

陈洪萍, 贾根锁, 冯锦明, 等. 2014. 准全球陆表干旱严重程度的多传感器遥感监测方法研究 [J]. 大气科学, 38 (5): 939–949, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13219. Chen Hongping, Jia Gensuo, Feng Jinming, et al. 2014. Monitoring global land surface drought severity by multi-sensors remote sensing data [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (5): 939–949.

准全球陆表干旱严重程度的多传感器 遥感监测方法研究

陈洪萍^{1,2} 贾根锁¹ 冯锦明¹ 董燕生³ 张安治¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候—环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 北京市农林科学院北京农业信息技术研究中心, 北京 100097

摘 要 在全球气候变暖的背景下, 持续的干旱事件将对生态系统和人类社会产生不利影响。尽管存在多源卫星遥感资料及多种干旱指数, 然而区域和全球尺度干旱事件的监测仍具有挑战。采用 TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 数据量化降水异常、MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 归一化植被指数 (Normalized Difference Vegetation Index, NDVI) 和陆表温度 (Land Surface Temperature, LST) 数据表征植被生长异常, 构建了一种兼顾降水异常和植被生长状况异常的多传感器陆表干旱严重程度指数 (Multi-sensors Drought Severity Index, MDSI)。结果表明: MDSI 能够准确检测准全球范围 (50°S~50°N, 0°~180°~0°) 的气象干旱事件, 如亚马逊流域 2005 和 2010 年干旱、中国川渝地区 2006 年干旱、中国云南 2010 年干旱、非洲东部 2011 年干旱、2012 年美国中部干旱等; MDSI 与 PDSI (Palmer Drought Severity Index) 呈现出大致相同的干湿空间格局, 并且 MDSI 有助于湿润地区干旱程度的检测。

关键词 干旱 遥感 TRMM 多传感陆表 干旱严重指数

文章编号 1006-9895(2014)05-0939-11

中国分类号 P405

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.13219

Monitoring Global Land Surface Drought Severity by Multi-Sensors Remote Sensing Data

CHEN Hongping^{1,2}, JIA Gensuo¹, FENG Jinming¹, DONG Yansheng³, and ZHANG Anzhi¹

1 Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia (RCE-TEA), Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Beijing Research Center for Information Technology in Agriculture, Beijing Academy of Agriculture and Forestry Sciences, Beijing 100097

Abstract In the context of global warming, persistent droughts may cause adverse impacts on ecosystems and human societies. Although several multi-source satellite remote sensing records and types of drought indices exist, detection of droughts at regional to global scales remains a challenge. On the basis of precipitation data of the Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) used to quantify rainfall anomalies and the Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) vegetation index and land surface data used to reflect vegetation growth anomalies, this study develops a Multi-sensor Drought Severity Index (MDSI) to accurately monitor meteorological drought events at

收稿日期 2013-07-19, 2013-12-26 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB956202, 中科院战略性先导科技专项 XDA05090200

作者简介 陈洪萍, 女, 1982 年出生, 博士研究生, 主要从事极端气候事件的遥感监测研究。E-mail: chenhp@mail.tea.ac.cn

通讯作者 贾根锁, E-mail: jiong@tea.ac.cn

almost the global scale (50°S–50°N, 0°–180°–0°). These events include the 2005 and 2010 droughts in the Amazon; the 2006 drought in Chongqing, China; the 2010 drought in Yunnan, China; the 2011 drought in the eastern Africa; and the 2012 drought in the central parts of America. The spatial distribution patterns of the drought and flood events of the MDSI are essentially the same as those of the Palmer Drought Severity Index (PDSI). Therefore, the MDSI is useful for detecting drought conditions in humid areas.

Keywords Drought, Remote sensing, Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM), Multi-sensors Drought Severity Index (MDSI)

1 引言

尽管干旱可以分为气象干旱、农业干旱、水文干旱、社会经济干旱,但对于生态系统和人类社会而言,干旱是一种不利的重要气候事件,受其影响的人口数量均大于其他任何自然灾害 (Wilhite, 2000)。自从 1850 年以来,全球平均气温已经升高了大约 0.76°C,并且到本世纪末,预计将会升高 1.5~6.4°C (IPCC, 2007)。在全球气候变暖的背景下,持续的干旱或将增加 (Dai et al., 2004),因而干旱可能更为长久影响生态系统和人类社会。开展从区域尺度到全球尺度干旱严重程度监测与专题制图,对于加强水资源管理、防范干旱灾害风险具有重要意义 (Shukla et al., 2011)。尽管存在多源卫星遥感资料及多种干旱指数,然而区域和全球尺度干旱事件的监测仍具有挑战。

干旱指数是一种有效检测干旱事件的手段。例如,帕默尔干旱指数 (Palmer Drought Severity Index, PDSI) (Palmer, 1965)、标准降水指数 (Standardized Precipitation Index, SPI) (McKee et al., 1993)、全国降雨指数 (National Rainfall Index, NRI) (Gommes and Petrassi, 1994) 等。其中, PDSI 被广泛应用于监测大范围的干旱事件、分析干旱的时空特征 (Jones et al., 1996),以及进行干旱预警等 (Ozger et al., 2009)。先前的学者已经详细评述了常用干旱指数的适用性 (Quiring, 2009; Mishra and Singh, 2010; Mu et al., 2012)。总的看来,大多干旱指数是基于气象站点的降水观测数据,或者结合其他气象观测要素,如空气温度、土壤湿度等进行构建 (Mishra and Singh, 2010)。因而,气象站点的空间分布情况将会影响干旱监测的精细程度 (Brown et al., 2008)。由于气象站点缺乏连续的空间覆盖,且大多分布稀疏 (Ashcroft et al., 2009),在偏僻的森林覆盖区域尤为明显。为了评估气象站点稀疏区域的干旱状况,通常采用空间插值方法进行估算。然而,

在气象要素变化非常明显的复杂地形区域,空间插值法会产生较大误差 (Flannigan et al., 1998)。

卫星遥感能够克服气象站点稀疏或缺失的限制,可以直接用于监测干旱状况的空间格局 (Ji and Peters, 2003)。基于卫星遥感的干旱监测方法可以分为三类:一是反映土壤水分变化的,如表观热惯量 (Apparent Thermal Inertia, ATI) (Price, 1985);二是反映植被绿度变化特征的,如植被条件指数 (Vegetation Condition Index, VCI) (Kogan, 1990);三是反映植被冠层温度变化特征的,如温度植被干旱指数 (Temperature Vegetation Dryness Index, TVDI) (Sandholt et al., 2002)。基于卫星遥感数据构建的干旱指数,尽管在干旱半干旱区域应用非常有效,但在湿润半湿润区域却受到限制 (Kogan, 1995)。Mu et al. (2012) 基于 MODIS (Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer) 合成的全球陆表土壤水分蒸发蒸腾数据 (evapotranspiration, ET) 和 NDVI (Normalized Difference Vegetation Index),构建了全球陆表干旱严重程度指数 (Drought Severity Index, DSI)。DSI 成功检测出 2000 年至 2011 年的全球典型区域气象干旱事件,如 2003 年的欧洲严重干旱事件,2005 年和 2010 年的亚马逊流域干旱。然而,DSI 对湿润区域的检测仍然存在较大偏差。可能由于湿润地区经常受到阴雨天气的影响,基于光学可见光遥感数据构建的干旱指数存在较大的不确定性。热带测雨卫星 (Tropical Rainfall Measuring Mission, TRMM) 搭载了微波图像仪、测雨雷达、可见光红外扫描仪等多种传感器,能够克服不利天气的影响,得到覆盖南北纬 50°之间的表面降水率。TRMM 降水数据已被用于检测干旱情况。例如, Rhee et al. (2010) 引入 TRMM 降水数据,并结合 MODIS-LST (Land Surface Temperature) 和 MODIS-NDVI 数据,构建了多传感干旱状况指数 (Scaled Drought Condition Index, SDCI),SDCI 成功检测出美国湿润区和干旱区的农业干旱。Zhang and Jia

(2013) 结合 TRMM 降水数据和地球观测系统先进微波扫描辐射计 (Advanced Microwave Scanning Radiometer for EOS, AMSR-E) 的微波数据, 构建了综合微波干旱指数 (Microwave Integrated Drought Index, MIDI)。MIDI 在检测类似中国北方半干旱地区的短期气象干旱方面性能优越, 然而缺少湿润地区的相关实验。

干旱情景可以分为“敏感性情景”和“适应性情景” (Simelton et al., 2009)。干旱地区植被对水分短缺的适应能力较强, 而湿润地区植被对水分短缺适应能力较差, 半干旱半湿润地区植被对水分短缺的响应时间较长 (Vicente-Serrano et al., 2013)。因而, 可以将干旱地区归为干旱适应性情景, 植被生长状况是干旱监测的重要指标; 湿润地区归为干旱敏感性情景, 干旱检测应量化降水盈亏情况; 半干旱半湿润地区则介于干旱适应性情景与干旱敏感性情景之间, 干旱检测应兼备分析降水盈亏和植被生长状况。因此, 对准全球陆表干旱程度进行检测时, 有必要兼顾分析降水异常和植被生长状况异常。基于上述的思考, 本研究构建了一种兼顾降水异常和植被生长状况异常的多传感器陆表干旱严重程度指数 (Multi-sensors Drought Severity Index, MDSI)。MDSI 采用 TRMM 数据量化降水异常, 采用 MODIS-NDVI 与 MODIS-LST 表征植被生长异常。MDSI 在检测气象干旱程度的同时, 根据 NDVI/LST 植被干旱响应特征来降低仅依靠 TRMM 降水数据检测气象干旱事件时的不确定性。MDSI 以年时间尺度进行检测, 空间分辨为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$, 检测的空间范围是准全球范围 ($50^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 0^{\circ}$), 适用于检测区域气象干旱事件。研究的主要目标包括: (1) 评估 MDSI 对近 12 年 (2001~2012 年) 准全球范围陆表干旱程度的检测能力; (2) 比较分析近 12 年 (2000~2011 年) MDSI、DSI 和 PDSI 检测干旱空间格局的一致性; (3) 比较 MDSI、DSI 和 PDSI 监测湿润地区干旱事件的能力。考虑到 MDSI 以年时间尺度进行干旱事件的检测, 且从准全球范围比较不同气候区域的气象干旱严重程度, 因而不与 MIDI 以及 SDCI 进行比较。

2 数据

2.1 TRMM 降水数据

采用最新的第 7 版本 TRMM 月降水数据 3B43 ([http://trmm.gsfc.nasa.gov/\[2012-11-26\]](http://trmm.gsfc.nasa.gov/[2012-11-26])) (Huffman

et al., 1995)。TRMM 数据时间覆盖从 1998 年 1 月至 2012 年 12 月, 空间分辨率为 $0.25^{\circ} \times 0.25^{\circ}$, 空间范围为 ($50^{\circ}\text{S} \sim 50^{\circ}\text{N}$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 0^{\circ}$)。对 TRMM 数据进行预处理, 包括去除异常值、重采样等。在处理过程中, 如果像元的像元值为 -9999, 则该像元赋值为 0。为了使 TRMM 数据与 MODIS 数据空间分辨率保持一致, 采用最邻近像元内插法将 TRMM 数据重采样为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 。

2.2 MODIS 数据

采用第 5 版本的 MODIS 月 NDVI 数据 MOD13C2 ([ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/\[2012-11-26\]](ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/[2012-11-26])) (Huete et al., 2002) 和月 LST 数据 MOD11C3 ([ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/\[2012-11-26\]](ftp://e4ftl01.cr.usgs.gov/[2012-11-26])) (Wan et al., 1996)。这二种数据的空间分辨率均为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$, 覆盖时间为 2000 年 6 月至 2012 年 12 月。为了与 TRMM 数据覆盖相同的空间范围, 对 MODIS 时间序列数据进行了裁剪。

2.3 辅助数据

为了对比分析 MDSI 检测典型干旱事件的能力, 采用的辅助数据包括 Mu et al. (2012) 生成的 2000 年至 2011 年全球年尺度的 DSI 数据 ([ftp://ftp.ntsg.umd.edu/pub/MODIS/Mirror/DSI/\[2012-11-26\]](ftp://ftp.ntsg.umd.edu/pub/MODIS/Mirror/DSI/[2012-11-26])) 以及 PDSI 数据 ([ftp://ftp.ntsg.umd.edu/pub/NPP_Science_2010/PDSI/\[2012-11-26\]](ftp://ftp.ntsg.umd.edu/pub/NPP_Science_2010/PDSI/[2012-11-26])) (Zhao and Running, 2010)。DSI 包括 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$ 和 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 两种空间分辨率, 覆盖范围为 ($80^{\circ}\text{N} \sim 60^{\circ}\text{S}$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 0^{\circ}$)。PDSI 数据空间分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 覆盖范围为 ($90^{\circ}\text{N} \sim 90^{\circ}\text{S}$, $0^{\circ} \sim 180^{\circ} \sim 0^{\circ}$)。

3 方法

3.1 TRMM 降水标准化距平

干旱以数月到低于常态的降雨为特征 (Dai, 2011), 其本质是大气降水偏少。利用 TRMM 数据量化降水异常来反映气象干旱程度, 降水标准化距平 Z_T , 计算如下:

$$Z_T = (T - \bar{T}) / \sigma_T, \quad (1)$$

式中, T 为一年内 12 个月降水总量, $\bar{T}$ 和 σ_T 分别为 1998 至 2012 年 TRMM 年降水量的均值和标准差。

3.2 MODIS NDVI/LST 标准化距平

NDVI 反映了绿色植被的生长状况和覆盖度信息, LST 表征了植被冠层温度状况。当植被受到干旱胁迫时, 叶表面光合作用能力下降, 植被叶片的

叶绿素会下降,甚至叶片会凋萎,NDVI随之降低。与此同时,植被通过关闭气孔的方式来减少蒸腾,避免植被水分散失,其冠层表面温度就会随之升高。进而NDVI与LST的比率(R)就会降低,因而 R 能够推演出植被受到干旱胁迫的情况,其计算公式为

$$R = N / L, \quad (2)$$

其中, N 表示NDVI, L 表示LST。在计算过程中,先应用MOD13C2产品提取NDVI波段和用MOD11C3产品提取LST波段,计算月时间尺度上的 R 。然后计算每年 R 的均值,用以表示年内植被长势的平均状态。最后利用年 R 的均值进行标准化距平处理,公式为

$$Z_R = (R - \bar{R}) / \sigma_R, \quad (3)$$

式中, $\bar{R}$ 和 σ_R 分别为2000至2012年每年 R 的均值和标准差。 Z_R 主要反映植被干旱程度, Z_R 越小表明植被干旱程度也就越严重。

3.3 基于多传感器遥感数据的陆表干旱严重指数

MDSI通过 Z_T 量化降水异常来反映气象干旱程度,通过 Z_R 表征干旱胁迫对植被长势的影响。引入 Z_R 来降低仅仅依靠TRMM降水数据检测气象干旱事件的不确定性,进而更好检测敏感性情景和适用情景下的区域气象干旱事件。

$$Z = Z_T + Z_R, \quad (4)$$

$$\text{MDSI} = (Z - \bar{Z}) / \sigma_Z, \quad (5)$$

式中, Z 是同时量化降水盈亏和植被生长状况的综合指数, $\bar{Z}$ 和 σ_Z 分别为2000至2012年综合指数 Z 的均值和标准差。MDSI值越小,表示干旱程度也就越严重。在计算过程中,考虑到非植被覆盖区域NDVI的影响,将年NDVI的最大值小于0.2的区域规定为非植被区域。对于非植被区域,直接用 Z_T 量化干旱严重程度。

当湿润地区发生干旱时,由于土壤深层水可能保证植被对水分的需求,植被对干旱的响应则可能表现为变黄(Z_R 变小)或变绿(Z_R 变大)的 Z_R 异常现象。为此,MDSI主要通过 Z_T 来量化气象干旱程度,并结合 Z_R 来表征植被对干旱胁迫的响应,从而降低仅仅依靠TRMM降水数据检测气象干旱事件的不确定性。由于干旱地区植被对水分短缺的适应能力较强,即使 Z_T 偏小时(发生干旱), Z_R 的变化也较小,那么主要依据 Z_T 反映出区域干旱的严重程度,结合 Z_R 来降低检测干旱地区气象干旱事件的不确定性。

在应用上述公式计算MDSI的过程中,由于受到历史资料时长的限制,如果某区域TRMM数据或者MODIS遥感数据存在整体偏湿或偏干的情况,则MDSI检测结果存在一定的偏差。

4 结果与讨论

4.1 2001~2012年MDSI干旱监测

逐像元生成了空间分辨率为 $0.05^\circ \times 0.05^\circ$ 的从2001年到2012年准全球的MDSI,用于分析典型的区域气象干旱事件。将MDSI重采样为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ 的低分辨率MDSI,用于评估准全球范围的干旱事件,如图1所示。为了验证MDSI监测干旱事件的能力,选择与文章Mu et al. (2012)相同的典型干旱事件以及先前文献记载的典型区域干旱事件进行评估。

亚太区域是全球水稻的主要产地,从2000年到2007年,约7百万公顷的水稻受到干旱影响(Pandey et al., 2007)。MDSI成功检测了该区域的典型干旱事件,例如从2001年到2002年,巴基斯坦和印度西北部遭受了连续的干旱,导致农作物死亡(Pandey et al., 2007);2004年干旱导致亚洲东南部区域百万人可饮用水短缺(NBS, 2005),泰国2百万公顷的农作物受灾(Asia Times, 2005);2009年印度中部、北部和东部发生高温热浪天气,热浪造成河流枯竭,水库干涸,120人死亡(李威等, 2010);2010年巴基斯坦遭遇 50°C 高温干旱(陈洪滨和范学花, 2011)。2009年秋至2010年春,中国云南发生50年罕见的干旱(黄荣辉等, 2012)。同时,MDSI也成功检测出亚太区域典型的洪涝事件,例如2007年南亚多国发生洪涝,造成至少3000人死亡,6000万多人受灾,孟加拉国、尼泊尔受灾尤为严重(梁潇云和郭艳君, 2008);2008年印度尼西亚因暴雨引发洪涝,造成至少58人死亡(王小玲和郭艳君, 2009);2011年暴雨致使泰国发生洪涝,造成740人死亡,900万人受灾,2200多套住房被毁(司东等, 2012)。

在北美地区,从1998年到2004年美国西部出现的连续干旱导致了贮水池水供给严重不足(Cook et al., 2007),在2002年最干旱时,超过50%的美国西部地区处于中到重度干旱,其降水不足量接近有记录以来的最低值(Lawrimore and Stephens, 2003)。2011年美国和墨西哥发生干旱,影响了美国48个州32%的土地,导致墨西哥农作物枯死,170

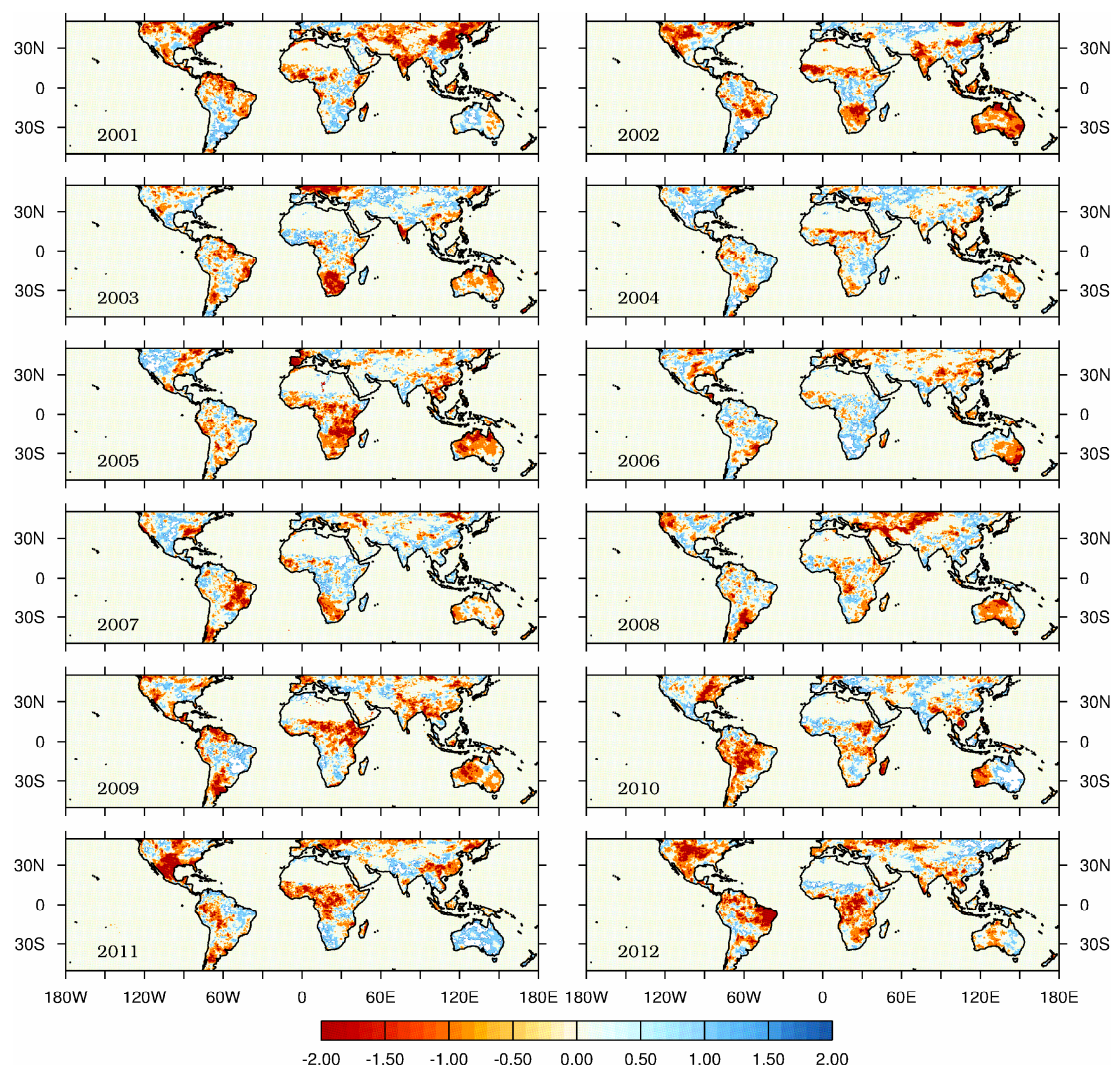


图1 基于多传感器遥感数据的陆表干旱严重指数 (Multi-sensors Drought Severity Index, MDSI) 检测出的 2001~2012 年准全球干旱分布情况。MDSI 值的范围从负到正代表气候从干旱变成湿润

Fig. 1 Quasi-global drought severity distributions detected by Multi-sensors Drought Severity Index (MDSI) from 2001 to 2012. The range of MDSI values from negative to positive stands for the climate changes from dry to wet

万头牲畜死亡 (司东等, 2012)。北美洲其他典型的干旱事件包括: 2006 年美国南部干旱 (李威和朱艳峰, 2007)、2007 年美国东南部干旱 (梁潇云和郭艳君, 2008)、2012 年美国中部大部分地区发生的严重干旱。

MDSI 成功检测出了 2001 年到 2012 年间澳大利亚发生的干旱或洪涝事件。从 2001 年 11 月到 2007 年 10 月, 澳大利亚南部和东部发生了大范围的干旱 (Bureau of Meteorology, 2007), 其中 2002 年到 2003 年间的干旱 (Horridge et al., 2005) 是澳大利亚有气象记录以来最严重的短期干旱之一 (Nicholls, 2004)。其他干旱事件包括 2005 年干旱 (Watkins, 2005), 以及 2007 年到 2009 年的连续

干旱事件 (Bureau of Meteorology, 2009)。从 2010 年到 2011 年初, 澳大利亚遭受了历史上最强的 La Niña 事件, 致使澳大利亚北部和东部从 2010 年春至 2011 年一直出现强降雨, 这两年成为该区有记录以来最湿润的两年 (Bureau of Meteorology, 2012)。

MDSI 成功检测出 2005 年和 2011 年非洲发生的干旱事件 (Phillips et al., 2009; Lyon and Dewitt, 2012)。同时, MDSI 也检测出非洲其他地区发生的洪涝灾害, 如 2002 年刚果东部暴雨导致大规模泥石流的发生, 泥石流造成数十人受伤, 40 多人死亡; 肯尼亚发生的洪涝和山体滑坡, 导致 15 万人逃离家园, 至少 46 人死亡 (李小燕, 2003)。

MDSI 能够成功检测到南美洲 2005 年和 2010

年的亚马逊流域干旱 (Hopkin, 2005; Lewis et al., 2011)。同时, MDSI 也能够检测到南美洲的典型洪涝灾害事件。如 2006 年哥伦比亚的暴雨致使约 100 处河水泛滥、山体滑坡, 全国 3/4 省份受灾, 107 人死亡, 217 人受伤 (李威和朱艳峰, 2007)。

4.2 干旱程度相关性分析

在对全球干旱进行监测时, PDSI 应用最为广泛 (Dai et al., 2004; Wells et al., 2004)。为了评估 MDSI 监测干旱的有效性, 分别对 MDSI 以及 DSI 与 PDSI 的相关性进行分析, 如图 2 所示。

从图 2 可以直观反映出: 在非洲中南部, 墨西哥南部, 南美洲中部, 以及美国东南部地区, MDSI 与 PDSI 的相关性小于 DSI 与 PDSI 的相关性; 而在南美北部和中国区域, MDSI 与 PDSI 的相关性略大于 DSI 与 PDSI 的相关性; 在澳大利亚地区, MDSI、DSI 两者均与 PDSI 的相关性表现一致。尽管在南美洲中部和北部, MDSI 和 DSI 均与 PDSI 不相关, 但是两者都表现出相同的空间模式。PDSI 检测干旱的效果依赖于气象观测站点的数量和分

布 (Brown et al., 2008)。南美洲中部和北部的气象站点分布稀疏 (Chen et al., 2002; Zhao et al., 2006), 因此, 在这些区域 PDSI 检测干旱的效果较差, 不能分辨 MDSI、DSI 的检测能力。而在气象站点分布密集的地区, 如澳大利亚地区 (Chen et al., 2002; Zhao et al., 2006), MDSI 以及 DSI 与 PDSI 的相关性较高, 甚至表现一致。以上这些现象也说明 PDSI 干旱监测结果有可能存在一定误差, 在气象站点分布稀疏的区域需谨慎应用 PDSI。

由于 PDSI 检测干旱的结果存在一定误差, 通过对比分析 MDSI 与 PDSI, 以及 DSI 与 PDSI 的相关性, 并不能说明 MDSI 与 DSI 检测干旱的能力。因而需要选择典型干旱事件, 进一步比较分析 MDSI、DSI 和 PDSI 检测干旱的能力。

4.3 典型干旱事件比较

选择典型干旱事件, 如 2005 和 2010 年亚马逊流域干旱、2011 年非洲东部干旱、2010 年的中国云南干旱、2006 年川渝干旱事件等进行对比分析。在图 3 至图 7 是 MDSI 和 DSI 干旱检测对比, 图中

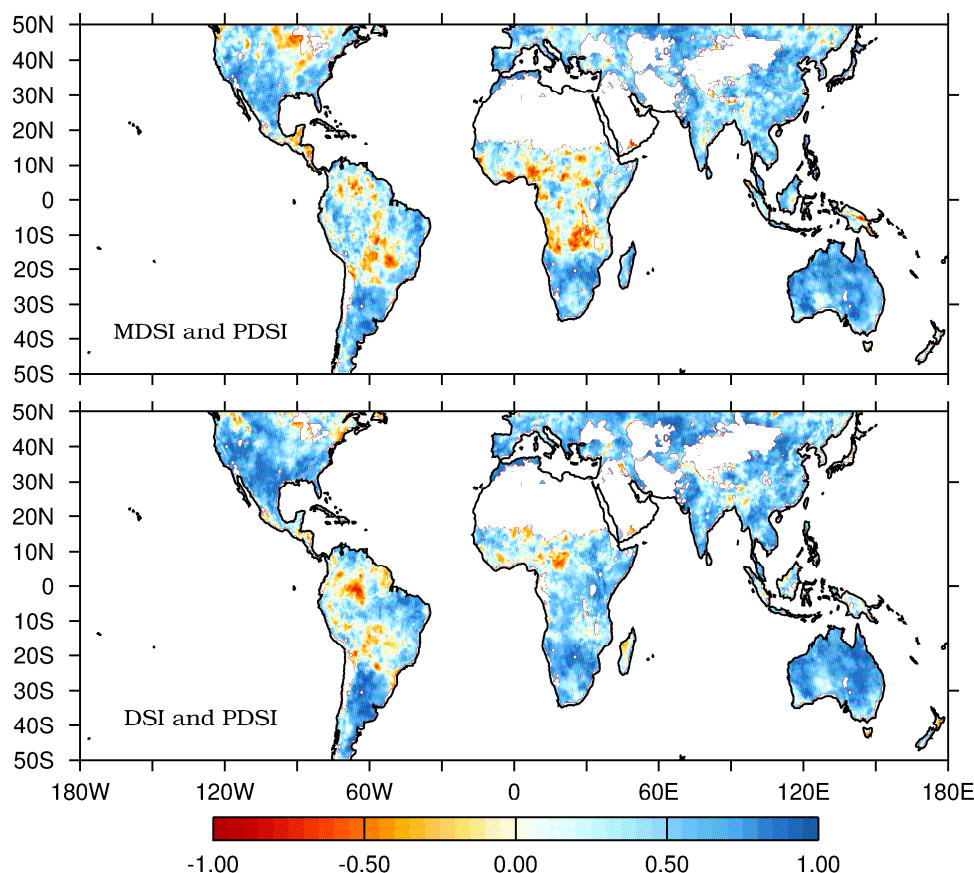


图 2 2000 到 2011 年 MDSI (上) 以及 DSI (下) 与 PDSI 的无偏相关系数空间分布, 空间分辨率为 $0.5^\circ \times 0.5^\circ$

Fig. 2 The spatial distribution of no partial correlation coefficient between MDSI (upper) or DSI (lower) and PDSI from 2000 to 2011 at $0.5^\circ \times 0.5^\circ$ spatial resolution

都采用相同的等级进行干旱评价，颜色越红表示越干旱，颜色越蓝表示越湿润。

在亚马逊流域，2005 年发生了干旱 (Hopkin, 2005)，2010 年再次发生干旱 (Lewis et al., 2011)，MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果如图 3 所示。对于 2005 年亚马逊流域干旱，MDSI 检测出的干旱影响面积小于 PDSI 和 DSI 检测出的面积，而 DSI 干旱面积接近于 PDSI。而对于 2010 年亚马逊流域干旱，MDSI 检测出的干旱影响面积与 DSI 非常接近，而 PDSI 干旱面积小于 MDSI 和 DSI。Xu et al. (2011) 认为 2010 年亚马逊流域干旱导致热带雨林变黄的面积是 2005 年植被变黄面积的 4 倍。其他相关研究都认为 2010 年是亚马逊流域最干旱的一年 (Atkinson et al., 2011; Lewis et al., 2011)。由此，MDSI 的干旱检测结果与 Xu et al. (2011) 的结论一致，而 PDSI 和 DSI 的监测结果都高估了 2005

年干旱的影响面积。PDSI 监测的 2005 年干旱面积大于 2010 年，且 2010 年干旱处于从 2000 年到 2011 年共 12 年间的第二或第三个干旱年 (Mu et al., 2012)，因而可以认为 PDSI 对 2005、2010 亚马逊流域干旱的检测存在较大误差。

2011 年非洲东部遭受 60 年来最严重的干旱，导致 3 万儿童死亡，索马里是受灾最严重的地区 (司东等，2012)。MDSI、PDSI 和 DSI 检测出的干旱和湿润空间分布位置明显不同 (图 4)。MDSI 和 PDSI 均反映出索马里干旱这一事实，而 DSI 检测为这一地区处于湿润状态。在遭受干旱后，非洲又出现严重的洪涝，如暴雨导致肯尼亚西部发生洪水，15 人死亡，7 万多人无家可归 (司东等，2012)。MDSI 也反映了肯尼亚西部发生洪水的基本事实。

2006 年中国重庆、川东、湖北西部、陕西南部

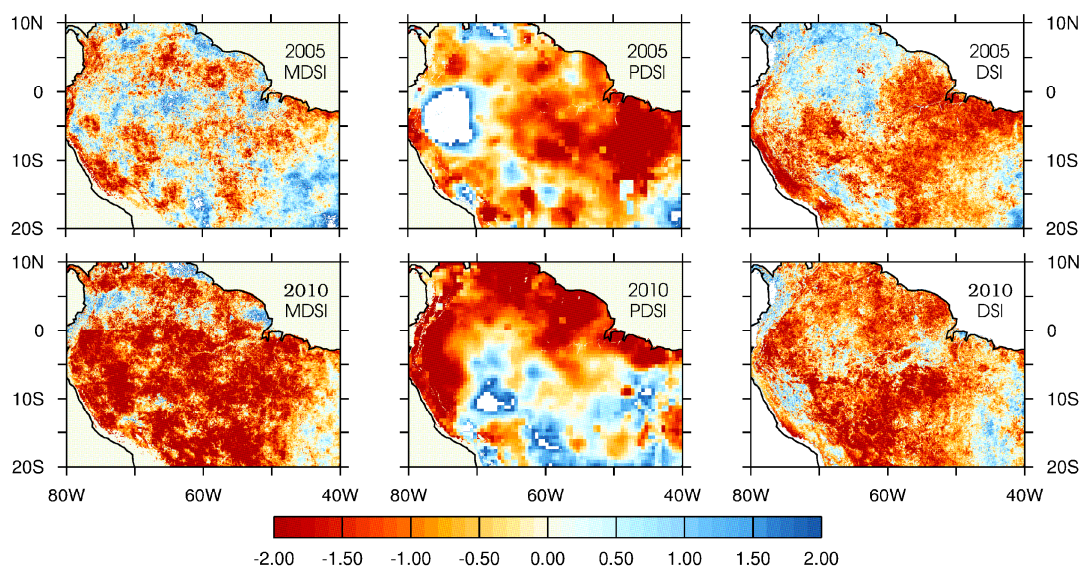


图 3 2005、2010 年亚马逊流域干旱的 MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果

Fig. 3 The Amazon droughts in 2005 and 2010 detected by MDSI, PDSI, and DSI

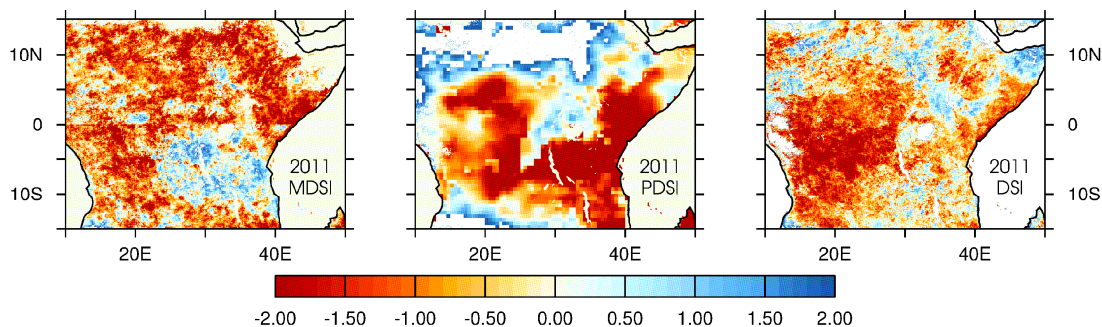


图 4 2011 年非洲东部干旱的 MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果

Fig. 4 The eastern Africa drought in 2011 detected by MDSI, PDSI, and DSI

地区遭受高温热天气,其中重庆干旱最为严重。高温干旱导致重庆和四川直接经济损失超过 150 亿元(李威和朱艳峰,2007)。图 5 显示了 MDSI、PDSI、DSI 对 2006 年重庆干旱事实的检测结果。MDSI 和 PDSI 能够检测到 2006 年川渝严重干旱的事实,而 DSI 监测到的川渝干旱严重程度弱于川西高原。

2010 年中国云南遭遇百年一遇的大旱。在云南中部、东部因降水偏少,气温偏高,导致发生干旱(陈洪滨和范学花,2011)。图 6 是 MDSI、PDSI、DSI 对云南干旱事实的检测结果。MDSI 检测出的干旱影响范围明显小于 PDSI 和 DSI 的,而 DSI 和

PDSI 均完全覆盖了整个云南区域,说明高估了干旱影响范围。同时,2010 年中国东北的黑龙江、吉林经历高温天气,高温日数为 1961 年来的最多日数(陈洪滨和范学花,2011)。同样,MDSI 也能够检测到这一高温天气现象。

2008 年中国长江中下游干旱状况的 MDSI、PDSI、DSI 检测结果如图 7 所示。MDSI 显示 2008 年中国南方大部分区域处于润湿状态,而 PDSI 和 DSI 显示为大部分区域处于干旱状态。事实上,2008 年中国南方出现强降雨天气,致使 177 人死亡(王小玲和郭艳君,2009)。显然,MDSI 监测结果基本上反映了这一事实。Mu et al. (2012) 认为可能是

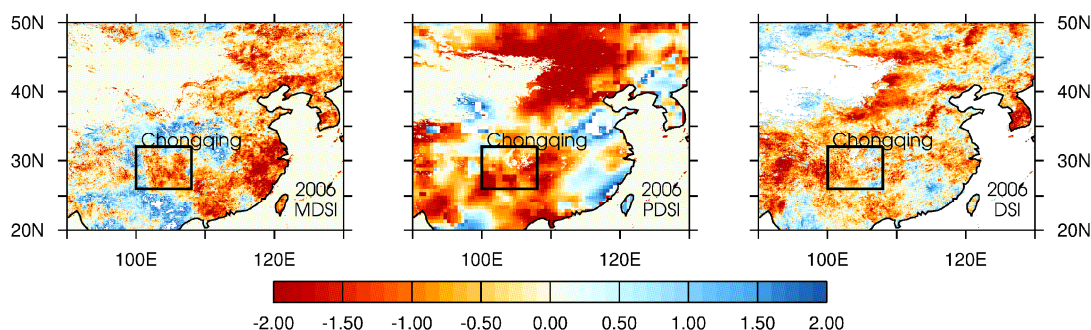


图 5 2006 年中国重庆干旱的 MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果

Fig. 5 The drought in Chongqing, China in 2006 detected by MDSI, PDSI, and DSI

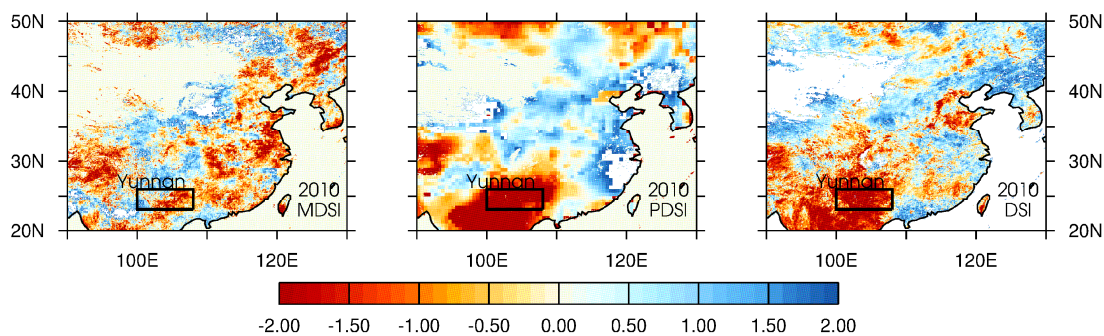


图 6 2010 年中国云南干旱的 MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果

Fig. 6 The drought in Yunnan, China in 2010 detected by MDSI, PDSI, and DSI

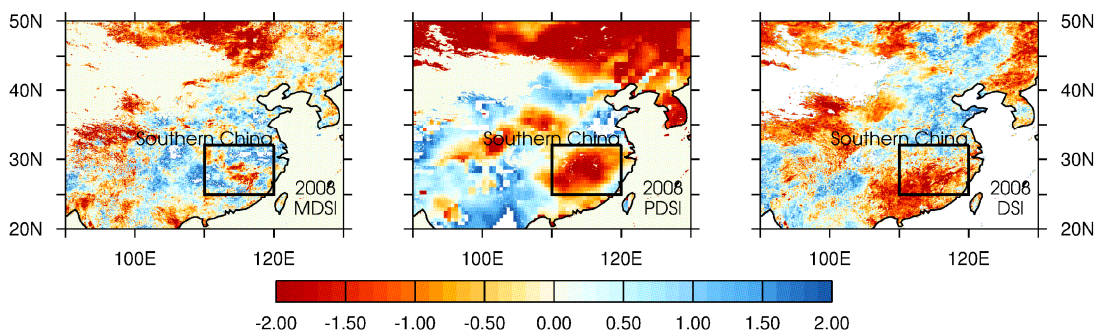


图 7 2008 年中国长江中下游干旱的 MDSI、PDSI 和 DSI 检测结果

Fig. 7 The drought in the lower reaches of the Yangtze River, China detected by MDSI, PDSI, and DSI

由于受到 2008 年夏季干旱以及 2008 年 1 月发生的低温冰冻灾害对树木破坏的影响,致使 PDSI 和 DSI 显示中国南方中部城市,如湖南为干旱状态。同时, Mu et al. (2012) 还未找到引起 2008 年中国广东省出现虚假干旱现象的原因,而 MDSI 则能够避免检测这种虚假的干旱现象,可能原因是 MDSI 采用 TRMM 数据,避免了湿润地区 MODIS 光学遥感数据因受到阴雨天气影响出现的不适定反演现象。

5 结论

文章基于 TRMM 降水数据、MODIS-NDVI 和 MODIS-LST 数据,构建了基于多传感器遥感数据的陆表干旱严重指数 MDSI,对近 12 年准全球典型干旱事件进行检测。结果表明: MDSI 能够检测到典型的干旱和洪涝事件。同时,在准全球尺度上对比 MDSI 以及 DSI 与 PDSI 之间的相关性,表明 MDSI 与 DSI 干旱检测结果,在气象站点稀疏的区域存在较大差异,而在气象站点稠密的区域具有较高的一致性。此外,比较 MDSI、DSI 和 PDSI 对典型干旱事件的检测能力,包括 2005 和 2010 年亚马逊流域干旱、2010 年非洲东部干旱、2006 年中国重庆干旱、以及 2010 年中国云南干旱等。结果表明: MDSI 对上述典型干旱事件检测能力均符合先前的文献报道。总体来说, MDSI 基本上成功地检测出了准全球年尺度上的典型干旱事件,说明运用 TRMM 数据有助于干旱严重程度的监测,并且 MDSI 更适合湿润地区干旱情况的检测。

上述研究结果说明 MDSI 检测干旱事件的性能优越,可能原因是 MDSI 兼顾降水异常和植被生长状况异常,适用于检测区域气象干旱事件。本文假设是在一段时间内,干旱严重程度由降雨总量异常和植被长势的平均状态异常共同决定。湿润地区植被对降水异常具有敏感性,更应关注降水盈亏情况,因而 MDSI 能够抓住湿润地区降水亏缺导致干旱的现象。同时, MDSI 通过 NDVI/LST 降低湿润地区干旱检测的不确定性,兼顾反映植被对干旱胁迫的响应,即植被指数下降、冠层温度增加的特征。干旱地区对降水异常具有适应性,植被生长特征是干旱监测的重要指标, MDSI 能够反映干旱地区植被长势受干旱胁迫的严重程度。MDSI 兼备降水盈亏和植被生长状况,因而能够反映半干旱和半湿润地区植被对干旱的滞后性响应。

MDSI 是借鉴了构建 DSI 的思路,用 TRMM 降雨数据代替 MODSI 的 ET/PET,用 NDVI/LST 代替 NDVI,对干旱检测更为简单有效。然而,从准全球尺度上来看,仍然需要更多的典型干旱事件对 MDSI 进行验证。由于 PDSI 依赖于不同区域内气象站点的个数和分布 (Brown et al., 2008),如在气象站点分布相对密集的美国东北部和欧洲部分地区 (Chen et al., 2002; Zhao et al., 2006), PDSI 值的准确性相对较高,但目前 TRMM 数据并不能覆盖上述地区。同时, MDSI 的空间分辨率为 $0.05^{\circ} \times 0.05^{\circ}$,且每年检测一次,因而对于季节性的短期干旱事件,以及局地干旱的精细检测性能还需要进一步的验证。在以后的研究中,可以考虑通过对 TRMM 数据进行降尺度,构建高空间和高时间分辨率的 MDSI 用于近实时干旱事件的监测。此外,目前 TRMM 降水数据也存在一定的空间误差 (Mu et al., 2012)。同样, MODIS 等光学卫星遥感数据生成的 NDVI/LST 也存在误差,包括:受到传感器、云的覆盖、大气中的气溶胶污染等限制, NDVI/LST 数据会出现不连续的现象,不符合真实地表的噪声信号;当植被出现较大扰动时,如森林火灾、低温冻害、病虫害时, MDSI 中植被异常的贡献可能会大于 TRMM 降雨的贡献。因而,在 TRMM 降水数据和 NDVI/LST 光学遥感数据都存在误差的情况下,本文构建的 MDSI 还存在着不确定性的影响。考虑到植被对干旱响应的敏感性,因而以后的研究中还可以评估 MDSI 对植被叶面积指数、净初级生产力的影响,从而更为充分验证 MDSI 的性能。

致谢 感谢马里兰大学赵茂盛博士提供的 PDSI 数据和 DSI 数据。感谢两位匿名审稿专家对本文改进提出的宝贵建议。

参考文献 (References)

- Ashcroft M B, Chisholm L A, French K O. 2009. Climate change at the landscape scale: Predicting fine-grained spatial heterogeneity in warming and potential refugia for vegetation [J]. *Global Change Biology*, 15: 656–667.
- Asia Times. 2005. Grim reaping for Thai farmers: A news report on Southeast Asia [OL]. http://www.atimes.com/atimes/Southeast_Asia/GD29Ae03.html [2012–11–26].
- Atkinson P M, Dash J, Jeganathan C. 2011. Amazon vegetation greenness as measured by satellite sensors over the last decade [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L19105, doi:10.1029/2011GL049118.
- Brown J F, Wardlow B D, Tadesse T, et al. 2008. The Vegetation Drought Response Index (VegDRI): A new integrated approach for monitoring drought stress in vegetation [J]. *GIScience and Remote Sensing*, 45:

- 16–46.
- Bureau of Meteorology. 2007. Special Climate Statement 14: Six years of widespread drought in southern and eastern Australia November 2001–October 2007 [OL]. <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs14.pdf>. [2012–11–26].
- Bureau of Meteorology. 2009. Special Climate Statement 19: A prolonged spring heat wave over central and south-eastern Australia [OL]. <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs19b.pdf>. [2012–11–26].
- Bureau of Meteorology. 2012. Special Climate Statement 38: Australia's wettest two-year period on record; 2010–2011 [OL]. (2012–11–26), <http://www.bom.gov.au/climate/current/statements/scs38.pdf>.
- 陈洪滨, 范学花. 2011. 2010 年极端天气和气候事件及其他相关事件的概要回顾 [J]. 气候与环境研究, 16 (6): 789–804. Chen Hongbin, Fan Xuehua. 2011. Some extreme events of weather, climate and related phenomena in 2010 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 16 (6): 789–804.
- Chen M Y, Xie P P, Janowiak J E, et al. 2002. Global land precipitation: A 50-yr monthly analysis based on gauge observations [J]. J. Hydrometeor., 3: 249–266.
- Cook E R, Seager R, Cane M A, et al. 2007. North American drought: Reconstructions, causes, and consequences [J]. Earth-Sci. Rev., 81: 93–134.
- Dai A G, Trenberth K E, Qian T T. 2004. A global data set of Palmer Drought Severity Index for 1870–2002: Relationship with soil moisture and effects of surface warming [J]. J. Hydrometeor., 5: 1117–1130.
- Dai A G. 2011. Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisc. Rev., 2: 45–65.
- Flannigan M D, Wotton B M, Ziga S. 1998. A study on the interpolation of fire danger using radar precipitation estimates [J]. Int. J. Wild. Fire, 8: 217–225.
- Gommes R, Petrassi F. 1994. Rainfall Variability and Drought in Sub-Saharan Africa Since 1960 [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 100pp.
- Hopkin M. 2005. Amazon hit by worst drought for 40 years [J]. Nature News, doi:10.1038/news051010–8.
- Horridge M, Madden J, Wittwer G. 2005. The impact of the 2002–2003 drought on Australia [J]. J. Policy Mode., 27: 285–308.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 443–457, doi:10.3878/j.issn.1006.9895.2001.11101. Huang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- Huete A, Didan K, Miura T, et al. 2002. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices [J]. Remote Sens. Environ., 83: 195–213.
- Huffman G J, Adler R B, Rudolf U, et al. 1995. Global precipitation estimates based on a technique for combining satellite-based estimates, rain-gauge analysis, and NWP model precipitation information [J]. J. Climate, 8 (5): 1284–1295.
- IPCC. 2007. Climate Change 2007: The Physical Science Basis [M] // Contribution of Working Groups I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. New York: Cambridge University, 106pp.
- Ji L, Peters A J. 2003. Assessing vegetation response to drought in the northern Great Plains using vegetation and drought indices [J]. Remote Sens. Environ., 87: 85–98.
- Jones P D, Hulme M, Briffa K R, et al. 1996. Summer moisture accumulation over Europe in the Hadley center general circulation model based on the Palmer drought severity index [J]. Int. J. Climatol., 16 (2): 155–172.
- Kogan F N. 1990. Remote sensing of weather impacts on vegetation in nonhomogeneous area [J]. Int. J. Remote Sens., 11: 1405–1420.
- Kogan F N. 1995. Application of vegetation index and brightness temperature for drought detection [J]. Adv. Space Res., 15: 91–100.
- Lawrimore J, Stephens S. 2003. Climate of 2002 annual review [OL]. <http://www.ncdc.noaa.gov/oa/climate/research/2002/ann/ann02.html> [2012–11–26].
- Lewis S L, Brando P M, Phillips O L, et al. 2011. The 2010 Amazon drought [J]. Science, 331: 554.
- 李威, 朱艳峰. 2007. 2006 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 33 (4): 108–111. Li Wei, Zhu Yanfeng. 2007. Global significant climate events in 2006 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 33 (4): 108–111.
- 李威, 蔡锦辉, 郭艳君, 等. 2010. 2009 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 36 (4): 106–110. Li Wei, Cai Jinhui, Guo Yanjun, et al. 2010. Global significant weather and climate events in 2009 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (4): 106–110.
- 李小燕. 2003. 2002 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 29 (4): 28–31. Li Xiaoyan. 2003. Significant climate events in the world during 2002 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 29 (4): 28–31.
- 梁潇云, 郭艳君. 2008. 2007 年全球重大天气气候事件概述 [J]. 气象, 34 (4): 113–117. Liang Xiaoyun, Guo Yanjun. 2008. Global significant climate events in 2007 [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 34 (4): 113–117.
- Lyon B, DeWitt D G. 2012. A recent and abrupt decline in the East African long rains [J]. Geophys. Res. Lett., 39: L02702, doi:10.1029/2011GL050337.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Proceedings of the 8th Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, AMS, 179–184.
- Mishra A K, Singh V P. 2010. A review of drought concepts [J]. J. Hydrol., 391: 202–216.
- Mu Q, Zhao M, Kimball J S, et al. 2012. A remotely sensed global terrestrial drought severity index [J]. Amer. Meteor. Soc., 94: 83–98.
- NBS. 2005. China Statistical Yearbook 2004 [M]. Beijing: China Statistics Press, 1011pp.
- Nicholls, N. 2004. The changing nature of Australian droughts. Climatic Change, 63, 323–336.
- Ozger M, Mishra A K, Singh V P. 2009. Low frequency drought variability events associated with climate indices [J]. J. Hydrol., 364: 152–162.
- Palmer W C. 1965. Meteorological Drought [M]. Washington DC: US Weather Bureau, 58pp.
- Pandey S, Bhandari H, Hardy B. 2007. Economic Costs of Drought and Rice Farmers' Coping Mechanisms: A Cross-Country Comparative

- Analysis [M]. Los Banos: IRRI, 203pp.
- Phillips O L, Aragao L E O C, Lewis S L, et al. 2009. Drought sensitivity of the Amazon rainforest [J]. *Science*, 323: 1344–1347.
- Price J C. 1985. On the analysis of thermal infrared imagery: The limited utility of apparent thermal inertia [J]. *Remote Sens. Environ.*, 18: 59–93.
- Quiring S M. 2009. Monitoring drought: An evaluation of meteorological drought indices [J]. *Geogr. Compass*, 3: 64–88.
- Rhee J Y, Im J, Carbone G J. 2010. Monitoring agricultural drought for arid and humid regions using multi-sensor remote sensing data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 114: 2875–2887.
- Sandholt I, Rasmussen K, Andersen J. 2002. A simple interpretation of the surface temperature-vegetation index space for assessment of surface moisture status [J]. *Remote Sens. Environ.*, 79: 213–224.
- Shukla S, Steinemann A C, Lettenmaier D P. 2011. Drought monitoring for Washington State: Indicators and applications [J]. *J. Hydrometeorol.*, 12: 66–83.
- 司东, 李修仓, 任福民, 等. 2012. 2011 年全球重大天气气候事件及其成因 [J]. *气象*, 38 (4): 480–489. Si Dong, Li Xiucang, Ren Fumin, et al. 2012. Global significant weather and climate events in 2011 and the possible causes [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 38 (4): 480–489.
- Simelton E, Fraser E D G, Termansen M, et al. 2009. Typologies of crop-drought vulnerability: An empirical analysis of the socioeconomic factors that influence the sensitivity and resilience to drought of three major food crops in China (1961–2001) [J]. *Environ. Sci. Policy*, 12 (4): 438–452.
- Vicente-Serrano S M, Gouveia C, Camarero J J, et al. 2013. Response of vegetation to drought time-scales across global land biomes [J]. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*, 110: 52–57.
- Wan Z, Dozier J. 1996. A generalized split-window algorithm for retrieving land-surface temperature from space [J]. *IEEE Trans. Geosci. Remote Sens.*, 34: 892–905.
- 王小玲, 郭艳君. 2009. 2008 年全球重大天气气候事件概述 [J]. *气象*, 35 (4): 108–111. Wang Xiaoling, Guo Yanjun. 2009. Global significant weather and climate events in 2008 [J]. *Meteorological Monthly (in Chinese)*, 35 (4): 108–111.
- Watkins A B. 2005. The Australian drought of 2005 [J]. *WMO Bulletin*, 54 (3): 156–162.
- Wells N, Goddard S, Hayes M J. 2004. A self-calibrating palmer drought severity index [J]. *J. Climate*, 17: 2335–2351.
- Wilhite D A. 2000. Drought as a Natural Hazard: Concepts and Definitions [M]. London: Routledge, 16pp.
- Xu L, Samanta A, Costa M H, et al. 2011. Wide spread decline in greenness of Amazonian vegetation due to the 2010 drought [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38: L07402, doi:10.1029/2011GL046824.
- Zhang A Z, Jia G S. 2013. Monitoring meteorological drought in semiarid regions using multi-sensor microwave remote sensing data [J]. *Remote Sens. Environ.*, 134: 12–23.
- Zhao M S, Running S W. 2010. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009 [J]. *Science*, 329: 940–943.
- Zhao M S, Running S W, Nemani R R. 2006. Sensitivity of Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer (MODIS) terrestrial primary production to the accuracy of meteorological reanalyses [J]. *J. Geophys. Res.*, 111: G01002, doi:10.1029/2004JG000004.