

白永清, 智协飞, 祁海霞, 等. 基于多尺度 SPI 的中国南方大旱监测. 气象科学, 2010, 30(3): 292-300 Bai Yongqing, Zhi Xiefei, Qi Haixia et al Severe drought monitoring in south China based on the standardized precipitation index at different scales Scientia Meteorologica Sinica 2010, 30(3): 292-300

基于多尺度 SPI 的中国南方大旱监测

白永清 智协飞 祁海霞 张 玲

(南京信息工程大学 气象灾害省部共建教育部重点实验室, 南京 210044)

摘 要 用标准化降水指数 (SPI) 对 2003 年南方大旱发生、发展、持续、缓解进行全过程监测。2002 年 12 月—2003 年 5 月中国西南地区东部以及华南南部两广交界一带发生冬春连旱, 其中西南地区东部冬旱最为严重, 华南南部一带春旱最为严重。入夏以来南方大范围地区 6—12 月逐月均表现亏水, 尤以 7、8、10 月亏水面积最广, 强度最大。2003 年 6—12 月长江以南大范围地区持续夏秋冬三季连旱, 旱情极为严重, 局部地区出现极端干旱, 而长江以北则持续偏涝。2003 年 3 月—2004 年 2 月全年属于典型的“南旱北涝”型分布。基于多尺度 SPI 进一步统计南方地区 1951—2007 年历史上严重的夏秋冬三季连旱事件。结果表明 1980s 以前发生过 3 次, 分别是 1956、1967、1978 年, 每 11 a 出现一次; 1980s 以后仅 2003 年发生 1 次。而这 4 次连旱的强度却是一次高于一次。

关键词 南方干旱监测 连旱 标准化降水指数

分类号 P426.68 **文献标识码** A

Severe drought monitoring in south China based on the standardized precipitation index at different scales

Bai Yongqing Zhi Xiefei Qi Haixia Zhang Ling

(Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044 China)

Abstract Based on the precipitation data of 160 stations in China during the period from January 1951 through October 2007, the entire drought process in 2003 in southern China was monitored by using the standardized precipitation index (SPI). It was found that the consecutive drought in summer, autumn and winter occurred in the eastern region of southwest China where drought was the most serious in winter and the southern part of south China where the drought was the most severe in spring during the period from December 2002 to May 2003. Water deficit occurred month by month since the beginning of summer in the large areas of south China. In addition, the extreme water shortage took place in July, August and October in large areas. From June to December 2003, the consecutive drought in summer, autumn and winter affected large areas in the south of the Yangtze River, while the consecutive flood occurred in the north of the Yangtze River. “Drought in the south and flood in the north” was the typical pattern from March 2003 to February 2004. Based on multi-scale SPI analysis, the consecutive drought events during the period 1951—2007 in south China was investigated in detail. The events of consecutive drought in summer, autumn and winter occurred three times before 1980s, namely in 1956, 1967 and 1978, and only one time in 2003 after 1980s. However, the intensities of the droughts in these four years were increasing year by year.

Key words Drought monitoring Consecutive drought Standardized precipitation index

收稿日期: 2009-05-11; 修改稿日期: 2009-07-03

基金项目: 教育部留学回国人员科研启动基金 (2720); 江苏省六大人才高峰项目。

第一作者简介: 白永清 (1985-), 男, 银川, 硕士, 研究方向为短期气候预测, 2007byq@163.com

© 1994-2011 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. <http://www.cnki.net>

引言

干旱、洪涝是中国最主要的气候灾害, 尤其是干旱, 因其出现频率高、持续时间长、波及范围大, 对国民经济特别是对农业生产有严重影响, 故历来被人们关注。美国气象学会^[1]在总结各种干旱定义的基础上将干旱分为四种类型: 气象干旱(由降水和蒸发不平衡所造成的水分短缺现象)、农业干旱(以土壤含水量和植物生长形态为特征, 反映土壤含水量低于植物需水量的程度)、水文干旱(河川径流低于其正常值或含水层水位降落的现象)、社会经济干旱(在自然系统和人类社会系统中, 由于水分短缺影响生产、消费等社会经济活动的现象)。

目前, 关于干旱指标已有大量研究^[2-5]。根据建立途径的不同, 把干旱指标大致归纳为两类。一类是通过研究干旱机理, 力图细致反映干旱涉及的各个物理过程, 如土壤水分蒸发、地表径流和地表水分补给等, 这类指标以 PDSI^[6] (Palmer drought severity index)、KBDI^[7] (Keetch byram drought index)、WAWAHAMO^[8] 等为代表。另一类干旱指标则是通过气象学方法研究降水量的统计分布规律来反映干旱的强度和持续时间, 如降水量百分率或降水量距平百分率以及在我国成熟应用的 Z 指数^[9-10] 等。第二类干旱指标计算简单, 所需资料容易获取, 并且不涉及具体的干旱机理, 时空适应性较强。其代表性模型是由 McKee 等^[11] 在评估美国科罗拉多干旱状况时提出的基于降水量的标准化降水指标 I_{sp} (SPI Standardized Precipitation Index)。该指标替代了计算烦杂的 PDSI 能够较好地反映干旱强度和持续时间。并且还具有多时间尺度应用特性, 可以区分引起干旱的两种直接原因, 即由土壤水分亏缺引起的和用于补给土壤水分亏缺引起的。1~3 个月时间尺度的 I_{sp} 用于监测短时期内水分变化, 如对农业生产有重要影响的土壤水分变化。6~24 个月时间尺度的 I_{sp} 用于监测长时期的水分动态, 如地下水位、径流量等变化。这就使得用同一干旱指标反映不同时间尺度和不同方面水资源状况成为可能, 因而 I_{sp} 在国外得到广泛应用^[12-15]。

在中国应用较多的还是 Z 指数, 对 I_{sp} 的应用与研究相对较少。袁文平等^[16] 通过比较 I_{sp} 和 Z 指数, 指出 I_{sp} 计算简单, 资料容易获取, 计算结果与 Z 指数具有极好的一致性, 并且具有独特的计算稳定性, 在各区域和各时段均能有效地反映旱涝状况, 可以为我国不同时间尺度的干旱监测服务, 优于在我

国广泛应用的 Z 指数。王彦集等^[17] 基于不同时间尺度 I_{sp} 计算结果, 对关中平原和渭北旱塬未来干旱状态做出预测和分析。韩萍等^[18] 通过计算关中地区不同时间尺度 I_{sp} 对 I_{sp} 序列进行分析建模, 实现了对关中地区不同尺度的干旱预测。

2003 年中国南方地区持续异常少雨, 降水量为 1961 年以来最少, 出现了罕见的大范围夏秋冬连旱现象。郭锐等^[19] 对 2003 年夏季我国南方大旱做出详细的天气学背景分析, 指出西太平洋副高加强西伸, 脊线位置较常年偏北, 副高长期盘踞在长江以南上空是造成长江以南地区夏季干旱的主要原因。并且指出西太平洋副高与南亚高压重叠区域对应主要干旱区, 前期欧亚大陆中高纬地区 100 hPa 温度场异常作为 2003 年南方大旱的一个影响因子。杨义文等^[20] 指出, 2003 年中国气候异常是地球下垫面热力异常引起大气环流异常的结果, 并且认为 2003 年夏季旱涝趋势不同于过去 10 a 的重要原因是 2003 年盛夏 7、8 月夏季风突变性异常增强。智协飞等^[21] 通过统计近 47 a 南方秋季的干旱特征, 指出秋季南亚高压位置异常偏东将直接导致南方降水偏少, 夏季蒙古上空高压偏强也可导致南方降水偏少。此外当赤道东太平洋海温异常偏低, 赤道印度洋海温偶极子呈负位相时, 我国南方秋季易出现大范围干旱。

已经有人做了大量有关干旱发生的天气学背景研究^[19-23], 本文主要依据 I_{sp} 能够反映干旱强度和持续时间的特点, 并且 I_{sp} 具有多时间尺度灵活应用的特性, 基于 I_{sp} 对 2003 年南方大旱发生、发展、持续、缓解情况进行全过程监测。此外进一步统计了南方地区 1951—2007 年历史上严重的夏秋冬连旱事件的发生, 充分展现了多尺度 I_{sp} 的优越性。

1 资料与方法

1.1 资料

由国家气候中心提供的中国 160 标准站 1951 年 1 月—2007 年 10 月逐月降水资料。

1.2 标准化降水指数 (I_{sp})

由于不同时间、不同地区降水量变化幅度很大, 直接用降水量很难在不同时空尺度上相互比较, 并且降水分布是一种偏态分布。 I_{sp} 的原理就是基于降水量分布不是正态分布, 而是一种偏态分布。该指标是将某一时间尺度的降水量时间序列看作服从 Γ 分布, 通过降水量的 Γ 分布概率密度函数求累积概率, 然后转化成标准正态分布而得。这样做能够消

除降水量在时空分布上的差异,使 I_{sp} 能够适用于反映不同地区、不同时间尺度的旱涝情况。其计算方法如文献[16-18]。

根据《气象干旱等级》国家标准中的划分标准, I_{sp} 旱涝等级划分如表 1。

I_{sp} 通过计算给定时间尺度内降雨量的累积概率,能够在多个时间尺度上进行计算比较。许多研究^[12 16 18]都表明, I_{sp} 适合于不同类型的干旱量化研究,时间尺度为 1~3 月的 I_{sp} 可反映农业干旱情况;6—24 月的 I_{sp} 可用于反映地下水位的变化。短时间尺度的 I_{sp} 实际上反映了阶段性降水量的变化,

它对旱涝的反应较为敏感,单月的水分亏盈很

表 1 I_{sp} 及旱涝等级划分

I_{sp}	旱涝类型
≥ 2.0	特涝
$[1.5\ 2.0)$	重涝
$[1.0\ 1.5)$	中涝
$[0.5\ 1.0)$	轻涝
$(-0.5\ 0.5)$	正常
$(-1.0\ -0.5]$	轻旱
$(-1.5\ -1.0]$	中旱
$(-2.0\ -1.5]$	重旱
≤ -2.0	特旱

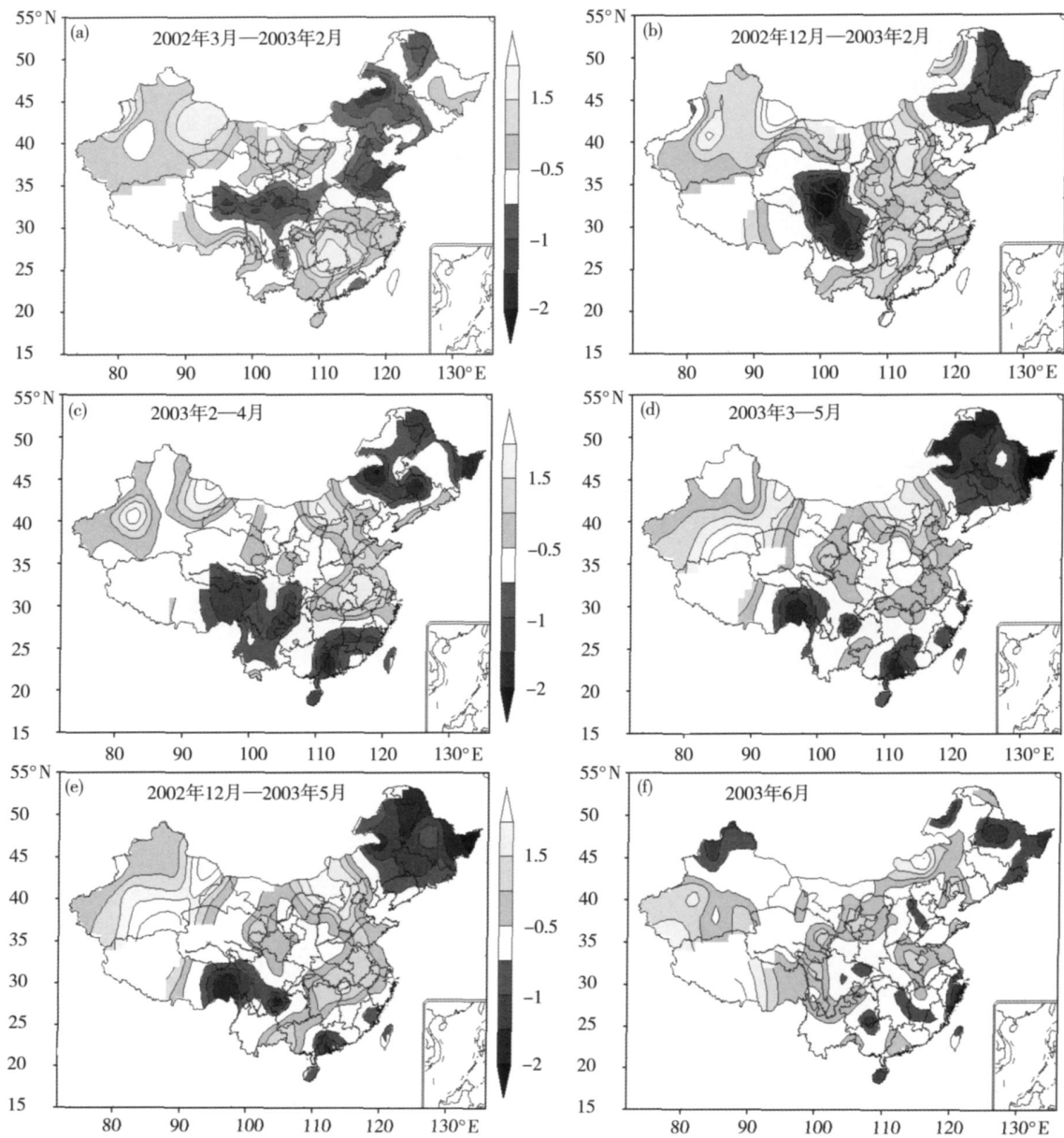


图 1 全国气候旱涝 I_{sp} 分布 (实线表示 $I_{sp} \geq 0.5$ 虚线表示 $I_{sp} \leq -0.5$)

Fig 1 I_{sp} values for the climatic divisions of China

(The solid lines represent I_{sp} values more than or equivalent to 0.5, dashed lines for I_{sp} values less than or equivalent to -0.5)

好地指示出干旱的发生、缓解阶段以及严重程度。长时间尺度的 I_{sp} 反映出下层土壤水分的旱涝状况以及持续时间, 长时期的干旱才能造成一次严重的旱灾, 以引起人们关注。基于此, 本文分别计算了 1 3 6 9 12 个月尺度的 I_{sp} , 通过综合分析多个时间尺度的 I_{sp} , 对短时间内降雨量的变化以及长时期内水资源的演变情况进行实时监测。

2 2003年南方大旱全过程监测

2.1 前期冬春旱监测

12个月时间尺度 I_{sp} 监测表明 2002 年 3 月—2003 年 2 月 (图 1a) 我国旱涝分布总体上呈“南涝北旱”型。东北至黄河以南、长江以北大范围地区处于干旱状态, 长江以南大范围地区降水偏多。通过对 3 个月、6 个月时间尺度的 I_{sp} 监测, 可以及时准确地掌握 2003 年南方前期冬春旱的发生、发展情况。

2002 年 12 月—2003 年 2 月 (图 1b) 3 个月时间尺度 I_{sp} 监测发现, 严重旱情主要发生在黄河上游以及西南地区东部。2003 年前期西南地区东部处于一个较强的冬旱当中, 而全国大范围地区仍处于降

水偏多状态。至 2003 年 2—4 月 (图 1c) 西南地区东部冬春旱强度减弱, 东南至华南一带冬春旱开始发生, 华南局部地区冬春旱发展严重。春季 3—5 月 (图 1d) 西南地区东部、东南一带干旱面积有所减少, 严重旱情集中位于云贵川交界以及两广交界地区。

通过 6 个月时间尺度 I_{sp} 监测可以看出, 2002 年 12 月—2003 年 5 月 (图 1e) 我国南方前期冬春连旱主要发生在西南东部局部地区和华南南部两广交界一带。其中西南东部以冬旱最为严重, 华南南部以春旱最为严重。单月 I_{sp} 监测表明 (图 1f) 西南东部和华南南部局部地区旱情在 6 月份有所缓解。

2.2 夏秋冬三季连旱监测

9 个月时间尺度 I_{sp} 检测表明, 2002 年 10 月—2003 年 6 月 (图 2a) 我国南方还没有出现干旱迹象。而转折期发生在 2003 年 7 月 (图 2b), 7 月份单月 I_{sp} 监测长江以南大部地区出现严重亏水情况, 其中江西南部、福建南部等地处于极端亏水状态。受此影响, 2002 年 11 月—2003 年 7 月 (图 2c) 9 个月 I_{sp} 检测表明华南东南一带开始进入一个干旱期。若此后降水持续亏损, 将有可能造成南方地区的季节性

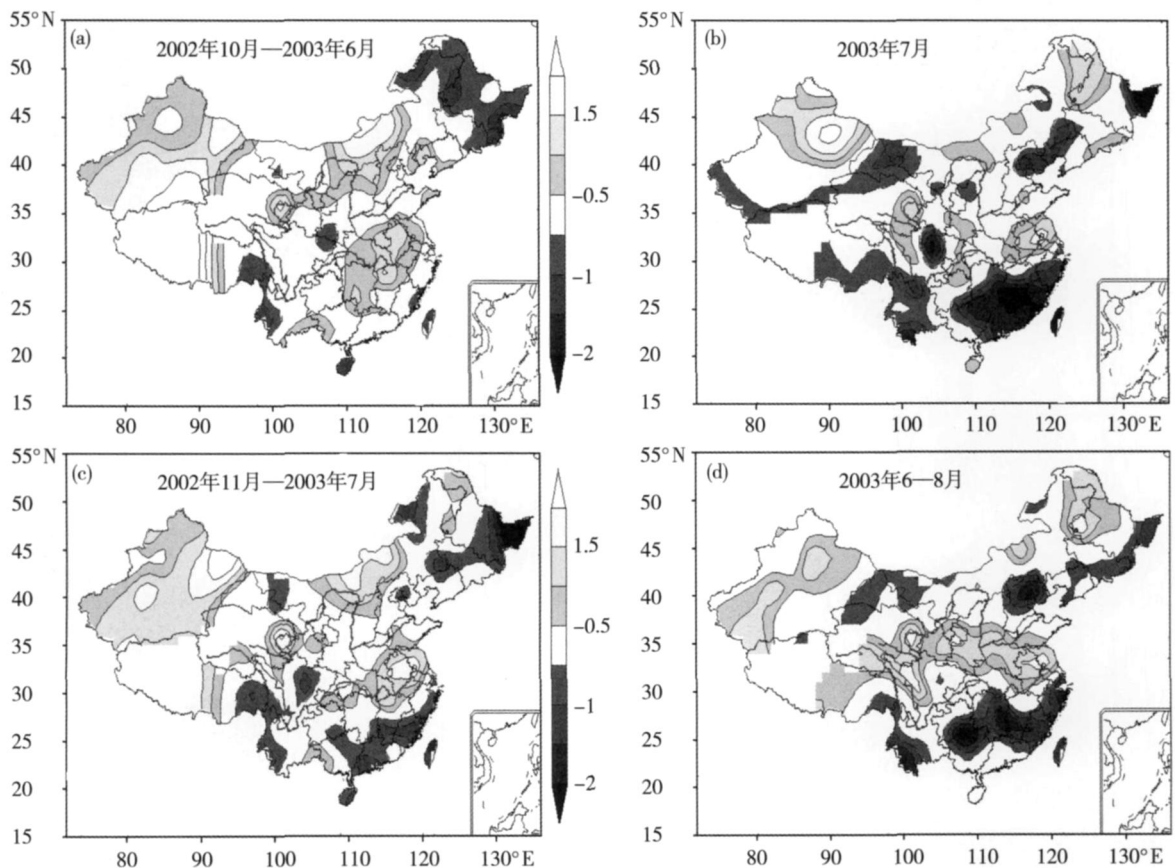


图 2 全国气候旱涝 I_{sp} 标准化降水指数分布 (说明同图 1)

Fig 2 Same as Fig 1 except for different periods

连旱。3个月 I_{sp} 监测 6—8月 (图 2d) 发现, 期间南方地区出现严重的夏伏旱, 整个干旱区呈东西带状分布。其中江西西部、湖南东部、贵州南部、广西北部、云南西南部旱情严重, 局部地区出现极端干旱情况。而长江以北情况恰好相反, 局部地区还出现极端洪涝。以长江为界, 2003 年夏季全国呈现出“南旱北涝”的格局, 不同于近些年的“南涝北旱”。

9月份 (图 3a) 单月 I_{sp} 监测表明云南西南部、江西大部地区亏水明显, 而两广一带降水稍有盈余, 这对该地区一段时间内的旱情起到了缓和作用。此后, 7—9月、8—10月、9—11月、10—12月 (图 3b—

e) 每 3 个月时间尺度的 I_{sp} 监测看出, 全国旱涝分布一直持续着“南旱北涝”, 南方地区受旱面积较大, 东西方向福建、江西、湖南、贵州、云南一带受灾情况严重, 其中云南西南部持续遭受极端干旱, 广西南部地区在秋冬季 (10—12月) 也遭受到极端干旱。

6个月 I_{sp} 监测表明 2003 年 7—12月 (图 3f) 整个下半年南方大部地区均处于一个严重的夏秋冬三季连旱时期。旱区波及浙江、江西、湖南、福建、湖北、广东、广西、贵州、云南几乎所有南方地区, 受灾面积之广, 干旱强度之大, 均为 1963 年以来历史最高。

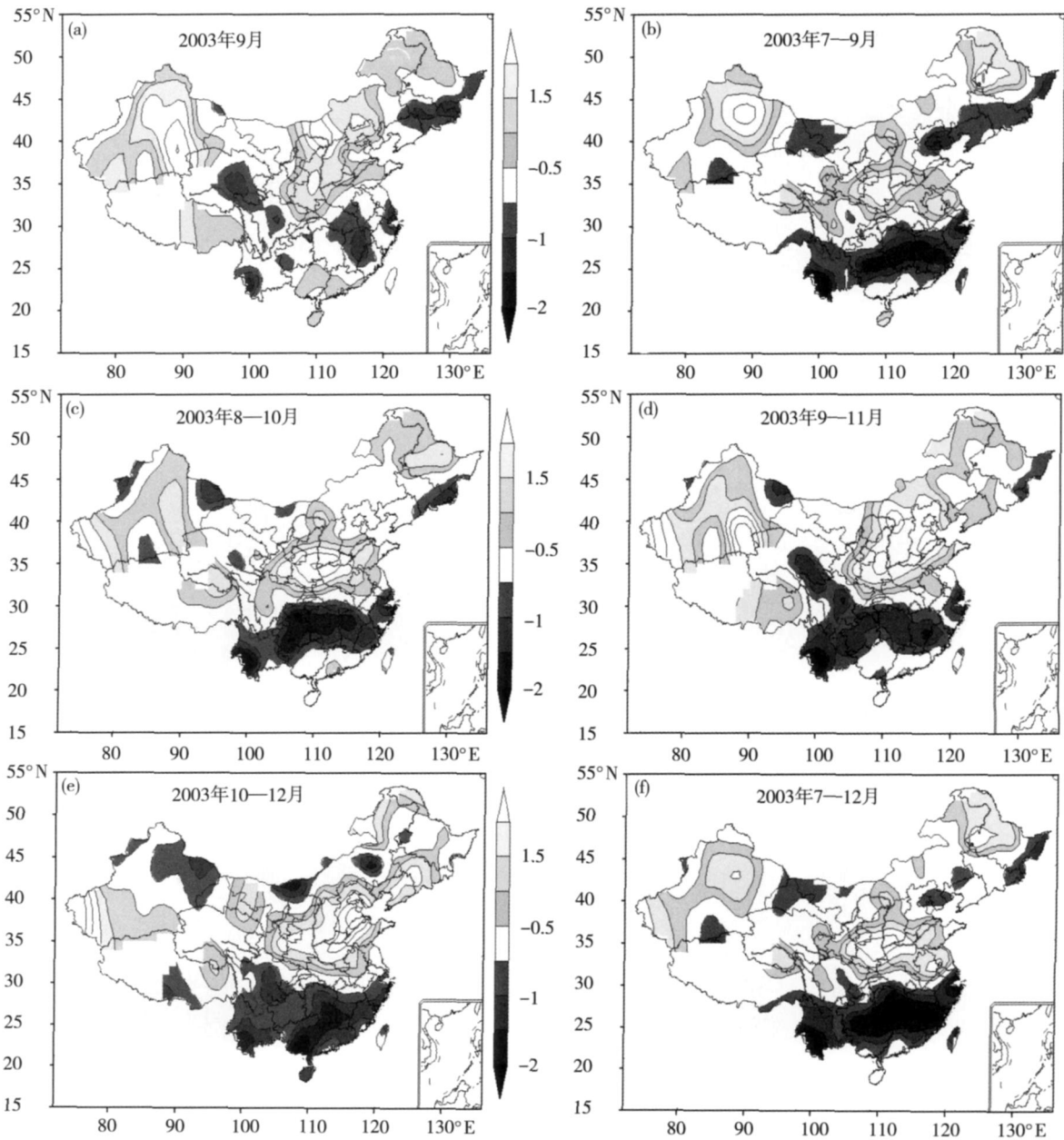


图 3 全国气候旱涝 I_{sp} 分布 (说明同图 1)

Fig 3 Same as Fig 1 except for different periods

I_{sp} 监测到南方地区旱情在次年 1 月份 (图 4a) 得到缓解, 长江一带、云南和两广地区降水都有所盈余。3 个月 I_{sp} 监测 2003 年 12 月至次年 2 月 (图 4b) 长江以南大部地区干旱面积缩小, 干旱强度减弱, 东南部地区还存在干旱的迹象。9 个月时间尺度的 I_{sp} 监测表明 2003 年 6 月—2004 年 2 月 (图 4c) 整个夏秋冬三个季节我国一直处在“南旱北涝”的分布状态, 其中云南西部至贵州、广西、湖南、江西、福建、浙江一带均遭受严重干旱, 局部地区达到极端干旱的等级。2003 年 3 月—2004 年 2 月 (图 4d) 12 个月时间尺度的监测也表明全国处于“南旱北涝”

的分布, 长江以南大范围地区旱情从春季开始一直持续到冬季, 2003 年整年南方地区表现出干旱的特征。

总的说来, 2003 年南方大旱是由逐个亏水过程累加发展所引起的。最初是在西南地区东部、华南南部部分地区发生冬春旱。入夏以来, 单月 I_{sp} 监测表明 7 月份南方地区突然出现了大范围异常亏水情况, 局部地区遭受极端缺水。8 月份 (图 4e) 南方大部地区水分流失仍然很严重, 并且形成典型的“南旱北涝”分布特征。10 月份 (图 4f) 南方地区亏水越发明显, 干旱面积再次扩大。11、12 月西南、华南、

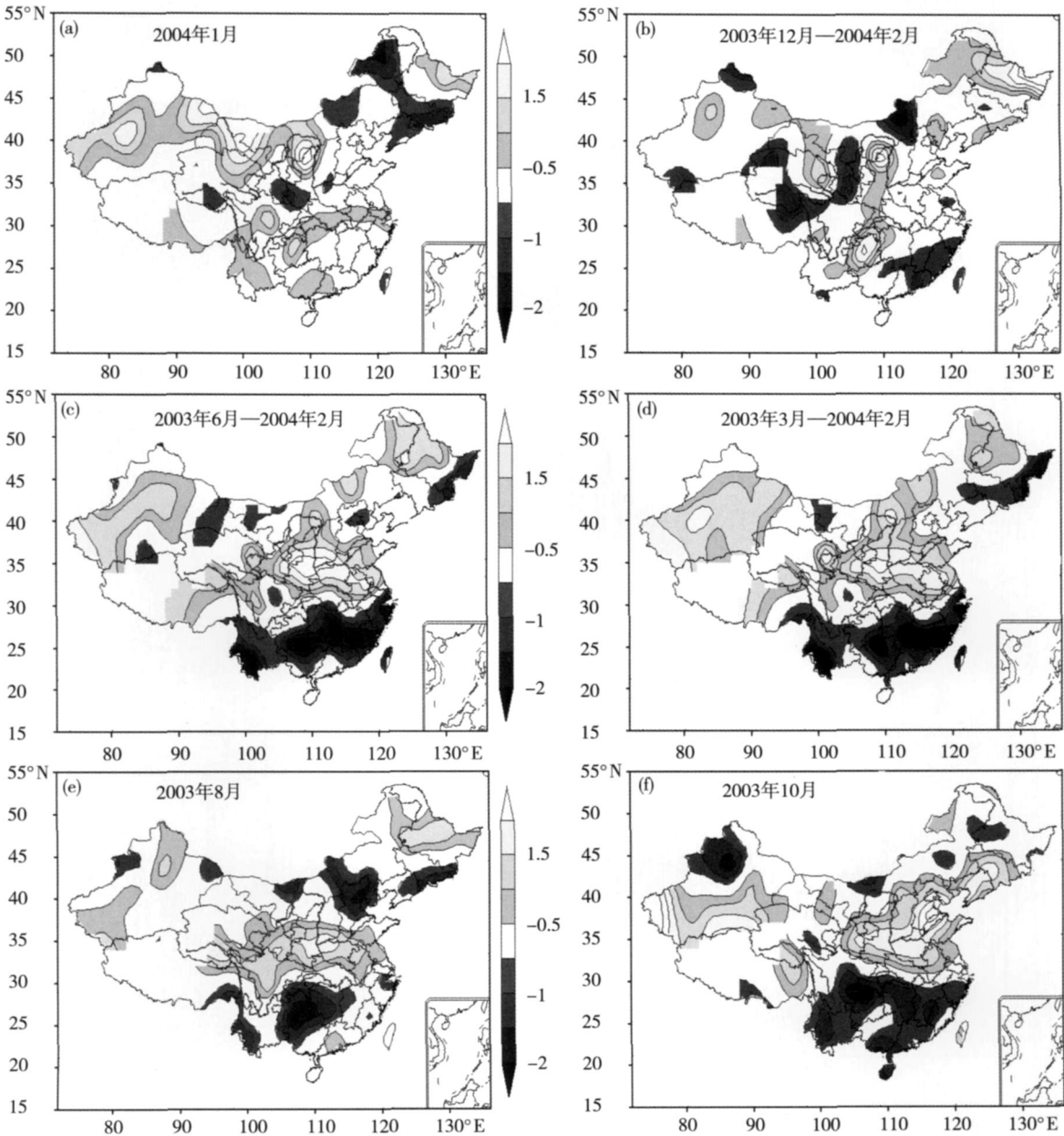


图 4 全国气候旱涝 I_{sp} 分布 (说明同图 1)

Fig 4 Same as Fig 1 except for different periods

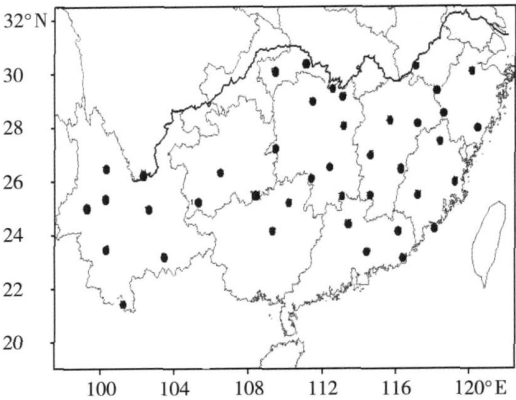


图 5 2003/2004 年南方夏秋冬三季连旱的 41 个代表站点分布
Fig 5 Distribution of the 41 selected stations with consecutive drought of the summer autumn and winter during 2003—2004 in south China

东南部分地区继续处于亏水当中(图略)。2003 年整个下半年南方地区逐月均表现为亏水状态,并且局部地区还出现极端缺水情况。这种逐月亏水的累加效应,再配合该年夏季南方地区罕见的持续性高温天气,最终造成这次极端的夏秋冬三季连旱的发

生。

3 多尺度 I_{sp} 南方地区夏秋冬季节连旱的统计

挑选出 2003、2004 年南方夏秋冬三季连旱的 41 个代表站,如图 5,以代表站区域平均的降水量计算 1951—2007 年逐月多时间尺度 I_{sp} 。

图 6 为南方代表站区域平均的 1、3、6、12 个月时间尺度的 I_{sp} 序列。由图可见,不同时间尺度的 I_{sp} 值对于降水量的敏感性不同。较短的时间尺度对每次降水变化都显著, I_{sp} 序列正负波动大,旱涝频率变化快。较长的时间尺度,只有持续的多次降水才会使之发生波动,旱涝出现的频率减少,但旱涝持续的时间相对增长。从 6 个月 I_{sp} 和 12 个月 I_{sp} 序列中可以明确标出 2003—2004 年发生的大旱, I_{sp} 均达到 -3.0 干旱强度极端罕见。同样罕见的一次大旱还发生在 1962—1963 年,其 I_{sp} 也达到 -3.0。2003 年南方大旱是自 1963 年以来的第二个历史之最。同时期内的 1 个月 I_{sp} 和 3 个月 I_{sp} 也有着相对应的变化

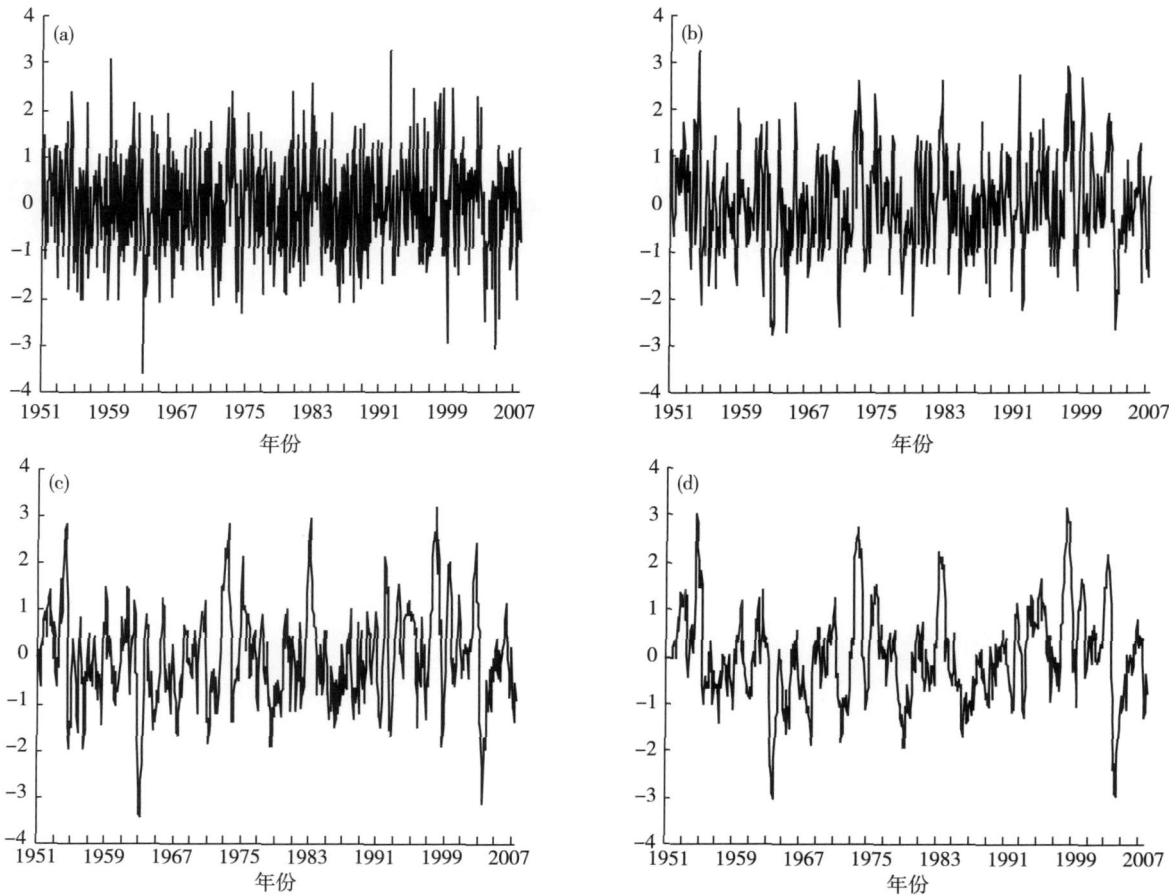


图 6 1951—2007 年我国南方地区 I_{sp} 多时间尺度分析 (a) 单月; (b) 3 个月; (c) 6 个月; (d) 12 个月

Fig 6 I_{sp} values for different periods during the period 1951—2007 in south China
(a) 1 month; (b) 3 months; (c) 6 months; (d) 12 months

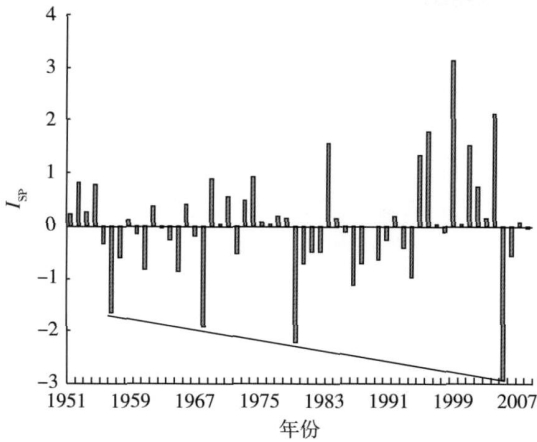


图 7 1951—2006年我国南方地区逐年 9个月 I_{sp} 序列, 即前一年 6月至次年 2月的时间尺度, 图中斜线是 1956、1967、1978、2003年发生 4次夏秋季连旱的 I_{sp} 变化趋势

Fig 7 9 months I_{sp} values (between June of year $n-1$ and February of year n) during the period 1951—2007 in south China and the I_{sp} trend of years namely 1956, 1967, 1978 and 2003 when the drought occurred consecutively in summer, autumn and winter

趋势。3个月 I_{sp} 在 1963、2003年间都连续达到 -2.0以下, 而 I_{sp} 在 1963 年 1 月达到历史最低的 -3.6 在 2003 年 7 月也达到 -2.5。2003 年南方大旱与 1963 年的大旱, 两次极端罕见的事件相隔 40 a 时间。

从 I_{sp} 序列中能够确定其它严重的干旱年份 ($I_{sp} \leq -1.5$), 如 1964—1965 年、1967—1968 年、1971—1972 年、1978—1979 年、1985—1986 年。从发生重旱及以上等级的频率来看, 几乎所有重大旱灾都出现在 1960s—1980s 而 1990s 以后南方地区主要以洪涝灾害为主。

从 I_{sp} 历史序列中还能找到与 2003 年相类似的

夏秋冬季连旱事件。将第 $n-1$ 年 6 月至第 n 年 2 月的逐年 9 个月 I_{sp} 序列提取出来, 如图 7。可以看到, 南方地区严重的夏秋冬季连旱事件在 1980s 以前发生过 3 次, 分别是 1956 年、1967 年和 1978 年, 每 11 a 出现一次。而 1980s 以后仅 2003 年出现了 1 次。但是南方地区发生夏秋冬季连旱的强度却是一次高于一次, 图中用趋势线表示。

1956、1967、1978 年以及 2003 年的夏秋冬季连旱事件中 6 月至次年 2 月的逐月 I_{sp} 变化曲线如图 8a。可以看到逐月平均的 I_{sp} 均为负, 表现为逐月亏水情况, 7 月和 10 月是夏秋冬季连旱中亏水最为严重的月份, 其中 2003 年 7 月达到了极端干旱的等级。1956 年 6—8 月、10—12 月发生两次 3 个月的连旱, 1967 年 6—10 月和 1978 年 6—10 月均发生 5 个月的连旱, 而 2003 年 6—12 月更是持续了长达 7 个月的连旱。相比较历史上罕见的 1962—1963 年大旱 (图 9b), 逐月 I_{sp} 也均为负, 1962 年 1 月达到了历史最低, 期间也持续了长达 7 个月的连旱。可见, 逐月亏水的累加效应以及持续多个月发生连旱是造成罕见大旱的关键, 连旱期间出现极端亏水会加剧该时期内旱情的发展。

4 小 结

本文利用标准化降水指数 (I_{sp}) 对 2003 年南方大旱发生、发展、持续、缓解情况进行全过程监测, 并基于多尺度 I_{sp} 着重统计了南方地区 1951—2007 年历史上严重的夏秋冬季连旱事件, 得到如下几点结论:

(1) 2003 年南方前期冬春连旱主要发生在西南东部局部地区以及华南南部两广交界一带。其中

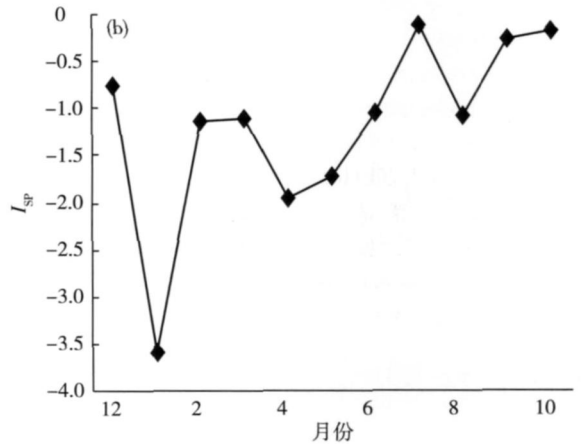
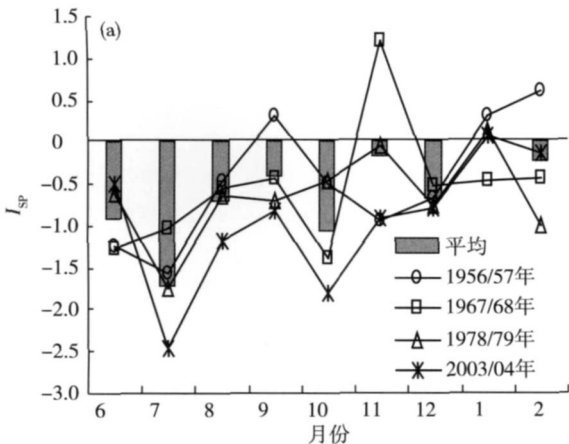


图 8 我国南方地区逐月 I_{sp} 变化曲线 (a) 1956、1967、1978、2003 年 6 月至次年 2 月; (b) 1962 年 12 月—1963 年 10 月

Fig 8 Monthly I_{sp} values calculated from June 1956, 1967, 1978 and 2003 to February of the next year

(a) and from December 1962 to October 1963 (b) in south China

西南东部以冬旱最为严重, 华南南部以春旱最为严重。入夏以后南方大范围地区发生干旱, 长江以南大部地区 6月至 12月一直处于亏水状况, 尤以 7、8、10月份亏水面积最广, 强度最大。整个夏秋冬三季, 长江以南大范围地区持续干旱, 旱情极为严重, 局部地区出现极端干旱, 而长江以北则持续偏涝, 使该年形成典型的“南旱北涝”型分布。南北持续性旱涝至次年 1月份得到缓解。2003年南方地区遭受了罕见的夏秋冬三季连旱。

(2) 2003年南方大旱是自 1963年以来历史上最严重的干旱, 两次极端干旱事件相隔了 40 a。从发生重旱及以上等级的频率来看, 1960s—1980s出现频率最高, 而 1990s以后南方地区主要以洪涝灾害为主。

(3) 南方地区严重的夏秋冬连旱在 1980s以前发生过 3次, 分别是 1956、1967年和 1978年, 每 11 a 出现一次。而 1980s以后仅 2003年发生 1次。但是发生夏秋冬季连旱的强度却是一次高于一次。其中 7月和 10月是夏秋冬季连旱中亏水最为严重的月份。2003年 6—12月出现了长达 7个月的连旱, 逐月亏水的累加效应以及持续多个月发生连旱是造成罕见大旱的关键, 连旱期间出现极端亏水加剧了该时期内旱情的发展。

参 考 文 献

[1] American Meteorological Society. Meteorological drought: Policy statement. Bulletin of American Meteorological Society, 1997, 78: 847-849.

[2] Richard R. Hein. A review of twentieth-century drought index used in the United States. Bulletin of American Meteorological Society, 2002, 83(8): 1149-1165.

[3] 赵旭春, 王澄海, 张永生, 等. 两种干旱指标在乌海地区干旱分析中的应用比较研究. 气象科学, 2007, 27(增刊): 162-168.

[4] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-990.

[5] 王越, 江志红, 张强, 等. 基于 Palmer湿润指数的旱涝指标研究. 南京气象学院学报, 2007, 30(3): 383-389.

[6] Palmer W. C. Meteorological Drought. Research Paper No. 45. US Weather Bureau. Washington, DC: NOAA Library and Informa-

tion Services Division, 1965.

[7] Keetch J. J., Byram G. M. A drought index for forest fire control. USDA Research Paper SE-38 No. 33. Asheville, NC: Southeastern Forest Experiment Station, 1968.

[8] Zierl B. A water balance model to simulate drought in forested ecosystems and its application to the entire forested area in Switzerland. Journal of Hydrology, 2001, 242(1): 115-136.

[9] 鞠笑生, 邹旭恺, 张强. 气候旱涝指标方法及其分析. 自然灾害学报, 1998, 7(3): 51-57.

[10] 谭桂容, 孙照渤, 陈海山. 旱涝指数的研究. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 153-158.

[11] McKee T. B., Doesken N. J., Kleist J. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Proceeding of 8th Conference on Applied Climatology. American Meteorological Society, Boston, Massachusetts, 1993, 179-184.

[12] Hayes M. J., Svoboda M. D., Wilhite D. A., et al. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index. Bulletin of the American Meteorological Society, 1999, 80(3): 429-438.

[13] Gutman N. B. Comparing the Palmer drought severity index and the standardized precipitation index. Amer. Water Res. Ass., 1998, 34(1): 113-121.

[14] Gutman N. B. Accepting the standardized precipitation index: a calculating algorithm. Amer. Water Res. Ass., 1999, 35(2): 311-323.

[15] Cancelliere A., Mauro G. D., Bonaccorso B., et al. Drought forecasting using the standardized precipitation index. Water Resource Manage., 2007, 21(2): 801-819.

[16] 袁文平, 周广胜. 标准化降水指标与 Z 指数在我国应用的对比分析. 植物生态学报, 2004, 28(4): 523-529.

[17] 王彦集, 刘峻明, 王鹏新, 等. 基于加权马尔可夫模型的标准化降水指数干旱预测研究. 干旱地区农业研究, 2007, 25(5): 198-203.

[18] 韩萍, 王鹏新, 王彦集, 等. 多尺度标准化降水指数的 ARMA 模型干旱预测研究. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2): 212-218.

[19] 郭锐, 智协飞. 2003年夏季我国南方大旱天气学背景分析. 南京气象学院学报, 2008, 31(2): 234-241.

[20] 杨义文, 许力, 龚振淞. 2003年北半球大气环流及中国气候异常特征. 气象, 2003, 30(4): 20-24.

[21] 智协飞, 郭锐. 中国南方秋季干旱的时空分布特征及其可能成因. 中国气象学会 2006年年会“气候变化及其机理和模拟”分会场论文集. 成都: 中国气象学会, 2006: 1488-1489.

[22] 李君, 邵庆国, 韩国泳. 山东伏期旱涝特征与大气环流异常. 气象科学, 2009, 29(1): 106-109.

[23] 施宁, 建林. 江苏省夏季持续干旱和雨涝的气候分析以及环流和海温场演变特征. 气象科学, 1996, 16(4): 384-390.