

张元元. 应用 FY-2 地表蒸散产品监测西南特大干旱[J]. 气象, 2011, 37(8): 999-1005.

应用 FY-2 地表蒸散产品监测西南特大干旱^{*}

张元元

国家卫星气象中心, 北京 100081

提 要: 基于能量平衡原理的卫星遥感地表蒸散产品具有清晰明确的物理含义, 广泛地应用于遥感干旱监测领域。本研究以中国能量与水平衡监测系统(CEWBMS)和近 11 年的静止卫星遥感数据集为基础, 利用 FY-2/VISSR 数据生成相对蒸散距平百分率(Percentage of Relative Evapotranspiration Anomaly, PRETA)产品, 应用于全国范围的旱情连续监测。与极轨卫星同类产品相比, 基于 FY-2 的 PRETA 产品在监测范围和频次上都具有明显的优势。由于距平百分率的引入, PRETA 干旱指数等级划分不再与季节和地域气候类型等因素相关。针对 2009 年秋季至 2010 年春季西南大旱的监测结果进行了对比分析和统计, 结果表明 PRETA 干旱指数真实客观地反映了旱情时空变化, 面平均的 PRETA 和降水距平百分率时间序列变化趋势显示出良好的一致性, PRETA 与 10 cm 土壤相对湿度有较高的相关性。本研究为实时、大范围、高分辨率、定量和动态卫星遥感监测干旱提供了切实可行的方法。

关键词: FY-2 气象卫星, 干旱监测, 能量与水平衡, 相对蒸散距平百分率

Using FY-2 Based Evapotranspiration Index to Monitor the Severe Drought in Southwest China

ZHANG Yuanyuan

National Satellite Meteorological Centre, Beijing 100081

Abstract: Satellite based evapotranspiration according to the energy balance principle has clear physical meaning, and is widely used in the field of remote sensing for drought monitoring. Based on the China Energy and Water Balance Monitoring System (CEWBMS) and long time-series (11 years) dataset of geostationary satellite, the percentage of relative evapotranspiration anomaly (PRETA) is obtained by using FY-2/VISSR remote sensing data and investigated for large-area drought monitoring. Compared with polar-orbiting satellite based drought indices, the FY-2 based PRETA drought index has obvious advantages in the scope and frequency of monitoring. Due to the introduction of anomaly to relative evapotranspiration, the drought intensity classification is no longer dependent on seasonal and regional variations. Continuous quantitative evaluations of drought conditions in Southwest China from autumn 2009 to spring 2010 are carried out and statistics of the arid area are collected. Results show that spatial and temporal changes of drought status derived from PRETA are highly correlated with the actual drought situations. Trends of the area-averaged PRETA and the precipitation anomaly percentage time-series are highly consistent. Meanwhile, PRETA has a reasonable correlation with 10 cm relative soil moisture measurements. On the whole, the drought monitoring application in this study provided a practical way for real-time, large-area, high spatial resolution, quantitative and dynamic monitoring of drought.

Key words: FY-2 weather satellite, drought monitoring, energy and water balance, percentage of relative evapotranspiration anomaly (PRETA)

* 国家自然科学基金(40975054)资助

2010 年 9 月 10 日收稿; 2011 年 4 月 18 日收修定稿

作者: 张元元, 主要从事卫星遥感反演地表蒸散以及干旱应用方面研究. Email: zhangyy@cma.gov.cn

引 言

干旱是地球上造成损失最多的自然灾害,受其影响的人数比其他任何自然灾害都多。因此对干旱严重程度评估是非常重要的,但是干旱的精确量化监测和评估也是一个难题。2009年秋季至2010年春季我国西南五省区由于持续高温少雨,遭受了特大干旱。这次干旱持续时间之长、范围之广、程度之重、损失之大为历史罕见。据民政部门截至2010年3月23日的统计,上述地区受灾人口达6130.6万人,饮水困难人口1807.1万人,农作物受灾面积503.4万 hm^2 ,绝收面积111.5万 hm^2 ,直接经济损失达236.6亿元。在这种严峻的背景下,开展实时的、大范围的、高分辨率的遥感干旱定量化监测工作尤为重要,对防灾减灾、灾后评估工作都具有重要的现实意义。

20世纪70年代以来,国内外研究人员先后开展利用可见光-近红外、热红外、微波遥感数据进行干旱监测方面的研究,提出了很多有效的遥感干旱监测方法,主要有基于热惯量^[1-4]、地表蒸散量^[5-7]、温度和植被指数^[8-11]等参数的多种干旱指数模型。其中地表蒸散量描述了由于地表蒸发和植物蒸腾作用而导致的实际失水量,直接与植物生长状况及土壤水分相联系,基于它的干旱指数具有清晰的物理含义。

利用遥感技术研究地表能量与水平衡问题始于20世纪80年代^[12-15],其基本方法是利用可见光通道数据反演地表反照率,从而估算出地表吸收到的太阳辐射,然后使用热红外通道数据反演地表温度,用其估算显热和潜热通量各自在地表净辐射中所占份额,潜热通量就是以能量单位表示的实际蒸散量,也是地表水平衡的重要组成部分。近年来国内科研人员利用遥感地表蒸散量在干旱监测领域取得了很多进展。隋洪智等^[6]建立了在部分植被条件下估算农田蒸散的双层模型,结合遥感数据对黄淮海平原春季旱情进行了评估。吴蓉璋等^[7]使用静止卫星相对蒸散产品展开全国范围的干旱监测,结合实际旱情对监测结果做了详细的对比评估。刘安麟等^[16]简化了遥感地表潜在蒸散计算模型,利用作物缺水指数监测陕西关中地区春旱。侯英雨^[17]构建了地

表蒸散亏缺指数,对我国20年来干旱的时空变化规律进行了阐述。

相对蒸散为实际蒸散量与潜在蒸散量的比值,是一个0到1之间的数,当其值低于某一阈值时表示当地环境处于干旱状态,值越小说明干旱程度越严重。直接用它来评价干旱时,其对干旱程度的反映受季节、地表覆盖类型、植被生长阶段以及地域气候类型等因素影响,使得分级标准的建立成为难点。利用长时间序列的地表相对蒸散数据集,就可以引入距平百分率,大大降低上述因素对干旱分级标准的影响,使得由此构建的干旱指数在时间和空间上具有一致性。

本研究以中国能量与水平衡监测系统(China Energy and Water Balance Monitoring System, CEWBMS)遥感蒸散模型和近11年的静止卫星数据集为基础,利用相对蒸散距平百分率干旱指数对西南大旱过程进行了定量连续监测。结合实际旱情对卫星监测结果做出对比分析,并利用台站10 cm土壤相对湿度以及降水距平百分率数据进行了相关性分析。由于所使用的遥感蒸散模型基于静止卫星数据,产品适用于大范围的连续监测,与基于极轨卫星数据的同类模型相比,在监测范围和频次上具有明显的优势。

1 地表蒸散模型与数据

1.1 模型背景及原理简介

Rosema^[13,15]多年从事能量与水平衡方面的研究,近几十年来他多次主持开展相关的研究项目,分别在欧洲和非洲多个地区取得成功。基于中荷合作项目“建立用于荒漠化和粮食保障的中国能量与水平衡监测系统”(1999—2004年)开发的CEWBMS以Rosema发展的算法为基础,利用静止气象卫星数据生成地表能量与水平衡产品,结果可以应用到干旱和荒漠化监测、水资源管理、作物估产、气候模式等多个领域。CEWBMS主要包括能量平衡、降水估计和作物估产模型,这里只介绍用来计算地表蒸散量的能量平衡模型。该模型的理论基础是地表能量守恒,即:

$$I_n = H + LE + E + G \quad (1)$$

式中 I_n 为地表净辐射, H 为显热通量, LE 为潜热通量, 是以能量单位表示的地表实际蒸散量, E 为光合作用消耗的能量, G 为土壤热通量。

Rosema 以 Kondratyev^[18] 提出的二流大气辐射传输模型为基础, 并对该模型进行了扩展, 使其同时包括吸收和散射, 利用可见光通道数据首先估算出大气光学厚度 τ , 带入函数关系式, 求出大气透过率 t 和地表反照率 A , 最后得到地表总辐射:

$$I_g = tS\cos(i_s) \quad (2)$$

其中 S 为太阳常数, i_s 为太阳天顶角。对红外通道数据进行大气校正后估算出地表温度 T_0 , 同时利用正午和午夜行星温度散点图的线性关系求出边界层顶的空气温度 T_a , 最后根据公式(3)~(9)求出地表的净长波辐射、净辐射、显热通量、光合作用消耗的能量、实际蒸散、潜在蒸散、相对蒸散等物理量。

地表净长波辐射:

$$L_n = \epsilon_0 \epsilon_a \sigma T_a^4 - \epsilon_0 \sigma T_0^4 \quad (3)$$

式中 ϵ_0 为地表发射率, ϵ_a 为空气发射率, σ 为斯蒂芬-玻耳兹曼常数。

地表净辐射:

$$I_n = (1 - A)I_g + L_n \quad (4)$$

显热通量:

$$H = a(T_0 - T_a) \quad (5)$$

式中 a 为对流热交换系数, 与地面拖曳系数和风速有关, 利用前一天的相对蒸散量对 a 做了参数化假定, 以引入植被信息的影响。

光合作用消耗的能量:

$$E = \epsilon(1 - A)I_g C_v \quad (6)$$

式中 ϵ 是日平均光合系数, 可由光合系统失活模型(The Photosystem Deactivation Model)^[19] 估计出, C_v 是植被覆盖率, 可由前一天的相对蒸散量估算出。

日平均情况下, 认为土壤热通量 G 近似为零, 由公式(1)可以求出潜热通量, 也就是实际蒸散量:

$$LE \approx I_n - H - E \quad (7)$$

潜在蒸散可以由地表净辐射估算出:

$$LE_p \approx 0.8I_n \quad (8)$$

相对蒸散为实际蒸散与潜在蒸散量的比值:

$$RET = LE/LE_p \quad (9)$$

项目执行过程中使用台站常规测值和大口径闪烁仪(LAS)分别对 CEWBMS 生成的地表总辐射、

净辐射、显热通量等基本产品进行了真实性检验。结果表明辐射产品与地面测值吻合得很好。排除云的影响之后, 显热通量和 LAS 测值也有良好的一致性。地表蒸散产品作为能量平衡式中的余项, 在地表辐射和显热项的真实性得到确认之后, 也被认为是真实可靠的。

1.2 数据

1.2.1 地表蒸散模型输入输出数据

目前蒸散模型的遥感源数据来自风云二号气象卫星(D 或 E 星)可见光红外自旋扫描辐射仪(VIS-SR)每小时的实时观测数据, 所使用通道包括可见光通道(0.55~0.90 μm)和红外 1 通道(10.3~11.3 μm), 星下点分辨率为 5 km, 其中可见光通道使用的是经过 4:1 抽样之后的数据。数据投影的地理范围为 8.4°~59.6°N、73.3°~134.7°E, 覆盖中国和周边国家。模型输出日和旬的地表总辐射、净辐射、显热通量、实际蒸散、相对蒸散等产品。其中旬相对蒸散是用实际蒸散、潜在蒸散、云检测日产品合成的, 当像素旬内晴天天数小于两天时, 不予计算, 标志为有云。

1.2.2 长时间序列静止卫星数据集

研究中所使用的静止卫星数据来自国家卫星气象中心, 并进行了严格的质量控制和预处理, 包括剔除错误数据、重新定位定标、滤除干扰、投影等工作, 基础数据时段为 1999 年至 2009 年, 监测数据时段为 2009 年 9 月至 2010 年 5 月。

1.2.3 地面验证数据

台站旬土壤相对湿度(2009 年 9 月至 2010 年 5 月)和旬降水(2009 年 8 月至 2010 年 6 月)数据来自国家气象信息中心共享的农业气象资料。

2 相对蒸散距平百分率在西南干旱监测中的应用

将 1999—2010 年的静止卫星数据输入 CEWBMS 生成旬相对蒸散数据集, 使用监测时段之前的所有历史蒸散数据求得一年中各旬的相对蒸散平均值 RET_{AVE} , 利用该平均值得到干旱发生时段每旬的相对蒸散距平百分率(Percentage of Relative Evapotranspiration Anomaly, PRETA), 其数

学表达式如下:

$$PRETA = \frac{RET - RET_{AVE}}{RET_{AVE}} \times 100\% \quad (10)$$

当 $PRETA$ 数值在 0 附近时,相对蒸散值接近常年均值,认为处于适宜状态;大于 0 时认为处于湿润状态,统一划为“无旱”等级,不进行细化分级; $PRETA < 0$ 时开始出现干旱,下面对这种情况做具体分级。2006 年公布实施的气象干旱等级国家标准中,把干旱程度划为从“无旱”到“特旱”五个等级,参照该标准中土壤相对湿度干旱指数的等级划分,并通过分析 $PRETA$ 和土壤相对湿度之间的关系,结合多年实际使用经验,给出 $PRETA$ 干旱分级标准,如表 1。

表 1 $PRETA$ 、土壤相对湿度干旱等级表

Table 1 Intensity classification of $PRETA$

干旱等级	土壤相对湿度/%	$PRETA$ /%
特旱	≤ 30	≤ -45
重旱	30~40	-45~-30
中旱	40~50	-30~-15
轻旱	50~60	-15~0
无旱	> 60	> 0

使用上述干旱分级标准,生成 FY-2 气象卫星遥感干旱监测结果,对 2009 年秋季至 2010 年春季西南五省区的干旱过程进行连续动态监测。结果显示旱情从 2009 年 9 月开始,之后逐渐发展加重,其中云南省 2010 年 3 月中旬旱情最为严重,中北部出现大面积特旱区域。2010 年 3 月下旬旱情开始逐渐缓解,至 5 月下旬仅有小部分区域存在中旱以上程度的旱情。

台站观测的土壤相对湿度是一种常用的干旱指数,能够较为直接地反映干旱程度,可以作为实测数据来检验卫星的干旱监测结果。图 1 为 2010 年 3 月上旬至 5 月下旬卫星干旱监测结果与台站 10 cm 土壤相对湿度监测结果对比图。对比显示,总体上 $PRETA$ 干旱指数对旱情演变过程以及重点区域的干旱程度范围反映良好。

监测结果也存在以下问题,如 2010 年 3 月上旬和下旬、4 月上旬对滇中和滇东北的干旱程度反映偏轻,同时 3 月诸旬之间的监测结果存在较大跳变。其主要原因有两点,一是 $PRETA$ 基于的相对蒸散历史数据集时间序列不够长,由此得到的距平值不

能充分地反映出对平均状态的偏离程度。云的影响也是一个重要因素,图 1 中的卫星旬监测结果是由晴天的日产品合成的,当有云天数较多时,旬的合成值不能充分代表旬的平均状况,同时云检测的误差以及云对子像元的污染也会造成模型计算误差,上述几旬都存在旬内有云天数较多的情况。

根据监测结果对受灾最重的云南省月干旱面积进行了统计,统计方法是以旬为监测时间单位,对具体像素而言,只要其在月内出现过某个等级的干旱,就纳入到该等级的面积累计中,结果如表 2。从定量统计结果也可以看出干旱发展变化的过程,云南全省都受到干旱的影响,2010 年 3 月干旱最严重时 48% 面积出现重旱及以上程度的干旱,24% 面积出现特旱。

3 讨论与分析

土壤相对湿度和降水距平百分率是干旱的重要参考指标,分析它们和 $PRETA$ 之间的关系可以对后者在干旱监测中的适用性给出评价。

3.1 $PRETA$ 与 10 cm 土壤相对湿度相关性分析

统计干旱发生时段台站 10 cm 土壤相对湿度与卫星 $PRETA$ 每旬的相关性,研究范围包括云南、贵州、四川、重庆、广西五个省市。统计时 $PRETA$ 取站点周围 5×5 个像素的平均值,用以消除定位偏差和噪声点等造成的误差,有灌溉标志的站点以及有云的像素点予以剔除,结果如表 3。

可以看出在这次大旱过程跨越的三个季节中,冬季(2009 年 12 月至 2010 年 2 月)相关性低,秋季(2009 年 9—11 月)和春季(2010 年 3—5 月)相关性较高。在植被生长较为旺盛的秋季和春季,多数旬的相关系数超过 0.5。冬季大部分旬的相关系数低于 0.4,主要原因是由于本研究使用的蒸散模型适用于地表植被覆盖度较高的情况,冬季地表植被稀疏时,效果不是很好,加上该季节云检测误差较大,最终造成计算结果和土壤相对湿度之间的低相关性。

3.2 $PRETA$ 与台站降水距平百分率

针对旱情最严重的云南省,对台站降水距平百

分率与卫星 PRETA 的面平均时间序列进行对比分析,从宏观上研究两者变化趋势的一致性,研究时段

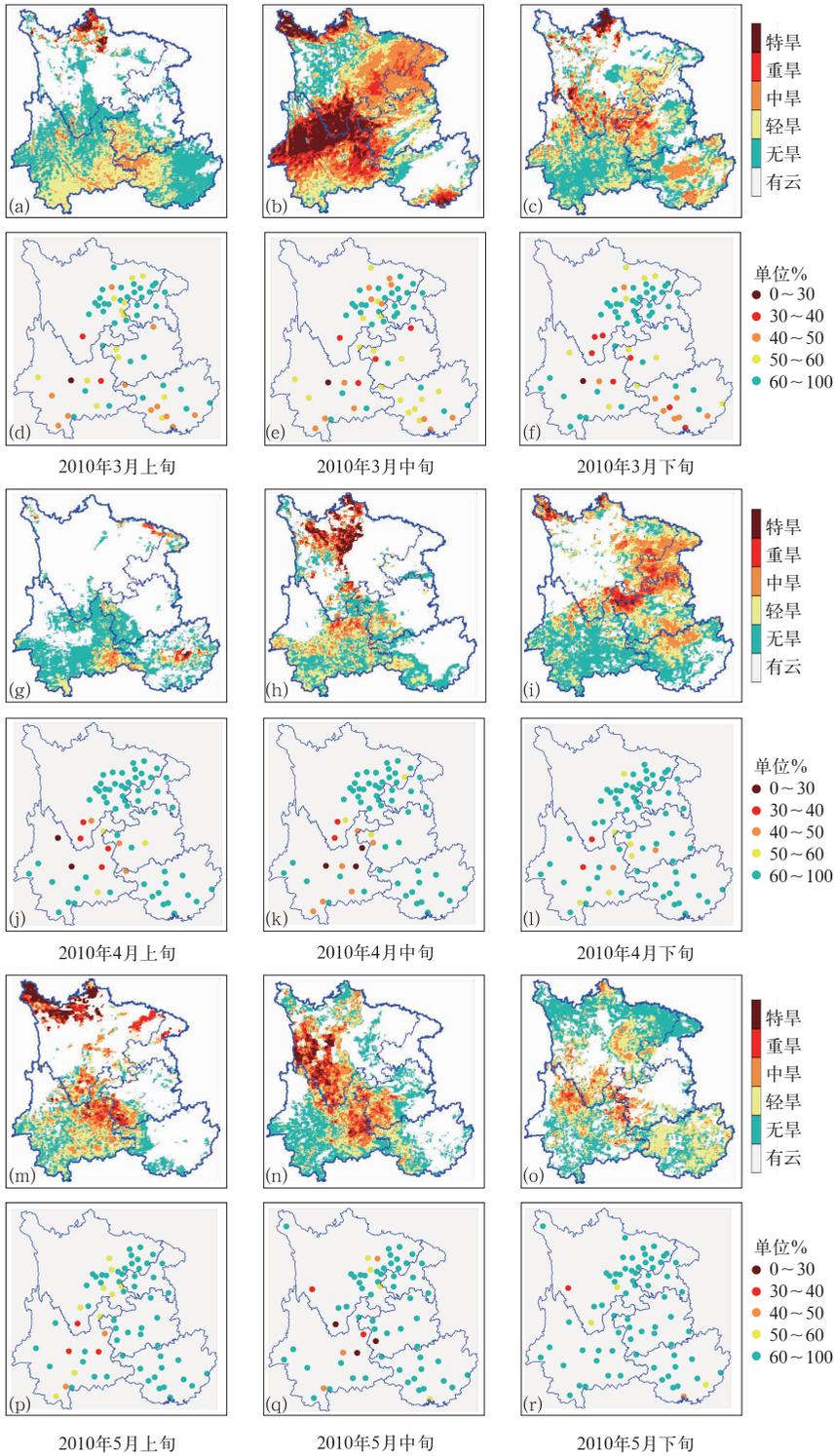


图 1 西南地区 FY-2 卫星干旱监测图(a,b,c,g,h,i,m,n,o)和 10 cm 土壤相对湿度分布图(d,e,f,j,k,l,p,q,r)

Fig. 1 FY-2 satellite drought monitoring maps (a,b,c,g,h,i,m,n,o) and 10 cm relative soil moisture measurements (d,e,f,j,k,l,p,q,r) in Southwest China

表 2 云南省月干旱面积百分比

Table 2 Monthly statistical results of drought area in Yunnan Province

日期	轻旱及以上程度 干旱面积百分比/%	中旱及以上程度 干旱面积百分比/%	重旱及以上程度 干旱面积百分比/%	特旱面积 百分比/%
2009年9月	66.03	21.16	1.25	0.01
2009年10月	89.11	50.24	16.1	3.47
2009年11月	97.99	65.32	23.35	1.97
2009年12月	99.73	93.5	46.85	6.77
2010年1月	99.92	96.62	60.5	17.16
2010年2月	92.01	78.58	43.8	15.54
2010年3月	93.86	72.49	48.28	23.68
2010年4月	62.61	21.04	5.05	0.59
2010年5月	70.81	34.77	12.84	1.93

表 3 西南地区 PRETA 和 10 cm 土壤
相对湿度相关系数表Table 3 Correlation coefficients between PRETA
and 10cm relative soil moisture measurements
in Southwest China

日期	样本数(N)	相关系数(R)	
2009年	9月上旬	58	0.81**
	9月中旬	57	0.65**
	9月下旬	65	0.24-
	10月上旬	59	0.54**
	10月中旬	54	0.38**
	10月下旬	58	0.57**
	11月上旬	63	0.51**
	11月中旬	54	0.57**
	11月下旬	62	0.52**
	12月上旬	59	0.07-
	12月中旬	58	0.27*
	12月下旬	60	0.04-
2010年	1月上旬	61	0.28*
	1月中旬	66	0.27*
	1月下旬	62	0.38**
	2月上旬	57	0.15-
	2月中旬	43	0.48**
	2月下旬	63	0.63**
	3月上旬	41	0.67**
	3月中旬	60	0.33**
	3月下旬	62	0.67**
	4月上旬	31	0.25-
	4月中旬	37	0.75**
	4月下旬	73	0.43**
5月上旬	47	0.38**	
5月中旬	47	0.63**	
5月下旬	69	0.31**	

注: ** 通过 0.01 显著性水平检验; * 通过 0.05 显著性水平检验; - 没有通过显著性检验

** significant at 0.01 level; * significant at 0.05 level; - insignificant

面平均 PRETA 为省内所有晴空像素的平均值,图 2 为上述各变量的时间序列图。

结果显示大致从 2009 年 8 月底至 9 月初开始,降水距平百分率和 PRETA 都急剧下降,之后近 7 个月的时段两者都一直保持为负值,且变化趋势基本一致,2010 年 3 月下旬出现明显的降水正距平,PRETA 也急剧增加并于 4 月上旬出现明显正距平,之后随着降水的不断出现,相对蒸散值也逐渐接近常年平均值。总的来说,在这次大旱过程中,面平均的 PRETA 和降水距平百分率在时间变化趋势上具有良好的一致性。

4 结 论

本研究基于近 11 年的卫星旬地表蒸散数据集,构建了相对蒸散距平百分率 (PRETA) 干旱指数,距平百分率的引入消除了季节和地域气候类型等因素对于干旱等级划分的影响。利用 PRETA 干旱指数对 2009 年秋季至 2010 年春季的西南大旱过程进行了连续监测,总体上对旱情时空变化反映良好。研究中所使用的地表蒸散模型基于静止气象卫星数据,在保证大范围连续监测能力的同时,还能兼顾高的空间分辨率,可以清晰地获得旱情变化的时间和空间细节。经过与地面观测的 10 cm 土壤相对湿度和降水距平百分率对比分析,得出以下结论。

PRETA 能够反映土壤的水分状况,在植被生长旺盛的阶段,PRETA 和 10 cm 土壤相对湿度有较高的相关性。面平均 PRETA 和降水距平百分率时间序列的变化趋势显示出良好的一致性。因此,静止卫星 PRETA 产品能够用来监测干旱的发生和发展过程,并可以用来评估干旱的影响,在干旱监测领域内具有良好的应用前景,为实时大范围遥感定

为 2009 年 8 月上旬至 2010 年 6 月下旬。面平均降水距平百分率和降水量为该省所有测站的平均值,

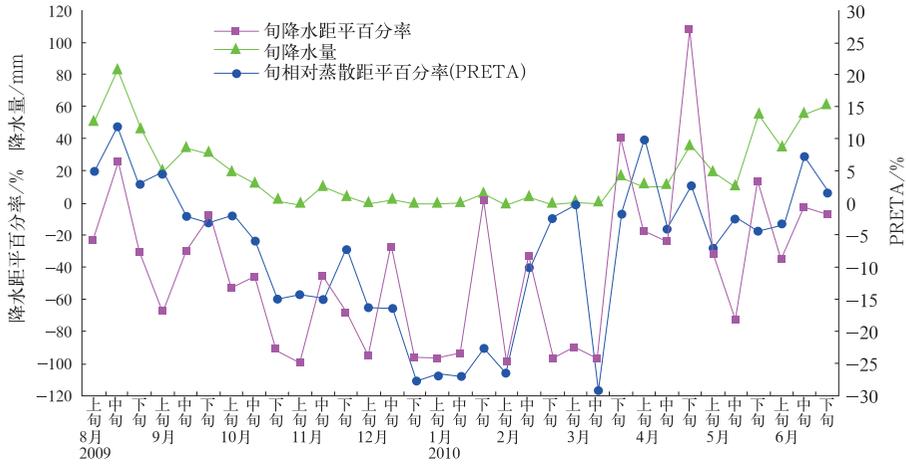


图 2 云南省 PRETA、台站降水距平百分率和降水量时间序列图
 Fig. 2 Time series for PRETA, precipitation anomaly percentage and precipitation measurements in Yunnan Province

量化监测干旱提供了切实可行的方法。

另外,在建立基于 PRETA 的干旱指数和干旱分级标准方面还需要进行更深入细致的研究。为了提高监测准确性,还应收集更长时间序列的卫星数据,以获得更具代表性的常年平均值。

参考文献

[1] 董琼琼,徐虹,浦吉存,等. 利用 NOAA/AVHRR 资料监测云南大面积干旱的业务流程[J]. 气象,2001,27(1): 31-34.
 [2] 刘良明,李德仁. 基于辅助数据的遥感干旱分析[J]. 武汉测绘科技大学学报,1999,24 (4):300-305.
 [3] 陈怀亮,冯定原,邹春辉. 河南省干旱遥感监测信息系统[J]. 气象,1998, 25(6):50-53.
 [4] 张仁华,孙晓敏,朱治林,等. 以微分热惯量为基础的地表蒸发全遥感信息模型及在甘肃沙坡头地区的验证[J]. 中国科学(D辑),2002,32(12):1041-1051.
 [5] 申广荣,田国良. 作物缺水指数监测旱情方法研究[J]. 干旱地区农业研究,1998,16(1):123-128.
 [6] 隋洪智,田国良,李付琴. 农田蒸散双层模型及其在干旱遥感监测中的应用[J]. 遥感学报,1997,1(3):220-224.
 [7] Wu Rongzhang, Hu Liqin, Zhang Yuanyuan, et al. S-VISSR image-based Chinese energy and water balance system and its potential application on drought monitoring[C]. SPIE, 2003, 4895:157-167.
 [8] 罗秀陵,薛勤,张长虹,等. 应用 NOAA-AVHRR 资料监测四川干旱[J]. 气象,1996,22(5): 35-38.

[9] 张春桂,李文. 福建省干旱灾害卫星遥感监测应用研究[J]. 气象,2004,30(03): 22-24.
 [10] 朱小祥,刘瑞霞. 卫星资料在干旱监测中的应用研究[J]. 海洋科学进展,2004,22(z1):8-15.
 [11] 刘惠敏,马小群,孙秀帮. 安徽省 MODIS 干旱监测技术研究[J]. 气象,2010,36(4):111-115.
 [12] Price J C. Estimation of regional scale evapotranspiration through analysis of satellite thermal-infrared data[J]. IEEE Trans Geosci Remote Sens, 1982, GE-20(3):286-292.
 [13] Rosema A. Results of the Group Agromet Monitoring Project (GAMP)[J]. ESA-Journal, 1986, 10(1):17-41.
 [14] Marks D, Dozier J. Climate and energy exchange at the snow surface in the alpine region of the Sierra Nevada[J]. Water Resour Res, 1992, 28(11):3043-3054.
 [15] Rosema A. Using METEOSAT for operational evapotranspiration and biomass monitoring in the Sahel region[J]. Remote Sens Environ, 1993, 46(1):27-44.
 [16] 刘安麟,李星敏,何延波,等. 作物缺水指数法的简化及在干旱遥感监测中的应用[J]. 应用生态学报,2004, 15(2):210-214.
 [17] 侯英雨. 中国地表蒸散和干旱时空变化遥感分析[D]. 北京:中科院遥感应用研究所,2008.
 [18] Kondratyev K Y. Radiation in the Atmosphere[M]. New York: Academic Press, 1969.
 [19] Rosema A, Snel JFH, Zahn H, et al. The relation between laser-induced chlorophyll fluorescence and photosynthesis[J]. Remote Sens Environ, 1998, 65(2):143-154.