

DOI :10.3876/j.issn.1000-1980.2012.01.006

基于模拟土壤含水量的干旱监测技术

吴志勇^{1 2} 陆桂华^{1 2} 郭红丽³ 匡亚红^{1 2}

(1. 河海大学水资源高效利用与工程安全国家工程中心 ,江苏 南京 210098 ;
2. 河海大学水问题研究所 ,江苏 南京 210098 ;3. 江苏省水文水资源勘测局南京分局 ,江苏 南京 210028)

摘要 :为实现大范围干旱的实时监测 ,开发了基于模拟土壤含水量的干旱监测技术 .采用 VIC (variable infiltration capacity)大尺度水文模型模拟了 30 km 网格尺度的逐日土壤含水量 ,建立了土壤含水量距平指数(SMAPI) ,分析了其在 2002 年山东干旱和 2010 年西南地区干旱监测中的作用 .结果表明 ,SMAPI 具有较明确的物理意义 ,能够反映大范围干旱在时间和空间上的发生、发展及变化趋势 .基于模拟土壤含水量的干旱监测技术 ,可为全面认识干旱 ,有效预防和减轻干旱灾害提供技术支持 .

关键词 :干旱监测 ;土壤含水量 ;大尺度水文模型

中图分类号 :P339 **文献标志码 :**A **文章编号 :**1000-1980(2012)01-0028-05

Drought monitoring technology based on simulation of soil moisture

WU Zhi-yong^{1 2} , LU Gui-hua^{1 2} , GUO Hong-li³ , KUANG Ya-hong^{1 2}

(1. *National Engineering Research Center of Water Resources Efficient Utilization and Engineering Safety , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*

2. *Research Institute of Water Problems , Hohai University , Nanjing 210098 , China ;*

3. *Nanjing Branch of Jiangsu Provincial Hydrology and Water Resources Investigation Bureau , Nanjing 210028 , China)*

Abstract : For real-time drought monitoring on a large scale , a drought monitoring technology based on simulation of soil moisture was developed . A macro-scale hydrological model , the variable infiltration capacity (VIC) model , was used to simulate the daily soil moisture with a spatial resolution of 30 km × 30 km . The soil moisture anomaly percentage index (SMAPI) was established , and its performance was analyzed through its application to the drought monitoring in Shandong Province in 2002 and in Southwest China in 2010 . The results show that SMAPI has clear physical meanings and can reflect the characteristics of occurrence , development , and change trends of large-scale droughts in time and space . The drought monitoring technology based on simulation of soil moisture can provide technical support for comprehensive understanding of drought and effective prevention and mitigation of drought .

Key words : drought monitoring ; soil moisture ; large-scale hydrological model

干旱灾害是发生最频繁、影响最广泛、损失最严重的自然灾害之一^[1] .据不完全统计 ,1949—2001 年我国年均受旱面积 2 253 万 hm² ,约占全国受灾总面积的 60% ,平均每年因干旱损失粮食 128 亿 kg^[2] .干旱问题已成为我国面临的最为严峻的环境问题之一 .及时发现干旱 ,实时监测旱情的发展动态 ,对抗旱减灾至关重要 .

干旱监测的基础是干旱指数 .干旱指数是反映干旱成因、程度和持续时间等要素的量度 .常见的干旱指数(降水距平指数、PDSI 指数^[3]、SPI 指数^[4]等) ,多数是仅根据降水构建的指数 ,因为相对其他气象变量来说 ,降水资料比较容易获得 ,且能够有较长的系列 .利用这些指数 ,国内外学者对全球以及区域干旱规律进行

收稿日期 :2011-01-14

基金项目 :国家重点基础研究发展计划(973 计划)(2010CB428405) ;全国优秀博士学位论文作者专项资金(201161) ;国家自然科学基金(41001012) ;中央高校基本科研业务费专项(2009B00114)

作者简介 :吴志勇(1979—) ,男 ,浙江松阳人 ,教授 ,博士 ,主要从事水文循环大气-陆面过程模拟及应用研究 . E-mail :wzyhhu@gmail.com

了许多研究^[5-10],提高了人们对干旱的认识.然而,对于农作物生长来说,土壤含水量是一个比降水更关键的因素.土壤含水量对维持农业、草原和林地至关重要,而对于没有灌溉设施的雨养地区则尤为重要(据报道,中国目前有 55% 的耕地没有灌溉设施^[11]).由于降水是一个随机的事件,土壤含水量在前后两场降水事件之间对作物的供水起到至关重要的调节作用.因此,土壤含水量的变化是干旱发生发展的关键环节.由此可见,土壤含水量是一个更好的干旱指数.

然而,大范围的土壤含水量信息并不易获得.由于土壤含水量的监测方法比较多,且不同区域的监测方法不尽相同,目前还没有一个综合的、大范围的土壤含水量监测网,而且土壤含水量的监测起步比较晚,没有较长系列的监测数据.根据文献^[12]所述,目前中国气象局仅能提供 279 个站点的土壤湿度观测资料,且空间分布不均,集中分布在东北、华北和江淮地区,其中观测时间在 20 a 以上的站点仅为 61 个.通过遥感或许能够获得较大范围的土壤含水量,然而目前的遥感技术仅能获得土壤表层 0~20 cm 的土壤含水量.更为重要的是,站点和遥感获得的土壤含水量资料系列往往较短.然而,长期的土壤含水量信息对于干旱规律分析、干旱监测是必不可少的.

获得长期土壤含水量资料的替代方法,是基于长期的气象资料,采用具有一定物理基础或概念的水文模型对土壤含水量进行模拟.这种方法有 3 个优点:(a)这样的水文模型考虑不同区域植被、土壤特性对水文过程的影响,能够较为真实地反映土壤含水量和区域径流量的空间分布;(b)通过区域能量和水量的平衡计算,可以获得较为理想的区域平均值,能够较好地反映区域的综合情况.这样,就可以减少以往仅仅通过单点计算带来的不确定性;(c)可以模拟逐日的土壤含水量和径流量,便于建立日尺度的干旱指数,对分析各种尺度的干旱影响非常有用.而以往建立的气象干旱指数一般都是基于月尺度来建立的,不但影响干旱起讫时间的确定,而且还会影响干旱强度的确定^[13].

本研究采用 VIC(variable infiltration capacity)模型建立 30 km 网格尺度的逐日土壤含水量数据库,并以此构建具有物理基础的定量干旱指数,实现大范围干旱的逐日监测.

1 干旱监测指数的构建

1.1 水文模型的选择

选用 VIC 模型模拟土壤含水量.VIC 模型是一种基于 SVATS(soil vegetation atmospheric transfer schemes)思路的大尺度水文模型^[14-16].该模型可同时模拟水循环过程中的能量平衡和水量平衡,弥补了传统水文模型对能量过程描述的不足,同时还考虑了积雪融雪及土壤冻融过程,因此该模型也适用于北方地区冬春季节的水文模拟.与其他陆面模型相比,VIC 模型的显著特征在于利用空间概率分布函数表达土壤含水量的次网格不均性^[17],有利于更好地模拟地面径流和土壤含水量.VIC 模型自开发以来,已被国内外学者广泛地检验和应用^[18-21].研究^[22-23]表明,VIC 模型对大范围土壤含水量的模拟具有较好的能力.

1.2 土壤含水量的模拟

本研究采用的 VIC 模型模拟系统是基于笔者前期工作扩展的,有关 VIC 模型在中国范围的率定和检验参见文献^[23].这里仅作简要介绍.VIC 模型基于 30 km×30 km 网格构建,中国范围共有 10 458 个网格.每一个网格的土壤和植被参数,分别基于全球 10 km 的土壤数据库和全球 1 km 的陆地覆盖类型数据库来确定.驱动模型的日降水量、日最高和最低气温数据来自于水利部水文局的全国 624 个基本气象站实时数据库.网格的日降水量、日最高和最低气温通过距离加权法求得,并采用高程上升 100 m,气温下降 0.65℃的关系考虑高程对气温的影响.基于实测流量过程线率定 VIC 模型的水文参数,并通过参数移用公式移植到无资料区域.模拟的土壤含水量已通过 28 个站的实测土壤含水量资料的验证^[23].

1.3 土壤含水量距平指数

土壤含水量距平指数(SMAPI:soil moisture anomaly percentage index)定义为当前土壤含水量与多年同期含水量的差值占多年同期含水量的百分比.这里把一个地区某个时段的多年平均土壤含水量作为当地该时段土壤含水量的气候适宜值.当实际含水量小于多年平均土壤含水量时,土壤水分出现“亏缺”,由此确定出现干旱现象.该指数反映土壤含水量偏离正常态的程度,是一种相对干旱指数.

早在 1988 年,Bergman 等^[24]就提出用 SMAPI 来描述全球范围的干旱.他们依据 Thornthwaite 的水分计算方法,采用 2 层土壤模式计算土壤饱和度的动态值.1995 年,余晓珍等^[25]采用 SMAPI 成功模拟了华北平原聊

城等地区历史干旱形成、发展和结束的全过程,认为该方法具有一定的实用价值和推广前景.本研究将 SMAPI 应用到大范围干旱的实时监测中,并选用 VIC 大尺度水文模型模拟土壤含水量.

SMAPI 的计算过程为 (a) 计算各网格 0~20 cm、20~100 cm 和 0~100 cm 3 个土层 1971—2000 年模拟土壤含水量的逐日多年平均值 $\bar{m}$,例如 1 月 1 日的多年平均值,等于 30 a 每年的 1 月 1 日的算术平均值 (b) 各网格每日的 SMAPI(I)为该日的模拟土壤含水量 m 与相应的 $\bar{m}$ 之差占 $\bar{m}$ 的百分比,计算公式为

$$I = \frac{m - \bar{m}}{\bar{m}} \times 100\%$$

SMAPI 干旱级别划分标准采用综合频率分布的方法来确定,见图 1.图中数据来源于 1981—1999 年每月的 1 日、11 日和 21 日的模拟数据.从图 1 可以看出,SMAPI 的频率分布地区差异较小,可以综合成一条曲线,代表 SMAPI 的频率分布.该指数可以用来比较不同地区的干旱程度,具体的干旱级别划分标准和各等级出现概率见表 1.

表 1 SMAPI 干旱级别划分

Table 1 Drought classification based on SMAPI

SMAPI/%	旱涝级别	出现概率	SMAPI/%	旱涝级别	出现概率
≤ -50	极旱	0.005	5~15	轻湿	0.200
-50~-30	重旱	0.020	15~30	中湿	0.100
-30~-15	中旱	0.100	30~50	重湿	0.020
-15~-5	轻旱	0.200	> 50	极湿	0.005
-5~5	正常	0.350			

2 结果分析

2.1 历史干旱事件的检验

选取 2002 年山东省的干旱事件来验证.2002 年山东省降水严重偏少,是继 1999 年、2000 年和 2001 年严重干旱之后的又一特大干旱年份.6 月份以后,全省持续高温少雨,特别是 7—9 月,全省平均降水量仅 163 mm,较常年同期降水偏少 60%,为山东省 1916 年有降水资料记载以来同期最少的年份,致使全省旱情持续发展.图 2 给出了 2002 年山东省逐月受旱面积^[26]与平均 SMAPI 的对比过程.从实际受旱面积看,2002 年 6 月开始到 9 月受旱面积不断增加,到 10 月上旬受旱面积稍有减小.图 2 中的 SMAPI(0~100 cm)过程反映的是山东省范围内 1 m 土层土壤含水量距平百分率的月过程.从图 2 可以看出 6 月 SMAPI 大于 -5%,处于正常范围,没有出现旱情;7 月 SMAPI 达到 -23%,出现中旱;8 月和 9 月 SMAPI 小于 -30%,旱情加剧,达到重旱级别;10 月以后旱情趋于缓和.从实际受旱面积和 SMAPI 过程的对比分析来看,本研究建立的 SMAPI 能够较好地再现 2002 年山东省旱情的发生与发展.

2.2 大范围干旱实时监测

本研究开发的干旱监测技术已于 2005 年和 2009 年分别嵌入水利部水文局的“中国水文气象综合业务系统”和国家防汛抗旱总指挥部的“国家防汛抗旱指挥系统旱情信息查询分析系统”,在旱情监测中发挥了显著的作用,对 2010 年西南干旱进行了成功的监测,为全面、准确地掌握旱情的发展变化、及时科学地组织抗旱减灾行动提供了重要的技术支撑.

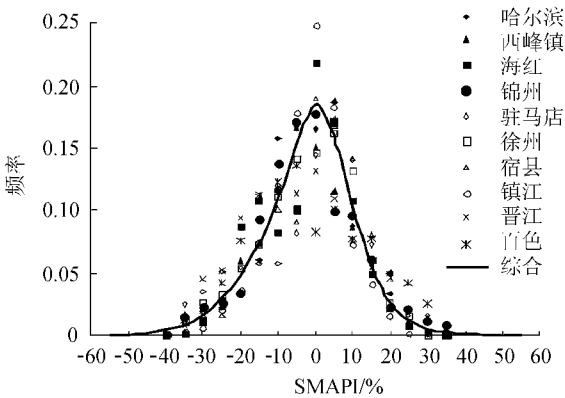


图 1 中国部分地区模拟 SMAPI 频率分布

Fig. 1 Frequency distributions of SMAPI for ten experimental sites in China

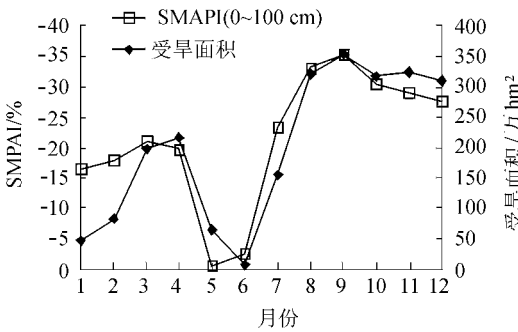


图 2 2002 年山东省实际受旱面积与平均 SMAPI 对比

Fig. 2 Comparison of actual drought area and average SMAPI in Shandong Province in 2002

2009 年 9 月以来 ,我国西南大部分地区降水量明显偏少 ,云南、贵州西部、四川南部较常年偏少 7~9 成 ,形成了大范围的特大旱灾 ,严重影响了农业生产和群众生活 .据国家防汛抗旱总指挥部的最新统计 ,西南地区(云南、贵州、广西、重庆、四川)因干旱饮水困难的人数超过 2000 万人 ,耕地受旱面积超过 660 万 hm^2 ,经济损失高达 350 亿元 .

图 3 是 2009 年 9 月至 2010 年 5 月西南地区干旱监测结果 .从图 3 可以看出本研究建立的干旱监测系统能够很好地监测出西南地区干旱的发生、发展以及分布范围 ,与实际发生情况吻合 .图 3 显示 :2009 年 9 月 20 日贵州 ,云南北部、东部和广西北部、西部地区发生了局部干旱 ;2009 年 11 月 20 日 ,干旱扩展到西南大部分地区 ,其中云南、广西和贵州的部分地区发生了中度以上干旱 ;2010 年 1 月至 2010 年 3 月 ,中度以上干旱持续发展 ,局部地区达到了重度干旱 ,甚至是极旱 .随后 ,干旱逐步减轻 ,至 2010 年 5 月 20 日干旱基本解除 .

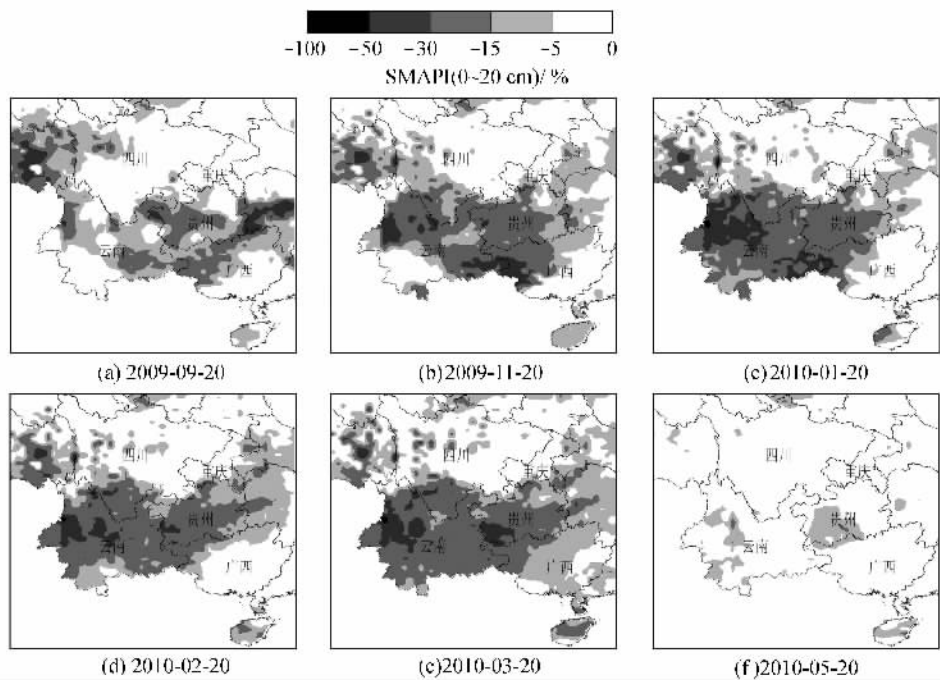


图 3 2009 年 9 月至 2010 年 5 月西南地区干旱监测结果

Fig. 3 Drought monitoring results for Southwest region during period from September , 2009 to May , 2010

3 结 语

本研究采用 VIC 大尺度水文模型构建 30 km 网格尺度的逐日土壤含水量数据库 ,利用此数据库构建土壤含水量距平指数 (SMAPI) ,从模拟土壤含水量入手 ,实现了全国范围干旱的实时监测 .以 2002 年山东干旱和 2010 年西南地区干旱为例 ,检验了 SMAPI 的作用 .结果表明 :SMAPI 能够较好地反映中国区域大范围干旱在时间和空间上的发生、发展及变化趋势 ;基于模拟土壤含水量的干旱监测技术 ,从土壤含水量的角度反映了干旱时空变化的基本特征 ,能够为全面认识干旱 ,有效预防和减轻干旱灾害提供技术支持 .

在本研究的基础上 ,国家防汛抗旱指挥系统旱情信息查询分析系统和水利部水文局已将 SMAPI 用于干旱监测业务系统中 ,每天发布全国干旱指数分布图 ,对大范围干旱进行实时监测 .今后 ,可利用大气模式预报的降水、气温等资料作为输入 ,实现对未来干旱发展形势的预报 .

参考文献 :

[1] WILHITE D A. Drought as a natural hazard :concepts and definitions[C]/WILHITE D A. Drought :A Global Assessment. New York : Routledge , 2000 :1-18 .
[2] 张文渊 . 浅谈中国的干旱灾害及抗旱减灾对策 [J] . 中国减灾 , 2003 (1) :47-49 . (ZHANG Wen-yuan. Dicussion on China drought disaster and drought mitigation measure[J] . China Mitigation , 2003 (1) :47-49 . (in Chinese))
[3] PALMER W C. Meteorological drough[R] . Washington , D. C . :Weather Bureau , U. S. Department of Commerce , 1965 .
[4] MCKEE T B , DOESKEN N J , KLEIST J . The relationship of drought frequency and duration to time scales[C] /Proc 8th Conference on

- Applied Climatology. Anaheim ,CA. Boston :American Meteorological Society ,1993 :179-184.
- [5] DAI A ,TRENBERTH K E ,QIAN T. A global data set of Palmer drought severity index for 1870-2002 :relationship with soil moisture and effects of surface warming[J]. Hydrometeor 2004 ,5 :1117-1130.
 - [6] 苏明峰 ,王会军. 全球变暖背景下中国夏季表面气温与土壤湿度的年代际共变率[J]. 科学通报 ,2007 ,52(8) :965-971.(SU Ming-feng ,WANG Hui-jun. The China summer surface temperature and soil moisture interdecadal variation rate under the background of global warming[J]. Chinese Science Bulletin 2007 ,52(8) :965-971.(in Chinese))
 - [7] 张永 ,陈发虎 ,勾晓华 ,等. 中国西北地区季节间干湿变化的时空分布 :基于 PDSI 数据[J]. 地理学报 ,2007 ,62(11) :1142-1152.(ZHANG Yong ,CHEN Fa-hu ,GOU Xiao-hua ,et al. The temporal and spatial distribution of seasonal dry-wet changes over the northwestern china based on PDSI[J]. Journal of Geographical Science 2007 ,62(11) :1142-1152.(in Chinese))
 - [8] ELSA E M ,ANA A P ,LUIS S P ,et al. Analysis of SPI drought class transitions using loglinear model[J]. Journal of Hydrology 2006 ,331 (1/2) :349-359.
 - [9] LIVADA I ,ASSIMAKOPOLOS V D. Spatial and temporal analysis of drought in greece using the standardized precipitation index (SPI) [J]. Theoretical and Applied Climatology 2007 ,89(3/4) :143-153.
 - [10] 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[J]. 干旱地区农业研究 ,2007 ,25 (5) :198-203.(WANG Yan-ji ,LIU Jun-ming ,WANG Peng-xin ,et al. Prediction of drought occurrence based on the standardized precipitation index and the Markov chain model with weight[J]. Agricultural Research in the Arid Areas 2007 ,25(5) :198-203.(in Chinese))
 - [11] 田野. 影响我国粮食安全的主要隐患及对策建议[J]. 粮食问题研究 ,2004(2) :29-32.(TIAN Ye. Hidden danger on china 's food security and the main countermeasures and suggestion[J]. Grain Issues Research 2004(2) :29-32.(in Chinese))
 - [12] 左志燕 ,张人禾. 中国东部春季土壤湿度的时空变化特征[J]. 中国科学 :D 辑 地球科学 ,2008 ,38(11) :1428-1437.(ZUO Zhi-yan ,ZHANG Ren-he. Spatial and temporal variation characteristics of soil moisture in spring over East China[J]. Science in China Series D Earth Sciences 2008 ,38(11) :1428-1437.(in Chinese))
 - [13] BYUN H R ,WILHITE D A. Objective quantification of drought severity and duration[J]. Journal of Climate ,1999 ,12 :2747-2756.
 - [14] XU Liang ,LETENMAIER D P ,WOOD E F ,et al. A simple hydrologically based model of land-surface water and energy fluxes for general circulation model[J]. Journal of Geophysical Research ,1994 ,99(D7) :14415-14428.
 - [15] XU Liang ,WOOD E F ,LETENMAIER D P. Surface soil moisture parameterization of the VIC-2L model :evaluation and modification[J]. Global and Planetary Change ,1996 ,13(1/2/3/4) :195-206.
 - [16] CHERKAUER K A ,BOWLING L C ,LETENMAIER D P. Variable infiltration capacity (VIC) cold land process model updates[J]. Global and Planetary Change 2002 ,38(1/2) :151-159.
 - [17] ZHAO Ren-jun ,ZHANG Yi-lin ,FANG Le-ren ,et al. The Xinjiang model in hydrological forecasting[M]. Wallingford :IAHS Press , 1980 :351-356.
 - [18] NIJSSEN B ,SCHNUR R ,LETENMAIER D P. Global retrospective estimation of soil moisture using the variable infiltration capacity land surface model ,1980-93[J]. Journal of Climate 2001 ,14(8) :1790-1808.
 - [19] 谢正辉 ,刘谦 ,袁飞 ,等. 基于全国 50 km × 50 km 网格的大尺度陆面水文模型框架[J]. 水利学报 ,2004 ,35(5) :76-82.(XIE Zheng-hui ,LIU Qian ,YUAN Fei ,et al. Macro-scale land hydrological model based on 50 km × 50 km grids system[J]. Journal of Hydraulic Engineering 2004 ,35(5) :76-82.(in Chinese))
 - [20] 胡彩虹 ,郭生练 ,彭定志 ,等. VIC 模型在流域径流模拟中的应用[J]. 人民黄河 ,2005 ,27(10) :22-28.(HU Cai-hong ,GUO Sheng-lian ,PENG Ding-zhi ,et al. Application of VIC model in runoff simulation[J]. Yellow River 2005 ,27(10) :22-28.(in Chinese))
 - [21] 宋星原 ,余海艳 ,张利平 ,等. VIC 陆面水文模型在白莲河流域径流模拟中的应用[J]. 水文 ,2007 ,27(2) :40-44.(SONG Xing-yuan ,YU Hai-yan ,ZHANG Li-ping ,et al. Application of VIC land surface hydrological model in flow simulation of Bailian River Basin [J]. Journal of China Hydrology 2007 ,27(2) :40-44.(in Chinese))
 - [22] HAMLET A F ,MOTTE P W ,CLARK M P ,et al. 20th-century trends in runoff ,evapotranspiration and soil moisture in the Western United States[J]. Journal of Climate 2007 ,20(8) :1468-1486.
 - [23] WU Zhi-yong ,LU Gui-hua ,LEI Wen ,et al. Thirty-five year (1971-2005) simulation of daily soil moisture using the variable infiltration capacity model over China[J]. Atmosphere-Ocean 2007 ,45(1) :37-45.
 - [24] BERGMAN K H ,SABOL P ,MISKUS D. Experimental indices for monitoring global drought conditions[C]//Proceedings of the 13th Annual Climate Diagnostics Workshop. Cambridge :National Technical Information Service ,U. S. Dept. Commerce ,Springfield ,VA , 1988 :190-197.
 - [25] 余晓珍 ,夏自强 ,刘新仁. 应用土壤水模拟模型研究区域干旱[J]. 水文 ,1995 ,15(5) :4-9.(YU Xiao-zhen ,XIA Zi-qiang ,LIU Xin-ren. A soil moisture simulating model for regional drought[J]. Journal of China Hydrology ,1995 ,15(5) :4-9.(in Chinese))
 - [26] 张胜平 ,陈希村 ,苏传宝 ,等. 2002 年山东省严重干旱分析[J]. 水文 ,2004 ,24(3) :42-45.(ZHANG Sheng-ping ,CHEN Xi-cun , SU Chuan-bao ,et al. Analysis of Shandong Province severe drought in 2002[J]. Journal of China Hydrology 2004 ,24(3) :42-45.(in Chinese))