

基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标及其适用性^{*}

王春林^{1**} 郭 晶² 陈慧华¹ 刘 霞¹

(¹ 广东省气候中心, 广州 510080; ² 天津市气候中心, 天津 300074)

摘 要 根据土壤水分平衡原理, 采用 Penman-Monteith 公式计算可能蒸散, 逐日滚动模拟土壤有效水分, 提出基于土壤水分(SM)的逐日干旱动态监测指标。通过与《气象干旱等级》国家标准中标准化降水指数(SPI)、相对湿度指数(MI)和综合气象干旱指数(CI)相比较, 分析了 SM 干旱动态监测指标在广东的适用性特征。结果表明: (1) 基于 SM 统计的干旱频发时段(11 月—翌年 4 月)比少雨时段(10 月—翌年 3 月)滞后 1 个月, SM 指标能够刻画干旱相对于降水年变化的滞后效应和逐渐发展的特征, 客观反映广东干旱频率季节变化特征; (2) SM 干旱指标自动隐含了降水-蒸发过程的时间累积效应, 物理意义清晰, 能够刻画干旱发生、发展和结束过程的丰富细节, 在对于旱过程发展渐进性、降水敏感性和过程完整性方面, 具有较好的应用价值。

关键词 土壤水分; 模拟模型; 干旱指标; 动态监测

中图分类号 P49 **文献标识码** A **文章编号** 1000-4890(2011)2-0401-07

Dynamic drought-monitoring index based on soil moisture simulation model and its applicability. WANG Chun-lin^{1**}, GUO Jing², CHEN Hui-hua¹, LIU Xia¹ (¹Guangdong Climate Center, Guangzhou 510080, China; ²Tianjin Climate Center, Tianjin 300074, China). *Chinese Journal of Ecology*, 2011, 30(2): 401-407.

Abstract: According to the principles of soil water balance, Penman-Monteith function was adopted to calculate potential evapotranspiration. The daily soil available moisture was simulated, and the daily dynamic drought-monitoring index was put forward based on soil moisture (SM). With the comparison of the standardized precipitation index (SPI), relative moisture index (MI), and combined meteorological drought index (CI) recommended by the 'meteorological drought levels of National Standards' (GB/T 20481-2006), the applicability of the daily dynamic drought-monitoring index based on SM in Guangdong was evaluated, and the results showed that the drought season (from November to next April) based on SM lagged one month, compared to rain-less period (from October to next March). The SM index could describe the lag effect and gradual change characteristics of drought relative to the annual change of precipitation, and objectively reflect the seasonal distribution of drought frequency in Guangdong. The drought index based on SM automatically implied the time cumulative effect of precipitation-evaporation process, and thereby, could describe the start, development, and end of drought process in detail. In terms of progressive development, precipitation sensitivity, and integrity of drought course, the drought index based on SM was of good application value.

Key words: soil moisture; simulation model; drought index; dynamic monitoring.

干旱是我国对农业生产影响最大的自然灾害, 具有发生频率高、持续时间长、影响范围广的特点(宋连春等, 2003; 张强等, 2009)。据统计, 近 50 多

年来, 我国平均每年干旱受旱面积达到 20 多万 km² (袁文平和周广胜, 2004b)。以广东为例, 虽然总体上降水量丰富, 但由于降水时空变率大(陈创买等, 1997; 贺海晏, 1998), 兼之太阳辐射强、气温高、蒸腾蒸发量大、作物生长期长, 因此区域性、季节性干旱十分突出(宋丽莉等, 2001; 郭晶等, 2008a; 2008b)。据统计, 1950 年以后全省平均每年受旱面积近 5000

^{*} 国家自然科学基金项目(509010315)和公益性行业(气象)科研专项(2009416055)资助。

^{**} 通讯作者 E-mail: wangcl@grmc.gov.cn

收稿日期: 2010-08-25 接受日期: 2010-11-25

km²,其中 1991 年秋冬春连旱更导致受旱面积达 22400 km²。随着全球气候变暖,全球及区域性水平衡、干湿状况及其时空特征将发生变化,极端干旱事件可能会更加严重(杜尧东等,2004;王春林等,2007)。从 2001—2005 年春,广东全省遭遇了罕见的连续 5 年秋冬春连旱,直接农业经济损失 30 多亿元。

全球水资源和水循环的研究已经成为全球变化科学一个新的战略重点,准确地评估与监测干旱的发生发展,是进一步采取科学的对策以减少不良影响的关键(袁文平和周广胜,2004b)。开展干旱动态监测和干旱影响定量评估,一直是政府部门开展防旱减灾工作的迫切需求,也是国际性学术难题,其中的首要问题就是干旱指标问题。王春林等(2006,2007)建立了一套基于土壤水分逐日模拟模型的干旱监测指标体系,能比较客观地描述干旱的发生、发展、持续、解除等过程,实现对干旱的动态监测与定量评估,取得了良好的业务效果。本文旨在通过与中国气象局业务中推荐的综合气象干旱指数 CI(中国国家标准化管理委员会,2006;邹旭恺和张强,2008)相比较,分析基于土壤水分模拟的干旱动态监测指标的适用性特征,为在更大范围推广应用提供依据和参考。

1 逐日土壤水分模拟模型

考虑目前气象台站资料获取情况,借鉴帕默尔(Palmer)旱度模式中土壤水分平衡概念(Ji & Peters,2003;Quiring & Papakryiakou,2003;刘庚山等,2004;刘巍巍等,2004),建立土壤水分逐日模拟模型(王春林等,2006;2007)。模型基本框架是把土壤分为上、下 2 层,上层近似等于耕作层,厚度约 15 cm,假定其最大有效含水量(相当于田间持水量) A_{\max} 为 30 mm;下层土壤相当于耕作层以下约 1 m 厚土壤,下层土壤最大有效含水量 B_{\max} 本文取值为 250 mm。理论上 B_{\max} 取值与有效耕作层深度、土壤性质、地下水埋深、补水条件等因素有关,不同地区可以参考王春林等(2007)对干旱指标敏感性分析进行调整。

逐日土壤水分计算包括降水(补水)过程和蒸散(失水)过程,并优先考虑降水过程,然后考虑蒸散过程(图 1)。计算中约定 A_0 、 A_1 、 A_2 分别为上层土壤前一天末、降水过程后、蒸散过程后的有效含水量, B_0 、 B_1 、 B_2 分别为下层土壤前一天末、降水过程后、蒸散过程后的有效含水量。

降水过程:假定降水量优先补充上层土壤,当上层土壤有效含水量达到其最大值 A_{\max} 后,多余水分

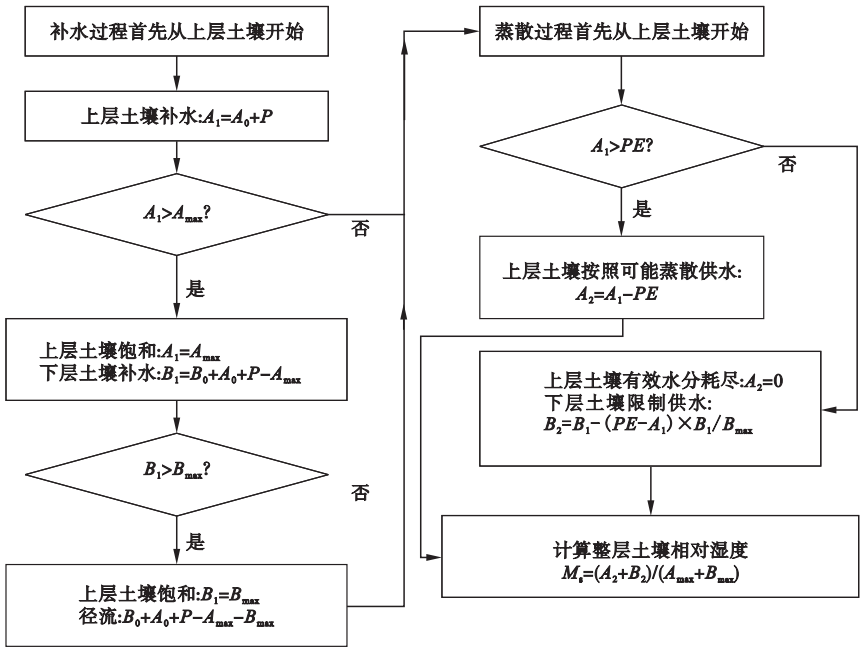


图 1 逐日土壤水分动态计算流程

Fig. 1 Dynamic calculation flow chart of daily soil moisture

A_0 、 A_1 、 A_2 分别为上层土壤前一天末、降水过程后、蒸散过程后的有效含水量, B_0 、 B_1 、 B_2 分别为下层土壤前一天末、降水过程后、蒸散过程后的有效含水量, A_{\max} 、 B_{\max} 分别为上层、下层土壤最大有效含水量, PE 为最大可能蒸散,根据 Penman-Monteith 修正公式计算。

补充下层土壤;当下层土壤有效含水量达到其最大值 B_{\max} 后,多余水分产生径流。

降水量(P)补充上层土壤水分:

$$A_1 = A_0 + P \tag{1}$$

若 $A_1 > A_{\max}$, 则 $A_1 = A_{\max}$, 此时上层土壤达到田间持水量。更多的降水开始补充下层土壤, 可供补充下层土壤的水量为: $A_0 + P - A_{\max}$, 下层土壤补水过程为:

$$B_1 = B_0 + A_0 + P - A_{\max} \tag{2}$$

若 $B_1 > B_{\max}$, 则 $B_1 = B_{\max}$, 此时下层土壤也达到最大有效含水量, 更多的补充将产生径流, 径流量为: $B_0 + A_0 + P - A_{\max} - B_{\max}$ 。

蒸散过程: 假定实际蒸散在上层土壤中以可能速率发生, 直到耗尽所有上层土壤水分, 不足部分从下层土壤中散失, 下层土壤实际供水量取决于前一天末的下层土壤有效含水量。可能蒸散 PE 是本模型中重要的水分支出项之一, 准确地测定和估算 PE 是干旱指标能否精确反映干旱程度的关键(袁文平和周广胜, 2004b)。本文 PE 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 修正公式计算(Monteith, 1975; Allen *et al.*, 1998)。

经过补水过程后, 若 $A_1 > PE$, 则,

$$A_2 = A_1 - PE \tag{3}$$

若 $A_1 < PE$, 则设定 $A_2 = 0$, 表示表层土壤有效水分已经耗尽, 不足的蒸散($PE - A_1$) 开始从下层土壤中获取。下层土壤实行条件供水, 实际供水量为需求量($PE - A_1$) 乘以下层土壤有效含水量 B_1 占 B_{\max} 的比值, 即: $(PE - A_1) \times B_1 / B_{\max}$, 此时, 下层土壤最后剩余有效含水量为:

$$B_2 = B_1 - (PE - A_1) \times B_1 / B_{\max} \tag{4}$$

采用土壤相对湿度 SM 刻画干旱程度(表 1), SM 计算如下:

$$SM = (A_2 + B_1) / (A_{\max} + B_{\max}) \tag{5}$$

2 综合干旱指标定义

气象干旱综合指数 CI 是以 SPI 、 MI 为基础建立的一种综合指数(中国国家标准化管理委员会, 2006; 邹旭恺和张强, 2008)。

$$CI = aSPI_{30} + bSPI_{90} + cMI_{30} \tag{6}$$

式中: SPI_{30} 、 SPI_{90} 为近 30 和 90 d 标准化降水指数, MI_{30} 为近 30 d 相对湿润度指数, a 、 b 、 c 为权重系数, 分别取 0.4、0.4、0.8。根据 CI 的干旱等级划分标准见表 1。

标准化降水指数 SPI (standard precipitation index) 是先求出降水量 I 分布概率, 然后进行正态标准化而得(McKee *et al.*, 1993; 袁文平和周广胜, 2004a; 张强等, 2009), 根据 SPI 的干旱等级划分标准如表 1, 理论上无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱出现频率依次为 69.1%、15.0%、9.2%、4.4% 和 2.3%。

相对湿润度指数 MI 是某时段降水量与同一时段长有植被地段的最大可能蒸发量:

$$MI = \frac{P - PE}{PE} \tag{7}$$

式中: P 为某时段的降水量, PE 为某时段的可能蒸散量, 采用 FAO 推荐的 Penman-Monteith 公式(Monteith, 1975; Allen *et al.*, 1998) 计算。根据 MI 的干旱等级划分标准见表 1。

3 适用性分析

3.1 干旱频率的季节分布

广东降水具有明显季节变化特征, 4—9 月为多雨时段, 月平均降水量均在 150 mm 以上, 合计占全年降水量的 80% 以上, 10 月—翌年 3 月为少雨时段(表 2)。根据 SM 干旱指标, 轻等以上干旱日出现频率(简称干旱频率) 全省年平均为 21.5%, 其中 11 月—翌年 4 月为干旱频发时段, 干旱频率均在

表 1 标准化降水指数 SPI 、相对湿润指数 MI 、综合干旱指数 CI 及土壤相对湿度 SM 的干旱等级标准
Table 1 Drought criteria of standard precipitation index (SPI), relative moisture index (MI), comprehensive drought index (CI) and soil moisture (SM)

等级	类型	SPI	MI	CI	SM
0	无旱	$-0.5 < SPI$	$-0.40 < MI$	$-0.6 < CI$	$0.6 < SM$
1	轻旱	$-1.0 < SPI \leq -0.5$	$-0.65 < MI \leq -0.40$	$-1.2 < CI \leq -0.6$	$0.5 < SM \leq 0.6$
2	中旱	$-1.5 < SPI \leq -1.0$	$-0.80 < MI \leq -0.65$	$-1.8 < CI \leq -1.2$	$0.4 < SM \leq 0.5$
3	重旱	$-2.0 < SPI \leq -1.5$	$-0.95 < MI \leq -0.80$	$-2.4 < CI \leq -1.8$	$0.3 < SM \leq 0.4$
4	特旱	$SPI \leq -2.0$	$MI \leq -0.95$	$CI \leq -2.4$	$SM \leq 0.3$

20%以上,5—10月干旱频率在10%以下,具有与降水相似的年变化趋势。值得注意的是,干旱频发时段(11月—翌年4月)比少雨时段(10月—翌年3月)滞后1个月,全年最早月份1月(干旱频率为50.4%)比月降水最少的12月滞后1个月,表明SM指标能够刻画干旱发生发展相对于降水年变化的滞后效应。

由于4—9月降水的持续影响,10月尽管降水量锐减但干旱频率并不高,反映出干旱过程发生发展的时间渐进性特征;4月汛期开始,因此干旱频率相对3月迅速回落,反映出干旱过程由于雨季到来迅速缓解的特征。

从不同等级干旱频率逐月变化看(表2),轻旱最高频率出现在11月(19.7%),中旱最高频率出现在12月(18.8%),重旱最高频率出现在1月(12.0%)、2月(12.3%),极旱最高频率出现在3月(6.1%),揭示干旱从11月—翌年3月渐进发展的特征。

根据CI指数统计的干旱频率(表2),全省全年干旱频率平均为27.8%,高于根据SM指标统计的干旱频率。从逐月变化看,4—9月干旱频率低于20%,10月—次年3月高于30%,最高值出现在月降水最少的12月,最低值出现在月降水最多的6月,年变化动态与降水一致,未反映出干旱发生发展相对降水季节动态的滞后效应。

根据构成CI的SPI₃₀、SPI₉₀和MI₃₀三个指标统计的干旱频数看出(表2),基于SPI₃₀和SPI₉₀的干旱频率与理论频率(轻旱15.0%、中旱9.2%、重旱4.4%和极旱2.3%)非常接近,没有明显的年内波动,基于MI₃₀的干旱频率(27.1%)略低于基于SPI的干旱频率,具有与降水显著一致的年变化特征。

3.2 干旱过程分析

选择2002年广州秋冬春连旱过程为例,从逐日SM、CI、SPI₃₀和MI₃₀变化可以看出干旱的发生、发展和结束过程中细节(图2)。根据降水(P)和灾情资料分析,2002年广州秋冬春连旱过程从2001年

表2 逐月降水量(mm)及不同干旱指标各等级干旱出现频率(%)
Table 2 Monthly precipitation (mm) and occurring frequency (%) of different grades of drought derived by various drought index

指标	等级	1月	2月	3月	4月	5月	6月	7月	8月	9月	10月	11月	12月	全年
降水量(mm)		44	76	107	205	279	288	234	252	162	81	40	34	1802
SM	轻旱	17.2	14.4	11.6	6.7	2.1	0.8	0.4	0.7	1.3	6.8	19.7	19.3	8.4
	中旱	18.0	16.0	11.1	5.6	1.6	0.6	0.2	0.1	0.2	1.9	10.3	18.8	7.0
	重旱	12.0	12.3	9.5	4.3	1.2	0.4	0.1	0.0	0.0	0.3	2.1	8.4	4.2
	极旱	3.1	5.5	6.1	3.5	1.7	0.4	0.1	0.1	0.0	0.1	0.2	1.1	1.8
	合计	50.4	48.1	38.3	20.1	6.6	2.1	0.9	0.9	1.6	9.1	32.3	47.6	21.5
CI	轻旱	21.9	19.2	16.1	8.8	5.7	5.9	9.0	9.8	10.7	17.4	22.6	26.3	14.4
	中旱	17.7	14.6	10.3	4.9	3.9	3.4	4.6	5.2	5.7	11.2	16.7	17.6	9.7
	重旱	5.0	4.8	4.1	2.8	1.9	1.3	1.2	1.4	1.7	4.4	5.2	4.3	3.2
	极旱	0.6	0.6	1.0	1.1	1.4	0.3	0.2	0.1	0.5	0.6	0.3	0.3	0.6
	合计	45.3	39.2	31.4	17.6	12.9	10.9	15.0	16.6	18.6	33.6	44.7	48.4	27.8
SPI ₃₀	轻旱	13.0	13.7	14.1	15.0	12.8	14.2	14.5	13.9	14.6	13.0	13.7	15.9	14.0
	中旱	10.9	9.2	7.5	8.2	7.8	8.7	8.4	9.3	8.6	8.6	11.4	12.2	9.2
	重旱	6.2	5.0	4.0	4.0	4.4	4.8	4.3	4.8	4.1	5.3	5.4	4.2	4.7
	极旱	1.3	2.0	2.7	2.8	3.4	2.6	2.6	2.5	2.6	2.3	0.6	0.3	2.1
	合计	31.4	29.9	28.4	30.0	28.4	30.3	29.9	30.5	30.0	29.1	31.1	32.6	30.1
SPI ₉₀	轻旱	15.1	19.1	19.6	16.5	11.6	14.2	14.4	14.4	17.1	14.7	14.3	14.5	15.5
	中旱	9.1	12.3	12.7	7.8	6.9	8.0	8.9	9.3	9.1	8.9	9.6	9.2	9.3
	重旱	4.5	3.4	3.8	3.6	4.0	4.3	4.3	4.6	4.0	5.0	4.8	4.5	4.2
	极旱	2.1	1.1	0.4	2.5	3.7	3.2	2.7	2.1	1.8	2.4	2.4	2.7	2.3
	合计	30.9	35.8	36.5	30.3	26.2	29.7	30.4	30.3	31.9	31.1	31.1	30.9	31.3
MI ₃₀	轻旱	12.4	14.1	10.3	4.6	2.4	1.5	3.8	4.0	5.3	12.2	12.5	13.4	8.0
	中旱	11.1	9.8	7.2	2.3	1.0	0.4	1.3	1.2	2.3	8.0	10.3	11.5	5.5
	重旱	15.5	12.7	7.0	2.2	1.0	0.2	0.5	0.3	0.9	8.7	16.3	17.4	6.9
	极旱	15.4	7.6	4.4	0.7	0.2	0.1	0.1	0.1	0.2	6.7	19.8	24.8	6.7
	合计	54.5	44.1	28.9	9.8	4.6	2.1	5.7	5.5	8.7	35.5	58.9	67.1	27.1

采用1971—2000年广东省86个气象站资料。

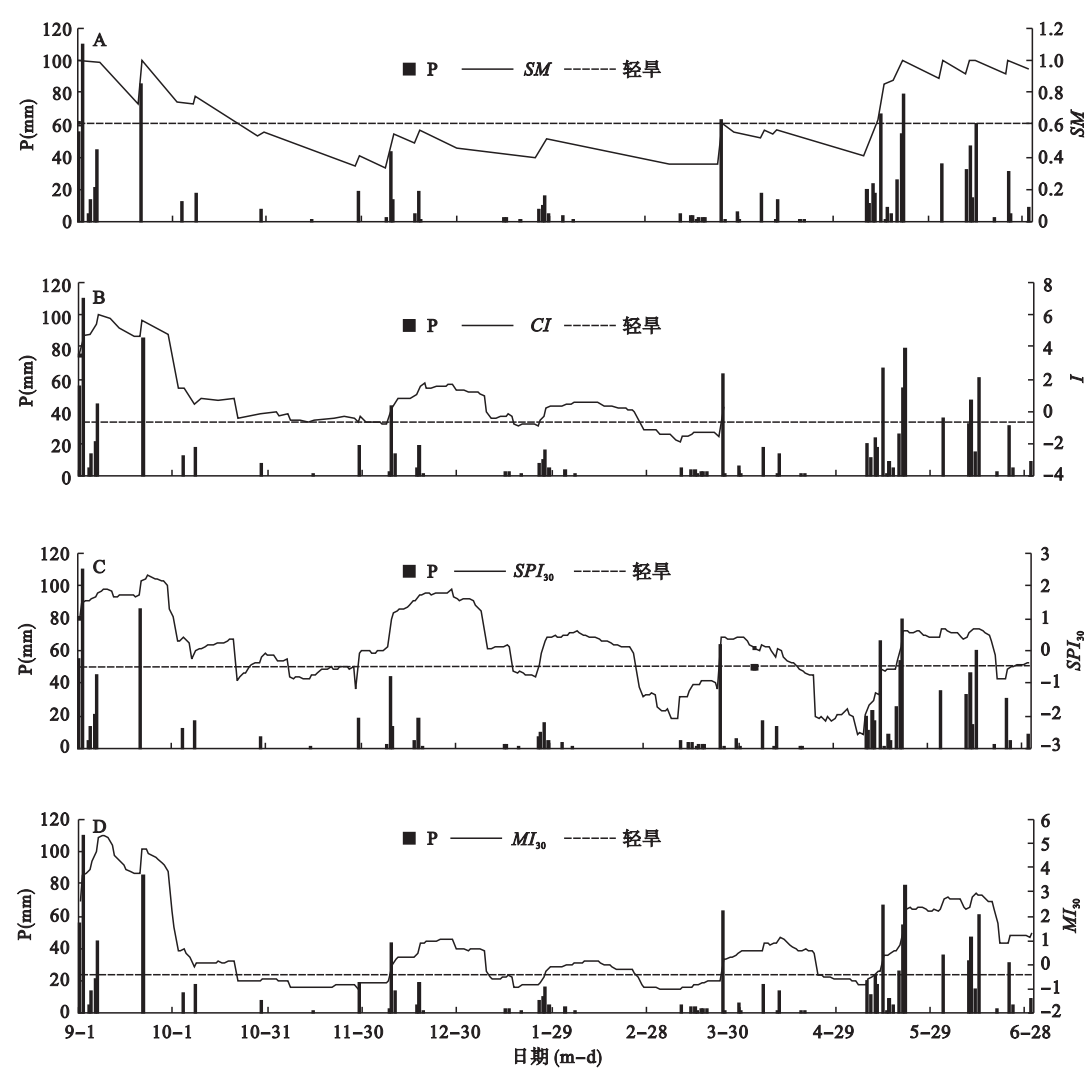


图2 广州2001年9月1日至2002年6月30日秋冬春连旱过程中 SM (A)、 CI (B)、 SPI_{30} (C)、 MI_{30} (D)和降水 P 逐日动态
Fig.2 Daily dynamic of SM (A), CI (B), SPI_{30} (C), MI_{30} (D) and precipitation during the autumn-winter-spring continuous drought course from September 1, 2001 to June 30, 2002 in Guangzhou

10月开始,至2002年5月9日结束,其间虽有3次降水过程,但均不足以解旱,总体上降水量持续偏少。下面从三个方面评价不同干旱指标对于旱过程的监测能力:

(1)发展渐进性。在持续无雨或少雨情况下,理论上干旱强度的增强应该是渐进性的,不应该出现剧烈的增强。基于 CI 、 SPI_{30} 和 MI_{30} 的干旱过程均在10月21日出现干旱指数忽然下降、旱情加剧现象(图2B-D),原因是由于9月21日的降水(85.4 mm)移出近30 d的统计时段导致的 SPI_{30} 、 MI_{30} 忽然减小。同理,对 CI 及 SPI_{90} 还存在90天前降水移出统计过程而导致干旱指数忽然下降问题。而 SM 指数的干旱过程没有这种不合理忽然加剧现象(图2A),表明 SM 指标由于自动隐含降水-蒸发过程的

时间累积效应,能够较好刻画干旱发展过程渐进性特点。

(2)降水敏感性。当遇到降水过程时候,理论上干旱强度应该表现出与降水量级相应的缓解,即干旱指标应该对降水敏感。从图2可见,4个干旱指标的波动均与降水过程相对应,当降水发生时干旱指数同步上升,上升幅度与降水量级相关,表明 SM 和 CI 、 SPI_{30} 、 MI_{30} 一样,均能较好刻画干旱过程对降水敏感性特点。

(3)过程连续性。理想的干旱指标一方面要对降水敏感,但也不能过于敏感,否则干旱指数会由于一些小的降水过程而剧烈波动,导致干旱过程中断。基于 CI 、 SPI_{30} 和 MI_{30} 指标的干旱过程,均被3次降水过程间隔为3~5段不等较短的过程(图2,

B-D), 而 *SM* 的干旱过程没有明显的中断(图 2A), 3 次降水过程只导致干旱程度减轻, 但未大到解旱程度, 保持干旱过程完整, 表明 *SM* 指标能够较好保持干旱过程连续性。

4 讨论

McKee 等(1993)提出的标准化降水指数 *SPI* 不仅考虑了降水服从偏态分布的实际, 而且还进行了正态标准化处理, 对不同时空尺度的干旱监测、评价具有相同的干旱等级划分标准, 适用于多时空尺度旱涝等级对比分析, 具有资料容易获取、简洁明了的优点, 是一种较好的气候干旱指标(邹旭恺和张强, 2008)。 *SPI* 一度替代 Palmer 干旱指数在包括美国在内的许多国家得到广泛应用(Richard & Heim, 2002)。 *SPI* 指标的局限在于仅考虑了降水要素, 对水分支出和地表水分平衡反映的不足, 因而难以反映干旱的内在机理。此外, 由于 *SPI* 指标消除了降水时空差异, 因此不能反映干旱区域性和季节性特征。

相对湿润度指数 *MI* 反映了降水与最大水分需要量的平衡, 从物理原理上看, *MI* 比仅考虑降水因子的 *SPI* 指标要相对合理些, *MI* 在对于干旱频率时空特征的描述能力上比 *SPI* 明显改进, 但基于 *MI* 指标的干旱频率不能刻画干旱发生、发展相对降水季节动态的滞后效应。 *MI* 经常被用于水资源、气候干湿状况评估(郭晶等, 2008b), 而在干旱实时动态监测方面的应用则不多见。

综合气象干旱指数 *CI* 是 *SPI* 和 *MI* 的算术组合, 基于 *CI* 的干旱频率在于 *SPI* 和 *MI* 之间, 既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)的降水量气候异常, 又反映短时间尺度(月)水分亏缺情况(中国国家标准化管理委员会, 2006), 近几年 *CI* 日益成为国内干旱实时监测评估的行业标准(邹旭恺和张强, 2008; 刘晓梅等, 2009)。但从物理意义上看, *CI* 指标不如 *SPI* 和 *MI* 清晰。

一般而言, 合理的干旱指标首先应该能够精确地描述干旱的强度、范围和起止时间; 其次, 指标应该包含明确的物理机制, 充分考虑降水、蒸发散、径流、渗透以及土壤特性等因素对水分状况的影响; 指标的实用性也是关系到它能否被广泛应用的关键(袁文平和周广胜, 2004b)。理想的干旱指数既要

敏感, 均能够正确刻画干旱缓解对降水过程的敏感性, 但由于 *CI* 和 *SPI*、*MI* 这 3 个指标对统计时段内的降水本质上是等权处理的, 一旦有明显的降水过程移出统计时段, 将导致旱情忽然加剧现象, 不符合干旱发展渐进性特点。此外, 这 3 个指标均表现出对降水的过度敏感, 因此容易导致干旱过程中断。基于土壤水分模拟的土壤有效含水量指标 *SM*, 根据土壤水分平衡原理逐日滚动模拟土壤水分, 自动隐含了降水-蒸发过程的时间累计效应, 物理意义清晰, 能够反映不同等级干旱频率时空特征, 能够精细刻画干旱的发生、发展和结束过程, 显示出良好的业务应用性能。

干旱指标中土壤分层方案通常分为水桶型一层方案和强迫-恢复型两层方案, 双层方案较水桶方案相比更加细致的考虑了土壤中水分的渗透、底层水分的补给(袁文平和周广胜, 2004b)。值得指出的是, 本文提出的土壤水分平衡模型是一个概念模型, 是实际土壤水分运动的一个简化。事实上, 在上层土壤并未达到田间持水量时, 上层的水分已经开始向下层土壤补充水分, 同样, 并不是当上层水分蒸发完后下层水分才开始向上层补充, 模型中也没有考虑植被对土壤水分运动的反馈作用。实际应用中, 模型中的下层土壤最大含水量需要结合历史灾情和各地有效耕层深度、土壤性质、地下水埋深、补水条件等因素, 并参考敏感性分析结果进行调整(王春林等, 2007)。

近年来, 人们更加清晰地认识到没有一种单独的干旱指数完全适合于区域尺度干旱监测(侯英雨等, 2007)。机理性干旱指标考虑了与干旱发生有关的气象、土壤、水文以及生物等各种因素, 能够细致的反映局地干旱的强度、持续时间和影响程度, 是目前干旱指标研究的新领域(Heim, 2002; 袁文平和周广胜, 2004b; 侯英雨等, 2007)。

参考文献

- 陈创买, 郑德娟, 赵仲辉. 1997. 广东干湿气候的特征. 热带气象学报, **13**(3): 194-200.
- 杜尧东, 宋丽莉, 毛慧琴, 等. 2004. 广东地区的气候变暖及其对农业的影响与对策. 热带气象学报, **20**(3): 302-310.
- 郭晶, 景元书, 王春林, 等. 2008a. 基于土壤水分平衡模型的广东干旱时空分布特征. 中国农业气象, **29**(3): 353-357.
- 郭晶, 吴举开, 李远辉, 等. 2008b. 广东省气候干湿状况及其变化特征. 中国农业气象, **29**(2): 157-161.

- 贺海晏. 1998. 近 40 年广东省的旱涝特征. 热带气象学报, **14**(4): 297-305.
- 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 2007. 干旱监测指数研究. 生态学杂志, **26**(6): 892-897.
- 刘庚山, 郭安红, 安顺清, 等. 2004. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展. 自然灾害学报, **13**(4): 21-27.
- 刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 等. 2004. 帕默尔旱度模式的进一步修正. 应用气象学报, **15**(2): 207-215.
- 刘晓梅, 李 晶, 吕志红, 等. 2009. 近 50 年辽宁省干旱综合指数的动态变化. 生态学杂志, **28**(5): 938-942.
- 宋丽莉, 王春林, 董永春. 2001. 水稻干旱动态模拟及干旱损失评估. 应用气象学报, **12**(2): 226-233.
- 宋连春, 邓振镛, 董安祥, 等. 2003. 干旱. 北京: 气象出版社.
- 王春林, 董永春, 李春梅, 等. 2006. 基于 GIS 的广东干旱逐日动态模拟与评估. 华南农业大学学报, **27**(2): 20-24.
- 王春林, 吴举开, 黄珍珠, 等. 2007. 广东干旱逐日动态监测模型及其应用. 自然灾害学报, **16**(4): 36-42.
- 袁文平, 周广胜. 2004a. 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, **28**(4): 523-529.
- 袁文平, 周广胜. 2004b. 干旱指标的理论分析与研究展望. 地球科学进展, **19**(6): 982-991.
- 张 强, 鞠笑生, 李淑华. 1998. 三种干旱指标的比较和新指标的确定. 气象科技, (2): 48-52.
- 张 强, 潘学标, 马柱国, 等. 2009. 干旱. 北京: 气象出版社.
- 中国国家标准化管理委员会. 2006. 气象干旱等级 (GB/T 20481-2006). 北京: 中国标准出版社.
- 邹旭恺, 张 强. 2008. 近半个世纪我国干旱变化的初步研究. 应用气象学报, **19**(6): 679-687.
- Allen RG, Pereira LS, Raes D, *et al.* 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and drainage paper 56, FAO, Rome.
- Ji L, Peters AJ. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices. *Remote Sensing of Environment*, **87**: 85-98.
- McKee TB, Doesken NJ, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales. Preprints of Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, CA. American Meteorological Society: 179-184.
- Monteith JL. 1975. Vegetation and Atmosphere, Vol. 1: Principles. New York: Academic Press.
- Quiring SM, Papakryiakou TN. 2003. An evaluation of agricultural drought indices for the Canadian prairies. *Agricultural and Forest Meteorology*, **118**: 49-62.
- Heim Jr RR. 2002. A review of twentieth century drought indices used in the United States. *Bulletin of the American Meteorological Society*, **83**: 1149-1165.
-
- 作者简介** 王春林,男,1970 年 10 月生,博士,正研高工。主要从事应用气象、生态系统生态学研究。E-mail: wangcl@grmc.gov.cn
- 责任编辑** 王 伟
-