

标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价

赵静 严登华 杨志勇 胡勇 翁白莎 宫博亚

Improvement and adaptability evaluation of standardized precipitation evapotranspiration index

Zhao Jing Yan Deng-Hua Yang Zhi-Yong Hu Yong Weng Bai-Sha Gong Bo-Ya

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 049202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.049202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.049202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I4>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于信息分配和扩散理论的东北地区干旱脆弱性特征分析

[Analysis of the drought vulnerability characteristics in Northeast China based on the theory of information distribution and diffusion](#)

物理学报.2014, 63(22): 229201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.229201>

基于模式误差分布特征的中国夏季旱涝预测可信度研究

[Predictive reliability of summer precipitation in China based on error distribution of numerical model](#)

物理学报.2014, 63(14): 149202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.149202>

基于无导数优化方法的数值模式误差估计

[Numerical model error estimation by derivative-free optimization method](#)

物理学报.2014, 63(14): 149203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.149203>

国家气候中心大气环流模式冬季模式误差特征分析

[Characteristics of forecast errors in the National Climate Center atmospheric general circulation model in winter](#)

物理学报.2014, 63(9): 099202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.099202>

一级相变时的红外特征辐射--熔融结晶和蒸气冷凝或沉淀

[Infrared characteristic radiation under first order phase transitions--melt crystallization and vapor condensation or deposition](#)

物理学报.2013, 62(7): 079203 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.079203>

标准化降水蒸发指数的改进与适用性评价*

赵静¹⁾²⁾ 严登华²⁾ 杨志勇^{2)†} 胡勇³⁾ 翁白莎²⁾ 官博亚²⁾

1)(东华大学环境科学与工程学院, 上海 201620)

2)(中国水利水电科学研究院水资源研究所, 北京 100038)

3)(安徽省·淮委水利科学研究院, 合肥 230088)

(2014年8月23日收到; 2014年9月25日收到修改稿)

针对标准化降水蒸发指数中 Thornthwaite 方法对干旱区估算误差较大的问题, 采用 FAO Penman-Monteith 方法计算潜在蒸发, 改进标准化降水蒸发指数计算方法. 应用 1961—2013 年全国 541 个气象站点逐日观测资料, 从分布检验以及与标准化降水指数、Palmer 干旱指数、实测土壤湿度等常用干旱指标一致性校核等方面, 评估改进前后标准化降水蒸发指数在区域和季节上的适用性. 结果表明: 改进蒸发能力计算方法能够显著提高标准化降水蒸发指数的区域和季节适用范围, 使标准化降水蒸发指数能够应用于全国不同季节的干旱评估, 改进了干旱区标准化降水蒸发指数冬季适用性不高的不足, 改进后的标准化降水蒸发指数在年尺度及月尺度上的干旱评估能力均得到改善, 满足我国以季节性干旱为主的干旱评估需求.

关键词: 标准化降水蒸发指数, 改进, Kolmogorov-Smirnov 检验, 校核

PACS: 92.40.De, 92.70.Cp

DOI: 10.7498/aps.64.049202

1 引言

标准化降水蒸发指数^[1](standardized precipitation evapotranspiration index, SPEI)是在标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)基础上衍生出来的干旱指数, 以水分亏缺量代替单纯的降水量作为输入条件, 以 log-logistic 概率分布函数代替伽马分布函数进行拟合, 综合考虑了降水和气温两个驱动区域气候演变的主要气候因子, 通过区域内水分亏缺变化反映降水和气温对旱涝演变的影响, 可以反映不同取样频率下的干旱过程. SPEI 融合了 SPI 和 Palmer 干旱(PDSI)指数的优点, 既具有 SPI 多时间尺度的特征, 又考虑了温度变化对干旱的影响, 具有较好的应用前景^[2]. 近年来, SPEI 在我国干旱监测与机理研究中得到了广泛应用, 如文献^[3, 4]分别对我国华南及西南地区进行了干旱趋势及特征研究. 章大全等^[5]在

研究温度和降水对干旱形成的影响时发现, 全球变暖的背景下, 降水减少是中国东部干旱形成的主要因素, 相对于南方地区, 中国华北、东北及西北东部等干旱与半干旱区的干旱化进程对温度比降水变化更为敏感. 马柱国^[6]也指出, 当前北方地区的普遍增温是干旱化加剧的主要原因. 全球气候变暖背景下, 极端气候事件更加复杂多变, 统筹降水和温度等多个气象要素对我国不同气候区进行干旱评价是十分重要的研究课题^[7].

SPEI 计算中采用 Thornthwaite 方法计算潜在蒸发, 该方法输入参数少, 对数据要求低, 计算相对简单. 但是 Thornthwaite 方法主要适用于湿润地区潜在蒸发的计算^[8], 对我国广大的干旱、半干旱地区并不适用, 而干旱、半干旱地区正是我国干旱频发且广发的地区, 也是干旱评价的重点区域. Vicente-Serrano 等^[1]及庄少伟等^[9]在评价 SPEI 的适用性时, 分析了基于年尺度数据的水分亏缺量累积理论概率分布与经验概率分布的拟合

* 国家科技支撑计划(批准号: 2012BAC19B03, 2013BAC10B01)和国家自然科学基金(批准号: 51279207, 51409266)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: yangzy@iwhr.com

程度, 而没有进行基于月尺度 SPEI 的适用性评价, 无法满足我国以季节性干旱为主的干旱评估需求.

本文采用了联合国粮农组织推荐的 FAO Penman-Monteith 公式计算潜在蒸发量, 并对改进前后的 SPEI 进行分布函数拟合程度检验及与 PDSI, SPI, 土壤湿度进行校核, 评估改进后 SPEI 的时空适用性.

2 数据和方法

2.1 数据

本文以中国气象局提供的 754 个国家级气象观测站 1961—2013 年间的逐日气象资料为基础, 筛选出时间序列完整的 541 个站点, 如图 1 所示. 为检验 SPEI 评估干旱的能力, 本文应用 PDSI, SPI, 土壤湿度指数对改进前后 SPEI 进行对比分析, 其中, PDSI 数据采用马柱国根据 PDSI 的定义计算的中国区域 160 个气象台站 1951—2004 年的年 PDSI^[10-13]; 土壤湿度数据采用 1981—1999 年中国土壤数据库更新后的全国 40 个站点土壤水分旬值观测资料^[14-16]; SPI 数据采用 541 个气象站点提供的逐日降水数据计算所得.

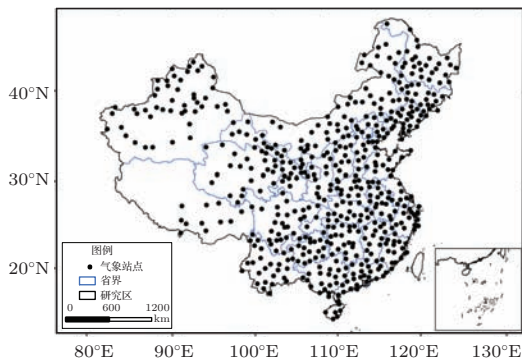


图 1 研究区及气象站点分布

2.2 方法

2.2.1 SPEI 的修正

本文主要针对 Vicente-Serrano 等^[1]提出的 SPEI 计算方法中的潜在蒸发计算模块进行改进. Vicente-Serrano 等计算潜在蒸发时, 采用基于气温的 Thornthwaite 方法进行估算, Thornthwaite 法^[8]是最初基于美国中东部地区的试验数据而提出的, 仅需要月平均气温及纬度资料, 数据容易获得. 当前, 利用 Penman-Monteith 公式计算潜在蒸

发较为普遍, 本文采用 FAO Penman-Monteith 法代替 Thornthwaite 方法计算潜在蒸发, 改进 SPEI 计算方法. (1) 和 (2) 式给出了改进前后两种计算潜在蒸发的方法, 这里不再赘述式中各参数的具体计算公式, 详见我国气象干旱等级国标^[17].

$$PET = 16K \left(\frac{10T}{I} \right)^m, \quad (1)$$

其中, PET 为 Thornthwaite 方法计算的潜在蒸发量 (mm), T 为月平均温度 ($^{\circ}\text{C}$), I 为年热量指数, K 为修正系数, $m = 6.75 \times 10^{-7}I^3 - 7.71 \times 10^{-5}I^2 + 1.79 \times 10^{-2}I + 0.492$.

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34u_2)}, \quad (2)$$

其中, ET_0 为 FAO Penman-Monteith 方法计算的潜在蒸发量 ($\text{mm}\cdot\text{d}^{-1}$), R_n 为地表净辐射 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), G 为土壤热通量 ($\text{MJ}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{d}^{-1}$), T 为日平均气温 ($^{\circ}\text{C}$), Δ 为饱和水汽压曲线斜率 ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), γ 为干湿表常数 ($\text{kPa}\cdot^{\circ}\text{C}^{-1}$), u_2 为 2 m 高处的风速 (m/s), e_s 为饱和水汽压 (kPa), e_a 为实际水汽压 (kPa).

Vicente-Serrano 等定义 SPEI 时, 先对基于不同采样频率下的累积水分亏缺序列 X 进行升序排列, 采用三参数 log-logistic 概率分布函数计算累积水分亏缺量序列的概率分布, 并对分布函数进行标准化处理, 最终获得 SPEI, 具体计算公式见文献^[1]. SPEI 干湿等级分类见表 1. 采样频率可以取为 1, 3, 6, 12, 18, 24 个月等, 即用于评价某时间尺度的旱涝事件, 某月累积水分亏缺量为前 $k-1$ 个月 (k 为时间尺度) 的水分亏缺量之和. 本文讨论 1, 3, 6, 12 个月尺度.

表 1 SPEI 干湿等级分类

等级	SPEI	类型
1	≥ 2.00	极端湿润
2	1.50—1.99	严重湿润
3	1.00—1.49	轻度湿润
4	-0.99—0.99	正常
5	-1.49—-1.00	轻度干旱
6	-1.99—-1.50	严重干旱
7	≤ -2.00	极端干旱

2.2.2 SPEI的适用性评价

SPEI的计算基于以下假设:即某一时间尺度的累积水分亏缺量序列的概率分布服从三参数log-logistic概率分布,当该时间尺度累积水分亏缺量序列的经验概率分布与概率分布一致时,认为该尺度SPEI适用于该水分亏缺量序列的评价^[9].由于SPEI反映的是某月水分亏缺量相对于历史年份当月水分亏缺量序列的分布频率,即其参考标准为历史年份同月水分亏缺量,针对SPEI计算结果是否满足以上假设须进行逐月份适用性评价,即月尺度适用性评价. Vicente-Serrano等^[1]及庄少伟等^[9]在评价SPEI的适用性时,反映的是全年水分亏缺量序列相对于历史年份水分亏缺量序列的分布频率,评价尺度为年尺度,这与SPEI的定义有所出入.

Kolmogorov-Smirnov (K-S)检验是广泛用于检验样本是否来自于同一个总体的统计方法^[18].采用K-S检验统计方法,对月尺度累积水分亏缺量序列的累积理论概率分布与经验概率分布进行一致性评价,进而实现对基于两种潜在蒸发计算方法得到的SPEI进行适用性评价.具体做法如下:首先,分别计算了改进前后SPEI水分亏缺序列的log-logistic拟合的累积理论概率分布函数,然后求得该函数和实际累积分布函数绝对差值的最大值,结合某置信水平下K-S检验的分位数,从而确定其是否通过了该显著性水平的K-S检验.本文选用置信水平为0.95进行检验,若通过,表明SPEI对应水分亏缺序列累积理论概率分布与经验概率分布一致性较好,SPEI在该地区适用,反之亦然.

3 结果与讨论

3.1 基于月尺度的SPEI适用性评价

我国是典型的季风气候国家,降水季节差异明显,干旱具有显著的季节性特征:我国华北大部、东北西部多春旱,东北西部、华北大部、西北东部及黄淮北部多夏旱,华北、黄淮、长江中下游地区及华南等地多秋旱,华南、西南则为冬旱主要发生区^[19].叶敏等^[20]根据PDSI对我国旱涝时空分布进行研究,发现20世纪80年代以来,我国夏季干旱与洪涝更加频繁,旱涝强度增加,空间上华北、西南、东北地区多干旱,华东地区多洪涝.因此,在利用SPEI对我国干旱进行评价之前,须对不同时间

尺度SPEI进行时间及空间上的适用性评价.

3.1.1 时间尺度上的适用性评价

基于1961—2013年全国541个气象站点的气象观测资料,计算不同时间尺度的SPEI,逐月进行K-S检验,统计通过0.95置信水平K-S检验的站点数.图2为不同时间尺度下改进前后SPEI逐月通过K-S检验的站点个数占全国站点总数的百分比.结果表明,3,6,12个月尺度下改进前SPEI在我国各月份均适用,98%以上站点通过了0.95置信水平的K-S检验.1个月尺度下改进前SPEI在4—10月份均适用,而在11月、12月、1月、2月、3月的适用性相对偏弱,改进前SPEI的K-S检验通过率约为85%,表明短时间尺度SPEI在我国的适用性有待提高.

对SPEI进行蒸发能力计算方法改进后,各时间尺度通过K-S检验的站点个数占全国站点总数的99%以上,且各月份K-S检验通过率均有所提升,尤其是冬季,K-S检验通过率由改进前的85%提高到99%.结果表明,改进后的SPEI显著提高了冬季短时间尺度干旱评价的适用性,使得1,3,6,12个月等不同时间尺度的SPEI在我国各个季节普遍适用.从概率分布的检验来看,改进后的SPEI在各季节和时间尺度的适用性均有明显改善.

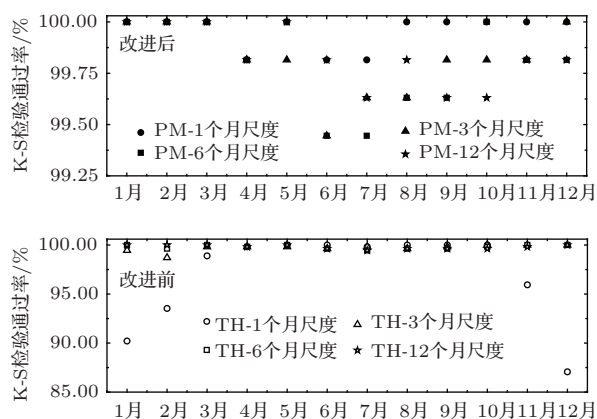


图2 1, 3, 6, 12个月尺度下改进前后SPEI逐月K-S检验结果

3.1.2 空间尺度上的适用性评价

已有研究表明,短时间尺度SPEI在干旱区适用性较差.干旱区冬季温度较低,潜在蒸发多在0值附近,且降水偏少,短时间尺度水分亏缺量在0值附近的概率分布偏高,可能导致概率异常,降低了SPEI在该区域的适用性.因此,对改进前后SPEI在空间上进行短时间尺度冬季适用性评价具

有重要意义。

分别对11月、12月、1月、2月、3月全国气象站点进行1个月尺度的SPEI K-S检验,如图3所示,除了西北干旱区外,短时间尺度SPEI在我国各个气候区均适用.在西北干旱区,改进前SPEI未通过检验的站点偏多,该区域适用性较差,采用

FAO Penman-Monteith法进行指数改进后,改进前SPEI适用性较差的干旱地区,在进行指数改进后全部通过了K-S检验,表明改进蒸发能力计算方法能够显著提高SPEI在该区域冬季的区域适用性,使SPEI能够广泛应用于冬季全国各个区域的干旱评估。

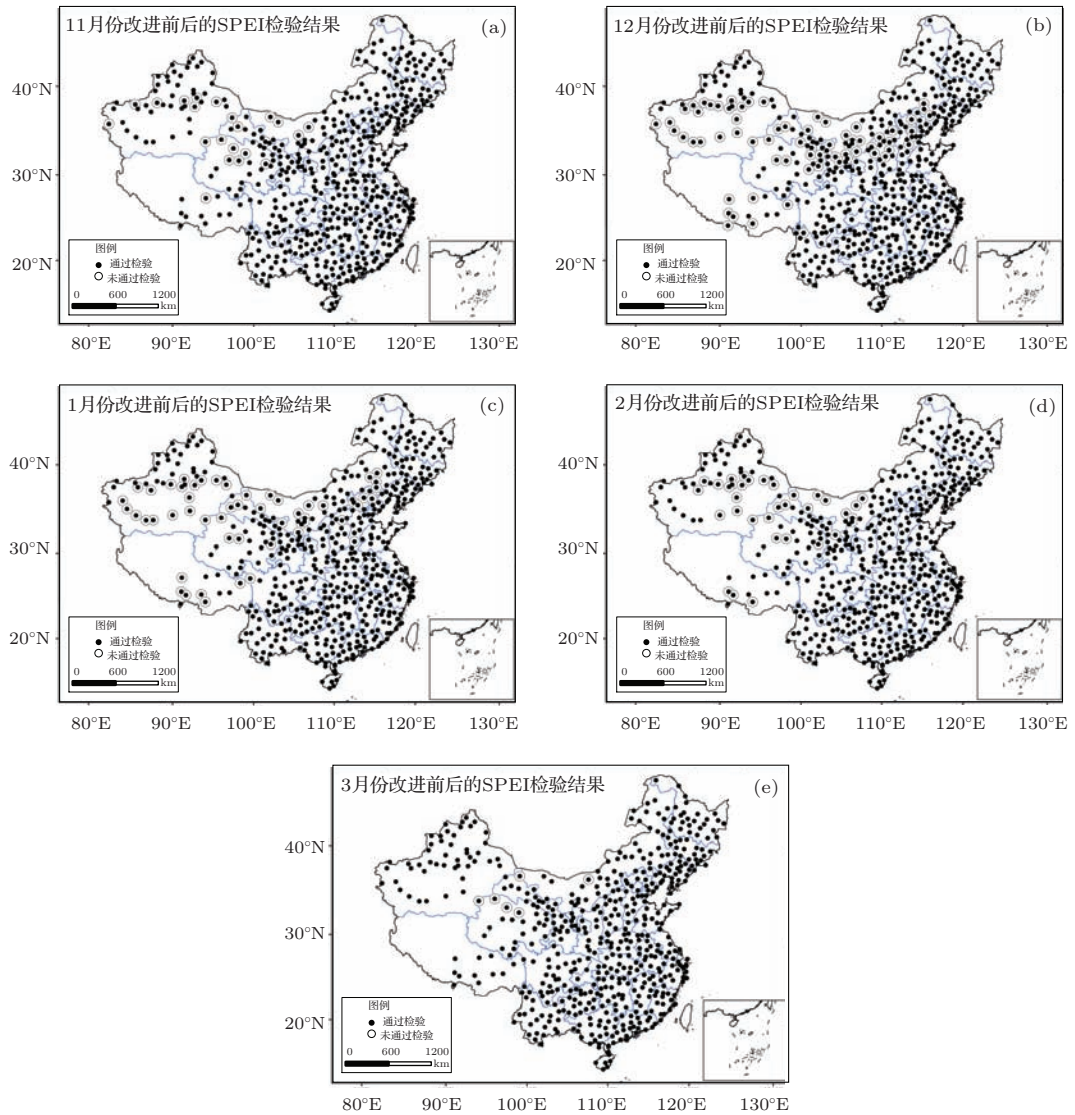


图3 1个月尺度下改进前后SPEI冬季K-S检验结果空间分布(黑色实心圆代表改进前SPEI未通过检验的站点,白色三角形代表改进SPEI后这些站点通过了检验) (a) 11月; (b) 12月; (c) 1月; (d) 2月; (e) 3月

3.2 SPEI干旱评估能力评价

3.2.1 PDSI, SPI年尺度校核

PDSI综合考虑了前期降水、水分供给、水分需求、实际蒸发量和潜在蒸发量等要素,以水平衡为基础而建立的气象干旱指数,有较好的时空差异性[21].SPI是由McKee等[22]在评估美国科罗拉多干旱状况时提出的,适用于月尺度以上干旱监测与

评估,且具有多时间尺度特征,可以很好地反映干旱持续时间和强度.不同气候区域水分亏缺量差异明显,为检验改进前后SPEI对不同气候条件下的干旱识别能力,本文选择北京、哈尔滨、乌鲁木齐、昆明4个代表站进行改进前后SPEI, PDSI和SPI指数的比较.典型站点选取原则是能代表我国不同区域的气候条件,每个气候条件下选取1个典型站点,多为省会城市.各站点具体信息见表2.

表2 典型站点基本信息

站点名称	经度/°	纬度/°	高程/m	年均降水量/mm	气候类型
北京	116.47	39.80	31.3	664	温带半湿润大陆性季风气候
乌鲁木齐	87.65	43.78	935.0	294	温带大陆性干旱气候
昆明	102.60	25.02	1892.4	1035	亚热带-高原山地季风气候
哈尔滨	126.77	45.75	142.3	569	温带大陆性季风气候

图4为代表我国不同气候区的典型站点改进前后SPEI分别与PDSI, SPI在1961—2004年干湿趋势对比。整体上看,改进后的SPEI与PDSI, SPI在1961—2004年间干湿变化趋势较为一致。不同气候区典型站点对比结果均显示,基于FAO公式改进后的SPEI与PDSI, SPI在干旱趋势的拟合程度上明显较改进前的SPEI与各指数拟合程度高,改进后的SPEI较改进前对干旱趋势的评估能力得到提高。干旱区的乌鲁木齐近年来气候有明显转湿的趋势,已有研究表明,新疆降水自1961年以来

是增多的,80年代以来尤为显著,且乌鲁木齐市是降水增加最为明显的区域[23]。改进前SPEI对乌鲁木齐的干旱评估结果显示,1961—2004年乌鲁木齐呈现湿转干的趋势,而PDSI与SPI评估结果均显示乌鲁木齐呈干转湿的趋势,改进后的SPEI评估的干湿特征恰好符合这一变化趋势,因此,改进后SPEI对乌鲁木齐市干旱评价结果与PDSI, SPI评价的干旱趋势一致,较改进前更适用于该地区的干旱评价。

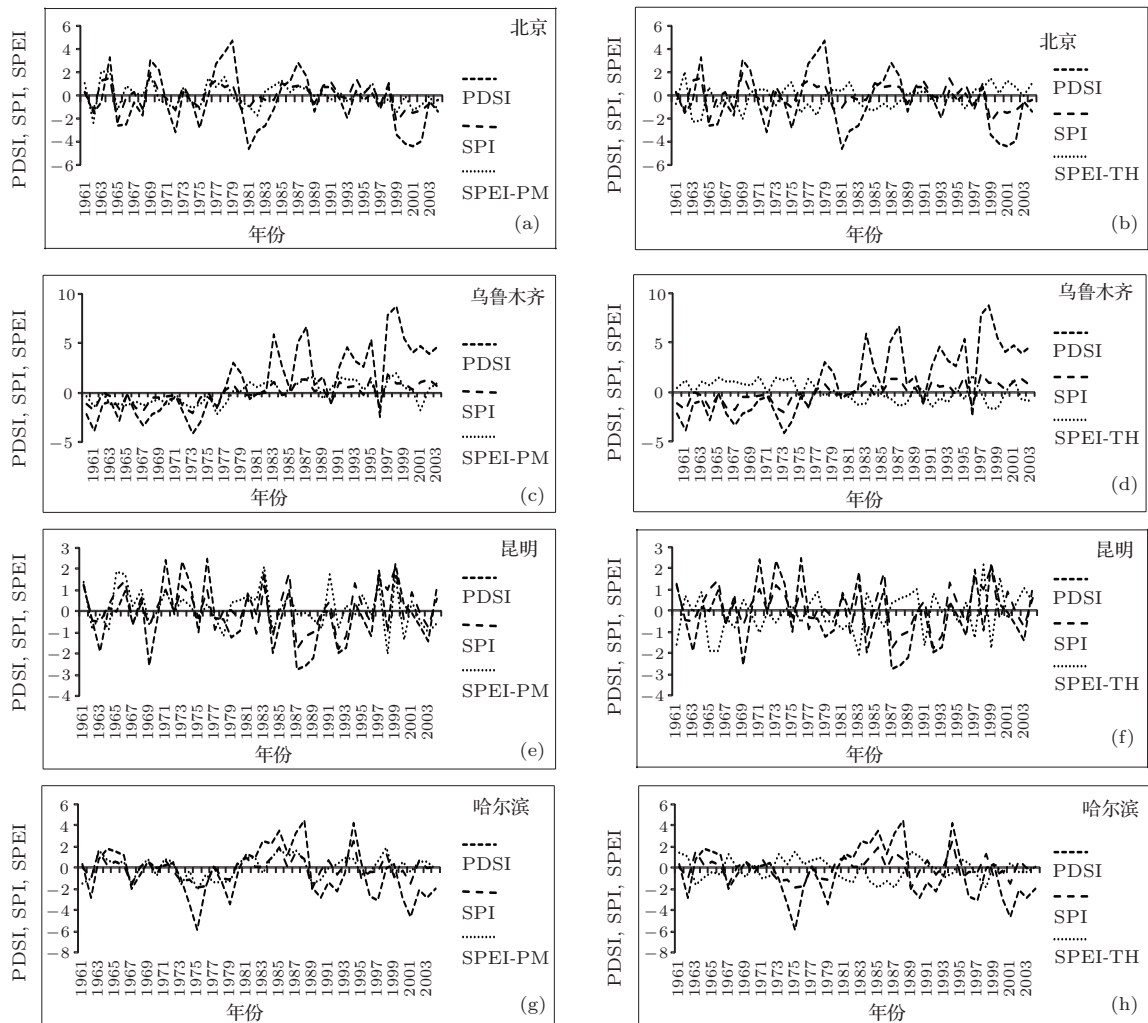


图4 典型站点12个月尺度下SPEI与PDSI, SPI校核结果(SPEI-PM表示改进后的SPEI; SPEI-TH表示改进前的SPEI) (a), (c), (e), (g)分别为北京站、乌鲁木齐站、昆明站、哈尔滨站改进后SPEI与PDSI, SPI校核结果; (b), (d), (f), (h)分别为北京站、乌鲁木齐站、昆明站和哈尔滨站改进前SPEI与PDSI, SPI校核结果

典型站点改进前后 SPEI 对干旱识别精度存在差异, 相对来说, 改进后的 SPEI 识别出的干旱年与 PDSI, SPI 两个干旱指数一致性较高. 以北京市为例, 1980—1982 年, 1999—2000 年旱灾灾情突出. 1980—1982 年干旱范围已超出北京地区, 涉及华北大部分地区. 其中北京旱情最为严重, 全市除官厅、密云、怀柔水库以外, 其余水库都干涸或降至死水位以下, 河道大多干涸, 地下水严重超采, 形成以城近郊区为中心的降落漏斗状面积扩大到 2000 多平方千米, 粮食作物受旱面积累计约 867.5 万亩 (1 亩 = 1/15 公顷). 1999, 2000 年是我国建国 52 年来最严重的连续干旱年, 官厅、密云两大水库汛期蓄水量均为建国以来最少的一年. 1999 年年降水总量比常年减少 56%, 夏季降水量比常年减少 69%, 是 1724 年有降水量记录以来夏季降水量最少的一年. 2000 年, 年降水总量比常年偏少 18%, 夏季降水比常年减少 49%, 加之持续高温近 1 个月, 地下水位下降, 有 18 万人, 22 万头牲畜出现饮水困难, 严重影响农作物生长^[24]. 1982 年和 1999 年两个重大干旱年在改进后的 SPEI 识别的干旱年序列中有所体现, SPEI 值分别为 -1.63 和 -1.41, 干旱级别均达到重旱水平. 而改进前的 SPEI 评价结果显示 1982 和 1999 年为无旱年, 干旱评估误差大.

3.2.2 土壤湿度月尺度校核

SPEI 表示一段时间内的水分亏缺较同期的变化, 水分亏缺直接反映为土壤的干湿变化, 而土壤湿度主要取决于降水和地表蒸发, 二者在机理上呈因果关系, 存在着紧密的联系. 本文采用中国土壤数据库更新后的全国 40 个站点土壤水分观测资料, 进行改进前后 SPEI 月尺度干旱评估能力的校核. 该观测资料分为 11 个土层单元, 前两个土层深度为 5 cm, 剩下土层均为 10 cm, 本文选择 11 个土层平均土壤湿度代表地表湿润度. 该数据是旬值数据, 且时间序列为 1981—1999 年. 由于部分数据丢失或缺测, 首先对该数据进行插补, 原则是采用

最相邻时间上土壤湿度平均值代替缺失的数据, 对插补后的土壤旬值数据进行平均化获取月尺度数据, 再与改进前后的 SPEI 干旱评估结果进行对比分析.

采用典型站点法对土壤湿度进行改进前后的 SPEI 校核. 站点选取原则: 尽量选择能够代表不同气候区, 且数据较为完整的地区. 经过比对筛选, 最终从 40 个代表站点中确定吐鲁番、锦州、徐州及南充 4 个典型站点, 分别代表我国西北、东北、中部及西南地区, 这些站点能很好地代表不同气候条件各区域土壤干湿情况. 由于冬季土壤湿度观测具有限制性, 数据缺失严重, 本文选择 4—10 月生长期进行对比分析. 此外, 表层土壤湿度主要取决于短时间内的水分亏缺量, 对 SPEI 进行校核时, 本文采用 1 个月尺度的 SPEI 评估结果进行对比分析.

不同气候区典型站点改进前后 SPEI 与土壤湿度在 1981—1999 年生长季逐月干湿变化趋势图及二者相关系数见图 5 和表 3. 整体上看, 各站点改进后的 SPEI 与土壤湿度生长季逐月干湿变化趋势相对一致, 改进前的 SPEI 一致性略差, 改进后的 SPEI 较改进前在月尺度干旱评估上存在优势. 表 3 显示, 除徐州外, 各气候区 SPEI 进行蒸发能力计算方法改进后, 相关系数增大, 对土壤干旱的评估能力得到提升, 但是逐月水平上 SPEI 与标准化土壤湿度相关系数并不高, 相关性相对较好的锦州和吐鲁番站, 在 0.01 显著性水平下相关系数仍不足 0.5. SPEI 表征的气象干旱与土壤湿度表征的土壤水分干旱在时间及空间上均存在差异, 不同的气候区下垫面条件不同, 人类活动方式不同. 土壤湿度一方面取决于气象条件, 另一方面受制于地形地貌等自然及人类活动条件, 土壤水分干旱与气象干旱具有差异性. 徐州为农业灌溉区, 人为干扰会导致表层土壤湿度受降水制约减小, 对温度的变化相对敏感, 可能导致该区域改进前的 SPEI 较改进后的 SPEI 对土壤干旱的评估能力高.

表 3 典型站点标准化土壤湿度与 1 个月尺度 SPEI 的相关性 (相关系数是指 Pearson 相关系数)

典型站点	改进后 SPEI 与标准化土壤湿度相关性		改进前 SPEI 与标准化土壤湿度相关性	
	相关系数	显著性水平	相关系数	显著性水平
吐鲁番	0.477	0.01	-0.098	—
锦州	0.482	0.01	-0.403	0.01
南充	0.257	0.01	-0.249	0.01
徐州	0.295	0.01	0.566	0.01

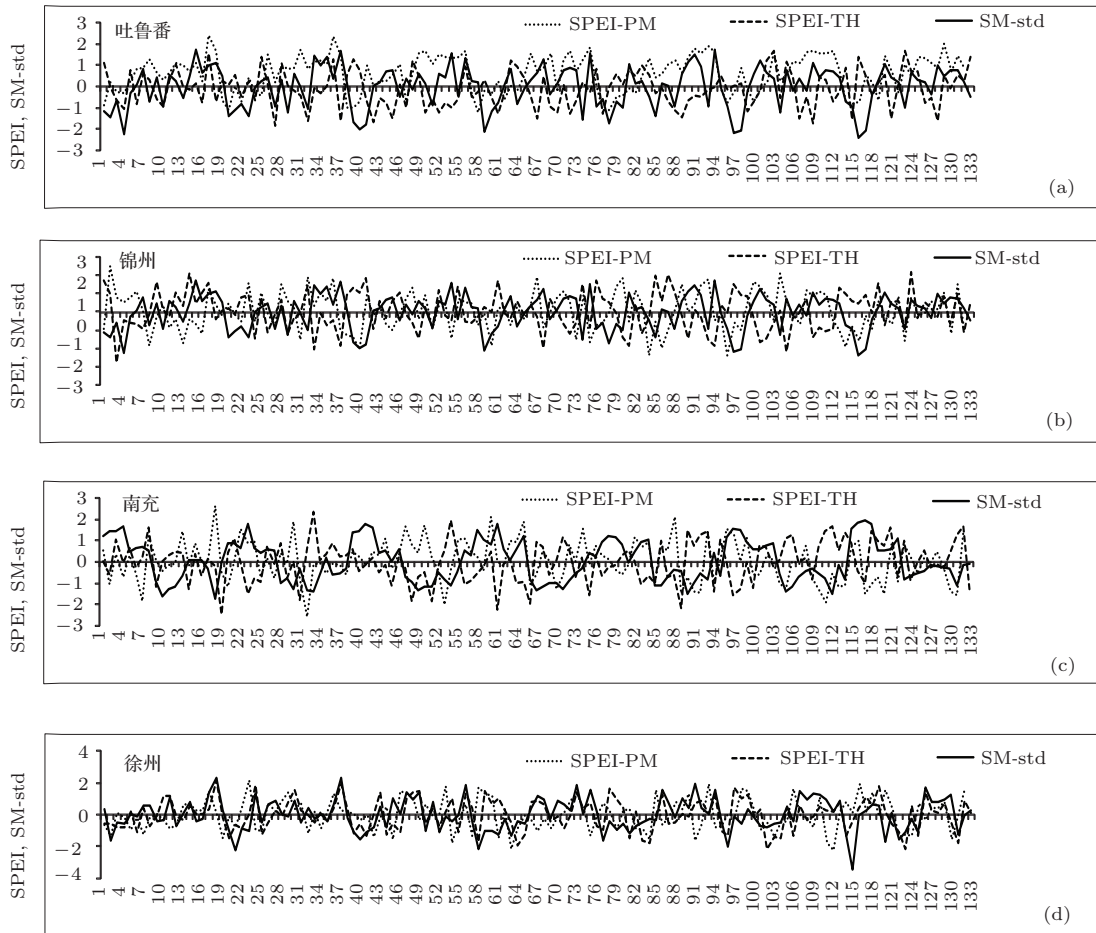


图5 典型站点1个月尺度下改进前后SPEI与标准化土壤湿度校核结果(SM-std表示标准化土壤湿度;横坐标1—19代表1981年4月—1999年4月,20—39依次代表1981年5月—1999年5月,以此类推,114—133依次代表1981年10月—1999年10月) (a)吐鲁番站;(b)锦州站;(c)南充站;(d)徐州站

4 结 论

基于FAO Penman-Monteith方法改进后的SPEI提高了干旱区冬季的适用性. Thornthwaite法计算潜在蒸发误差较大,在此基础上计算SPEI并进行干旱评价具有局限性;采用FAO Penman-Monteith方法改进潜在蒸发计算方法,综合考虑了温度、风速、相对湿度、日照时数等气象参数,潜在蒸散发计算结果更接近实际情况,计算得到的SPEI在干旱区冬季干旱的评估能力明显提高,减小了改进前短时间尺度的SPEI在区域和季节上的适用性差异,使得SPEI能够广泛应用于我国不同气候区不同时间尺度的干旱评价.

基于FAO Penman-Monteith方法改进后的SPEI较改进前提高了干旱评估能力. 不同气候区的典型站点年尺度及月尺度校核结果均显示,基于FAO Penman-Monteith方法对蒸发能力改进后,无论是年尺度还是月尺度干旱评估能力较改进前

的SPEI均有所提高,相对来说,年尺度SPEI能够很好地识别出典型干旱年,而月尺度SPEI对干旱的识别能力较弱. 改进后的SPEI弥补了传统SPEI在我国干旱区干旱评估能力弱的不足,对我国进行干旱评估时更具优越性.

参考文献

- [1] Vicente-Serrano S M, Beguería S, López-Moreno J I 2010 *J. Climate* **23** 1696
- [2] Wang L, Chen W 2014 *Plateau Meteorol.* **33** 423 (in Chinese) [王林, 陈文 2014 高原气象 **33** 423]
- [3] Li W G, Hou M T, Chen H L, Chen X M 2012 *J. Nat. Disasters* **21** 84 (in Chinese) [李伟光, 侯美亭, 陈汇林, 陈小敏 2012 自然灾害学报 **21** 84]
- [4] Xiong G J 2013 *M. S. Dissertation* (Lanzhou: Lanzhou University) (in Chinese) [熊光洁 2013 硕士学位论文 (兰州: 兰州大学)]
- [5] Zhang D Q, Zhang L, Yang J, Feng G L 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 655 (in Chinese) [章大全, 张璐, 杨杰, 封国林 2010 物理学报 **59** 655]

- [6] Ma Z G 2005 *Chin. J. Geophys.* **48** 1011 (in Chinese) [马柱国 2005 地球物理学报 **48** 1011]
- [7] Zhang D Q, Feng G L, Hu J G 2008 *Chin. Phys. B* **17** 736
- [8] Thornthwaite C W 1948 *Geog. Rev.* **38** 55
- [9] Zhuang S W, Zuo H C, Ren P C, Xiong G J, Li B D, Dong W C, Wang L Y 2013 *Climat. Environ. Res.* **18** 617 (in Chinese) [庄少伟, 左洪超, 任鹏程, 熊光洁, 李邦东, 董文成, 王利盈 2013 气候与环境研究 **18** 617]
- [10] Palmer W C 1965 *Meteorological Drought* (Washington, DC: US Department of Commerce, Weather Bureau) p58
- [11] Li X Z, Liu X D, Ma Z G 2005 *Chin. J. Arid Zone Res.* **21** 97 (in Chinese) [李新周, 刘晓东, 马柱国 2005 干旱区研究 **21** 97]
- [12] An S Q, Xing J X 1986 *J. Acad. Meteorol. Sci., S. M. A., China* **1** 75 (in Chinese) [安顺清, 邢久星 1986 气象科学研究院院刊 **1** 75]
- [13] Liu W W, An S Q, Liu G S, Guo A H 2004 *Quart. J. Appl. Meteorol.* **15** 207 (in Chinese) [刘巍巍, 安顺清, 刘庚山, 郭安红 2004 应用气象学报 **15** 207]
- [14] Entin J K 1999 *Meteorol. Soc. Japan* **77** 183
- [15] Entin J K 2000 *Geophys. Res.* **105** 11865
- [16] Srinivasan G 2000 *Geophys. Res.* **105** 26635
- [17] China Meteorological Administration 2006 GB/T20481-2006 (Beijing: China Standard Press) (in Chinese) [中国气象局 2006 GB/T20481-2006 (北京: 中国标准出版社)]
- [18] Zhu H B, He L J 2009 *J. Capital Coll. Phys. Educ.* **21** 466 (in Chinese) [朱红兵, 何丽娟 2009 首都体育学院学报 **21** 466]
- [19] Weng B S, Yan D H 2010 *Resour. Sci.* **32** 309 (in Chinese) [翁白莎, 严登华 2010 资源科学 **32** 309]
- [20] Ye M, Qian Z H, Wu Y P 2013 *Acta Phys. Sin.* **62** 139203 (in Chinese) [叶敏, 钱忠华, 吴永萍 2013 物理学报 **62** 139203]
- [21] Wang J S, Guo J Y, Zhou Y W, Yang L F 2007 *Arid Land Geog.* **30** 60 (in Chinese) [王劲松, 郭江勇, 周跃武, 杨兰芳 2007 干旱区地理 **30** 60]
- [22] McKee T B, Doesken N J, Kleist J 1995 *Ninth Conference on Applied Climatology* (Boston: Boston American Meteorological Society) p233
- [23] Hu C L 2007 *M. S. Dissertation* (Nanjing: University of Information Science and Technology) (in Chinese) [胡春丽 2007 硕士学位论文 (南京: 南京信息工程大学)]
- [24] Wen K G, Xie P 2005 *Meteorological Disasters Ceremony Chinese* (Beijing Vol.) (Beijing: China Meteorological Press) p33 (in Chinese) [温克刚, 谢璞 2005 中国气象灾害大典 (北京卷) (北京: 气象出版社) 第 33 页]

Improvement and adaptability evaluation of standardized precipitation evapotranspiration index*

Zhao Jing¹⁾²⁾ Yan Deng-Hua²⁾ Yang Zhi-Yong^{2)†} Hu Yong³⁾
Weng Bai-Sha²⁾ Gong Bo-Ya²⁾

1) (*Environmental Science and Engineering Department, Donghua University, Shanghai 201620, China*)

2) (*Water Resources Department, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*)

3) (*Anhui and Huaihe River Water Resources Research Institute, Hefei 230088, China*)

(Received 23 August 2014; revised manuscript received 25 September 2014)

Abstract

In view of the question about larger estimate error in arid areas by using the Thornthwaite method of estimating potential evaporation in the process of calculating standardized precipitation evapotranspiration index, we use the FAO Penman-Monteith method instead of Thornthwaite method to improve the method of calculating the standardized precipitation evapotranspiration index. Based on the 1961–2013 daily meteorological data offered by 541 stations of Meteorology Bureau, the distribution of test and standardized rainfall index, Palmer drought severity index and soil moisture are used to analyze the consistency with standardized rainfall evaporation index when used to evaluate drought in the applicability of area and season. Result shows that the improvement on the method of evaporation capacity calculation can significantly expand the application of standardized precipitation evapotranspiration index in area and season, making standardized precipitation evapotranspiration index applied to national drought assessment well, making up the shortcomings in the applicability of standardized precipitation evapotranspiration index in winter at a short time scale level in arid region. In addition, both yearly time scale and monthly time scale of drought assessment ability about modified standardized precipitation evapotranspiration index are improved, meeting the demand for drought assessment in our country, which is given priority to seasonal drought.

Keywords: standardized precipitation evapotranspiration index, improvement, Kolmogorov-Smirnov nonparametric test, contrast

PACS: 92.40.De, 92.70.Cp

DOI: [10.7498/aps.64.049202](https://doi.org/10.7498/aps.64.049202)

* Project supported by the National Key Technology Research and Development Program of the Ministry of Science and Technology of China (Grant Nos. 2012BAC19B03, 2013BAC10B01) and the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 51279207, 51409266).

† Corresponding author. E-mail: yangzy@iwhr.com