

刘珂, 姜大膀. 2015. 基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国干湿变化的分析 [J]. 大气科学, 39 (1): 23–36, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13265.
Liu Ke, Jiang Dabang. 2015. Analysis of dryness/wetness over China using standardized precipitation evapotranspiration index based on two evapotranspiration algorithms [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 39 (1): 23–36.

基于两种潜在蒸散发算法的 SPEI 对中国 干湿变化的分析

刘珂^{1,2} 姜大膀^{1,3}

1 中国科学院大气物理研究所竺可桢—南森国际研究中心, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

3 中国科学院气候变化研究中心, 北京 100029

摘 要 利用美国普林斯顿大学高分辨率的全球陆面同化数据集和美国国家环境预测中心的辐射再分析数据, 根据 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 公式分别计算了 1948~2008 年中国区域潜在蒸散发量; 而后, 使用降水和两套潜在蒸散发数据分别计算得到标准化降水蒸散发指数 SPEI (Standardized Precipitation Evapotranspiration Index), 并以此研究了 1949~2008 年中国区域干湿变化时空特征以及两种 SPEI 结果之间的差异; 最后, 给出了两种 SPEI 在中国的适用区域。结果表明: 两种 SPEI 均显示中国地区整体上存在变干趋势, 季节上以春季的变干趋势最为显著; 空间上表现为以长江为界的南涝北旱, 显著变干的区域有内蒙古中部、华北、东北以及四川东部地区, 显著变湿的地区主要位于新疆北部和西部。同时, 各种不同等级干旱也呈增加趋势, 其中以中等干旱增加最为显著。1990 年代中后期以来是中等和极端干旱发生最多的时期, 空间上与 SPEI 显著减小的区域相对应。两种 SPEI 在冬、春季差异最大, 这主要是由于期间两种潜在蒸散发的计算结果之间存在很大差异。在 Penman-Monteith 公式中, 由于空气动力项对冬、春季北方潜在蒸散发的贡献显著增加, 基于该公式的 SPEI 相对而言能更合理地描述干湿变化特征。

关键词 潜在蒸散发 SPEI 干湿变化 干旱

文章编号 1006-9895(2015)01-0023-14

中图分类号 P467

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.1402.13265

Analysis of Dryness/Wetness over China Using Standardized Precipitation Evapotranspiration Index Based on Two Evapotranspiration Algorithms

LIU Ke^{1,2} and JIANG Dabang^{1,3}

1 Nansen-Zhu International Research Centre, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

3 Climate Change Research Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract On the basis of a high-resolution global meteorological dataset from Princeton University and monthly radiation data from the National Centers for Environmental Prediction (NCEP), two types of Standardized Precipitation Evapotranspiration Index (SPEI) were established using precipitation in addition to two sets of potential evapotranspiration (PET) data, in which PET was calculated by Thornthwaite and Penman-Monteith formulas, respectively. On the basis of these results, the dryness/wetness trends over China during 1949–2008 measured by two

收稿日期 2013-09-16; **网络预出版日期** 2014-05-07

项目资助 国家重点基础研究发展计划 (973 计划) 项目 2012CB955401, 公益性行业 (气象) 科研专项 GYHY201006022, 国家自然科学基金项目 41175072

作者简介 刘珂, 女, 1985 年出生, 博士研究生, 主要从事干旱监测和预估方面研究。E-mail: liuke@mail.iap.ac.cn

SPEIs and their differences are analyzed. In addition, the applicable regions of the two SPEIs are evaluated. It is determined that a dryness trend for the entire country was indicated by the two SPEIs. Seasonally, the most significant dryness trend occurred in spring. Geographically, drought clearly increased in northern China but decreased in southern China, with a dividing line approximately along with the Yangtze River valley. A significant dryness trend was apparent over the areas of western Inner Mongolia, North China, northeastern China, and eastern Sichuan, whereas the opposite was indicated for northern and western Xinjiang. Moreover, different grades of drought events increased across the entire country. Among them, the moderate drought event showed the most significant increasing trend, and the occurrences of moderate and extreme drought events were the most frequent after the late 1990s for the entire study period. Spatially, the regions with an obvious upward trend of drought events corresponded to the regions with a downward trend of SPEI. It is noted that the difference between the two types of SPEI was largest in winter and spring because of differences in PET. In northern China, the contribution of an aerodynamic term to PET in the Penman–Monteith formula was determined to be important in winter and spring and hence gave more reasonable results.

Keywords Evapotranspiration, SPEI, Dryness/wetness, Drought

1 引言

气候干湿状况及其变率与人民生活息息相关,对区域生态环境和社会经济亦有重要影响,是气候学领域的焦点问题之一。在以变暖为主要特征的全球变化背景下,温度和降水等要素变化会影响地表水分收支平衡,从而最终改变地表干湿状况。目前,对干湿状况的研究多是通过相应的指数来开展,这些指数大体上分为两类,一类是基于降水的单因子指数,另一类是基于降水以及其他气象要素的综合性指数(卫捷等,2003)。在温度变化背景下,仅用降水来衡量干湿变化的指数会有局限性,因为温度变化会通过调制地表蒸散发过程改变地表干湿状况,而降水单因子指数则无法体现增暖或者变冷对干湿的影响,尽管降水仍是决定地表干湿变化的一个重要因子(马柱国和符淙斌,2006)。近几十年来,随着全球变暖逐渐加剧,温度等地表气象要素变化所引起的蒸发潜力等变化已经对地表干湿状况产生了重要影响(Richard and Heim, 2002);大气环流模式试验结果表明,蒸发和蒸腾作用总体上能消耗 80% 的降水,同时温度异常对干旱的效能等价于降水(Abramopoulos et al., 1998)。因此,在分析气候变化背景下的干湿状况时,需要寻求客观合理的指标来表征环境的干湿变化。

帕尔默干旱指数(Palmer Drought Severity Index, PDSI; Palmer, 1965)是目前干旱研究中常用的一种干湿指数,通过基于土壤水分平衡方程的 PDSI 能综合反映降水和蒸发的作用。同时,该指数本身随着时代的发展也得到了不断修正和改进,但其固有的缺陷依然存在,例如评估的干旱尺度依旧

是 9~12 个月,自回归特征使指数本身仍然受前 4 年指数的影响(Guttman, 1998)。目前气象学者已经利用 PDSI 进行了大量干旱研究,研究结果总体表明 1950 年代以来中国东北、华北、西北东部和东北地区的干旱面积增加,新疆、长江中下游、华南等地区的干旱面积呈减小趋势(卫捷等,2003;翟盘茂和邹旭恺,2005;苏明峰和王会军,2006;姜大膀等,2009; Dai, 2011)。另一方面,干旱是一种多尺度现象,标准化降水指数(Standardized Precipitation Index, SPI; McKee et al., 1993)因为能在不同空间和时间尺度上评估干旱,且在 6~12 个月的时间尺度上与 PDSI 具有良好的可比性而被广泛应用于干旱研究中(Guttman, 1998; Hayes et al., 1999; Lloyd-Hughes and Saunders, 2002; Redmond, 2002),但 SPI 受到质疑最多的是该指数本身仅考虑了降水的作用。在我国,基于 SPI 对区域整体干湿变化趋势的研究较少,已有的工作多是针对某一区域而展开的。白永清等(2007)根据 SPI 指出中国南方大旱总体上呈减少趋势,1980 年代后以涝为主;马建勇等(2012)利用 SPI 分析了中国东北 5~9 月的干湿变化,表明干旱呈增加趋势,其中以东北南部增加最为明显;李剑锋等(2012)采用 SPI 分析了新疆干旱,表明北疆地区干旱发生频率和持续时间呈减少趋势,南疆则有增加趋势。

为了能综合考虑降水、蒸发和蒸腾的作用,且能在多时间尺度上合理地评估干旱,一种基于降水量和潜在蒸散发(Potential Evapotranspiration, PET)的干湿指数,即标准化降水蒸散发指数(Standardized Precipitation Evapotranspiration Index, SPEI; Vicente-Serrano et al., 2010a)应运而生。鉴于 SPEI 综合考虑了蒸散发和降水对干旱的影响,亦

能在不同时间尺度上评估和检测干旱, 因此已被广泛应用于世界范围内的干旱研究中 (Vicente-Serrano et al., 2010b, 2011; 石崇和刘晓东, 2012)。

现在, 利用 SPEI 对中国区域干旱进行评估和研究的工作还较少, 同时 SPEI 原始计算过程中的潜在蒸散发的计算利用的是仅考虑了温度的 Thornthwaite (1948) 公式, 相对于 Thornthwaite 公式, Penman-Monteith 公式 (Monteith, 1965) 计算的潜在蒸散发不管是在干旱区还是在湿润区都与实测参考作物的蒸散量较为符合 (Jensen et al., 1990)。因此, 我们分别利用 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发, 得到了基于两套潜在蒸散发资料和同一套降水资料的 SPEI 值。其中, SPEI_TH 为根据 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散发, SPEI_PM 则为根据 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸散发。本文基于这两套 SPEI 结果, 分析了 1949~2008 年中国区域干湿状况及其时空演化特征以及二者之间的差异, 最后讨论给出了二者在中国的适用区域, 以期 SPEI 在中国区域干旱研究中的应用提供参考。

2 数据和 SPEI

本文所用资料为 1948~2008 年月平均地面气象数据 (包括: 温度、降水量、地表气压、2 m 风速、相对湿度、比湿、地表净辐射通量、饱和水汽压)。除地表辐射通量数据是 NCEP 再分析数据外, 其他变量均来自美国普林斯顿大学的高分辨率全球陆面同化数据 (<http://hydrology.princeton.edu/data.pgfp.php>[2013-11-17]; Sheffield et al., 2006), 这套数据是利用全球站点观测数据与 CRU (Climatic Research Unit)、GPCP (Global Precipitation Climatology Project)、TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) 和 NASA (National Aeronautics and Space Administration) 4 种再分析数据对 NCEP 中的温度和降水等要素进行修正后得到的一套更加准确的地面气象变量数据集。目前这套数据已被用于了中国区域的干旱研究中 (李明星和马柱国, 2012), 且其中的温度和降水数据与吴佳和高学杰

(2013) 新近发展的一套格点化的中国区域资料也具有较好的一致性。要素中地表辐射数据的水平分辨率是 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 其他的水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$, 在计算潜在蒸散发时, 辐射数据通过双线性插值到与其他变量一致的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 水平网格上。

SPEI 原始程序可于网址 (<http://digital.csic.es/handle/10261/10002?locale=en>[2013-11-30]) 下载。本文在计算 SPEI 时, 分别利用了 Penman-Monteith 和 Thornthwaite 公式来计算潜在蒸散发, SPEI 具体的计算过程这里不再赘述, 更多信息请参阅 Vicente-Serrano et al. (2010a)。与 SPI 一样, SPEI 是对表征干旱特征量的标准化, 反映的是当年干旱偏离正常年份的程度。文中对各类干湿事件的划分按表 1 标准进行。鉴于降水是年及更长时间尺度上影响干旱的主要因子。而在更短的季节时间尺度上, 除了降水因子外, 温度、气压、风速等要素也会通过影响潜在蒸散发对干旱产生很大影响。因此, 这里我们主要讨论时间尺度为 3 个月的季节尺度干旱的时空变化特征。

3 1949~2008 年中国干湿变化趋势

3.1 1949~2008 年 SPEI 时空变化特征

图 1 是 1949~2008 年中国区域平均的年和季节 SPEI_PM 和 SPEI_TH 变化趋势图。两种 SPEI 结果均显示: 近 60 年来, 年和季节平均的 SPEI 都为明显的减小趋势, 四季中以春季的减小趋势最为明显, 冬季干湿变化趋势最不明显。此外, SPEI_TH 显示秋季也有显著的变干趋势, 但 SPEI_PM 则未检测到这种显著的变干趋势。其中, SPEI_TH 所揭示的中国区域干湿变化趋势与李伟光等 (2012) 利用 160 个观测站的气象资料根据 Thornthwaite 公式计算所得的 SPEI 结果相似, 即年、春季和秋季的变干趋势最为显著。

图 2 是 1949~2008 年 SPEI 年均值变化趋势的空间分布, 表明两个结果在干湿变化格局的空间分布上具有较好的一致性, 但在干湿变化程度上存有一定的差异。一致性主要表现在: 在 30°N 以北, 除西北地区西部有一定的增加趋势外, 其他地区

表 1 SPEI 的干湿等级划分与概率

Table 1 SPEI grade standard divided for drought and its probability

	极端干旱	中等干旱	轻度干旱	正常或湿润年份	轻度湿润	中等湿润	极端湿润
SPEI	≤ -2.0	$-2.0 \sim -1.0$	$-1.0 \sim -0.5$	$-0.5 \sim 0.5$	$0.5 \sim 1.0$	$1.0 \sim 2.0$	≥ 2.0
概率	2.28%	13.59%	14.98%	38.3%	14.98%	13.59%	2.28%

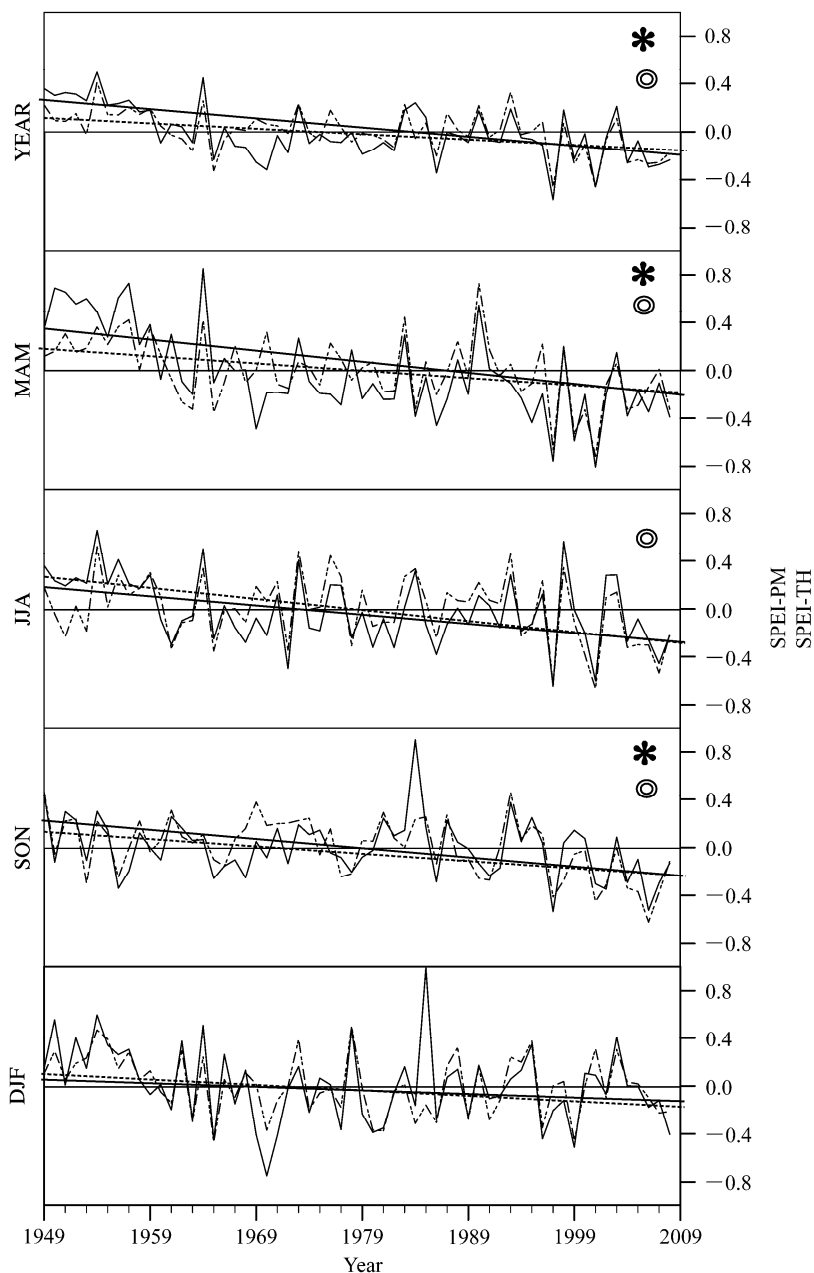


图1 1949~2008年中国区域平均的年(YEAR)、春季(MAM)、夏季(JJA)、秋季(SON)和冬季(DJF) SPEI_PM(实线)和SPEI_TH(虚线)变化趋势,其中,“*”表示SPEI_PM通过了95%的信度检验,“⊙”表示SPEI_TH通过了95%的信度检验

Fig. 1 Changes in regionally averaged annual (YEAR), spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter (DJF) SPEIs over China as derived from Penman-Monteith (solid line, SPEI_PM) and Thornthwaite (dashed line, SPEI_TH) formulas during 1949–2008, respectively, in which “*” denotes the SPEI_PM passed the 95% confidence level, and “⊙” denotes the SPEI_TH passed the 95% confidence level

SPEI 均为减小趋势,其中以黄河中游的河套地区、华北和东北地区南部的减小趋势最为显著,即这些地区有显著的变干趋势,这一空间分布特征与石崇和刘晓东(2012)直接利用 Vicente-Serrano 等的 SPEI 数据集在中国区域的分析结果具有较好的相似性,其他干旱指数如 PDSI 和 CI 指数也都揭示出中国北方具有明显的变干趋势(翟盘茂和邹旭

恺, 2005; 邹旭恺等, 2010; Dai, 2011)。差异性主要是,相对于 SPEI_TH, SPEI_PM 所示的中国北方变干而南方变湿趋势更为清晰。

在季节尺度上(图3),以春季的干湿变化分布特征最为清晰,其空间分布和年平均情形最相似,除了相同的变干区域外,春季的长江中下游地区也有明显变干趋势。夏季, SPEI 显著减小的地区发生

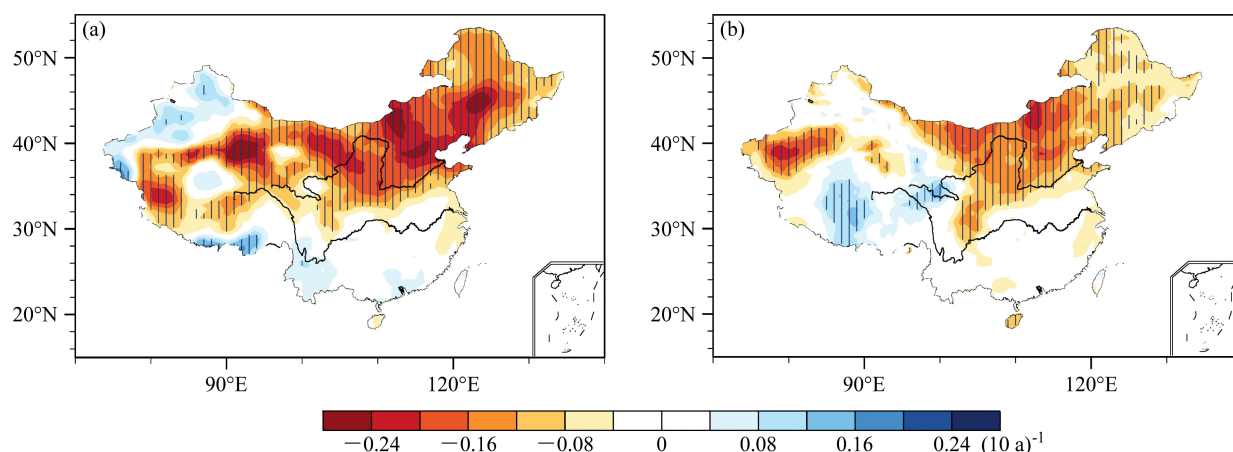


图2 中国区域年平均的 (a) SPEI_PM 和 (b) SPEI_TH 变化趋势分布 [单位: $(10a)^{-1}$], 其中标竖线区为通过 95% 信度检验的区域

Fig. 2 The geographical distribution of the linear trend [units: $(10a)^{-1}$] of annual (a) SPEI_PM and (b) SPEI_TH during 1949–2008, and the areas with the 95% confidence level are hatched

在内蒙古中部、华北、东北地区以及四川盆地, 同时变化趋势显著的地区较春季范围要小一些。秋季, SPEI 变化的空间分布特点是西南、东北和华北地区显著变干, 西北西部部分地区显著变湿。冬季, 河套、东北东部以及内蒙古中部地区显著变干, 新疆北部以及东北西部显著变湿。两种 SPEI 在大的空间格局上具有较高的相似性, 但在不同地区和不同季节间也存在着一定差异, 在区域水平上主要表现为: 春季, SPEI_PM 显著变干的面积和趋势明显要大于 SPEI_TH 结果, 同时在青藏高原北部地区, 两者结果相反, 即 SPEI_PM 结果为显著变干, SPEI_TH 则为显著变湿; 两种 SPEI 结果在夏季和秋季的差异较小; 冬季, SPEI_TH 和 SPEI_PM 除在干湿变化程度方面存在差异之外, 在新疆西部、黄河上游、西南地区东部和华南地区, 两者结果也相反, SPEI_TH 为显著变湿 (新疆西部地区变干), 而 SPEI_PM 则为显著变干 (新疆西部地区变湿)。

3.2 1949~2008 年各级干旱事件的时空变化特征

图 4 是按照 SPEI 干湿标准给出的中国区域平均的各级湿润和干旱事件发生月数变化趋势图。从中可以看出, 除了极端湿润事件外, 其他干湿事件都有显著的变化趋势, 其中显著减少的是中等和轻度湿润事件, 极端、中等和轻度干旱事件则显著增加。

干旱往往能造成严重的自然灾害, 给农业生产以及人民生活带来极大的威胁。在分析了中国区域整体的干湿变化趋势后, 我们根据 SPEI 定义三类不同程度的干旱, 分析了中国区域各级干旱事件

的变化趋势。从图 4 可以看出, 与 SPEI 减小趋势相对应, 各级干旱均呈显著增加趋势。SPEI_PM 结果表明: 1960 年代至 1970 年代中期, 以及 1990 年代中期以来的两个时段, 是极端干旱的相对多发期。相对于极端干旱变化而言, 中等干旱的增加趋势更显著, 在极端干旱多发的两个时期, 中等干旱也处于多发期。轻度干旱整体上则呈现持续增加趋势。就 SPEI_TH 来说, 极端干旱多发期只出现在 1990 年代中后期之后; 在中等干旱方面, SPEI_TH 与 SPEI_PM 结果较为一致; 轻度干旱的增加趋势则不显著。

图 5 是 1949~2008 年中国区域平均的季节尺度轻度、中等和极端干旱发生月数的变化趋势图。在变化趋势最显著的冬、春季, 轻度干旱的变化可以概括为“中间多两头少”, 1950 年代和 2000 年后轻度干旱发生较少, 中间时段较多。中等和极端干旱的增加趋势在春、夏季也最为显著, 而在秋、冬季则不明显。相对于中等干旱的逐渐增加, 极端干旱增加只集中在两个时段, 一是 1960 年代和 1970 年代, 二是 1990 年代中期以后。与年平均结果相似, SPEI_TH 和 SPEI_PM 只在轻度和极端干旱方面存在较大差异, 即与 SPEI_PM 所示的轻度干旱先增加再减小趋势不同, SPEI_TH 的变化特征不明显, 而且 SPEI_TH 的极端干旱发生月数在 1960 年代和 1970 年代要小于 SPEI_PM 的结果。

图 6 是轻度、中等和极端干旱年际变化趋势的空间分布图。两种 SPEI 结果均显示: 河套、华北、西北地区南部和东北地区的中等干旱显著增加。四

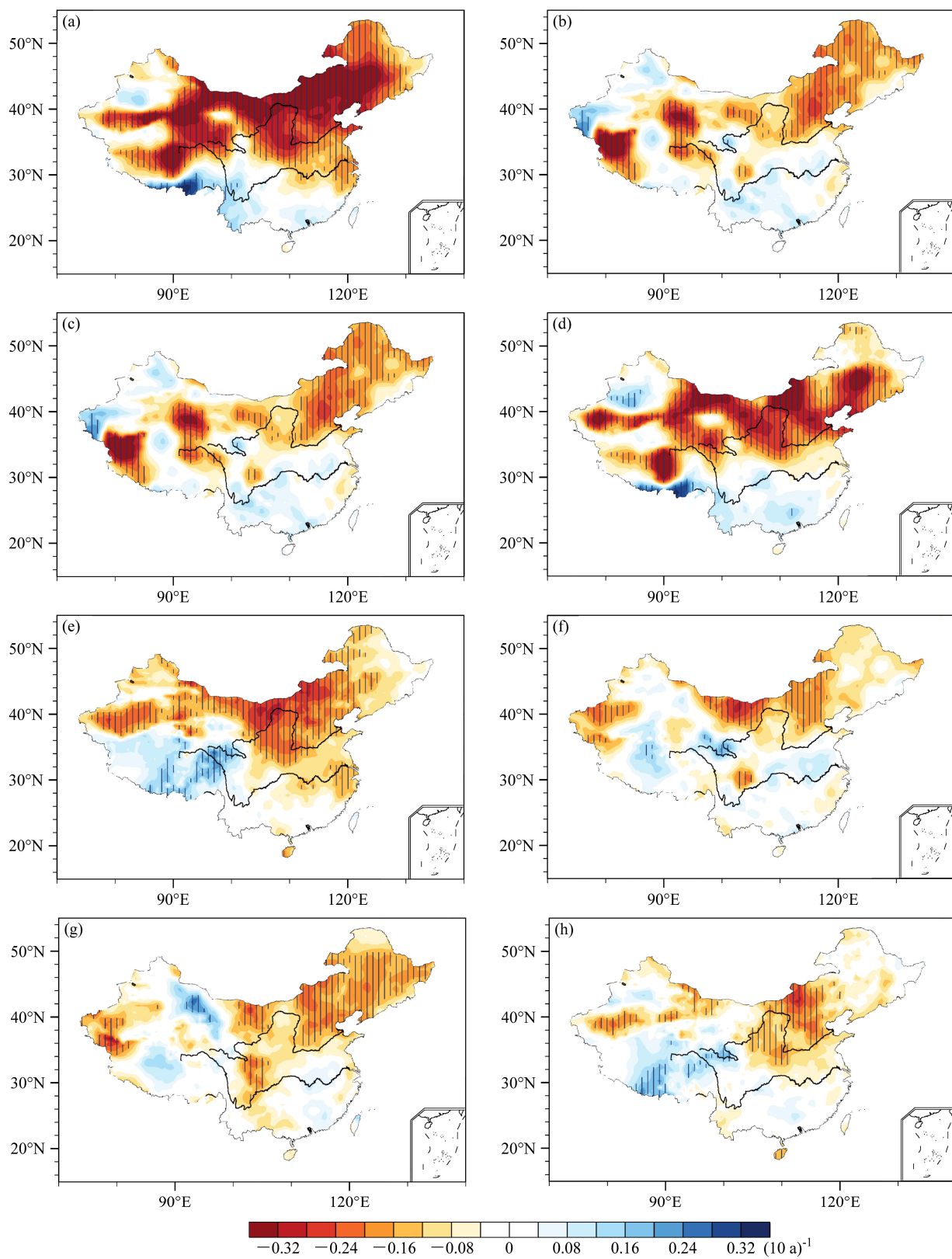


图3 中国 (a、e) 春、(b、f) 夏、(c、g) 秋、(d、h) 冬季 (a、b、c、d) SPEI_{PM} 和 (e、f、g、h) SPEI_{TH} 变化趋势 [单位: $(10a)^{-1}$], 其中标竖线区为通过 95% 信度检验的区域

Fig. 3 The geographical distribution of the linear trend [units: $(10a)^{-1}$] of spring (a, e), summer (b, f), autumn (c, g), and winter (d, h) SPEI_{PM} (a, b, c, d) and SPEI_{TH} (e, f, g, h) during 1949–2008, and areas with the 95% confidence level are hatched

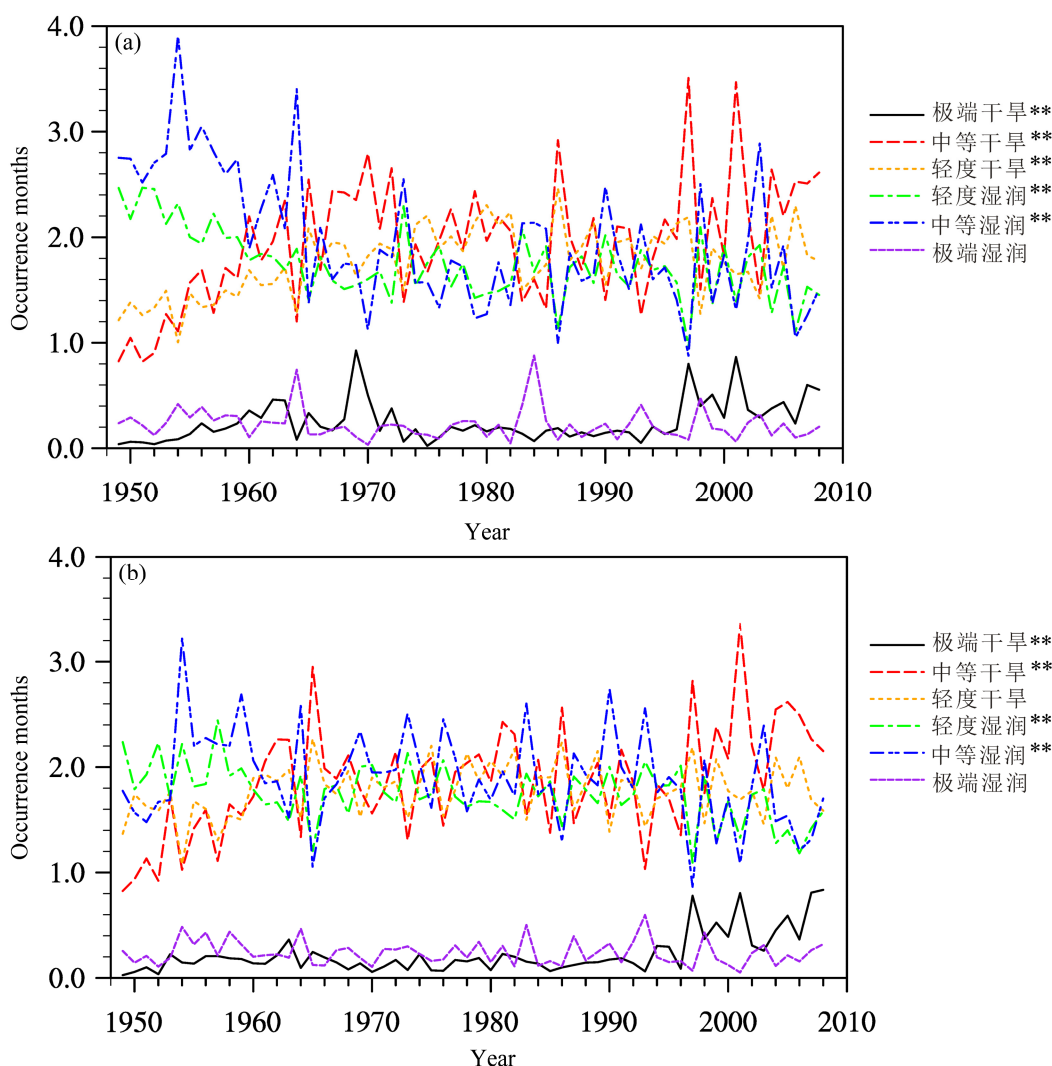


图4 1949~2008年中国区域平均的年均6类干湿事件发生月数趋势(单位:月): (a)为SPEI_PM结果; (b)为SPEI_TH结果。“***”表示通过了95%的信度检验

Fig. 4 Changes in annual occurrence months of six kinds of dryness/wetness events (units: month) during 1949–2008, in which (a) denotes SPEI_PM, (b) denotes SPEI_TH, and “***” denotes the 95% confidence level

季中, 春季中等干旱增加趋势显著的区域最多, 且主要集中在华北、河套、东北以及长江中下游地区, 其他季节增加趋势显著的地区只出现在华北和东北的某些区域。不同于中等干旱, 轻度和极端干旱变化趋势的空间特征不明显, 出现轻度和极端干旱显著增加或减小的区域相对较少, 增加趋势明显的地区与中等干旱明显增加的地区一致。在总体增加趋势最明显的春季, 极端干旱显著增加的地区主要位于内蒙古中部、河套和华北某些地区, 其他季节变化趋势显著的地区分布则比较零散, 轻度干旱显著增加的地区主要位于华北北部。SPEI_TH 与 SPEI_PM 差异较大的地区主要位于新疆北部、云南、华南和西藏高原北部等; 在四季中, 两种结果

在冬、春季的差异最大。

4 SPEI_PM和SPEI_TH差异原因分析

4.1 降水量变化对SPEI的影响

一个地区干湿变化的决定性因子是降水。由图7可见, 1949~2008年中国年和季节降水变化具有明显的季节和区域差异。就年平均而言, 降水变化呈现西北至东南向的正一负一正分布, 东北东部、华北、河套以及西南的部分地区表现为显著减少, 西北西部地区、华东和华南地区则为显著增加。季节尺度上, 江淮和长江以南地区降水变化趋势的季节差异最大, 除夏季降水为增加趋势外, 其他季节降水均表现为不同程度的减少, 东北东部、华北、河套

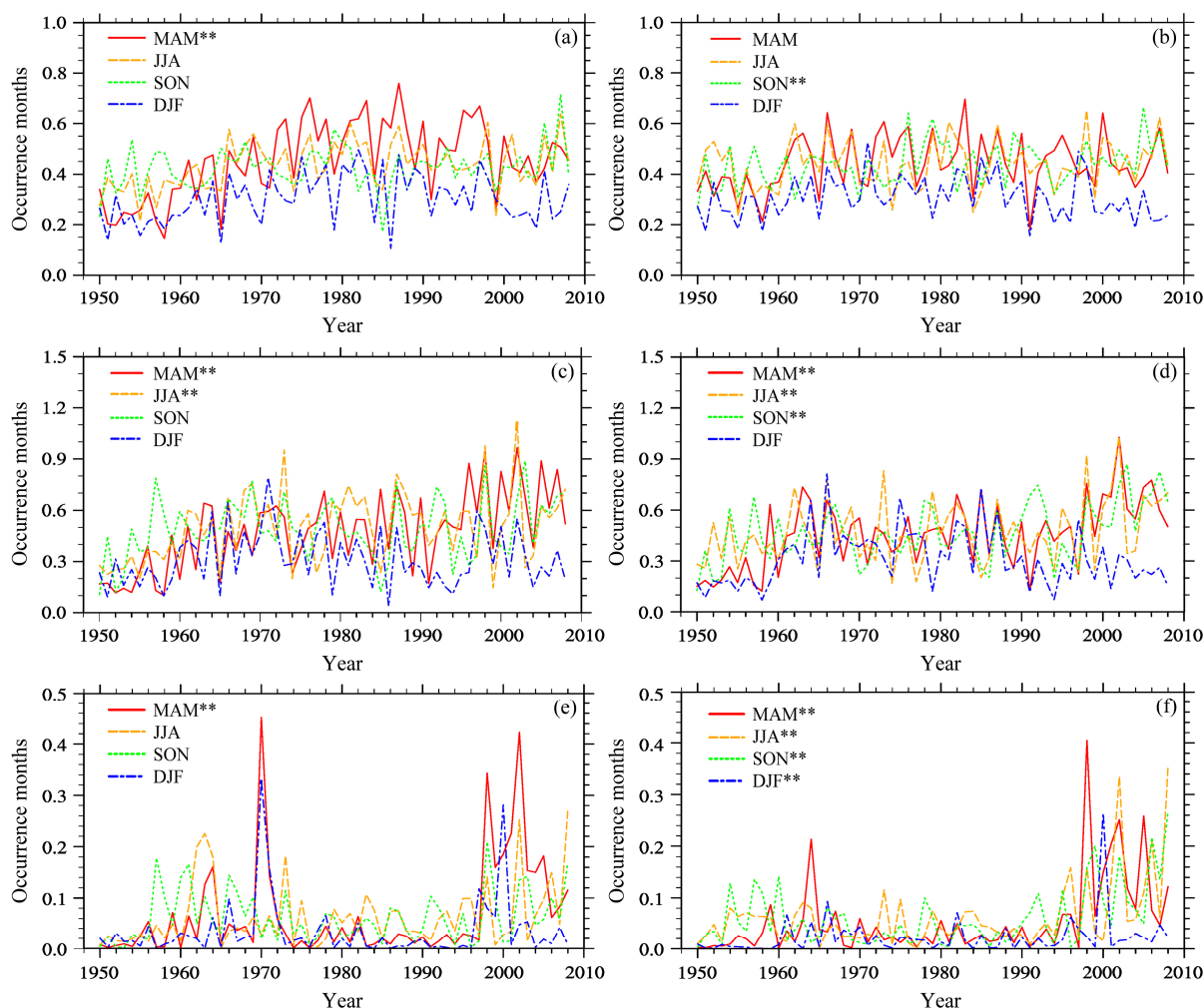


图5 1949~2008年(a, b, c) SPEI_PM和(d, e, f) SPEI_TH所示的中国区域平均的春(MAM)、夏(JJA)、秋(SON)和冬(DJF)季(a, d)轻度干旱、(b, e)中等干旱和(c, f)极端干旱发生月数趋势(单位:月),其中“**”表示通过了95%的信度检验,其他说明如图1
Fig. 5 Changes in spring (MAM), summer (JJA), autumn (SON), and winter (DJF) occurrence months (units: month) of three kinds of dryness events, including (a, d) light, (b, e) moderate, and (c, f) extreme drought, as derived from (a, b, c) SPEI_PM and (d, e, f) SPEI_TH during 1949–2008, in which “**” denotes the 95% confidence level

和西南的部分地区降水量的减少趋势在夏、秋季节最为显著。这一结果与王大钧等(2006)的台站资料分析结果有很好的 consistency。

在年降水量显著减少的华北、西南、长江中下游和海南岛等地区(图7a),对应的是SPEI的显著减小趋势。但是从四季降水变化趋势图(图7b–e)上,我们发现降水变化和SPEI变化的对应关系存在不同,特别是在春季,即某些降水增加的地区对应的是SPEI减小趋势,例如春季的山东半岛地区;另外,某些降水减少不显著地区对应的是SPEI显著减小的地区,例如在内蒙古、华北和东北地区。这说明降水对干湿变化有指示作用,但是在某些地区和季节也具有局限性,因此综合考虑潜在蒸散发

的影响能更加合理的识别和监测干旱。

4.2 PET_PM和PET_TH比较分析

目前,考虑潜在蒸散发作用的干湿指数在计算过程中用的多是仅依赖于温度因子的Thornthwaite公式,而与实际潜在蒸散发较为接近的Penman-Monteith公式由于用到的气象因子数较多且计算复杂而少被使用。前面我们分析得到:同一个降水变化序列,两种不同的潜在蒸散发计算方法得到的SPEI_TH和SPEI_PM之间存在着一定的差异,因此有必要把两个结果进行对比,以寻求其内在原因。图8a是Thornthwaite和Penman-Monteith公式计算得到的中国区域平均潜在蒸散发(PET_TH和PET_PM)的季节循环变化曲线。可以看到,两种

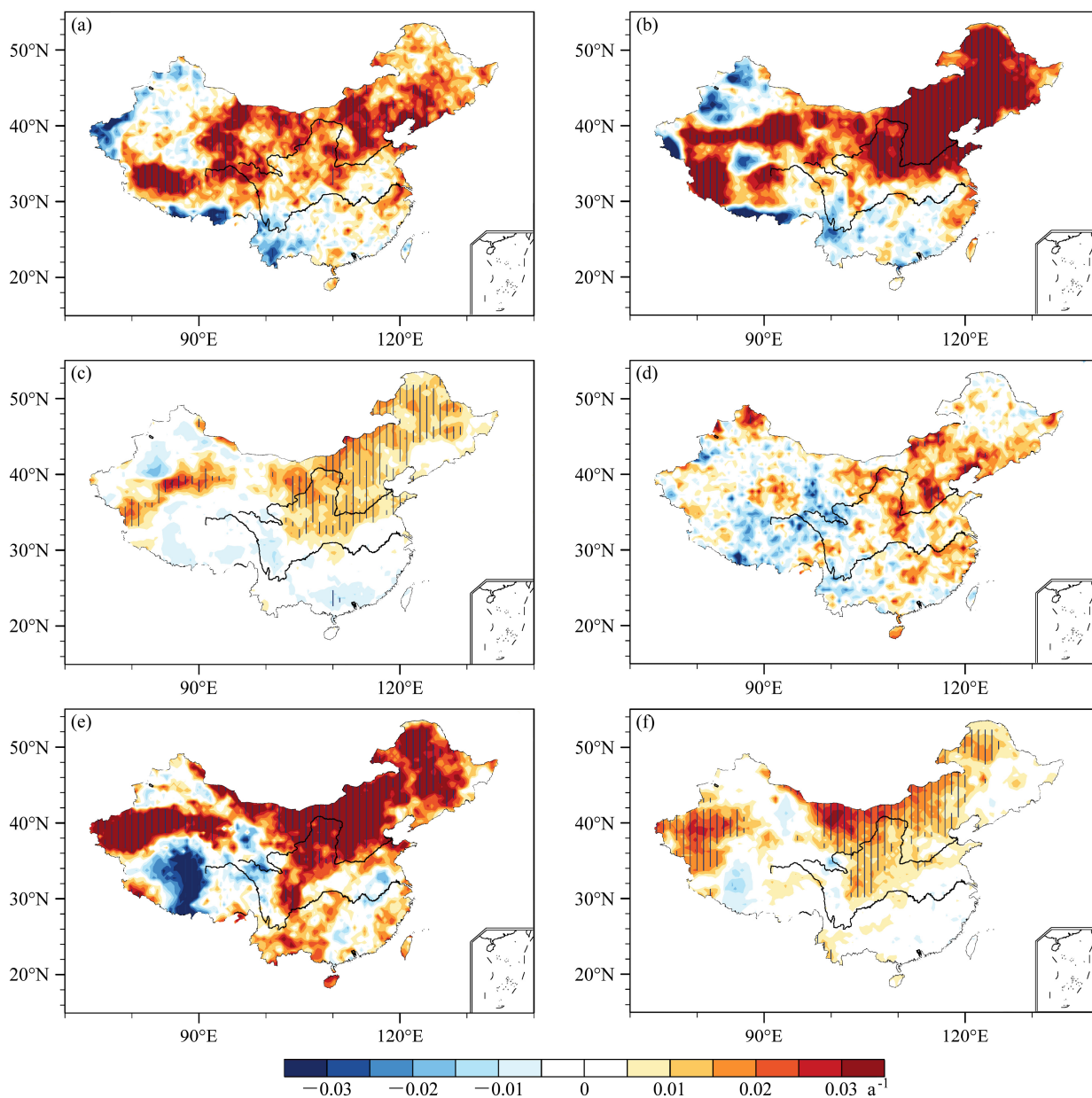


图6 1949~2008年(a, b, c) SPEI_PM和(d, e, f) SPEI_TH所示的中国区域年均(a, d)轻度干旱、(b, e)中等干旱和(c, f)极端干旱变化趋势分布(单位: a^{-1}), 标竖线区为通过95%信度检验的区域, 其他说明如图1

Fig. 6 The geographical distribution of the linear trend (units: a^{-1}) of annual dryness events, including (a, d) light, (b, e) moderate, and (c, f) extreme drought occurrence length, as derived from S (a, b, c) PEI_PM and (d, e, f) SPEI_TH during 1949–2008, in which the areas with the 95% confidence level are hatched, and others are the same as Fig. 1

结果间存在的差异主要是: 与 PET_PM 相比, PET_TH 在冬春季偏小, 夏季偏大, 其变化与温度变化曲线一致; PET_TH 在 7 月最大, 而 PET_PM 峰值则出现在 6 月份, 4~6 月份两者间差异达到最大。参照施晓晖和徐祥德(2006)的分区标准, 图 8b~g 是中国各地区 PET_TH 和 PET_PM 的季节循环变化图, 可见在我国东北、华北和西北等北方地区 PET_TH 与 PET_PM 结果在 4~6 月份差异(负偏

差)较大, 7~9 月份由负偏差转为正偏差, 9 月份之后转为负偏差; 在长江流域和西南地区, PET_TH 都偏小, 且在 7 月之前, 负偏差逐渐增加, 之后两者间差异减小。而在华南地区, 两者间差异与北方地区类似, 但是 PET_TH 从负偏差转为正偏差的时间为 5 月, 由正偏差转为负偏差的时间为 10 月; 相对于北方, 华南地区 PET_TH 的单峰特征更明显。

而在年际变化趋势上, 两种潜在蒸散发也存在

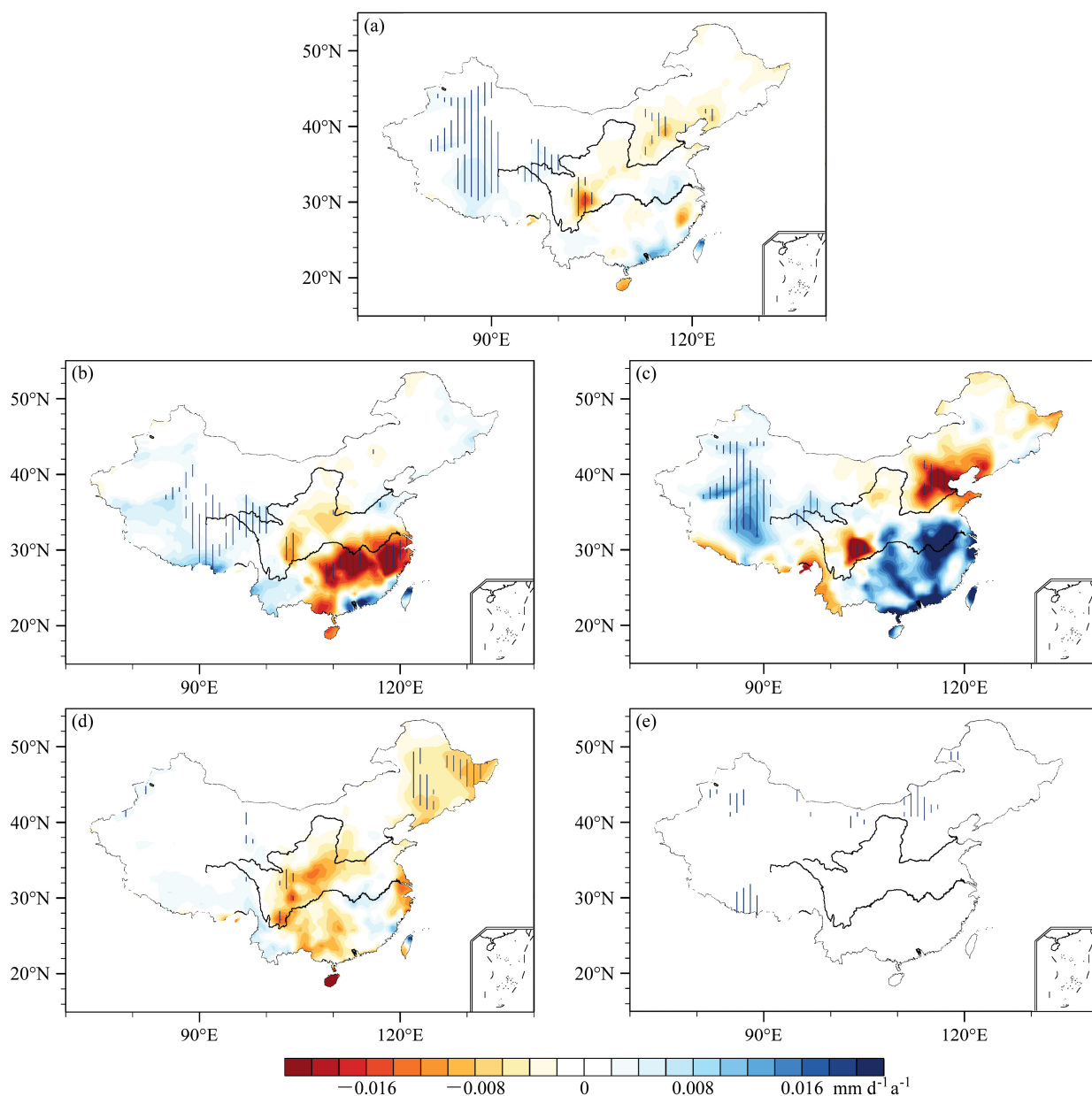


图7 1949~2008年中国区域 (a) 年、(b) 春季、(c) 夏季、(d) 秋季和冬 (e) 季降水变化趋势 (单位: $\text{mm d}^{-1} \text{a}^{-1}$), 其中标竖线区为通过 95% 信度检验的区域

Fig. 7 The geographical distribution of the linear trend of (a) annual, (b) spring, (c) summer, (d) autumn, and (e) winter precipitation over China during 1949–2008 (units: $\text{mm d}^{-1} \text{a}^{-1}$), respectively, in which the areas with the 95% confidence level are hatched

较大的差异。二者在中国区域整体上为增加趋势,但在不同地区, PET_{PM} 的增加趋势表现出与 PET_{TH} 不同的特征。在东北、华北、江淮等地区, PET_{PM} 在 1960 年代中期到 1980 年代为相对高值,这一特征对应着 SPEI_{PM} 定义的各级干旱在这一时段发生较多 (图 5a、b), 同时也对应着 SPEI_{PM} 在这一时段较大的负值区间 (图 1a), 而在 PET_{TH} 的变化趋势中并不存在这一特征。

从上面的分析结果来看, PET_{TH} 计算的潜在蒸散发要小于 PET_{PM} 结果, 这是因为计算潜在蒸散发的原理不同所致, Thorntwaite 公式仅考虑了热量因子对潜在蒸散发的贡献, 而 Penman-Monteith 公式则综合考虑了热量和空气动力两个因子。虽然热量因子对潜在蒸散发的贡献相对较高, 但随着一年四季气候条件的变化, 空气动力因子的影响也在不停变化, 进一步计算 Penman-Monteith 公式中的

辐射因子和空气动力因子的季节变化显示,从春季到夏季,辐射项是主导因子,但在秋、冬季,空气动力因子逐渐占主导地位(图 8)。在空间上,北方

地区的空气动力因子项对总潜在蒸散发的贡献大于南方。此外,我们还计算了中国各区域 1949~2008 年辐射因子和空气动力因子占全年总潜在蒸

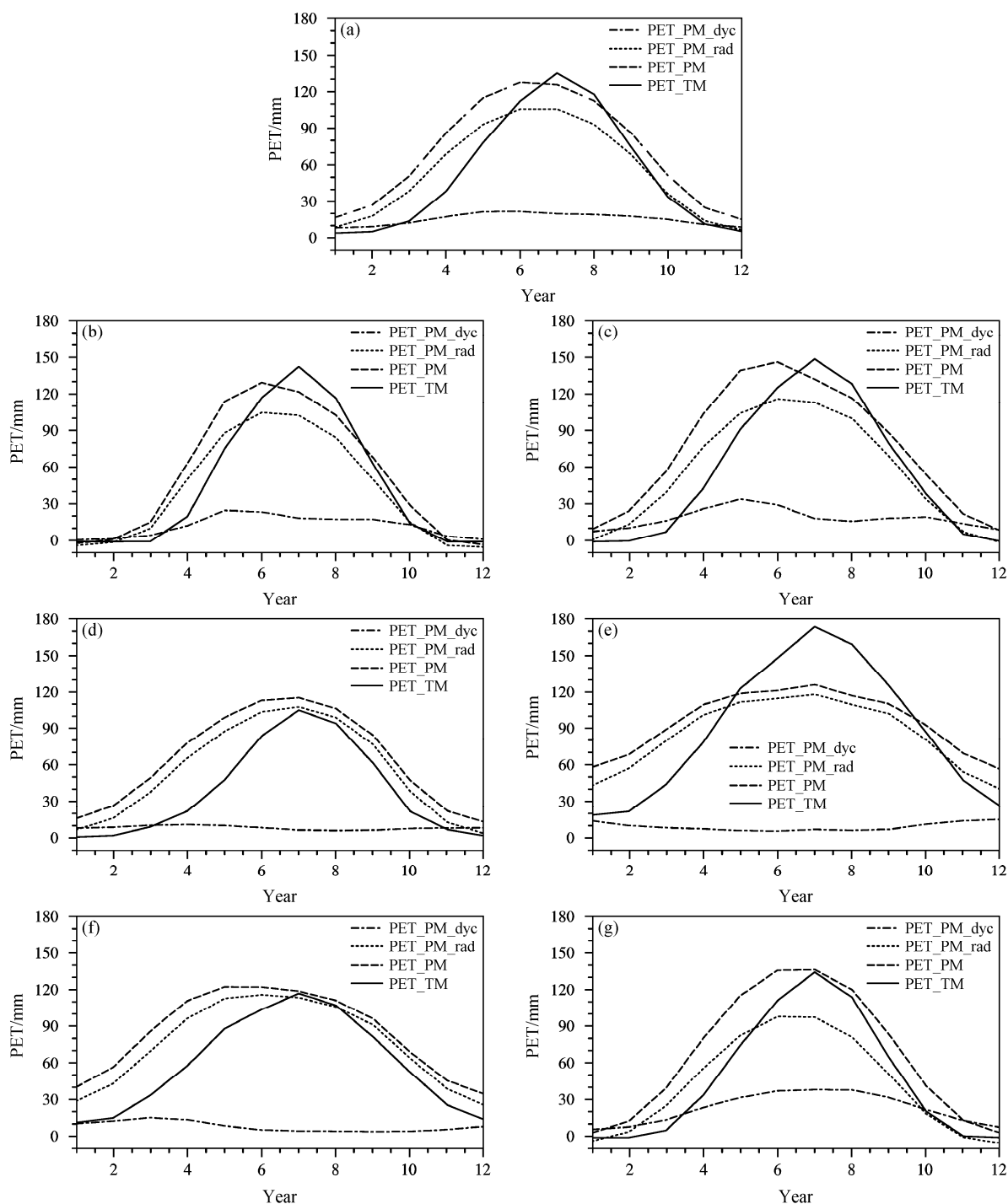


图 8 基于 Thornthwaite (PET_TH) 和 Penman-Monteith (PET_PM, PET_PM_rad 为辐射因子项, PET_PM_dyc 为空气动力因子项) 公式计算的 (a) 中国、(b) 东北、(c) 华北、(d) 江淮、(e) 华南、(f) 西南和 (g) 西北区域平均的月平均潜在蒸散发

Fig. 8 The monthly potential evapotranspiration as derived from Thornthwaite (PET_TH) and Penman-Monteith (PET_PM, PET_PM_rad and PET_PM_dyc denote radiation and aerodynamic terms, respectively) formulas for (a) China, (b) northeastern China, (c) North China, (d) Jianghuai, (e) South China, (f) southwestern China, and (g) northwestern China, respectively

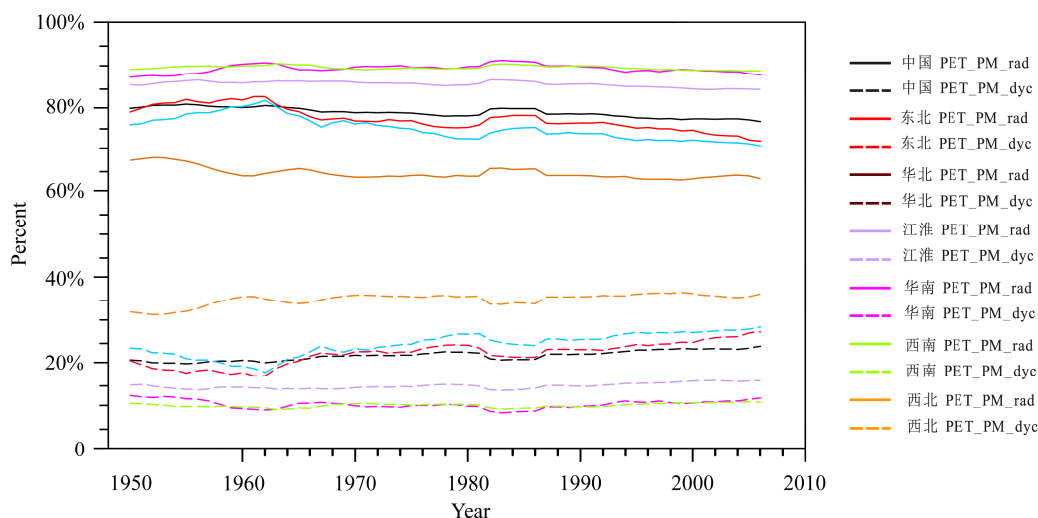


图9 Penman-Monteith 公式计算的中国、东北、华北、江淮、华南、西南和西北潜在蒸散发中的辐射因子(PET_PM_rad)和空气动力因子(PET_PM_dyc)占总潜在蒸散发的百分比

Fig. 9 The contribution of radiation (PET_PM_rad) and aerodynamic (PET_PM_dyc) terms to potential evapotranspiration in Penman-Monteith formula for China, northeastern China, North China, Jianghuai, South China, southwestern China, and northwestern China, respectively

散发百分比(图9),发现辐射项约占全年潜在蒸散发的80%,但具有明显的下降趋势(约下降了10%)。四季中,以秋季、冬季和春季下降趋势最明显,即空气动力因子的影响不断增加,特别是在北方地区。这说明在估算中国北方的潜在蒸散发时,辐射因子项和空气动力因子项的影响都不能忽视,而在南方,潜在蒸散发的决定因子只是辐射因子项。

通过以上对潜在蒸散发计算结果的比较可见,两者不管在均值和趋势上都具有明显差异, Thornthwaite 公式由于只考虑了热力作用,使其结果与 Penman-Monteith 公式相差较大;而 Penman-Monteith 公式同时考虑了热力和动力作用,其中热力作用在春、夏季起主要作用,空气动力作用在秋、冬季逐渐占主导地位。随着气候变暖,其中空气动力因子对总潜在蒸散发贡献明显增加,特别是在北方地区。

5 结论和讨论

分别利用 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 公式计算了中国区域 1948~2008 年潜在蒸散发数据,并以此计算得到标准化蒸散指数 SPEI_TH 和 SPEI_PM,进而对中国年和季节干湿变化以及各级干旱事件变化进行了分析,主要结论是:

从时间上来看,全国平均的 SPEI_TH/PM 均表现为显著下降趋势,即变干趋势。季节上,以春季

变干趋势最为显著,冬季变干趋势最不显著。空间分布上,中国区域整体表现为南涝北旱,其间以长江为界,显著变干的区域主要包括内蒙古中部、华北、东北以及四川东部地区,而长江以南地区为变湿趋势,但变湿的趋势较不显著,显著变湿的地区主要位于新疆的北部和西部。四季中,以春季干湿变化的南北对比最为突出,另外春季长江中下游地区变干趋势也很明显。

对于不同等级的干旱,中国区域整体都表现为增加趋势,其中中等干旱的增加趋势最显著;四季中,春季的增加趋势最明显。在整个时段上,1960 年代~1990 年代是轻度干旱发生最多的时段,1990 年代中后期以来是中等和极端干旱发生最多的时期。四季中,冬、春季节的轻度干旱和冬季的中等干旱发生最多的时段出现在 1960 年代~1980 年代,其他季节的各级干旱发生最多的时段则为 2000 年之后。空间分布上,各级干旱增加趋势较显著的地区对应着 SPEI_TH/PM 显著减小的区域,华北、内蒙古中部、东北地区都是各级干旱发生频繁的区域,各级干旱显著减少的地区位于新疆地区。

虽然 SPEI_TH 和 SPEI_PM 在时间演变和空间分布上具有很大的相似性,但在具体区域和季节间仍有不同。差异较大的地区主要位于新疆、云南、华南和青藏高原北部等地区;差异较大的季节是冬、春季节。

在降水量和干湿变化的对应关系上,我们发现降水量是一个地区干湿变化的主控因子,但是在某些地区和季节,干湿变化更多地受到潜在蒸散发影响。通过对比分析 Thornthwaite 和 Penman-Monteith 公式计算所得的潜在蒸散发,发现它们不管在季节循环还是年际变化趋势上都存在较大的不同,这种差异主要表现在:季节循环上,春季两者间差异最大;年际变化上,由于 Thornthwaite 公式只是温度的函数,因此 PET_TH 变化与温度变化趋势一致, Penman-Monteith 公式是温度等多气象要素的函数,使得 PET_PM 变化趋势较为复杂。造成两种 PET 计算结果存在较大差异的原因主要是: Penman-Monteith 公式除考虑了热量因子之外,同时也考虑了空气动力因子的影响,其中空气动力因子对北方的秋、冬、春季节的潜在蒸散发影响较大,而对南方地区潜在蒸散发影响普遍较小。1949~2008 年期间,空气动力因子对北方地区潜在蒸散发总的贡献约增加了 10%。鉴于 Thornthwaite 公式计算潜在蒸散发较为简单,且在夏、秋季两种 SPEI 结果差异较小,因而基于 Thornthwaite 公式的 SPEI 使用更为方便;而基于 Penman-Monteith 公式的 SPEI 则对中国冬、春季节北方地区的干湿变化有更好的刻画能力。

需要指出的是,以往研究表明 1980 年代以来西北特别是西北西部地区的暖湿化趋势被大量观测数据所证实(马柱国和符淙斌,2006;王大钧等,2006)。基于 Thornthwaite 公式的 SPEI 未能检测出这一趋势,而基于 Penman-Monteith 公式的 SPEI 则检测到了新疆西部地区的明显湿润化趋势(图 2 和 3)。因此在西北干旱区,鉴于 Thornthwaite 公式计算的 SPEI 过度夸大了温度对该区干旱的影响,因此宜谨慎使用。

致谢 感谢两位审稿人的宝贵审阅意见。

参考文献 (References)

- Abramopoulos F, Rosenzweig C, Choudhury B. 1988. Improved ground hydrology calculations for global climate models (GCMs): Soil water movement and evapotranspiration [J]. *J. Climate*, 1: 921–941.
- 白永清, 智协飞, 祁海霞, 等. 2010. 基于多尺度 SPI 的中国南方大旱监测 [J]. *气象科学*, 30 (3): 292–300. Bai Yongqing, Zhi Xiefei, Qi Haixia, et al. 2010. Severe drought monitoring in South China based on the standardized precipitation index at different scales [J]. *Scientia Meteorologica Sinica* (in Chinese), 30 (3): 292–300.
- Dai A G. 2011 Drought under global warming: A review [J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 2: 45–65.
- Guttman N B. 1998. Comparing the palmer drought index and the standardized precipitation index [J]. *Journal of the American Water Resources Association*, 34 (1): 113–121.
- Hayes M, Wilhite D A, Svoboda M, et al. 1999. Monitoring the 1996 drought using the standardized precipitation index [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 80: 429–438.
- 姜大膀, 苏明峰, 魏荣庆, 等. 2009. 新疆气候的干湿变化及其趋势预估 [J]. *大气科学*, 33 (1): 90–98. Jiang Dabang, Su Mingfeng, Wei Rongqing, et al. 2009. Variation and projection of drought and wet conditions in Xinjiang [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (1): 90–98.
- Jensen M E, Burman R D, Allen R G. 1990. Evapotranspiration and irrigation water requirements [M]. ASCE Manuals and Reports on Engineering Practice No. 70, American Society of Civil Engineers, New York, 332 pp.
- 李剑锋, 张强, 陈晓宏, 等. 2012. 基于标准降水指标的新疆干旱特征演变 [J]. *应用气象学报*, 23 (3): 322–330. Li Jianfeng, Zhang Qiang, Chen Xiaohong, et al. 2012. SPI-based drought variations in Xinjiang, China [J]. *Journal of Applied Meteorological Science* (in Chinese), 23 (3): 322–330.
- 李明星, 马柱国. 2012. 中国气候干湿变化及气候带边界演变: 以集成土壤湿度为指标 [J]. *科学通报*, 57 (28): 2740–2754. Li Mingxing, Ma Zhuguo. 2013. Soil moisture-based study of the variability of dry-wet climate and climate zones in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 58 (4): 531–544.
- 李伟光, 易雪, 侯美婷, 等. 2012. 基于标准化降水蒸散指数的中国干旱趋势研究 [J]. *中国生态学报*, 20 (5): 643–649. Li Weiguang, Yi Xue, Hou Meiting, et al. 2012. Standardized precipitation evapotranspiration index shows drought trends in China [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture* (in Chinese), 20 (5): 643–649.
- Lloyd-Hughes B, Saunders M A. 2002. A drought climatology for Europe [J]. *International Journal of Climatology*, 22: 1571–1592.
- 马柱国, 符淙斌. 2006. 1951~2004 年中国北方干旱化的基本事实 [J]. *科学通报*, 51 (20): 2429–2439. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2006. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. *Chinese Science Bulletin*, 51 (23): 2913–2925.
- 马建勇, 许吟隆, 潘婕. 2012. 基于 SPI 与相对湿度指数的 1961~2009 年东北地区 5~9 月干旱趋势分析 [J]. *气象与环境学报*, 28 (3): 90–95. Ma Jianyong, Xu Yinlong, Pan Jie. 2012. Drought tendency based on standardized precipitation index (SPI) and relative moisture index over northeast China from May to September during 1961–2009 [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 28 (3): 90–95.
- McKee T B, Doesken N J, Kleist J. 1993. The relationship of drought frequency and duration to time scales [C] // Eighth Conference on Applied Climatology. Anaheim, CA, American Meteor. Society, 179–184.
- Monteith J L. 1965. Evaporation and environment [J]. *Symposium of the Society for Experimental Biology*, 19: 205–234.
- Palmer W C. 1965. Meteorological drought [R]. U. S. Weather Bureau, Research Paper, 45: 1–58.
- Redmond K T. 2002. The depiction of drought: a commentary [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1143–1147.

- Richard R, Heim J. 2002. A review of twentieth-century drought indices used in the United States [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 83: 1149–1165.
- 施晓晖, 徐祥德. 2006. 中国大陆冬夏季气候型年代际转折的区域结构特征 [J]. *科学通报*, 51 (17): 2075–2084. Shi Xiaohui, Xu Xiangde. 2006. Regional characteristics of the interdecadal turning of winter/summer climate modes in Chinese mainland [J]. *Chinese Science Bulletin*, 52(1): 101–112.
- 石崇, 刘晓东. 2012. 1947~2006 年东半球陆地干旱化特征——基于 SPEI 数据的分析 [J]. *中国沙漠*, 32 (6): 1691–1701. Shi Chong, Liu Xiaodong. 2012. Continent drought characteristics over the eastern hemisphere from 1947 to 2006: Analyses based on the SPEI dataset [J]. *Journal of Desert Research (in Chinese)*, 32 (6): 1691–1701.
- Sheffield J, Goteti G, Wood E F. 2006. Development of a 50-yr high-resolution global dataset of meteorological forcings for land surface modeling [J]. *J. Climate*, 19: 3088–3111.
- 苏明峰, 王会军. 2006. 中国气候干湿变率与 ENSO 的关系及其稳定性 [J]. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 36 (10): 951–958. Su Mingfeng, Wang Huijun. 2007. Relationship and its instability of ENSO-Chinese variations in droughts and wet spells [J]. *Science in China Series D: Earth Sciences*, 50 (1): 145–152.
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38: 55–94.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I. 2010a. A multiscale drought index sensitive to global warming: The standardized precipitation evapotranspiration index [J]. *J. Climate*, 23: 1696–1718.
- Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I, et al. 2010b. A new global 0.5° gridded dataset (1901–2006) of a multiscale drought index: Comparison with current drought index datasets based on the palmer drought severity index [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 11: 1033–1043.
- Vicente-Serrano S M, López-Moreno J I, Lorenzo-Lacruz J, et al. 2011. The NAO impact on droughts in the Mediterranean region [J]. *Advances in Global Change Research*, 46: 23–40.
- 王大钧, 陈列, 丁裕国. 2006. 近 40 年来中国降水量、雨日变化趋势及与全球温度变化的关系 [J]. *热带气象学报*, 22 (3): 286–289. Wang Dajun, Chen Lie, Ding Yuguo. 2006. The change trend in rainfall, wet days of China in recent 40 years and the correlation between the change trend and the change of globe temperature [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 22 (3): 286–289.
- 卫捷, 陶诗言, 张庆云. 2003. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用 [J]. *地理学报*, 58 (7S): 91–99. Wei Jie, Tao Shiyun, Zhang Qingyun. 2003. Analysis of drought in northern China based on the palmer severity drought index [J]. *Acta Geographica Sinica (in Chinese)*, 58 (7S): 91–99.
- 吴佳, 高学杰. 2013. 一套格点化的中国区域逐日观测资料及与其他资料的对比 [J]. *地球物理学报*, 56 (4): 1102–1111. Wu Jia, Gao Xuejie. 2013. A gridded daily observation dataset over China region and comparison with the other datasets [J]. *Chinese Journal of Geophysics (in Chinese)*, 56 (4): 1102–1111.
- 翟盘茂, 邹旭恺. 2005. 1951~2003 年中国气温和降水变化及其对干旱的影响 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (1): 16–18. Zhai Panmao, Zou Xukai. 2005. Changes in temperature and precipitation and their impacts on drought in China during 1951–2003 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1(1): 16–18.
- 邹旭恺, 任国玉, 张强. 2010. 基于综合气象干旱指数的中国干旱变化趋势研究 [J]. *气候与环境研究*, 15 (4): 371–378. Zou Xukai, Ren Guoyu, Zhang Qiang. 2010. Drought variations in China based on a compound index of meteorological drought [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 15 (4): 371–378.