多光谱干旱严重度指数的评价与修正

刘 珺[1,2,3]，梁韶卿[3]，李彦荣[3]，秦荣荣[3]，张陶然[3]，杨 倩[3]，杜灵通[4]

1. 太原理工大学安全科学与工程博士后科研流动站，山西 太原 030024
2. 山西省交通科技研发有限公司博士后科研工作站，山西 太原 030006
3. 太原理工大学矿业工程学院，山西 太原 030024
4. 西北土地退化与生态恢复省部共建国家重点实验室培育基地，宁夏 银川 750021

摘 要 干旱是一种破坏力极强的自然灾害，近年来，受气候变化的影响，干旱在全球的发生频率不断升高，造成了严重的经济损失，准确监测干旱信息是防灾减灾的基础。干旱严重度指数(DSI)监测全球干旱的能力已经得到证实，但在局部区域的应用具有明显的差异性。为了检验DSI在省级尺度的适用性、修正其等级划分差异，以山西省为研究区，基于MODISET/PET，以及MODIS和AVHRR的NDVI数据集分别得到2001年—2014年的DSI_{MODIS}和DSI_{AVHRR}，同时结合SPEI，对三者进行了干旱时空分布的对比分析；为了证实SPEI的可靠性，将长时序的SPEI与历史干旱记录进行了比对；为了考察DSI在区域范围内的误差，将DSI_{MODIS}，DSI_{AVHRR}和SPEI进行了时间频率与空间分布的比较；最后，以SPEI为参照，基于DSI的原始划分标准，以0.1为步长调整DSI_{MODIS}的干旱等级阈值，得到了新的干旱等级划分标准DSI_{MM}；并利用DSI_{MM}监测了全省2001年—2014年季节尺度的旱情，捕捉了研究区2001年和2002年的典型干旱事件，验证了DSI_{MM}在山西省干旱监测中的适用性和稳健性。研究表明，DSI_{MODIS}与DSI_{AVHRR}之间存在较高的相关性，相关系数为0.75，二者对干旱的空间分布和时间频率具有一致的表现，说明在数据缺失的情况下，DSI可拓展应用于AVHRR数据集，以弥补MODIS数据在长时序监测中的不足；DSI_{MODIS}低估了山西省D1等级干旱信息，而高估了D2～D4等级干旱；对于轻度干旱D1，中度干旱D2，重度干旱D3，极度干旱D4四个等级，DSI_{MM}与SPEI在干旱时间频率和空间分布占比方面表现出高度的一致性，其中D3等级的时间频率完全一致，D4等级的空间分布一致性为0.98；在干旱类型丰富的地区可精确地修正DSI的干旱等级划分。研究结果对利用DSI进行区域尺度干旱监测具有借鉴作用，为山西省干旱信息监测获取了一种计算简易、精确度高的方法。

关键词 干旱严重度指数(DSI)；修正；等级划分；干旱；遥感；山西
中图分类号： X87 **文献标识码：** A **DOI：** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)11-3522-08

引 言

干旱是一种破坏力极强的自然灾害，可能持续数周、数月甚至数十年[1]。由于全球气候变暖、人口增长及社会经济发展的影响，各国对水资源的需求量不断增加[2]，但是近年来，干旱在全球的发生频率却逐渐升高，给粮食生产、工业和生态等领域带来的损失难以估计[3-4]。干旱已成为制约我国经济发展和农业生产的自然灾害之一[5]。

由于对干旱一直没有统一的定义，至今也没有一个普适性的干旱指数。20世纪以来，科学家们基于气象、水文、农业、遥感等学科和领域构造了许多干旱指数，用于定量表征干旱事件、评价和监测地区干旱。Palmer干旱指数(palmer drought severity index，PDSI)是第一个较为完善的干旱指数[6]，该指数综合降水、温度和土壤湿度等多种数据监测农业干旱，但其参数获取较为困难，且计算公式复杂[7]。Shafer和Dezman提出了地表水供应指数(surface water supply index，SWSI)，该指数考虑水库储蓄量、水体、积雪及降水等信息，但其识别重度干旱的能力较弱[8]。Sandholt等提出了温度植被干旱指数(the temperature vegetation dryness index，TVDI)[9]，TVDI对干旱的监测精度受地表温度合成方式的影响，许多研究对此进行了修正和改进[10-12]。有报道

收稿日期： 2019-09-18，**修订日期：** 2020-01-11
基金项目： 国家自然科学基金地区项目(41661003)，国家自然科学基金地区合作项目(41967027)，国家留学基金项目(201706935028)资助
作者简介： 刘 珺，女，1981年生，太原理工大学矿业工程学院副教授 e-mail：8886355@163.com

采用标准化降水指数(standardized precipitation index，SPI)来评估气象干旱，该指数基于时间尺度进行计算，较为简单灵活，但在干旱评估中仅以降水量作为唯一参数，而忽略了温度表征干旱的重要作用[13]。因此，Vicente-Serrano 等[14]提出利用标准化降水蒸散指数(standardized precipitation evapotranspiration index，SPEI)监测气象干旱，SPEI 与 SPI 非常相似，但其考虑了潜在蒸发蒸腾量(PET)及多时间尺度下的干旱，被广泛应用于干旱的定量监测研究中。Mu 等[8]提出了干旱严重度指数(drought severity index，DSI)，DSI 综合考虑了描述植被光合作用和生长状态的 NDVI 和表示植被水分胁迫状况的 ET/PET。将两种要素标准化后得到的 DSI 能够综合反映干旱的状况[15]，有效捕获区域干旱事件，精确监测和准确评价大范围内的干旱信息。

本工作以山西省为研究区，以精确监测干旱为目的，旨在探寻一种适合区域干旱监测的方法。首先，基于 MODIS 和 AVHRR 的归一化植被指数 NDVI(normalized difference vegetation index，NDVI)数据集分别计算 2001 年—2014 年山西省范围内的 DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR}。通过对比二者的相关性，评估了 DSI 的稳健性；然后，从干旱的时间频率和空间分布角度评价了 DSI_{MODIS} 的准确性；最后，为了提高 DSI_{MODIS} 的敏感性，使其能够更加精确地捕捉区域干旱，以 SPEI 为参考，将 DSI_{MODIS} 进行了重新修正分类，确定了一种适合于山西省的干旱等级分类方法，为准确监测区域干旱提供了技术支撑。

1　实验部分

1.1　研究区概况

山西省(E 111°14′—114°33′，N 34°34′～40°44′)位于黄土高原，疆域轮廓呈东北斜向西南的平行四边形，横跨 6 个纬度，高山盆地相间分布，地形起伏不平，高差悬殊大(图 1)。东依太行山，南临吕梁山，一定程度上阻挡了夏季暖湿气流的深入，造成黄河沿岸地区常年雨水偏少，全省各地年降水量偏低，形成夏季高温多雨，冬季寒冷干燥的气候特点，致使山西“十年九旱”。准确监测全省干旱，对监测区域生态环境、保障区域粮食安全具有重要意义。

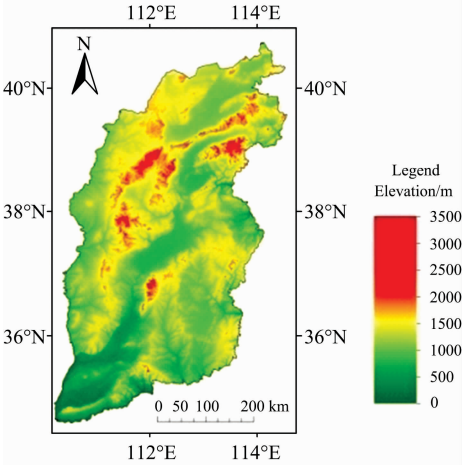


图 1　山西省地理位置及 DEM

Fig. 1　The site and DEM of Shanxi province

1.2　数据处理

研究所用遥感数据来自美国国家航空航天局(NASA)的 MOD13 NDVI (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod13.php) 和 MOD16 ET/PET 产品 (https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod16.php)，以及 NOAA AVHRR 的 NDVI 产品(https://modis.gsfc.nasa.gov/data/dataprod/mod16.php)。气象数据来源于自然环境研究委员会的大气科学与地球观测数据库的 CRU 气候数据集(https://auth.ceda.ac.uk/account/signin/)。数据详情见表 1。

表 1　研究使用的数据集

Table 1　Data sets used for research

数据集名称	数据集说明	时空分辨率	时间跨度	变量名称
MODIS	Moderate resolution imaging spectroradiometer	500 m 16 d	2001—2014	NDVI
		250 m 8 d	2001—2014	ET
		250 m 8 d	2001—2014	PET
CRU	Climate research unit	0.5°Monthly	2001—2014	PR
		0.5°Monthly	2001—2014	TA
AVHRR	Advanced very high resolution radiometer	8 km semi-monthly	2001—2014	NDVI

对原始数据进行投影转换，获得 WGS_1984_UTM_zone_49N 投影的山西省归一化植被指数、蒸散、降水和气温数据集，对其进行拼接、裁剪、融合等处理。由于 MODIS NDVI 和 ET/PET 与 AVHRR NDVI 数据的空间分辨率(表 1)差异较大，综合考虑重采样误差和数据计算分析的便利，研究将 MODIS NDVI 和 ET/PET 数据，以及 AVHRR NDVI 数据的空间分辨率进行统一，重采样为 3 km，在此基础上求取了 MODIS 和 AVHRR 的 NDVI 年均值(图 2)，用于计算 DSI。

1.3　方法

1.3.1　干旱严重度指数 DSI

DSI 利用 NDVI 和 ET/PET 数据计算得到，是一种计算简便、准确性高的全球范围内评估和监测干旱事件的方法。基于 MODIS 的 NDVI 和 ET/PET 数据集计算得到 DSI_{MODIS}，

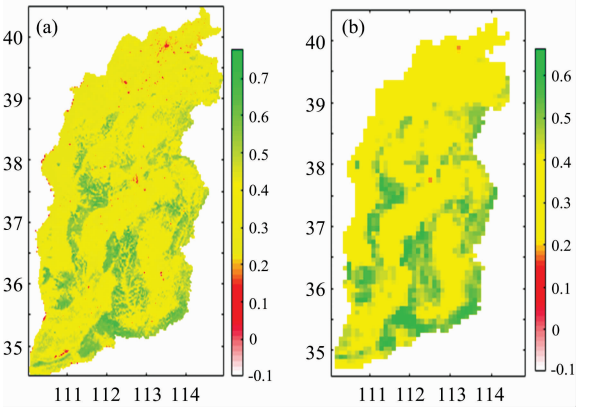


图 2 2001 年—2014 年山西省年均 NDVI

(a)：MODIS NDVI；(b)：AVHRR NDVI

Fig. 2 Average yearly NDVI of Shanxi province from 2001 to 2014

(a)：MODIS NDVI；(b)：AVHRR NDVI

基于 AVHRR 的 NDVI 和 MODIS 的 ET/PET 数据计算得到 DSI_{AVHRR}。具体算法为：

首先，计算月际 ET 和 PET 的比值 RT，$RT_i = ET_i / PET_i$；

然后，通过求取 RT 和 NDVI 的标准化比率得到 DSI，公式如式(1)

$$DSI_i = (Z_i - \overline{Z})/\sigma_Z \tag{1}$$

其中，

$Z_i = Z_{RT} + Z_{NDVI} = (RT_i - \overline{RT})/\sigma_{RT} + (NDVI_i - \overline{NDVI})/\sigma_{NDVI}$

式中，$\overline{Z}$ 和 σ_Z 分别为 Z 的平均值与标准差；Z 为 RT 与 NDVI 的比值之和；$\overline{RT}$ 和 $\overline{NDVI}$ 分别为 RT 和 NDVI 的平均值；σ_{RT} 和 σ_{NDVI} 分别为 RT 和 NDVI 的标准差。

1.3.2 标准化降水指数 SPEI

SPEI 是基于 CRU 数据集的降水量和温度数据计算得到的，其空间分辨率为 0.5°，计算参照 1965 年相关研究提出的方法。其值为负时表示有旱情发生，值越小表示越旱。

2 结果与讨论

2.1 三种干旱指数的对比分析

根据 DSI 和 SPEI 的计算公式分别得到 2001 年—2014 年山西省的 DSI_{MODIS}，DSI_{AVHRR} 和同期的 SPEI(图 3)，为了便于在像元尺度进行比较，在对比三种指数的干旱监测结果和进行相关性分析时，采用由高空间分辨率向低空间分辨率采样的方法，将 DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR} 重采样为 0.5°(下同)，保持与 SPEI 一致，从而探索和评价不同指数之间的关系。

图 3(a,b,c)分别显示了三种指数对山西省近 14 年来干旱信息的监测结果。通过对比三者监测的干旱时空分布可以看出：2001 年—2014 年间，三种指数 DSI_{MODIS}，DSI_{AVHRR} 和 SPEI 在各年都表现出由低到高再到低的变化特征。其中 SPEI 的平均数值高于 DSI，且每年的正值均于二月份前后出现，一直持续到 10 月份，即 2 月—10 月表现为无旱，11 月至次年 1 月其值为负，表现出不同程度的干旱。DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR} 均表现为 7 月—10 月份为正值，监测结果显示为无旱，11 月至次年 6 月为负值，监测结果显示为不同程度的干旱，从图 3(b)和(c)可以看出，二者呈现高度的一致性，说明基于 MODIS 和 AVHRR 的 DSI 具有相同的性能；进一步对比 SPEI 与 DSI 发现，SPEI 监测的无旱时段不仅明显早于 DSI，而且持续时间也较长。

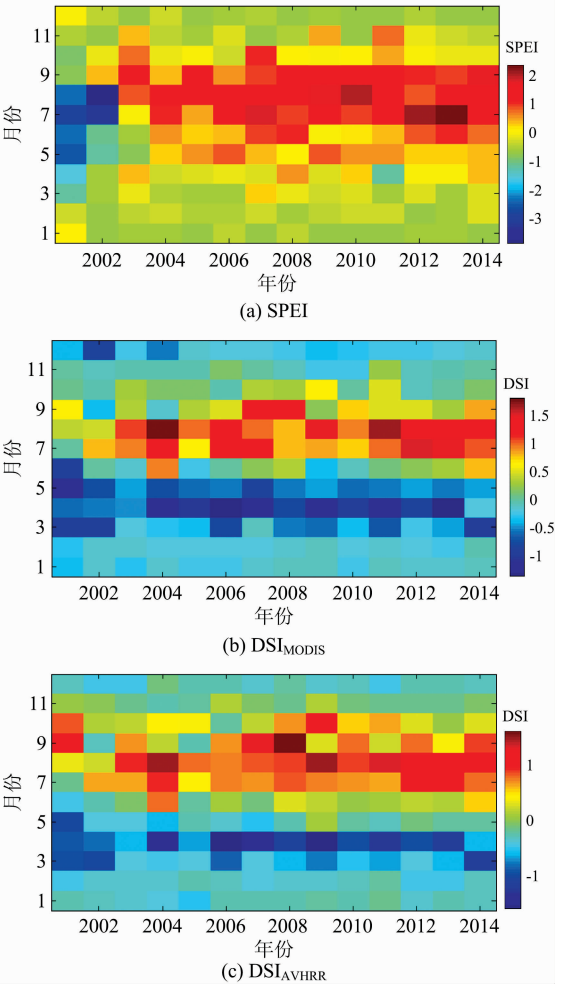


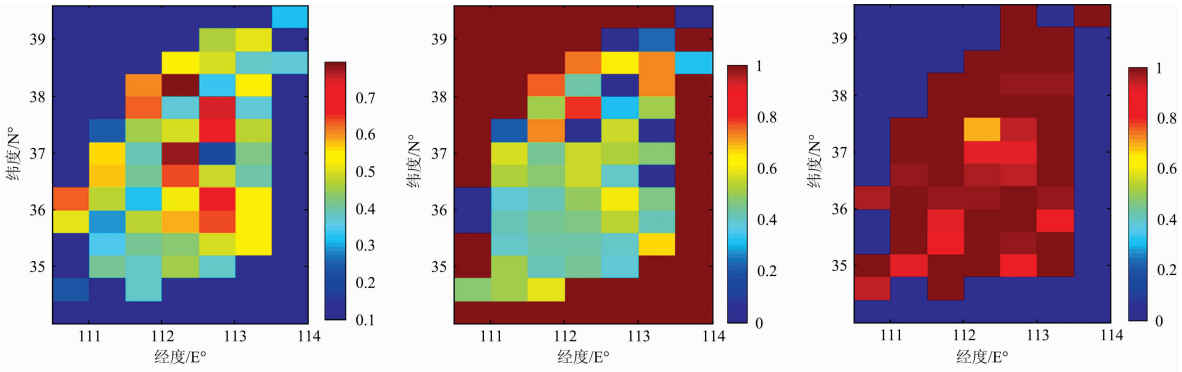
图 3 2001 年—2014 年山西省 SPEI (a)，DSI_{MODIS} (b) 和 DSI_{AVHRR} (c) 月均值

Fig. 3 Average monthly SPEI (a)，DSI_{MODIS} (b) and DSI_{AVHRR} (c) in Shanxi province from 2001 to 2014

分析图 3(a)可知，SPEI 在 2001 年 1 月—9 月为负值，说明全省出现干旱，其中 3 月—8 月为连续低值，呈现出显著的春夏连旱现象。2002 年 4 月—11 月山西省 SPEI 为负值，其中 4 月和 5 月呈现极低值，表现为重旱现象，这与已有研究[16]的结果一致。山西省气象台指出，2005 年 7 月中旬山西大部分地区旬平均气温较常年同期偏高，旬降水量较常年同期偏少；2010 年 10 月全省平均气温与常年持平，各地降水量比历年同期偏少近三成。SPEI 在 2005 年和 2010 年相应时间点上的数值均为负，明显较同年其余月份低，而以上干旱信息在 DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR} 中表现并不明显。因此，不

仅证实了 SPEI 优于 DSI 的干旱监测和捕捉能力，而且说明 SPEI 具有精准的干旱捕捉能力。

为了进一步分析 SPEI 和 DSI 的关系，研究定量计算了三种干旱指数的相关系数 r(图 4)。



(a) SPEI与DSI_{MODIS}　(b) SPEI与DSI_{AVHRR}　(c) DSI_{MODIS}与DSI_{AVHRR}

图 4　DSI_{MODIS}、DSI_{AVHRR} 和 SPEI 相关系数 R

(a)：SPEI 与 DSI_{MODIS}；(b)：SPEI 与 DSI_{AVHRR}；(c)：DSI_{MODIS} 与 DSI_{AVHRR}

Fig. 4　Correlation coefficients among DSI_{MODIS}, DSI_{AVHRR} and SPEI

(a)：SPEI and DSI_{MODIS}；(b)：SPEI and DSI_{AVHRR}；(c)：DSI_{MODIS} and DSI_{AVHRR}

从图 4(a)和(b)中可以看出，SPEI 与 DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR} 的相关性都不太理想，虽然 SPEI 与 DSI_{MODIS} 之间的匹配程度略高于 SPEI 与 DSI_{AVHRR}，但两个平均相关系数均偏小，分别为 0.51 和 0.50。说明原始的 DSI 分类标准不能准确监测和表达山西省的干旱信息。从图 4(c)可以看出，DSI_{MODIS} 和 DSI_{AVHRR} 的空间匹配关系较好，其相关系数 R 为 0.75，说明基于 AVHRR 和 MODIS 计算得到的 DSI_{AVHRR} 与 DSI_{MODIS} 具有相似的监测效果，在长时序的干旱研究中，AVHRR 可弥补 MODIS 数据不足的缺陷。

2.2　DSI 分类修正及评价

基于 DSI_{MODIS} 与 SPEI 指数的特征，Mu 等[8] 和 Tan 等[17] 分别在 2013 年和 2015 年提出了相应的干旱等级划分，如表 2 所示。

表 2　DSI 干旱等级划分标准

Table 2　Criteria drought grading of DSI

类别	描述	SPEI	DSI	
			原始分类 DSI_{MODIS}	修正分类 DSI_{MM} (本研究)
D1	轻度干旱	≤−0.0	≤−0.3	≤0.0
D2	中度干旱	≤−1.0	≤−0.9	≤−2.5
D3	重度干旱	≤−1.5	≤−1.2	≤−2.7
D4	极度股旱	≤−2.0	≤−1.5	≤−2.8

研究以 SPEI 为标准，对 DSI_{MODIS} 进行调整，探寻适合山西省干旱监测的分类方法。总体思想是以 0.1 为步长调整不同等级间的 DSI_{MODIS} 阈值，重新划分干旱分类标准。具体做法为：首先，从时间频率上对 DSI_{MODIS} 进行初步筛选，即在原分类的基础上，根据 DSI_{MODIS} 与 SPEI 在时间频率的差异，以常规干旱指数等级划分为参照，以 0.1 为步长逐步调整其等级阈值，多次试验，确定新的分类标准，并计算修正后 DSI_{MODIS} 的时间频率；然后，将修正值与 SPEI 进行对比，在此基础上继续调整其等级阈值，使其与 SPEI 在时间频率上进一步吻合，反复执行此步骤，得到与 SPEI 在时间频率分布上较为一致的四种方案，如表 3 所示。

表 3　DSI 基于时间频率的几种修正方案

Table 3　Modification schemes based on time frequency of DSI

方案	类别	描述	分类标准
1	D1	轻度干旱	≤−0.0
	D2	中度干旱	≤−2.2
	D3	重度干旱	≤−2.4
	D4	极度干旱	≤−2.6
2	D1	轻度干旱	≤−0.0
	D2	中度干旱	≤−2.4
	D3	重度干旱	≤−2.7
	D4	极度干旱	≤−2.8
3	D1	轻度干旱	≤−0.0
	D2	中度干旱	≤−2.5
	D3	重度干旱	≤−2.7
	D4	极度干旱	≤−2.8
4	D1	轻度干旱	≤−0.0
	D2	中度干旱	≤−3.0
	D3	重度干旱	≤−3.2
	D4	极度干旱	≤−3.3

基于上述四种方案，对比分析 SPEI 与 DSI 在空间分布上的吻合度，即分别计算四种方案的空间分布并与 SPEI 进行比较，选择出一种在时间频率和空间分布均与 SPEI 最相符的干旱分类方案，使 DSI_{MODIS} 修正后的干旱严重度指数 DSI_{MM} 的特征与 SPEI 的表现充分匹配，从而得到修正后的阈值分类，如表 2 所示。

2.3　DSI_{MM} 时间频率评价

根据表 2 中 SPEI，DSI_{MODIS} 和 DSI_{MM} 的等级划分，分别得到 2001 年—2014 年山西省轻度干旱 D1，中度干旱 D2，重度干旱 D3，极度干旱 D4 等四个不同干旱等级的发生频率

(图 5)。

从图 5 可以看出，D1～D4 等级 DSI_{MODIS} 与 SPEI 的时间频率分布差异较大，而 DSI_{MM} 与 SPEI 则表现出一致的频率特征。对各等级干旱发生的时间频率进行了统计，发现 SPEI 和 DSI_{MM} 在 D1 等级的发生频率分别为 0.648 1，0.500 8，而 DSI_{MODIS} 仅为 0.244 6，可见 DSI_{MODIS} 低估了 D1 等级时间频率，在 D2 等级 SPEI，DSI_{MM} 和 DSI_{MODIS} 监测的干旱发生时间频率分别为 0.041 7，0.050 6 和 0.104 8，在 D3 和 D4 等级 SPEI，DSI_{MM} 与 DSI_{MODIS} 监测的干旱发生时间频率分别为 0.014 9，0.014 9，0.089 3 和 0.029 8，0.020 8，0.098 2。可以看出在 D2～D4 等级，DSI_{MODIS} 均高估了干旱的发生频率，而 DSI_{MM} 在四个等级的干旱发生频率与 SPEI 的表现高度一致，其中在 D3 等级的一致性达到了 1。说明基于 DSI_{MM} 的干旱等级划分对旱情发生频次监测的可靠性。

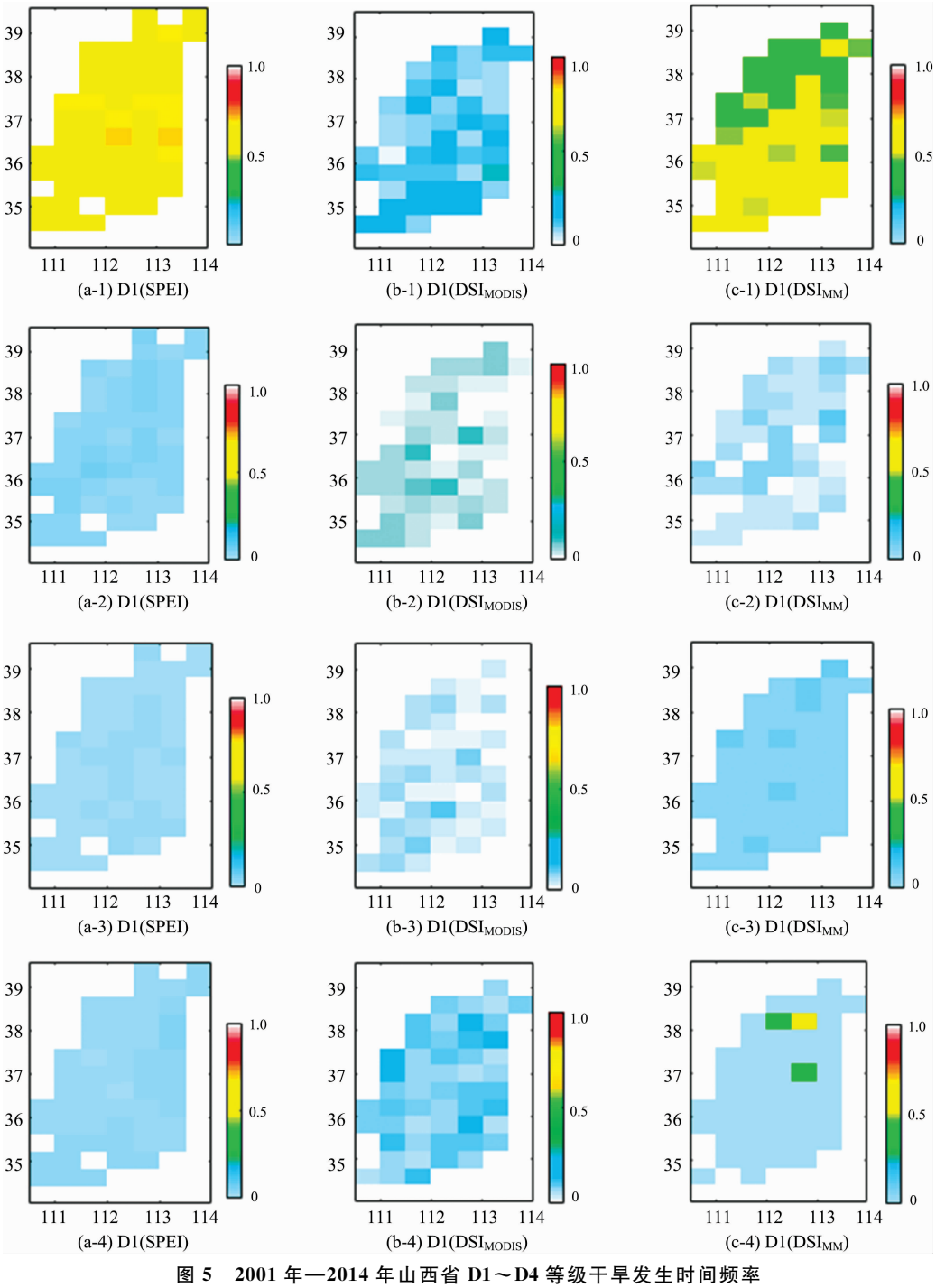


图 5 2001 年—2014 年山西省 D1～D4 等级干旱发生时间频率

(a)：SPEI；(b)：DSI_{MODIS}；(c)：DSI_{MM}

Fig. 5 Time frequency of drought under D1～D4 gradesin Shanxi Province from 2001 to 2014

(a)：SPEI；(b)：DSI_{MODIS}；(c)：DSI_{MM}

2.4　DSI_{MM} 空间分布评价

为了进一步证实 DSI_{MM} 的可靠性，将基于 DSI_{MODIS}，DSI_{MM} 和 SPEI 的干旱结果进行了空间分布的比较，分别统计了不同等级干旱(D1～D4)的空间分布占比(图 6)。

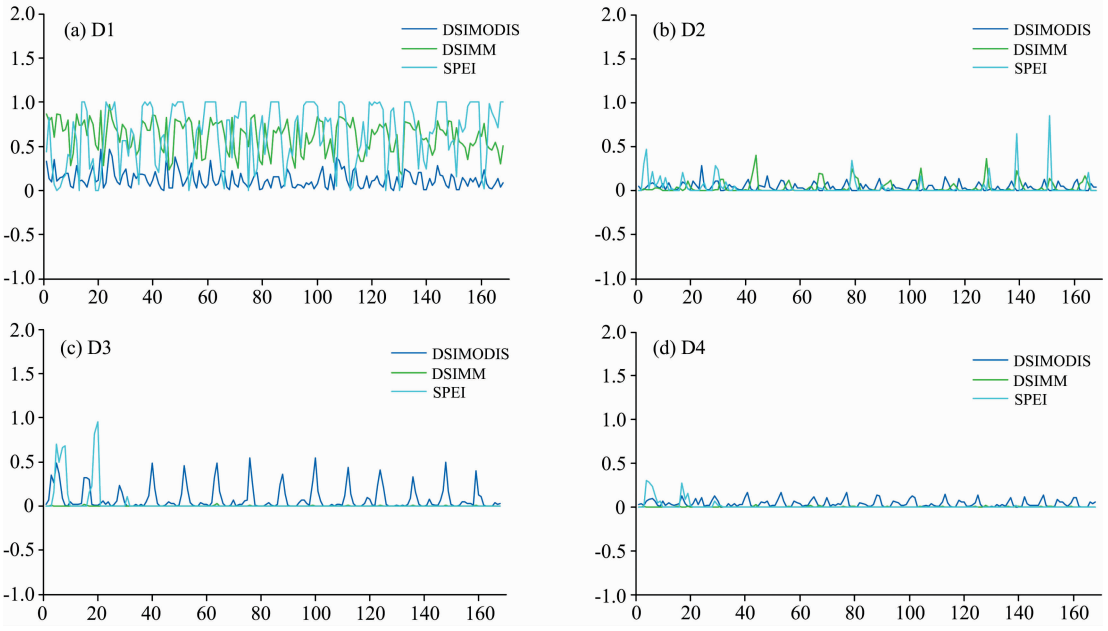


图 6　基于 SPEI，DSI_{MODIS}，DSI_{MM} 的 D1～D4(a，b，c，d)等级干旱空间分布占比

Fig. 6　Spatial rate of SPEI，DSI_{MODIS} and DSI_{MM} under D1～D4 (a，b，c，d) grades

从图 6(a，b，c，d)可知，SPEI，DSI_{MODIS} 和 DSI_{MM} 在 D1 等级的干旱占比分别为 64.10%，12.84%和 61.56%，D2 等级为 3.23%，4.20%和 3.31%，D3 等级为 1.05%，3.95%和 1.70%，D4 等级为 3.04%，8.46%和 3.09%。由结果可以看出，DSI_{MODIS} 过低估计了 D1 等级的空间分布范围，而对于 D2，D3 和 D4 等级的空间分布则不同程度地高估了，这与其在时间频率的表现一致。而 DSI_{MM} 的监测结果则与 SPEI 接近，证明了基于 DSI_{MM} 干旱分类方法统计的空间分布与 SPEI 具有高度的一致性。

综上所述，不论是基于时间频率还是空间分布，在干旱程度较弱的情况下，DSI_{MODIS} 较 SPEI 判别干旱的标准更高，因此出现低估现象，而随着干旱程度的加重，DSI_{MODIS} 判别干旱的标准开始低于 SPEI，随之出现高估现象。而 DSI_{MM} 的干旱分类方法明显优于 DSI_{MODIS}，与 SPEI 在时间频率和空间分布上均具有一致的匹配度。

2.5　DSI_{MM} 分类验证

研究基于 DSI_{MM} 对 2001 年—2014 年山西省的干旱监测结果进行了重新分类，并进行了季节尺度的干旱信息统计和分析(图 7)。

从图 7 中可以看出，2001 年—2014 年间，研究区春季干旱成为常态，其中 2001 年和 2002 年旱情较其他年份严重；夏季在 2001 年和 2002 年发生严重干旱，2002 年尤为严重，其余年份则未有干旱发生；近 14 年来研究区秋季处于干旱边缘，除 2003 年和 2011 年情况略微好转之外，其余年份均处于干旱边缘状态；而在研究时段内，冬季虽未出现严重干旱现象，但却一直处于干旱状态，纵观全局，整体表现出秋冬连旱的态势，监测结果与 2001 年—2014 年山西省历史干旱情况一致。

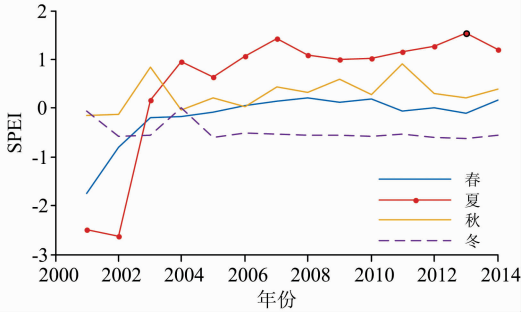


图 7　基于 DSI_{MM} 的 2001 年—2014 年山西省四季干旱统计

Fig. 7　Drought information of four seasons in Shanxi province from 2001 to 2014 year

从图 7 还可以看出，2001 年和 2002 年山西省发生比较严重的干旱，两年的夏季还分别出现了中旱和重旱现象。在全省范围内，天镇县、兴县、五寨县、垣曲县四个县市的干旱情况较为严重。研究利用 DSI_{MM} 对上述四个县市在 2001 年夏季及 2002 年夏季的干旱事件进行重新捕捉。在获得全省夏季(6，7 和 8 月)DSI 的基础上，对旱情等级按照 DSI_{MM} 标准进行重新划分，并将湿润，D1，D2，D3，D4 等五个干旱等级分别赋值 0，1，2，3，4，然后计算得到其等级均值(图 8)，图中值越大代表干旱等级越高，即旱情越严重。

从图 8 可以明显看出，2001 年(a)和 2002 年(b)山西省全部区域均发生不同程度的干旱，2001 年夏季为山西省大旱年，2002 年较 2001 年有所缓解，但仍出现全省范围的严重旱情，DSI_{MM} 的监测结果与山西省干旱实际情况完全吻合。

对 D1～D4 等级干旱进行统计发现，2001 年 6 月山西全省范围内出现干旱的区域占比为 86.68%，其中，天镇县 94.31%，五寨县 91.22%，兴县 91.67%，垣曲县 76.48%；2002 年 6 月山西省范围内出现干旱情况的区域占比为 76.46%，其中，天镇县 91.77%，五寨县 88.51%，兴县 88.99%，垣曲县 89.41%，干旱区域占比总体高于总体平均分布，能够准确地捕捉到干旱信息，充分证明了 DSI_{MM} 在山西省干旱监测中的成功应用。

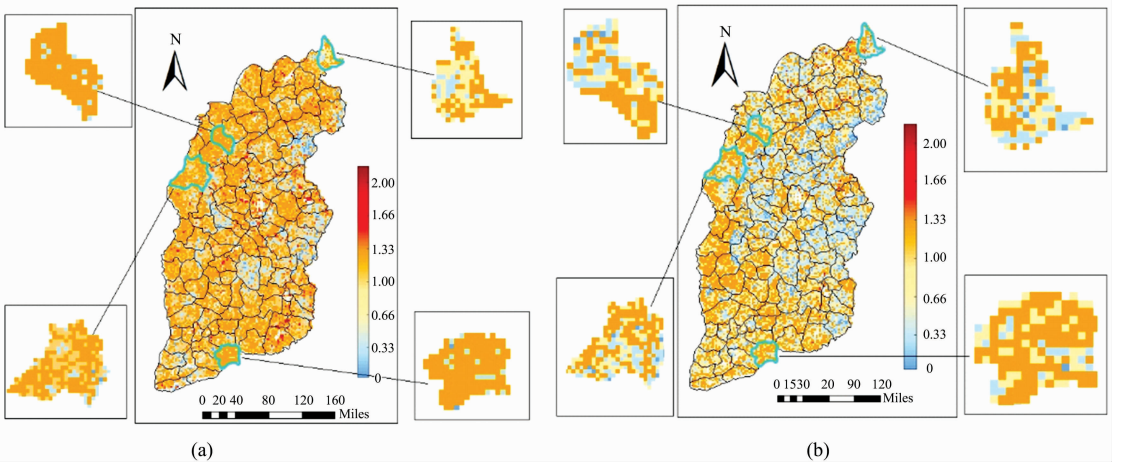


图 8 2001 年(a)和 2002 年(b)夏季典型干旱事件 DSI_{MM} 监测结果

Fig. 8 Typical drought monitoring in summer of 2001 (a) and 2002 (b) based on DSI_{MM}

3 结 论

基于 SPEI 和 DSI 开展了区域干旱等级划分研究。利用 SPEI 的稳健性，对 DSI 的全球干旱等级划分标准进行了重新修正，以 SPEI 的干旱时间频率为基准，在界定发生干旱的前提下，重新修正了轻度干旱 D1，中度干旱 D2，重度干旱 D3 和极度干旱 D4 的划分标准，并进行了验证。结果表明：

(1)全球范围 DSI 干旱等级划分标准不适用于山西省干旱监测，需进行修正。

(2)基于不同数据源得到的 DSI_{MODIS} 与 DSI_{AVHRR} 具有高度的相关性，其相关系数 $R=0.75$，说明 DSI 具有较强的稳健性，在进行长时间序列研究时，可用 DSI_{AVHRR} 代替 DSI_{MODIS}，从而弥补了 MODIS 数据不足的弊端。

(3)全球 DSI_{MODIS} 干旱等级划分标准应用于山西省时，低估了 D1 等级的旱情，却不同程度地高估了 D2～D4 等级的干旱。

(4)修正后得到的 DSI_{MM} 干旱等级划分方法在时间频率和空间分布上均能更加准确地捕捉山西省的干旱事件，大幅提高了山西省干旱监测精度。

研究成果为利用 DSI 准确进行区域干旱监测提供了参考，为开展基于干旱监测结果的相关研究奠定了基础。基于不同数据源得到的 DSI_{MODIS}，DSI_{MODIS} 和 SPEI 三种指数的空间分辨率相差较大，给相关性分析和阈值调整带来了误差；山西省发生重度和极度等级干旱的情况较少，对 DSI 在 D3 和 D4 等级划分依据有所影响，下一步将选择干旱类型丰富的区域进行研究，以更加精确地修正 DSI 的干旱等级划分精度。

References

[1] Wilhite D A. Drought: A Global Assessment, 2000, (1): 3.
[2] Cook B I, SmerdonJ E, Seager R, et al. Climate Dynamics, 2014, 43(9/10): 2607.
[3] Nasrollahi N, Aghakouchak A, Cheng L, et al. Water Resources Research, 2015, 51(4): 2847.
[4] Xu Ying, Ge Junzhu, Tian Shaoyang, et al. Science of The Total Environment, 2015, 505: 1043.
[5] Venteris E R, Tagestad J D, Downs J L, et al. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2015, 39: 160.
[6] Palmer W C. Meteorological Droughts. U. S. Department of Commerce, 1965, 45: 58.
[7] Vicente-Serrano S M, Begueria S, Lope-Moreno J I. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2011, 116(D19): 1.
[8] Mu Q, Zhao M, Kimball J S, et al. Meteorol. Soc., 2013, 94(1): 83.
[9] Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. Remote Sensing of Environment, 2002, 79(2-3): 213.
[10] Du Lingtong, Song Naiping, Liu Ke, et al. Remote Sensing, 2017, 9(2): 177.
[11] Du L, Tian Q, Yu T, et al. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2013, 23: 245.
[12] Hou J, Du L, Liu K, et al. Theoretical and Applied Climatology, 2019, 136(3-4): 915.
[13] SHEN Guo-qiang, ZHENG Hai-feng, LEI Zhen-feng(沈国强，郑海峰，雷振锋). Acta Ecologicasinica(生态学报), 2017, 37(11): 3787.
[14] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J. International Journal of Climate, 2010, 23: 1696.

[15] HUANG Jian-xi, ZHANG Jie, LIU Jun-ming, et al(黄健熙，张 洁，刘峻明，等). Transactions of The Chinese Society of Agricultural Machinery(农业机械学报)2015, 46(3): 166.
[16] LI Na, HUO Zhi-guo, QIAN Jin-xia (李 娜，霍治国，钱锦霞). Chinese Journal of Ecology(生态学杂志), 2019, 38(7): 2249.
[17] Tan C, Yang J, Li M. China Atmosphere, 2015, (6): 1399.

Evaluation and Modifying of Multispectral Drought Severity Index

LIU Jun[1,2,3], LIANG Shao-qing[3], LI Yan-rong[3], QIN Rong-rong[3], ZHANG Tao-ran[3], YANG Qiang[3], DU Ling-tong[4]
1. Postdoctoral Scientific Research Workstation of Safety Technology and Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
2. Postdoctoral Scientific Research Workstation of Shanxi Transportation Technology Research & Development Co., Ltd., Taiyuan 030006, China
3. College of Mining Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China
4. Breeding Base for State Key Laboratory of Land Degradation and Ecological Restoration in Northwest China, Yinchuan 750021, China

Abstract Drought is a very destructive natural disaster. In recent years, affected by climate change, the frequency of drought is increasing all over the world, causing serious economic losses. Accurate monitoring of drought information is the basis of disaster prevention and reduction. Drought Severity Index (DSI) is a kind of index that can effectively capture regional drought information. It has been proved that it has great potential in global drought monitoring, but its classification of drought grade is obviously regional. In order to test the applicability of DSI on the provincial scale and correct the classification differences, DSI_{MODIS} and DSI_{AVHRR} from 2001 to 2014 were obtained based on the data sets of MODIS ET/PET, NDVI and AVHRR NDVI in Shanxi Province. Meanwhile, combined with SPEI, the spatial and temporal distribution of drought in these three indexes was compared and analyzed. To verify the reliability of SPEI, long time series SPEIs were compared with historical drought records. In order to investigate the errors of DSI in the region, DSI_{MODIS}, DSI_{AVHRR} and SPEI were compared in time frequency and spatial distribution. Finally, as SPEI a reference and based on the original DSI classification standard, the new drought classification standard was obtained by adjusting the threshold of drought grade of DSI_{MODIS} with 0.1 as the step size. In addition, DSI_{MM} was used to monitor the provincial seasonal scale from 2001 to 2014, to capture the typical drought events in 2001 and 2002, and to verify the applicability and robustness of DSI_{MM} in drought monitoring in Shanxi. Studies show that there is a high correlation between DSI_{MODIS} and DSI_{AVHRR}, with a correlation coefficient of 0.75. Both of them have consistent performance in spatial distribution and time frequency of drought, indicating that DSI can be extended to AVHRR data set in the absence of data to make up for the deficiency of MODIS data in long time series monitoring. D1 was underestimated by DSI_{MODIS}, while D2, D3 and D4 were overestimated in Shanxi province. In the four grades of mild drought D1, moderate drought D2, severe drought D3 and extreme drought D4, DSI_{MM} and SPEI showed a high degree of consistency in the occurrence frequency and spatial ratio of drought. The time frequency of D3 was completely consistent, and the spatial distribution consistency of D4 was 0.98. The drought classification standard of DSI_{MM} can monitor the drought information at different temporal and spatial scale accurately, which can be applied to the whole governor time series drought monitoring. The results can be used for reference in regional scale drought monitoring using DSI, and a simple calculation method with high accuracy is obtained for Shanxi Province drought information monitoring.

Keywords Drought severity index (DSI); Modification; Gradation; Drought; Remote sensing; Shanxi

(Received Sep. 18, 2019; accepted Jan. 11, 2020)