

李忆平,李耀辉. 气象干旱指数在中国的适应性研究进展[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 709-723, [LI Yiping, LI Yaohui. Advances in Adaptability of Meteorological Drought Indices in China[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 709-723], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0709

## 气象干旱指数在中国的适应性研究进展

李忆平, 李耀辉

(中国气象局兰州干旱气象研究所, 甘肃省干旱气候变化与减灾重点实验室,  
中国气象局干旱气候变化与减灾重点实验室, 甘肃 兰州 730020)

**摘要:**在全球变暖背景下, 中国极端干旱事件频繁发生, 其强度和范围都不断增大, 这不但给国民经济特别是农业生产等带来巨大损失, 还会造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多深远的不良影响。为进一步提高干旱监测、预测、评估和决策服务等方面的技术水平, 以气象干旱为对象, 对常用的气象干旱指标在中国的时空适应性进行了系统总结。首先, 从指数的计算原理及考虑要素的角度回顾了国内常用干旱指数及其特点, 这些指标主要分为两类: 一类是只考虑单一因子的干旱指标, 另一类是考虑多要素的干旱指标。其次, 系统归纳了这些干旱指数在我国不同区域、不同季节的适应性, 阐述了对现有干旱指数的进一步修正、改进及其应用效果, 并对影响干旱指数适应性的主要因素进行探讨。最后, 提出目前干旱研究领域存在争议的问题, 探讨今后在气象干旱监测指标及其适应性研究中应重点解决的关键科学问题及发展趋势。

**关键词:**干旱; 气象干旱指数; 监测预测; 适应性

**文章编号:**1006-7639(2017)05-0709-15 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2017)-05-0709

**中图分类号:**P463.1

**文献标志码:**A

### 引言

干旱是我国最常见的自然灾害之一, 具有发生频率高、持续时间长和影响范围广的特点。它的频繁发生和长期持续不但会给国民经济特别是农业生产等带来巨大损失, 还会造成水资源短缺、荒漠化加剧、沙尘暴频发等诸多深远的不良影响<sup>[1]</sup>。据统计, 干旱灾害占农作物总受灾面积的55%<sup>[2]</sup>。在农业气象灾害中, 旱灾是影响中国粮食生产最严重的自然灾害, 频率率占53%<sup>[3]</sup>。中国的干旱事件常常伴随着高温的出现<sup>[4]</sup>。在全球变暖的背景下, 极端天气气候事件的强度不断增大, 百年或几十年一遇的极端干旱事件频繁出现。中国干旱发生的范围不断扩大, 旱灾高发区由北方干旱半干旱地区向南方和东部湿润、半湿润地区发展<sup>[3]</sup>。近几十年干旱频率和持续时间最大的区域是华北和西南<sup>[5]</sup>, 其干旱(尤其是重度和极端干旱事件<sup>[6-7]</sup>)发生的频率、范围和强度有增大趋势<sup>[8]</sup>, 据预测这种趋势在本世纪将持续<sup>[9]</sup>。

由于干旱涉及的时空分布多样, 范围广泛, 使得单一的干旱定义很难满足各行业、各部门的需求。鉴于对干旱研究的角度和侧重点不同, 美国气象学会在总结各种干旱定义的基础上, 将干旱分成4类: 气象干旱、农业干旱、水文干旱和社会经济干旱<sup>[10]</sup>, 各类干旱之间密切相关, 同时也存在差异。干旱的类型在一定程度上反映了干旱发展的不同阶段。通常情况下大气降水的亏缺造成了气象干旱的最先出现, 随后导致土壤湿度下降造成作物减产从而产生农业干旱。与此同时, 地表和地下水资源亏缺、河流径流减少引起水文干旱, 在气象干旱结束后仍有可能持续较长时间。当气象干旱持续时间长、影响范围大时, 会出现多种干旱并存, 这将严重影响国民经济发展, 造成社会经济干旱。无论是农业干旱、水文干旱还是社会经济干旱, 从本质上讲都是气象干旱的影响结果, 都比气象干旱发生得晚, 可以通过气象干旱监测做到早期预警<sup>[11]</sup>。例如, 定量评估农业干旱对气象干旱响应的滞后时间<sup>[12]</sup>及这种关系在

收稿日期: 2017-04-13; 改回日期: 2017-07-31

基金项目: 甘肃省气象局气象科研项目“基于K指数的甘肃省干旱持续性特征研究”(2015-10)资助

作者简介: 李忆平(1981—), 硕士, 副研究员, 主要从事干旱监测预测研究。E-mail: liyiping532@163.com。

季节尺度上的差异,揭示大气环流对这种滞后效应的确切影响<sup>[13]</sup>都有助于对不同类型的干旱进行提前预警。鉴于气象干旱在各干旱类型中的基础地位,对它进行准确、有效的监测可为其他三类干旱的研究提供研究背景和参考依据,对农业生产、社会发展、环境保护具有积极意义。

干旱指标是干旱监测的基础与核心,它可以定量给出指标数值来反映干旱的严重程度和持续时间。对干旱指标的应用表明,如果干旱指标制定得客观、合理,则对干旱过程就反映准确,否则,对干旱气候进行评估时,不但有可能遗漏一些干旱过程,还有可能增加一些并非干旱的过程<sup>[14]</sup>。由于干旱成因及其影响的复杂性,很难找到一种普遍适用于各种用途的干旱指数,因此对应于不同需求的各种干旱指数得到发展。气象干旱指标可成为其他三种指标的研究背景和参考依据,具有重要的基础意义。近年来,国内外学者从不同角度发展了大量的气象干旱监测指数。目前,已有大约 100 种干旱监测指数<sup>[11]</sup>。据世界气象组织统计,常用的气象干旱指数达 55 种之多,如降水距平百分率( $P_a$ )、Palmer 干旱指数(Palmer drought severity index, PDSI)、标准化降水指数(standardized precipitation index, SPI)、相对湿度指数、综合气象干旱指数(compound index, CI)、Z 指数和连续无雨日数等<sup>[15]</sup>。

对于气象干旱指数,国内学者在 20 世纪末就开始对它们进行总结,但由于此时干旱指标的发展还处在中早期阶段,数量并不多,并且对气象干旱指标和干旱气候分区指标的区分也不是很明确,因此,这一时期的综述性文章提及的指标数量相对较少,总结分析也并不全面<sup>[16-17]</sup>。本世纪以来,随着干旱监测技术手段及资料来源的不断丰富和发展,气象干旱指标的数量和应用都得到快速发展。在此背景下,部分学者对气象干旱指标在干旱监测预测方面的研究进展进行了回顾和总结<sup>[1,11,14-15,18-23]</sup>,并对常用气象干旱指标的计算原理及优缺点从理论上进行了评述和归纳。

实际应用过程中,哪些指数应该在干旱半干旱区使用?哪些更适用于湿润区?理论上认为适用于某一区域的干旱指数是否经过了实际的应用和对比验证?这些验证结果是否与理论相一致?最重要的是,如何根据具体的区域、气候和时段来选择最有效的气象干旱指标?目前为止,对于各指标的时空适应性还没有系统的总结和归纳,这使得很多科研和业务人员在选择干旱指标时比较盲目,很难达到预期的监测效果。实际上,由于干旱自身的复杂性

和对社会影响的广泛性,干旱指标都是建立在特定的地域和时间范围内,有其相应的时空尺度。更重要的是,我国地域广阔、地形地貌复杂多样,并且地处季风区,不同区域、不同时段的气候特征差异较大,再加上各干旱指标的考虑要素和计算原理各不相同,因此,气象干旱指数存在明显的时空适应性差异。若简单采用单一指数来监测区域干旱事件,结果有可能与实际情况大相径庭。因此,如何针对不同区域、不同时段选取最合适的监测指标,对于及时、准确地评估区域干旱对农作物生长的影响,实现水资源合理调度和有效抗旱减灾决策都具有重要指导意义。

## 1 常用干旱指数及其特点

气象干旱是指某时段降水明显低于气候平均值,从而导致水分支出大于水分收入的水分短缺现象。气象干旱指标是利用气象要素根据一定的原理计算数值来监测和评价某区域某时段内的水分亏欠程度。

### 1.1 只考虑单一降水因子的干旱指标

降水持续偏少是气象干旱最主要的特征,因此,许多常用的干旱指数都以降水量为唯一考虑要素使用不同原理计算得到。降水强度和降水时次、无降水和少降水的持续时间是主要考虑因素。目前国内常用的指标有降水距平百分率( $P_a$ )、标准化降水指数(SPI)<sup>[24]</sup>、Z 指数<sup>[23]</sup>、GEVI 指数<sup>[25]</sup>、SAPI 指数<sup>[26]</sup>等。

降水距平百分率( $P_a$ )是表征某时段降水量较常年值偏多或偏少的指标之一,能直观反映降水异常引起的干旱,在气象日常业务中多用于评估月、季、年发生的干旱事件。降水量距平百分率等级适合应用于半湿润、半干旱地区平均气温高于 10 ℃ 的时间段<sup>[24]</sup>。其优点是意义明确、计算方法简单,但其响应慢、敏感性低,反映的旱涝程度较弱,而且该指标未考虑蒸发和下垫面状况。此外,该方法假设降水量服从正态分布,实际上多年平均值一般并不是降水量长期序列的中位数,其计算的时间长度一般为近 30 a(例如目前使用的时间长度是 1981—2010 年),对于平均值的计算结果本身来说,这一计算方法合理,但由于降水量时空分布的差异,降水量偏离正常值不同距离的出现频率以及不同地区降水量偏离正常值的距离大小难以相互比较。

降水量一般不是正态分布,而是一种偏态分布。在进行降水分析和干旱监测、评估中,常常假定降水量符合某种偏态概率分布函数,然后做标准化变换

得到干旱指数,这类指数主要有 SPI、Z、GEVI 指数,其优点是能够适用于任意时间尺度,对干旱的反映较灵敏。MEKKEE 等<sup>[27]</sup>发展的标准化降水指数(SPI)采用分布概率来描述降水量的变化<sup>[24]</sup>,是表征某时段降水量出现的概率多少的指标之一,该指标适合于月以上尺度相对于当地气候状况的干旱监测与评估。SPI 指数是国际上最常用的干旱指数之一,主要包括 3 个月、6 个月、12 个月和 24 个月尺度等<sup>[28-44]</sup>,相对于所选时段的不同,它可反映不同时间尺度的干旱。Z 指数假设降水量服从概率密度函数 Person - III 分布,然后将降水量转化为以 Z 为变量的标准正态分布,用以表征旱涝程度<sup>[45]</sup>。该指标计算较为简便且意义明确,而且比  $P_a$  更符合实际情况。由于这种指数是对不服从正态分布的变量经过正态化处理以后得到,因而对于降水时空分布不均匀的我国北部和西北地区可使用。值得注意的是,Z 指数在描述旱涝程度时需要针对不同地区进行修正<sup>[23]</sup>。

GEVI 指数由王澄海等<sup>[25]</sup>在 2012 年提出,它假设降水服从广义极值分布函数(GEV),再对其参数进行确定而建立干旱指数,它可以较好地分辨季节尺度的干旱事件。GEVI 指数在我国西北地区<sup>[46]</sup>、西南华南<sup>[47]</sup>、江苏苏北<sup>[48]</sup>都进行了应用。

标准化前期降水指数 SAPI(standard antecedent precipitation index)于 2012 年由王春林等<sup>[26]</sup>提出,是逐日气象干旱指数,与基于等权累积的  $P_a$ 、M、SPI 及 CI 等指标相比,SAPI 对当日降水的敏感性相对提高,其优点是考虑了干旱累积效应,加入了衰减系数,克服了不合理旱情加剧的问题。

以上这些指标大多数都是考虑某个时段的累积雨量距平,依此来确定干旱的发生和等级。事实上,由于降水时空分布的不均匀性,雨量偏多的季节仍可能出现严重干旱,这是因为有较长连续无降水时段的存在;而如果降水的时空分布比较均匀,则雨量偏少的年份也可能无旱灾发生,因而大多数干旱指数在干旱时空分布特征分析上存在一定的局限性。降水平均等待时间指数(AWTP)克服了这一问题,它不仅考虑无降水日(干日,指日雨量  $< 0.1 \text{ mm}$ )的总天数,而且也考虑雨日(日雨量  $\geq 0.1 \text{ mm}$ )随时间的分布情况,能较好地反映某时段里持续干期长度以及它们在整个时间序列中分布的综合影响,可以衡量干期平均的长短对灾情的影响<sup>[49]</sup>。

连续无有效降水日数是指降水量小于有效降水临界值的持续天数,该指标综合了降水量和降水日数双重因素。但由于它更多的关注无(有效)降水

的持续日数带来的干旱影响,对降水量的大小考虑较少,特别是干旱发生前期降水的多少对后期保水抗旱影响较大,会影响无降水的持续天数发生干旱的阈值。因此,当干旱持续越长、干旱强度越重、前期降水量影响越小时,本指标更接近干旱实际情况<sup>[50]</sup>。

降水量指标的优点在于方法简单明了、资料容易获取、意义明确,但是该类指标仅考虑了单一的降水量因子,没考虑作物、下垫面及其他相关因素的影响。考虑到降水时空分布的不均匀性,降水量指标只能大致反映干旱发生的趋势,不能准确反映某一段时间小范围内的干旱程度,也不能直接表征作物遭受干旱的影响程度。同时,由于降水时空结构复杂、局地性强且预报困难,所以降水量指标难以在大尺度上使用,实际应用中还存在一定的局限性。

## 1.2 考虑多要素的干旱指标

在判断是否出现干旱的问题上,多要素的气象干旱指标除了考虑干旱的主要影响因子——“降水”以外,还考虑蒸发、气温等其他因素,因而更加全面准确。这类指数大多以降水量和蒸发之间的不同组合来反映水分收支状况,例如:标准化降水蒸散发指数(SPEI)<sup>[51]</sup>、相对湿润度指数(MI)<sup>[24]</sup>、帕默尔干旱指数(PDSI)<sup>[24]</sup>、综合气象干旱指数(CI)<sup>[24]</sup>、湿润指数<sup>[1]</sup>、K 指数<sup>[52]</sup>、干燥度指数<sup>[1]</sup>、降水-温度均一化指数<sup>[53]</sup>。

标准化降水蒸散发指数(SPEI)是 2010 年在 SPI 指数的基础上提出的。它以月水分亏缺量(即月降水量与月潜在蒸发量之差)代替 SPI 指数中的月降水量,拥有多尺度特征和能够衡量温度变化对干旱影响的双重优点。在计算上,SPEI 与 SPI 指数相类似,但是多考虑了温度的因素,引入地表蒸发变化的影响,对全球气温快速上升导致干旱化反映更加敏感。在全球变暖背景下,只有自适应 PDSI(self-calibrating Palmer drought severity index,简称为 SC-PDSI)和 SPEI 指数识别出干旱的加剧与蒸发需要更多的水分有关系。相对于 SC-PDSI 指数,SPEI 指数有多尺度的优点,不仅能监测干旱是否发生,而且可以反映多个时间尺度的持续时间要素,这点对于干旱的分析与监测至关重要,不失为一个理想的干旱指数<sup>[54]</sup>。相对湿润度指数(MI)考虑的是降水量与可能蒸散量的差值与可能蒸散量之比,是表征某时段降水量与蒸发量之间平衡状况的指标之一。其等级标准反映作物生长季节的水分平衡特征,适用于作物生长季节旬以上尺度的干旱监测和评估<sup>[24]</sup>。湿润指数和干燥度指数都基于降水和蒸发量之间的比值,但互为倒数,湿润指数主要用来划分

干湿区域和分析区域干湿变化趋势<sup>[55-63]</sup>。这种指标考虑了下垫面条件,但指标中的蒸发能力是指在充分供水条件下的土壤蒸散量,不能反映作物的实际需水情况及土壤各时期的供水情况<sup>[1]</sup>。此外,张天峰等<sup>[64]</sup>在同时考虑降水和蒸发的基础上建立了K干旱指数,近年来其在甘肃省干旱监测业务、西北地区季节干旱的监测以及黄河流域和南方地区的干旱监测中都取得了较好的效果<sup>[47,52,64-66]</sup>,它比前两个指数的概念更精确一些,考虑的是降水变率和蒸发变率之间的比值,这一做法的优点是消除了不同变量的量纲,便于不同地区的比较。

降水-温度均一化指数与以上指数的明显区别是其假设降水偏少(多)与气温偏高(低)相联系,两者为负相关才有意义,即干旱指数的大小对应着高温少雨和低温多雨两种状态,其在西北干旱区(新疆、石羊河流域)应用效果较好<sup>[53,67]</sup>。

在考虑蒸发和气温的基础上,文献[24]将不同的干旱指数进行组合,发展了一个综合气象干旱指数(CI),它是利用近30 d(相当月尺度)和近90 d(相当季尺度)降水量标准化降水指数,以及近30 d相对湿度指数进行综合而得,该指标既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量气候异常情况,又反映短时间尺度(影响农作物)水分亏欠情况,适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估。利用前期平均气温、降水量可以滚动计算出每天综合干旱指数CI,进行干旱监测。目前国家气候中心运

用该指数对全国范围的干旱实况进行逐日滚动实时监测,业务实践效果良好。此外,近期又在CI指数的基础上不断进行修正和完善,发展了MCI指数,它改进了CI指数在局部地区监测中出现的问题,使其监测效果具有更广泛的适用性。

降水量的多少仅反映某地区一段时间内水分收入多少,不同地区或季节需水不同,干湿程度不仅取决于降水量,还与水分平衡过程的其他重要分量有关。利用水分平衡原理导出的干旱指数物理意义较为明确。1965年帕默尔对美国中西部地区多年气象资料进行分析,建立了帕默尔干旱指标(PD-SI)<sup>[68]</sup>,它表征在一段时间内,某地区实际水分供应持续地少于当地气候适宜水分供应的水分亏缺情况,是以土壤水分平衡为基础导出的干旱指标<sup>[24]</sup>。早在20世纪70年代,这一指标就引入了中国。到1980年代,随着气候变化的影响,PDSI开始得到广泛应用<sup>[69]</sup>。该指标适合旬、月以上尺度的水分盈亏监测和评估。

### 1.3 其他指数

除了以上两类指数,许多学者还发展了其他气象干旱指数,例如干旱侦测指数(RDI)<sup>[70-72]</sup>、标准化权重降水指数(SPIW)<sup>[47]</sup>、DI指数<sup>[73]</sup>、区域动态气象干旱强度指数<sup>[74]</sup>等,这些指数经过初步局地检验,也取得较好的监测效果,但是在研究和业务工作中并不常用,因此本文重点讨论以上两类常用的干旱指数,表1是常用的气象干旱指数列表。

表1 常用的气象干旱指数

Tab. 1 Characteristics of most commonly used meteorological drought indices

	降水距平百分率( $P_a$ )	标准化降水指数(SPI)	Z指数	GEVI指数
考虑因子	降水	降水	降水	降水
时间尺度	多时间尺度	月以上的多时间尺度	多时间尺度	多时间尺度
原理	表征某时段降水量较常年值偏多或偏少的状况。	采用 $\Gamma$ 分布概率来描述降水量的变化。	假设降水量服从概率密度函数Person-III分布,然后将降水量转化为以Z为变量的标准正态分布。	假设降水服从广义极值(GEV)分布函数,再对其参数进行确定建立干旱指数。
特点	优点:意义明确、计算方法简单。 缺点:(1)响应慢、敏感性低,反映的旱涝程度较弱;(2)未考虑蒸发和下垫面状况;(3)基于等权累积过程,容易出现不合理旱情加剧的问题;(4)假设降水量服从正态分布,这与很多地区的实际情况不完全相符。	是国内外最常用的干旱指数之一。 优点:具有多时间尺度,对干旱的反映较灵敏。 缺点:基于等权累积过程,容易出现不合理旱情加剧的问题。	计算简便、意义明确,对干旱的反映较灵敏。	对干旱的反映较灵敏,可以较好地分辨季节尺度的干旱事件。

表 1 (续)

	标准化前期降水指数(SAPI)	降水平均等待时间指数(AWTP)	标准化降水蒸散指数(SPEI)	
考虑因子	降水	降水	降水、蒸散	
时间尺度	日尺度	对任意一个时间长度为 $L$ 天的时间序列,都能得到一个 AW-TP 指数值。	月以上的多时间尺度	
原理	采用 SPI 的计算方法,求得前期降水指数(API)的标准化变量 SAPI。	与持续无雨时段的天数有关	与 SPI 指数相类似,但是引入了地表蒸发变化的影响。	
特点	考虑干旱累积效应,加入衰减系数,克服了不合理旱情加剧的问题。对当日降水的敏感性相对提高。	不仅考虑无降水日的总天数,而且也考虑雨日随时间的分布情况,能较好地反映某时段里持续干期长度以及它们在整个时间序列中分布的综合影响,可以衡量干期平均的长短对灾情的影响。	能够衡量温度变化对干旱的影响。不仅能监测干旱是否发生,而且可以反映多个时间尺度的持续时间要素。	
	相对湿度指数(MI)	湿润指数	干燥度指数	
考虑因子	降水、可能蒸散量	降水、蒸发	降水、蒸发	
时间尺度	作物生长季节旬以上尺度	多时间尺度	多时间尺度	
原理	降水量与可能蒸散量的差值与可能蒸散量之比	基于降水和蒸发量之间的比值	基于蒸发量和降水之间的比值	
特点	其等级标准反映作物生长季节的水分平衡特征。	与干燥度指数互为倒数,主要用来划分干湿区域及分析区域干湿变化趋势。 缺点:虽考虑了下垫面条件,但指标中的蒸发能力是指在充分供水条件下的土壤蒸散量,不能反映作物实际需水情况及土壤各时期的供水情况。	与湿润指数互为倒数,用来表征一个地区地表干湿状况。干燥度指数值越大,表明气候越干燥;反之,值越小则气候越湿润。	
	K 干旱指数	降水-温度均一化指数	综合气象干旱指数(CI)	帕默尔干旱指数(PDSI)
考虑因子	降水、蒸发	降水、气温	降水、蒸发(气温)	降水、蒸散、径流、土壤湿度
时间尺度	多时间尺度	多时间尺度	日尺度	适合旬、月尺度以上 较长时期的干旱
原理	降水变率和蒸发变率之间的比值	降水标准化变量与温度标准化变量之差	利用近 30 d 和近 90 d 的降水量标准化降水指数,以及近 30 d 相对湿润指数进行综合而得到。	基于水分平衡原理,综合考虑了实际水分亏缺量和持续时间对干旱程度的影响,并考虑到土壤上下层的含水量,是一个多因素的复杂综合干旱指数。
特点	概念精确,适用于不同地区的比较。	假设降水偏少(多)与气温偏高(低)相联系,两者为负相关才有意义。由于同时考虑了降水和温度的影响,因此对降水和温度的响应速度快。指数大小对应着高温少雨和低温多雨两种状态	是国内干旱监测业务中的常用指数之一。 优点:既反映短时间尺度(月)和长时间尺度(季)降水量气候异常情况,又反映短时间尺度水分亏欠情况,适合实时气象干旱监测和历史同期气象干旱评估。 缺点:基于等权累积过程,容易出现不合理旱情加剧的问题。	是干旱监测指数发展史上的里程碑,也是目前国内外应用最为广泛的气象干旱指标之一。 优点:(1)物理意义明确;(2)考虑了温度对干旱的影响。 缺点:(1)其权重因子是用美国中西部的站点得到的,使得该指数在全球不同的地方不具有空间可比性;(2)数据要求高,需要土壤持水量资料作为输入量;(3)计算复杂;(4)对短期干旱难以反映。

## 2 干旱指数区域适应性

大量的干旱指数计算原理和考虑要素不同,外加中国地域辽阔,气候类型多样,因此很难用一种干旱指数全面准确地监测所有地区的干旱。

### 2.1 干旱指数在不同区域的适应性

SPI、Z 和 GEVI 三个干旱指数只考虑降水因子并基于不同概率密度函数,具体来看,虽然 SPI 具有较好的稳定性,但不论是在西南地区还是中国整个区域,Z 指数的敏感性都较强,变化幅度大,尤其在极端干旱情况下,监测效果更为直观、更接近实况,计算更为简便,因此在 SPI 和 Z 指数之间推荐使用 Z 指数<sup>[45,75]</sup>。GEVI 和 SPI 指数相比,GEVI 在西北干旱半干旱区更符合实况,在干旱监测方面更为适用<sup>[46]</sup>。从计算原理来看,SPI 和 GEVI 指数都是拟合降水量分布函数,所以在一定程度上具有一致性和可替代性。但具体来看,SPI 和 GEVI 指数采取了两种不同的偏态分布,因此对干旱等级的衡量效果不尽相同。GEVI 指数假设降水量服从广义极值分布,是三种偏态分布的统一,因此在拟合降水量分布函数时更为详尽和客观。

大量的指数适应性研究都是将两类干旱指数放在一起进行对比分析。从指数的计算原理及考虑要素来看,理论上可初步认为综合考虑水分平衡的指数比只考虑降水的指数更符合实况,这一推断在实际对比分析中在中国大部分地区都得到了验证<sup>[47,54,76-82]</sup>。以下分区域阐述常用于干旱指数的适应性问题。

(1) 中国区域。SPEI 指数的计算原理是假设降水符合 Log logistic 分布,因此,使用时首先需要检验观测得到的样本序列是否符合 Log logistic 分布。分析 SPEI 指数在中国区域的适用性,发现在冬季且时间尺度小于 3 个月时,新疆南部、西藏西北部和华北至河套地区的样本不服从 Log logistic 分布,计算得到的 SPEI 值并不可靠,而在冬季且时间尺度大于 3 个月以及夏季的任何时间尺度,中国范围的样本都符合 Log logistic 分布,所得 SPEI 指数可靠。在中国区域,PDSI 指数适用于表征时间尺度大于 12 个月的长期干旱,将其与 SPEI 指数对比发现,虽然 PDSI 指数物理意义清晰,它的计算主要基于复杂的土壤水分供需模型,但 SPEI 指数的监测效果完全可以与 PDSI 相媲美,考虑到 SPEI 计算简便,而且具有多时间尺度特征,灵活性更强。因此,与 PDSI 相比 SPEI 指数在中国区域具有更好的适用性,应用前景广阔<sup>[76]</sup>。SPI、SPEI、RDI 三个指数在中国区域的适应

性研究结果表明:在湿润区,三个指数都能获得较好的监测效果,这是因为在湿润区三个指数都主要由降水来支配;在干旱区,SPI 和 RDI 比 SPEI 更适用。从指数原理来看,SPEI 和 RDI 指数都考虑了水分供给和支出(在 SPEI 中为  $P - E_p$ ,在 RDI 中为  $P/E_p$ ,其中  $E_p$  为潜在蒸发, $P$  为降水量),而 SPI 只考虑了降水因子,从这个角度上来说,前两个指数要比 SPI 指数更有优势。具体来看,RDI 指数考虑的水分收支形式是  $P/E_p$ ,这限制了其使用范围,因为在寒区或者冷季时, $E_p$  基本为 0。而 SPEI 采用的水分收支形式为  $P - E_p$ ,这使得 SPEI 在湿润区和干旱区的结果有明显区别。在干旱区, $E_p$  比  $P$  大得多, $P - E_p$  的大小主要取决于  $E_p$ ,这时 SPEI 的值由  $E_p$  主宰;在湿润区(例如南方地区), $P$  比  $E_p$  大得多,这时 SPEI 的变化主要由  $P$  来决定<sup>[83]</sup>。

(2) 南方湿润区。改进的 CI 指数和 SPEI 指数在长江中下游地区适应性都较好,但是在不同区域和不同时段略有差异。改进的 CI 在江苏和安徽省的应用效果优于 SPEI 指数,而在湖南、江西和湖北省,改进的 CI 在冷季(10 月至次年 4 月)的评估效果更好,而 SPEI 指数在暖季(5—9 月)更适用,两个指数分时段交替使用能够大幅提升监测效果<sup>[84]</sup>。在江淮流域,对比分析 Z、 $P_a$ 、SPI、CI、MI 几种指数的适应性,发现月尺度的 Z 指数应用效果最好。而月尺度的 SPI 指数在冬季吻合率较差,其余月份同 Z 指数总体相当,MI 指数效果最差<sup>[85]</sup>。CI 指数在淮河流域比  $P_a$ 、Z 指数、SPI 及 MI 具有更好的适用性,它能更好地刻画出干旱的发生发展机制,并且与土壤墒情和历史干旱灾情具有较好的相关性<sup>[80]</sup>,尤其在安徽省冬小麦生育期(10 月至次年 5 月)具有较好的适用性,这是由于 CI 指数不仅考虑了最近的降水情况,同时考虑了水分的收支情况,能够较好地表征干旱过程的发生发展机制及特征<sup>[77]</sup>。在西南及华南,修正的 CI 指数和 K 指数监测效果比其他指数(PDSI、GEVI、SPI)好。相比之下,SPI 及 GEVI 指数对干旱的累积效应考虑不够,存在监测偏轻、缓解或解除过快情况;而 PDSI 指数对干旱波动发展过程反映能力较差。修正的 CI 指数和 K 指数在各季干旱监测中表现均较好,其中,夏、秋季 K 指数优于修正的 CI 指数,冬、春季修正的 CI 指数优于 K 指数,K 指数对干旱演变过程的刻画能力最强<sup>[47]</sup>。由于西南地区夏季降水丰富而冬季降水稀少,存在明显的干湿两季,容易导致干旱指数在夏、冬季对干旱的描述不够准确,因此,考虑水分平衡的 SPEI 比 SPI 在这一区域更适用<sup>[54]</sup>。而在广东,将  $P_a$ 、MI、SPI、

SPEI 和  $Z$  指数进行对比,发现各指标之间干旱等级不一致率较高的时段主要集中在秋季 10 月、11 月和冬季 12 月及次年 1 月,考虑了蒸发的指数(MI、SPEI)比未考虑蒸发的指数( $P_a$ 、 $Z$ 、SPI)评估的干旱等级更为合理。此外,在对气温变化造成蒸发从而影响干旱等级变化的反映方面,SPEI 优于 MI。结合历史实况干旱资料,发现 SPEI 对干旱的评估更接近实际情况<sup>[81]</sup>。

(3) 华北及西北地区。在黄河流域,对比 CI、SPI、PDSI、 $P_a$  和  $K$  指数 5 种干旱指标的适应性,发现  $K$  指数和 CI 对干旱的监测结果与实际情况吻合最好,其次分别为 SPI、 $P_a$  和 PDSI。总的来说, $K$  指数在此区域的适用性最强,但以下情况除外:河南的夏、秋季以及内蒙古的冬季,建议采用 CI 的监测结果;内蒙古的夏季, $K$  和 CI 的监测结果均比较适宜,可以结合使用;山东的冬季, $K$  指数和  $P_a$  的监测结果可结合使用;山东的夏季,建议采用  $P_a$  的监测结果;而对于青海省,各个季节均建议使用 SPI 的监测结果<sup>[86]</sup>。在黄土高原,对比 SPI 和 SPEI,发现 SPEI 对于区域干旱监测较适用,因为它不仅具有多时间尺度特征,而且形式简单、对数据要求低、考虑了温度对干旱的影响<sup>[87]</sup>。在西北干旱半干旱地区的监测中,GEVI 在新疆和甘肃省都比 SPI 具有更好的监测效果<sup>[46]</sup>,而 SPEI 在西北地区东部比 SPI 更适用<sup>[88]</sup>。从西北地区的具体省份和区域来看,在青海的春夏季,MI 比 SPI 和  $Z$  指数对实际干旱事件的反映更准确,且能反映出不同地区干旱发生频率的差异<sup>[79]</sup>。对于宁夏回族自治区, $K$  指数和 CI 指数评估效果比  $P_a$  和 SPI 好。CI 指数和  $K$  指数在大部分年份都更接近实际等级,而在大部分地区, $K$  指数的绝对一致率和相对一致率均高于  $P_a$  和 SPI 指数。不仅如此,它的空、漏评估率之和也最小<sup>[82]</sup>。此外,SPEI 在这一地区对干旱的监测效果也比 SPI 好,很明显这是由于 SPEI 同时考虑了降水和蒸发的缘故<sup>[89]</sup>。在陕西省,对 PDSI、SPI 和 SPEI 三种常用指标进行比较,发现 PDSI 对干旱程度的监测效果与 12 个月尺度的 SPI 及 SPEI 类似,说明 PDSI 所隐含的固定时间尺度大约为 12 个月。此外,PDSI 与 SPEI 的相关要大于它与 SPI 的相关。总的来看,SPEI 与 PDSI、SPI 相比优势明显,它不仅考虑气温变化对干旱的影响,并且具有多尺度的特征<sup>[90]</sup>。将  $P_a$ 、MI、SPI 和 SPEI 指数在河西走廊干旱区进行评估,发现不论在年际还是季节尺度上,SPEI 的判断结果都与实际情况最为接近,报错率最小。从干旱等级来看,MI 在降水更加稀少的干旱区适应性和可

靠性相对较差。虽然从 SPEI 指数本身来看,它在干旱区的适应性不如其他区域好,但相比其他几个指数,SPEI 的效果在河西走廊还是相对不错<sup>[78]</sup>。

由以上各区域的指数适应性分析还可看出,MI 指数虽然考虑了蒸散在干旱中的作用,但在部分湿润区和干旱半干旱区,其监测效果并不比只考虑降水因子的指数优越,这与它的计算原理密切相关。

根据干旱指数适应性的分析,发现 SPEI、CI 和  $K$  指数等考虑了蒸散的指数在中国大部分区域和大多数季节监测效果都较好,SPEI 体现出以下优点:①可进行多时间尺度分析;②考虑温度因素,引入地表蒸发变化的影响,对全球气温快速上升导致的干旱化较敏感;③计算简单,仅需要月平均降水量和气温资料,有利于大范围应用;④作为标准化指数,有利于不同时间、不同地区进行对比分析<sup>[54]</sup>。为阅读一目了然,表 2 列出了各干旱指数的适应性。

## 2.2 潜在蒸散计算方法对干旱指数区域适应性的影响

由于实际蒸发资料稀缺,且难获得,因此通常需要用经验公式计算潜在蒸发,这会导致用不同蒸散计算方法得到的指数适应性不同。实际蒸散与潜在蒸散互补原理<sup>[22,91]</sup>表明,在严重干旱情况下,潜在蒸散完全不能代替实际蒸散。此外,北方冬季大部分时段潜在蒸散都接近于 0,这种情况下诸如相对湿度指数、综合干旱指数 CI 等基于潜在蒸散而构建的干旱指数可能会出现计算结果不稳定的问题<sup>[26]</sup>。蒸发结果的差异也会导致在降水趋势一致的情况下干旱指数变化趋势的转折。

目前常用的估算潜在蒸散的方法有:Penman - Monteith 法、Hargeaves 法、Thornthwaite 法和 Mc - cloud 法。Penman - Monteith 法属于气候变量分析法,主要通过数学关系来描述蒸发和蒸腾过程中的能量平衡和质量运输,已被推荐为估算潜在蒸散的标准方法,它结合了能量平衡和质量传递方法,同时考虑阳光、空气温度、湿度和风速对蒸散量的影响,适合各种气候环境。经验估计法是基于温度的经验方法,缺点是在多数情况下其研究区域是特定的,但因其对资料要求较少、计算所需数据较易获得而被广泛使用。这类方法有 Hargreaves 法、Thornthwaite 法和 Mc - cloud 法。其中,Thornthwaite 法在温度的基础上,考虑了热量和日照时数的影响,适于各种气候环境;Hargreaves 法是以温度和太阳辐射作为基础的潜在蒸散估算方法,对原始观测资料要求较低,在资料匮乏的地区也能利用观测数据进行潜在

表2 各干旱指数的适应性  
Tab.2 Adaptability of meteorological drought indices

区域	对比的指标	适应性较好的指数	
中国	SPEI	适用:夏季、所有时间尺度、中国区域;或冬季、时间尺度大于3个月、中国区域不适用;冬季且时间尺度小于3个月时,新疆南部、西藏西北部和华北至河套地区。	
	SPEI、PDSI	SPEI(时间尺度大于等于12个月)	
	SPEI、RDI、SPI	在湿润区,SPEI、RDI、SPI都适用;在干旱区,SPI和RDI较好。	
	SPI、Z	Z	
区域	对比的指标	适应性较好的指数	
南方	长江中下游	SPEI、改进的CI	江苏和安徽:改进的CI 湖南、江西和湖北:冷季(10—4月)建议使用改进的CI; 暖季(5—9月)建议使用SPEI。
	江淮流域	CI、MI、Z、SPI、 $P_a$	冬季:Z;其余月份:Z、SPI
	淮河流域	CI、MI、Z、SPI、 $P_a$	CI
	西南及华南	修正的CI、K、PDSI、GEVI、SPI	修正的CI、K 其中,夏、秋季:K;冬、春季:修正的CI
	西南地区	SPEI、SPI	SPEI
	广东	SPEI、MI、SPI、Z、 $P_a$	SPEI
区域	对比的指标	适应性较好的指数	
华北及西北	黄河流域	CI、K、PDSI、SPI、 $P_a$	K、CI 但以下情况除外:山东的夏季,建议采用 $P_a$ ; 青海省各季节均建议使用SPI
	黄土高原	SPEI、SPI	SPEI
	西北干旱半干旱区	GEVI、SPI	GEVI
	西北地区东部	SPEI、SPI	SPEI
	青海	MI、SPI、Z	MI(春夏季)
	宁夏回族自治区	CI、K、SPI、 $P_a$	K、CI
		SPEI、SPI	SPEI
	陕西	SPEI、PDSI、SPI	SPEI
	河西走廊	SPEI、MI、SPI、 $P_a$	SPEI

蒸散量的估算,如青藏高原地区等;Mc-cloud法基于日平均气温,将潜在蒸散作为温度的指数函数,计算简便,特别适于温度变化差异大的区域,如内陆地区等。周丹等<sup>[72]</sup>评价了这4种潜在蒸散估算方法对RDI计算结果的影响,发现各种潜在蒸散量估算方法均适合在国内计算长时间和中短时间尺度的RDI,但各站的最佳潜在蒸散量估算方法则不同。Thornthwaite法整体上估算的潜在蒸散量值较高,且与Penman-Monteith法的计算结果最接近,Hargreaves法估算的数值较低。在资料欠缺而无法使用Penman-Monteith法估算潜在蒸散量的情况下,

为更好地应用RDI表征年尺度的干旱状况,沿海亚热带季风气候区建议选择Thornthwaite法,高原山地气候区和东北温带大陆性季风气候区Mc-cloud法最适合,内陆暖温带季风气候区Mc-cloud法和Hargreaves法都比较适合,Mc-cloud法较适合在内陆干旱区使用。对于短时间尺度的RDI,Mc-cloud法较适合在沿海亚热带季风气候区使用,高原山地气候区各种方法均适合,Hargreaves法较适合在东北温带大陆性季风气候区、内陆干旱区和内陆暖温带季风气候区使用。值得注意的是,要避免在个别地区使用不适合的潜在蒸散估算方法。例如在沿海



亚热带季风气候区,要避免使用 Hargreaves 法计算各种尺度的 RDI<sup>[72]</sup>。刘珂等<sup>[92]</sup>根据 Thornthwaite 和 Penman - Monteith 公式分别计算了 1948—2008 年中国区域的 SPEI,并研究两种 SPEI 结果之间的差异,发现两种 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;而使用 Thornthwaite 蒸散公式计算 SPEI 时,对气温在 0 °C 以下的蒸发不予考虑,可能会造成一定程度误差<sup>[88]</sup>。XU 等<sup>[83]</sup>研究指出:用 Thornthwaite 公式计算的 RDI 和 SPEI 夸大了干旱的程度,这是因为 Thornthwaite 方法将气温对干旱的作用夸大了。同时,RDI 的表达式  $P/E_p$  限制了它的应用,因为当潜在蒸发的数值为 0 时(例如在寒区或冬季)RDI 无法计算结果。而 SPEI 表达式中的  $P - E_p$  项使得 SPEI 在干旱区和湿润区情况不同。在干旱区,潜在蒸发比降水大, $P - E_p$  的变化主要由潜在蒸发决定,因此 SPEI 由潜在蒸发主导;相反,在湿润区,降水的数值常常比潜在蒸发大,因此 SPEI 由降水主导。

### 2.3 干旱指数的改进及其应用效果

由于干旱指数适应性的局限性,每种指标都存在自身的缺点,为了提高指数的适应性,许多研究人员对干旱指数进行了修正及改进。王劲松等<sup>[86]</sup>认为,探讨干旱指数的区域适应性问题有三个途径:一是不改变指数的计算方法和指标的阈值,通过分析各指数对某一地区干旱监测的效果,从而得到干旱指数的适应性;二是不改变指数的计算方法,但根据历史资料重新确定指标的阈值;三是构建新指数。目前,大量研究集中在对 CI 指数和 PDSI 指数的修正和改进。

鉴于 PDSI 最初是基于美国的干旱特征建立的,因此将这一指标应用到中国时,需要根据不同区域的实际情况进行修正和改进。在这些修正方案中,最突出和一致的方案是修正指标中对可能蒸散的计算公式,利用物理过程更为完整的 Penman - Monteith 公式代替 Thornthwaite 方法,以弥补后者在低于 0 °C 时对可能蒸散计算的不足。除此以外,对 PDSI 的修正还主要围绕在权重系数、土壤持水特性、建模站点个数等与区域性特征息息相关的各个方面。安顺清等<sup>[93-94]</sup>最早对 PDSI 计算方案中的权重因子进行了订正,使其更适用于我国 100°E 以东的地区;随后,刘巍巍等<sup>[95]</sup>于 2004 年根据以上修正

过的 PDSI,从可能蒸散的计算方法、土壤持水特性的进一步划分及扩展建模站点个数等三个方面对 Palmer 旱度模式在半干旱、半湿润地区的权重因子进行了进一步的修正;郭安红等<sup>[96]</sup>在以上两个修正版的基础上,为了使 Palmer 旱度模式更适用于我国北方干旱、半干旱地区,从改进表层失水模式和增加建模站点个数两个方面对 Palmer 旱度模式进行了进一步改进。除了以上对 PDSI 的系列改进工作以外,很多学者也对其进行了局地化订正。如余晓珍<sup>[97]</sup>在中国黑龙江、吉林、河北、山东、江苏、广西、新疆等 7 个省和自治区对 PDSI 进行了适用性检验,针对应用过程中发现的一些概念性和技术性问题进行了修正;杨小利等<sup>[98-100]</sup>从建模资料长度、站点密度、可能蒸散的计算、土壤田间持水量和径流计算、土壤失水模式等几个方面对 PDSI 进行了一系列修正,使其更适合在甘肃黄土高原使用;史津梅等<sup>[101]</sup>利用青海省站点资料对 PDSI 指数的持续因子和气候权重系数作了适用性修正,并在计算可能蒸散量时,采用了 FAO Penman - Monteith 修正公式;王劲松等<sup>[102-103]</sup>通过将河西内陆河径流量转化为降水量,又将潜在蒸散量的算法由桑斯威特公式改为彭曼公式,改进了 PDSI 的计算,使得该指数对河西灌溉区干旱情况的监测有所改善;蔡元刚等<sup>[104]</sup>针对四川绵阳地区,采用国际通用的彭曼 - 蒙蒂斯公式对 PDSI 中可能蒸散量的计算方法进行了修正;王文等<sup>[105]</sup>在 2004、2006 年几次修正的基础上,从 3 个方面对 Palmer 指数进行了修正:调整权重系数,减少前期旱涝对后期的影响程度,从而提高指数对干旱描述的灵敏度;选用 Penman 公式计算可能蒸散量,这与 2004 年刘巍巍修正时选用的方法一致;土壤水含量的下限值参照 2008 年的修正方案,即实际土壤水分量达到一定值时,水分不再减少,而原 PDSI 公式里是假设土壤水分完全损失掉。结果表明,修正后的 Palmer 指数在反映淮河流域的干旱强度和持续时间等方面都得到很好的改进,可以用于淮河流域干旱的监测和预警。以上对 PDSI 的各种修正方案也随后在各地区进行了应用和检验,在干旱监测分析中显示出了较好的适应性<sup>[106-110]</sup>。

近些年,随着国家气候中心对 CI 指数的推广,各省级业务和科研人员逐渐发现这一指数在使用中存在的问题,即监测结果中容易出现不合理跳跃现象。为克服此种现象,相关专家主要从两方面进行了改进。首先,最常用的方法是通过将非等权重思想引入各个分量来减少不合理跳跃次数。这种非等权重思想的实现可通过“线性递减”和“非线性递

减”两种途径来实现。赵海燕等<sup>[111]</sup>用指数衰减形式的加权降水量对综合气象干旱指数进行修正,发现修正后的综合气象干旱指数减少了干旱发展过程中的不连续加重现象,且与同期土壤湿度有更好的相关性,更接近实际干旱的演变规律,更适合在西南地区实时干旱监测业务中使用。谢五三等<sup>[112]</sup>、王春林等<sup>[113]</sup>、赵海燕等<sup>[114]</sup>采用线性递减权重方法改进 CI 指数,并对其在安徽、广东和山西等地的应用情况进行检验,发现它有效克服了 CI 指数的“不合理旱情加剧”问题,同时,在统计特征、对逐日干旱演变的监测能力以及与土壤湿度的相关性等方面,改进的 CI 指数不仅保留了原 CI 指数的优点,而且还在原指数监测效果的薄弱方面有了不同程度的提高。其次,对于干旱监测中不合理跳跃现象的另一种解决办法是将多个时间尺度的分量同时引入参与计算。李红梅等<sup>[115]</sup>通过增加变量和调整权重系数对 CI 指数进行了改进,改进的 CI 指数不仅考虑月、季度尺度有效降水和蒸发的影响,还引入 60 d 标准化降水指数,并根据季节变化对各变量系数进行调整。通过应用检验发现其克服了原 CI 指数对弱降水的骤然反应,保留了对强降水的敏感性,监测过程更符合陕西实际干旱的演变规律。此外,也有研究人员根据当地的干旱气候特点,从阈值修正的角度对 CI 指数进行本地化改进<sup>[116]</sup>,采用累积频率法重新确定各干旱等级的阈值,使 CI 指数的区域适应性得到更好的发挥。

### 3 未来的科学问题和发展方向

气候变暖引起社会各界的广泛关注,而干旱可能是以气候变暖为标志的全球变化的重要影响之一。现有的气象干旱指数种类繁多,为干旱监测提供了很多参考依据,但目前还没有任何一种气象干旱指数能够适用于所有的区域和时段。而且由于干旱发生的隐蔽性、形成的复杂性以及影响范围的广泛性,使得干旱指数的适应性问题在很大程度上影响干旱监测的准确性,同时也给干旱的监测和评估工作带来严峻挑战。基于现有气象干旱指标的研究成果及当前面临的关键科学问题,未来应该从以下几个方面进行更深入的研究。

(1) 针对不同区域、时段对干旱指数重新定义等级阈值。干旱指数的时空适应性除了受计算原理、考虑要素、蒸散计算方式的影响以外,还与指数等级阈值的定义方式有重要联系。对于干旱指数等级的划分,目前国内外大部分研究都使用累积频率法<sup>[117]</sup>。对于国内建立的指数,由于使用的累积频

率节点不同,也会导致不同的指数之间监测结果出现明显差异,这也是原理相似的干旱指数在同一地区监测效果差距较大的一个重要原因。而对于国外发展建立的一些干旱指数(例如 SPI 和 PDSI),由于其等级阈值是根据国外的干旱及气候特征确定的,将这些指数广泛应用于国内时,很多情况下并没有根据我国干旱的特征对阈值进行重新确定,使得国外监测效果较好的指数在我国部分地区与实况相差甚远。此外,由于我国不同地区的气候特点不一样,对同一指数在所有地区都使用统一的等级阈值也是导致指数在中国地区适应性差的原因。例如,21 世纪以来西南地区干旱事件频发,因此应该将干旱指标在这一地区的阈值百分点进行调整,与南方其他地区有所区别。鉴于以上分析,当只使用一种干旱指数时,为了增强它在中国的适应性,可以对不同气候区重新确定新的等级阈值。

(2) 关注干旱指数对旱涝急转事件的监测效果。目前对干旱指数的适应性分析基本都集中在对历史干旱过程的判断上。实际上,干旱事件的发生总是伴随降水过程在其前后。近年来,旱涝急转事件在我国越来越频繁出现,这也对干旱指标适应性的评价提出新的挑战,未来可以考虑将干旱指数对旱涝急转事件的监测效果也作为评判其适应性好坏的标准之一。

(3) 评估干旱指标所用的实况资料有待改进。评估干旱指标的监测效果时,如何确定干旱实况的真值一直是一个难点问题。目前,大多数情况下采用的是灾害大典中农作物的成灾受灾面积以及减产量,或者是干旱大典中对旱情的文字描述。实际上,农作物的受灾面积和减产量除了受干旱的影响外同时也受很多其他因素(如病虫害)影响,这些数据不能真实反映干旱的严重程度。而文献材料中对历史旱情的文字描述不仅掺杂主观因素,更重要的是无法量化,这使得干旱指数的数值和等级很难与这些文字材料相比较。因此,如何在指数的评价过程中选用合理的实况真值也是值得进一步研究的重要问题。

(4) 将干旱过程作为一个时空连续的整体进行监测。目前常用的气象干旱指数都是建立在单个站点上,缺乏空间代表性,这一问题在气象站点分布稀疏的西部和高原地区更为突出。而真实的干旱形成和发展过程是一个时空连续的整体,单个站点只能代表这一过程中的一个节点,如何精确反映干旱的时空演变过程也是气象干旱指标未来应该重点发展的方向。

(5)通过气象干旱监测为其他三类干旱提供预警信息。干旱的形成是一个缓慢的过程,各类干旱出现的时间点有很大差距。一般情况下,气象干旱最先发生,随后才会通过对土壤、作物以及径流等的影响而造成农业干旱和水文干旱。农业干旱不是出现在降水减少时,而是出现在植物根系不能获取到所需水分时。另外,在灌溉农业发达地区,农业依靠地表水或抽取地下水灌溉弥补了气象上干旱对农业的影响,但却会引起水文干旱。研究气象干旱与农业干旱、水文干旱、社会经济干旱等其他类型干旱之间的定量关系,有助于了解气象干旱对水文和农业的影响机制,在此基础上可用气象干旱监测信息对水文干旱和农业干旱进行提前预警。

(6)关注综合干旱指数在实时干旱监测业务系统中的发展。目前,我国国家级和省级的实时干旱监测业务系统都以干旱指数为主要依据。鉴于干旱指标的时空适应性,在建立干旱监测产品时不能只采用一种指标的监测结果,应综合考虑各指标的特点,建立综合气象干旱指数。值得注意的是,由于没有一个指标能适合所有的情况,所以综合干旱指数的研制只能是在不断探索和完善的过程中努力将指标的准确性不断提高。

(7)评判干旱指标好坏的标准应从多方面综合考虑。在研制干旱指标时,应综合考虑指数的理论性、实用性、时效性及可对比性等。如果一个指标只注重理论上的完整,在包含明确物理机制的基础上还全面兼顾降水、蒸散、径流、渗透以及土壤特性等因素对水分状况的影响,而不考虑要素的可收集性、指标计算的简易性及在实际监测业务中的可行性,那么这种指标只是理论上的一个框架,无法在业务中应用推广。同理,若只注重指标的简单和易操作性而忽视基本的理论基础,那指标对干旱监测的准确性就难以保证。因此,在未来建立新的干旱指标时,如何平衡理论性和实用性是干旱指标发展中面临的重要科学挑战。

(8)多种资料综合使用提高干旱指标的实用性。目前气象干旱指数的计算大多使用站点观测资料,因为这类数据不仅精度高还可以实时获取。但地面常规观测数据也存在很多难以克服的缺点,例如观测站点的分布不均,这会导致在北方、西部和高原地区的单点资料无法准确代表周围大面积范围的真实状况。此外,观测资料所提供的气象要素也十分有限,导致目前业务中使用的干旱监测指数大多比较简单。而具有深厚理论基础的干旱指数则需要较多的气象要素(如实际蒸散量等),其中一些要素

无法通过观测直接获得。近年来,随着科学技术的不断发展和逐渐成熟,数值模式和卫星遥感资料的出现可以有效弥补这些缺点,它们可以提供近乎实时的高时空分辨率数据。综合使用不同手段获得的数据计算理论性强的干旱指数,可以有效提高干旱监测能力。随着科学技术的进步,期望会有更多新的资料来源促进对干旱指数的研究。

## 4 结语

在分析常用气象干旱指数优缺点的基础上,本文系统总结了它们在中国地区的适应性,阐述了对现有干旱指数的进一步修正、改进及其应用效果,并对影响指数适应性的主要因素进行了探讨,为不同地区、不同季节的干旱指标使用提供了全面的参考。

(1)目前国内常用的气象干旱指标大致可以分为两类:只考虑单一降水因子的干旱指标和考虑多要素的干旱指标。具体包括降水距平百分率( $P_a$ )、标准化降水指数(SPI)、标准化降水蒸散发指数(SPEI)、帕默尔干旱指数(PDSI)、综合气象干旱指数(CI)、Z指数、相对湿润度指数(MI)、GEVI指数、SAPI指数、湿润指数、K指数、干燥度指数、干湿指数等。

(2)从指数的计算原理及考虑要素来看,考虑水分收支平衡的指数比只考虑降水的指数监测效果更符合实况,即SPEI、CI及K指数在全国大部分地区(特别是湿润区)的适应性最好。从区域来看,大多数指数在东部湿润区的适应性都比西北干旱、半干旱区和高原高寒地区要好。从季节来看,干旱指数在暖季比冬季更接近实况。值得注意的是,潜在蒸散计算方法对于干旱指数区域适应性有一定影响,对于需要考虑蒸散影响的干旱指数,为了避免冬季气温对潜在蒸散计算结果的影响,推荐使用Penman-Monteith公式计算蒸散量。

(3)干旱指数的区域适应性还体现在对现有干旱指数进行的修正和改进。已有研究对PDSI从不同角度进行了在中国的适应性改进。近些年,随着国家气候中心对CI指数的推广,各省级业务和科研人员逐渐发现CI指数在使用中的缺陷,因此,CI指数在各区域的本地化修正工作也有了新的进展。

最后,基于现有气象干旱指标的研究成果及当前面临的关键科学问题,探讨了今后在干旱监测指标及其适应性研究中应重点解决的问题及发展方向。

### 参考文献:

[1] 邹旭旭,张强,王有民,等. 干旱指标研究进展及中美两国国家

- 级干旱监测[J]. 气象, 2005, 31(7): 6-9.
- [2] 张庆云, 陶诗言, 彭京备. 我国灾害性天气气候事件成因机理的研究进展[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 815-825.
- [3] 周广胜. 气候变化对中国农业生产影响研究展望[J]. 气象与环境科学, 2015, 38(1): 80-94.
- [4] HE B, WANG H L, WANG Q F, et al. A quantitative assessment of the relationship between precipitation deficits and air temperature variations[J]. *Journal of Geophysical Research - Atmospheres*, 2015, 120(12): 5951-5961.
- [5] ZHANG L, ZHOU T. Drought over East Asia: a Review[J]. *Journal of Climate*, 2015, 28(8): 3375-3399.
- [6] WANG L, CHEN W, ZHOU W. Assessment of future drought in southwest China based on CMIP5 multimodel projections[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2014, 31(5): 1035-1050.
- [7] 胡实, 莫兴国, 林忠辉. 未来气候情景下我国北方地区干旱时空变化趋势[J]. 干旱区地理, 2015, 38(2): 239-248.
- [8] 尹晗, 李耀辉. 我国西南干旱研究最新进展综述[J]. 干旱气象, 2013, 31(1): 182-193.
- [9] LIN W, WEN C, WEN Z. Drought in Southwest China: A Review[J]. *atmospheric and Oceanic Science Letters*, 2015, 6(8): 339-344.
- [10] AMERICAN M S. Meteorological drought: policy statement[J]. *Bulletin of American Meteorological Society*, 1997(78): 847-849.
- [11] 张强, 张良, 崔显成, 等. 干旱监测与评价技术的发展及其科学挑战[J]. 地球科学进展, 2011, 26(7): 763-778.
- [12] WU Z, MAO Y, LI X, et al. Exploring spatiotemporal relationships among meteorological, agricultural, and hydrological droughts in Southwest China[J]. *Stochastic Environmental Research and Risk Assessment*, 2016, 30(3): 1033-1044.
- [13] HUANG S, HUANG Q, CHANG J, et al. The response of agricultural drought to meteorological drought and the influencing factors: A case study in the Wei River Basin, China[J]. *Agricultural Water Management*, 2015, 159: 45-54.
- [14] 王劲松, 郭江勇, 周跃武, 等. 干旱指标研究的进展与展望[J]. 干旱区地理, 2007, 30(1): 60-65.
- [15] 张强, 姚玉璧, 李耀辉, 等. 中国西北地区干旱气象灾害监测预警与减灾技术研究进展及其展望[J]. 地球科学进展, 2015, 30(2): 196-213.
- [16] 孙荣强. 干旱定义及其指标评述[J]. 灾害学, 1994, 9(1): 17-21.
- [17] 朱炳媛, 谢金南, 邓振镛. 西北干旱指标研究的综合评述[J]. 甘肃气象, 1998, 6(1): 37-39.
- [18] 李柏贞, 周广胜. 干旱指标研究进展[J]. 生态学报, 2014, 34(5): 1043-1052.
- [19] 王劲松, 李耀辉, 王润元, 等. 我国气象干旱研究进展评述[J]. 干旱气象, 2012, 30(4): 497-508.
- [20] 赵丽, 冯宝平, 张书花. 国内外干旱及干旱指标研究进展[J]. 江苏农业科学, 2012, 40(8): 345-348.
- [21] 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.
- [22] 袁文平, 周广胜. 干旱指标的理论分析与研究展望[J]. 地球科学进展, 2004, 19(6): 982-991.
- [23] 姚玉璧, 张存杰, 邓振镛, 等. 气象、农业干旱指标综述[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(1): 185-189.
- [24] 中国国家标准化管理委员会. 中华人民共和国国家标准: 气象干旱等级[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.
- [25] 王澄海, 王芝兰, 郭毅鹏. GEV 干旱指数及其在气象干旱预测和监测中的应用和检验[J]. 地球科学进展, 2012, 27(9): 957-968.
- [26] 王春林, 陈慧华, 唐力生, 等. 基于前期降水指数的气象干旱指标及其应用[J]. 气候变化研究进展, 2012, 8(3): 157-163.
- [27] MCKEE T, DOESKEN N, KLEIST J. The relationship of drought frequency and duration to time scales[Z]. Eighth Conference on Applied Climatology, Anaheim, California, 1993: 17-22.
- [28] LOGAN K E, BRUNSELL N A, JONES A R, et al. Assessing spatiotemporal variability of drought in the US central plains[J]. *Journal of Arid Environments*, 2010, 74(2): 247-255.
- [29] SANTOS J F, PUTIDO - CALVO I, PORTELA M M. Spatial and temporal variability of droughts in Portugal[J]. *Water Resources Research*, 2010, 46(3): 742-750.
- [30] KARAVITIS C A, ALEXANDRIS S, TSESMELIS D E, et al. Application of the Standardized Precipitation Index (SPI) in Greece[J]. *Water*, 2011, 3(3): 787-805.
- [31] KUMAR M N, MURTHY C S, SAI M V R S, et al. Spatiotemporal analysis of meteorological drought variability in the Indian region using standardized precipitation index[J]. *Meteorological Applications*, 2012, 19(2): 256-264.
- [32] BONSAI B R, AIDER R, GACHON P, et al. An assessment of Canadian prairie drought: past, present, and future[J]. *Climate Dynamics*, 2013, 41(2): 501-516.
- [33] XIE H, RINGLER C, ZHU T, et al. Droughts in Pakistan: a spatiotemporal variability analysis using the Standardized Precipitation Index[J]. *Water International*, 2013, 38(5): 620-631.
- [34] GANGULI P, REDDY M J. Evaluation of trends and multivariate frequency analysis of droughts in three meteorological subdivisions of western India[J]. *International Journal of Climatology*, 2014, 34(3): 911-928.
- [35] SPINONI J, NAUMANN G, CARRAO H, et al. World drought frequency, duration, and severity for 1951-2010[J]. *International Journal of Climatology*. 2014, 34(8): 2792-2804.
- [36] LAZRI M, AMEUR S, BRUCKER J M, et al. Analysis of drought areas in northern Algeria using Markov chains[J]. *Journal of Earth System Science*, 2015, 124(1): 61-70.
- [37] KARABULUT M. Drought analysis in Antakya - Kahramanmaraş Graben, Turkey[J]. *Journal of Arid Land*, 2015, 7(6): 741-754.
- [38] ZARCH M A A, SIVAKUMAR B, SHARMA A. Droughts in a warming climate: a global assessment of Standardized precipitation index (SPI) and Reconnaissance drought index (RDI)[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 526: 183-195.
- [39] STAGGE J H, KOHN I, TALLAKSEN L M, et al. Modeling drought impact occurrence based on meteorological drought indices in Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 530: 37-50.
- [40] BONACCORSO B, PERES D J, CASTANO A, et al. SPI - Based probabilistic analysis of drought areal extent in Sicily[J]. *Water*

- Resources Management, 2015, 29(2):459-470.
- [41] IONITA M, SCHOLZ P, CHELCEA S. Assessment of droughts in Romania using the Standardized Precipitation Index[J]. Natural Hazards, 2016, 81(3):1483-1498.
- [42] BOTAI C M, BOTAI J O, DLAMINI L C, et al. Characteristics of droughts in South Africa: a Case Study of Free State and North West Provinces[J]. Water, 2016, 8(10):439.
- [43] BAUTISTA - CAPETILLO C, CARRILLO B, PICAZO G, et al. Drought assessment in Zacatecas, Mexico [J]. Water, 2016, 8(10):416.
- [44] ZHAI J, HUANG J, SU B, et al. Intensity - area - duration analysis of droughts in China 1960—2013 [J]. Climate Dynamics, 2017, 48(1/2):151-168.
- [45] 刘琳,徐宗学. 西南地区旱涝特征及其趋势预测[J]. 自然资源学报, 2014, 29(10):1792-1801.
- [46] 王芝兰,王劲松,李耀辉,等. 标准化降水指数与广义极值分布干旱指数在西北地区应用的对比分析[J]. 高原气象, 2013, 32(3):839-847.
- [47] 王素萍,王劲松,张强,等. 几种干旱指标对西南和华南区域月尺度干旱监测的适用性评价[J]. 高原气象, 2015, 34(6):1616-1624.
- [48] 龚艳冰,胡娜,刘高峰,等. 基于 GEV 干旱指数和 DFA 方法的苏北地区季节性干旱研究[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(1):140-146.
- [49] 张凌云,简茂球. AWTP 指数在广西农业干旱分析中的应用[J]. 高原气象, 2011, 30(1):133-141.
- [50] 黄晚华,隋月,杨晓光,等. 基于连续无有效降水日数指标的中国南方作物干旱时空特征[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4):125-135.
- [51] VICENTESERRANO S M, BEGUERÍA S, LÓPEZMORENO J I. A multiscalar drought index sensitive to global warming: the standardized precipitation evapotranspiration index [J]. J Climate, 2010, 23(7):1696-1718.
- [52] 王劲松,郭江勇,倾继祖. 一种 K 干旱指数在西北地区春旱分析中的应用[J]. 自然资源学报, 2007, 22(5):709-717.
- [53] 吴友均,师庆东,常顺利. 1961—2008 年新疆地区旱涝时空分布特征[J]. 高原气象, 2011, 30(2):391-396.
- [54] 熊光洁,王式功,李崇银,等. 三种干旱指数对西南地区适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(3):686-697.
- [55] 苏秀程,王磊,李奇临,等. 近 50 a 中国西南地区地表干湿状况研究[J]. 自然资源学报, 2014, 29(1):104-116.
- [56] 王允,刘普幸,曹立国,等. 基于湿润指数的 1960—2011 年中国西南地区地表干湿变化特征[J]. 自然资源学报, 2014, 29(5):830-838.
- [57] 蒋冲,王飞,穆兴民,等. 气候变化对渭河流域自然植被净初级生产力的影响研究(I):地表干湿状况时空演变特征分析[J]. 干旱区资源与环境, 2013, 27(4):30-36.
- [58] 黄亮,高苹,谢小萍,等. 全球变暖背景下中国干湿度气候带变化规律研究[J]. 气象科学, 2013, 33(5):570-576.
- [59] 赵俊芳,郭建平,徐精文,等. 基于湿润指数的中国干湿状况变化趋势[J]. 农业工程学报, 2010, 26(8):18-24.
- [60] 毛飞,唐世浩,孙涵,等. 近 46 年青藏高原干湿度气候区动态变化研究[J]. 大气科学, 2008, 32(3):499-507.
- [61] 张方敏,申双和. 中国干湿状况和干湿度气候界限变化研究[J]. 南京气象学院学报, 2008, 31(4):574-579.
- [62] YANG J P, DING Y J, CHEN R S, et al. Fluctuations of the semi - arid zone in China, and consequences for society[J]. Climatic Change, 2005, 72(1/2):171-188.
- [63] 马柱国,符淙斌. 中国北方干旱区地表湿润状况的趋势分析[J]. 气象学报, 2001, 59(6):737-746.
- [64] 张天峰,王劲松,郭江勇. 西北地区秋季干旱指数的变化特征[J]. 干旱区研究, 2007, 24(1):87-92.
- [65] 吴爱敏,郭江勇,王劲松. 中国西北地区伏期干旱指数及干旱分析[J]. 干旱区研究, 2007, 24(2):227-233.
- [66] 王劲松,任余龙,宋秀玲. K 干旱指数在甘肃省干旱监测业务中的应用[J]. 干旱气象, 2008, 26(4):75-79.
- [67] 潘莹,刘明春,胡正华,等. 石羊河流域干旱变化特征及对牧草生产的影响[J]. 干旱区资源与环境, 2014, 28(1):109-114.
- [68] PALMER W. Meteorological drought [R]. U. s. department of Commerce Weather Bureau Research Paper, 1965.
- [69] 刘庚山,郭安红,安顺清,等. 帕默尔干旱指标及其应用研究进展[J]. 自然灾害学报, 2004, 13(4):21-27.
- [70] TSAKIRIS G, VANGELIS H. Establishing a drought index incorporating evapotranspiration[J]. European Water, 2005, 10(9):3-11.
- [71] TSAKIRIS G, PANGALOU D, VANGELIS H. Regional drought assessment based on the reconnaissance drought index (RDI) [J]. Water Resources Management, 2007, 21(5):821-833.
- [72] 周丹,张勃,沈彦俊. 潜在蒸散量估算方法对干旱侦测指数计算的影响[J]. 中国农业气象, 2014, 35(3):258-267.
- [73] 王春林,陈慧华,唐力生. 广东省气象干旱图集[Z]. 北京:中国科学技术出版社, 2012.
- [74] 王学锋. 区域动态气象干旱强度指数及其应用[J]. 气象科技, 2012, 40(4):601-605.
- [75] WU H, HAYES M J, WEISS A, et al. An evaluation of the Standardized Precipitation Index, the China - Z Index and the statistical Z - Score[J]. International Journal of Climatology, 2001, 21(6):745-758.
- [76] 王林,陈文. 标准化降水蒸散指数在中国干旱监测的适用性分析[J]. 高原气象, 2014, 33(2):423-431.
- [77] 王胜,田红,张存杰,等. 安徽冬麦区 4 种干旱指数应用对比[J]. 气象科技, 2015, 43(2):295-301.
- [78] 梁丹,赵锐锋,李洁,等. 4 种干旱指标在河西走廊地区的适用性评估[J]. 中国农学通报, 2015, 31(36):194-204.
- [79] 姚瑶,张鑫,马全,等. 青海省东部农业区作物生长期不同气象干旱指标应用研究[J]. 自然灾害学报, 2014, 23(4):177-184.
- [80] 谢五三,王胜,唐为安,等. 干旱指数在淮河流域的适用性对比[J]. 应用气象学报, 2014, 25(2):176-184.
- [81] 刘占明,陈子燊,黄强,等. 7 种干旱评估指标在广东北江流域应用中的对比分析[J]. 资源科学, 2013, 35(5):1007-1015.
- [82] 王素艳,郑广芬,杨洁,等. 几种干旱评估指标在宁夏的应用对比分析[J]. 中国沙漠, 2012, 32(2):517-524.
- [83] XU K, YANG D, YANG H, et al. Spatio - temporal variation of drought in China during 1961—2012: a climatic perspective[J]. Journal of Hydrology, 2015, 526:253-264.

- [84] 王文,李亮,蔡晓军. CI 指数及 SPEI 指数在长江中下游地区的适用性分析[J]. 热带气象学报,2015,31(3):403-416.
- [85] 蔡晓军,茅海祥,王文. 多尺度干旱指数在江淮流域的适应性研究[J]. 冰川冻土,2013,35(4):978-989.
- [86] 王劲松,李忆平,任余龙,等. 多种干旱监测指标在黄河流域应用的比较[J]. 自然资源学报,2013,28(8):1337-1349.
- [87] LIU Z, WANG Y, SHAO M, et al. Spatiotemporal analysis of multiscale drought characteristics across the Loess Plateau of China[J]. Journal of Hydrology, 2016,534:281-299.
- [88] 王芝兰,李耀辉,王素萍,等. 1901—2012 年中国西北地区东部多时间尺度干旱特征[J]. 中国沙漠,2015,35(6):1666-1673.
- [89] TAN C, YANG J, LI M. Temporal - Spatial Variation of Drought Indicated by SPI and SPEI in Ningxia Hui Autonomous Region, China[J]. Atmosphere, 2015,6(10):1399-1421.
- [90] JIANG R, XIE J, HE H, et al. Use of four drought indices for evaluating drought characteristics under climate change in Shaanxi, China: 1951—2012[J]. Natural Hazards, 2015,75(3):2885-2903.
- [91] 邱新法,曾燕,缪启龙,等. 用常规气象资料计算陆面年实际蒸散量[J]. 中国科学:D 辑地球科学,2003,33(3):281-288.
- [92] 刘珂,姜大膀. 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,2015,39(1):23-36.
- [93] 安顺清,邢久星. 修正的帕默尔干旱指数及其应用[J]. 气象,1985,11(12):17-19.
- [94] 安顺清,邢久星. 帕默尔旱度模式的修正[J]. 气象科学研究院院刊,1986,1(1):75-82.
- [95] 刘巍巍,安顺清,刘庚山,等. 帕默尔旱度模式的进一步修正[J]. 应用气象学报,2004,15(2):207-216.
- [96] 郭安红,刘巍巍,安顺清,等. 基于改进失水模式和增加建模站点的 Palmer 旱度模式[J]. 应用气象学报,2008,19(4):502-506.
- [97] 余晓珍. 美国帕尔默旱度模式的修正和应用[J]. 水文,1996,(6):31-37.
- [98] 杨小利,刘庚山,杨兴国,等. 甘肃黄土高原帕尔默旱度模式的修订[J]. 干旱气象,2005,23(2):8-12.
- [99] 杨小利,杨兴国,马鹏里,等. PDSI 在甘肃中东部地区的修正和应用[J]. 地球科学进展,2005,20(9):1022-1028.
- [100] 杨小利,杨兴国. 甘肃黄土高原气象旱度模式研究[J]. 自然灾害学报,2007,16(5):30-36.
- [101] 史津梅,唐红玉,许维俊,等. 1959—2003 年青海省干湿变化分析[J]. 气候变化研究进展,2007,3(6):356-361.
- [102] 王劲松,黄玉霞,冯建英,等. 径流量 Z 指数与 Palmer 指数对河西干旱的监测[J]. 应用气象学报,2009,20(4):471-477.
- [103] WANG J S, FENG J Y, YANG L F. Runoff - denoted drought index and its relationship to the yields of spring wheat in the arid area of Hexi Corridor, Northwest China[J]. Agricultural Water Management, 2009,96(4):666-676.
- [104] 蔡元刚,王明田,周志君,等. 帕默尔旱度模式在绵阳干旱研究中的应用[J]. 高原山地气象研究,2010,30(2):55-59.
- [105] 王文,徐红. Palmer 干旱指数在淮河流域的修正及应用[J]. 地球科学进展,2012,27(1):60-67.
- [106] 卫捷,陶诗言,张庆云. Palmer 干旱指数在华北干旱分析中的应用[J]. 地理学报,2003,58(增刊1):91-99.
- [107] 李新周,刘晓东,马柱国. 近百年来全球主要干旱区的干旱化特征分析[J]. 干旱区研究,2004,21(2):97-103.
- [108] 姚玉璧,董安祥,王毅荣,等. 基于帕默尔干旱指数的中国春季区域干旱特征比较研究[J]. 干旱区地理,2007,30(1):22-29.
- [109] 韩海涛,胡文超,陈学君,等. 三种气象干旱指标的应用比较研究[J]. 干旱地区农业研究,2009,27(1):237-241.
- [110] 冯永忠,刘志超,刘强,等. 黄土高原旱作农区气候干旱时空特征分析[J]. 干旱地区农业研究,2011,29(2):218-223.
- [111] 赵海燕,高歌,张培群,等. 综合气象干旱指数修正及在西南地区的适用性[J]. 应用气象学报,2011,22(6):698-705.
- [112] 谢五三,田红,王胜. 改进的 CI 指数在安徽省应用研究[J]. 气象,2011,37(11):1402-1408.
- [113] 王春林,郭晶,薛丽芳,等. 改进的综合气象干旱指数 C<sub>new</sub> 及其适用性分析[J]. 中国农业气象,2011,32(4):621-626,631.
- [114] 赵海燕,侯美亭,刘文平,等. 干旱指数在山西逐日监测中的适用性研究[J]. 干旱气象,2014,32(4):505-515.
- [115] 李红梅,王钊,高茂盛. CI 指数的改进及其在陕西省的适用性分析[J]. 干旱地区农业研究,2015,33(3):260-266.
- [116] 王素艳,郑广芬,李欣,等. CI 综合气象干旱指数在宁夏的本地化修正及应用[J]. 干旱气象,2013,31(3):561-569.
- [117] HEIM R R J. A review of twentieth - century drought indices used in the United States[J]. Bull Amer Meteor Soc, 2002,83(8):1149-1165.

## Advances in Adaptability of Meteorological Drought Indices in China

LI Yiping, LI Yaohui

(*Institute of Arid Meteorology, China Meteorological Administration, Key Laboratory of Arid Climatic Change and Reducing Disaster of Gansu Province, Key Laboratory of Arid Climate Change and Disaster Reduction of China Meteorological Administration, Lanzhou 730020, China*)

**Abstract:** The frequency, intensity and influence region of extreme drought events are increasing under the global warming background, which would lead to not only enormous losses on national economy especially on agricultural production but also profound adverse impacts on water resources shortage, desertification exacerbation and frequent sand storm. In this paper, we focused on meteorological drought, then the spatiotemporal adaptability of commonly-used meteorological drought indices in China were systematically summarized in order to further improve technological level on drought monitoring, predicting, assessing and decision-making services. Firstly, commonly-used meteorological drought indices in China and their characteristics were reviewed in terms of calculation principle and elements, the results indicated that these indices could be classified into two categories: one category just considered precipitation and the other combined multi-factors in calculating. Secondly, adaptability of meteorological drought indices in different regions and seasons were summed up in China. In addition, amendments and improvements of these indices and their application effects were concluded. Furthermore, main factors impacting adaptability of these indices were investigated. Finally, controversial issues in research field of drought were proposed and key scientific problem which needed to be dealt with and development tendency were discussed on study area of meteorological drought indices and their adaptability in further.

**Key words:** drought; meteorological drought indices; monitoring and predicting; adaptability

## 欢迎订阅 2018 年《干旱气象》

《干旱气象》由中国气象局兰州干旱气象研究所、中国气象学会干旱气象学委员会主办,是我国干旱气象领域科学研究的专业性学术期刊,反映有关干旱气象监测、预测和评估的最新研究成果,充分展示干旱气象领域整体的研究和应用水平。期刊主要刊载干旱气象及相关领域有一定创造性的学术论文、研究综述、简评,国内外干旱气象发展动态综合评述、学术争鸣以及相关学术活动。具体包括:国内外重大干旱事件分析、全球及干旱区气候变化、干旱气象灾害评估及对策研究、水文、生态与环境、农业与气象、可再生能源开发与利用、地理信息与遥感技术的应用等。本刊还免费刊载干旱气象研究成果、研究报道、学术活动、会议消息等。《干旱气象》已被《中国学术期刊(光盘版 CAJ-CD)》、万方数据-数字化期刊群、中国核心期刊(遴选)数据库、中国科技论文统计源期刊、重庆维普中文科技期刊数据库、教育阅读网、台湾华谊线上图书馆等全文收录。

《干旱气象》内容丰富、信息量大、研读性强,适合广大气象科研业务工作者、各相关专业技术人员、大专院校师生阅读。

《干旱气象》为双月刊,国内外公开发行。2018 年正刊 6 期,每期定价 36 元,全年 216 元。欢迎广大读者订阅,并可以随时邮局款汇购买,款到开正式发票。

编辑部地址:甘肃省兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部

邮政编码:730020 联系电话:0931-2402270 电子信箱:ghs\_ghqx@sina.com

银行汇款:建设银行嘉峪关路支行 户名:中国气象局兰州干旱气象研究所

账号:62050138000800000057

邮汇:兰州市东岗东路 2070 号 中国气象局兰州干旱气象研究所 《干旱气象》编辑部