

基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验

杜灵通^{1,2}, 田庆久^{1*}, 黄彦¹, 刘珺¹

(1. 南京大学国际地球系统科学研究所, 南京 210093; 2. 宁夏大学西北退化生态系统恢复与重建教育部重点实验室, 银川 750021)

摘要: 为了兼顾卫星遥感干旱监测的高时空覆盖性和气象站点干旱监测的普遍适应性, 使用热带降水测量卫星 (TRMM) 3B43 的逐月降水量资料和单站干旱监测 Z 指数方法, 对区域干旱过程进行监测。研究以黄淮海平原冬小麦主产区的山东省为例, 使用该方法对 1998 年 1 月—2010 年 12 月间的逐月干旱情况进行了监测, 并利用同期气象数据计算出来的标准化降水指数 (SPI) 对 TRMM-Z 指数进行了验证。结果表明 TRMM-Z 指数监测出的干旱发生、发展过程与实际相符, 其监测结果与站点 SPI 相关系数为 0.83, 达极显著水平。该干旱监测方法在区域干旱监测与评估中具有很好的适用性和精度, 为有效获取气象与农业旱情提供了一种新的思路。

关键词: 干旱, 监测, 遥感, TRMM, Z 指数, 标准化降水指数 (SPI)

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.02.022

中图分类号: TP79/S16

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-02-0121-06

杜灵通, 田庆久, 黄彦, 等. 基于 TRMM 数据的山东省干旱监测及其可靠性检验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(2): 121-126.

Du Lingtong, Tian Qingjiu, Huang Yan, et al. Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(2): 121-126. (in Chinese with English abstract)

0 引言

干旱是一种复杂的自然灾害, 它已严重影响到全球的农业生产和经济发展, Zhao 等人的研究表明, 干旱还导致全球陆地初级净生产力下降, 并影响到了陆地生态系统的碳汇能力^[1]。据统计资料, 中国 1950—2008 年平均每年受旱面积 $21.57 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 成灾面积 $9.56 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 因旱损失粮食 $158.0 \times 10^8 \text{ kg}$ ^[2]。而朴世龙等人的研究表明, 中国大部分地区的干旱还呈逐年增加的态势, 并已严重影响到了旱作农业的生产^[3]。由此可见, 精确监测与合理评估干旱的发生发展过程, 已成为当前和今后研究的热点。

目前对干旱的监测主要有基于气象站点数据的常规干旱监测和基于卫星数据的遥感监测两种方法^[4]。基于站点的干旱监测方法比较成熟, 广泛使用的有 (palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水指数 (standardized precipitation index, SPI)、作物湿度指数 (crop moisture index, CMI)、地表水分供应指数 (surfacewater supply index, SWSI) 等^[4]。帕尔默干旱指数因综合考虑了降水、温度和土壤有效含水量等因素,

所以能够较准确的指示旱情, 并得以广泛应用^[5]; McKee 等人提出的 SPI 仅需降水数据便可计算, 且具有从不同时间尺度进行干旱监测的能力^[6], 因此被美国科罗拉多州作为干旱常规监测的手段之一; 国家气候中心在旱涝监测中使用的单站旱涝指标—Z 指数, 已被证实是一种比较适合中国的旱情监测指数^[7]。

虽然基于气象站点的干旱监测方法比较成熟, 但却存在着站点少、分布不均等不足, 而基于遥感技术的干旱监测, 则可以实时、快速和大范围地获取旱情信息。目前许多学者已从土壤和植被两个旱情载体入手, 进行了多种方法的尝试与探索, 形成了基于土壤热惯量、基于土壤波谱特征、基于地表能量平衡和基于植被指数的 4 类旱情遥感监测方法, 并在国内外旱情监测中得到了广泛的应用^[4,8]。这些遥感方法均是对针对土壤和植被进行的农业干旱监测, 而对于降水偏少引起的气象干旱, 目前依然以基于台站的常规监测方法为主, Quiring 等的研究表明, 遥感技术获取的干旱指数不宜直接作为气象干旱判别的依据^[9], Bayarjargal 等人利用变化向量分析的手段, 分析了各种遥感干旱指数与站点干旱指数空间插值数据间的关系, 得出即便是在植被生长期, 二者在空间上也存在不一致性^[10]。

随着微波雷达遥感技术的发展, 从卫星空间传感器上便可连续对地表降水进行观测, 特别是热带降雨卫星 (tropical rainfall measuring mission, TRMM) 发射之后^[11], 遥感降水量数据便开始被许多学者应用到气候、气象及水文学等领域的研究之中^[12], 并开发了一系列的反演算法和验证方法^[13]。Almazroui 在沙特阿拉伯地区的研究表

收稿日期: 2011-06-09 修订日期: 2011-11-13

基金项目: 国家重点基础研究发展计划 (2010CB951503); 江苏高校优势学科建设工程资助项目

作者简介: 杜灵通 (1980—), 男, 宁夏同心人, 助理研究员, 博士, 从事遥感应用研究。南京 南京大学国际地球系统科学研究所, 210093。

Email: dult80@qq.com

*通信作者: 田庆久 (1964—), 男, 山东嘉祥人, 教授, 博士生导师, 主要从事高光谱遥感研究。南京 南京大学国际地球系统科学研究所, 210093。

Email: tianqj@nju.edu.cn

明, TRMM 数据的精度已基本接近站点观测雨量数据, 完全可用于降水有关的研究和分析^[14]; Rhee 等的研究显示, TRMM 3B43 数据可以用于美国西部一些缺少站点数据地区的干旱监测, 而且能提高无站点地区旱情监测的精度^[15]; 由此可见, TRMM 数据将为干旱监测提供一条新的途径。为了验证 TRMM 数据在中国进行干旱监测的可靠性和可行性, 本研究以黄淮海平原上的山东省为例, 将 TRMM 3B43 月降水数据运用到单站点干旱监测 Z 指数中, 构建基于遥感数据的 TRMM-Z 指数, 对山东近十余年的干旱情况进行监测, 并检验其干旱监测的可靠性。

1 数据与方法

1.1 遥感数据及 TRMM-Z 指数计算

热带降水测量计划 (TRMM) 是由美国国家航空航天局和日本国家空间发展局联合开展的一项用于测量热带和亚热带降水及能量交换的科学计划^[11]。TRMM 卫星 1997 年 11 月发射, 设计轨道高度 350 km, 倾角 35°, 2001 年 8 月轨道高度调整到了 400 km, 共搭载了测雨雷达 (PR)、微波图像仪 (TMI)、可见光和红外扫描仪 (VIRS)、云和地球辐射能量感应器 (CERES) 和雷电图像仪 (LIS) 5 个传感器, 其中 PR 是第一个星载降水雷达, 能够观测降水的三维结构, 工作频率 13.8 GHz, 刈幅 220 km, 星下点水平分辨率 4.3 km, 垂直分辨率 0.25 km^[16]。

本研究利用 TRMM 卫星资料和其他资料合成的 0.25°×0.25°格点月降水速率 (mm/h) 数据集, 即 TRMM 3B43 数据集, 该数据集由 TRMM 3B42 数据产品、美国海洋与大气的管理局气候预测中心气候异常监测系统 (CAMS) 的全球格点雨量测量器资料和全球降水气候中心 (GPCP) 的全球降水资料合成^[17]。该数据产品有降水量 (precipitation) 和相对误差 (relative error) 两个层, 以 HDF (hierarchical data format, 层次型数据格式) 存储, 3B43 数据集从 1998 年 1 月延续至今, 空间上覆盖 50°S—50°N、180°W—180°E, 中国除了黑龙江和内蒙古的部分高纬度地区外均有覆盖, TRMM 3B43 数据免费获取^[18]。

在 ENVI 软件的支持下, 将 1998 年 1 月至 2010 年 12 月的 TRMM 3B43 降水速率层从 HDF 文件中提取出来, 之后用降水速率 (mm/h) 乘以各月的总时间 (h), 生成月降水量格点数据, 使用山东矢量边界对其进行切割, 提取出山东范围内的月降水量数据, 并转换到自定义的投影系统 (Albers 等面积圆锥投影, Krasovsky 椭球体, 中央子午线为 105°, 两条标准纬线分别为北纬 25°和北纬 47°, 中央纬线为 0°)。虽然 TRMM 3B43 月降水量数据为面上的栅格数据, 但栅格空间格点在空间位置上可以被抽象地看做成一个个气象站点^[16], 考虑到面数据计算的复杂性和干旱指数的普适性, 本研究用 TRMM 数据计算出降水 Z 指数^[7], 来表征干旱程度。由于某一时段的降水量一般并不服从正态分布, 而是服从 P-III 分布, 因此可通过对降水量进行正态化处理, 将 P-III 型分布转

换为以 Z 为变量的标准正态分布, Z 指数最早是用于单站气象数据的旱涝指标计算^[7], 李景刚等人将该方法拓展到利用 TRMM 格点数据来计算区域旱涝情况^[16], 其计算方法如下

$$Z_i = \frac{6}{C_s} \left(\frac{C_s}{2} \varphi_i + 1 \right)^{\frac{1}{3}} - \frac{6}{C_s} + \frac{C_s}{6} \quad (1)$$

式中, Z_i 为 TRMM 数据中某格点的月降水 Z 指数; C_s 为偏态系数, φ_i 为标准化月降水量, i 为月份, 通过格点月降水资料序列, 分别可以计算出 C_s 和 φ_i 。

$$C_s = \frac{\sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^3}{n\sigma^3} \quad (2)$$

$$\varphi_i = \frac{P_i - \bar{P}}{\sigma} \quad (3)$$

式中, P_i 为 TRMM 数据中某格点的月降水量, mm; n 为 P_i 的样本数量; σ 为降水序列标准差, mm, \bar{P} 为降水量序列均值, mm。

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (P_i - \bar{P})^2} \quad (4)$$

$$\bar{P} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n P_i \quad (5)$$

Z 值可用于划分旱涝程度, 根据前人的研究结果^[7,16], 一般将 Z 值划分为 7 个范围, 依次对应极涝、大涝、偏涝、正常、偏旱、大旱和极旱 7 个旱涝等级 (表 1)。

表 1 Z 指数的旱涝等级

等级	Z 指数	类型
1	$Z > 1.645$	极涝
2	$1.037 < Z \leq 1.645$	大涝
3	$0.842 < Z \leq 1.037$	偏涝
4	$-0.842 \leq Z \leq 0.842$	正常
5	$-1.037 \leq Z < -0.842$	偏旱
6	$-1.645 \leq Z < -1.037$	大旱
7	$Z < -1.645$	极旱

1.2 站点数据及 SPI 计算

地面站点降水量数据来自中国气象数据共享网 (<http://cdc.cma.gov.cn/>), 从该网站可下载到山东省 32 个气象站的月值气象数据, 但由于部分站点数据不连续, 缺少一些年份, 另外综合考虑各个气象站间的空间分布等因素, 最终选取了济南、东营、威海、青岛、潍坊、德州的陵县、滨州的惠民、烟台的莱阳、日照的莒县、淄博的淄川、泰安的泰山、聊城的朝阳、菏泽的定陶、临沂的费县、济宁的兖州共 15 个气象站的数据, 以代表各地级市的地面观测降水量, 在山东 17 个地级市中, 只有莱芜和枣庄无合适的站点 (图 1)。由于陵县、东营、淄川、定陶、费县的数据缺少个别年份, 本研究分别利用与他们临近的德州、垦利、淄博、菏泽和临沂的数据对他们进行补全。

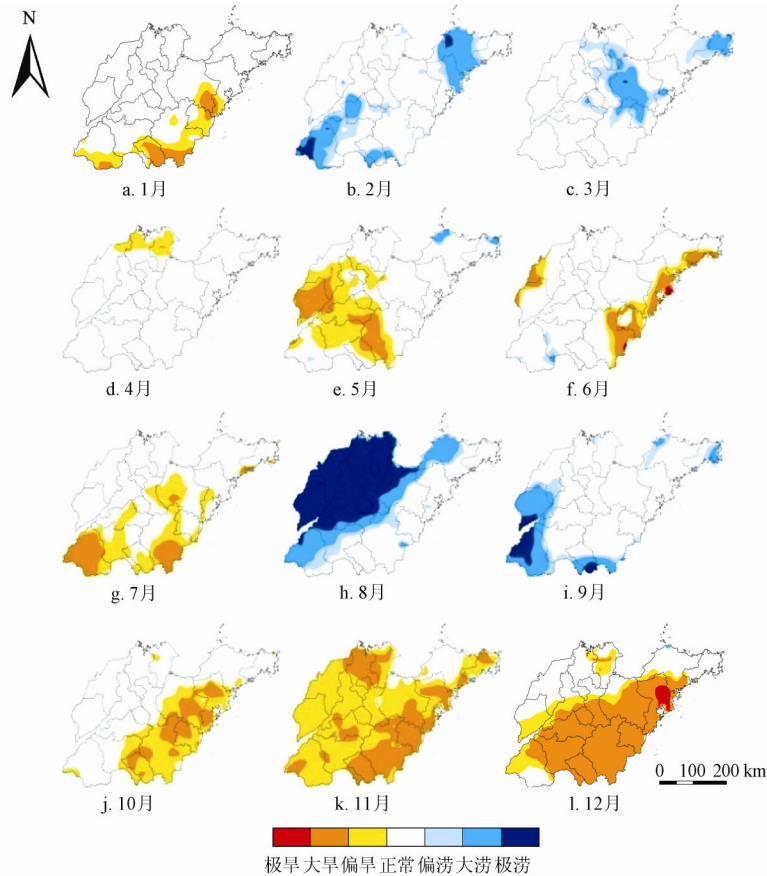


图 2 TRMM-Z 指数监测的 2010 年山东省各月干旱情况

Fig.2 Monthly drought monitoring by TRMM-Z index of Shandong province in 2010

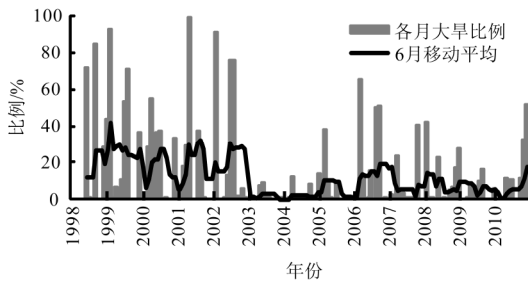


图 3 山东逐月大旱面积比例变化

Fig.3 Monthly heavy drought area percent in Shandong province

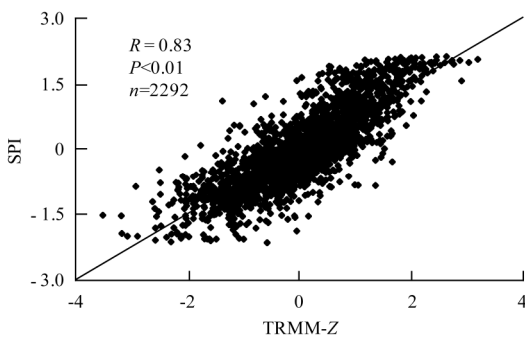


图 4 SPI 与 Z 指数的散点图

Fig.4 Scatter plots between SPI and Z-index values

为了检验 TRMM-Z 指数监测干旱的有可靠性，本研究将山东各地级市 TRMM-Z 指数划分出来的旱涝级别与

同期 SPI 指数划分出来的旱涝级别进行对比。由于 Z 指数采用 7 级标准 (表 1)，而 SPI 则通常将旱灾分为无旱、轻旱、中旱、重旱和特旱 5 级，二者在划分旱情级别时采用的数值和标准有一定差异，无法直接比较，因此这里将二者的类别统一划分为旱灾、正常和涝灾 3 类，即 $TRMM-Z > 0.842$ 、 $SPI > 0.5$ 划分涝灾， $-0.842 \leq TRMM-Z \leq 0.842$ 、 $-0.5 \leq SPI \leq 0.5$ 划分为正常， $TRMM-Z < -0.842$ 、 $SPI < -0.5$ 划分为旱灾。每个气象站每月计算一个 SPI 值，气象站所在地级市区域内该月的平均 TRMM-Z 指数为一个对应的 TRMM-Z 值，然后对他们分别进行旱涝级别划分，共得到 2292 对 SPI 与 TRMM-Z 指数的旱涝判别结果，并对二者的判别结果进行对比 (表 2)。从对比结果可以看出，大部分 TRMM-Z 指数判别出来的旱涝情况与 SPI 判别结果一致，其中 TRMM-Z 指数判别出来的旱灾、正常和涝灾与 SPI 判别结果的相符率分别为 67.50%、79.84% 和 73.52%，只有少量 TRMM-Z 值被划分到了相邻级别。

表 2 两种指数划分旱涝结果的对比

Table 2 Comparison of drought classification results which got from two kinds of drought index

		SPI 划分的旱涝等级数据个数		
		涝灾	正常	旱灾
TRMM-Z 划分的旱涝等级数据个数	涝灾	261(73.52%)	161(10.21%)	1(0.28%)
	正常	94(26.48%)	1259(79.84%)	116(32.22%)
	旱灾	0(0.00)	157(9.95%)	243(67.50%)

注：() 内为 TRMM-Z 划分的旱涝等级与 SPI 划分的旱涝等级一致的数据个数占 SPI 划分的相应旱涝等级数据个数的百分比。

3 结论与讨论

1) 基于卫星遥感获取的 TRMM 数据和单站点干旱监测 Z 指数方法, 构建可用于大范围干旱时空变化监测的 TRMM-Z 指数。利用该指数对山东省 1998—2010 年逐月的干旱情况进行监测, 监测结果与实际干旱情况相符, 该方法监测出的旱情强度与范围具有较高的可信度。

2) TRMM-Z 指数的旱情监测结果具有较高的可靠性。TRMM-Z 指数与山东 15 个气象站观测数据计算出的对应的 SPI 相关系数为 0.83, 达极显著水平; TRMM-Z 指数划分出来的旱涝等级与 SPI 划分出来的旱涝等级基本一致, 准确率都在 67.50% 以上。

利用 TRMM 数据进行干旱监测, 还存在一些需要进一步研究和探讨的问题。TRMM 目前只有 13 a 的序列, 由于数据积累的时间比较短, 因此在统计显著性检验时, 会有个别的点通不过显著性检验。此外, 当 TRMM 数据序列存档到一定时间长度后, 还可以用其计算其他类型的干旱指数, 以获取更准确的干旱时空分布。

[参 考 文 献]

- [1] Zhao Maosheng, Running S W. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009[J]. *Science*, 2010, 329(5994): 940—943.
- [2] 翁白莎, 严登华. 变化环境下中国干旱综合应对措施探讨[J]. *资源科学*, 2010, 32(2): 309—316.
Weng Baisha, Yan Denghua. Integrated strategies for dealing with droughts in changing environment in China[J]. *Resources Science*, 2010, 32(2): 309—316. (in Chinese with English abstract)
- [3] Piao Shilong, Ciais P, Huang Yao, et al. The impacts of climate change on water resources and agriculture in China[J]. *Nature*, 2010, 467(7311): 43—51.
- [4] 侯英雨, 何延波, 柳钦火, 等. 干旱监测指数研究[J]. *生态学杂志*, 2007, 26(6): 892—897.
Hou Yingyu, He Yanbo, Liu Qinhuo, et al. Research progress on drought indices[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2007, 26(6): 892—897. (in Chinese with English abstract)
- [5] Briffa K R, Jones P D, Hulme M. Summer moisture variability across Europe, 1892—1991: an analysis based on the Palmer Drought Severity Index[J]. *International Journal of Climatology*, 1994, 14(5): 475—506.
- [6] 黄晚华, 杨晓光, 李茂松, 等. 基于标准化降水指数的中国南方季节性干旱近 58 a 演变特征[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(7): 50—59.
Huang Wanhua, Yang Xiaoguang, Li Maosong, et al. Evolution characteristics of seasonal drought in the south of China during the past 58 years based on standardized precipitation index[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(7): 50—59. (in Chinese with English abstract)
- [7] 鞠笑生, 杨贤为, 陈丽娟, 等. 我国单站旱涝指标确定和区域旱涝级别划分的研究[J]. *应用气象学报*, 1997, 8(1): 26—33.
Ju Xiaosheng, Yang Xianwei, Chen Lijuan, et al. Research on determination of station indexes and division of regional flood/drought grades in China[J]. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1997, 8(1): 26—33. (in Chinese with English abstract)
- [8] 孙丽, 王飞, 吴全. 干旱遥感监测模型在中国冬小麦区的应用[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(1): 243—249.
Sun Li, Wang Fei, Wu Quan. Drought monitoring by remote sensing in winter-wheat-growing area of China[J]. *Transactions of the CSAE*, 2010, 26(1): 243—249. (in Chinese with English abstract)
- [9] Quiring S M, Ganesh S. Evaluating the utility of the vegetation condition index (VCI) for monitoring meteorological drought in Texas[J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2010, 150(3): 330—339.
- [10] Bayarjargal Y, Karnieli A, Bayasgalan M, et al. A comparative study of NOAA-AVHRR derived drought indices using change vector analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2006, 105(1): 9—22.
- [11] Theon J S. The tropical rainfall measuring mission (TRMM)[J]. *Remote Sensing of Earths Surface and Atmosphere*, 1993, 14(3): 159—165.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] Almazroui M. Calibration of TRMM rainfall climatology over Saudi Arabia during 1998-2009[J]. *Atmospheric Research*, 2011, 99(3/4): 400—414.
- [15] Rhee J, Carbone G J. Estimating drought conditions for regions with limited precipitation data[J]. *Journal of Applied Meteorology and Climatology*, 2011, 50(3): 548—559.
- [16] 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.
Li Jinggang, Li Jiren, Huang Shifeng, et al. Characteristics of the recent 10-year flood/drought over the Dongting lake basin based on TRMM precipitation data and regional integrated Z-index[J]. *Resources Science*, 2010, 32(6): 1103—1110. (in Chinese with English abstract)
- [17] 李景刚, 阮宏勋, 李纪人, 等. TRMM 降水数据在气象干旱监测中的应用研究[J]. *水文*, 2010, 30(4): 43—46.
Li Jinggang, Ruan Hongxun, Li Jiren, et al. Application of TRMM precipitation data in meteorological drought monitoring[J]. *Journal of China Hydrology*, 2010, 30(4): 43—46. (in Chinese with English abstract)
- [18] 杨绍镔, 吴炳方, 熊隽, 等. 基于 TRMM 降水产品计算月降水量距平百分率[J]. *遥感信息*, 2010(5): 62—66, 114.

- Yang Shaoe, Wu Bingfang, Xiong Jun, et al. Calculation of monthly precipitation anomaly percentage using TRMM rainfall product[J]. *Remote Sensing Information*, 2010(5): 62—66, 114. (in Chinese with English abstract)
- [19] 赵林, 武建军, 吕爱锋, 等. 黄淮海平原及其附近地区干旱时空动态格局分析: 基于标准化降雨指数[J]. *资源科学*, 2011, 33(3): 468—476.
- Zhao Lin, Wu Jianjun, Lü Aifeng, et al. Spatial and temporal analysis of drought over the Huang-Huai-Hai plain and its surroundings based on the standardized precipitation index[J]. *Resources Science*, 2011, 33(3): 468—476. (in Chinese with English abstract)
- [20] 李恩菊, 赵景波. 厄尔尼诺/拉尼娜事件对山东省气候的影响[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2010, 38(3): 80—84.
- Li Enju, Zhao Jingbo. Influence of El Nino/La Nina events on the climate in Shandong province[J]. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 2010, 38(3): 80—84. (in Chinese with English abstract)
- [21] 杨传国, 余钟波, 林朝晖, 等. 基于 TRMM 卫星雷达降雨的流域陆面水文过程[J]. *水科学进展*, 2009, 20(4): 461—466.
- Yang Chuanguo, Yu Zhongbo, Lin Zhaoahui, et al. Study on watershed hydrologic processes using TRMM satellite precipitation radar products[J]. *Advances in Water Science*, 2009, 20(4): 461—466. (in Chinese with English abstract)

Drought monitoring based on TRMM data and its reliability validation in Shandong province

Du Lingtong^{1,2}, Tian Qingjiu^{1*}, Huang Yan¹, Liu Jun¹

(1. *International Institute for Earth System Science, Nanjing University, Nanjing 210093, China;* 2. *Key Laboratory for Restoration and Reconstruction of Degraded Ecosystem in North-western China of Ministry of Education, Ningxia University, Yinchuan 750021, China*)

Abstract: In order to give consideration to the high spatial and temporal observation ability of remotely sensed drought monitoring method and the universality of meteorological station based drought monitoring method, this paper constructed TRMM-Z index using 3B43 monthly precipitation data of Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) and single station based Z index drought monitoring method to study the regional drought. Taking Shandong Province in the winter wheat main production area Huang-huai-hai plain as an example, monthly drought situation was monitored during the period from January 1998 to December 2010 and standardized precipitation index (SPI) calculated from station meteorological data over the same period was taken as validation of TRMM-Z. The results showed that TRMM-Z index could well reflect the occurring and developing process of regional drought and the monitoring results were accorded well with actual situation. The correlation coefficient of the average value of TRMM-Z index with the corresponding station based SPI value was 0.83, with a very significant level. The new method can be widely used in regional drought monitoring and it has a good applicability and accuracy, which can provide a new approach to monitoring meteorological and agricultural drought.

Key words: drought, monitoring, remote sensing, TRMM, Z-index, standardized precipitation index (SPI)