

赵一磊,任福民,李栋梁,等. 2013. 基于有效降水干旱指数的改进研究. 气象, 39(5): 600-607.

基于有效降水干旱指数的改进研究^{* 1}

赵一磊^{1,2} 任福民^{1,2} 李栋梁¹ 刘建永³

1 南京信息工程大学大气科学学院, 南京 210044

2 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

3 空军南苑机场气象台, 北京 100076

提 要: 基于加权平均降水量(WAP)这一有效降水指数, 从两个方面对其进行改进: 确定 WAP 指数中的两个参数以及去除区域性和季节性差异, 从而发展了改进的 WAP 指数, 即 IWAP。在此基础上, 将 IWAP 指数与多因素气象综合干旱指数 C_i 做了对比分析, 结果显示: 在全国大部地区特别是中东部地区, IWAP 指数与 C_i 指数具有良好的相关性, 其中在华中大部、贵州大部、云南南部和新疆南部的部分地区两者的相关系数超过 0.7; IWAP 指数对区域性气象干旱事件的识别在起止时间、影响范围和干旱中心等方面均与 C_i 指数十分一致。IWAP 指数、 C_i 指数和单因素气象干旱指数降水距平百分率 P_a 对比分析显示, 对于单站干旱过程的监测, 在干旱开始时间上 IWAP 指数与 C_i 指数接近, 但 P_a 指数则明显偏晚; 对干旱结束时间的判断三个指数有较好的一致性; 在干旱过程演变的判别效果上, IWAP 指数表现出良好的稳定性, 而 C_i 指数和 P_a 指数可能由于自身算法中的因素影响容易出现不合理的波动乃至中断现象。IWAP 指数的适用也存在一定局限性, 年平均降水量小于 300 mm 的西北地区大部至内蒙古西部这些常年干旱地区和青藏高原大部地区不适宜使用该指数。IWAP 指数具有计算方法简洁、物理意义明确的特点。考虑到它基于单一降水因子这一特性, 该指数不仅便于业务应用, 而且在研究中, 特别是在现有气候模式输出要素有限的情况下, 对干旱的模拟和预估具有更加明显的优势。

关键词: 有效降水, 干旱指数, 改进研究

中图分类号: P468

文献标识码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.05.008

Study on Improvement of Drought Index Based on Effective Precipitation

ZHAO Yilei^{1,2} REN Fumin^{1,2} LI Dongliang¹ LIU Jianyong³

1 College of Atmospheric Science, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044

2 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

3 Meteorological Station of Nanyuan Airport, Beijing 100076

Abstract: Based on the Weighted Average Precipitation (WAP), an improvement study on drought index was carried out in two aspects. After determining the two parameters of the WAP index and removing regional and seasonal differences, an improved WAP drought index named IWAP index was developed. Then, comparison analysis between IWAP index and C_i index was done. The results show that: IWAP index has a good correlation with C_i index in most of China especially in mid-eastern China with correlation coefficients above 0.7 in most of Central China, most of Guizhou, southern Yunnan and southern Xinjiang. In identifying regional meteorological drought events, IWAP index also shows good consistency with C_i index on beginning time, ending time, impacted area and drought center. Further comparison of IWAP index, C_i index and anomaly percentage P_a index on drought processes for individual station shows

* 全球变化重大科学研究计划(2010CB950501)和国家自然科学基金项目(41175075)共同资助

2012 年 12 月 11 日收稿; 2013 年 3 月 20 日收修定稿

第一作者: 赵一磊, 主要从事极端事件方面的研究. Email: nqyzhao@126.com

通信作者: 任福民, 主要从事极端事件和台风研究. Email: fmren@163.com

that *IWAP* index is consistent with *Ci* index on beginning time while *Pa* index generally shows a delayed beginning time. However, the three indices all show good consistency on ending time. In addition, *IWAP* index shows a stable ability during a drought process while *Ci* index and *Pa* index tend to show unreasonable instability due to their algorithms. *IWAP* index also has some limitations, unsuitable to be applied in most of the Tibet Plateau and the regions with annual average precipitation less than 300 mm. *IWAP* index can be calculated in simple way and has clear physical meanings. Considering the nature that the index is only based on precipitation, *IWAP* index is not only convenient for meteorological operation, but also has obvious potential advantages in drought simulation and prediction in the case of limited output elements from current available climate models.

Key words: effective precipitation, drought index, improvement study

引言

我国是世界范围内受气象灾害最严重的国家之一。干旱作为最主要的气象灾害,它的频繁发生对社会经济生产生活等方面造成不可估量的危害。长期以来,干旱一直都是研究的热点之一。

根据研究内容和应用领域的不同,干旱指标通常可分为四类,即气象干旱指标、水文干旱指标、农业干旱指标和社会经济干旱指标。在气象干旱指标方面,前人提出了多种气象干旱指数(Richard et al, 2002; 张强等, 2006)。如果从指数算法中是否仅包含降水一个要素的角度,这些气象干旱指数可以划分为两类:多因素指数和单因素指数。

多因素气象干旱指数包括帕默尔指数、干燥度指数和气象综合干旱指数等。帕默尔指数(Palmer, 1965)表征在一段时间内某地实际水分供应相对于气候适宜水分供应的亏缺状况;基于土壤水分平衡原理,该指数考虑了前期降水量、蒸散量、土壤水分供给、径流和表层水分损失。干燥度指数(Penman, 1948)是表征一个地区干湿程度的指数,亦称湿润指数,其计算涉及水汽压和风速等。气象综合干旱指数(*Ci*)(张强等, 2006)以标准化降水指数和湿润度指数为基础,考虑 30 和 90 d 降水对当前旱涝的作用,同时考虑了近期蒸散作用对干旱的影响,该指数目前在国家气候中心业务中使用。

单因素气象干旱指数包括降水距平百分率指数、标准化降水指数和有效降水指数等。降水距平百分率是最简单的干旱指数,针对不同的时间尺度(候、旬、月、季或年)可得到相应的降水距平百分率指数。标准化降水指数(*SPI*)(McKee et al, 1993;

1995)仅利用降水单一因素,计算某时段内降水量的 Γ 分布概率,再进行正态标准化处理,最终用标准化降水累积频率分布表征干旱的情况,适用于月时间尺度以上气候状况的干旱监测与评估,能较好地反映干旱的强度和持续时间。利用这些已有的干旱指数,学者们已经开展了许多对干旱的研究工作,如张存杰等(1998)、王越等(2007)、邹旭恺等(2005)、杨小利(2007)、侯威等(2012)及赵海燕等(2012)的研究。Byun 等(1999)提出了有效降水(effective precipitation)的概念,认为可以利用日降水量随时间衰减的累积函数来表征前期降水对于当前旱涝的影响。之后 Lu(2009)提出用逐日加权平均降水量(*WAP*)来表征当前的旱涝状况,*WAP* 实际上就是一种有效降水指数,它能在逐日尺度上反映一个地区的干湿状况;但是,由于它保留了降水量的概念,其自身存在区域性和季节性差异的先天不足,即不同气候区域和不同季节之间无法使用统一的标准来比较旱涝程度,这使得它的应用受到极大制约。

尽管气象干旱业务应用中比较多使用多因素气象干旱指数,但对单因素气象干旱指数的发展需求并未因此减弱,特别是在干旱的模拟和预估领域,由于模式输出要素的有限性,对单因素气象干旱指数的需求更高。本文正是立足于上述需求和考虑,基于有效降水干旱指数 *WAP*, 对其进行改进研究,以期得到改进的单因素气象干旱指数。

1 资料和方法

1.1 资料

本文所用资料包括逐日降水资料和综合气象干

旱指数(C_i)资料。逐日降水资料为国家气象信息中心提供的 1961 年 1 月 1 日至 2004 年 12 月 31 日经过均一化处理的全国 723 个站资料和 2005 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日国家气候中心业务使用资料。逐日综合气象干旱指数(C_i)资料为国家气候中心业务使用的 1961 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日资料。考虑到逐日降水资料中存在一定程度的缺漏,通过初步筛选去掉了资料缺测较严重的站点,最后本文选取 579 个站(图略)。

1.2 加权平均降水量(WAP)

本文所用的加权平均降水量(WAP)(Lu, 2009)定义为:

$$WAP \equiv \sum_{n=0}^N a^n P_n / \sum_{n=0}^N a^n \quad (1)$$

其中,参数 N 为超前当前日的最大天数; P_n 为前期第 n 日的降水量, n 为超前当前日的天数, $n=0$ 代表当前日; a 为取值范围(0,1)的参数。当 a 取值趋近于 1 时,式(1)可简化为:

$$WAP = \sum_{n=0}^N \omega_n P_n \quad (2)$$

其中,权重系数 $\omega_n = (1-a)a^n$ 。故式(2)可表示为:

$$WAP = (1-a) \sum_{n=0}^N a^n P_n \quad (3)$$

WAP 能够综合反映前期降水和当天降水对于当天旱涝的影响(Lu, 2009)。由式(3)可知,前期降水对当天旱涝的影响呈指数形式递减。WAP 越大,表明前期降水越多,偏涝;WAP 越小,表明前期降水越少,偏旱。

1.3 区域性极端事件客观识别法

极端天气气候事件通常具有一定的影响范围和持续时间,即是区域性极端事件。Ren 等(2012)发展了一种区域性极端事件客观识别法(an Objective Identification Technique for Regional Extreme Events, OITREE),该方法思路清晰:提出“糖葫芦串”模型,并借助该模型思路,将逐日影响范围合理地“串”成一串从而构成一个完整的区域性事件。该客观识别法包括 5 个技术步骤:单点(站)逐日指数选定、逐日自然异常带分离、事件的时间连续性识别、区域性事件指标体系和区域性事件的极端性判别。其中,逐日自然异常带分离和事件的时间连续

性识别是该方法的两个关键技术;区域性事件指标体系是针对区域性事件的特点专门提出的,包括 5 个单一指数:极端强度、累积强度、累积面积、最大影响面积和持续时间,以及一个综合指数。

2 新指数的建立

2.1 改进思路

首先,WAP 指数中两个参数的确定。关于超前当前日的最大天数参数 N ,参考 2012 年 3 月 8 日国家气候中心组织召开的《气象干旱综合监测指标》评审会上关于需要更加充分地考虑前期降水对当前干旱贡献的业务需求和适当延长考虑前期降水的时效(如云南等地最好从目前实际业务中的 90 天延长至半年)的建议,对参数 N 和 a 的取值可在对比基础上确定。第二步,区域性和季节性差异的去除。由于有效降水 WAP 指数是一个降水量的概念,对于不同地区、不同季节无法使用统一的阈值作为旱涝的标准,因此,有必要对新的 WAP 指数进行无量纲化处理,使干旱判别的标准统一。

最终得到改进的 WAP,即 IWAP(Improved WAP)。

2.2 新指数的建立

第一步,WAP 指数参数的确定

为了选择合适的参数 N 和接近于 1 的参数 a ,图 1 给出了 WAP 指数式(3)中权重系数函数 $\omega_n = (1-a)a^n$ 在 a 的 3 个不同取值下的曲线;为了对 WAP 权重系数变化有更定量的认识,特定义了一个权重系数下降速率 $R_{n,a} = [\omega_{(0,a)} - \omega_{(n,a)}] / \omega_{(0,a)}$,并给出不同参数组条件下该权重系数下降速率表(表 1)。结合图 1 和表 1 可见,当参数 a 取值 0.95 时,WAP 权重系数在超前 90 d 时已较当日减小了 99%,超前 120 d 时已减小了接近 100%;当参数 a 取值 0.99 时,WAP 权重系数在超前 90 d 时才较当日减小了 60%,超前 180 d 时才减小了约 84%;当参数 a 取值 0.97 时,WAP 权重系数在超前 90 d 时较当日减小了 93%,超前 150 d 时已减小了接近 100%。可见,参数 a 取值 0.97 时 WAP 权重系数下降速率适中,结合前面关于改进干旱指数的需求

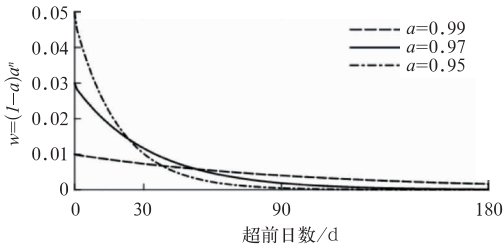


图 1 WAP 指数公式中权重系数函数 $w=(1-a)a^n$ 变化曲线

Fig. 1 Curves of weight function $w=(1-a)a^n$ for daily precipitation in the WAP index

分析,WAP 指数中的参数 N 和 a 分别取值 150 d 和 0.97 相对最好。

第二步,区域性差异和季节性差异的去除

由于有效降水 WAP 指数具有降水量的概念和单位,因此它同时存在显著的区域性差异和明显的季节变化,对于不同气候区域和不同季节而言无法使用统一的标准比较旱涝程度。针对这一局限性,对 WAP 采用距平百分率的概念进行改进,使 WAP 无量纲化:

$$IWAP = c \times \frac{(WAP - \overline{WAP})}{\overline{WAP}} \quad (4)$$

表 1 不同参数组合条件下 WAP 权重系数下降速率

Table 1 The descent rate of WAP weight coefficient under different parameter group

$a \backslash R_{(n,a)}$	n				
	30	90	120	150	180
0.95	79%	99%	100%	100%	100%
0.97	76%	93%	98%	100%	100%
0.99	26%	60%	70%	80%	84%

注:权重系数下降速率 $R_{(n,a)} = (y(0,a) - y(n,a)) / y(0,a)$

其中, \overline{WAP} 为 WAP 的多年平均值(本研究取 1961—2010 年平均), c 为区域控制参数。之所以引入参数 c , 是在反复试验基础上形成的经验结果。过程简述如下:

为了试验 IWAP 指数对于干旱判别的效果,做了干旱日数分布的比较(图 2)。图 2a 为 1961—2010 年基于 C_i 指数统计的干旱(强度在中旱及以上)日数分布,而图 2b~2d 则分别为 IWAP 指数在 -0.4、-0.5 和 -0.6 三种不同阈值下的干旱日数分布。比较图 2a 与图 2b~2d 可以发现,图 2b~2d 在我国中东部地区所反映出来的干旱分布形势比较一致,即自东北到西南呈“低—高一低—弱高”分布,与图 2a 相吻合。但是,图 2b~2d 在西北地区大部

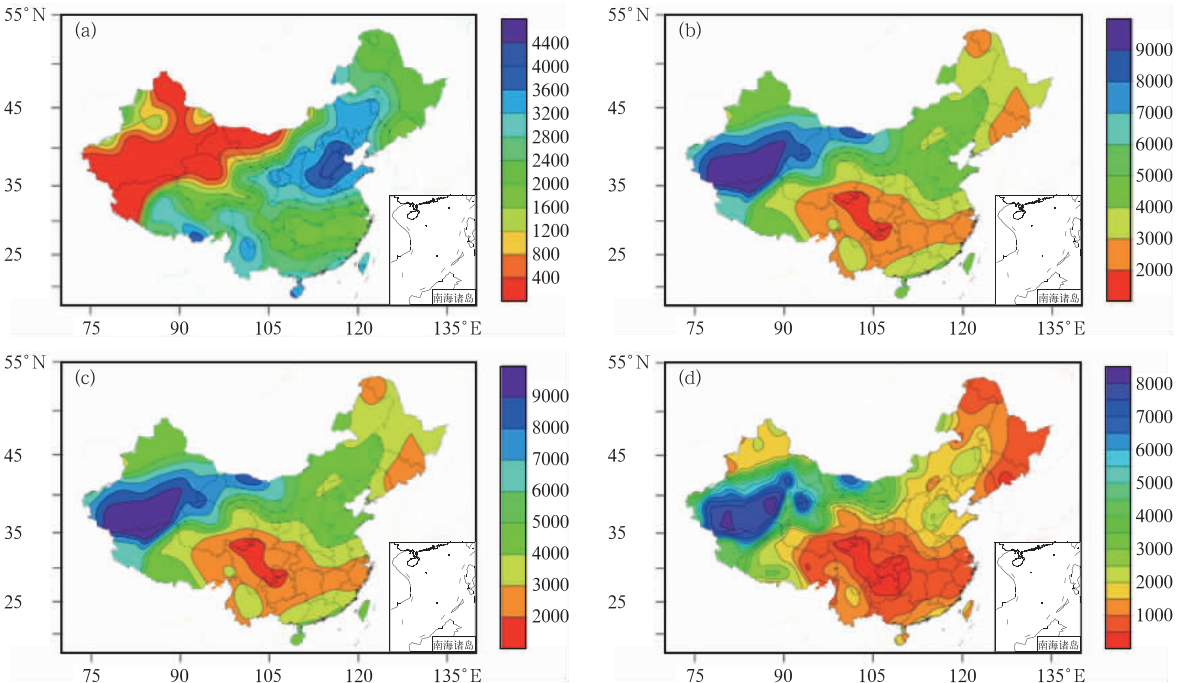


图 2 基于不同指数不同阈值下的干旱日数分布

(a) $C_i \leq -1.2$, (b) $IWAP(c=1) \leq -0.4$, (c) $IWAP(c=1) \leq -0.5$, (d) $IWAP(c=1) \leq -0.6$

Fig. 2 Distributions of the number of drought days under different indices with different thresholds

(a) $C_i \leq -1.2$, (b) $IWAP(c=1) \leq -0.4$, (c) $IWAP(c=1) \leq -0.5$, (d) $IWAP(c=1) \leq -0.6$

至内蒙古西部表现为高值中心,与图 2a 所表现的低值中心完全相反;众所周知,西北地区大部至内蒙古西部在气候区划中属于常年干旱区,而 $IWAP$ 指数主要表征的是季节性干旱,可见该指数不能有效地表征这一地区的季节性干旱。进一步分析了中国区域 1961—2010 年多年平均降水量分布(图 3),发现年平均降水量在 300 mm 及以下的范围正好与图 2b~d 中的西北地区大部至内蒙古西部干旱日数高值区出现惊人的吻合。故考虑引入区域控制参数 c 使得这一地区的干旱日数表现为与图 2a 相一致的低值中心,具体取值如式(5):

$$c = \begin{cases} 1 & (pr > 300 \text{ mm}) \\ 0.02 & (pr \leq 300 \text{ mm}) \end{cases} \quad (5)$$

其中, pr 为年平均降水量。

经过上述处理后最终得到改进的 $IWAP$ 指数。基于引入参数 c 的 $IWAP$ 指数,进一步比较不同阈值下的 $IWAP$ 干旱日数分布,发现当阈值取 -0.5 时, $IWAP$ 指数的干旱 ($IWAP \leq -0.5$) 日数分布(图 4)

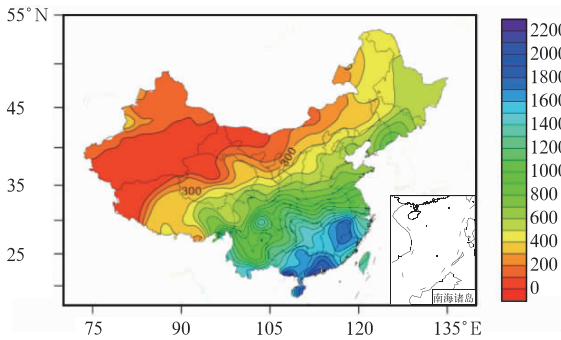


图 3 中国 1961—2010 年年平均降水量分布(单位:mm)
Fig. 3 Distribution of the annual average precipitation in China during 1961—2010 (unit: mm)

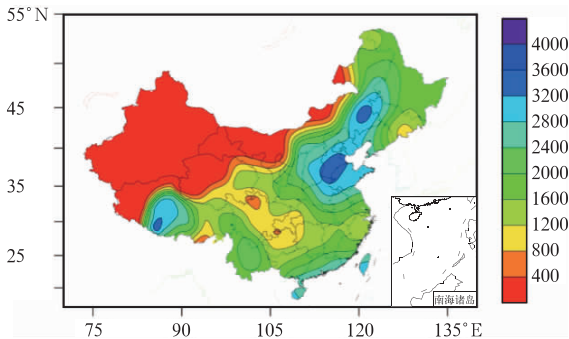


图 4 基于引入参数 c 的 $IWAP$ 指数干旱 ($IWAP \leq -0.5$) 日数分布

Fig. 4 Distribution of the number of drought ($IWAP \leq -0.5$) days under the $IWAP$ index with parameter c

与图 2a 具有更高的一致性,场相关系数高达 0.70。

3 新指数的效果检验

为检验新指数($IWAP$)的效果,采用目前在国家气候中心干旱业务中使用多因素气象综合干旱指数 C_i 作为参照,对比了相关性和区域性气象干旱事件过程的识别;此外,就单站干旱过程,将 $IWAP$ 指数同时与 C_i 指数和针对季尺度的单因素气象干旱指数降水距平百分率(Pa)(张强等,2006)进行对比分析。

3.1 $IWAP$ 与 C_i 的相关性

图 5 给出了 1961 年 1 月 1 日至 2010 年 12 月 31 日逐日 $IWAP$ 指数与 C_i 指数的相关系数空间分布,可以发现除青藏高原西南部小部分地区为负相关外,其余地区为一致的正相关。除青藏高原大部 and 新疆与内蒙古两区的边境局部地区相关系数不足 0.5 以外,全国其余地区普遍超过 0.5,中心值大于 0.7,位于华中大部、贵州大部和云南南部的部分地区。表明在全国大部地区特别是中东部地区, $IWAP$ 指数与 C_i 指数具有较好的一致性。

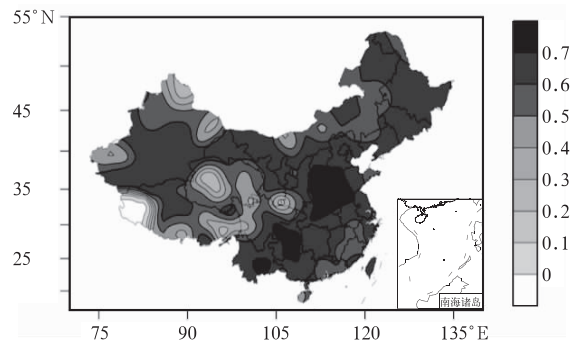


图 5 $IWAP$ 指数与 C_i 指数的相关分布
Fig. 5 Distribution of the correlation coefficient between $IWAP$ index and C_i index

3.2 区域性气象干旱事件过程对比

利用区域性极端事件客观识别法(OITREE),分别基于 $IWAP$ 指数和 C_i 指数针对两个中国区域性极端干旱事件的识别结果进行对比分析。

图 6 是关于 1998/1999 年中国区域性极端气象干旱事件的结果比较。崔冬林(2010)基于 C_i 指数的分析指出此次事件是自 1961 年以来排名第一的中国区域性极端气象干旱事件,持续时间为 1998 年 9 月下旬至 1999 年 5 月中旬,影响范围覆盖华北、

西北东部、黄河中下游地区、西南部分地区和华南,而山西和陕西为此次干旱过程的干旱中心(图 6a)。基于 *IWAP* 指数的识别结果显示,此次事件为自 1961 年以来排名第二的中国区域性极端气象干旱

事件,持续时间为 1998 年 11 月上旬至 1999 年 4 月下旬,华北影响范围(图 6b)较基于 *Ci* 指数的结果略有缩小且略偏南,而山西和陕西亦为此次干旱过程的干旱中心。

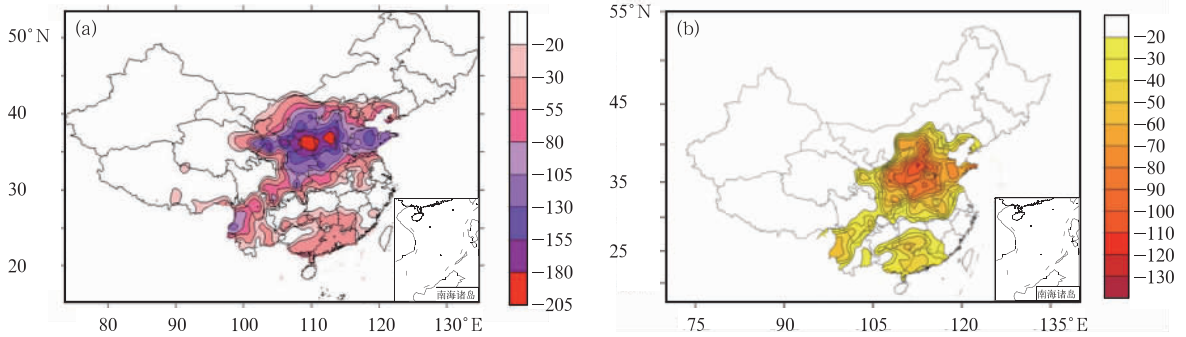


图 6 1998/1999 年中国区域性极端气象干旱事件的过程累积强度空间分布
(a) 基于 *Ci* 干旱指数的结果(崔冬林,2010), (b) 基于 *IWAP* 干旱指数的结果

Fig. 6 Spatial distributions of the cumulative intensities of the 1998–1999 regional extreme drought event in China
(a) result basing on *Ci* drought index (Li et al, 2013), (b) result basing on *IWAP* drought index

崔冬林(2010)基于 *Ci* 指数识别发现 2009/2010 年发生在西南地区的极端区域性气象干旱事件,持续时间为 2009 年 7 月下旬至 2010 年 4 月下旬,干旱中心为云南和贵州(图略)。基于 *IWAP* 指数的识别结果同样显示,此次事件为一次中国区域性极端气象干旱事件,持续时间是 2009 年 10 月下旬至 2010 年 4 月中旬,影响范围和干旱中心(图略)与崔冬林(2010)分析十分吻合。

可见,基于 *IWAP* 指数和 *Ci* 指数对 1998/1999 年和 2009/2010 年两次中国区域性极端气象干旱事件的识别结果十分一致。

3.3 单站干旱过程比较

为了客观检验 *IWAP* 指数对于单站干旱过程的监测能力,挑选历史上两次极端区域性干旱事件(崔冬林,2010)(详见 3.2“区域性气象干旱事件过程对比”)的干旱中心站点,分别与 *Ci* 指数和 *Pa* 指数进行对比分析。

图 7 为 1998/1999 年极端干旱事件过程运城站各指数的演变情况。*Ci* 指数显示此次干旱过程为 1998 年 10 月中旬至 1999 年 3 月中旬, *IWAP* 指数则反映干旱过程为 1998 年 10 月下旬至 1999 年 3 月中旬,而 *Pa* 指数则反映干旱过程为 1998 年 11 月中旬至 1999 年 3 月中旬;即表明对干旱开始时间的判断, *IWAP* 指数与 *Ci* 指数较接近,而 *Pa* 指数则明显偏晚;对干旱结束时间的判断三个指数一致。

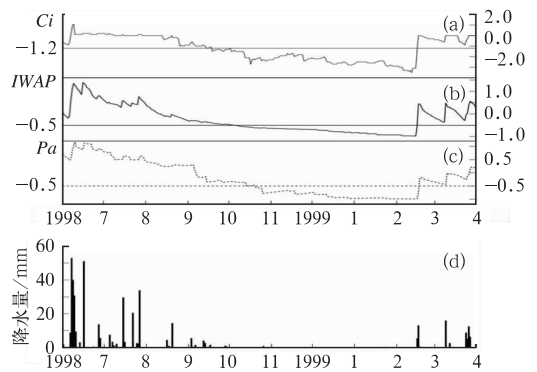


图 7 1998/1999 年区域性极端气象干旱事件过程运城站各指数演变
(a) *Ci* 指数(阈值为-1.2), (b) *IWAP* 指数(阈值为-0.5), (c) *Pa* 指数(阈值为-50%), (d) 日降水量(单位:mm)

Fig. 7 Variation of each index at Yuncheng Station during 1998–1999 regional extreme drought event
(a) *Ci* index with threshold -1.2, (b) *IWAP* index with threshold -0.5, (c) *Pa* index with threshold -50%, (d) daily precipitation (unit: mm)

图 8 为 2009/2010 年极端干旱事件过程昆明站的干旱过程演变情况。通常,昆明的雨季是 5—10 月,旱季是 11 月至次年 4 月。图 8d 表明,2009 年 8 月中旬开始,昆明的降水就明显少于常年,特别是自 2009 年 10 月上旬末至 2010 年 3 月下旬初一共约 140 天内只下了两场雨:11 月中旬末(3 天共下 20.2

mm)和1月下旬末(1天下3.6 mm)。IWAP 指数显示昆明站此次干旱过程为2009年10月初至2010年3月底,在与两次降水相对应旱情出现了两次阶段性缓和,但整个过程持续并于2010年3月下旬达到最强。 C_i 指数表明此次干旱过程为2009年9月中旬至2010年3月底,但这期间于2009年12月上中旬和2010年2月中旬出现了两次中断,旱情最严重时段为2009年11月上旬。 P_a 指数则显示昆明站干旱过程为2009年11月上旬至2010年3月底,但于2月中旬出现了中断。对比发现,在干旱过程的开始时间上,IWAP 指数与 C_i 指数较接近,但 P_a 指数则明显偏晚;对干旱结束时间的判断三个指数相一致。进一步比较三个指数对干旱过程演变的判别效果,发现 C_i 指数出现的两次中断并非发生在降水过程出现的当时,而均为降水过程之后的25天左右,之后指数又迅速回落到干旱状态,这一结果与常识不符,可能主要与该指数计算时过于强调近30 d的标准化降水指数 SPI 值和近30 d相对湿度指数有关,导致这种不合理的波动出现; P_a 指数出现一次中断,也并非发生在降水过程出现的当时,而是滞后于1月下旬末降水过程大约20 d左右的时间,之后又迅速回落到干旱状态,这一结果也

与常识不符,可能主要与 P_a 指数的季节尺度(90 d)以及季节尺度内的气候平均降水量随着进入旱季后逐渐变小从而导致在没有新的降水情况下 P_a 指数不断上升有关。结合当年实际来看,IWAP 指数所反映出来的干旱过程更加符合实况。

4 结论与讨论

针对本文的上述分析,小结如下:

(1) 通过以下两个步骤对有效降水指数 WAP 做了改进:(a)重新确定 WAP 指数中的两个参数、(b)去除区域性和季节性差异,发展了改进的 WAP 指数,即 IWAP。

(2) 与国家气候中心业务使用的 C_i 干旱指数比较结果显示:在全国大部地区特别是中东部地区,IWAP 指数与 C_i 指数具有良好的相关性;IWAP 指数对区域性气象干旱事件的识别在起止时间、影响范围和干旱中心等方面均与 C_i 指数十分吻合。

(3) 就单站干旱过程的监测能力来看,在干旱开始时间上 IWAP 指数与 C_i 指数接近,但 P_a 指数则明显偏晚;对干旱结束时间的判断三个指数有较好的一致性;在干旱过程演变的判别效果上,IWAP 指数表现出良好的稳定性,而 C_i 指数和 P_a 指数可能由于自身算法中的因素影响容易出现不合理的波动乃至中断现象。

(4) IWAP 指数适用的局限性主要存在于以下地区:年平均降水量小于300 mm的西北地区大部至内蒙古西部这些常年干旱地区和青藏高原大部地区。

以上小结显示,相比于多因素气象干旱指数 C_i 和单因素气象干旱指数 P_a ,新发展的 IWAP 指数总体上表现出了良好的特性:IWAP 计算方法更简洁,物理意义更明确。考虑到它基于单一降水因子这一特性,使该指数不仅便于业务应用,而且在研究中特别是在现有气候模式输出要素有限的情况下对于干旱的模拟和预估方面有明显的优势。相信 IWAP 指数可以在未来应用和研究中得到不断的改进和完善。

参考文献

- 侯威,张存杰,高歌.2012.基于气候系统内在层次性的气象干旱指数研究.气象,38(6):701-711.
 崔冬林.2010.近50年中国区域持续性气象干旱事件的客观识别及变化研究.兰州:兰州大学.
 王越,江志红,张强,等.2007.基于Palmer湿润指数的旱涝指标研

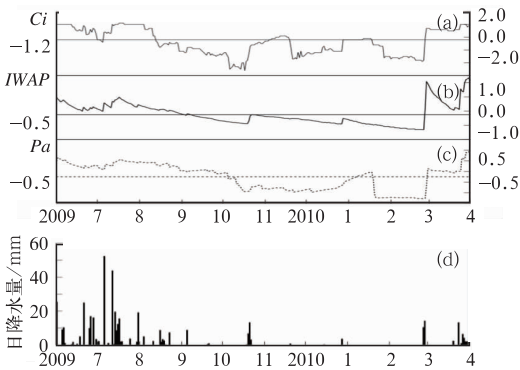


图8 2009/2010年区域性极端气象

干旱事件过程昆明站各指数演变

- (a) C_i 指数(阈值为-1.2), (b) IWAP 指数(阈值为-0.5), (c) P_a 指数(阈值为-50%), (d) 日降水量(单位: mm)

Fig. 8 Variation of each index at Kunming Station during the 1998-1999 regional extreme drought event

- (a) C_i index with threshold -1.2,
 (b) IWAP index with threshold -0.5,
 (c) P_a index with threshold -50%,
 (d) daily precipitation (unit: mm)

- 究. 南京气象学院学报, 30(3):383-389.
- 杨小利. 2007. 西北地区气象干旱监测指数的研究和应用. 气象, 33(8):90-96.
- 张存杰, 王宝灵, 刘德祥, 等. 1998. 西北地区旱涝指标的研究. 高原气象, 17(4):381-389.
- 张强, 邹旭恺, 肖风劲, 等. 2006. 气象干旱等级. GB/T 20481, 中华人民共和国国家标准. 北京: 中国标准出版社:1-17.
- 赵海燕, 高歌, 张培群, 等. 2012. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性. 应用气象学报, 22(6):698-704.
- 邹旭恺, 张强, 王有民, 等. 2005. 干旱指标研究进展及中美两国国家级干旱监测. 气象, 31(7):6-9.
- Byun H-R, Wilhite D A. 1999. Objective quantification of drought severity and duration. J Climate, 12:2747-2756.
- Lu E. 2009. Determining the start, duration, and strength of flood and drought with daily precipitation: Rationale. Geophysical Research Letters, 36, L12707, doi:10.1029/2009GL038817.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1995. Drought Monitoring with Multiple Time Scales. Preprints, Ninth Conf on Applied Climatology, Dallas, TX. Amer Meteor Soc:233-236.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The Relationship of Drought Frequency and Duration to Time Scales. Preprints, Eighth Conf on Applied Climatology, Anaheim, CA. Amer Meteor Soc:179-184.
- Palmer W C. 1965. Meteorological Drought. US Weather Bureau Research Paper 45, 58.
- Penman H L. 1948. Natural evaporation from open water, bare soil and grass. Proceedings of the Royal Society of London. Series A, 193, 120-146.
- Ren F, Cui D, Gong Z, et al. 2012. An objective identification technique for regional extreme events. J Climate, 25:7015-7027.
- Richard R, Heim J. 2002. A review of twentieth century drought indices used in the United States. Bull Amer Meteor Soc, 83(3):1149-1165.