

田 苗, 王鹏新. 降水温度指数及其在旱涝灾害监测中的应用[J]. 江苏农业学报, 2016, 32(4): 810-816.
doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2016.04.016

降水温度指数及其在旱涝灾害监测中的应用

田 苗¹, 王鹏新²

(1. 江苏省农业科学院农业经济与信息研究所, 江苏 南京 210014; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

摘要: 应用被动微波遥感热带降雨测量卫星(TRMM)降水量数据结合中分辨率成像光谱仪(MODIS)地表温度产品, 建立了降水温度指数模型, 用于旱涝灾害的监测。该指数参考了地表温度与植被指数特征空间反演地表水分的方法, 同时考虑了降水量和地表温度2个因素, 并将旱灾和涝灾的监测结合起来。应用水系所在区域的降水温度指数的统计值, 确定了涝灾的值域范围; 应用 AMSR-E 土壤湿度数据, 确定了旱灾的值域范围。结果表明, 降水温度指数旱灾监测结果与条件温度指数监测结果一致, 降水温度指数涝灾监测结果与标准化降水指数监测结果一致, 且与历年相关的新闻报道相符。说明降水温度指数可以用来进行旱涝灾害监测。

关键词: 降水量; 地表温度; 遥感; 降水温度指数; 旱涝灾害

中图分类号: TP79 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-4440(2016)04-0810-07

Precipitation-temperature index and its application in drought and flood disasters monitoring

TIAN Miao¹, WANG Peng-xin²

(1. Institute of Agricultural Economy and Information, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: A new precipitation-temperature index (PTI) was developed based on precipitation data from passive microwave remote sensing of tropical rainfall measurement mission (TRMM) and moderate-resolution imaging spectroradiometer (MODIS) land surface temperature products in this study. The new index is not only related to precipitation changes in a region, but also gives emphasis on land surface temperature changes, aiming at integrated monitoring of both drought and flood disasters. The performance of temperature. The PTI pixels in the central Taihu Lake and Hongze Lake were applied to determine the flood line of PTI. ASMR-E soil moisture data was used to determine the drought line of PTI. The performance of temperature condition index (TCI) was consistent with PTI when applied to monitor drought, while standardized precipitation index (SPI) agreed well with PTI in monitoring flood disasters. The results indicated that PTI is capable of integrated monitoring of drought and flood disasters.

Key words: precipitation; land surface temperature; remote sensing; precipitation-temperature index; drought and flood disasters

收稿日期: 2015-11-10

基金项目: 国家自然科学基金项目(41401416); 国防科工委高分辨率对地观测系统重大专项课题(09-Y30B03-9001-13/15); 江苏省农业科学院基本科研业务专项项目[ZX(15)4055]

作者简介: 田 苗(1984-), 女, 河北保定人, 博士, 助理研究员, 主要从事遥感技术在农业灾害中的应用研究。
(Tel) 025-84391304; (E-mail) tm1304207@126.com

通讯作者: 王鹏新, (E-mail) wangpx@cau.edu.cn

旱涝灾害是中国主要的气象灾害, 对国民经济特别是对农业生产造成了严重的影响, 历来被人们所关注。江苏省地处欧亚大陆的东南部, 东部濒临西太平洋, 是亚热带和暖温带的过度区, 又是极地大陆性和热带海洋性气团强烈交汇的季风区, 因此一年四季都极易发生气象灾害, 尤其容易发生旱涝灾害。

目前应用遥感技术进行旱涝灾害的监测主要基于光学遥感反演的地表温度和植被指数进行^[1-2],地表温度(Land surface temperature, LST)是控制地球表面大多数物理、化学和生物过程的一种最重要的因子。对裸土来说地表温度指的是土壤表面温度,浓密植被覆盖的地表温度可以认为是植物冠层的表面温度。植物冠层温度升高是植物受到水分胁迫和干旱发生的最初表征。但植被指数反映干旱状况,在时间上具有滞后性,而降水是旱涝灾害发生的最直接因素,尤其对洪涝灾害的发生具有直接的影响作用。降水数据一般来自于地面气象站点的观测,但在实际操作中,由于区域降水时空分布的不均匀性,气象站点数量的不足以及空间展布的不合理性,往往直接限制了旱涝灾害分析的准确性。由于遥感数据具有较大的空间覆盖性,以及时间和空间上的连续性,近年来遥感技术已成为监测全球降水变化的重要手段。热带降雨测量卫星(Tropical rainfall measurement mission, TRMM)因其具有观测三维降水信息的能力,在各种星载传感器中已成为获取降水资料的首选^[3],已经开发出了一系列的TRMM相关反演算法和验证方法^[4-5]。Almazroui等在沙特阿拉伯地区的研究结果表明,TRMM数据的精度已基本接近站点观测雨量数据,可用于降水有关的研究和分析^[6]。当前TRMM降水数据还主要用于区域降水的空间结构以及季节变化等方面的研究^[7-9],而用于区域旱涝灾害监测的研究还不多见^[10]。

因此本研究基于被动微波遥感的TRMM降水数据和光学遥感的中分辨率成像光谱仪(Moderate-resolution imaging spectroradiometer, MODIS)的地表温度数据产品,应用降水量和地表温度两个因素建立特征空间,开发降水温度指数(Precipitation temperature index, *PTI*)。再应用ASMR-E的土壤湿度数据确定降水温度指数的旱灾值域范围,应用水体所在区域的降水温度指数值确定降水温度指数的涝灾值域范围。对江苏省冬小麦主要生育期内的旱涝灾害进行监测,并结合历年旱涝灾害的新闻报道对降水温度指数及其旱涝灾害的值域范围进行分析。

1 材料与方法

1.1 数据来源

选用2000—2014年1—6月TRMM 3B42逐日

降水数据产品(空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$)和2000—2014年3—6月MOD11A1逐日地表温度数据产品(空间分辨率为1 km)。

TRMM^[3]由美国国家宇航局和日本国家空间发展局共同研制,用于研究热带地区降水量和潜热以进一步了解全球能量和水循环。目前,TRMM 3B42数据已经在多个地区得到广泛的验证,在中国境内与实测资料的相关性较好,尤其是在整个东部平原区^[11]。

搭载在Terra和Aqua两颗卫星上的MODIS是美国地球观测系统(EOS)计划中用于观测全球生物和物理过程的重要仪器。它具有36个中等分辨率水平的光谱波段,每1~2 d对地观测1次。LST是MODIS资料业务化反演产品之一,大量研究结果表明,MODIS分裂窗算法反演得到的地表温度达到了1 K的精度^[12-14],且空间分辨率为1 km。

1.2 降水温度指数的生成及旱涝等级划分方法

参考地表温度与植被指数特征空间反演以地表水分参数为主的方法^[2],应用降水量和地表温度两个指标建立特征空间,开发降水温度指数。地表温度是大气-土壤-植被系统内物质和能量交换的结果,可以反映地表含水量的变化,进而揭示植被生长情况,同时还可以用来间接判断地表蒸散状况。降水量直接反映某一地区的水分供给情况,尤其是靠雨养为主的旱作区。两个指标相结合,既反映了某一地区水分供给状况,又反映了该地区地表蒸散情况,可以用来进行地表含水量的监测。地表温度与植被指数二维散点图的分布可能存在2种关系,三角形区域分布和梯形区域分布,在假定某种区域分布的前提下,开发相关地表参数监测模型。在本研究中,首先构造地表温度和降水量的二维散点图,并分析散点图的分布关系,确定区域分布关系后建立模型。本研究时间尺度定为旬,且降水量采用多旬累积降水量。由于某时段的降水量不一定能够反映该时段的旱涝程度,其旱涝程度尤其是干旱程度与前一时期的降水量也密切相关,因此本研究用多旬累积降水量来反映某一时段及其前一时段对该时段旱涝灾害的影响,即构造某时段多旬累积降水量和当旬地表温度的特征空间,在此基础上进行模型的开发。

1.2.1 旬地表温度和旬降水量的生成 分别将逐日降水数据和地表温度数据产品合成为旬降水量和

旬地表温度。旬地表温度的合成方法为:10 d 作为 1 旬,31 号为该月第 3 旬,应用最大值合成法,对每旬所有的影像数据逐像素取最大值,得到旬地表温度,此处在一旬内取最大值的目的是进一步消除太阳高度角、卫星视角、轨道漂移以及云等的影响;旬降水量数据合成方法为:10 d 作为 1 旬,31 号为该月第 3 旬,对每旬所有影像数据逐像素进行累积,得到旬降水量数据。

由于 TRMM 降水数据水平分辨率为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$,而 MODIS LST 数据的空间分辨率为 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$,两种数据在空间尺度上不匹配,在进行坐标匹配的基础上,将 TRMM 降水数据处理成 $1 \text{ km} \times 1 \text{ km}$ 的尺度。处理方法为:每个 MODIS LST 像素都对应一个降水量值,每个降水量值对应多个 LST 值,以 MODIS LST 影像的行列数为准,对每个 LST 值所对应的降水量值依次记录,得到与 MODIS LST 行列数相同的 TRMM 降水量数据。

1.2.2 多旬累积降水量 应用合成的 2000—2014 年 1—6 月的旬降水量数据,对每年的旬降水量分别进行累积,累积方法为:

$$P_{ik} = \sum_{i=1}^k p_{ik} \quad (1)$$

式中 i 为年份, $i=2000, 2001, \dots, 2014$; i_k 为第 i 年的第 k 旬, p_{ik} 为第 i 年第 k 旬的旬降水量, k 从每年的 1 月上旬依次记数,6 月下旬为 $k=18$,即 $k=1, 2, \dots, 18$ 。以 2000 年为例, $P_{2000,7}$ 为 2000 年第 7 旬(3 月上旬)的多旬累积降水量,该值由 2000 年 1 至 7 旬的旬降水量累积得到,同理, $P_{2000,8}$ 由 2000 年 1 至 8 旬的旬降水量累积得到,依次类推,根据上述方法得到每年 3—6 月每旬的多旬累积降水量,即 $P_{i,7}, P_{i,8}, \dots, P_{i,18}, i=2000, 2001, \dots, 2014$ 。

1.2.3 旬地表温度和旬累积降水量特征空间 利用多年某一旬的多旬累积降水量和 LST 构成特征空间,图 1 为 2000—2014 年 6 月下旬的多旬累积降水量和旬 LST 组成的散点图。由图 1 可见,多旬累积降水量和地表温度构成的特征空间呈三角形区域分布,随着多旬累积降水量的增大,像素逐渐减少。由于地表温度为当旬的产品,而降水数据为每年 1 月 1 日至该旬的降水量累积值,在相同降水量的情况下,不同像素 LST 的差异较大,水体、路面和植被等不同地物覆盖类型的 LST 差异明显,在植被覆盖的区域内不同作物覆盖类型,或同一作物类型

的覆盖率不同,以及前期和当时地表含水量的不同都会对 LST 产生影响,因此特征空间不是单纯的线性分布。地表温度与多旬累积降水量特征空间呈三角形区域分布,要求有多年该旬数据,且多年中存在极旱和极涝的灾害现象。图 1 中的热边界,表示土壤水分的有效性低,温度在相同降水条件下偏高;冷边界表示水分过剩,温度在同等条件下偏低。根据多年某一旬的数据构成的特征空间,可近似得到各旬的冷热边界,结合冷热边界建立降水温度指数。

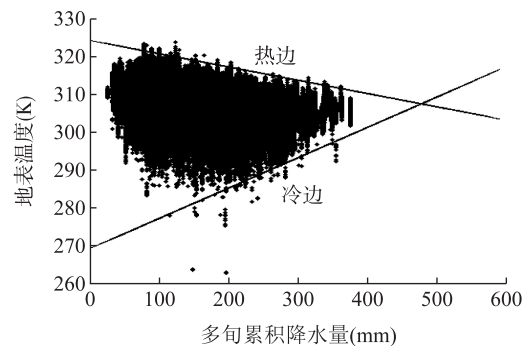


图 1 6 月下旬多旬累积降水量和地表温度散点图

Fig.1 Cumulative precipitation and land surface temperature scatter plot by the last ten days of June

1.2.4 降水温度指数 降水温度指数的定义为:

$$PTI = \frac{T_{P_i \max} - T_{P_i}}{T_{P_i \max} - T_{P_i \min}} \quad (2)$$

$$\text{其中, } T_{P_i \max} = a + bP_i \quad (3)$$

$$T_{P_i \min} = a' + b'P_i \quad (4)$$

式中, P 为多旬累积降水量, $T_{P_i \max}$ 和 $T_{P_i \min}$ 分别表示在研究区域内多旬累积降水量为 P_i 值时的地表温度的最大值和最小值, T_{P_i} 为某一时段研究区域内多旬累积降水量为 P_i 时的地表温度值,其中 a, b, a' 和 b' 通过多年该旬的多旬累积降水量和 LST 特征空间确定的冷热边界近似获得。

降水温度指数值为 0~1,数值越小越干旱,数值越大涝灾越严重,判断是否发生旱涝灾害,需要确定旱涝灾害的值域范围。

1.2.5 降水温度指数旱涝灾害值域的确定 江苏省内水体较多,如果其他区域降水温度指数值与水体所在区域的降水温度指数值相当,我们认为该区域发生了涝灾。选择较湿润的年份,在太湖和洪泽湖所在区域选定部分像素,作为涝灾样本确定涝灾值域范围。对所有涝灾样本作频数分布图取一个临

界值使得 95% 的样本值都大于该临界值,并将该临界值选为涝灾发生的临界值,即大于该值被认为发生了涝灾。

应用 ASMR-E 的 Level-3 土壤湿度产品确定降水温度指数的旱灾值域范围。ASMR-E 的 Level-3 陆地产品为逐日数据,包括地面土壤湿度的反演值、12 通道的亮温值及数据的质量评价。每一天的数据都有升轨和降轨两种,它们的区别在于传感器扫描的方式不同,升轨是从南极到北极,降轨是从北极到南极。Level-3 产品的空间分辨率经过重采样,统一为 25 km。应用与 TRMM 相同的匹配方法,将 ASMR-E level-3 产品转换成 1 km×1 km 的空间分辨率,再应用均值法将逐日的土壤湿度产品合成为旬土壤湿度产品。

体积土壤含水量小于 15% 时,我们认为发生了干旱。选用 2004 和 2005 年降水偏少的年份,将 ASMR-E 土壤湿度产品体积土壤含水量小于 15% 的像素所对应的降水温度指数值选为样本,并作频数分布图,取一个临界值使得 95% 的像素都小于该临界值,将该值选为干旱发生的临界值,即小于该值被认为发生了干旱。

2 结果与分析

2.1 降水温度指数计算结果

根据地表温度和旬累积降水指数的特征空间,确定 3—6 月各旬的冷热边界(表 1)。可以发现冷边界斜率均为正,热边界斜率均为负,在特征空间中构成三角形。根据确定的冷热边界及降水温度指数的定义,得到 2000—2014 年 3—6 月以旬为单位的降水温度指数。

以 2008 年 6 月下旬为例,对多旬累积降水量、地表温度和降水温度指数进行对比分析(图 2),可以看出江苏省西北部地区自 2008 年 1 月 1 日起至 6 月下旬的总降水量较少,丰县、沛县总降水量在 100 mm 左右,江苏中东部地区滨海县、射阳县降水量偏少,苏南地区降水量较丰沛;从地表温度图可以看出,江苏省内河流和湖泊等水体的形状十分清晰,较其他地区温度明显偏低,西北部地区边的地表温度相对较高;降水温度指数结合了多旬累积降水量和地表温度,由于累积降水量数据水平分辨率较低,因此降水温度指数的纹理受地表温度的影响较大,但降水温度指数同时受到累积降水量的影响。由图 2

中红色框和蓝色框中的区域可以看出,北部徐州市和东部滨海县、射阳县的多旬累积降水量较少,地表温度相对较高,降水温度指数显示的干旱程度更明显;黄色框中的水体部分多旬累积降水量较高,在多旬累积降水量图中出现深蓝色,在降水温度指数图中蓝色也很明显。

表 1 3—6 月各旬冷热边界

Table 1 The hot and cold boundary of each ten days from March to June

时间	冷边界	热边界
3 月上旬	$T=0.050P+270$	$T=-0.020P+305$
3 月中旬	$T=0.033P+275$	$T=-0.033P+305$
3 月下旬	$T=0.020P+279$	$T=-0.033P+307$
4 月上旬	$T=0.027P+280$	$T=-0.060P+313$
4 月中旬	$T=0.030P+276$	$T=-0.027P+312$
4 月下旬	$T=0.060P+273$	$T=-0.033P+316$
5 月上旬	$T=0.033P+283$	$T=-0.027P+317$
5 月中旬	$T=0.050P+277$	$T=-0.020P+317$
5 月下旬	$T=0.030P+283$	$T=-0.040P+322$
6 月上旬	$T=0.050P+281$	$T=-0.033P+321$
6 月中旬	$T=0.065P+275$	$T=-0.030P+324$
6 月下旬	$T=0.070P+269$	$T=-0.035P+324$

2.2 降水温度指数旱涝灾害值域的确定

选择 2001、2003、2006、2010 和 2012 年等较湿润的年份,在太湖和洪泽湖所在区域选定部分像素,作为涝灾样本。对所有涝灾样本作频数分布图(图 3),取临界值为 0.55 使得 95% 的样本值都大于该临界值,即降水温度指数值大于 0.55 时,认为该地区发生了涝灾。

2.3 降水温度指数旱灾值域的确定

选择 2004 和 2005 年降水偏少的年份,将体积土壤含水量小于 15% 的像素所对应的降水温度指数值选为样本,并作频数分布图(图 4),取临界值为 0.34 使得 95% 的像素都小于该临界值,即降水温度指数值小于 0.34 时,我们认为该地区发生了干旱。

2.4 降水温度指数监测旱涝灾害的精度分析

将降水温度指数和条件温度指数及标准化降水指数进行对比,条件温度指数强调温度和植物生长的关系,标准化降水指数强调降水与植物生长的关系。条件温度指数(Temperature condition index,

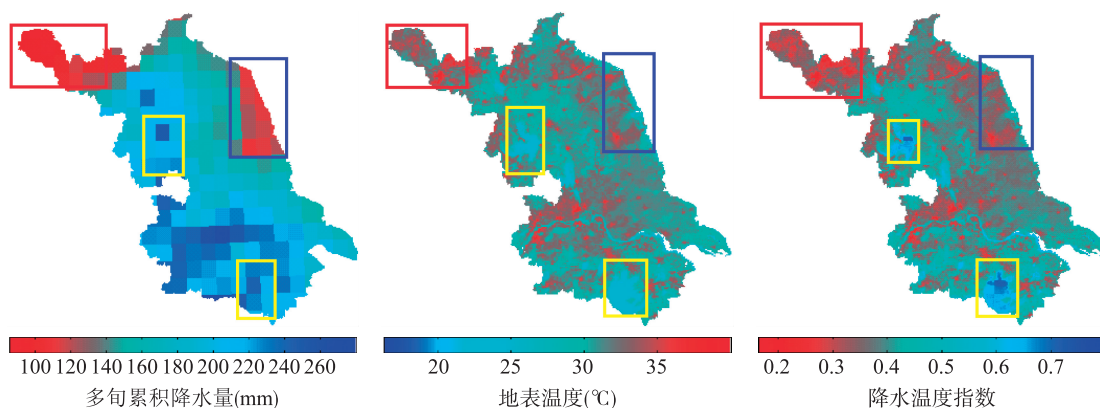


图 2 2008 年 6 月下旬的多旬累积降水量、地表温度和降水温度指数图

Fig.2 Cumulative precipitation, land surface temperature and precipitation temperature index by the last ten days of June 2008

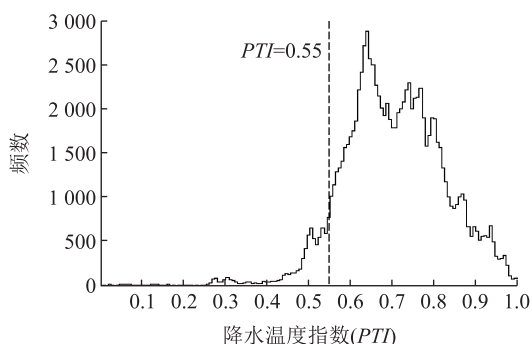


图 3 涝灾样本频数分布图

Fig.3 The frequency distribution of flood disaster samples

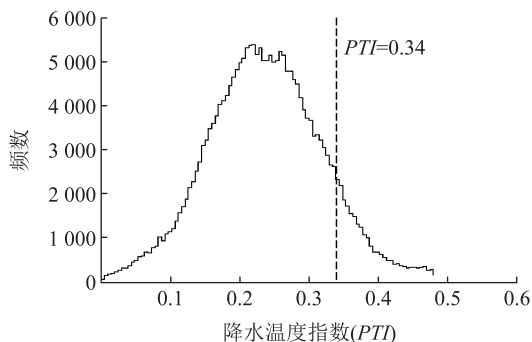


图 4 旱灾样本频数分布图

Fig.4 The frequency distribution of drought disaster samples

TCI) 的定义为:

$$TCI = \frac{T_{\max} - T_i}{T_{\max} - T_{\min}} \quad (3)$$

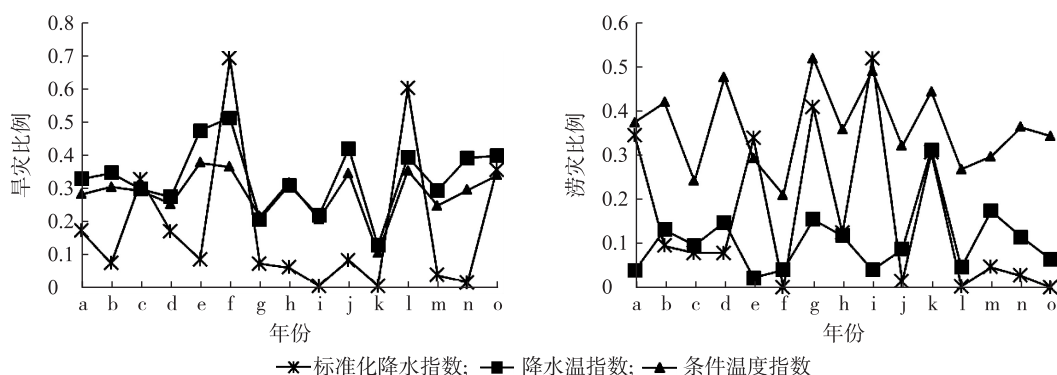
式中 T_i 为监测年第 i 个时期亮温值, T_{\max} 和 T_{\min} 分别表示所有监测年第 i 个时期亮温的最大值和最小值。根据 TCI 的等级划分, 大于 0.49 为湿润, 小于

0.33 为干旱^[15]。

标准化降水指数 (Standardized precipitation index, SPI) 在计算过程中消除了降水的时空分布差异, 在各个区域和各个时段都能有效地反映旱涝状况, 并具有良好的稳定计算特性。国内外学者应用 SPI 进行了大量研究, 并证实了它的现实意义。因为 12 个月时间尺度的 SPI 可以比较清楚地反映旱涝阶段性变化^[16], 本研究应用 TRMM 数据计算 36 个月时间尺度的 SPI , 与降水温度指数进行对比分析。根据 SPI 的等级划分, 大于 1.0 为洪涝, 小于 -1.0 为干旱。

根据 TCI 和 SPI 的原理, 计算得到 2000—2014 年 3—6 月以旬为单位的 TCI 和 SPI , 并根据等级划分规则, 将 TCI 、 SPI 和 PTI 划分成干旱、正常和洪涝 3 个等级。除去水域, 分别对 SPI 、 TCI 和 PTI 每年旱涝灾害发生的比例进行统计, 对 PTI 进行精度分析, 即分别计算每年处于旱涝灾害等级的像素占总像素数的比例。图 5 显示, 旱灾在历年所占比例中, PTI 和 TCI 相符得较好, 说明 PTI 在干旱监测方面与 TCI 能力相当, 而 SPI 与其他 2 个指数相差较多; 涝灾在历年所占比例中, 除个别年份外 PTI 和 SPI 相符得较好, 而 TCI 与其他 2 个指数相差较大, 说明在洪涝灾害监测能力上 PTI 与 SPI 相当。由此可以看出, PTI 综合了两者的优势, 可同时进行旱涝灾害的监测, 从整体上来看, PTI 优于其他两个指数。

结合历年江苏省旱涝灾害的新闻报道, 分析降水温度指数旱涝灾害监测的能力 (图 6)。图 6 中研究区域内的白色部分为水体或缺失值, 缺失值的主要原因有 2 点: ①原始地表温度或降水数据的部分



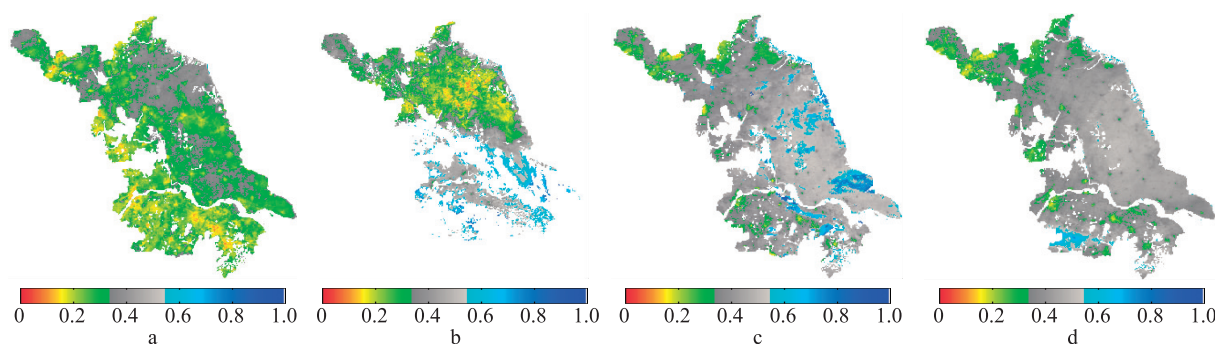
a、b、c、d、e、f、g、h、i、j、k、l、m、n、o 分别表示 2000 年、2001 年、2002 年、2003 年、2004 年、2005 年、2006 年、2007 年、2008 年、2009 年、2010 年、2011 年、2012 年、2013 年、2014 年。

图 5 2000—2014 年旱涝灾害发生比例

Fig.5 The drought disaster and flood disaster occurred in 2000 to 2014

缺失;②该区域地表温度与累积降水量组成的点,在散点图中处于冷热边界外,导致降水温度指数值异常。图 6 中红绿色系为干旱区域,灰黑色系为正常区域,蓝色系为洪涝区域。据报道,2011 年截止五月底,江苏省降雨较少,部分地区旱情达到了 60 年来最严重的程度,一些湖泊干涸,淮河下游断流,太湖和洪泽湖的水位处于历史最低水位^[17]。2011 年 5 月中旬监测结果(图 6)显示,江苏省大部分地区处于干旱状态,尤其苏南地区及水域周围干旱较严重,与报道相符。据中新网报道^[18],2011 年 6 月 18 日,江苏省气象台发布黄色、橙色暴雨预警信号,淮

河以南大部地区降雨量达到 50 mm 以上且降雨持续,江苏省南涝北旱,南北旱涝两重天。2011 年 6 月中旬旱涝灾害监测图(图 6)显示,江苏省北部干旱仍然较重,南部出现大范围洪涝灾害,南北旱涝两重天,与报道相符。报道称 2002 年江苏省徐州市发生百年罕见的干旱,尤其是丰县和沛县,遭遇春旱接伏旱又接秋旱的严峻局面^[19]。2002 年 4 月上旬和中旬的旱涝灾害监测图(图 6)显示,徐州地区干旱明显且持续加重。由此可以看出,降水温度指数对江苏省旱涝灾害的监测具有一定的指示作用。



a:2011 年 5 月中旬;b:2011 年 6 月中旬;c:2002 年 4 月上旬;d:2002 年 4 月中旬。

图 6 降水温度指数旱涝灾害分布图

Fig.6 Distribution of drought and flood disasters indicated by precipitation and temperature index

3 讨论

本研究结合光学遥感数据的 MODIS LST 产品

和被动微波遥感的 TRMM 降水量数据,参考地表温度与植被指数特征空间反演以地表水分参数为主的方法,提出了降水温度指数,并将旱灾与涝灾的监测

结合起来,应用水体的降水温度指数值,确定了涝灾发生的值域范围,应用 ASMR-E 的土壤湿度数据,确定了降水温度指数旱灾发生的值域范围,统计了 2000—2014 年旱涝灾害发生的频率,并根据多年旱涝灾害的相关新闻报道,对降水温度指数旱涝灾害监测的能力进行了分析,显示了降水温度指数监测旱涝灾害的合理性。植被指数对作物的指示作用也很重要,如何将降水量、地表温度、植被指数等更多影响因子结合起来进行农业旱涝灾害的监测,以及如何对旱涝灾害等级进行精细的划分将是后续研究的重点。

参考文献:

- [1] 王鹏新,龚健雅,李小文. 条件植被温度指数及其在干旱监测中的应用[J]. 武汉大学学报:信息科学版, 2001, 26(5): 412-418.
- [2] 田苗,王鹏新,孙威. 基于地表温度与植被指数特征空间反演地表参数的研究进展[J]. 地球科学进展, 2010, 25(7): 698-705.
- [3] THEON J S. The tropical rainfall measuring mission (TRMM)[J]. Remote Sensing of Earth's Surface and Atmosphere, 1993, 14(3): 159-165.
- [4] ISLAM M N, UYEDA H. Use of TRMM in determining the climatic characteristics of rainfall over Bangladesh [J]. Remote Sensing of Environment, 2007, 108(3): 264-276.
- [5] WOLFF D B, FISHER B, WANG J, et al. Ground validation for the tropical rainfall measuring mission (TRMM) [J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2005, 22(4): 365-380.
- [6] ALMAZROUI M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009 [J]. Atmospheric Research, 2011, 99(3/4): 400-414.
- [7] DUAN Z, BASTIAANSEN W G M. First results from Version7 TRMM 3B43 precipitation product in combination with a new downscaling-calibration procedure[J]. Remote Sensing of Environment, 2013, 131: 1-13.
- [8] 李景刚,李纪人,黄诗峰,等. 基于 TRMM 数据和区域综合 Z 指数的洞庭湖流域近 10 年旱涝特征分析[J]. 资源科学, 2010, 32(6): 1103-1110.
- [9] VARIKODEN H, SAMAH A A, BABU C A. Spatial and temporal characteristics of rain intensity in the peninsular Malaysia using TRMM rain rate[J]. 2010, 387(3-4): 312-319.
- [10] LONG D, SHEN Y J, SUN A, et al. Drought and flood monitoring for a large karst plateau in Southwest China using extended GRACE data[J]. Remote Sensing of Environment, 2014, 155: 145-160.
- [11] 骆三,苗峻峰,牛涛,等. TRMM 测雨产品 3B42 与台站资料在中国区域的对比分析[J]. 气象, 2011, 37(9): 1081-1090.
- [12] WAN Z, ZHANG Y L, ZHANG Q C, et al. Quality assessment and validation of the MODIS global land surface temperature[J]. International Journal of Remote Sensing, 2004, 25(1): 261-274.
- [13] WANG K C, LIN J, WAN Z, et al. Preliminary accuracy assessment of MODIS land surface temperature products at a semi-desert site [J]. Society of Photo-Optical Instrumentation Engineers, 2005, 5832: 452-460.
- [14] WAN Z, ZHANG Y L, ZHANG Q C, et al. Validation of the land surface temperature products retrieved from terra moderate resolution imaging spectroradiometer data[J]. Remote Sensing of Environment, 2002, 83: 163-180.
- [15] 孙威,王鹏新,韩丽娟,等. 条件植被温度指数干旱监测方法的完善[J]. 农业工程学报, 2006, 22(2): 22-26.
- [16] PATEL N R, CHOPRA P, DADHWAL V K. Analyzing spatial patterns of meteorological drought standardized precipitation index [J]. Meteorological Applications, 2007, 14: 329-336.
- [17] 孙彬. 江苏各地发生多年罕见旱情[EB/OL]. (2011-05-25) [2015-09-01]. http://news.xinhuanet.com/politics/2011-05/25/c_121455544.htm.
- [18] 吴瞳. 江苏南涝北旱:太湖逼近警戒水位苏北持续抗旱[EB/OL]. (2011-06-18) [2016-04-01]. <http://www.chinanews.com/gn/2011/06-18/3120423.shtml>.
- [19] 人民网. 江苏徐州干旱百年罕见,春旱接伏旱又接秋旱[EB/OL]. (2002-08-26) [2015-09-01]. <http://news.sohu.com/89/52/news202825289.shtml>.

(责任编辑:张震林)