

中国近 1000 年旱涝的持续性特征研究*

龚志强^{1)B)} 封国林^{2)B)†}

1) 扬州大学物理科学与技术学院, 扬州 225002)

2) 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029)

3) 国家气候中心, 中国气象局气候研究开放实验室, 北京 100081)

(2007 年 9 月 3 日收到 2007 年 11 月 7 日收到修改稿)

应用中国近 531 年旱涝指数和近 1041 年干湿指数, 定义干旱(湿润)等级, 滑动计算原指数序列各干旱(湿润)等级的出现次数, 发现各等级出现的次数与其窗口长度之间均遵循指数分布 $P_i(x) = Ae^{-\gamma x}$. 结合指数分布的数理意义, 定义指数特征值 γ 的倒数 λ 为描述旱(涝)持续性的尺度因子并对华北和江淮流域旱(涝)发生的持续性特征进行研究. 结果表明: 旱尺度因子的空间分布表现为由北向南呈带状式波动分布, 我国北方地区干旱的持续性相对长江流域要长一些, 由北向南三个区的旱尺度因子的均值分别为 1.87, 1.62, 1.82. 旱涝指数序列中旱或偏旱(涝或偏涝)相对集中的时段对旱(涝)持续性影响较显著, 12 世纪末期、13 世纪早期、17 世纪早期和 20 世纪末期华北和江淮流域发生时间上同步、空间上尺度较大的极端干旱事件的概率较高, 这也从侧面验证了旱涝指数序列中群发现象的存在. 华北地区 1260—1280 年(对应的气候背景为中世纪暖期的末期)的旱涝指数对旱尺度因子的影响较 1980—2000 年(对应的气候背景为 20 世纪全球变暖)的情况更显著; 1260—1280 年这一时段旱或偏旱年数较 1980—2000 年也要多一些. 因此, 在气候较暖的时期可能易发生强度大、范围广的同步干旱事件, 而近 30 年的中国北方干旱化可能是自然变率起主导作用下人为变率和自然变率共同作用的结果.

关键词: 旱(涝)尺度因子, 持续性, 群发性, 指数分布

PACC: 9260X

1. 引 言

气候系统的复杂性主要在于自然因素和人为因素等对其有复杂的相互作用, 同时各种因素作用的区分和定量评估仍是当前一个相当困难的问题^[1]. 古气候记录主要反映了气候的自然变化^[2], 可以提供在没有人类活动影响的或人为因素影响较小的气候实况, 从而揭示过去几百年、几千年甚至是几万年的自然气候变化规律和特征. 同时研究仅有自然因素作用下历史上的各种重大气候灾害有助于我们更好的研究当前人为变率和自然变率共同作用下全球变暖和极端气候事件频繁发生的气候变化. 目前对中国古气候研究已经取得了一定的成果: 杨保等^[3]利用冰芯、树轮、湖泊沉积以及历史文献等代用序列, 建立了中国 2000 年温度变化序列; 施雅风^[4]

等对都兰树轮序列和中国东部、古里雅冰芯以及青藏高原南部温度代用资料从外部特征的角度进行比较, 研究了中世纪暖期以及小冰期等几次重大气候事件的终止时间与特征等; 张德二等^[5]恢复了中国近 531 年旱涝指数发现, 我国南方和西部旱涝的发生往往早于北方和东部, 江淮流域夏季旱涝年往往对应着冬春我国大范围偏冷的特点等.

以往从均值、趋势、相关系数等方面对冰芯、石笋和历史文献记录等古气候数据的研究为当前气候预测提供了可供参考的气候背景^[6-9]. 但我们认为, 气候系统本身是一个非线性的复杂巨系统, 类似于地球系统等均遵循系统最复杂原理(最大熵原理). 因此温度、降水等观测资料以及根据历史文献、代用资料恢复的旱涝指数序列、温度序列等作为气候变化的各种重要表现形式必然也遵循复杂性系统的一些普适性原理. 目前国内外已经有了一些研究, 如:

* 国家重点发展基础科研项目(批准号 2006CB400503)和国家自然科学基金(批准号 90411008 和 40675044)资助的课题.

† 通讯联系人. E-mail: fenggl@cma.gov.cn

Kiraly 等人^[10]利用 DFA 方法对 Hungary 16 个站 1951—1989 年逐日温度资料滤除趋势项后,对衡量温度涨落的物理量进行统计分析发现,逐日温度资料中存在着较好的尺度律特征;Ole 等人^[11,12]定义了降水率,并从该角度对各种不同雨量降水的出现概率进行统计,同样发现了其中存在尺度律特征;曹鸿兴等人^[13]运用去趋势涨落方法(DFA)分析温度和降水序列并发现,北京年平均气温和降水量均可划分为多个标度不变区域,在特定的标度域内,它们都表现出正长程相关的性质,类似的现象在其他的一些记录中也被检测到^[14-16]。这些研究在一定程度上揭示了气候系统也存在无标度特征这一非线性复杂系统的共同属性,从而为制作年际与年代际气候预测提供了理论基础。目前对古气候资料的类似研究还相对较少,特别是对人为因素影响较小时期气候变化内在规律的研究,将有助于我们在较长气候背景下更好地认识气候系统的无标度特征。

旱(涝)的连续发生经常会导致空间尺度较大的重大干旱(洪涝)事件的发生,这些重大气候灾害的后果很多时候是瘟疫流行、蝗害猖獗。因此对旱(涝)持续性发生的规律和机理研究的重要性是不言而喻的。对旱(涝)持续性的研究主要包括:根据历史文献复原旱(涝)持续发生的时段;旱(涝)持续发生时期所对应的气候背景和强迫因子研究等。如张德二等人研究了中国近 1000 年发生的 10 次持续时间较长,空间分布较广的重大干旱事件,其中许多事件的严重程度是最近 50 年所未见的^[17,18]。在前人研究工作的基础上,本文采用张德二等人恢复的近 531 年旱涝指数和近 1041 年干湿指数,初步尝试研究我国华北和江淮流域等地区旱涝指数序列中的无标度特征,从旱涝事件群发性的角度定义旱涝尺度因子进而研究我国华北和江淮流域等地区旱涝的持续性特征及其所对应的气候背景。

2. 资 料

2.1. 近 531 年旱涝指数

本文引用已编制的 120 站点 531 年旱涝指数^[19-21],资料长度为 1470—2000 年,资料分为 5 个等级,1-涝、2-偏涝、3-正常、4-偏旱、5-旱。选取 48 个缺损值不超过 20% 的站点(图 1),其中 20 个站点完全没有缺损。对于旱涝指数缺损的年份,我们根据旱

涝变化具有一定记忆性的原理进行插值。插值的主要思想是:当某一缺损值前面两年的指数值之和大于 4 时该缺损值取为 3—5 之间随机值,若缺损值前面两年的指数值之和小于 4 时该缺损值取为 1—2 之间随机值。通过插值我们可以得到 48 个站点 531 年完整的旱涝指数序列。因为缺损值所占比例相对较低,因此插值过程不会改变原来指数序列的整体特征。根据站点的地理位置,我们将这 48 个站点大致分为 3 个区域分别进行研究。这三个区域分别为:A 华北大部 and 西北东部地区;B 江淮流域地区;C 中南和东南沿海地区。

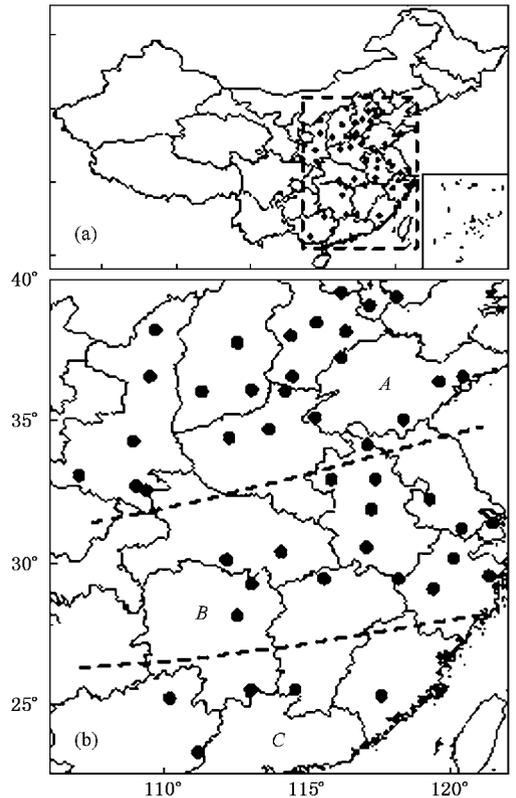


图 1 48 个站点的经纬分布 (a)为 48 个站点在中国的空间分布 (b)为(a)中虚线框的放大,本文选取西安(34.3,108.93)安阳(36.07,114.22)宁波(29.52,121.33)和赣州(25.51,114.57)为 4 个代表站点

2.2. 中国六个区域近 1041 年干湿指数

在 531 年旱涝指数序列的基础上,应用聚类分析方法对 120 个站点进行聚类分区,进而恢复了我国华北及东部六个区域近 1041 年干湿序列^[22],这六个区域分别为:I 河北区,II 山西区,III 黄河下游区,IV 河南区,V 江淮区,VI 苏杭区(图 2)。类似于旱涝指数序列,六个区域的干湿序列也分为五个等

级:1-湿、2-偏湿、3-正常、4-偏干、5-干,其含义与旱涝指数等同.本文中旱涝指数和干湿指数统称为旱涝指数.

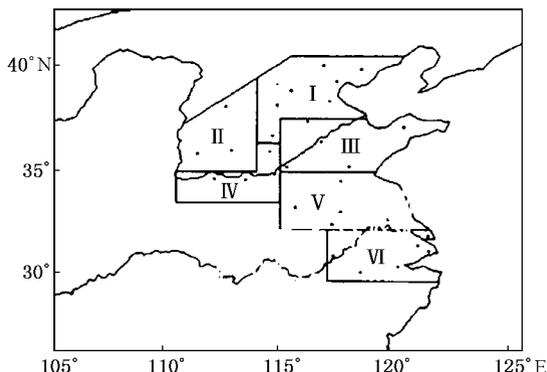


图2 近1000年区域干湿气候序列的分区图^[22] I 河北区, II 山西区, III 黄河下游区, IV 河南区, V 江淮区, VI 苏杭区

3. 结果和分析

3.1. 旱涝尺度因子的定义及空间分布特征

为了定量研究某一段时间内各个站点的干湿程度及旱涝发生的持续性特征,我们在张德二人从年际变化的角度定义旱涝等级的基础上,从旱(或涝)群发性特征的角度定义某一时间窗口的干湿等级.我们分别取不同的窗口长度,对于某一窗口内其4—5指数所占的比例越高则干旱的群发性越强,干的程度越强;反之当1—2所占的比例越高,则涝的群发性越高,湿的程度越强.因此,对于某一宽度的窗口(窗口宽度可取为2—15), g 为某一窗口内4—5(或1—2)所占的年数与窗口宽度的比值.当窗口宽度为2,且 $g \geq \frac{1}{2}$ 时为干旱(湿润)一级;当窗口宽度为3,且 $g \geq \frac{2}{3}$ 时为干旱(湿润)二级;当窗口宽度为4,且 $g \geq \frac{3}{4}$ 时为干旱(湿润)三级……当窗口宽度为 N ,且 $g \geq \frac{N-1}{N}$ 时为干旱(湿润) N 级.显然,干旱(湿润)的等级越高对应有窗口长度越长,窗口内4—5(或1—2)所占比例越高,较高的干旱(湿润)等级大多对应重大旱(涝)极端事件.因此,该方法也可作为重大旱(涝)极端事件的一种可能定义.此外,本文定义干湿等级的方法可以对旱涝的群发性特征、重大极端事件和持续性特征等进行分析.

取窗口宽度为2,滑动步长为1年,滑动统计531年旱涝指数序列中干旱(湿润)一级的出现次数,记为 $P_i(2)$;取窗口宽度为3,滑动步长为1年,滑动统计531年旱涝指数序列中干旱(湿润)二级的出现次数,记为 $P_i(3)$;取窗口宽度为4,滑动步长为1年,滑动统计531年旱涝指数序列中干旱(湿润)三级的出现次数,记为 $P_i(4)$;以此方法分别计算各个干旱(湿润)等级的出现次数 $P_i(N)$.对48个站点分别进行类似的处理,我们发现各等级出现的次数与其窗口宽度之间呈指数分布(图3),即遵循分布

$$P_i(x) = Ae^{-\gamma x},$$

$$i = 1, 2, 3, \dots, 48; x = 2, 3, 4, \dots, 15, \quad (1)$$

其中, $P_i(x)$ 为不同干旱(湿润)等级的出现次数, i 表示站点, x 为窗口长度, γ 为指数分布特征值, A 为常数.各站点旱涝指数序列,其不同干旱(湿润)等级出现的次数与其对应的窗口宽度之间均满足指数分布.这说明各种不同等级的干旱(湿润)事件的发生既带有一定的随机性(即何时发生何种干旱(湿润)等级是不确定的),但各种不同等级的干旱(湿润)事件出现的次数在一个较长的时间段内是遵循一定规律的,并且时间越长,这种规律越明显.旱涝指数的这种规律类似于地球系统中各种等级的地震发生的次数分布服从指数分布,其原因可能在于气候系统、地球系统等各种复杂系统均遵循系统最复杂原理(最大熵原理)^[23-26].

图3为4个代表站点不同干旱(湿润)等级出现次数-窗口宽度的指数分布图.其他站点的指数分布图与此类似,为了节省篇幅这里没有给出图像.结合指数分布的数理意义,这里指数特征值 γ 越大则表示等级较高的干旱(湿润)事件发生的次数较少,不同等级干旱(湿润)事件发生的次数从低到高的衰减速度较快,即连续或多次发生旱(涝)事件的可能性较小,指数特征值 γ 小则相反.因此我们定义旱(涝)尺度因子为

$$\lambda = 1/\gamma, \quad (2)$$

并用于描述旱(涝)发生的持续性特征.显然,由上面的解释容易得到,旱涝尺度因子 λ 大则表示旱(涝)发生的持续性较好,旱涝尺度因子 λ 越小则表示旱(涝)发生的持续性相对较差.由图3可以看出旱尺度因子的值较涝尺度因子偏大,同时我们分别统计了A区、B区和C区内所有站点旱(涝)尺度因子的平均值:A区,1.87(1.66);B区,1.62(1.54);C区,1.82(1.71).因此,就整体而言,旱的持续性较涝的

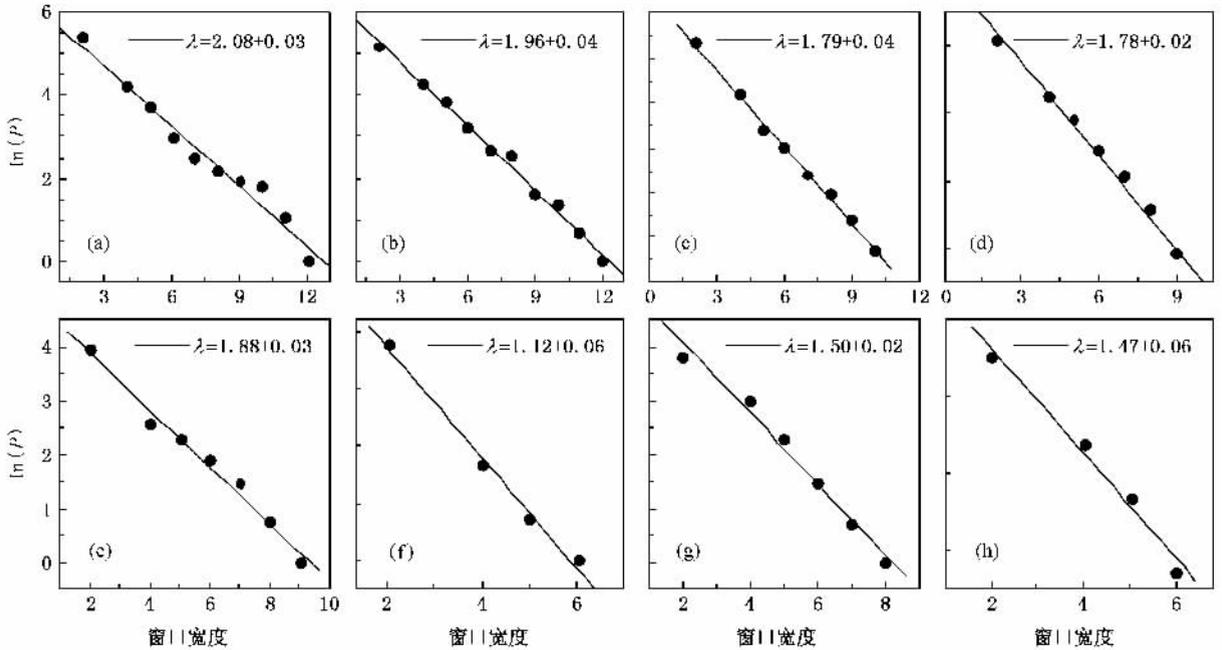


图 3 4 个代表站点的不同干旱(湿润)等级出现次数-窗口宽度的单对数分布图 (a)~(d)和(e)~(h)分别为 4 个代表站点的干旱和湿润等级的分布

持续性更好一些。

图 4(a)为 48 个站点对应的旱尺度因子的空间分布图。可以看出,旱尺度因子的空间分布表现为南、中、北的带状式波动分布。旱尺度因子的大值带主要位于华北西部地区向东南一直延伸至江苏和安徽北部地区,大值中心位于我国华北西部地区。山东的北部和河北的南部地区旱尺度因子值相对小一些。长江流域的四川东部地区、湖北、湖南、贵州、江苏和安徽南部地区和浙江等旱尺度因子的值较小,小值的中心主要位于湖北南部和湖南北部地区。在我国中南部和东南沿海地区旱尺度因子值相对较大,并呈带状分布。旱尺度因子表征了干旱发生的持续性,由此可见我国北方地区干旱的持续性相对长江流域要长一些,即北方地区的干旱往往表现为一段时间内连续出现或多次密集出现,干旱的群发性特征较显著,这可能是造成我国北方地区在历史上多次发生严重干旱化事件的一个重要原因^[27,28]。我国中南部地区和东南沿海地区出现持续旱的可能性也相对较大,但其程度较北方地区相对小一些。为了进一步分析旱涝尺度因子与旱涝年数之间的可能联系,我们统计了 48 个站点近 531 年中旱涝指数值分别为 5/4 和 2/1 的年数。结果表明,旱尺度因子的这一带状式波动分布特征与 48 个站点中每个站点在 531 年内出现旱或偏旱(5/4)年数的空间分布(图 4

(c)较相似,特别是整体上由南向北的带状波动分布和大值中心都较好的吻合,这也佐证了我们结论的可能性。

图 4(b)为 48 个站点涝尺度因子的空间分布图。涝尺度因子的第一个大值区主要分布在华北的天津、山西中部、河南西部以及山东中西部等地区,第二个大值区主要分布在东南沿海的福建。结合涝尺度因子的物理意义,我们可以得到上述地区,涝的持续性相对较好,即某一时间段内连续出现或多次出现涝年的可能性较大,存在涝的群发现象。其小值的中心主要位于华北西北部 and 长江中下游地区,即这两块区域出现涝的持续性相对较低。对比图 4(d)中 48 个站点对应的 531 年内涝年数的空间分布,我们发现其华北和东南沿海地区涝年数较多的两个大值中心与涝尺度因子的大值中心基本吻合,但对于降水量相对较多的长江中下游区域,涝年数较多,但涝尺度因子较小,即涝的持续性较差。出现这一现象的原因可能为 1)长江中下游地区本身是一个受东亚季风、南亚季风等多种因素影响的区域,其旱涝变化相对其他地区更复杂^[29,30]; 2)涝年存在准两年的相对较短的振荡周期^[22],在某一段时间内连续多年出现涝的情况相对较少,从而导致该区域涝年多,但涝的持续性较差。

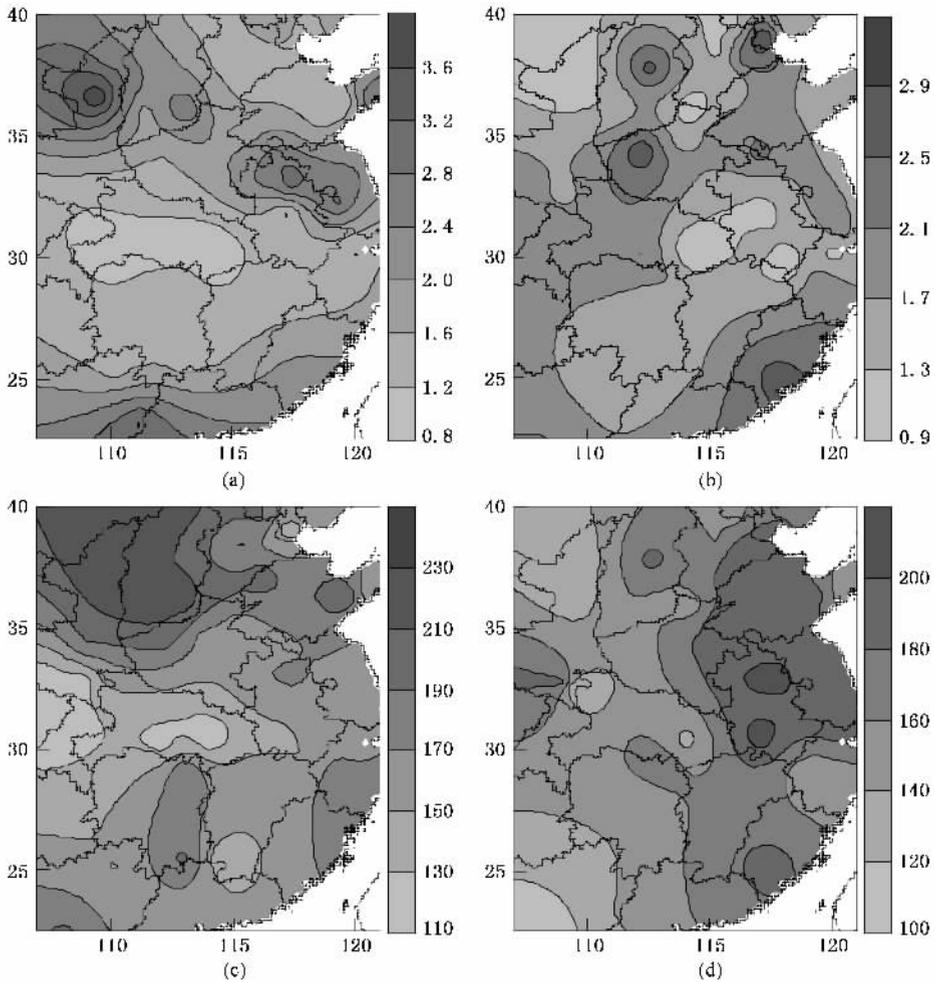


图4 48个站点对应的531年旱涝年数和旱涝尺度因子的空间分布图 (a)旱尺度因子 (b)涝尺度因子; (c)近531年中旱年数 (d)近531年中涝年数

3.2. 旱(涝)尺度因子的时间演化特征

在此基础上了,我们进一步研究哪一时段的旱涝指数对旱尺度因子的影响最大.取窗口长度为20年,在531年的指数序列中,第一次仅仅去除1—20年的旱涝指数值,然后分别计算A区24个站点的旱尺度因子.为了放大由于去除这一窗口的旱涝指数而产生的影响,我们计算A区24个站点旱尺度因子的和;第二次仅仅去除21—40年的旱涝指数值,然后类似地计算A区24个站点旱涝指数序列旱尺度因子的和,然后去除41—60年的旱涝指数的值……,依次类推直至旱涝指数序列的末尾.这样我们可以分别得到A区每次去除某一时段旱涝指数值后各站点的旱尺度因子为

$$\lambda(i) = \sum_{j=1}^{24} \frac{1}{\gamma_j}, (i = 1, 2, \dots, m/\text{win})$$

$$\bar{\lambda} = \frac{\sum_{i=1}^{m/\text{win}} \lambda(i)}{m/\text{win}}, \quad (3)$$

$$\Delta\lambda(i) = \lambda(i) - \bar{\lambda},$$

其中win为窗口宽度, m 为序列长度, $\Delta\lambda(i)$ 为旱尺度因子的距平值(图5(a)).为了进一步验证我们计算结果的可靠性,我们分别取窗口长度为30年和40年,进行上述分析,分别得到图5(b)和(c).

由图5(c)可以看出,去除1470—1510年内、1600—1680年内、1960—2000年内某一时段的旱涝指数值,旱尺度因子的和为明显的负距平值.显然,这几个窗口对应的时期对A区为代表的北方地区的旱尺度因子影响比较大.对比封国林等人^[31]三个分区48个站点旱涝转化的分析结果,我们发现这三个时期恰好都对应了A区三次空间尺度较大的干旱事件,而1960—2000年恰好与我国70年代末80年代初的北方干旱化相一致.因此,空间尺度较大,

时间上同步的重大干旱事件对干旱的持续发生起至关重要的作用。换言之，干旱指数不仅反映其持续性而且还可以检测重大干旱事件。同时，对旱尺度因子影响较大的三个时段对应的气候背景不尽相同，1470—1510 年为中国小冰期的第一阶段^[32, 33]、1600—1680 年为小冰期的最强盛时期^[32, 33]、1960—2000 年则对应了 1920 年以来的全球增暖^[34]。

类似于前文的方法，我们同样计算了 A 区各站点涝尺度因子和的距平值(图 5(d)–(f))。由三种窗口长度的结果可以看出，涝尺度因子距平值大致可以分为三段，分别为 1470—1720 年左右、1720—1920 年左右、1920—2000 年左右，结合封国林等人^[31]对

三个分区 48 个站点各旱涝转化的分析结果，我们发现这三个时期分别对应了干旱或偏旱、湿润、干旱的气候特征，因此近 531 年旱涝指数序列在 1720 年左右、1920 年左右两个转折点。此外，去除 1531—1560 年、1620—1660 年、1700—1740 年和 1780—1920 年等时段的旱涝指数对 A 区涝发生的持续性有不同程度的影响，其中以去除 1780—1920 年时段的旱涝指数的影响最为显著，而这一时期恰好对应了小冰期温度比较低的第三个强盛阶段^[32, 33]。由此可见，去除干旱期的某一段旱涝指数值对涝尺度因子的影响较小，但去除湿润时期的旱涝尺度指数值对于涝尺度因子的影响较大，即在一定程度上降低了涝

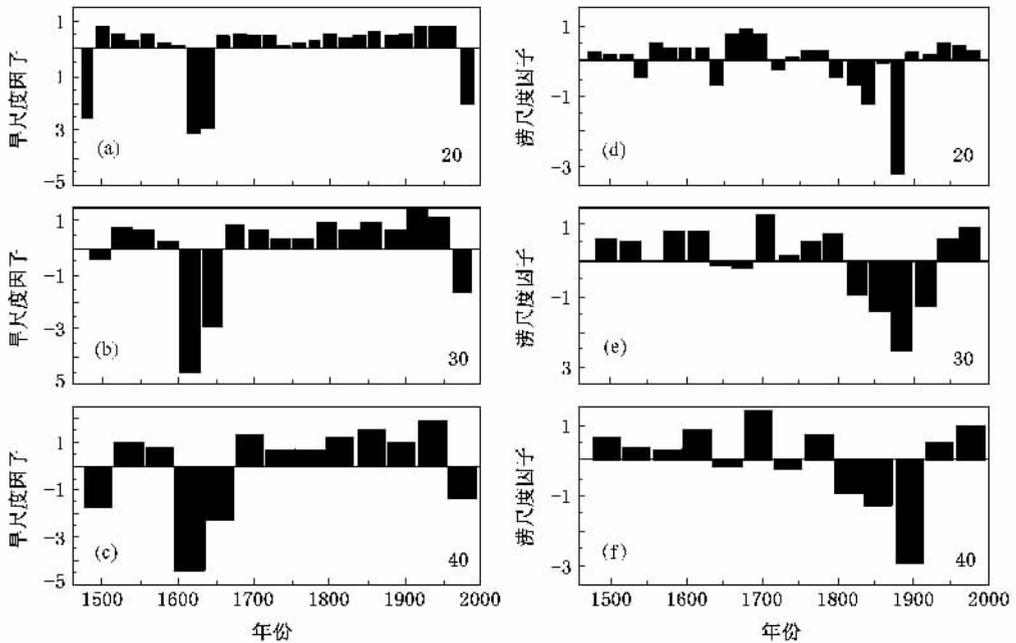


图 5 A 区 24 个站点旱(涝)尺度因子和的距平值(a)–(c)旱尺度因子距平值(d)–(e)涝尺度因子距平值，窗口长度分别取 20, 30, 40)

发生的持续性。

对 B 区各站点的旱(涝)尺度因子进行类似 A 区的分析。图 6 给出了 B 区 18 个站点旱涝尺度因子和的距平值。由图 6(a)–(c)可以看出，去除 B 区 18 个站点旱涝指数序列 1510—1550 年、1630—1670 年和 1870—1950 年时段后，各站点的旱尺度因子都有不同程度的减小，即这些时段的旱涝指数对旱尺度因子的影响较大，其中以 1870—1950 左右的时段最为显著，其对应的气候背景为 1920 年以来的全球增暖^[34]。换言之，1510—1550 年、1630—1670 年和 1910—1950 年三个时段干旱的持续性较显著，存在干旱的群发现象。最近 30 年来，虽然中国北方有大

尺度的干旱化现象，但去除近 30 年的旱涝指数，B 区各站点旱尺度因子的和没有发生显著减小，由此可以得到近 30 年 B 区为代表的江淮流域地区总体表现为偏涝。由图 6(d)–(f)可以看出，去除 B 区 18 个站点旱涝指数序列的 1470—1510 年、1550—1630 年和 1840—1920 年的时段，各站点涝尺度因子都有不同程度的减小，即这些时段的旱涝指数对涝尺度因子的影响较大，其中以 1550—1630 年左右的时段最为显著，其对应了两次小冰期盛期之间的温度回暖期^[33]。换言之，1470—1510 年、1550—1630 年和 1840—1920 年三个时段涝发生的持续性特征较显著。

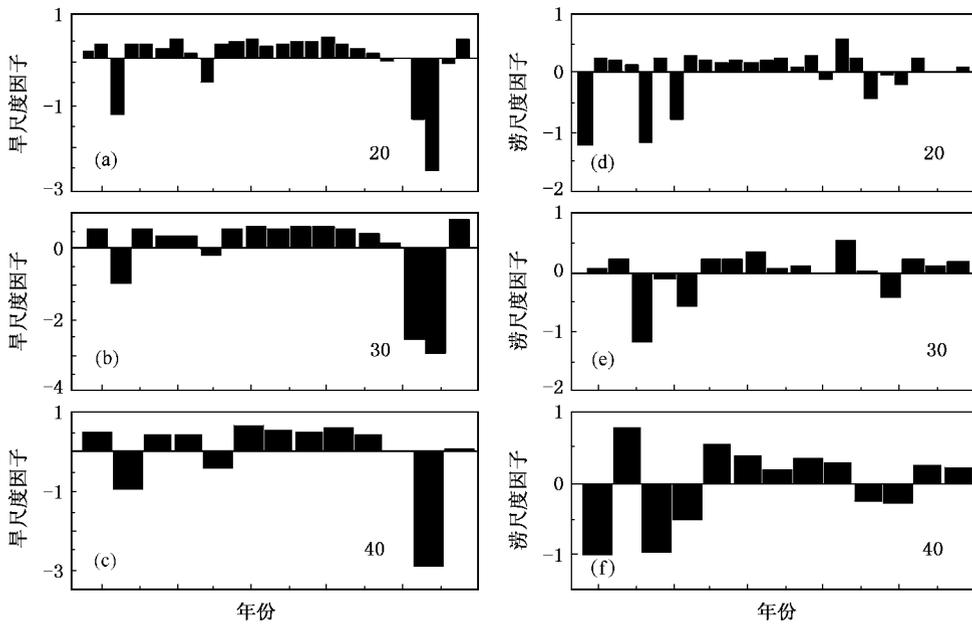


图 6 B 区 18 个站点旱涝尺度因子和的距平值 (a) — (c) 旱尺度因子距平值 (d) — (e) 涝尺度因子距平值, 窗口长度分别取 20, 30, 40)

因此, 通过计算旱(涝)尺度因子, 我们可以得到旱涝持续性的空间分布特征; 滑动计算旱(涝)尺度因子距平值的变化, 我们可以得到哪一时段的旱涝指数对旱(涝)发生的持续性影响较大以及旱涝指数在哪一时期可能发生了转折. 同时, 我们在旱涝指数序列存在长程相关性的基础上进一步验证了旱涝的群发现象, 而旱涝的群发现象可能是影响旱涝指数持续性特征的最要因素.

3.3. 六个区域近 1041 年旱涝持续性特征

类似前文对 48 个站点 531 年旱涝指数的分析, 我们应用中国华北和东部六个区域的旱涝指数(即干湿指数)序列^[22], 从更长的气候背景角度研究近 1041 年中国华北和江淮流域的旱涝持续性特征, 并验证前文研究的可靠性. 我们采用 3.1 节中类似的干湿等级定义方法, 即根据旱或偏旱年连续出现的情况(群发性)定义干旱等级, 同时滑动统计六区域 1041 年内旱涝指数序列中不同干旱等级的出现次数. 我们发现各干旱等级出现的次数与其对应的窗口宽度之间也遵循指数分布(图 7). 这说明在千年尺度和区域尺度上, 各种不同等级的干旱事件其出现次数均服从指数分布, 并且指数分布特征更明显, 指数值 γ 的误差范围更小. 这也佐证了我们前面单站点结论的可靠性. 对 1041 年中六个区域的湿润等级出现次数也进行了类似的研究, 发现存在类似干

旱等级的指数分布特征(为了节省篇幅, 这里没有给出图像).

表 1 为六个区域旱(涝)尺度因子和旱(涝)年数. 由表中可以看出, I—IV 区的旱尺度因子的值较大, 均在 2.0 以上, 即在千年尺度上 I—IV 区干旱的持续性较好, 在某一时期连续或多次出现旱或偏旱年的概率较高, 容易发生时间上同步、空间尺度较大的极端干旱事件. 其中 II 区(山西区)和 III 区(黄河下游区)的旱尺度因子更大, 发生时间上同步、空间尺度较大极端干旱事件的概率更高. V—VI 区的旱尺度因子的值则相对较小, 这表明 V 区和 VI 区干旱的持续性相对差一些, 在某一时期连续或多次发生干旱事件的可能性较小. 同时, 我们分别统计了六个区域近 1041 年的干旱年数发现, I—IV 区干湿序列中旱或偏旱年数较多, V 区和 VI 区干湿序列中旱或偏旱年数较少, 各区域旱尺度因子的值与其相应的旱年数成正比关系, 这也在一定程度上说明了华北地区旱尺度因子值较大、干旱的持续性较好这一结论是可能的. 但涝尺度因子的规律性则相对较差, 主要表现在一、空间分布上并不是江淮流域较大、华北区域较小; 二、涝尺度因子值大的区域未必对应湿或偏湿年数偏少(如 II 区), 涝尺度因子较小的区域却可能对应湿或偏湿年数偏多(如 VI 区). 出现这一现象的原因可能在于江淮流域虽然涝或偏涝的年数较多, 但由于其旱涝变化存在一个准 2 年的震荡周期,

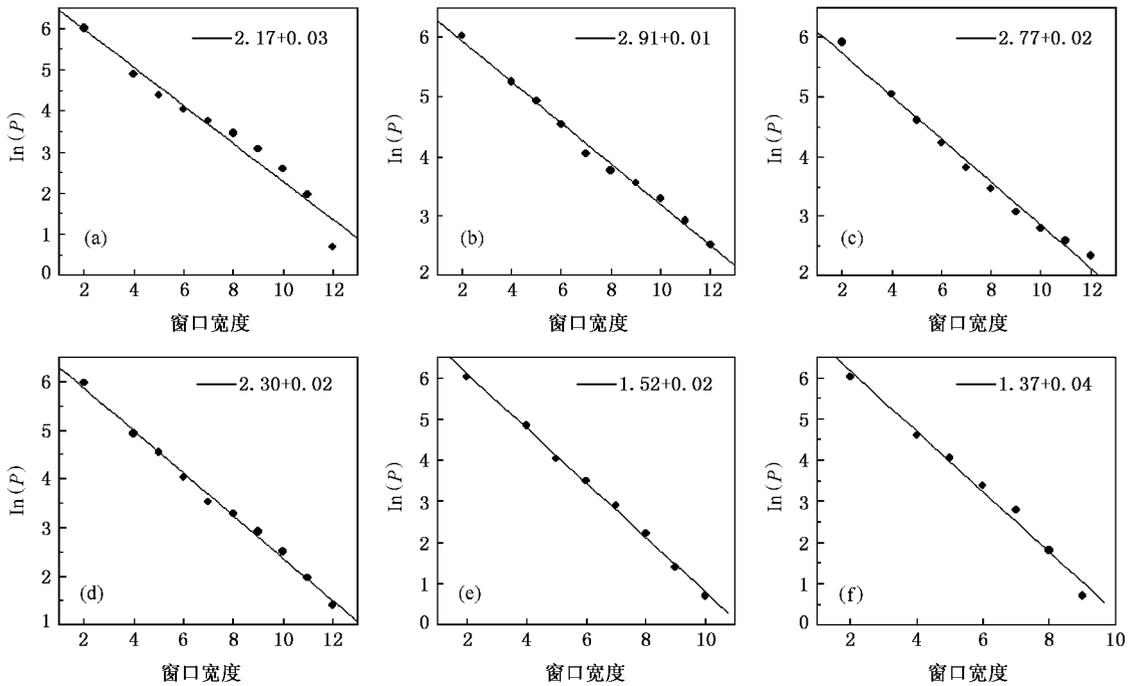


图 7 6 个区域不同干旱等级出现次数-窗口宽度的单对数分布图 (a)~(f) 分别对应 I—VI 区的单对数分布

因此,连续多年出现涝年或旱年的可能性较小,因此代表江淮流域的 V 区和 VI 区的涝尺度因子指数偏小.六个区域旱涝尺度因子空间变化特征与前文统计的 48 个站点旱涝尺度因子的空间分布特征是一致的.因此,无论是近 1000 年尺度还是近 500 年的尺度上,旱涝指数序列中不同等级的干旱(湿润)事件出现次数均遵从指数分布,这是旱涝变化的一个内在属性,旱(涝)尺度因子的空间分布特征是相对稳定的.此外,六个区域旱尺度因子的值较相应的涝尺度因子的值更大,这进一步说明了干旱的持续性比涝更好.

表 1 6 个区域旱(涝)尺度因子和旱(涝)年数

	I	II	III	IV	V	VI
旱尺度因子	2.17	2.91	2.77	2.30	1.52	1.37
旱年数	376	444	388	369	351	329
涝尺度因子	1.83	1.51	1.64	1.57	1.57	1.01
涝年数	357	254	326	342	342	366

为了研究近 1041 年中哪一时段的旱涝指数对这些区域旱(涝)的持续性影响较大,我们采用类似 3.2 节的方法,即滑动去除某一时段的旱涝指数.每次去除窗口宽度为 20 年的旱涝指数.如:首先分别去除 I—VI 区 1—20 年的干湿指数,然后计算其相应的旱涝尺度因子,随后去除 21—40 年的旱涝指数

并计算旱涝尺度因子,依次类推直至序列尾.为了放大去除某一时段的影响,增加统计的有效性,我们将位于华北的 I—IV 区的统计结果进行累加,对位于江淮流域的 V—VI 的结果进行累加.考虑到样本量有限,故没有计算旱涝尺度因子的距平值.

从图 8(a)可以看出,对于 I—IV 区而言,去除 1140—1280 年时段内的某一个 20 年干湿指数后,其旱尺度因子变化较大,特别是去除 1260—1280 年时段的旱涝指数后,旱尺度因子急剧减少.此外,去除 I—IV 区的 1620—1660 年、1980—2000 年时段内的干湿指数后旱尺度因子都有显著的减小.结合旱尺度因子的物理意义可知,在这些时段华北干旱的持续性较好,干旱年或偏旱年经常连续多次出现(干旱的群发现象),即发生极端干旱事件的概率较高(图 8(c)).近 30 年发生的北方干旱化在旱尺度因子的变化中有一定的体现,但就旱尺度因子的变化而言,近 1041 年中,这次干旱事件并不是最强烈的,主要表现为去除 1260—1280 年的旱涝指数后,旱尺度因子的减少较去除 1980—2000 年的情况更显著.我们滑动统计 I—IV 区每个 20 年内旱或偏旱年数发现,旱尺度因子明显减小的时段多对应旱或偏旱年数较多的年份,同时 1260—1280 年的这一时段的旱或偏旱年数较 1980—2000 年也要多一些,这在一定程度上验证了我们结论的可能性.图 8(b)为江淮流域 V

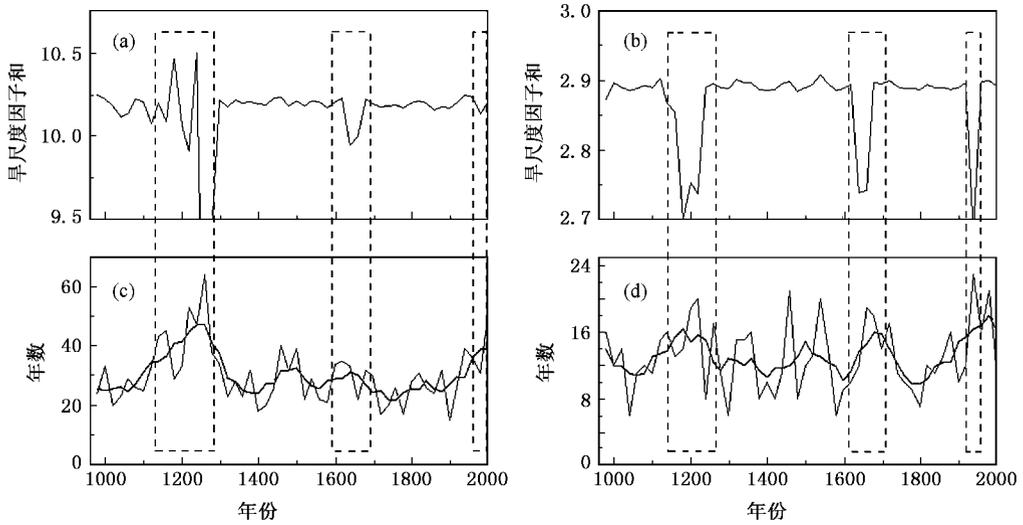


图 8 滑动去除 20 年旱涝指数后华北和江淮流域各区旱尺度因子的和 (a)华北旱尺度因子的和 (b)江淮流域旱尺度因子和 (c)华北每个 20 年内的旱或偏旱年数 (d)江淮流域每个 20 年的旱或偏旱年数 (c)(d)中粗线为 5 点滑动平均

区与Ⅵ区滑动去除 20 年旱涝指数后旱尺度因子的和.从图中可以看出,去除 1140—1260 年、1620—1700 年和 1920—1960 年时段的旱涝指数,Ⅴ区和Ⅵ区的旱尺度因子都有显著减小.图 8(d)为Ⅴ区和Ⅵ区旱或偏旱年数的 20 年滑动统计,旱尺度因子迅速减小的这三个时段均对应旱或偏旱年数较多的时段.由此可见,在 12 世纪末期 13 世纪早期、17 世纪早期和 20 世纪末期华北和江淮流域均发生了时间上同步、空间上尺度较大的极端干旱事件,即华北和江淮流域的干湿特征的大背景是相似的.根据已

有的研究^[36,37],1260—1280 年这一时段恰好对应中世纪暖气的末期,其平均温度在历史上处于较高水平,蒸发量较大在一定程度上导致了时间上同步和空间范围较大的干旱事件的发生.1980—2000 年这一时段对应 20 世纪全球增暖的气候背景,微量降雨的减少、蒸发量较大在一定程度上导致了这一时段的干旱^[34,35];1620—1660 年这一时段则对应了 17 世纪早期的小冰期的盛期,这一阶段干旱的可能原因是温度较低但降水量有所减少^[33,38].

华北Ⅰ—Ⅳ区滑动去除 1240—1380 年、1620—

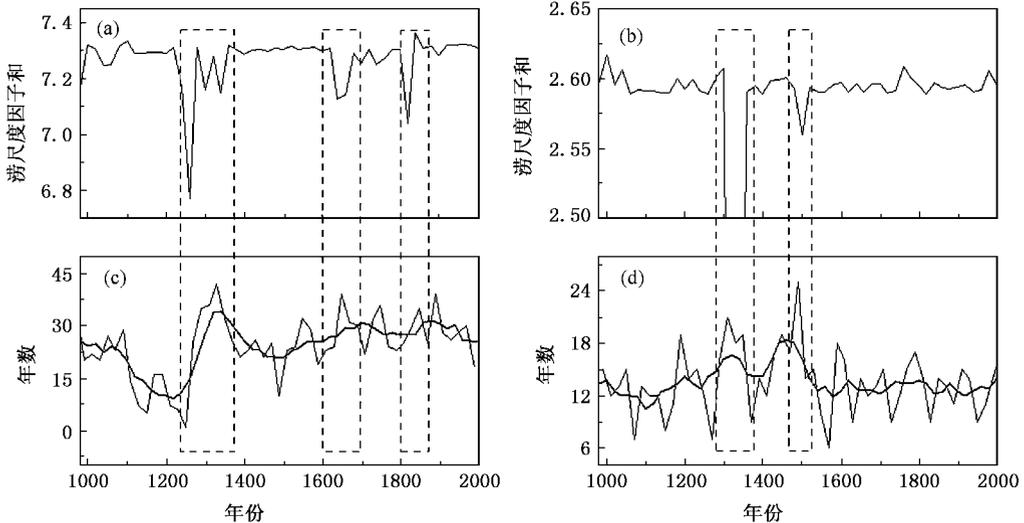


图 9 滑动去除 20 年干湿指数后华北和江淮流域各区涝尺度因子的和 (a)华北涝尺度因子的和 (b)江淮流域涝尺度因子和 (c)华北每个 20 年内的湿或偏湿年数 (d)江淮流域每个 20 年的湿或偏湿年数 (c)(d)中粗线为 5 点滑动平均

1660 年、1800—1840 年旱涝指数后,这四个区域的涝尺度因子显著减小,即这些时段的旱涝指数对华北地区涝发生的持续性影响较大(图 9(a)).同时,Ⅰ—Ⅳ区涝尺度因子明显减小的三个时段,均对应湿或偏湿年数较多(图 9(c)).江淮流域Ⅴ—Ⅵ区去除 1300—1380 年和 1460—1520 年的旱涝指数后,这四个区域的涝尺度因子显著下降,其中以去除 1320—1360 年的旱涝指数后涝尺度因子下降最为显著(图 9(b)和(d)).类似Ⅰ—Ⅳ区,Ⅴ—Ⅵ区涝尺度因子下降的时段也对应涝或偏涝年数较多.涝尺度因子的下降与涝或偏涝年数的高频发生有关联,即涝或偏涝事件的群发性对涝的持续性影响较大.

对比分析 3.1 节、3.2 节中 48 站点 531 年旱涝指数的统计结果和 3.3 节中中国东部六个区域近 1041 年旱涝指数的统计结果发现,就近 531 年而言,两者的不同干旱(湿润)等级与窗口宽度之间均遵循指数分布规律,同时去除某一时段的指数后,两者旱涝尺度因子发生变化的时段也是基本一致的,从一个侧面揭示了旱涝群发现象的存在.因此,旱涝指数序列的中包含的指数分布规律是其重要的本质属性,也是对气候系统最大熵原理的一个重要体现.同时也表明从旱(涝)尺度因子的角度研究旱涝的持续性也是可行的.

4. 结 论

对 48 站点 531 年旱涝指数序列的研究结果表明:

表 2 去除某一段旱涝指数后旱涝尺度因子显著减小的时段

	旱年份	涝年份
华北区 531 年旱涝指数	1470—1510, 1600—1680, 1960—2000	1531—1560, 1620—1660, 1700—1740, 1780—1920
江淮区 531 年旱涝指数	1510—1550, 1630—1670, 1910—1950	1470—1510, 1550—1630, 1840—1920
Ⅰ—Ⅳ区 1041 年旱涝指数	1140—1280, 1620—1660, 1980—2000	1240—1380, 1620—1660, 1800—1840
Ⅴ—Ⅵ区 1041 年旱涝指数	1140—1260, 1620—1700, 1920—1960	1300—1380, 1460—1520

对六个区域近 1041 年旱涝指数序列的研究表明:

1)无论是近 1000 年尺度还是近 500 年的尺度上,旱涝指数序列中不同等级的干旱事件出现次数均遵从指数分布的特征;六个区域旱(涝)尺度因子空间变化特征与 48 个站点旱(涝)尺度因子的空间分布特征是一致,旱涝尺度因子的空间分布特征是相对稳定的.

2)去除某一时段的旱涝指数后,六个区域的旱(涝)尺度因子都有一定程度的变化,在 12 世纪末期

1)根据一段时间内发生干旱或偏旱(涝或偏涝)的年数,即从旱涝事件群发性的角度定义各种干旱(湿润)等级,滑动计算原指数序列各干旱(湿润)等级出现的次数,发现各等级出现的次数与其窗口长度之间均遵循指数分布:

$$P(x) = A * e^{-\gamma x}$$

2)定义指数特征值 γ 的倒数 λ 作为描述旱(涝)持续性的尺度因子,旱尺度因子的空间分布表现为由南向北呈带状式波动分布.我国北方地区干旱的持续性相对长江流域要好一些,涝尺度因子的空间分布特征较复杂,华北的天津、山西中部、河南西部、山东中西部等地区以及东南沿海福建的涝尺度因子较大,出现涝的持续性相对较好,华北西北部和长江中下游地区涝的持续性相对较低.近 531 年华北和江淮区旱(涝)尺度因子的空间分布与旱涝年数的空间分布基本吻合.

3)旱涝指数序列中,旱或偏旱(涝或偏涝)相对集中的时段对旱(涝)的持续性影响较显著,滑动去除 531 年旱涝指数序列中的每个 20—40 年的时段发现,表 2 中给出的时段对华北和江淮流域地区的旱(涝)尺度因子影响较大,这些时段发生等级较高的干旱(湿润)事件的概率较高,也从一个侧面验证了旱涝指数序列中的群发现象的存在.同时,干旱或涝的群发期,大都对应于中世纪暖期、小冰期的三个阶段以及全球变暖的气候背景,其中温度增暖时期的发生干旱事件的强度和概率相对更大.

13 世纪早期、17 世纪早期和 20 世纪末期华北和江淮流域均发生了时间上同步、空间上尺度较大的极端干旱事件,即华北和江淮流域的干湿特征的大背景是相似的(表 2);对六个区域涝尺度因子的分析也有类似的结果.

1260—1280 年(对应的气候背景为中世纪暖期的末期)的旱涝指数对旱尺度因子的影响较 1980—2000 年(对应的气候背景为 20 世纪全球增暖)的情况更显著,1260—1280 年这一时段旱或偏旱年数较

1980—2000 年也要多一些. 因此, 在气候较暖的时期可能易发生强度大、范围广的同步干旱事件, 近 30

年的中国北方干旱化可能是自然变率起主导作用下人为变率和自然变率共同作用的结果^[39].

- [1] IPCC 2001 *Climate Change* (UK : Cambridge University Press) p24
- [2] Overpeck J , Trenberth K 2003 *A Multi-Millennia Perspective on Drought and Implications for Future* (Drought Summary In : CLIVAR/PAGES/IPCC Workshop) p18
- [3] Yang B , Braeuning A Johnson K R , Shi Y F 2002 *Geophys. Res. Lett.* **29** 1324
- [4] Yang B , Kang X C , Shi Y F 2000 *Scientia Geographica Sinica* **20** 397 (in Chinese) [杨 保、康兴成、施雅风 2000 地理科学 **20** 397]
- [5] Zhang D E 1983 *Journal of Metrological Science and Technology* (*Climate and dry/wet*) **40** (in Chinese) [张德二 1983 气象科学技术集刊 (气候与旱涝) **40**]
- [6] Yao T D , Thompson L G 1992 *Science in China* (Series B) **10** 1089 (in Chinese) [姚檀栋、Thompson L G 1992 中国科学 (B 辑) **10** 1089]
- [7] Wang S W , Ye J L , Gong D Y , Zhu J H , Yao T D 1998 *Quarterly Journal of Applied Meteorology* **9** 392 (in Chinese) [王绍武、叶瑾琳、龚道溢、朱锦红、姚檀栋 1998 应用气象学报 **9** 392]
- [8] Wan S Q , Feng G L , Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5487 (in Chinese) [万仕全、封国林、董文杰 2005 物理学报 **54** 5487]
- [9] Gong Z Q , Feng G L 2007 *Acta Phys. Sin.* **56** 3619 (in Chinese) [龚志强、封国林 2007 物理学报 **56** 3619]
- [10] Kiraly A , Janosi M 2002 *Phys. Rev. E* **65** 051102
- [11] Ole P , Christopher H , Kim C 2002 *Phys. Rev. Lett.* **88** 018701
- [12] Pelletier J D 1997 *J. Climate* **10** 1331
- [13] Cao H X , Zheng Z F , Zhang X L , Xie Z , Pan J H 2007 *Chinese Journal of Geophysics* **50** 420 (in Chinese) [曹鸿兴、郑祚芳、张秀丽、谢 庄、潘家华 2007 地球物理学报 **50** 420]
- [14] Jiang T H , Den L T 2005 *Plateau Metrology* **24** 10 (in Chinese) [江田汉、邓莲堂 2005 高原气象 **24** 10]
- [15] Bartos I , Janosi I M 2006 *Nonlinear Process in Geophysics* **13** 571
- [16] Liu S D , Rong P P , Chen J 2000 *Acta Metro. Sin.* **58** 111 (in Chinese) [刘式达、荣平平、陈 炯 2000 气象学报 **58** 111]
- [17] Zhang D E 2000 *Acta Geographica Sinica* **55** 106 (in Chinese) [张德二 2000 地理学报 **55** 106]
- [18] Zhang D E 2004 *Science & Technology Review* **8** 47 (in Chinese) [张德二 2004 科技导报 **8** 47]
- [19] Zhang D E 1980 *Chinese Science Bulletin* **25** 270 (in Chinese) [张德二 1980 科学通报 **25** 270]
- [20] Metrological Research College of China Metrological Administration 1981 *Wet and dry Distribution in China of Past 500 Years* (Beijing : Map Press) p1 (in Chinese) [中央气象局气象科学研究所 1981 中国近五百年旱涝分布图集 (北京 : 地图出版社) 第 1 页]
- [21] Zhang D E 1983 *Journal of Metrological Science and Technology* (*Climate and dry/wet*) **4** 17 (in Chinese) [张德二 1983 气象科学技术集刊 (气候与旱涝) **4** 17]
- [22] Zhang D E , Liu C Z , Jiang J M 1997 *Quaternary Sciences* **1** 1 (in Chinese) [张德二、刘传志、江剑民 1997 第四纪研究 **1** 1]
- [23] Feng G L , Dong W J , Gong Z Q , Hou W , Wan S Q , Zhi R 2006 *Nonlinear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing : Metrological press) p110 (in Chinese) [封国林、董文杰、龚志强、侯 威、万仕全、支 蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京 : 气象出版社) 第 110 页]
- [24] Bak P , Tang C , Wiesenfel K J 1990 *J. Appl. Meteorol.* **29** 1167
- [25] Gutenberg B , Richer C F 1994 *Bull. Seismol. Soc. Am.* **34** 185
- [26] Frette V , Christensen K , Malthe-Sorensen A , Feder J , Jossang T 1996 *Nature* (London) **379** 49
- [27] Ma Z G , Fu Z B 2006 *Chinese Science Bulletin* **51** 2429 (in Chinese) [马柱国、符宗斌 2006 科学通报 **51** 2429]
- [28] Ma Z G , Huang G , Gan W Q , Chen M L 2005 *Atmosphere Science* **29** 671 (in Chinese) [马柱国、黄 刚、甘文强、陈明林 2005 大气科学 **29** 671]
- [29] Huang R H 1990 *Atmosphere Science* **14** 108 (in Chinese) [黄荣辉 1990 大气科学 **14** 108]
- [30] Shi N , Feng G L 2003 *Acta Metro. Sin.* **61** 237 (in Chinese) [施 能、封国林 2003 气象学报 **61** 237]
- [31] Gong Z Q , Feng G L , Song L C 2008 *Acta Metro. Sin.* **58** 1013 (in Chinese) [龚志强、封国林、宋连春 2008 气象学报 **58** 1013]
- [32] Wang S W , Ye J L , Gong D Y 1998 *Quaternary Sciences* **1** 54 (in Chinese) [王绍武、叶瑾琳、龚道溢 1998 第四纪研究 **1** 54]
- [33] Zhu K Z 1973 *Science in China* **16** 226 (in Chinese) [竺可桢 1973 中国科学 **16** 226]
- [34] Wang S W 2006 *Progress in Modern Climate Research* (Beijing : Metrological Press) p80 (in Chinese) [王绍武 2006 现代气候学研究进展 (北京 : 气象出版社) 第 80 页]
- [35] Zhi R , Gong Z Q , Wang D Y , Feng G L 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 1837 (in Chinese) [支 蓉、龚志强、王德英、封国林 2006 物理学报 **55** 1837]
- [36] Dai X G , Fu Z B , Wang P 2005 *Chin. Phys.* **14** 850
- [37] Briffa K R , Bartholin T S , Eckstein D 1990 *Nature* **346** 434
- [38] Gong Z Q , Feng G L , Wan S Q , Li J P 2006 *Acta Phys. Sin.* **55** 477 (in Chinese) [龚志强、封国林、万仕全、李建平 2006 物理学报 **55** 477]
- [39] Feng G L , Gong Z Q , Dong W J 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林、龚志强、董文杰 2005 物理学报 **54** 5494]

The research of durative characteristics of dry/wet series of China during the past 1000 years^{*}

Gong Zhi-Qiang^{1,2,3}† Feng Guo-Lin^{2,3}†

¹ Department of Physics Yangzhou University, Yangzhou 225002, China)

² Key Laboratory of Regional Climate-Environment for Temperate East Asia, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029, China)

³ Laboratory for Climate Studies, National Climate Center, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China)

(Received 3 September 2007 ; revised manuscript received 7 November 2007)

Abstract

Using dry/wet index series of China during the past 531 years and 1041 years, by defining the dry (wet) grade and making running calculation of the appearance times of each dry (wet) grade in the original index series, it was shown that there is an exponential distribution $P(x) = A^* e^{-\gamma x}$ of the appearance times of each grade with respect to the window size. We defined $1/\gamma$ as the scale factor to characterize the dry (wet) durative and used it to analyze the dry (wet) durative of north China and the area between Yangtze and Huai rivers. Results show that the dry factor has the semi-belt wave distribution from north to south, the dry durative in north China is somewhat longer than that between Yangtze and Huai rivers, the average dry factors of area A, B and C are 1.87, 1.62 and 1.82, respectively. The dry (wet) durative is rather obvious in those intervals in which dry or wet are comparatively concentrated, so the large spatial scale and synchronized extreme dry accidents are easier to happen during the end of 12th century, the beginning of 13th century, the beginning of 17th century and the end of 20th century, which verifies the existence of cluster phenomena in the dry/wet index. The influence to dry durative in north China caused by the dry/wet index during 1260—1280 (the climate back ground being the end of the middle ages warm) was much larger than that caused by the index during 1980—2000 (the climate background being the global warming). Furthermore, the number of dry years during 1260—1280 was also larger than that of 1980—2000. Obviously, serious, larger spatial scale and synchronized extreme dry accidents are easy to happen in warm periods, and the drought since 1970s in north China might be caused by co-operation of human and natural factors, in which the natural factor might have played the more important role.

Keywords : dry (wet) scale factors, durative, cluster, exponential distribution

PACC : 9260X

^{*} Project supported by the State Key Development Program for Basic Research (Grant No. 2006CB400503) and the State Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 90411008 and 40675044).

[†] Corresponding author. E-mail : fenggl@cma.gov.cn