

CI 指数的改进及其在陕西省的适用性分析

李红梅, 王 钊, 高茂盛

(陕西省农业遥感信息中心, 陕西 西安 710014)

摘 要: 利用陕西 4 个站点 2002—2012 年逐日降水、气温资料和气象干旱指数, 结合测墒站建站至 2012 年墒情数据, 通过增加变量和调整权重系数对 CI 进行改进, 统计分析改进前后的综合气象干旱指数在陕西干旱过程描述、频率及强度等方面的应用情况和改进效果, 并比较了与同期土壤相对湿度的相关性差异。结果表明: 改进的综合气象干旱指数(CI_{new})监测的干旱日数较 CI 偏少, 春夏季尤为明显。各等级干旱发生频率 CI_{new} 较 CI 偏低 0.1% ~ 8%, 年干旱强度较 CI 平均偏低 64.2, 但改进前后的综合气象干旱指数在年干旱日数、频率、强度的总体变化特征方面并没有显著差异, 均能反映出陕西干旱频率及强度的变化特征。 CI_{new} 在具体干旱过程监测中的不合理跳跃次数明显减少, 克服了 CI 对弱降水的骤然反应, 保留了对强降水的敏感性, CI_{new} 与土壤相对湿度的相关性达 0.9, 较 CI 明显偏好, 监测过程更符合实际干旱的演变规律, 程度更贴近实际。因此, CI_{new} 可以作为陕西干旱监测与评估指标之一在业务中推广应用。

关键词: 综合气象干旱指数(CI); 改进的综合气象干旱指数(CI_{new}); 干旱频率; 干旱强度; 降水强度; 土壤相对湿度; 陕西省

中图分类号: S423 文献标志码: A

The improved of comprehensive meteorological drought index and its application in Shaanxi Province

LI Hong-mei, WANG Zhao, GAO Mao-sheng

(Remote Sensing Information Center for Agriculture in Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710014, China)

Abstract: The improved comprehensive meteorological drought index (CI_{new}) was proposed in view of shortages of comprehensive meteorological drought index (CI) by adding new variables and changing the weight coefficients of variables based on the daily precipitation, daily temperature, meteorological drought index at 4 stations from 2002 to 2012, and soil moisture data from the start of record to 2012. Compared with CI index, applicability characteristics and effects of CI_{new} were analyzed through the descriptions of the drought course, frequency, and intensity. The correlation between the soil moisture data and monitor data from CI and CI_{new} was also analyzed. The results showed that the number of drought days monitored by CI_{new} was fewer than that by CI , especially during spring and summer. Frequency of drought at different levels monitored by CI_{new} was lower by 0.1% ~ 8% than that of CI . Annual average drought intensity by CI_{new} was 64.2 lower than that by CI . However, no statistical significant differences between CI and CI_{new} during drought days were observed on distribution of drought frequency and drought intensity change, both of which could reflect the characteristics of drought frequency and drought intensity variation. The unreasonable jumping times were found to be decreased significantly by CI_{new} monitoring, which coped with CI on the drought abrupt change to weak precipitation and retained sensitivity to heavy rainfall. Correlation coefficient between CI_{new} and soil moisture was 0.9, better than that between CI and soil moisture. Compared with CI index, CI_{new} could objectively reflect the drought degree and the process to evaluate. Hence, CI_{new} could be used as an index for drought monitoring and evaluation in Shaanxi Province.

Keywords: comprehensive meteorological drought index(CI); improved comprehensive meteorological drought index(CI_{new}); drought frequency; drought intensity; precipitation intensity; soil relative moisture; Shaanxi Province

收稿日期: 2014-03-25
基金项目: 陕西省农业科技创新项目(2012NKC01-19); 陕西省气象局科技创新基金计划项目(2012M-14)
作者简介: 李红梅(1984—), 女, 河南商丘人, 工程师, 从事农业气象服务及干旱综合监测应用研究。E-mail: lee8003@163.com。

陕西地处季风边缘带,是气候环境变化响应的敏感区域,加之地形南北狭长,自然地理及气候条件差异较大,旱涝是影响陕西农业生产的主要气象灾害,尤其是干旱对农业生产危害最大,持续时间最长。陕西依靠自然降水的耕地有 1 754.6 hm²,占总耕地面积的 61.2%,旱地农业发展的好坏关系着陕西农业全局的发展,因此用适合的指标监测干旱变化以及研究干旱演变特征对指导农业防旱减灾和保证粮食安全具有重要意义。

目前用于反映干旱的指标有很多种^[1-2],农业干旱指标中的参数获取困难,一些指标受地域限制性很大,不便于大范围应用。气象干旱指标反映农业干旱虽有一定滞后性和差异性,但考虑了影响干旱的主要因子,计算相对简单,应用研究较广^[3-5],尤其是综合气象干旱指数(CI)同时考虑降水和蒸发的影响,在全国多个地区的应用研究中^[6-9]发现,CI 指数较单纯利用降水量计算的干旱指数有明显优越性,在业务中应用广泛,但会出现旱情不合理加剧现象^[10],福建^[11]、安徽^[12]、广州^[13]等地引用不等权重思想,在计算过去的 30 d 和 90 d 的 SPI 及 30 d 的 MI 时,总降水量采用线性递减的方法给逐日降水量赋予不同权重,越靠近目前的降水量权重系数越大,对当前的干旱影响越大,改进后 CI 指数对干旱的反映有了明显改善。但目前通过调整 CI 指数的权重系数和增加变量对其进行改进的研究较少,陕西省这方面的研究仍是空白。鉴于此本文以 CI 指数为基础,针对 CI 存在的问题,通过改变参数权重系数和引入 60 d 降水变量对 CI 指数进行改进,在干旱过程的描述能力、强度变化、发生频率等方面对改进前后的 CI 指数进行对比分析,为开展 CI 指数本地化应用奠定基础。

1 资料与方法

1.1 资料来源

资料包括逐日降水量、20 cm 土壤相对湿度、逐日综合气象干旱指数(CI)、30 d 标准化降水指数(SPI₃₀)、60 d 标准化降水指数(SPI₆₀)、90 d 标准化降水指数(SPI₉₀)和 30 d 相对湿度指数(MI₃₀)。逐日降水资料源自陕西气象信息中心提供的 2002 年 1 月 1 日至 2012 年 12 月 31 日资料。土壤相对湿度数据源自遥感中心自动土壤水分观测系统。气象干旱指数为国家气候中心业务系统提供的逐日数据。选取延安、咸阳、渭南、商州 4 站点为代表站点。

1.2 土壤水分监测数据处理方法

自动站 20 cm 土壤水分监测数据观测频率为 1

h 一次,与逐日 CI 指数无法匹配分析,因此取当天 24 h 观测的平均值为当日数据,每隔 5 d 取一个值,作为综合气象干旱指数对比数据使用。

1.3 CI 指数计算及存在的突出问题

综合气象干旱指数是参考气象干旱国家标准《气象干旱等级 GB/20481-2006》计算,公式为:

$$CI = a \times SPI_{30} + b \times SPI_{90} + c \times MI_{30} \quad (1)$$

式中,a、b、c 为系数,分别取 0.4、0.4 和 0.8。利用公式(1)可计算逐日 CI 指数,具体干旱等级划分见表 1。CI 指数值低于 -0.6 即为干旱日,某站点年(月)干旱日数为该站年(月)所有干旱日数之和^[6]。干旱过程即 CI 指数连续 10 d 为轻度以上干旱即为 1 个干旱过程,开始日为 CI 指数达到轻旱以上等级的首日。在干旱发生期连续 10 d 无旱表示干旱过程结束,结束日期为 CI 指数最后一次达到无旱等级的日期。干旱过程开始日至结束日期间为干旱持续时间,干旱过程内所有 CI 指数为轻度以上等级之和,表示干旱过程的强度,其值越小表示干旱过程越强^[14]。

CI 指数理论上综合考虑了月、季尺度的降水量变化,但在干旱动态监测及程度方面存在不合理的反应情况。以渭南 2007 年 3—7 月干旱过程为例(图 1)。3 月 14—17 日连续降水 20.1 mm,3 月 18 日至 4 月 12 日持续无降水,CI 呈震荡下降趋势,干旱过程始于 4 月 9 日,表现为轻旱,4 月 14 日 CI 指数从 12 日的 -0.6 骤然降至 -2.6,两天之内从轻旱变为特旱,明显和实际不符。从各指数演变过程可以看出,导致此次 CI 指数出现不合理现象的真正原因是 3 月 14—17 日的降水在计算 4 月 14 日的 MI₃₀ 和 SPI₃₀时已经超 30 d,移出了计算范围,使 MI₃₀ 和 SPI₃₀突然下降,导致 CI 指数骤然变低。同样原因使 SPI₉₀从 6 月 12 日到 15 日降低 0.8,导致 CI 骤然下降。显然当某降水过程移出 30 d 和 90 d 计算窗口时会导致 CI 出现不合理跳跃。为克服此种现象,目前已有诸多研究^[11-13]是通过将非等权重思想

表 1 CI、CI_{new} 干旱等级划分

Table 1 Classification of degrees for the comprehensive meteorological drought index and improved comprehensive meteorological drought index

等级 Grade	类型 Type	CI	CI _{new}
0	无旱 No drought	-0.6 < CI	-0.6 < CI _{new}
1	轻旱 Light drought	-1.2 < CI ≤ -0.6	-1.2 < CI _{new} ≤ -0.6
2	中旱 Middle drought	-1.8 < CI ≤ -1.2	-1.8 < CI _{new} ≤ -1.2
3	重旱 Severe drought	-2.4 < CI ≤ -1.8	-2.4 < CI _{new} ≤ -1.8
4	特旱 Extreme drought	CI ≤ -2.4	CI _{new} ≤ -2.4

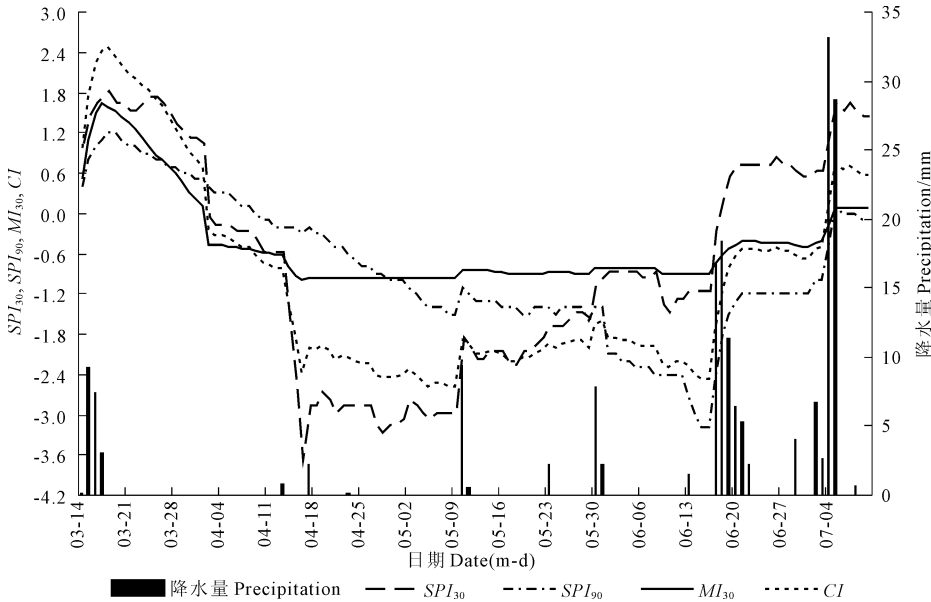


图 1 渭南春夏连旱过程中日降水量、CI、SPI₃₀、SPI₉₀和 MI₃₀(2007-03-14~2007-07-10)

Fig.1 Daily precipitation, CI, SPI₃₀, SPI₉₀ and MI₃₀ during the spring – summer drought course in Weinan(2007-03-14~2007-07-10)

引入各个分量来减少不合理跳跃次数。通过多次试验分析,笔者发现将多个时间尺度的分量同时引用参与计算,同样可以减少不合理跳跃现象,基于该思路构建了新的综合气象干旱指数 CI_{new} 。

1.4 改进的综合气象干旱指数(CI_{new})

考虑到 CI 指数存在的不足, CI_{new} 不仅考虑月、季度尺度有效降水和蒸发的影响,还引入了 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。 CI_{new} 指数计算公式为:

$$CI_{new} = a \times SPI_{30} + b \times SPI_{60} + c \times SPI_{90} + d \times MI_{30}$$

式中, a 、 b 、 c 、 d 为权重系数,5—10 月温度高,蒸发

量大,水分流失较快,越临近降水对干旱影响越大,4 个系数分别取 0.25、0.2、0.2、0.35;11—12 月及 1—4 月份温度较低,蒸发较少,对前期降水依赖性较大,加之该时段雨雪稀少,权重系数分别取:0.2、0.35、0.25 和 0.2,等级划分与 CI 指数保持一致(见表 1)。

2 结果与分析

2.1 CI 和 CI_{new} 不合理跳跃现象的比较

从图 2 和图 3 中的 CI、 CI_{new} 逐日变化可以看出,在持续少雨或无雨情况下(图 3 中的 11 月 14—15 日), CI_{new} 较 CI“不合理跳跃”情况明显降低,呈逐

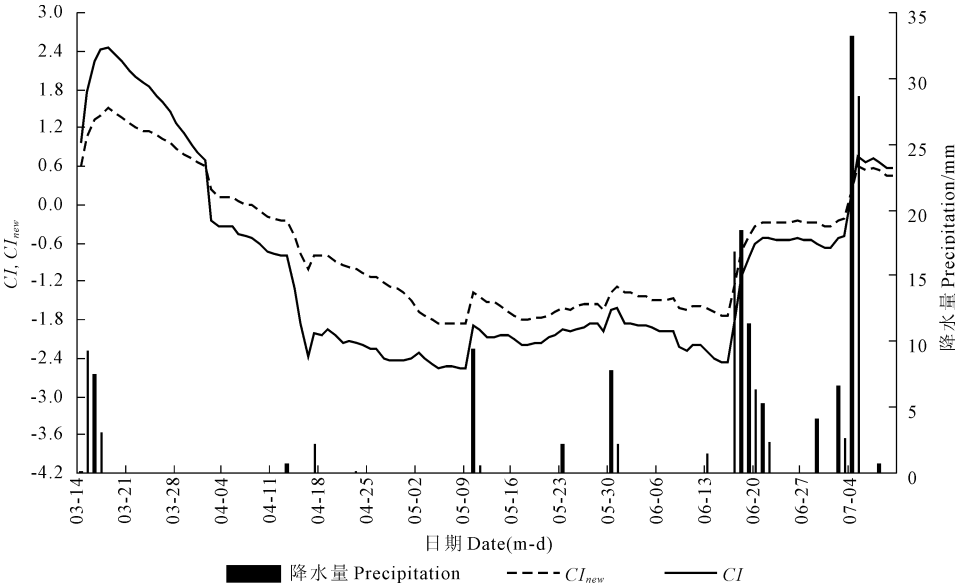


图 2 渭南春夏连旱过程中日降水量、CI 和 CI_{new} (2007-03-14~2007-07-10)

Fig.2 Daily precipitation, CI, and CI_{new} during the spring – summer drought course in Weinan(2007-03-14~2007-07-10)

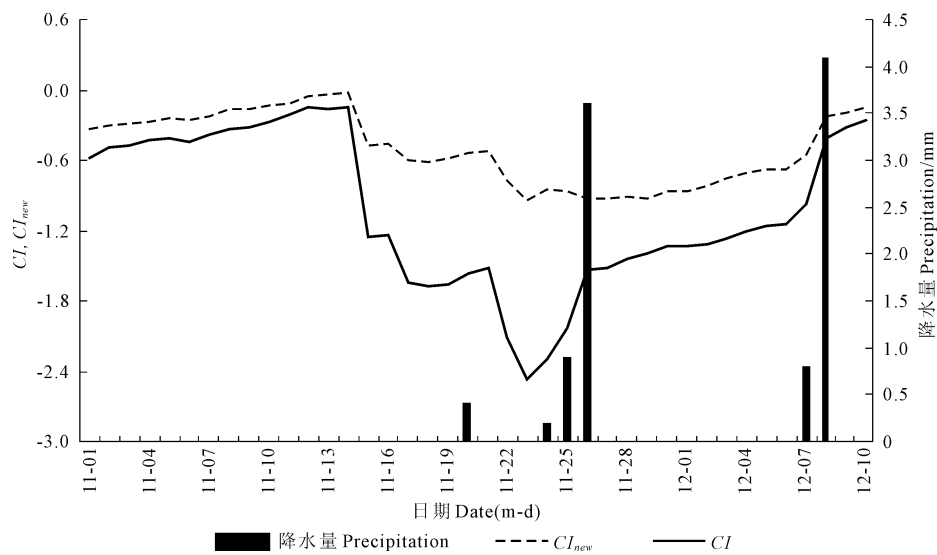


图 3 咸阳秋冬干旱过程中日降水量、CI 和 CI_{new} (2006-11-01~2007-01-13)

Fig.3 Daily precipitation, CI and CI_{new} during the autumn – winter drought course in Xianyang(2006 – 11 – 01 ~ 2007 – 01 – 13)

步下降趋势,变化较为缓和,这与杨丽慧等^[11]研究结果一致。遇弱的降水过程(图 2 中的 3 月 14—17 日降水,图 3 中 11 月 24—26 日降水), CI 曲线变化过于陡峭, CI_{new} 曲线则呈逐步上升趋势,更符合干旱实际的演变过程。究其原因是 CI_{new} 增加了对过去 60 d 降水的影响,并考虑到不同季节降水量多少及温度对蒸散量的影响,使 CI_{new} 整体监测能力提高,能较为客观真实地反映干旱发展过程。

统计渭南、咸阳、延安、商州 2002—2012 年干旱

过程中 CI_{new} 和 CI 当天与前一天的变化量(Δ_2)以及当天与前天的变化量(Δ_3),将 $\Delta_2 \geq 0.6$ 以及 $\Delta_3 \geq 1.2$ 定义为不合理跳跃点,结果见表 2。 CI_{new} 在干旱监测过程中的不合理跳跃点较 CI 减少幅度在 47%~89.6%,平均减少 65.4%,且 $\Delta_3 \geq 1.2$ 的不合理跳跃点减少尤为明显,说明改进后的 CI_{new} 有效改善了 CI 监测中的“不合理跳跃现象”,提高了对干旱过程的描述能力。

表 2 各站干旱过程中 CI 、 CI_{new} 不合理跳跃点统计 (2002—2012)

Table 2 Unreasonable jumping points of drought process derived by CI and CI_{new} respectively at 4 stations from 2002 to 2012					
站点 Station	干旱过程次数 Times of drought course	$\Delta_2 \geq 0.6$ 的次数 Times of $\Delta_2 \geq 0.6$		$\Delta_3 \geq 1.2$ 的次数 Times of $\Delta_3 \geq 1.2$	
		CI_{new}	CI	CI_{new}	CI
渭南 Weinan	26	22	59	6	41
咸阳 Xianyang	21	12	49	3	29
延安 Yanan	25	26	49	13	31
商州 Shangzhou	23	30	60	11	24

2.2 CI 和 CI_{new} 对干旱过程、强度大小的描述

仍以渭南 2007 年 3—7 月干旱过程为例,以文献[14]中定义的干旱强度及持续时间为参考。 CI 监测渭南此次干旱过程始于 4 月 9 日,7 月 11 日结束,持续 94 d,强度为 -146.5。而 CI_{new} 监测的干旱过程始于 4 月 15 日,6 月 30 日结束,时长 77 d,干旱强度为 -94.7,强度明显低于 CI ,持续时间较 CI 少 17 d。从此次干旱过程的描述看(图 2), CI 监测的多为重旱,部分为特旱, CI_{new} 监测多为中等干旱,5 月上中旬出现 8 个重旱日。对比文献[15]对 2007 年干旱的描述“4 月下旬旱情逐步发展,5 月上旬陕

北、陕南东西部和关中大部发展为中旱,6 月上中旬关中大部轻 - 中度干旱”表明, CI_{new} 监测的干旱程度更接近于实际。

商州 2010 年冬春连旱监测过程中(图 4), CI_{new} 在干旱强度描述及降水对干旱的影响效应方面明显优于 CI 指数。 CI 监测显示从 2010 年 11 月 1 日至 2011 年 3 月 10 日商州出现 2 次干旱过程,分别为 2010 年 11 月 24 日至 2011 年 1 月 13 日和 2011 年 1 月 24 日至 3 月 7 日,持续时间为 51 d 和 42 d,强度为 -55.9 和 -29.9。 CI_{new} 监测干旱过程只有一次,从 11 月 24 日至 3 月 7 日共计 93 d,强度为 -61.2,

其中干旱日为 68 d,多为轻旱,在 12 月中旬出现 5 个中旱日。而 CI 监测的 2 次过程干旱日共计 71 d,第一个过程有 22 个中旱日,2 个重旱日,第二个过程多为轻旱,累积干旱强度为 -95.8 ,明显强于 CI_{new} 监测结果。

以 20 cm 土壤相对湿度作为检验干旱程度的参考, CI_{new} 、 CI 与土壤相对湿度的总体相关性均较好,均通过 0.01 的显著性水平检验,但 CI_{new} 与土壤相对湿度的相关系数达 0.9,明显好于 CI 。在不同时段两者监测干旱强度存在很大差异,商州 2010 年 12 月份的逐日监测中(图 4),20 cm 相对湿度监测多为轻旱, CI 监测多为中到重旱, CI_{new} 监测多为轻旱,与土壤墒情较为接近,更贴合实际。1 月 17—20 日商

州出现 1.7 mm 的弱降水,土壤墒情略有增加,但不明显。 CI 、 CI_{new} 分别从 1 月 17 日的 -0.13 、 -0.47 变为 1 月 22 日的 0.75 、 -0.16 ,改变量分别为 0.88 和 0.31。2 月 25—26 日出现 25.6 mm 强降水过程,土壤湿度从 2 月 23 日的 67% 上升到 2 月 28 日的 80%,墒情增加明显。 CI 、 CI_{new} 从 2 月 23 日的 -1.05 、 -0.84 变为 2 月 28 日的 2.57 和 1.25 ,改变量分别为 3.62 和 2.09,增加都较为明显。说明 CI_{new} 改进了 CI 对弱降水的不合理反应,保留了 CI 对于强降水过程的敏感性,并克服了 CI 遇强降水发生直线突变的现象,基本反映出不同降水过程对干旱的影响效应,比较符合干旱逐渐发生发展的过程,更适用于陕西的干旱监测。

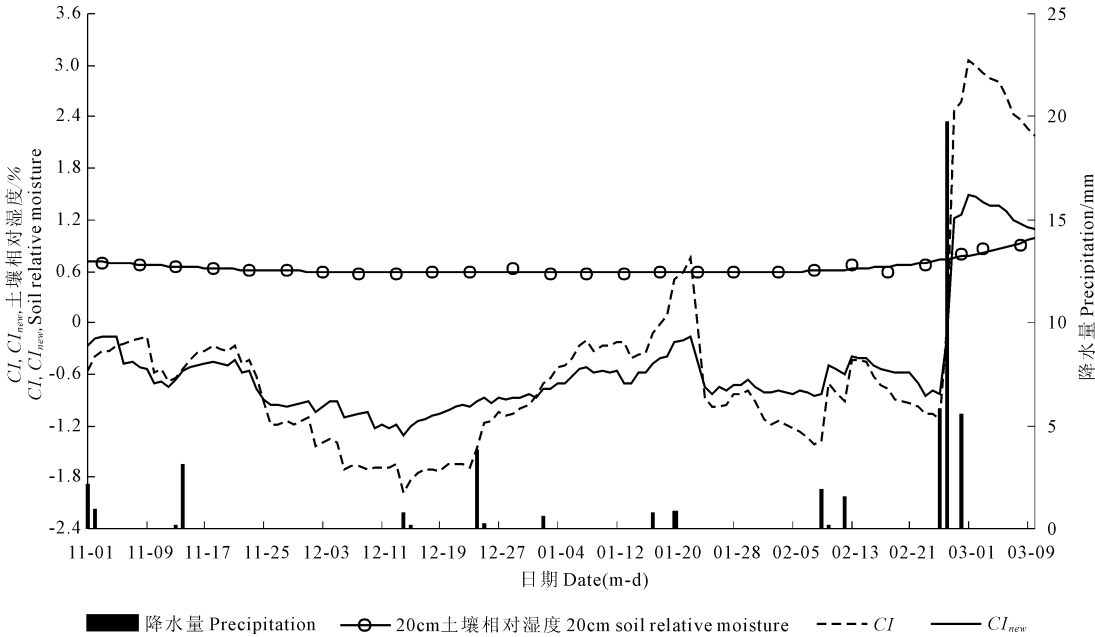


图 4 商州干旱过程中日降水量以及 CI 、 CI_{new} 与土壤相对湿度的相关分析
(2010-11-01~2011-03-10) ($R_{CI}=0.83$, $R_{CI_{new}}=0.9$)

Fig.4 Daily precipitation, correlation analyses of CI , CI_{new} and soil moisture during the drought course
in Shangzhou(2010-11-01~2011-03-10) ($R_{CI}=0.83$, $R_{CI_{new}}=0.9$)

2.3 CI 和 CI_{new} 对干旱日数和频率的统计比较

由延安、渭南、咸阳和商州 CI 、 CI_{new} 各分量统计结果看(表略),改进前后的综合气象干旱指数对干旱日数及等级频率分布的统计特征相似,以商州(图 5)为例, CI 和 CI_{new} 统计的各月干旱日数分布特征大致相同(图 5a),春末夏初(4—6 月)干旱日数较多,6 月以后干旱日数逐步下降,夏末秋初(8—9 月)干旱日数最少,10 月开始又逐步增多,符合商州降水和温度对干旱综合影响效应的变化特征(图 6)。春季向夏季过渡阶段温度直线回升,而降水增幅较小,且降水量不大,是干旱易发阶段,同时也与陕西持续性

干旱多为春夏连旱有关^[9]。7—9 月是全年雨量较多的月份,7 月温度高,但降水量大,所以干旱日数较 6 月有所减少,而 8—9 月雨量较多,温度较 7 月有所下降,两者综合对干旱有抑制作用,干旱发生相对较少。进入秋冬季降水稀少,干旱日又逐步增多,但 CI 监测的干旱日数总体多于 CI_{new} ,尤其是在春夏季节。

干旱等级分布特征(图 5b)中的 -4 至 0 分别代表特旱、重旱、中旱、轻旱和正常,图中 CI 、 CI_{new} 对不同等级干旱发生频率统计的分布特征均是偏态分布,总体特征相似,干旱发生频率随着等级的增加逐渐降低,但 CI_{new} 监测的各等级干旱发生频率均低于

CI ,相差 0.1%~8%,其它三站点结果和商州相似(图略),但存在一定差异,这与各站所处的区域环境和气候特点有关,说明 CI 和 CI_{new} 对多年干旱频率

分布特征的统计并无太大差异,均能综合描述干旱发生时段及频率分布特征,结果与蔡新玲等^[9]研究结果一致。

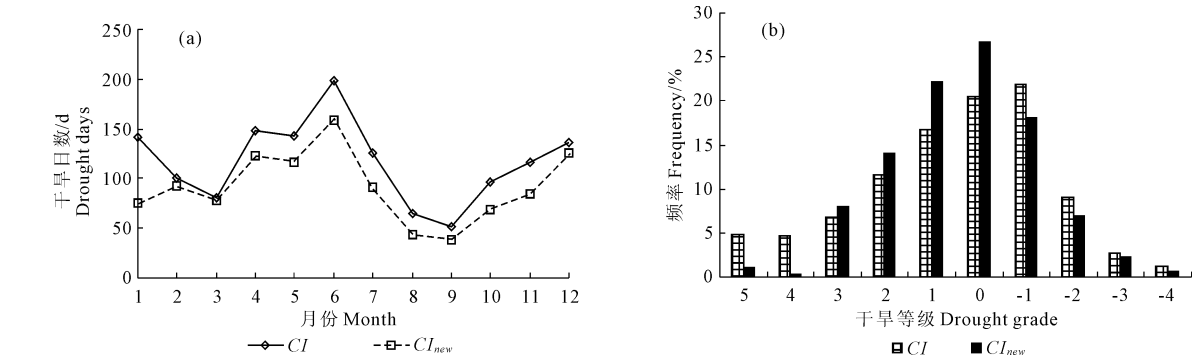


图 5 基于 CI 和 CI_{new} 的干旱日数月分布(a)和不同等级干旱频率分布(b) (2002—2012, 商州)
Fig.5 Distribution of monthly drought days (over light) (a) and frequency of different grade droughts (b)
based on CI and CI_{new} (2002—2012, Shangzhou)

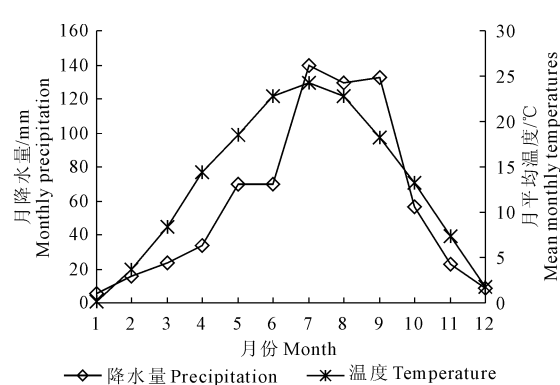


图 6 商州多年平均月降水量和月平均温度(2002—2012)
Fig.6 Distribution of monthly precipitation and mean monthly temperature in Shangzhou(2002—2012)

2.4 基于 CI 和 CI_{new} 的干旱强度的年际变化

各站年干旱强度及年降水量变化结果见(图 7), CI 和 CI_{new} 统计的各站年干旱强度变化趋势大致相同,均呈现震荡起伏的变化趋势。 CI_{new} 监测的四站点的年干旱强度较 CI 平均偏低 64.2,其中咸阳偏低最多,为 78,商州相差较小,偏低 34.4,但变化幅度 CI 比 CI_{new} 剧烈。除咸阳以外,其它三站年干旱强度与年降水量相关性显著,均通过 0.05 显著性水平检验。但个别年份除外,以咸阳为例,2007 年降水明显多于 2006 年,但干旱强度却强于 2006 年,这与年内降水时间分布不均有关,2006 年内降水时间分布较为均匀,干旱发生时段较短,程度较轻,年干旱强度较小。2007 年咸阳降水主要集中在 7—8 月份,占全年降水量的 69.2%,而 3—5 月持续干旱少雨,长时段发生中到重度干旱^[15],导致年干旱强度

整体较大。结合统计数据分析,年内降水时间分布不均是导致年干旱强度与年降水量相关性较差的主要原因之一。参照文献^[15-17]对干旱的描述发现,改进前后的综合气象干旱指数均能反映出干旱强度的年际强弱变化,总体与年降水量呈正相关,可以用于长期干旱变化的监测评估,但年干旱强度大小描述的准确度尚无参照资料,有待于进一步的研究。

3 结论与讨论

1) 原有 CI 指数只考虑了月、季尺度降水影响,时间跨度间隔太大, CI_{new} 在原有参数的基础上增加 SPI_{60} ,并针对不同季节对各权重系数进行调整。高温季节,蒸发较快,越临近的降水对干旱缓和作用越大,时间尺度较小的参数赋予权重越大;寒冷季节降水本身稀少,加之蒸发少,前期降水对干旱影响较大,60 d 和 90 d 的 SPI 权重系数较大。改进后的综合气象干旱指数能较为客观真实地反映干旱演变过程,不合理跳跃现象明显减少,这与谢五三等^[12-13]采用非等权重方案对 CI 指数进行改进有着同样的效果,但不合理跳跃现象仍然存在,有待于进一步的研究和修正。

2) CI_{new} 监测的具体干旱过程持续时间比 CI 指数少,强度比 CI 指数明显偏轻,与实际的干旱程度更为接近。 CI_{new} 与土壤相对湿度相关性高于 CI ,既克服了 CI 指数遇弱降水的不合理突变现象,又保留了对于强降水过程的敏感性,更加符合干旱逐渐发生发展的演变规律。

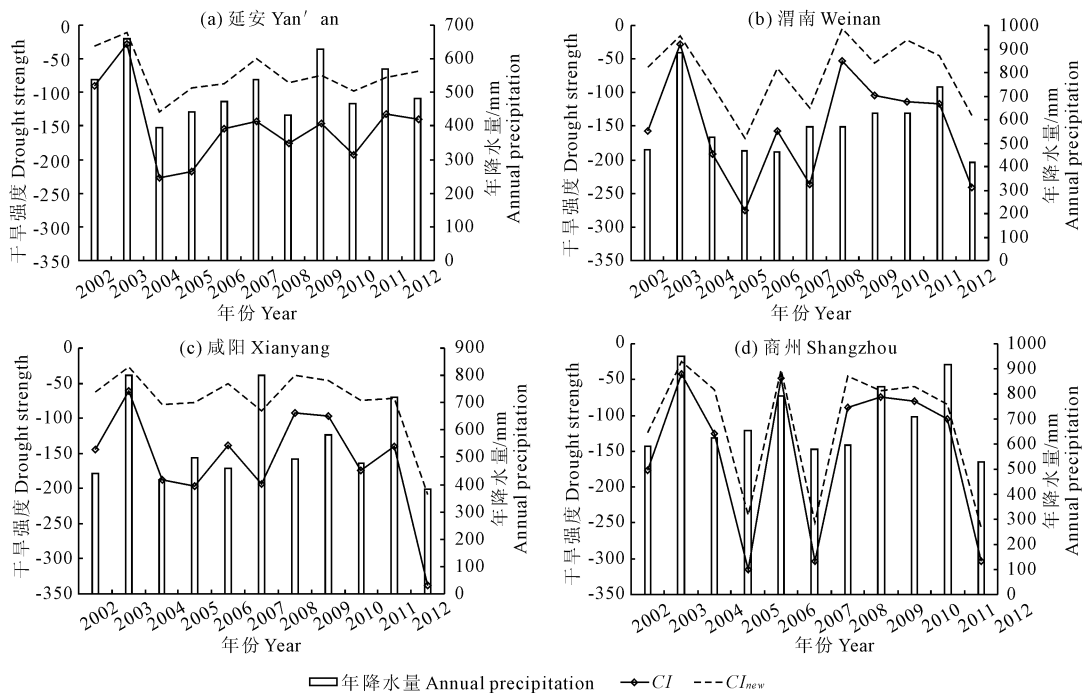


图 7 各站点 2002—2012 年年降水量与 CI 、 CI_{new} 描述的年干旱强度的变化

Fig. 7 Variations of annual precipitation and annual drought strength based on CI and CI_{new} from 2002 to 2012

3) CI_{new} 与 CI 指数对年干旱日数、频率以及年干旱强度的变化分布特征监测结果大致相同,与蔡新玲等^[9]研究结果较为一致,均能较合理地反映陕西总体的干旱变化特征,但 CI_{new} 监测的年干旱强度明显低于 CI 指数,有关其准确度目前尚无定量评定方法,能参考的仅有具体干旱过程的定性描述。

4) 2007 年渭南和 2006 年咸阳的具体干旱过程监测表明, CI_{new} 整体监测干旱的能力较 CI 有了明显的提高,但与实际干旱仍有一定偏差,可能与变量的权重系数设定或干旱等级分级有关,因此下一步还需在更多地区和长时间干旱过程中对其进行进一步的适用性检验,通过修正其权重系数或调整分级阈值不断对其进行优化。

参考文献:

[1] 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.
[2] 李星敏,杨文峰,高蓓,等.气象与农业业务化干旱指标的研究与应用现状[J].西北农林科技大学学报(自然科学版),2007,35(7):111-116.
[3] 杨世刚,杨德保,赵桂香,等.三种干旱指数在山西省干旱分析中的比较[J].高原气象,2011,30(5):1406-1414.
[4] 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.

[5] 乔丽,杜继稳,薛春芳,等.干旱指标在陕西省适用性研究[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):1-6.
[6] 刘可群,李仁东,刘志雄,等.基于 CI 指数的湖北干旱及其变化特征分析[J].长江流域资源与环境,2012,21(10):1274-1280.
[7] 张调风,张勃,王有恒,等.基于综合气象干旱指数的石羊河流域近 50 年气象干旱特征分析[J].生态学报,2013,33(3):975-984.
[8] 张婧,梁树柏,许晓光,等.基于 CI 指数的河北省近 50 年干旱时空分布特征[J].资源科学,2012,34(6):1089-1094.
[9] 蔡新玲,叶殿秀,李茜,等.基于 CI 指数的陕西干旱时空变化特征分析[J].干旱地区农业研究,2013,31(5):1-8.
[10] 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.
[11] 杨丽慧,高建芸,苏汝波,等.改进的综合气象干旱指数在福建省的适用性分析[J].中国农业气象,2012,33(4):603-608.
[12] 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.
[13] 王春林,郭晶,薛丽芳,等.改进的综合气象干旱指数 CI_{new} 及其适用性分析[J].中国农业气象,2011,32(4):621-626.
[14] 张强,周旭凯,肖风劲,等.GB/T20481-2006.气象干旱等级[S].北京:中国标准出版社,2006:1-17.
[15] 陕西救灾年鉴编委会.2007 陕西救灾年鉴[M].西安:陕西科学技术出版社,2009:34-35.
[16] 陕西救灾年鉴编委会.陕西救灾年鉴(2003)[M].西安:陕西科学技术出版社,2005:13-14.
[17] 陕西救灾年鉴编委会.陕西救灾年鉴(2005)[M].西安:陕西科学技术出版社,2007:102-103.