

文章编号:1004-4574(2012)04-0084-07

基于标准化降水蒸散指数的华南干旱趋势研究

李伟光¹, 侯美亭², 陈汇林¹, 陈小敏¹

(1. 海南省气象科学研究所, 海南 海口 570203; 2. 中国气象局气象干部培训学院, 北京 100081)

摘要:最近几年华南地区干旱频发,为探讨该地区的干旱趋势,用标准化降水蒸散指数(SPEI)和1961-2010年华南地区具有代表性的50个站点的月降水及月平均气温资料,分析了该地区近50年来的干旱趋势、干旱空间分布、极端干旱事件发生频次和干旱持续时间。结果表明,华南地区普遍存在干旱事实,最近10年是干旱最严重的10年,Mann-Kendall检验表明该地区平均SPEI指数从1998年开始突变;干旱化最严重的区域是海南岛、广西南部和西部地区,广东的干旱化趋势最轻。20世纪70年代干旱和极端干旱事件较少,其后明显增多,干旱持续时间也有所延长。由于该地区降水呈现弱增加趋势而温度升高显著,因此推测温度升高导致蒸散增加可能是华南地区干旱化的主要原因。另外,降水频次的减少和集中也是导致近来极端干旱事件增多的原因之一。SPEI指数较好地体现了气候变暖导致的干旱化趋势。

关键词:华南;干旱趋势;SPEI指数;极端干旱

中图分类号:S162.3;P467

文献标志码:A

Study on drought trend in south China based on standardized precipitation evapotranspiration index

LI Weiguang¹, HOU Meiting², CHEN Huilin¹, CHEN Xiaomin¹

(1. Hainan Institute of Meteorological Science, Haikou 570203, China;

2. China Meteorological Administration Training Centre, Beijing 100081, China)

Abstract: In recent years, drought in south China occurred frequently. In order to investigate the trend of drought in this region, the standardized precipitation evapotranspiration index (SPEI) and monthly precipitation and average temperature data from the representative 50 sites in South China during 1961-2010 were used to analyze the drought trend, the space distribution of extreme drought events, the drought occurrence frequency and drought duration in the region during nearly 50 years. The results show that south China is meeting with a widespread drought trend. The most severe drought has occurred in the last 10 years. Based on the method of Mann-Kendall test, it is known that the average SPEI index of the region mutated from 1998. The most severe drought area is the southern and western parts of Guangxi Province and Hainan Island, while the drought trend in Guangdong Province is the lightest. The extreme drought event occurred scarcely during the 1970s, and extreme drought events significantly increase subsequently and the drought duration extended. Significant temperature rise and weak increase in precipi-

收稿日期:2011-12-20; 修回日期:2012-02-10

基金项目:海南省自然科学基金项目(411098);农业科技成果转化资金项目(SQ2011EC4160003)

作者简介:李伟光(1981-),男,硕士,工程师,主要从事气象干旱研究。E-mail:163great@163.com

tation in this region resulting in the increase in potential evapotranspiration, which is probably the main reason of the drought trend in South China. The fact indicates that SPEI is a good drought trend indicator under climate warming. In addition, the high frequency of occurrence of extreme drought events is partly attributed to the decreased frequency of precipitation events and the rainfall concentration in recent years.

Key words: south China; drought trends; SPEI; extreme drought

干旱是世界上最严重的自然灾害之一,干旱不仅直接影响农业生产和水资源的利用,还间接引发火灾、城市水危机等衍生灾害。研究表明,全球极端干旱面积正在扩大^[1-2]。大量的事实也揭示了中国北方地区干旱化正在加剧^[3-4]。华南地处我国南部沿海,属亚热带、热带季风气候区,年降水量约为 900 ~ 2700 mm,是我国多雨地区之一,但由于降水时空变率大,太阳辐射强、气温高、蒸腾蒸散量大,干旱时有发生,加之该地区作物生长期长、人口密集、城市及农事活动需水量大,干旱带来的损失并不小。有研究也表明我国南方地区干旱的季节性特征表现为春旱和秋旱有加重的趋势,而夏旱和冬旱有减轻的趋势^[5]。贺晋云等^[6]对我国西南地区的极端干旱变化特征研究发现,广西南部沿海地区极端干旱发生频率明显增加。周明森等^[7]发现 1990 年之后广东全省性秋旱和局部性秋旱都具有加重的趋势。俞胜斌等^[8]利用 *SPI* 指数对海南岛 1961 - 2004 年干旱面积进行估算,发现海南岛的干旱面积在扩大。不过,与对北方地区的干旱化研究相比,针对华南地区的干旱趋势研究依然较少,而近年来我国南方地区连续发生了几次特大干旱事件,其面积和强度都是近几十年来少见的。因此,加强我国华南地区的干旱变化特征研究显得尤为迫切。

干旱成因复杂,不同领域的研究者开发了不同的指标来研究干旱。气象干旱指标由于其客观、真实和可比性,被广泛用来表征复杂的干旱现象^[9]。降水量波动是导致气象干旱发生的首要原因,Makee 于 1993 年提出的标准化降水指数(standardized precipitation index, *SPI*)能够较好地反映干旱强度和持续时间,使得利用同一指标反映不同时间尺度和不同区域的干旱状况成为可能^[10-11],因而得到广泛应用。但是,*SPI* 指数的主要缺点是,它仅考虑了降水,而未考虑影响干旱的其他因素如温度、蒸散等,在分析全球变化背景下的干旱趋势方面有所欠缺。2006 年张强等制定的气象干旱综合指数(*CI*)综合考虑了 30 d, 90 d *SPI* 指数和 30 d 的相对湿润度指数,在监测不同地区和季节干旱发生发展方面具有非常好的适用性和优势^[12]。Vicente - Serrano^[13-14] 2010 年提出了标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index, *SPEI*),该指数基于降水和蒸散两种变量,考虑了水分平衡对干旱的影响,具有对温度敏感的特点,又具备 *SPI* 计算简单、适合多尺度、多空间比较的优点。*SPEI* 指数与 *CI* 指数相比对降水和蒸散的差值进行了标准化,更适合不同季节和地区之间干旱化程度的比较。因此 *SPEI* 特别适于检测和监测全球变暖背景下干旱的变化特征。Vicente - Serrano 用它建立了 1901 - 2006 年全球干旱趋势的数据集^[16]以检测全球干旱分布,该指数也被应用于干旱评估^[15]、水文干旱分析^[16]等。然而,目前国内基于 *SPEI* 指数的干旱研究还很少见。

本文根据我国华南地区三省(广东省、广西区、海南省)从 1961 到 2010 年的月降水和气温观测资料,采用 *SPEI* 分析该地区的干旱特征,系统地认识干旱化的时空趋势,以期为该地区气候变化研究和干旱减灾决策提供支持,以及对区域气候资源的合理利用提供科学依据。

1 资料和方法

本研究选用了华南三省广东、广西、海南共 50 个地面气象站 1961 - 2010 年逐月降水和气温资料,资料来源于国家气象信息中心。

SPEI 计算方法类似于 *SPI*,原理是用降水量与蒸散量的差值偏离平均状态的程度来表征某地区的干旱。该指标的计算方法是首先计算潜在蒸散(*PET*),Vicente - Serrano 采用的是 Thornthwaite 方法,然后计算降水与蒸散的差值,再通过降水与蒸散的差值的分布概率密度函数(3 参数的 log - logistic)求累积概率,然后转化成标准正态分布而得到。正态标准化处理能够消除时空分布上的差异,使 *SPEI* 能够适用于反映不同地区、不同时间尺度的旱涝情况。具体计算步骤如下。

首先计算潜在蒸散(*PET*)。本次计算才用的是 Thornthwaite 方法:

$$PE = 16.0 \times \left(\frac{10T_i}{H}\right)^A. \quad (1)$$

式中:PE 为可能蒸散量;T 为 30 d 的平均气温;H 为年热量指数。

各月热量指数由下式计算:

$$H_i = \frac{T_i^{1.514}}{5} \tag{2}$$

年热量指数计算方法为:

$$H = \sum_{i=1}^{12} H_i = \sum_{i=1}^{12} \left(\frac{T_i}{5}\right)^{1.514} \tag{3}$$

常数由下式计算:

$$A = 6.75 \times 10^{-7}H^3 - 7.71 \times 10^{-5}H^2 + 1.792 \times 10^{-2}H + 0.49 \tag{4}$$

第 2 步用公式(5) 计算逐月降水与蒸散的差值:

$$D_i = P_i - PET_i \tag{5}$$

式中, D_i 为降水与蒸散量的差值, P_i 为月降水量, PET_i 为月蒸散量。

第 3 步如同 SPI 方法, 对 D_i 数据序列进行正态化, 计算每个数值对应的 SPEI 指数。由于原始数据序列 D_i 中可能存在负值, 所以 SPEI 指数采用了 3 个参数的 log - logistic 概率分布。log - logistic 概率分布的累积函数为:

$$F(x) = \left[1 + \left(\frac{\alpha}{x - \gamma}\right)^\beta\right]^{-1} \tag{6}$$

式中:参数 α, β, γ 分别采用线性矩的方法拟合获得:

$$\alpha = \frac{(w_0 - 2w_1)\beta}{\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta)}; \tag{7}$$

$$\beta = \frac{2w_1 - w_0}{6w_1 - w_0 - 6w_2}; \tag{8}$$

$$\gamma = w_0 - \alpha\Gamma(1 + 1/\beta)\Gamma(1 - 1/\beta) \tag{9}$$

式中: Γ 为阶乘函数, w_0, w_1, w_2 为原始数据序列 D_i 的概率加权矩。计算方法如下:

$$w_s = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (1 - F_i)^s D_i; \tag{10}$$

$$F_i = \frac{i - 0.35}{N} \tag{11}$$

式中, N 为参与计算的月份数。

然后对累积概率密度进行标准化:

$$P = 1 - F(x) \tag{12}$$

当累积概率 $P \leq 0.5$ 时:

$$w = \sqrt{-2\ln(P)}; \tag{13}$$

$$SPEI = w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \tag{14}$$

式中: $c_0 = 2.515517, c_1 = 0.802853, c_2 = 0.010328, d_1 = 1.432788, d_2 = 0.189269, d_3 = 0.001308$ 。

当 $P > 0.5$ 时:

$$P = 1 - P; \tag{15}$$

$$SPEI = - \left(w - \frac{c_0 + c_1w + c_2w^2}{1 + d_1w + d_2w^2 + d_3w^3} \right) \tag{16}$$

SPEI具有多时间尺度(1, 3, 6, 12, 24个月等)特征,本文主要分析1个月时间尺度的SPEI,因为1个月时间尺度的干旱指数可以比较清楚地反映旱涝的细微性变化^[10]。本文中SPEI指数与干旱发生频率和干旱程度按照以下标准进行划分(表1)。

表1 SPEI干旱等级划分与发生累积概率

Table 1 SPEI drought gradation hierarchies and corresponding cumulative probability

	极端干旱	中度干旱	轻度干旱	正常年份
SPEI	< -2.0	< -1.0	< -0.5	-0.5 - 0.5
累积概率/%	2.28	15.87	30.85	50.00

2 1961 - 2010 年华南干旱化事实的结果分析

2.1 华南平均 SPEI 指数年际变化及突变检测

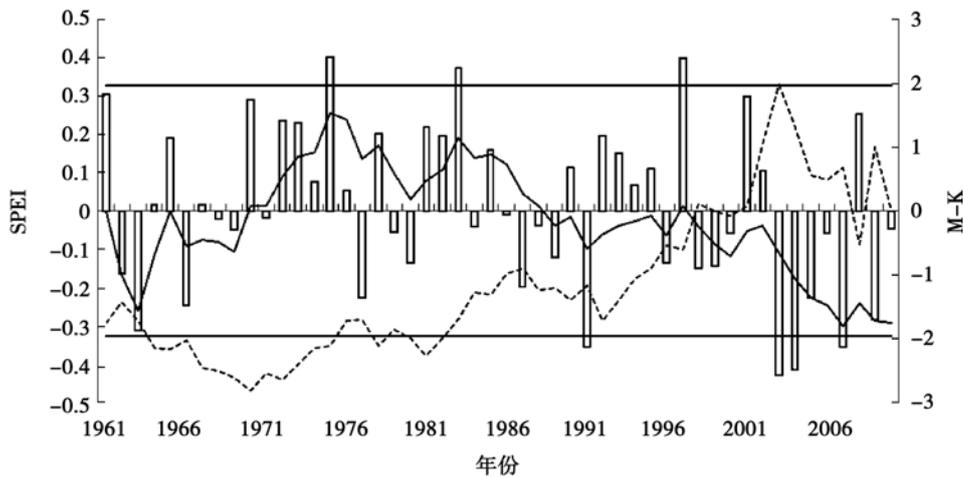


图1 华南平均 SPEI 指数年际变化及 M - K 突变检验曲线
(实(虚)曲线为 UF(UB) 线,直线为 $\alpha = 0.05$ 显著性水平临界线)

Fig.1 Interannual variation and Mann - Kendall test of average SPEI index of south China.
(Solid line (dashed line) is UF (UB) line. Horizontal line is the level of 0.05 significance line.)

图1给出了华南地区平均SPEI指数年际变化趋势及其Mann - Kendall(M - K)检验结果。从图中可以看出,华南地区有5个时段发生了连续干旱,分别是20世纪60年代、70年代后半段、80年代末、90年代末和21世纪初的前10a左右。干旱最严重的前5个年份分别是2003年、2004年、2007年、1991年和1960年,最湿润的前5个年份分别是1975年、1997年、1983年、1961年和2001年。从SPEI数值上来看,最干旱的年份偏离正常年的程度要大于最湿润年份。由UF曲线可知,近50a来华南地区平均SPEI指数呈现先上升后持续下降的趋势,但是不论上升还是下降趋势均未超过0.05显著性水平临界线。在显著水平0.05的临界线内,UF, UB曲线相交于1998年,这是华南年平均SPEI指数突变的开始。年平均SPEI指数在突变后与突变前的平均值相差0.167。从平均SPEI指数年际变化来看,20世纪90年代中期以来该区域偏旱的年份明显增多,连续偏旱年景频繁出现,且干旱趋势明显增强。从1961年到2010年,该地区的平均SPEI指数以0.035/10a的速度下降;若只计算1981到2010年,这种下降速度高达0.099/10a。

2.2 SPEI 指数线性趋势的空间分布

图2给出了1961 - 2010年华南区域SPEI指数线性变化趋势空间分布图。由图2可以看出,该区域仅有两个点的SPEI指数呈现上升趋势,占全部站点总数的4%,都没有通过0.1显著水平的检测。其余各地SPEI指数均呈现不同程度的下降趋势,且广西西部和南部地区以及海南岛境内的站点下降趋势明显。共有12个站点SPEI指数下降趋势通过0.1显著水平检验,占站点总数的24%;另有6个站点下降速率超过0.04/10a。

总体来说,华南地区呈现大范围的干旱趋势,就区域而言,海南岛干旱化的趋势最明显,广西次之,广东最轻。

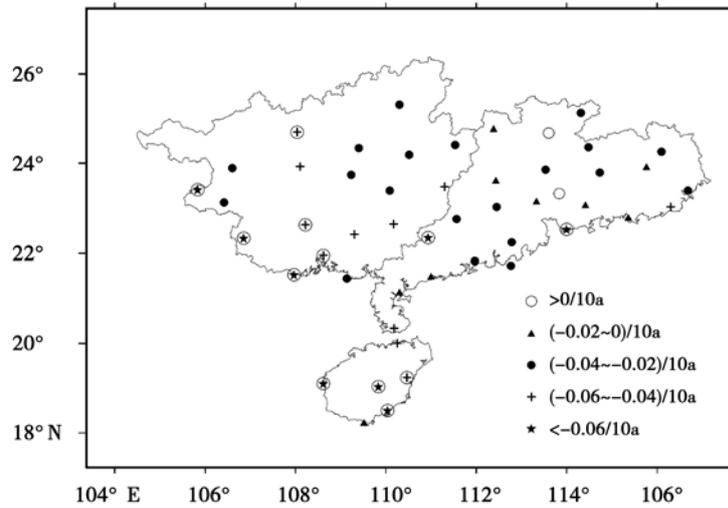


图 2 1961 - 2010 年华南区域 SPEI 指数的线性变化趋势的空间分布 (外面圆圈表示通过 0.10 显著性检验)

Fig. 2 Spatial distribution of linear variation trend of SPEI index in south China from 1961 to 2010 (Stations with circles are statistically significant at 90% confidence level)

2.3 干旱事件年代际变化趋势

分别计算了 50 a 每个站的逐月 SPEI 值,当月 $SPEI \leq -2$ 时,即认为极端干旱月, $SPEI \leq -1$ 时,即认为中度干旱月。每站发生一次记为一站次,分别计算各年代华南地区极端干旱和中度干旱发生的站次数。由图 3(a) 可以看出,华南地区极端干旱事件发生的次数明显增加,20 世纪 80 年代发生极端干旱的频率最小,21 世纪初发生极端干旱的频率最大。发生极端干旱频率最大的年代和最少的年代相比,两者相差约 2.58 倍。由各年代月 $SPEI \leq -1$ 所发生的频次图 3(b),可以看出华南中度干旱的发生频率有一个明显的增加趋势,该地区 20 世纪 70 年代中度干旱发生频率最小,其后逐年代增加,但中度干旱发生频次的增长速度没有极端干旱事件增长的比例大。

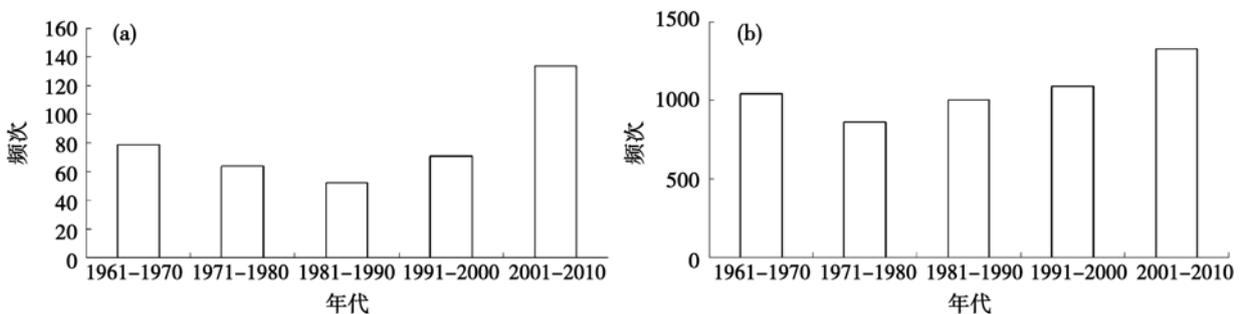


图 3 华南不同年代极端干旱事件 (a) 和中度干旱事件 (b) 频次

Fig. 3 Frequencies of extreme drought events (a) and moderate drought events (b) in south China

2.4 不同年代干旱持续时间

为更全面的反应干旱变化特征,本研究对不同年代干旱事件 ($SPEI < -0.5$) 持续时间进行了统计(表 2)。最长时间的持续干旱为 8 个月,出现过 2 次,分别是在 1977 年的钦州和 2007 年的三亚。其余统计结果见表 2,持续时间超过 7 个月的干旱事件出现过 12 次,而 21 世纪初的前 10 a 生过 8 次;从其他连续干旱持续时间统计结果来看,20 世纪 70 年代的干旱持续时间最短,其后干旱持续时间开始延长。

表2 不同年代干旱持续时间统计表
Table 2 Statistics of drought duration in different decades

年代	连续干旱月数					
	2	3	4	5	6	7
1961 - 1970	439	162	64	25	7	0
1971 - 1980	357	110	44	13	3	2
1981 - 1990	475	160	49	16	7	1
1991 - 2000	503	174	64	24	2	1
2001 - 2010	567	217	95	42	13	8

3 结论与讨论

基于我国华南地区 50 个站的月降水和月平均气温资料,利用标准化降水蒸散指数(SPEI),分析了 1961 到 2010 年的干旱趋势、极端干旱发生频率及干旱持续时间,得到以下几点事实:

从时间变化上看,在 1961 到 2010 年的 50 a 间,华南地区经历了 5 个连续干旱时段,特别是 20 世纪 90 年代中期以来,该区域偏旱的年份明显增多,连续偏旱年景频繁出现,且干旱趋势明显增强。从 SPEI 数值大小上看,平均 SPEI 指数呈现先上升后持续下降的趋势,20 世纪 70 年代中期以后整体上呈现干旱化趋势。1998 年是华南年平均 SPEI 指数突变的开始。从干旱事件的发生次数和干旱的持续时间上也可以发现,70 年代是华南地区干旱最轻的一个时段,其后干旱逐渐加重,在 21 世纪初达到最重。21 世纪初的前 10 a 发生了 7 次干旱,而且 2003,2004,2007 年是历史上最早的 3 a。

从空间分布上看,1961 到 2010 年,华南区域 96% 的站点 SPEI 指数呈现出下降趋势,24% 的站点下降趋势通过 0.1 显著水平检验。下降最迅速的站点分布在广西的南部和西部,以及海南岛。海南岛干旱化趋势最为集中和明显,6 个站点有 4 个的 SPEI 指数呈现显著下降,而且无一上升。广东省干旱化的趋势最轻。

气象干旱发生的原因可以归结为降水的减少或蒸散的增大。华南地区降水呈现微弱增加趋势(0.65%/10 a),年平均气温升温速率约为 0.16°C/10 a^[17],降水增多而 SPEI 指数减小,这说明温度在该地区干旱化中起了重要的作用,降水的微弱增加没有抵消温度上升带来的蒸散量增大。SPEI 指数很好地反映了气候变暖引起的干旱化趋势。另外,华南地区降水日数呈减少趋势,降水分布更为集中^[17],这也将会导致极端干旱事件的进一步增多。

参考文献:

- [1] Dai A G, Trenberth K E, Qian T. A global dataset of palmer drought severity index for 1870 - 2002: relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. *Journal of Hydrometeorol*, 2004, 5:1117 - 1130.
- [2] Nicholls N. The changing nature of Australian droughts[J]. *Clim Change*, 2004, 63: 323 - 336.
- [3] 马柱国,符淙斌. 1951 ~ 2004 年中国北方干旱化的基本事实[J]. *科学通报*, 2006, 50(20): 2429 - 2439.
MA Zhuguo, FU Zongbin. The basic facts of northern China from 1951 to 2004 drought [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2006, 50(20): 2429 - 2439. (in Chinese)
- [4] 章大全,张璐,杨杰,等. 近 50 年中国降水及温度变化在干旱形成中的影响[J]. *物理学报*, 2010, 59(1): 655 - 663.
ZHANG Daquan, ZHANG Lu, YANG Jie, et al. The impact of temperature and precipitation variation on drought in China in last 50 years[J]. *Acta Physic Sinica*, 2010, 59(1): 655 - 663. (in Chinese)
- [5] 黄晚华,杨晓光,李茂松,等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58a 演变特征[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50 - 59.
HUANG Wanhua, YANG Xiaoguang, LI Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(7): 50 - 59. (in Chinese)
- [6] 贺晋云,张明军,王鹏,等. 近 50 年西南地区极端干旱气候变化特征[J]. *地理学报*. 2011, 9(66): 1179 - 1190.
HE Jinyun, ZHANG Mingjun, WANG Peng, et al. Climate characteristics of the extreme drought events in southwest China during recent 50 years [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2011, 66(9): 1179 - 1190. (in Chinese)
- [7] 周明森,简茂球. 广东近 46 年秋季干旱特征分析[J]. *中山大学学报:自然科学版*, 2009, 48(增刊): 197 - 200.
ZHOU Mingsen, JIAN Maoqiu. Characteristics of autumn drought in recent 46 - year in Guangdong[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2009, 48(S): 197 - 200. (in Chinese)
- [8] 俞胜宾,翟盘茂,张强. 1961 ~ 2004 海南岛干旱演变特征分析[J]. *热带作物学报* 2006, 3(27): 111 - 115.

- YU Shengbin, ZHAI Panmao, ZHANG Qiang. Variation of characteristics of drought in Hainan island during 1961 ~2004[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2006, 27(3): 111 – 115. (in Chinese)
- [9] Richard R, Heim J R. A review of twentieth century drought indices used in the United States Bull[J]. Amer Meteor Soc, 2002, 83:1149 – 1165.
- [10] 李伟光,陈汇林,朱乃海,等. 标准化降水指数在海南岛干旱监测中的应用分析[J]. 中国生态农业学报,2009,17(1):178 – 182.
LI Weiguang CHEN Huilin ZHU Naihai, et al. Analysis of drought monitoring on Hainan Island from standardized precipitation index[J]. Chinese Journal of Eco – agriculture, 2009,17(1):178 – 182. (in Chinese)
- [11] Dubrovsky M, Svoboda M, Trnka M J, et al. Application of relative drought indices in assessing climate – change impacts on drought conditions in Czechia[J]. Theor Appl Climatol,2008, 96:155 – 171.
- [12] 张强, 邹旭恺, 肖风劲. 气象干旱等级[S]. 北京:中国标准出版社, 2006.
ZHANG Qiang, ZHOU Xukai, XIAO Fengjin, Classification of Meteorological Drought Category [S]. Beijing: Standards Press of China, 2006. (in Chinese)
- [13] Vicente – Serrano S M, Beguería S, López – Moreno J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index[J]. Journal of Climate,2010, 23:1696 – 1718.
- [14] Vicente – Serrano S M, Beguería S, López – Moreno J I, et al. A new global 0.5° gridded dataset (1901 – 2006) of a multiscalar drought index: comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index[J]. Journal of Hydrometeor, 2010,11: 1033 – 1043.
- [15] Vicente – Serrano S M, Juan I L M, Jorge L, et al. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region[J]. Advances in Global Change Research, 2011, 46: 23 – 40.
- [16] Patricia A J S, Wang L, Toshio K. Modeling the hydrologic responses of the Pampanga River Basin, philippines: a quantitative approach for identifying droughts[J]. Water Resources Research, 2011, 47, W03514, 21.
- [17] 中国气象局. 华南区域气候变化评估报告决策者摘要 2011[R]. 北京:气象出版社, 2011.
China Meteorological Administration. Southern Regional Climate Change Assessment Report Summary for Policymakers,2011[R]. Beijing: Meteorological Press, 2011. (in Chinese)