

# 帕尔默旱度指数方法在全国实时旱情监视中的应用

杨 扬<sup>1</sup>, 安顺清<sup>2</sup>, 刘巍巍<sup>2</sup>, 徐 胜<sup>1</sup>, 周国良<sup>1</sup>, 戚建国<sup>1</sup>, 王 琳<sup>1</sup>, 郑 文<sup>1</sup>

(1 水利部水文局, 北京 100053; 21 中国气象科学研究院, 北京 100081)

**摘要:** 在进一步修正的帕尔默旱度指数月模式的基础上研制了帕尔默旱度指数日模型, 同时采用了权重帕尔默旱度指数方法实现了逐日帕尔默旱度指数计算。经过对全国 556 个气象测站的参数调试, 建立了全国范围帕尔默旱度指数实时业务应用系统, 一年多的运行表明, 帕尔默旱度指数确实能够较好地及时反映实时旱涝情况和变化过程。

**关键词:** 旱情监视; 帕尔默旱度指数; 实时业务系统

中图分类号: P3381.6 文献标识码: A 文章编号: 1002-6791(2007)0120052-06

干旱的发生涵盖很多复杂的过程和因子, 不仅与降水的多少及其分配有关, 还与蒸发、土壤含水量、径流量等多种因子有关。我国幅员辽阔, 地理环境多样, 气候复杂, 往往一个地区严重洪涝时另一地区发生严重干旱, 有时同一地区先涝后旱或先旱后涝。旱情可能在连续几天的高温无雨后迅速发生, 也可能由于一场强降水而使某地旱情立即缓解。为了实时监测和评估旱情的发生发展和严重程度, 需要建立气象、水文、农业等多方面的干旱指标。在气象干旱监测评估中, 国内外学者提出了多种形式的干旱指标, 其中帕尔默指数是目前广泛应用的干旱指标之一。

美国帕尔默(W. C. Palmer)在 1965 年根据旱度是水分亏缺量及其持续时间的原理, 应用水量平衡方法, 考虑前期天气条件对后期的影响, 研制了一个能够进行干旱严重程度时空比较的指标, 称之为帕尔默旱度指数(Palmer drought severity index, PDSI)<sup>[1]</sup>。在美国, 它被广泛地应用于描述历史和当前干旱发生的范围和严重程度。在国际上, 帕尔默旱度模式享有盛名, 澳大利亚、加拿大、南非等国家曾先后对 PDSI 方法的适用性作了检验。在我国, 1984 年范嘉泉等在 5 帕尔默气象干旱研究方法介绍<sup>6</sup>一文中简要介绍了帕尔默气象干旱指数的原理和计算方法<sup>[2]</sup>, 中国气象科学研究院安顺清等(1985)根据其思路应用我国的资料建立了我国的气象旱度模式, 并进行了干湿气候分析和气候影响评价<sup>[3]</sup>, 河海大学余晓珍(1996)在中国 14 个地区进行了 PDSI 的适用性检验, 提出了应用中存在的问题及修正后的帕尔默旱度模式。计算表明, PDSI 可以成为我国这些地区区域干旱分析的有效工具<sup>[4]</sup>。2004 年, 刘巍巍等根据我国的实际情况对帕尔默旱度模式进行了进一步修正, 用此模式计算了我国北方地区 139 个站 1961-2000 年的逐月 PDSI。结果表明, 进一步修正的帕尔默旱度模式适合于我国应用, 能较为准确地评估旱涝情况<sup>[5]</sup>。

我国上述研究成果主要为月旱度模式, 不能反映短时段旱情的变化, 另外在交替性干旱发生时不能立即得到 PDSI 的当前值, 须在一个旱涝周期结束后确定, 因此 PDSI 一般适用于干旱气候分析和评定而不太适用于实时大范围旱情监测。

为了将 PDSI 用于我国大范围旱情实时监测, 在刘巍巍等月旱度模式的基础上研制了帕尔默旱度指数日模型, 并采用权重 PDSI 法实现了实时旱情监测。在完成了全国范围的参数调试后, 建立了全国大范围帕尔默旱度指数实时计算应用系统。

收稿日期: 20051011; 修订日期: 200602224

基金项目: 科技部农业科技成果转化基金资助项目 (04EFN216800352)

作者简介: 杨 扬(1950-), 女, 北京人, 教授级高级工程师, 主要从事水文气象和计算机应用方面研究。

E-mail: yangy@mwrl.gov.cn

# 1 帕尔默旱度指数日模型的研制

## 1.1 逐日帕尔默旱度模式

逐日帕尔默旱度模式与逐月模式的建立方法相同, 首先按照刘巍巍等计算逐月水分距平的方法进行 24 个代表站(嫩江、哈尔滨、西宁、呼和浩特、银川、石家庄、太原、长春、沈阳、北京、济南、青岛、成都、西安、郑州、武汉、重庆、贵阳、南京、杭州、南昌、福州、广州、南宁)1961- 2000 年逐日水分平衡计算, 得到水分平衡各分量逐日的实际值、可能值和它们相应的多年平均值, 包括蒸散量 ET、可能蒸散量 PE、补水量 P、可能补水量 PR、径流量 RO、可能径流量 PRO、失水量 L、可能失水量 PL, 然后计算各分量逐日多年平均实际值和可能值之比得到逐日各气候常数值, 包括蒸散系数 A 补水系数 B 径流系数 C 和失水系数 D 以及表示水分需要与水分供给之比的气候特征系数 k。由此可得到气候适宜降水量  $\bar{P}^C$ :

$$P^C = APE + BPR + CPRO - DPL \tag{1}$$

进而计算逐日水分距平指数 z:

$$z = k(P - P^C) \tag{2}$$

式中 z 值为负表示水分亏缺, 为正表示水分盈余; P 为实际日降水量。

由于干旱严重程度是持续时间和水分亏缺量的函数, 选取济南、郑州和太原三站 1961 年以来不同持续期的最早时段和对应的累计 z 值(表 1)建立回归直线, 并假定此线对应的旱度指数 C = - 4, 即极端干旱的情形,

直线方程为

$$\sum_{i=1}^t z_i = C(013375t + 1571125) \tag{3}$$

式中 t 为持续日数。

实际上, 帕尔默指数为前期指数与当前 z 值的结合, 表达形式为

$$x_i = px_{i-1} + qz_i \tag{4}$$

式中  $x_i$  为当日 PDSI 值,  $x_{i-1}$  为前一日 PDSI 值;  $z_i$  为当日水分距平指数; p, q 分别为  $x_{i-1}$  和  $z_i$  的系数。

以 m 和 b 分别表示式(3)中的斜率和截距, 则

$$p = 1 - \frac{m}{m + b} = 1 - \frac{013375}{013375 + 1571125} = 019979 \tag{5}$$

$$q = \frac{1}{m + b} = \frac{1}{013375 + 1571125} = 1/15714625 \tag{6}$$

因此, 逐日帕尔默指数的计算公式为

$$x_i = 019979x_{i-1} + z_i/15714625 \tag{7}$$

PDSI 值的旱涝等级划分采用帕尔默旱度模式的划分标准(表 2)。

表 1 济南、郑州和太原最早时段的  $\sum z$  值

Table 1 Driest intervals and  $\sum z$  of Jinan, Zhengzhou and Taiyuan

站名	起止时间	持续日数	$\sum z$
济南	1968 年 6 月 1 日- 8 月 31 日	92	- 901165
郑州	1968 年 3 月 1 日- 7 月 31 日	153	- 728164
太原	1972 年 4 月 1 日- 8 月 31 日	153	- 678197
太原	1972 年 3 月 1 日- 10 月 31 日	245	- 922163
济南	1967 年 12 月 1 日- 1968 年 9 月 30 日	305	- 1302179
郑州	1967 年 12 月 1 日- 1968 年 11 月 30 日	366	- 887144
太原	1972 年 3 月 1 日- 1973 年 5 月 31 日	457	- 1352108
太原	1971 年 10 月 1 日- 1973 年 5 月 31 日	609	- 1310161
郑州	1965 年 5 月 1 日- 1968 年 8 月 31 日	1219	- 2318176
济南	1965 年 5 月 1 日- 1969 年 6 月 30 日	1522	- 3217103
郑州	1965 年 5 月 1 日- 1970 年 4 月 30 日	1826	- 2644149

表 2 帕尔默旱度指数干湿等级

Table 2 Wet and drought classification of the PDSI

指数值(x)	等级
\ 410	极端湿润
3100~ 3199	严重湿润
2100~ 2199	中等湿润
1100~ 1199	轻微湿润
- 0199~ 0199	正常
- 1100~ - 1199	轻微干旱
- 2100~ - 2199	中等干旱
- 3100~ - 3199	严重干旱
[ - 4100	极端干旱

与 PDSI 月模型相同, 为了时空可比性, 对 24 个站进行了权重因子(气候特征系数)的修正。用上述公式计算

24站1961年1月1日至2000年12月31日逐日PDSI,并将计算结果与月模式的计算结果进行比较(图1),表明二者具有高度的一致性,同时逐日模式更能从细节上反映旱涝程度的变化。

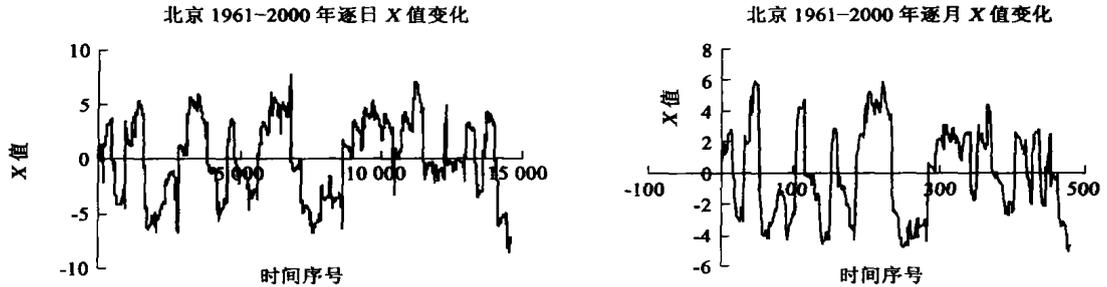


图1 帕尔默旱度指数计算逐日模式和月模式计算结果比较

Fig11 Comparison of PDSI values for daily model(left) and monthly model(right)

## 11.2 帕尔默旱度指数的计算和权重帕尔默旱度指数

帕尔默方法的特点在于其旱度指数具有丰富的信息含量,包括干旱或湿润的严重程度、干期或湿期开始与结束的时间、干期或湿期开始或结束的可能性、旱涝转换的确定等。因此,需要同时计算3个指数:湿期开始指数 $X_1$ ,干期开始指数 $X_2$ ,当前干湿强度指数 $X_3$ 。另外还需要一个重要的辅助指数 $Pe$ ,即用百分率表示在当前所处的干期或湿期内获得的水分与该时期结束所需要水分的比值,用于标识干期或湿期结束的可能性,从而判断当前的状态和控制干湿期的阶段转换:

$$Pe = \frac{V_i}{Ze + V_{i-1}} \quad (8)$$

式中 $Ze$ 为当前干旱或湿润程度减轻至正常状态即使PDSI值 $x$ 达到-0.15(干期)或0.15(湿期)所需要增加或减少的水分。根据式(7),在干期:

$$-0.15 = 0.19979x_{i-1} + Ze/1571462.5 \quad (9)$$

$$\text{因此 } Ze = -157113x_{i-1} - 78173 \quad (10)$$

$$\text{同样,在湿期 } Ze = -157113x_{i-1} + 78173 \quad (11)$$

另外在干早期,若需维持干旱减轻,即 $x_{i-1}$ 和 $x_i$ 同为-0.15,根据式(7), $z$ 应为-0.165,也就是说,只要 $z$ 值大于-0.165则干旱趋于减轻,因此定义有效增湿量 $U_w$ ,为维持干旱减轻所需的最少水分增量为

$$U_w = z + 0.165 \quad (12)$$

同样,可定义湿期的有效增干量 $U_d$ 为

$$U_d = z - 0.165 \quad (13)$$

$V_i$ 和 $V_{i-1}$ 分别为当前干期或湿期自开始至计算日当天及前一天累计的有效增湿或增干量。在干早期, $V_i = V_{i-1} + U_w$ ,当 $V_{i-1} + U_w \leq 0$ 时, $V_i = 0$ 。在湿润期, $V_i = V_{i-1} + U_d$ ,当 $V_{i-1} + U_d \leq 0$ 时, $V_i = 0$ 。

PDSI的取值遵循如下原则:

(1) 基本旱涝状态为5种:干期、湿期、交替期和干期内的交替期和湿期内的交替期。在干期 $z \leq 0$ (继续增干)和湿期 $z \leq 0$ (继续增湿)的情况下, $X_1$ 和 $X_2$ 均为0,PDSI= $X_3$ 。交替期 $X_3$ 为0, $1 > X_1 > 0$ , $0 > X_2 > -1$ ,PDSI为 $X_1$ 和 $X_2$ 中绝对值较大者。

(2) 在交替期中, $X_1 \leq -1$ 即进入湿期,PDSI= $X_1$ ; $X_2 \geq 1$ 则进入干期,PDSI= $X_2$ 。

(3) 干(湿)期一旦出现 $z > 0$ ( $z < 0$ )的情况即开始逐日计算 $Pe$ ,并在继续计算 $X_3$ 的同时开始计算 $X_1$ 、 $X_2$ 。当 $0 < Pe < 1$ 时,表示进入干(湿)期内的交替期,PDSI值不确定, $Pe = 1$ 时,干(湿)期结束,这时将此从未确定的PDSI值自当日起逐日回溯,用相应日期的 $X_1$ ( $X_2$ )值填充,再根据最后 $X_1$ ( $X_2$ )的值确定进入湿(干)期还是交

替期; 一旦  $Pe \leq 0$ , 即返回干(湿)期, 用  $X_3$  的值回填 PDSI。

由此可见, 在干期或湿期内出现干湿交替时 PDSI 值不能当时确定, 要在返回或该时期结束时回溯推求, 时间往往长达数月。由于此现象经常发生, 因此帕尔默旱度指数适用于旱情分析评价而不适用于实时旱情监视。为了将帕尔默旱度指数改造为实时旱情监视分析的工具, Heddinghaus 和 Sabol 1991 年提出了权重帕尔默指数的计算方法, 也称修正帕尔默旱度指数(Palmer modified drought index, PMDI)其目的是通过对  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$  和  $Pe$  4 项指标所含信息的浓缩, 形成能够更好地表达当前旱情的单一指数<sup>[6]</sup>。这种算法仅用于干(湿)期内的交替期即  $0 < Pe < 1$  的情况。

具体算法: 当  $X_3 < 0$  时, 当前状态为干期,

$$PMDI = (1 - Pe) @X_3 + Pe @X_1 \quad (14)$$

当  $X_3 > 0$  时, 当前状态为湿期,

$$PMDI = (1 - Pe) @X_3 + Pe @X_2 \quad (15)$$

在干期、湿期和交替期, PMDI 与 PDSI 的算法相同。

应用逐日帕尔默旱度模式, 必须解决在 PDSI 值不确定时期的处理问题, 否则即失去了应用日模型实时监视旱情的意义。因此, 同时计算 PDSI 和 PMDI, 在应用中以 PMDI 为主, 用于大范围实时旱情的监视和分析, PDSI 能够反映干旱从形成到结束的过程和旱涝转换的时间, 主要用于历史时间序列分析。

## 2 逐日帕尔默旱度指数的应用和验证

### 2.1 大范围计算的参数设置和调试

为了建立大范围逐日帕尔默旱度指数实时计算系统, 在全国选择了 556 个气象站作为计算站点, 从 2000 年 1 月 1 日开始计算。选站的原则一是分布均匀, 二是实时地面观测资料发报稳定, 同时排除高山测站。实际计算首先要确定初始参数田间持水量 AWC、土壤含水量  $S$  和 5 个气候常数即蒸散系数  $A$ 、补水系数  $B$ 、径流系数  $C$ 、失水系数  $D$  和气候特征系数  $k$ 。由于在建立 PDSI 逐日计算模式的过程中获得了 24 个站的各项参数, 同时这些站具有较高的地区代表性, 因此将其作为代表站, 采用了以此为基础, 参考其他辅助资料推求全部计算站初始参数和气候常数的解决方案。

参考中国科学院遥感应用研究所提出的以全国气候、土壤、地貌分布特征为基础研制的干旱区划图和河海大学陈晓燕等<sup>[7]</sup>全国土壤田间持水量分布研究的成果, 根据各计算站当地的土壤类型及相应的田间持水量数据较方便地确定了各站 AWC 值。将代表站 1999 年 12 月 31 日的土壤含水量数据应用距离权重方法进行空间插值, 再参考干旱区划图对插值结果进一步调整, 即确定了各站土壤含水量  $S$  的初值。

对其他 5 个气候常数的推求较为复杂, 首先为了减少逐日气候常数的随机性, 对 24 个代表站各气候常数进行了逐日 5 点滑动平均的时间平滑处理。为了推求计算站的气候常数, 将 24 个代表站的气候常数用距离权重方法进行空间插值, 得到计算站气候常数的参考值。这些气候常数应该反映特定地区的气候特征, 而以距离权重方法为主的空间插值结果难于反映计算站的实际情况, 直接应用可能导致计算失败, 因此必须采取修正措施得到计算站的气候常数。首先参考干旱区划图从 556 站中选出 135 个基本站, 选站原则第一考虑气候土壤特征的代表性, 第二要分布均匀。对每个基本站根据其多年平均降水量与蒸发量比值, 以及气候土壤区划, 找出特征相似的代表站, 用代表站的 5 个气候常数修正其相应参数。如在西部地区新疆、甘肃等地基本站与代表站银川特征相似, 高原地区的基本站主要参照代表站西宁的气候常数, 其他地区由于代表站分布较均匀, 因此基本站气候常数的确定难度不大。对这些基本站进行 PDSI 试算并检查结果, 找出计算结果不合理的站, 分析原因并进一步修正参数。经几次反复, 可确认基本站参数的合理性。最后再以代表站和基本站为基础, 调试 556 个计算站中其他测站的气候特征常数。经过大量反复的调试, 确定了全部计算站的初始参数, 保证了计算成果的合理正确和稳定可靠。

## 212 帕尔默旱度指数的实时计算和成果验证

应用上述研究成果,以逐日地面观测气象资料为基础建立了适于业务应用的实时帕尔默旱度指数计算系统。计算在每日 20 时自动进行,首先采用修正的彭曼公式,用实时天气资料中气温、风速、湿度及云量等要素估算全国 556 个气象站的逐日可能蒸散量<sup>[8]</sup>,再将其与相应测站当日的降水量资料共同输入帕尔默旱度指数计算模型计算逐日 PDSI 和 PMDI 值。目前系统已连续运转 1 年多,实现了逐日自动计算,显示数值分布图和等值面图,同时能够提取各站时间序列数据。图 2 为 2005 年 6 月 1 日和 2005 年 8 月 15 日等值面图,图 3 为上海站 2000 年 1 月 1 日至 2005 年 9 月 15 日 PMDI 时间序列曲线图。

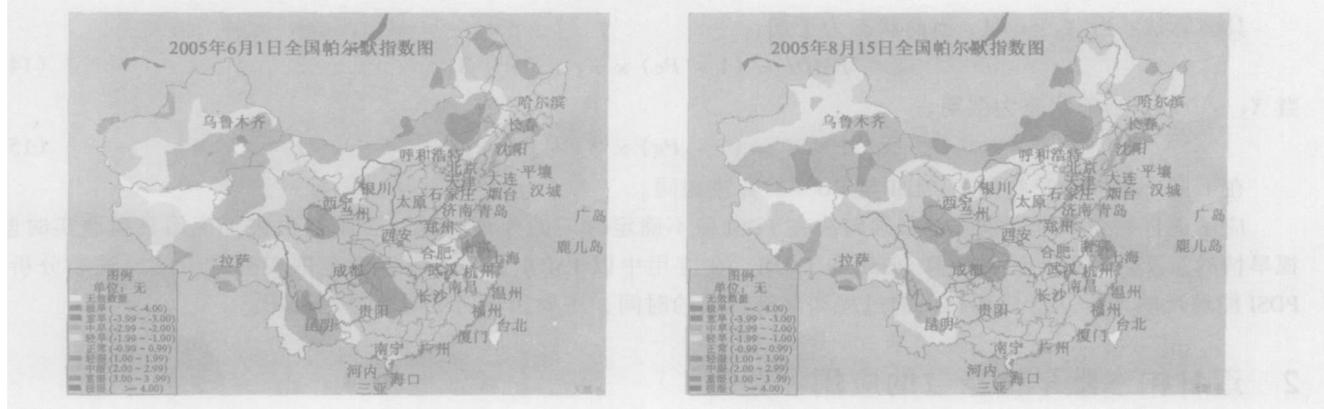


图 2 2005 年 6 月 1 日和 2005 年 8 月 15 日全国 PMDI 等值面图

Fig 2 Map of PMDI for China on Jun 1, 2005 (left) and Aug 15, 2005

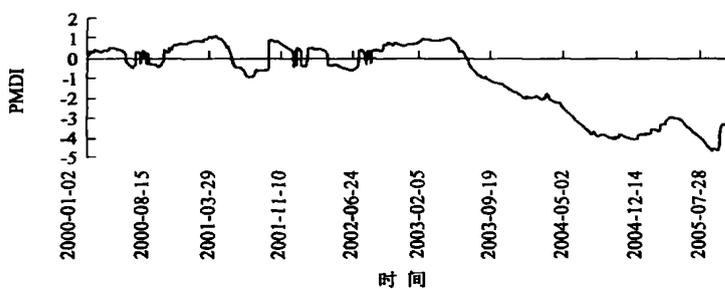


图 3 上海站 2000 年 1 月 1 日至 2005 年 9 月 15 日 PMDI 时间序列曲线图

Fig 3 PMDI time series of Shanghai from Jan 1, 2000 to Sept 15, 2005

在成果验证中,首先考察计算结果的合理性:自 2000 年 1 月 1 日至 2005 年 9 月 1 日共 2071 d,每天计算 556 站 PMDI 值,共计 1151476 个数据。其中大于 410 的有 8504 个,占总数的 017%,小于 -410 的有 29454 个,占总数的 215%,最大值为 6178,出现在 2003 年 9 月 29 日广西防城港市,最小值为 -6188,出现在 2005 年 7 月 8 日浙江嘉兴平湖。防城港市为 556 站中年降水量最多的地方,极大值出现在连续多雨期后,嘉兴平湖在连续两年降水量少于常年 40%后达到极端最低值,两个极值都是当时旱涝

情况的客观反映。根据美国计算帕尔默旱度指数的经验,大于 410 和小于 -410 的数据总量应分别在 2% 以内。考虑到目前计算时间不长,其中 2000 年、2001 年为特大干旱年,2002 年、2003 年为中等偏重干旱年,因此上述计算结果是合理的。

从图 2 中可清楚地看出全国大范围的旱情变化:辽宁吉林东部涝情加剧,山西、内蒙等地旱情有所发展,江苏、云南、海南等地的旱情有所缓和,这些都与实际情况符合。

从图 3 中可看出,由于上海继 2003 年和 2004 年连续两个汛期少雨后,2005 年汛期的前半段仍然降水稀少,致使上海的 PMDI 值由 1105(轻微湿润,2003 年 7 月 17 日)下降为 -417(极端干旱,2005 年 7 月 11 日)。2005 年 8 月 6 日台风/麦莎登陆,上海出现大暴雨,随后又有几次较弱的降水过程,至 9 月 15 日, PMDI 回升至 3112(严重干旱)。这种变化过程很好地反映了上海的实际情况。

### 3 结 论

为了将帕尔默旱度指数用于实时旱情的监视和分析,进行了PDSI日模型和权重帕尔默旱度指数PMDI的研制,并建立了全国范围556个气象站帕尔默旱度指数逐日实时自动计算的业务运行系统。一年多来系统运行稳定,通过对计算成果的不断观察应用,表明逐日PMDI确实能够较好地及时反映旱涝的当前情况和变化过程。由于模型是以北方地区测站数据为基础开发的,通过对气候特征值的修正使各地计算结果具有可比性,但在气候特征值修正过程中存在一定的误差,特别是西部边疆地区 and 海岛测站可能误差较大,会使计算结果的同一性受到影响。另外,在大量文献中均指出了帕尔默指数方法在特定地区应用的局限性和问题,如年降水量小于400 mm的地区,南方稻田区、北方冻土区和融雪区等。由于本项研究以大范围干旱监视为基础,同时目前计算的时间较短,已有的计算成果尚不能看出明显的误差和漏洞,因此,将在今后的应用过程中进一步观察,逐步发现问题并找出解决方案。

#### 参考文献:

- [1] Wayne C, Palmer. Meteorological drought[R]. Research Paper No 45, U S Weather Bureau, 1965.
- [2] 范嘉泉, 郑剑非. 帕尔默气象干旱研究方法介绍[J]. 气象科技, 1984(1): 63- 71.
- [3] 安顺清, 邢久星. 修正的帕尔默干旱指数及其应用[J]. 气象, 1985(12): 17- 19.
- [4] 余晓珍. 美国帕尔默旱度模式的修正和应用[J]. 水文, 1996(6): 30- 36.
- [5] 刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 等. 帕尔默旱度模式的进一步修正[J]. 应用气象学报, 2004, 15(1): 1- 10.
- [6] Heddinghaus T R, Sabol P. 1991: A review of the Palmer Drought Severity Index and where do we go from here? Proceedings[C]. 7<sup>th</sup> Conf On Appl Climatol[A]. 10- 13 Sept 1991.
- [7] 陈晓燕, 叶建春, 陆桂华, 等. 全国土壤田间持水量分布探讨[J]. 水利水电技术, 2004, 35(9): 113- 119.
- [8] 周国良, 岳智慧, 王 琳. 利用实时气象资料估算蒸发能力的研究与应用[J]. 水文, 1998(增刊): 20- 22.

### Application of Palmer drought severity index method to real time drought survey in China

YANG Yang<sup>1</sup>, AN Shunqing<sup>2</sup>, LIU Weizwei<sup>2</sup>, XU Sheng<sup>1</sup>, ZHOU Guoliang<sup>1</sup>, QI Jianguo<sup>1</sup>, WANG Lin<sup>1</sup>, ZHENG Wen<sup>1</sup>

(11 Bureau of Hydrology, MWR, Beijing 100053, China; 21 Chinese Academy of Meteorological Science, Beijing 100081, China)

Abstract: In order to use the Palmer drought severity index method (PDSIM) in the real time large scale drought survey, the Palmer modified drought index (PMDI) of daily model is developed based on the further modification of the PDSIM by Liu Weizwei et al (2004). After the initial parameters adjustments of 556 weather stations scattered in China, the countrywide daily PMDI calculation system is established. The results of one years operation show its validity, and it can describe in time the large scale drought situation and its evolvement.

Key words: drought survey; Palmer drought severity index; real time operational system