、海河流域、黄河流域在 20 世纪 90 年代中后期至 21 世纪前期连续数年出现大范围干旱, 南方大多数江河流域干旱面积的变化趋势不明显, 只有西南诸河流域有显著的减少趋势。

关键词 综合气象干旱指数 CI 江河流域 干旱面积 气候趋势 中国

文章编号 1006-9585 (2010) 04-0371-08 **中图分类号** P429 **文献标识码** A

Droughts Variations in China Based on a Compound Index of Meteorological Drought

ZOU Xukai, REN Guoyu, and ZHANG Qiang

Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081

Abstract Based on the calculation results of a Compound Index (CI) of meteorological drought, the variations in drought conditions for ten major river basins and China as a whole are investigated. In recent 60 years, a weak increasing trend of drought areas is found for the entire country. Most northern river basins of China experience upward trends of drought areas, with significant trends being found in the Songhuajiang River basin, the Liaohe River basin, and the Haihe River basin. Severe and prolonged droughts occurred in the areas of Liaohe River, Haihe River, and Yellow River basins during the periods from the late 1990s to the early 2000s. There are no significant long-term upward or downward trends in drought areas in most river basins of southern China, except for the southwestern rivers basin where a significant decreasing trend can be detected.

Key words compound index (CI) of meteorological drought, river basin, drought area, trend, China

收稿日期 2010-01-11 收到, 2010-03-19 收到修定稿

资助项目 国家科技支撑项目 2007BAC29B02 和公益性行业科研专项 200801001

作者简介 邹旭恺, 女, 1973 年出生, 高级工程师, 从事干旱指标研究、极端事件监测等工作。E-mail: zxk@cma.gov.cn

1 引言

干旱类型通常被分为气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱。其中气象干旱的发生是最直接和最频繁的,也是其他类型干旱发生发展的基础。气象干旱指数是气象干旱监测与研究的核心。随着全球陆地和各国对干旱的脆弱性增加,为降低干旱灾害影响的风险,迫切需要加强建立在气象干旱指数基础上的区域干旱变化研究和监测(Wilhite, 2006)。

国内外学者发展了众多的气象干旱指数,用以研究和监测干旱的变化。在我国,已发展和应用的气象干旱指数种类非常多,其中Z指数(王志伟和翟盘茂, 2003; 王志伟等, 2005)、Palmer指数(安顺清和邢久星, 1986; 卫捷等, 2003; 刘巍巍等, 2004; 王越等, 2007)、湿润度和干燥度指数(马柱国和符淙斌, 2006; 马柱国, 2007)、连续无有效降水日数(刘莉红等, 2008)等在气象干旱监测业务和研究中都得到了广泛的应用。近些年来,不少学者基于不同的气象干旱指数对我国的干旱变化进行了研究。这些研究表明,近半个多世纪以来,我国东北和华北地区干旱化趋势明显(张庆云等, 2003; Zou et al., 2005; 马柱国, 2007),而西北地区有变湿的趋势(王绍武等, 2002; 施雅风等, 2002)。这些分析结论与直接利用降水资料获得的研究结果具有良好的可比性(陈峪等, 2005; 任国玉, 2007),说明降水量变化是造成我国区域尺度干旱变化的主要因素。

20世纪70年代后期以来,我国华北和东北等地区的持续干旱产生了严重影响。一些主要河流断流事件频繁发生,不仅使流域水资源的供需矛盾加剧,还对流域的生态与环境带来严重的影响(李政海等, 2007)。长期的严重干旱对我国干旱气候变化监测和研究提出了更高的要求。科学界需要了解全国及其各个流域或地区气象干旱发展的历史和现状,探索干旱形成的原因和未来可能发展趋势,以便为制定相关适应政策提供科技支撑。

本文介绍最近发展的综合气象干旱指数CI(Compound Index),并应用该指数计算分析全国

及十大江河流域近60年的干旱气候变化特征。

2 资料与方法

研究所用资料包括中国地面606个地面台站1951~2008年的逐日降水量和平均气温资料,大部分站点属于国家基准站和基本站,个别为一般气象站。资料由中国气象局国家气象信息中心提供,经过了较严格的质量检验。台站变迁、仪器变化、观测方法改变等造成的日气候资料非均一性还没有经过订正,但对于资料缺测情况本研究做如下规定:月内逐日资料缺测达5日的,该月资料定为缺测;1年中有1个月缺测时,该年年值为缺测;资料时间序列应包括气候平均场(1971~2000年),时间长度至少为40年。原始资料库中共包含731个台站,本文剔除了不满足上述条件的125个站点的资料,最终选取了606个站点,剔除站点数占总站点数的17%。

选取的606个地面观测台站覆盖了中国大陆的绝大部分地区,西部特别是青藏高原站点比较稀疏(图1)。在本文选取的资料集中,20世纪50年代初期站点数量较少,仅有150~350个左右,而且空间分布不均,西部地区除了新疆有少量台站外,其他地区记录很少;50年代中期以后观测站点数迅速增加,西部的站点也逐渐增多,至50年代末中国西部所有省区都有了观测站;60年代以后资料站点数均在600个以上,各年的站点数量变化不大。

经过上述质量控制后的资料集时间序列较长,覆盖率较高,具有较好的代表性和可靠性。

本文分别讨论松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域、长江流域、东南诸河流域、珠江流域、西南诸河流域、西北诸河流域十个地区近半个世纪干旱的变化特征。十大流域边界采用全国水资源综合规划推荐的一级流域界线(任国玉, 2007)。在讨论各区域的干旱长期变化时,采用了格点化和面积加权的计算方法,在一定程度上有助于增加区域平均时间序列的可靠性(Jones and Hulme, 1996)。

本文采用综合气象干旱指数CI来计算分析中国全国和各个流域的干旱状况。CI指数是以标准化降水指数、湿润度指数及近期降水量为基础的

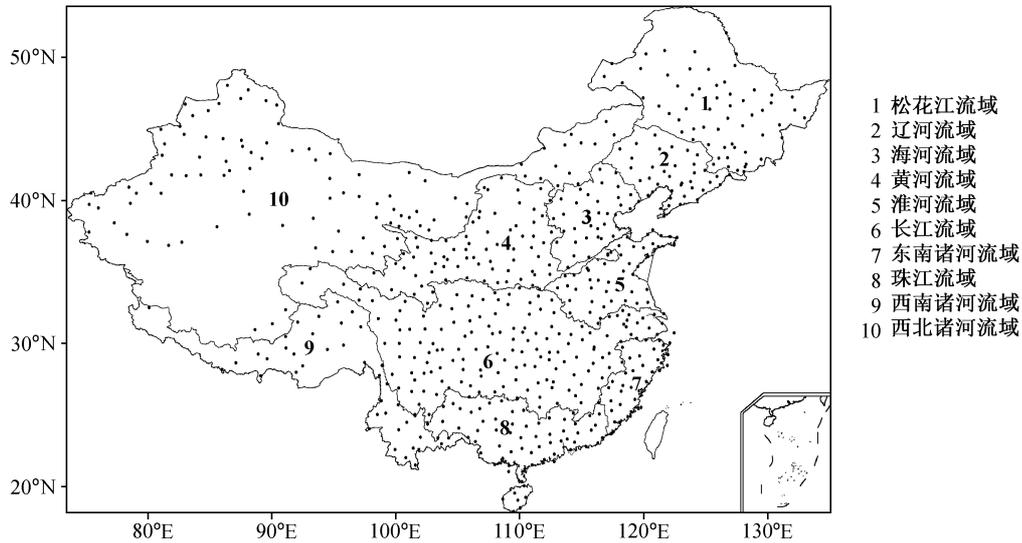


图 1 全国 606 个地面观测站及十大流域分布示意图

Fig. 1 Locations of the 606 meteorological stations and the ten major river basins in China

设计的，它同时考虑了降水和潜在蒸散两项因子，与单纯利用降水量的干旱指标相比更具有优越性。CI 指数的具体计算方法请见国家标准《气象干旱等级 GB/T20481-2006》（张强等，2006），其等级划分如表 1。

表 1 综合气象干旱指数 CI 的等级划分

Table 1 Classification of the compound meteorological drought index CI

等级	类型	CI 值
1	无旱	$-0.6 < CI$
2	轻旱	$-1.2 < CI \leq -0.6$
3	中旱	$-1.8 < CI \leq -1.2$
4	重旱	$-2.4 < CI \leq -1.8$
5	特旱	$CI \leq -2.4$

按照国家标准《气象干旱等级 GB/T20481-2006》中的规定，综合气象干旱指数 CI 连续 10 天或以上达到轻旱等级以上统计为一次干旱过程。干旱过程的开始日为第 1 天 CI 指数达轻旱或轻旱以上等级的日期。在干旱发生期，当综合干旱指数 CI 连续 10 天为无旱等级时干旱解除，同时干旱过程结束，结束日期为最后 1 次 CI 指数达轻旱等级的日期。干旱过程开始到结束期间的时间为干旱持续时间。

另外，本研究采用估算干旱面积的方法来分折近 60 年我国的干旱变化特征。在计算干旱影响

范围时，先将干旱指数值的站点资料格点化，转化为对应的 $2^\circ \times 2^\circ$ 的格点资料，计算干旱影响范围时，按照 $CI \leq -0.6$ 为出现干旱的区域。每个 $CI \leq -0.6$ 格点覆盖的面积近似为：

$$S_i = x \times y \times 110.0 \times 111.0 \times \cos\phi_i, \quad (1)$$

其中， x 和 y 分别为经度和纬度格矩， 110.0×111.0 为赤道地区 $1^\circ \times 1^\circ$ 网格的近似面积， $\cos\phi_i$ 是对纬度的订正，则第 j 年 n 个格点的总面积 S 为

$$S_j = \sum_{i=1}^n S_{ij}. \quad (2)$$

然后对发生干旱的格点按公式 (1)、(2) 统计面积，以此表示干旱影响范围的大小。考虑到干旱资料为地面站点资料，在沙漠和青藏高原高寒地区站点分布稀少，会造成部分格点资料无有效值。为了减少因此带来的误差，将估算的格点面积又转化为其占有效格点面积的百分率。计算第 j 年有效观测区格点的覆盖面积为 S_{N_j} ， $CI \leq -0.6$ 的出现干旱的格点的覆盖面积为 S_j ，则第 j 年的干旱面积百分率 S_{S_j} 为：

$$S_{S_j} = \frac{S_j}{S_{N_j}} \times 100\%. \quad (3)$$

3 中国及十大江河流域干旱变化

3.1 全国干旱的长期变化

图 2 显示了基于 CI 指数统计的中国全国干旱

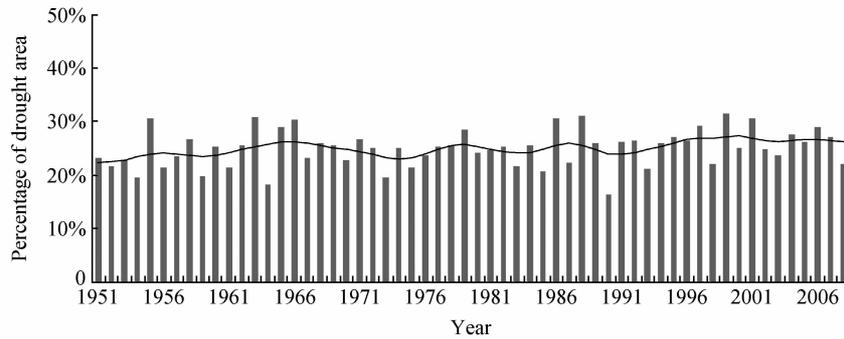


图2 全国年干旱面积百分率历年变化图(1951~2008年), 曲线为11点二项式滑动

Fig. 2 Time series of annual percentage areas in drought conditions over the entire China during 1951-2008, the smooth curve is generated using an 11-point binomial filter

面积百分率的历年变化。从年代际变化看,在近半个多世纪中,我国干旱较重的时期主要出现在20世纪60年代、70年代后期至80年代前期、80年代中后期以及90年代后期至21世纪初。其中最为严重的干旱出现在1999年,干旱面积达到31.5%。根据 Kendall's tau 的趋势计算(Wang and Swail, 2001)结果分析,就整体而言,全国干旱面积在近58年中有增加趋势,趋势值为 $0.66 (10 a)^{-1}$ (表2),通过了95%置信限的显著性水平检验。

表2 1951~2008年全国及十大江河流域干旱面积百分率变化趋势

Table 2 Trends of drought area in the ten river basins of China and the entire country during 1951-2008

地区	变化趋势/ $(10 a)^{-1}$
全国	0.66 *
松花江流域	1.91 *
辽河流域	2.61 *
海河流域	3.24 *
黄河流域	0.72
淮河流域	1.22
长江流域	0.38
东南诸河流域	0.63
珠江流域	0.68
西南诸河流域	-1.25 *
西北诸河流域	0.15

* 表示通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平。

3.2 十大江河流域干旱的长期变化

图3是中国各站点1951~2008年CI指数的

长期趋势。从分布上看,北方诸河流域中,松花江流域、辽河流域、海河流域、黄河流域、淮河流域的大部分站点都呈干旱化趋势,其中不少站点干旱化趋势显著。南方诸河流域中,长江流域大部分站点干旱没有显著增加或减少的趋势,东南诸河流域和珠江流域大部分站点干旱呈增加趋势,但大多没有通过显著性检验,西南诸河流域中东部站点干旱多呈增加趋势,西部站点干旱多呈减弱趋势,且通过了显著性检验。下文从各流域区域干旱面积变化详细讨论各地的干旱长期变化特征。

松花江流域:近50多年来,松花江流域的干旱面积变化呈现出逐渐增加的态势 [$1.91\% (10 a)^{-1}$](见图4和表2),通过了95%置信限的信度水平检验。干旱范围最大的为2001年,达43.3%,其次为2007年和1967年,分别为37.3%和36.7%。从年代际变化看,20世纪70年代中后期和90年代以后都是干旱范围较大的时期。

辽河流域:辽河流域在近半个多世纪干旱面积表现出显著的增加趋势 [$2.61\% (10 a)^{-1}$],其中干旱范围最大的前5名分别为2001年(54.8%)、1982年(50.1%)、1999年(48.5%)、1989年(45.7%)和1988年(43.6%),均出现在20世纪80年代以后。特别是1997年、1999~2002年,辽河流域连续数年干旱面积超过40%,为历史罕见。

海河流域:海河流域的干旱面积在近50多年来呈现出显著的增加趋势 [$3.24\% (10 a)^{-1}$],增加趋势之大为各区域之首,干旱面积最大出现在1999年(61.1%),其次为1965年(60.9%)。从

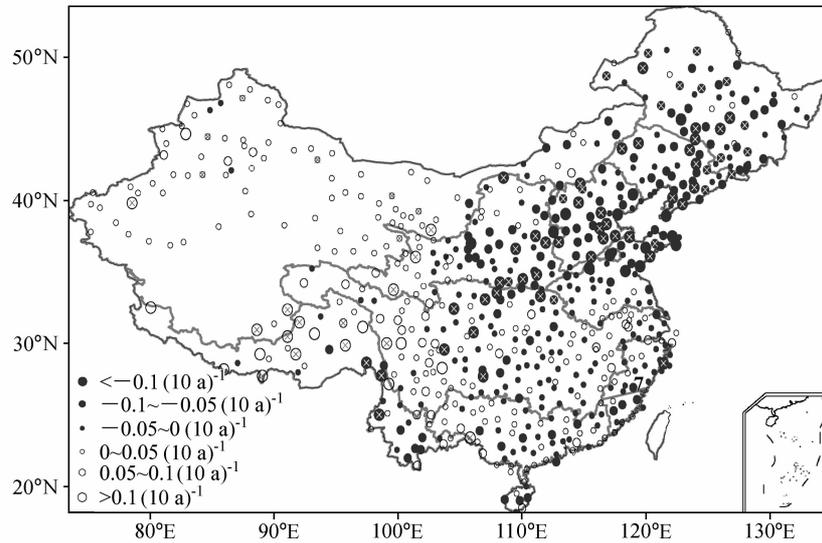


图3 1951~2008年年干旱指数CI变化趋势的空间分布，叉号表示通过0.05显著性水平检验

Fig. 3 Trends in annual values of drought index CI during 1951-2008, cross symbols are statistically significant at 0.05 significance level

年代际变化看(图4), 20世纪90年代为海河流域干旱范围最大的时期, 平均干旱面积达 $44.6\% a^{-1}$ 。20世纪90年代后期至21世纪初的几年, 海河流域也出现了罕见的连年大范围干旱。

黄河流域:近50多年来, 黄河流域的干旱面积有增加趋势 [$0.72\% (10 a)^{-1}$], 但没有通过显著性检验, 其中干旱面积最大出现在1999年(45.5%), 其次为1965年(41.8%)。20世纪90年代中后期至2002年, 黄河流域连续出现大范围干旱。

淮河流域:淮河流域的干旱面积有 $1.22\% (10 a)^{-1}$ 的增加趋势, 但趋势没有达到显著性检验。淮河流域干旱面积的年际变化差异较大, 干旱面积最大出现在1988年, 达58.9%, 其次为2001年, 52.9%; 干旱面积最少年出现在2003年, 仅为6.9%。

长江流域:长江流域的干旱面积在近50多年来有弱的增加趋势 [$0.38\% (10 a)^{-1}$], 但没有通过显著性检验, 其中最大值出现在1988年(34.5%)和1966年(34.1%)。从全流域平均情况看, 长江流域历年干旱面积基本上围绕多年平均值波动, 趋势不明显。从上游和中下游情况看(以宜昌为界, 其西为上游, 以东为中下游), 长江上游干旱面积的年际变化幅度也不大, 但长江中下游干旱面积年际变化起伏大(图略), 其

中最大值出现在1978年, 达37.3%, 最小值出现在1975年, 仅有4.8%。长江上游和中下游的干旱面积均没有显著的增加或减少的趋势存在。

东南诸河流域:东南诸河流域近50多年干旱面积没有明显的趋势存在 [$0.63\% (10 a)^{-1}$], 其中最大值出现在2003年(41.8%), 其次为1963年(41.5%)。

珠江流域:珠江流域的干旱面积也没有明显的趋势存在 [$0.68\% (10 a)^{-1}$], 其中最大值出现在1963年(52.0%), 其次为1989年(42.2%)。

西南诸河流域:与我国其他江河流域不同, 近58年来, 西南诸河流域的干旱面积表现出显著的减少趋势 [$-1.25\% (10 a)^{-1}$], 其中最大值出现在1969年(48.6%), 最小值出现在2000年(20.7%)。

西北诸河流域:西北诸河流域的干旱面积没有明显的增加或减少的趋势存在 [$0.15\% (10 a)^{-1}$], 其中最大值出现在1965年(14.9%)。

从1951~2008年间干旱过程最长持续时间分布上看(图略), 干旱持续时间长的几个中心分别位于辽河流域西部、黄河流域东部、海河流域、西南诸河流域东南部等地, 最长持续时间一般有4个月以上。另外, 黄河流域大部、淮河流域、西南诸河流域大部、珠江流域南部等地干旱

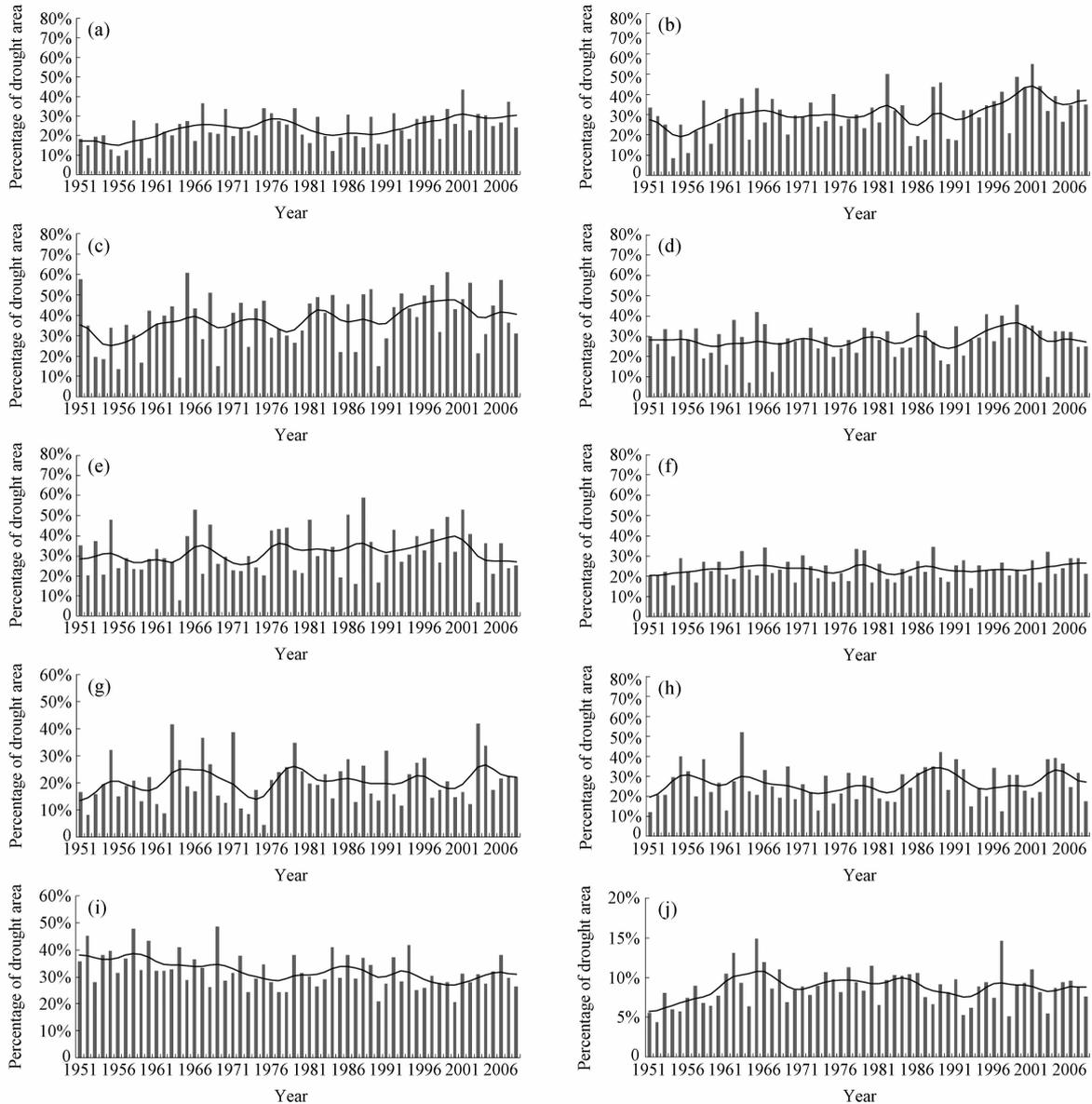


图4 中国十大江河流域年干旱面积百分率历年变化图(1951~2008年): (a) 松花江流域; (b) 辽河流域; (c) 海河流域; (d) 黄河流域; (e) 淮河流域; (f) 长江流域; (g) 东南诸河流域; (h) 珠江流域; (i) 西南诸河流域; (j) 西北诸河流域。曲线为11点二项式滑动
Fig. 4 Time series of annual percentage areas in drought conditions over the ten major river basins in China during 1951–2008; (a) The Songhuajiang River basin; (b) the Liaohe River basin; (c) the Haihe River basin; (d) the Yellow River basin; (e) the Huai River basin; (f) the Yangtze River basin; (g) the Southeastern Rivers basin; (h) the Zhujiang River basin; (i) the Southwestern Rivers basin; (j) the Northwestern Rivers Basin. The smooth curve is generated using an 11-point binomial filter

最长持续时间一般也有3个月左右,可见这些地区干旱灾害之严重。另外,从最长干旱过程出现年代看,在松花江流域、辽河流域、海河流域、淮河流域北部、黄河流域东部和南部、长江流域中西部、珠江流域北部等地在近60年中持续时间最长的干旱事件多发生在1980年以后的20多年中。

4 小结与讨论

利用综合气象干旱指数(CI)和国家级气象台站地面气温和降水观测记录,对我国全国和十大江河流域的干旱气候变化进行了分析,得到以下结果:

(1) 从近 60 年的资料分析来看, 全国干旱持续时间长的几个中心分别位于北方的辽河流域西部、黄河流域东部、海河流域、西南诸河流域东南部等地, 最长持续时间一般有 4 个月以上;

(2) 北方江河流域除西北诸河流域外, 普遍有干旱面积增加的变化趋势, 其中海河流域、辽河流域和松花江流域干旱化趋势显著, 趋势值分别达到 $3.24\% (10 a)^{-1}$ 、 $2.61\% (10 a)^{-1}$ 和 $1.91\% (10 a)^{-1}$; 南方大多数江河流域的干旱面积没有明显的增加或减少的趋势, 仅西南诸河流域的干旱面积有显著减少的趋势, 趋势值为 $-1.25\% (10 a)^{-1}$;

(3) 从整体来看, 近 60 余年中国干旱面积呈现出弱的增加趋势。

综合气象干旱指数 CI 同时考虑了降水和蒸发能力因子, 与单纯利用降水量的干旱指数比较具有较大的优越性, 蒸发能力的计算也比较简便。但造成干旱的因子十分复杂, 采用 Thornthwaite 方法计算蒸发能力仍有一定局限, 需要今后不断改进。同时, 中国 20 世纪 50 年代早中期的观测资料主要集中在东部, 对于分析长期气象干旱变化趋势可能会有一定影响。但是, 本文得到的全国和各个流域气象干旱长期变化趋势与前人根据降水量和其他干旱指数变化分析获得的结果基本相近 (任国玉等, 2000; 王志伟和翟盘茂, 2003; Zou et al., 2005; 马柱国和符淙斌, 2006; 任国玉, 2007), 说明上述结论具有比较高的可信度。综合气象干旱指数可以用于气象干旱监测业务和干旱变化研究。本文分析结果也可作为相关部门制定减缓和适应干旱灾害的科学依据。

参考文献 (References)

安顺清, 邢久星. 1986. 帕默尔旱度模式的修正 [J]. 气象科学研究所院刊, 1 (1): 75-81. An Shunqing, Xing Jiuxing. 1986. A modified of Palmer's drought index [J]. Journal of Academy of Meteorological (in Chinese), 1 (1): 75-81.

陈峪, 高歌, 任国玉, 等. 2005. 中国十大流域近 40 多年降水量的时空变化特征 [J]. 自然资源学报, 20 (5): 637-643. Chen Yu, Gao Ge, Ren Guoyu, et al. 2005. Spatial and temporal variation of precipitation over ten major basins in China between 1956 and 2000 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 20 (5): 637-643.

Jones P D, Hulme M. 1996. Calculating regional climatic time series for temperature and precipitation: methods and illustrations [J]. Int. J. Climate, 16: 361-377.

李政海, 王海梅, 韩国栋, 等. 2007. 黄河下游断流研究进展 [J]. 生态环境, 16 (2): 686-690. Li Zhenghai, Wang Haimei, Han Guodong, et al. 2007. Review on the flow-break in the lower reaches of Yellow River [J]. Ecology and Environment (in Chinese), 16 (2): 686-690.

刘莉红, 翟盘茂, 郑祖光. 2008. 中国北方夏半年最长连续无降水日数的变化特征 [J]. 气象学报, 66 (3): 474-477. Liu Lihong, Zhai Panmao, Zheng Zuguang. 2008. Variations in longest consecutive dry days in warm half year over northern China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 66 (3): 474-477.

刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 等. 2004. 帕默尔旱度模式的进一步修正 [J]. 应用气象学报, 15 (2): 207-215. Liu Weiwei, An Shunqing, Liu Gengshan, et al. 2004. The farther modification of Palmer drought severity model [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 15 (2): 207-215.

马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. 科学通报, 51 (20): 2429-2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Characteristics of aridification over northern China during 1951-2004 [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 51 (20): 2429-2439.

马柱国. 2007. 华北干旱化趋势及转折性变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 科学通报, 52 (10): 1199-1206. Ma Zhuguo. 2007. The aridification over North China associated with the Pacific decadal oscillation [J]. Chinese Science Bulletin (in Chinese), 52 (10): 1199-1206.

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

任国玉. 2007. 气候变化与中国水资源 [M]. 北京: 气象出版社, 314pp. Ren Guoyu. 2007. Climate Change and Water Resource in China [M] (in Chinese). Beijing: China Meteorological Press, 314pp.

施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219-226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219-226.

卫捷, 张庆云, 陶诗言. 2003. 近 20 年华北地区干旱期大气环流异常特征 [J]. 应用气象学报, 14 (2): 140-151. Wei Jie, Zhang Qingyun, Tao Shiyan. 2003. Characteristics of atmospheric circulation anomalies during persistent droughts in North China for last two decades [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 14 (2): 140-151.

王绍武, 龚道溢, 翟盘茂. 2002. 西部地区的气候变化 [M] //

- 秦大河, 中国西部地区的环境演变. 北京: 科学出版社, 31-80. Wang Shaowu, Gong Daoyi, Zhai Panmao. 2002. Climate Change in Western China [M] (in Chinese) // Qin Dahe. Environmental Changes in Western China. Beijing: Science Press, 31-80.
- 王志伟, 翟盘茂. 2003. 中国北方近 50 年干旱变化特征 [J]. 地理学报, 58 (增刊): 61-68. Wang Zhiwei, Zhai Panmao. 2003. Climate change in drought over northern China during 1950-2000 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (Suppl.): 61-68.
- 王志伟, 刘文平, 王红霞. 2005. 我国北方干旱逐月变化特征分析 [J]. 气象, 31 (7): 31-40. Wang Zhiwei, Liu Wenping, Wang Hongxia. 2005. Analysis of monthly changes of drought/wetness in the northern of China [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 31 (7): 31-40.
- 王越, 江志红, 张强, 等. 2007. 基于 Palmer 湿润指数的旱涝指标研究 [J]. 南京气象学院学报, 30 (3): 383-389. Wang Yue, Jiang Zhihong, Zhang Qiang, et al. 2007. Comparative study of Palmer's moisture anomaly index and Z index [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 30 (3): 383-389.
- Wang X, Swail V R. 2001. Changes of extreme wave heights in northern hemisphere oceans and related atmospheric circulation regimes [J]. J. Climate, 14: 2204-2221.
- Willhite D A. 2006. Drought monitoring and early warning: Concepts, progress and future challenges [R]. World Meteorological Organization, Geneva, Switzerland, WMO-No. 1006.
- 张庆云, 卫捷, 陶诗言. 2003. 近 50 年华北干旱的年代际和年际变化及大气环流特征 [J]. 气候与环境研究, 8 (3): 307-318. Zhang Qingyun, Wei Jie, Tao Shiyan. 2003. The decadal and interannual variations of drought in the northern China and association with the circulations [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (3): 307-318.
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 2006. 气象干旱等级 GB/T20481-2006 [S]. 北京: 中国标准出版社, 17pp. Zhang Qiang, Zou Xukai, Xiao Fengjin, et al. 2006. Classification of meteorological drought, GB/T20481-2006 [S] (in Chinese). Beijing: Standards Press of China, 17pp.
- Zou X, Zhai P, Zhang Q. 2005. Variations in droughts over China: 1951-2003 [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (4), L04707, doi: 10.1029/2004GL021853.