

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2014.01.001

基于改进的综合气象干旱指数的洞庭湖流域干旱时空特征

薛联青¹,张竞楠¹,刘晓群²,宋佳佳¹,邢宝龙¹

(1. 河海大学水文水资源与水利工程科学国家重点实验室,江苏 南京 210098; 2. 湖南省水利厅,湖南 长沙 512000)

摘要: 运用改进的综合气象干旱指数,根据洞庭湖流域19个气象站1961—2009年的实测气象资料,运用小波理论分析洞庭湖流域发生的干旱时间差异,并对洞庭湖流域的干旱特征进行空间格局分析。结果表明:从时间格局上,洞庭湖流域发生90%以上范围的干旱周期四季依次为:春季16 a,夏季13 a,秋季9 a,冬季16 a;在空间格局上,洞庭湖流域干旱发生程度整体上是以衡阳、邵阳、芷江、通道以西,石门、南县以北三个地区为中心向其四周递减;从季节尺度来看,整体上秋季干旱最为严重,冬季次之,春季干旱最轻。

关键词: 综合气象干旱指数;洞庭湖流域;干旱特征;时空格局;小波分析

中图分类号:P338⁺.6 文献标志码:A 文章编号:1000-1980(2014)01-0001-06

Spatial and temporal patterns of droughts in Dongting Lake watershed based on improved meteorological drought composite index

XUE Lianqing¹, ZHANG Jingnan¹, LIU Xiaoqun², SONG Jiajia¹, XING Baolong¹

(1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Department of Water Resources of Hunan Province, Changsha 512000, China)

Abstract: Based on the improved meteorological drought composite index and measured meteorological data from 19 meteorological stations in the watershed during the period from 1961 to 2009, the time difference of the drought development in the watershed was analyzed through wavelet analysis, and the spatial pattern of the drought characteristics were analyzed. The results show that the primary cycles of drought that occurred in more than 90% of the coverage area in the watershed were 16 years in the spring, 13 years in the summer, nine years in the autumn, and 16 years in the winter; at the spatial scale, the most severe droughts occurred in the Hengyang-Shaoyang region, the western part of the Zhijiang-Tongdao region, and the northern part of the Shimen-Nanxian region, and the degree of drought decreased in the surrounding regions; and at the seasonal scale, the most severe droughts occurred in the autumn on the whole, followed by the winter, with the most slight droughts occurring in the spring.

Key words: meteorological drought composite index; Dongting Lake watershed; drought characteristics; spatial and temporal patterns; wavelet analysis

在全球变暖背景下的气候变化,使得水循环加快,加剧了干旱灾害发生的频率^[1]。干旱指数是监测、预警、评估干旱的关键参数,能够标记干旱发生的起始时间、烈度等,在一定程度上反映出干旱发生的机理。但是,由于干旱指数存在强度定界不统一、忽略或是夸大了个别干旱影响因子的作用等问题^[2-5],2006年国家颁布实施的《气象干旱等级》^[6]中引入了综合气象干旱指数(CI)。CI综合了SPI和M两类干旱指标的优点,计算稳定、适用性强,同时能够监测季节性、区域性干旱^[4]。但是在实际应用中CI却存在着“不合理旱

收稿日期: 2013-07-03
基金项目: 国家自然科学基金(41371052,U1203282);水利部公益项目(201001066)
作者简介: 薛联青(1973—),女,新疆石河子人,教授,博士,主要从事环境水文及水环境保护研究。E-mail:lqxue@hhu.edu.cn

情加剧”的现象。CI 计算采用的是降雨等权重累计值之和,所以当有较大降雨移入或移出累计降雨时段时,CI 会产生较大的波动。为此国家气候中心于 2010 年对 CI 指数进行了改进,提出改进的综合气象干旱指数 I_{NCC} ,并进行了实际应用^[7-8]。结果表明 I_{NCC} 较好继承了传统指数 CI 的优点,能有效克服原干旱指数的不合理旱情加剧等缺点,而且相较原干旱指数具有更好的敏感性。基于 I_{NCC} 的诸多优点^[9-10],本文采用 I_{NCC} 对洞庭湖流域干旱特征进行分析研究,以期对开展干旱预报、预警业务及指导抗旱减灾提供参考。

1 资料与方法

1.1 流域概况与资料处理

洞庭湖流域水系发达,湘、资、沅、澧 4 水分别从东、南、西 3 面注入洞庭湖,长江的松滋、藕池、虎渡、太平 4 口由北向南注入洞庭湖,入湖水量经湖泊调蓄后于岳阳市七里山汇入长江,形成了以洞庭湖为中心的辐射状水系。研究流域介于北纬 24°00′~30°30′、东经 107°40′~114°25′之间,属于典型的亚热带季风气候区,冬夏季风交替;降水年际变化大、分布不均匀,干旱灾害发生频率高。本文选定 1961—2009 年洞庭湖地区的 19 个地面气象观测台站的逐日降水量、日平均气温、日最高气温、日最低气温、日照时数、风速、相对湿度等气象要素的实测资料进行分析研究。洞庭湖流域气象站点分布见图 1。

1.2 研究方法

1.2.1 改进的综合气象干旱指数

为修正 CI 中的诸多不合理因素,国家气候中心^[7]提出了改进的综合气象干旱指数 I_{NCC} 。降水量按线性递减权重方法计算,从而使得随着时间的向前推移,过去的降水对当前的干旱缓解作用减小。经分析, I_{NCC} 与 CI 具有相同的统计分布特性,故 I_{NCC} 仍采用原综合气象干旱等级(表 1)。 I_{NCC} 计算式如下:

$$I_{NCC} = \kappa Z_{30} + \lambda Z_{90} + \mu M_{30} \tag{1}$$

式中: Z_{30} 、 Z_{90} ——近 30 d 和近 90 d 的标准化降水指数;
 M_{30} ——近 30 d 相对湿度指数; κ ——近 30 d 标准降水系数,由轻旱以上级别 Z_{30} 的平均值除以历史出现最小 Z_{30} 值而得; λ ——近 90 d 标准降水系数,由轻旱以上级别 Z_{90} 的平均值除以历史出现最小 Z_{90} 值而得; μ ——近 30 d 标准降水系数,由轻旱以上级别 Z_{90} 的平均值除以历史出现最小 Z_{90} 值而得。

根据 GB/T 20481—2006《气象干旱等级》^[6],将由资料序列计算出的 I_{NCC} 值在年、季度尺度下进行统计,确定干旱发生与否以及干旱发生的时间段。为探究不同干旱等级下空间上的差异特性,现以不同等级下的干旱日数作为相应干旱等级的影响指标,对各计算序列严格按照表 1 中划分 I_{NCC} 值等级的方法进行统计,在时间上进行平均。由此,所确立的干旱频率计算方法如下:

$$P = \frac{n}{N} \times 100\% \tag{2}$$

式中: P ——干旱频率; n ——实际有干旱事件发生的年数; N ——资料年序列数。

干旱覆盖范围为 S , 计算式如下:

$$S = \frac{m}{M} \tag{3}$$

式中: m ——每年有干旱事件发生的站点数; M ——研究流域总站点数,本文 $M=19$ 。

1.2.2 小波分析

采用复 Morlet 小波对流域干旱序列进行小波分析。复 Morlet 小波的连续小波变换^[11-12]为

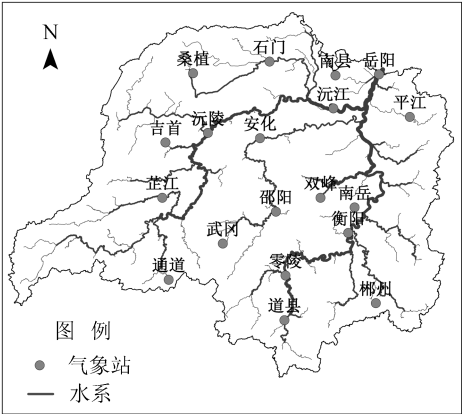


图 1 洞庭湖流域气象站点分布

Fig. 1 Generalization of meteorological stations in Dongting Lake watershed

表 1 综合气象干旱等级划分

Table 1 Grade division of meteorological drought composite index

等级	类型	I_{NCC}
1	无旱	>-0.6
2	轻旱	$(-1.2 \ -0.6]$
3	中旱	$(-1.8 \ -1.2]$
4	重旱	$(-2.4 \ -1.8]$
5	特旱	≥ -2.4

$$W_f(a,b)=\frac{1}{\sqrt{a}}\int_{-\infty}^{\infty}f(t)\overline{\varphi}\left(\frac{t-b}{a}\right)dt$$

(4)

$$\varphi(t)=\frac{1}{\sqrt{\pi f_b}}e^{2i\pi f_c t-\frac{t^2}{f_b}}$$

(5)

式中: $W_f(a,b)$ ——小波变换系数,该系数表示该部分信号与小波的近似程度; a ——尺度伸缩因子; b ——时间平移因子; t ——时间; f_b ——带宽; f_c ——中心频率; $f(t)$ ——某信号的时间序列; $\varphi(t)$ ——基小波函数; $\overline{\varphi}(t)$ —— $\varphi(t)$ 的复共轭函数。

将时间域上关于 a 的所有小波变换系数的平方进行平均,即为小波方差 V_a :

$$V_a=\frac{1}{N}\sum_{b=1}^N|W_f(a,b)|^2$$

(6)

总体小波功率谱表征不同尺度 a 对应的能量密度,它反映了波动的能量随尺度的分布。通过小波方差图,可以确定一个序列的主要时间尺度或者主周期。根据 Torrence 等^[13]导出的关系,Morlet 小波变换尺度伸缩因子 a 与周期 T 具有的关系为 $T\approx1.033a$ 。

小波方差是否显著,用红噪声或者白噪声标准谱进行检验^[14-15]。具体检验过程可参见文献[13-16]。

2 干旱覆盖范围时间演变过程分析

图 2 为洞庭湖流域年、季度干旱覆盖范围时间演变图,为较准确地描述其时间特性,采用小波理论进行辅助分析。由于小波分析主要是辅助分析干旱范围随时间的变化特性,这里仅列出年干旱覆盖范围的小波分析图(图 3、图 4),其季度的覆盖范围仍采用小波分析。小波方差图可以确定一个序列的主要尺度周期,根据近49a干旱范围序列小波方差图(图3)可以看出,洞庭湖流域存在年际尺度周期有2.68a、4.13a、6.96a、21.44a,其中,4.13a 为主周期(未通过置信水平为 0.1 的检验)。小波变换的时频变化图能够反映出年干旱范围的时间尺度变化、位相结构,图 4 给出了年干旱覆盖范围 Morlet 小波变换系数的实部的时频分布,图中正值(实线)表示干旱范围时间上偏多;负值(虚线)表示干旱范围时间上偏少。由图 4 可知,以 4 a 左右为中心的 2~5 a 的周期在 1985—2008 年表现突出;以 2.6 a 左右为中心的 1~3 a 的周期在 1975 年以前表现突出;以 7 a 为中心的 5~10 a 的周期在 1986 年以前表现突出,而在 1986 年之后则逐渐变为 8~12 a 的周期;而以 21.44 a 为中心的 15~27 a 的周期贯穿始终。另外,由图 2(a)可看出,洞庭湖流域年干旱覆盖范围呈波动变化趋势,这49a中,呈13峰13谷的波动,20世纪六七十年代干旱覆盖范围较广,80年代干旱趋势有所减

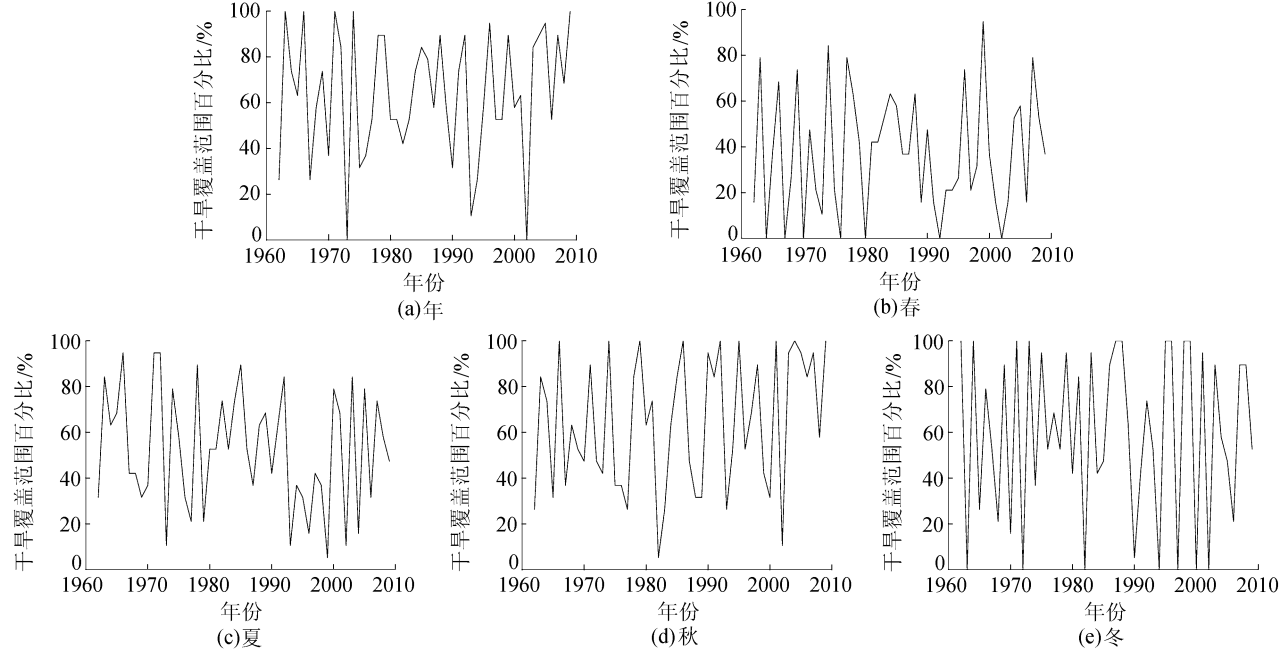


图 2 洞庭湖流域年、季干旱覆盖范围时间演变

Fig. 2 Temporal evolution chart of drought coverage areas for annual and seasonal droughts in Dongting Lake watershed

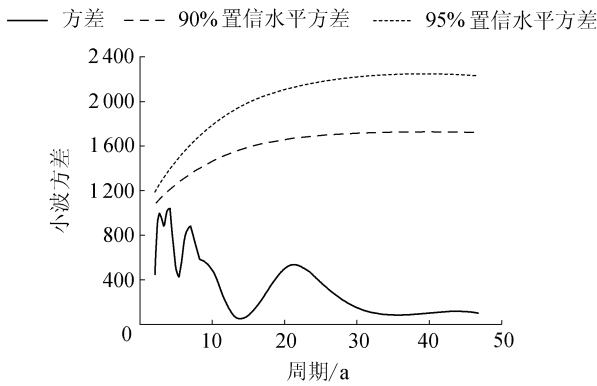


图3 小波方差
Fig. 3 Curves of wavelet variance

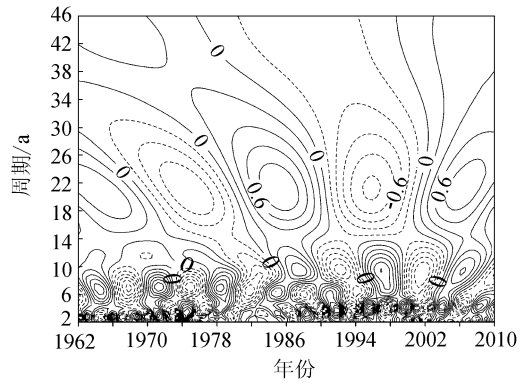


图4 年干旱覆盖范围 Morlet 小波变换系数等值线
Fig. 4 Morlet wavelet transform coefficients of coverage area for annual droughts

少,90年代、21世纪初干旱范围又有所增加。其中干旱覆盖面积达到90%以上的有7a,干旱较严重。图2(b)(c)(d)(e)为季节干旱覆盖范围百分比。春季2.92a、10.72a、25.49a的周期表现明显,其中2.92a为主周期(通过了置信水平为0.05的检验);周期表现程度上,20世纪六七十年代周期趋势明显,1977—1984年、1990—1996年周期较弱;历年来仅1999年干旱覆盖面积百分比超过90%。夏季3.19a、9.01a和21.44a的周期表现明显,其中主周期为3.19a(通过了置信水平为0.1的显著性检验);周期表现程度上,1966—1972年干旱周期变化较弱;干旱覆盖范围较春季稍偏多,20世纪六七十年代干旱烈度较大,21世纪初期虽干旱出现较频繁,但是干旱覆盖百分比几乎均小于80%。秋季干旱明显偏多,90%以上的干旱覆盖百分比在20世纪六七十年代及90年代平均4~5a出现1次,而进入21世纪后,则几乎每隔2a就发生1次。2003—2005年则出现连续3a干旱范围百分比超过90%。其中,干旱面积比达100%就有9a。干旱主周期为5.84a(已通过置信水平为0.05的显著性检验),其次为2.68a。冬季干旱波动剧烈,大面积干旱循环出现。全年干旱覆盖百分比为100%的年份有10a,干旱覆盖面积比为0的有7a。20世纪六七十年代,干旱周期为2a。1992—2003年干旱波动剧烈,“大范围干旱”和“无旱”以3a为周期交替出现。整体上,2.25a周期变化显著(通过置信水平为0.05的显著性检验),其次为10.72a变化周期。

从计算流域内50%以上台站发生轻度以上干旱等级的年份来看,季节连旱现象较明显。发生三季连旱的共有12a,其中春夏秋连旱的有5a,夏秋冬连旱的有7a;发生四季连旱的有4a,其中2007—2008年连续干旱。而从计算流域内90%以上台站发生轻度以上等级干旱的年份来看,洞庭湖地区秋、冬季发生大范围干旱年份较多。秋季大范围干旱主要出现在1985年以后,尤其2004年以来干旱次数明显偏多。冬季大范围干旱则主要出现在2002年以前。

3 干旱发生频率和日数的空间分布

3.1 干旱发生频率空间分析

由洞庭湖流域年干旱发生频率分布(图5(a))可以看出,洞庭湖流域干旱发生频率在空间上有较明显的差异。洞庭湖流域的东北部(石门、南县以北)、中部偏南(邵阳、零陵、郴州一带)发生干旱频率较高,有的地区甚至达到80%;其次是洞庭湖流域的西部(芷江地区),其干旱发生频率超过70%。这与左利芳等^[17]的研究完全吻合;芷江一带因山多溪多,范围较小,旱情并不严重。而南岳的东南部则干旱发生频率最低,一般都保持在20%~30%左右。其他地区基本保持在40%~60%之间。

由图5(b)(c)(d)(e)可见四季的干旱发生频率与年尺度的干旱频率有些差异,但是南岳衡阳东南部地区的低旱趋势却贯穿四季。整体上看,干旱发生强度有强到弱依次为:秋季、冬季、夏季、春季。四季干旱范围有较明显的季节波动,冬季和春季空间变化较小,干旱的高发区一般都集中在洞庭湖流域的北部,干旱范围由冬季到夏季有减少的趋势。夏季干旱范围则转移到了双峰、岳阳、衡阳以及零陵的交界地区,干旱发生频率以双峰发生最高,达到了73%。流域北部干旱减弱,干旱整体上向南移动。秋季干旱范围向西南方向移动。干旱缩小到了衡阳附近,在衡阳西南部高值达到80%,干旱频率向四周急剧下降,达到邵阳时干旱频

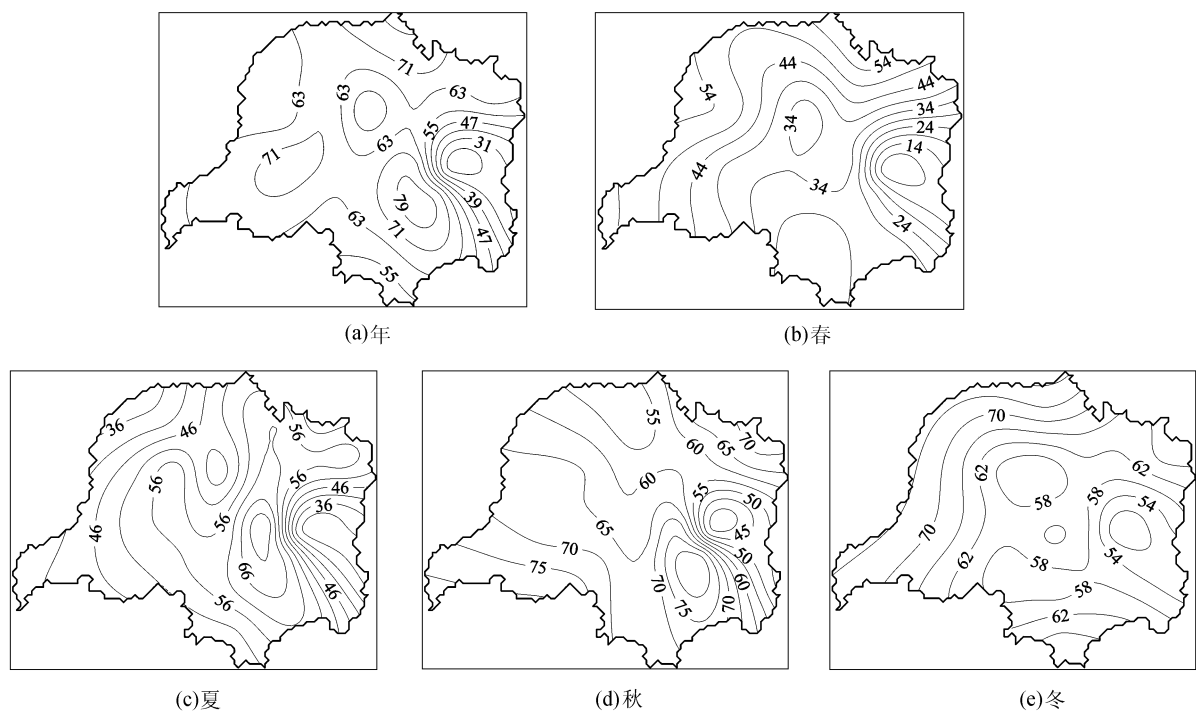


图 5 洞庭湖流域年、季节干旱发生频率(%)

Fig. 5 Occurrence frequencies of annual and seasonal droughts in Dongting Lake watershed (%)

率已经降为 50%。在芷江、通道、吉首一带的西部地区干旱频率出现高值区 80%，其干旱频率的强度表现为由边界向芷江一带减缓的趋势。冬季，以南县、桑植、吉首、芷江为界，北方表现为干旱的多发区，流域的中部大部分地区干旱频率集中在 50%~60%。春季则整个流域干旱发生频率都普遍低于 50%，可见春季干旱发生频率最小。

3.2 不同强度干旱发生日数分析

进一步统计分析表明，总体上衡阳、零陵、衡阳一带，通道、芷江以北以及石门、桑植一带，干旱发生日数较多，南岳以东、平江以南干旱发生日数较少。从年干旱来看，发生“轻旱”等级的日数较多，最大值达到 80 d，最小值达到 40 d。整个区域“轻旱”持续日数达 70 d 的仅出现在衡阳附近、流域西部的小部分以及石门北部的小部分，整个区域大部分持续日数为 50~70 d；“中旱”等级的日数较“轻旱”等级的日数少 20~30 d；干旱日数从中部向流域南部、西部递减。“重特旱”等级的日数最少，为 4~12 d。从各季度干旱来看，各季度除冬季以外衡阳、零陵一带干旱持续时间最长，其中以秋季干旱持续时间最长，为 28~31 d。夏秋两季道县及其南部均易发生中旱，其中夏季干旱日数为 10~22 d，而且整个流域上其波动较大，最大、最小日数之差为 12 d。另外，整个流域上“重特旱”持续日数较短，除秋季持续日数达到了 6 d，其余三季持续日数均未超过 4 d。

4 结 论

a. 时间变化上，年和季度尺度上干旱覆盖范围都存在 2~6 a 的周期变化，季度尺度上，除秋季主周期为 5.84 a 以外，其他主周期均分布在 2~3 a，并且都通过了置信水平为 0.05 的假设检验。变化趋势上，2000 年以来干旱有加剧的趋势。

b. 空间变化上，干旱整体上是以前衡、邵阳一带，芷江通道一带以西，石门南县以北 3 个地区为中心向其四周递减。

c. 季节变化上，以秋季干旱最为严重，冬季次之，春季干旱最轻。四季干旱范围有较明显的季节波动，冬季和春季空间变化较小，干旱的高发区一般都集中在洞庭湖流域的北部，干旱范围由冬季到夏季有减少的趋势。夏季干旱范围则转移到了双峰、岳阳、衡阳以及零陵的交界地区，干旱发生频率以双峰发生最高；流域北部干旱减弱，干旱整体上向南移动。秋季干旱范围向西南方向移动。冬季北部表现为干旱的多发区。春季干旱发生频率最小。衡阳、零陵、衡阳一带，通道、芷江以北一带以及石门、桑植一带，干旱发生日数较多，南岳以东、平江以南干旱发生日数较少。四季，发生轻旱的日数最多，中旱次之，发生重特旱的日数最少一般

最长不会超过6 d。

参考文献:

- [1] 严登华,袁喆,杨志勇,等. 1961 年以来海河流域干旱时空变化特征分析[J]. 水科学进展,2013,24(1):34-41. (YAN Denghua,YUAN Zhe,YANG Zhiyong,et al. Spatial and temporal changes in drought since 1961 in Haihe River basin[J]. Advances in Water Science,2013,24(1):34-41. (in Chinese))
- [2] 张调风,张勃,王小敏,等. 基于综合气象干旱指数(CI)的干旱时空动态格局分析:以甘肃省黄土高原区为例[J]. 生态环境学报,2012,21(1):13-20. (ZHANG Tiaofeng,ZHANG Bo,WANG Xiaomin,et al. Temporal and spatial analysis of drought for recent 50 years in Loess Plateau of Gansu Province based on meteorological drought composite index [J]. Ecology and Environmental Sciences,2012,21(1):13-20. (in Chinese))
- [3] GIBBS W J, MAHER J V. Rainfall deciles as drought indicators Australian Bureau of meteorology[J]. Bureau of Meteorology Bull,1967,48:32-33.
- [4] 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. (YUAN Wenping,ZHOU Guangsheng. Theoretical study and research prospect on drought indices [J]. Advances in Earth Science,2004,19(6):982-991. (in Chinese))
- [5] 王文,蔡晓军. 长江中下游地区干旱变化特征分析[J]. 高原气象,2010,29(6):1587-1593. (WANG Wen, CAI Xiaojun. Analysis on variation feature of drought in mid-and-lower reaches of Yangtze River Basin[J]. Plateau Meteorology,2010,29(6):1587-1593. (in Chinese))
- [6] GB/T 20481—2006 气象干旱等级[S].
- [7] 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. (XIE Wusan,TIAN Hong, WANG Sheng. Study on the application of the improved CI index in Anhui Province [J]. Meteorological monthly,2011,37(11):1402-1408. (in Chinese))
- [8] 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. (YANG Lihui,GAO Jianyun,SU Rubo,et al. Analysis on the suitability of improved comprehensive meteorological drought index in Fujian Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology,2012,33(4):603-608. (in Chinese))
- [9] 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. (ZHAO Haiyan,GAO Ge,ZHANG Peiqun,et al. The modification of meteorological drought composite index and its application in Southwest China [J]. Journal of Applied Meteorological Science,2011,22(6):698-705. (in Chinese))
- [10] 茅海祥. 五种干旱指数在淮河流域的适用性研究[D]. 南京:南京信息工程大学,2012.
- [11] 王文圣,丁晶,李耀清. 水文小波分析[M]. 北京:化学工业出版社,2005:115-141.
- [12] 汤成友,官学文,张世明. 现代中长期水文预报方法及其应用[M]. 北京:中国水利水电出版社,2008:159-189.
- [13] TORRENCE C, COMPO G P. A practical guide to wavelet analysis[J]. Bulletin of the American Meteorological society, 1998, 79(1): 61-78.
- [14] 尹继尧,朱元清,宋治平,等. Morlet 小波显著性检验和精度分析在地磁场和地震活动性周期分析中的应用[J]. 地震学报,2011,33(5):663-671. (YIN Jiyao,ZHU Yuanqing,SONG Zhiping,et al. Significance test and precision analysis of Morlet wavelet;application to studying periodic variation of earthquake activity and geomagnetic field[J]. Acta Seismologica Sinica, 2011,33(5):663-671. (in Chinese))
- [15] 刘毅睿,谢芊,吕述望. 白噪声序列检验的小波分析方法[J]. 电子技术应用,2005,31(10):48-49. (LIU Yirui,XIE Qian, LYU Shuwang. The wavelet analysis of white noise sequence test[J]. Application of Electronic Technique,2005,31(10):48-49. (in Chinese))
- [16] 郝立生,李新,李月英. 太阳活动变化的小波分析[J]. 干旱气象,2006,24(4):15-19. (HAO Lisheng,LI Xin,LI Yueying. The wavelet analysis of solar activity variation[J]. Arid Meteorology,2006,24(4):15-19. (in Chinese))
- [17] 左利芳,仇财兴. 湖南干旱特征及其对经济的影响[J]. 经济地理,2000,20(2):36-39. (ZUO Lifang,QIU Caixing. The characteristics drought and influence on economy in Hunan [J]. Economic Geography,2000,20(2):36-39. (in Chinese))