

李蔼恂, 肖辉, 周筠珺, 等. 2012. 河南省春季和秋季降水时空变化的特征研究 [J]. 气候与环境研究, 17 (6): 884–896, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.25. Li Aixun, Xiao Hui, Zhou Junjun, et al. 2012. Characteristics of spatio-temporal distribution of spring and autumn precipitation in Henan Province [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (6): 884–896.

河南省春季和秋季降水时空变化的特征研究

李蔼恂^{1,2} 肖辉² 周筠珺¹ 杨慧玲² 鲍向东³

1 成都信息工程学院大气科学学院, 成都 610225

2 中国科学院大气物理研究所云降水物理与强风暴实验室, 北京 100029

3 河南省人工影响天气办公室, 郑州 450003

摘 要 进行人工增雨作业和规划必须了解目标地区的气候背景, 才能有较好的作业效果, 因此根据河南省 1971~2001 年 114 个气象站点 4 月和 10 月的降水资料, 采用具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法进行分区, 并在此基础上对降水距平百分率、降水强度和雨日数等参数作分析, 研究其各分区降水的时、空变化特征和演变规律。结果表明: (1) 河南省 4 月和 10 月降水量和雨日数具有明显的区域性分布特征, 均呈现北少南多、东北少西南多的特点; 月平均降水量从北向南增大主要是雨日数从北向南的增加起决定性的作用, 其中以中雨雨日数的增加起主导作用。(2) 4 月各分区降水量和雨日数的年际演变趋势均呈减少趋势; 10 月各分区的降水量呈减少趋势, 但雨日数的年际演变呈现不同的趋势, 个别分区强度较小降水(小雨和中雨)的雨日数呈增加趋势。(3) 从旱涝年份情况上看, 4 月和 10 月各分区在 31 年中均以干旱、少雨年居多, 并且均以无降水日、小雨雨日占多数。其中, 4 月河南省最北部的分区(分区 1)和最南部的分区(分区 5)是干旱年出现最为频繁的区域, 其余分区干旱年出现的频数较接近; 各等级强度降水的雨日数均以分区 5 最多, 以分区 1 最少; 10 月河南最北部的分区(分区 1)是旱涝年发生最为频繁的区域, 其余分区旱涝年出现频数较接近, 各等级强度降水的日数均以河南最南部的分区(分区 4)最多, 而分区 1 最少。这些结果对河南省开展人工增雨作业布局规划和人工增雨效果检验是有重要参考价值的。

关键词 降水 聚类分区 时空分布 变化趋势 人工增雨

文章编号 1006-9585 (2012) 06-0884-13

中图分类号 P481

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2012.06.25

Characteristics of Spatio-Temporal Distribution of Spring and Autumn Precipitation in Henan Province

LI Aixun^{1,2}, XIAO Hui², ZHOU Junjun¹, YANG Huiling², and BAO Xiangdong³

1 School of Atmospheric Science, Chengdu University of Information Technology, Chengdu 610225

2 Laboratory of Cloud-Precipitation Physics and Severe Storms, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

3 Henan Province Weather Modification Office, Zhengzhou 450003

Abstract To achieve more effective operation, the climate background of the target area must be understood when conducting artificial precipitation enhancement operations. A total of 114 meteorological stations in Henan Province were partitioned by cluster analysis with the statistical test method on the basis of precipitation data of April and October

收稿日期 2012-04-23 收到, 2012-09-20 收到修定稿

资助项目 国家公益性行业(气象)科研专项经费项目 GYHY(QX)201006031, 青海省三江源人工增雨工程科技支撑计划项目 2009-Q-04, 国家自然科学基金项目 40875080

作者简介 李蔼恂, 女, 1985 年出生, 硕士研究生, 主要从事雷达气象和人工影响天气的研究。E-mail: liaixun@163.com

通讯作者 肖辉, E-mail: hxiao@mail.iap.ac.cn

during 1971–2001. The regional characteristics of temporal and spatial distributions of precipitation and their variation tendency in this province were then analyzed by precipitation anomaly percentage, precipitation intensity, and number of rain days. The distributions of precipitation and rain days of April and October showed remarkable regional characteristics, increasing from north to south and from northeast to southwest. The regional feature of monthly rainfall was determined mainly by the distribution of rain days with an increase tendency from north to south, in which the increase of moderate rain days plays a decisive role. The yearly variation trends of precipitation and rain days of April in each partitioned area decreased during the 31-year period, and the yearly variation trends of precipitation of October in all partitioned areas are decreased. However, the rain days with different intensities in October showed a different yearly trend; those with weak intensities in individual areas tended to increase. Among the 31 years, dry years and insignificant rain years were dominant both in April and October, and the days of little or no rain occurred often. A comparison of the distributions of precipitation and rain days in the six partitioned areas of April revealed that Area 1 and Area 5, which are located in the northern and southern parts of Henan Province, respectively, had most frequent drought occurrence; and the remaining areas showed similar frequencies of drought occurrences during the dry years. Area 5 had the most rain days with varied rain intensity, while Area 1 had the least. For the distributions of precipitation and rain days of the four partitioned areas of October, Area 1 showed the highest frequency of drought and flood occurrences; the remaining areas showed similar frequencies of drought occurrences during the dry years. Area 4, which is located in the southern part of Henan Province, had the most rain days, while Area 1 has the least. The results of this study can provide an important reference for the layout, planning, and effectiveness evaluation of artificial rain enhancement projects.

Keyword Precipitation, Cluster analysis, Spatio-temporal distribution, Variation tendency, Rain enhancement

1 引言

目前, 针对以抗旱和蓄水为目的的人工增雨播云作业, 其效果检验主要采用非随机化的试验方案, 包括非随机化的序列试验、历史回归试验、多因子分层回归试验、固定目标区的区域对比试验和移动目标区的区域对比试验等方案, 为播云有效性提供了一定证据(叶家东和范蓓芬, 1982; 叶家东和李铁林, 2001; 李大山等, 2002; 房彬等, 2005, 2008a, 2008b)。这些效果评价方案均以历史同期降水样本作为对比参考单元, 并对降水时空分布的均匀性和同步性作了不同的假设。但实际上, 降水时空分布变化(或者说区域气候变化)对效果评价的客观性和科学性有极为重要的影响, 且不同的试验方案对降水的区域气候变化的依赖关系也有所不同。马京津等(2006)分析了华北地区春季和夏季降水特征与气候相关性, 认为华北地区春、夏年代际与年际降水变化特征有一定的差别。孙安健和郭艳君(2003)研究认为, 我国西北东部旱涝事件频繁, 而整个西北地区春季严重雨涝的发生多于严重干旱, 且自 20 世纪 80 年代以来严重旱涝的发生有增加的趋势。周连童和黄荣辉(2006)通过对我国夏季降水的年代际变化特征的分析, 得出我国在 1976 年前后夏季降水发生了一次明显的气候跃变, 在 1976 年之后华北地区和黄河流域出现了明

显的夏季降水减少趋势, 而西北地区从 20 世纪 70 年代后期降水开始增多。曾光平等(1998)曾采用统计数值模拟方法分析了福建省降水气候变化对人工增雨效果评价结果的影响, 分析结果表明, 在降水偏多年份开展人工增雨使效果评价结果产生“正噪声”, 而在降水偏少年份开展人工增雨使效果评价结果产生“负噪声”。我国地域广阔, 天气气候、地理环境、降水分布差异极大, 意欲在一个地区进行有效的人工增雨作业, 期望取得较好的人工增雨效果, 在开展人工增雨方案设计时, 分析当地降水的时空分布特征及降水的区域性差异是非常有必要的。

为了抗旱和蓄水的需要, 近年来河南省每年在春、秋季均开展不同形式的人工增雨作业。但河南省地形复杂, 地势上西高东低, 西部山地, 中部丘陵, 东部平原, 使得其降水的空间分布很不均匀, 这就需要寻求一种更加科学、合理的分区方法, 以更准确地反映区域间降水空间异常的分布情况。目前, 通常是根据地理环境和气候特征(黄荣辉等, 1999; 左洪超等, 2004; 林云萍和赵春生, 2009)、通过经验函数正交分解 REOF(江志红和丁裕国, 1994; 王小玲和屠其璞, 2002; 李周等, 2008)或旋转经验函数正交分解(焦建丽和康雯瑛, 2007; 杨绚和李栋梁, 2008)等方法判断降水的空间异常, 进而进行分区。然而, 前者在一定程度上存在主观性, 后者虽然能够反映特征向量的空间分布结构,

但由于其本身所解得的特征向量（典型场）并非唯一而给最终分区增加了困难（江志红和丁裕国，1994）。

在气候上，河南省北部为暖温带，南部为亚热带，又受季风的影响，使得该地区降水的空间分布及年内分布很不均匀。河南省夏季降水量约占全年降水量的 50%~60%，而春、秋和冬季降水量较少；全年四季都可能发生干旱，春旱最为频繁，其次是秋旱。因此，在河南省，春、秋季是最需要开展人工增雨作业的季节，了解这两个季节降水的时空变化特征及其演变规律对开展有效的人工增雨作业非常有必要。然而，以往关于河南省降水特征的研究多集中在全年或汛期（6~8 月）降水的变化及趋势上（孙景兰和徐文明，2008），而对春、秋季降水变化和区域性分布特征的研究较少。孙杰等（2010）曾分析近 45 年华中地区 3 省降水的时空变化特征，分析得出春、秋季降水量呈减少趋势，减少速率为 $5.5 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ 和 $9.7 \text{ mm} (10 \text{ a})^{-1}$ ；降水日数的变化趋势与降水量的相似。焦建丽和康雯瑛（2007）选取河南省 1961~2005 年 65 个站的年降水资料，采用 REOF 方法对河南省年降水进行分区，得到豫南区、豫北区、豫西区和豫东区 4 个分区，降水存在明显的区域差异，全省年平均降水呈南多北少的空间分布特征；分析还显示，豫东南区域降水随时间呈增加趋势，而豫西区和豫北区呈减小趋势，但他们没有单独对春秋两季的降水演变特征进行分析。

房彬等（2005）提出了基于聚类分析的适合于移动播云作业的人工增雨效果统计检验方案（Cluster-Analysis-based Floating Control historical regression Method, CA-FCM），给出了具有一定物理基础的试验区人工增雨的效果，但在聚类层次的选择上存在一定人为性。为了解决这个问题，翟羽等（2006，2008）提出了基于具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法，并对河南省 1971~2001 年 4 月和 10 月的降水进行更科学的分区，然后，利用分区结果对人工增雨效果进行统计检验，取得了较好的统计结果，提高了检验功效。其原因是具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法在进行聚类同时对并为同一类的样本进行了显著性检验，因而，提高了分区的科学性，使结果更合理。但在他们的文章中没有分析这些分区的降水变化特征以及这些分区降水之间的气候关系。因此，本

文在翟羽等（2006，2008）所得到的河南省 1971~2001 年降水分区结果的基础上，采用统计分析方法，研究河南省春季（4 月）、秋季（10 月）各分区降水的气候统计关系和时空分布特征、变化趋势及不同强度降水日数的时空演变特征，以期进一步认识河南省降水的区域分布特征和变化规律，为当地人工增雨作业布局规划和人工增雨效果检验提供重要依据，为未来降水趋势预测提供参考。

2 资料和方法

根据抗旱型和蓄水型人工增雨业务的需要，河南省在春、秋季一般选择出现小雨或小到中雨的大范围稳定性层状云降水过程实施飞机增雨作业（陶树旺等，2001）。考虑到进行历史回归的前提假设即是作业期作业区与对比区雨量的统计相关关系与历史上同类天气条件下雨量的区域相关性相同（叶家东和李铁林，2001），因此，本文选择河南省 1971~2001 年（资料的时间序列长度为 31 年）114 个站点 4 月（代表春季）和 10 月（代表秋季）逐日 24 h 累积降水量作为统计资料。由于采用具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法进行分区，能使分区更合理，增雨作业效果的检验更科学（Gong and Richman，1995）。翟羽等（2006，2008）采用该方法将河南省 4 月的降水区分成 6 个分区，10 月的降水区分成 4 个分区。本文在此分区结果的基础上，首先分析全省 4 月和 10 月 31 年的平均降水量分布特征；然后，分析各分区 31 年的降水距平百分率序列，结合线性趋势方法和 9 年滑动平均方法分析各分区降水的年际和年代际变化特征，并统计分析各分区的旱涝情况；最后，分析 4 月和 10 月各分区降水强度和降水日数的时空变化特征。

3 结果与分析

3.1 降水的时空变化特征

人工增雨效果统计检验的核心内容是显著性检验，即如果实测雨量和估计雨量之间有差异的话，就要对这个差值进行统计检验，指出由于降水的自然变差引起这么大差异的可能性有多大（叶家东，1979）。若可能性大，则认为人工增雨效果不显著；反之，则效果显著。降水时空分布的变化将

影响人工增雨效果评估的客观性和科学性(曾光平等, 1998), 而选择合适的天气条件和有利的催化时机对于提高催化效果是十分重要的(叶家东等, 1981)。叶家东等(1981)认为, 人工增雨试验效果随着对比区自然雨量增大而减小, 但绝对增雨量却是随之增加的。因此, 了解试验区人工增雨作业时段降水的时空变化特征非常有必要。下面分析河南省 31 年来 4 月和 10 月各分区降水的时空变化特征。

3.1.1 降水的聚类分区和空间分布特征

根据 1971~2001 年河南省 114 个站点 4 月和 10 月逐日 24 h 累积降水量, 采用具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法(么枕生, 1994)对河南省进行聚类分析, 具体思路是选用欧氏距离平方和最近邻法, 即首先用两类间最近点的距离代表两类间的距离来计算两类间的相似性, 合并最近的或最相似的两项, 然后, 进行分类显著性检验。根据这个分类方法将河南省 4 月和 10 月的降水分别分成 6 个分区和 4 个分区(翟羽等, 2008)。这个分区结果显示, 4 月的降水比 10 月的存在更大的空间变异。图 1 给出了 4 月和 10 月的聚类分区情况。由图 1 可看到, 4 月的分区划分在河南省南部呈现带状分布, 而在北部则表现为局部区域的分布特点, 其中, 分区 1 有 32 个站点, 位于河南省正北部地区, 分区 2 有 10 个站点, 位于河南省中东部地区, 分区 3 有 17 个站点, 位于河南省东北部地区, 分区 4 有 14 个站点, 位于河南省西北部地区, 分区 5 有 11 个站点, 位于河南省南部地区, 分区 6 有 30 个站点, 位于河南省中南部地区; 10 月的分区划分则呈现纬向带状分布态势, 其中, 分区 1 有 31 个站点, 位于河南省北部, 分区 2 有 16 个站点,

位于河南省中南部地区, 分区 3 有 57 个站点, 位于河南省中部地区, 分区 4 有 10 个站点, 位于河南省最南部地区。表 1 和表 2 分别给出了河南省 4 月和 10 月各分区之间降水量的相关系数, 可看出, 相邻两个分区降水之间的相关性明显优于距离较远的两区降水的相关性(翟羽, 2006), 表明相邻两个分区降水之间存在较密切的关系, 而距离较远的两个分区降水之间相关性不高。这就是为什么在以往的人工增雨效果统计中将不同类型特性的站点雨量笼统地进行合并统计所得结果功效不高、增雨效果不显著的原因所在。房彬等(2008a)比较分析了 CA-FCM 人工增雨效果检验方案与作业区域趋势对比双比分析检验方案、区域趋势相关回归分析检验方案、区域趋势协变量多元回归分析检验方案、浮动对比区历史回归分析检验方案(Floating Control historical regression Method, FCM)的功效, 研究结果表明, CA-FCM 人工增雨效果检验方案由于采用了聚类分析提高了人工播云影响区和对比区相关系数以及引入物理协变量提高了作业区自然降水量估计值的准确性, 从而比其他检验方案效果更好。

表 1 河南省 4 月各分区之间降水量的相关系数(翟羽, 2006; 翟羽等, 2008)

Table 1 Correlation coefficients of precipitation between different areas of Henan Province in April (Zhai, 2006; Zhai et al., 2008)

相关系数	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4	分区 5	分区 6
分区 1	1.000	0.555	0.815	0.809	0.539	0.590
分区 2	0.555	1.000	0.777	0.601	0.664	0.800
分区 3	0.815	0.777	1.000	0.717	0.569	0.736
分区 4	0.809	0.601	0.717	1.000	0.661	0.758
分区 5	0.539	0.664	0.569	0.661	1.000	0.796
分区 6	0.590	0.800	0.736	0.758	0.796	1.000

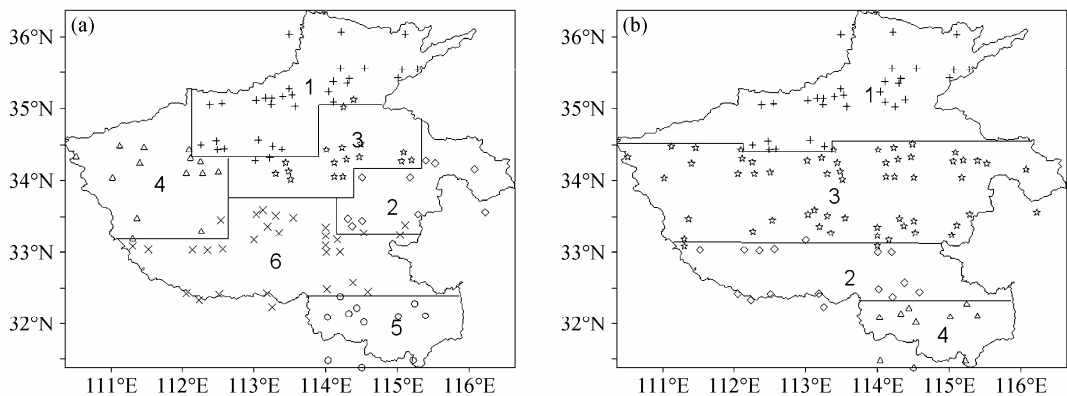


图 1 河南省 (a) 4 月和 (b) 10 月站点聚类分区结果 (图中数字为分区编号)

Fig. 1 Maps of (a) April and (b) October precipitation stations of Henan Province (the numbers in the picture are the numbers of partitioned area)

表2 河南省10月各分区之间降水量的相关系数(翟羽,2006)
Table 2 Correlation coefficients of precipitation between different areas of Henan Province in October (Zhai, 2006)

相关系数	分区 1	分区 2	分区 3	分区 4
分区 1	1.000	0.502	0.784	0.218
分区 2	0.502	1.000	0.807	0.684
分区 3	0.784	0.807	1.000	0.443
分区 4	0.218	0.684	0.443	1.000

图2给出了河南省4月(图2a)和10月(图2b)平均降水量的空间分布情况。由图2可看出,河南省4月和10月降水均具有明显的区域性分布特征,总体上呈现出南多北少、西南多东北少的特点,但4月降水量的南北差异较10月的大。其中,4月降水大致呈纬向分布,在河南省南部,降水呈带状纬向分布特点,而在中北部降水呈西部少—中部多—东部少的分布特点,分别对应于4月站点聚类分区的4区、3区和2区(见图1a)。10月的降

水大致呈带状纬向分布,这亦与10月站点聚类分区的分布情况相吻合(见图1b)。虽然在中部地区有小的降水强中心,但其等值线较密集,可视为同一类降水处理。通过上述分析可得,用具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法所得到的分区情况和实际降水量的空间分布情况一致,能够准确反映河南省4月和10月降水分布的区域性特征,表明该方法得到的分区情况合理。

3.1.2 降水的时间演变特征

通过各分区的降水距平百分率序列,结合线性趋势分析方法和9年滑动平均方法可分析各分区降水的年际和年代际变化趋势特征。按“降水量距平百分率干旱等级”将降水距平百分率 M 划分为5个等级:大涝($M \geq 50\%$)、偏涝($25\% \leq M < 50\%$)、正常($-25\% < M < 25\%$)、偏旱($-50\% < M \leq -25\%$)和大旱($M \leq -50\%$),可统计分析出各分区的旱涝情况。

图3给出了河南省4月和10月全省降水距平

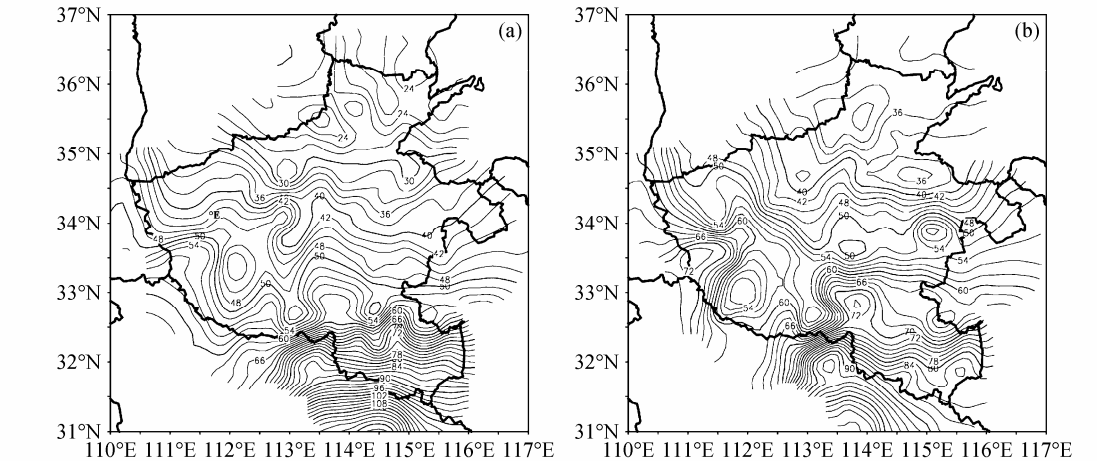


图2 河南省(a)4月和(b)10月平均降水量分布(单位: mm)
Fig. 2 Distributions of mean precipitation (mm) in (a) April and (b) October in Henan Province

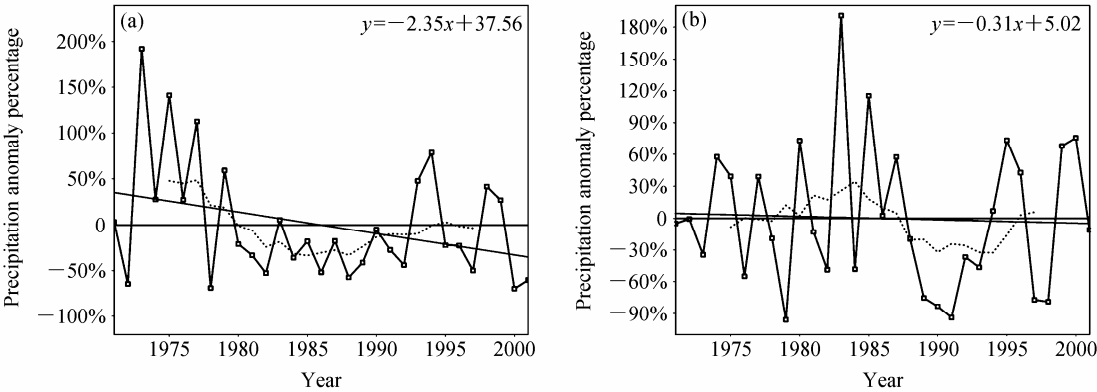


图3 河南省(a)4月和(b)10月全省降水距平百分率 M 的年际变化曲线(直线为线性趋势线,虚线为9年滑动平均曲线)
Fig. 3 The interannual variation curves of precipitation anomaly percentage in (a) April and (b) October in Henan Province (the straight line indicates linear trend, the broken line indicates 9-year moving average curve)

百分率 M 的年际变化曲线。从图 3 可以看出, 4 月和 10 月全省降水均表现出明显的年际和年代际变化。从降水距平百分率的年际演变趋势上看(见图中线性趋势线), 河南省 4 月和 10 月 31 年来降水总体上呈现出不同程度的减少趋势, 其中, 4 月的减少得较快, 减幅为 $23.5\% (10\text{ a})^{-1}$, 10 月减少得慢, 减幅为 $3.1\% (10\text{ a})^{-1}$ 。从降水距平百分率的年代际变化上看(见图中 9 年滑动平均曲线), 4 月存在 3 个明显的气候段: 20 世纪 70 年代为多雨期, 但年际波动较大, 20 世纪 80 年代至 90 年代初期为少雨期, 年际波动小, 20 世纪 90 年代初期至 21 世纪初

为相对多雨期, 年际波动相对较大; 10 月存在两个气候段: 20 世纪 70 年代至 80 年代中后期为相对多雨期, 年际波动较大, 20 世纪 80 年代中后期至 21 世纪初为少雨期, 年际波动较小。从 9 年滑动平均曲线上看, 4 月和 10 月降水呈波动变化, 均存在一个波峰和一个波谷, 且波峰和波谷的振幅强弱相当, 10 月波峰和波谷的振幅较 4 月的强; 多雨期和少雨期期间存在几次 3~6 年周期的微小波动; 4 月波峰和波谷分别发生在 1977 年和 1985 年, 10 月波峰和波谷分别发生在 1984 年和 1990 年。

图 4 给出了河南省 4 月各分区降水距平百分率

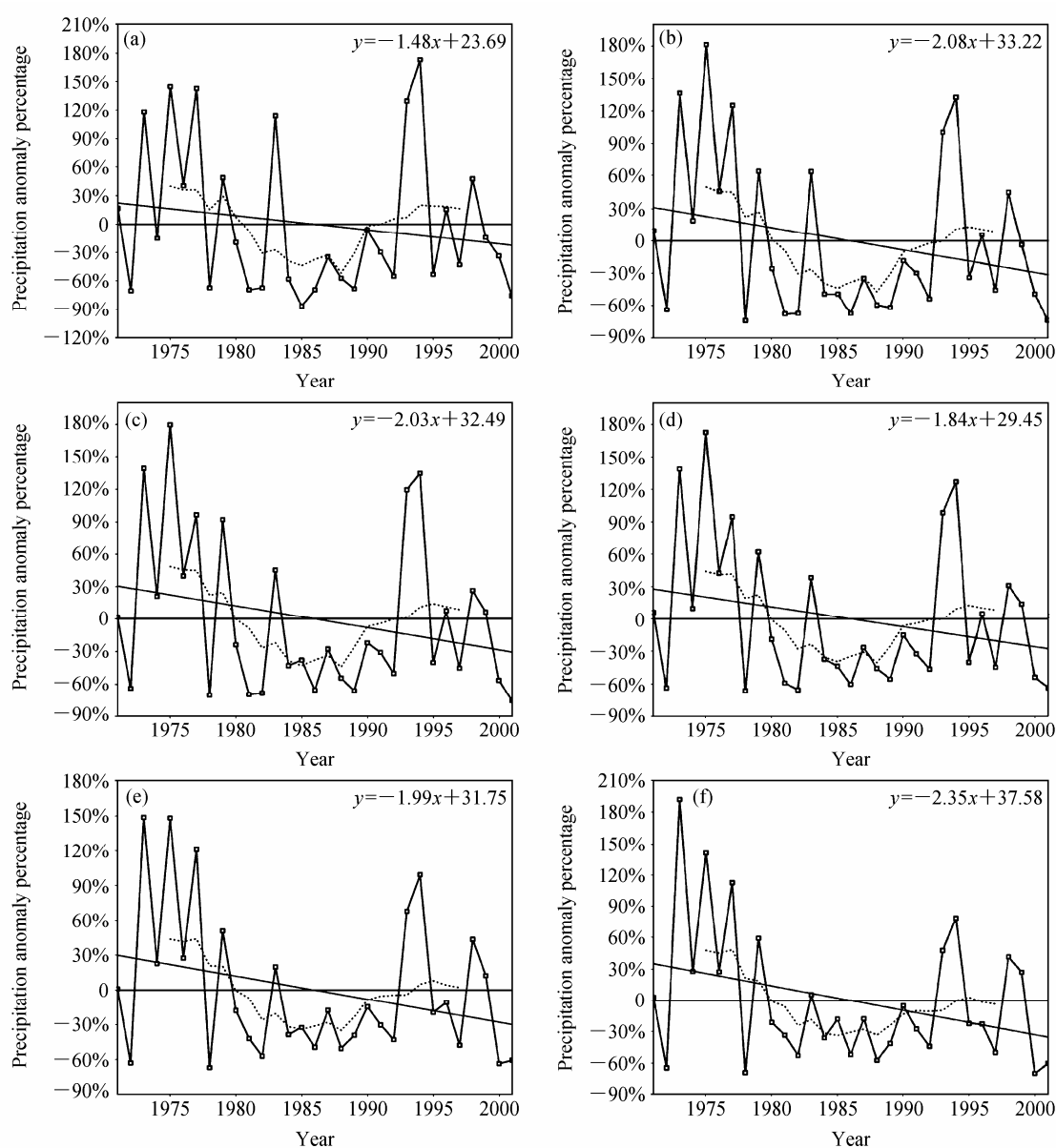


图 4 河南省 4 月各分区降水距平百分率 M 的年际变化曲线(直线为线性趋势线, 虚线为 9 a 滑动平均曲线): (a) 分区 1; (b) 分区 2; (c) 分区 3; (d) 分区 4; (e) 分区 5; (f) 分区 6

Fig. 4 The interannual variation curves of precipitation anomaly percentage occurring in April in each area of Henan Province (the straight lines stand for linear trend, the broken lines for 9-year moving average curves): (a) Area 1; (b) Area 2; (c) Area 3; (d) Area 4; (e) Area 5; (f) Area 6

的年际变化曲线。由图 4a-4f 可以看出, 4 月各分区降水均有明显的年际变化和年代际变化, 但各分区的变化并非完全同步。从降水距平百分率的年际演变趋势(见图中线性趋势线)来看, 31 年来各分区降水均呈现出不同程度的减少趋势, 位于河南中南部的分区 6 降水减少的线性倾向最大, 减幅为 $23.5\% (10\text{ a})^{-1}$ (见图 4f), 与全省的减幅相同; 位于河南最北部的分区 1 的最小, 减幅为 $14.8\% (10\text{ a})^{-1}$, 远小于全省降水年际的减幅(见图 3a), 即分区 1 降水的减少对于全省的影响较小。6 个分区降水减少的幅度从大到小依次为分区 6、分区 2、分区 3、分区 5、分区 4、分区 1。在 2001 年以后各分区降水仍有下降的趋势。各分区降水的年际变化较大, 干湿交替, 但存在明显的少雨期, 而且少雨相对占主要地位; 但各分区明显的少雨期的开始年份和持续时间略有差异, 分区 1 明显的少雨期较短, 主要发生在 20 世纪 80 年代; 分区 2、分区 3 和分区 4 明显的少雨期都发生在 1980~1993 年; 分区 5 和分区 6 明显的少雨期较长, 发生在 1980~1994 年。6 个分区的降水在年代际变化上近乎一致, 且和 4 月全省的年代际变化相一致, 均存在 3 个明显的气候段: 20 世纪 70 年代为多雨期, 年际波动较大, 20 世纪 80 年代至 90 年代初期为少雨期, 年际波动小, 20 世纪 90 年代中期至 21 世纪初期为相对多雨期, 年际波动相对较大。

从图 4 中 9 年滑动平均曲线上看, 降水距平百分率呈年代际波动变化, 各分区均存在一个波谷, 均发生在 1988 年; 在少雨期间, 分区 1 存在 3 次 3~5 年周期的微小波动, 分区 2 至分区 6 存在 3 次 4~6 年周期的微小波动; 各分区波峰均有 2 个, 但均相对较弱, 发生时间亦略有不同, 分区 1 和分区 2 发生在 1977 年和 1994 年、分区 3 至分区 6 发生在 1977 年和 1995 年, 由此可看出, 在气候上河南省降水存在准 18 年的周期震荡。

4 月各分区降水在年际和年代际变化上虽有一些相似的特征, 但各分区旱涝年份并没有较好的对应关系, 即各分区旱涝年份存在差异。统计了 6 个分区的旱涝年份(表 3), 其中, 分区 1 (河南省最北部) 大旱年份最多(为 12 年, 约占时间序列长度的 38.7%), 分区 5 (河南省最南部) 的最少(为 6 年, 约占时间序列长度的 19.4%); 分区 2、4 和 5 偏旱年份最多(均为 8 年, 约占时间序列长度的 25.8%), 分区 1 的最少(仅 4 年, 只占时间

序列长度的 12.9%), 其余分区均为 6 年; 偏涝年份均较少, 分区 6 (河南省中南部) 偏涝年份最多(为 5 年, 约占时间序列长度的 16.1%), 分区 2 和分区 5 的最少(为 2 年, 约占时间序列长度的 6.5%); 分区 2 大涝年份最多(为 7 年, 约占时间序列长度的 22.6%), 分区 6 的最少(为 5 年, 约占时间序列长度的 16.1%), 其余分区均为 6 年。从总体上看, 4 月 6 个分区均是大旱年份和偏旱年份多, 大涝年份和偏涝年份较少, 即均偏干旱, 其中分区 1 (河南省最北部) 和分区 5 (河南省最南部) 是干旱年出现最为频繁的区域, 其余分区干旱年出现的频数较为接近。

表 3 河南省 4 月 6 个分区的旱涝年份统计
Table 3 Drought and flood years occurring in each area of Henan Province in April

分区号	大旱年 ($M \leq -50\%$)	偏旱年	偏涝年	大涝年 ($M \geq 50\%$)
		($-50\% < M \leq -25\%$)	($25\% \leq M < 50\%$)	
1	1972、1978、1981、1982、1984、1985、1986、1988、1989、1992、1995、2001	1987、1991、1997、2000	1976、1979、1998	1973、1975、1977、1983、1993、1994
2	1972、1978、1981、1982、1986、1988、1989、1992、2001	1980、1984、1985、1987、1991、1995、1997、2000	1976、1998	1973、1975、1977、1979、1983、1993、1994
3	1972、1978、1981、1982、1986、1988、1989、1992、2000、2001	1984、1985、1987、1991、1995、1997	1976、1983、1998	1973、1975、1977、1979、1993、1994
4	1972、1978、1981、1982、1986、1989、2000、2001	1984、1985、1987、1988、1991、1992、1995、1997	1976、1983、1998	1973、1975、1977、1979、1993、1994
5	1972、1978、1982、1988、2000、2001	1981、1985、1984、1986、1989、1991、1992、1997	1976、1998	1973、1975、1977、1979、1993、1994
6	1972、1978、1982、1986、1988、2000、2001	1981、1984、1989、1991、1992、1997	1974、1976、1993、1998、1999	1973、1975、1977、1979、1994

图 5 给出了河南省 10 月各分区降水距平百分率的年际变化曲线。由图 5a-5d 可以看出, 10 月各分区降水均有明显的年际变化, 并且在变化时间上基本同步, 比如在 4 个分区均在 1974、1977、1980、1983、1985、1987、1995、2000 年出现降水正距平

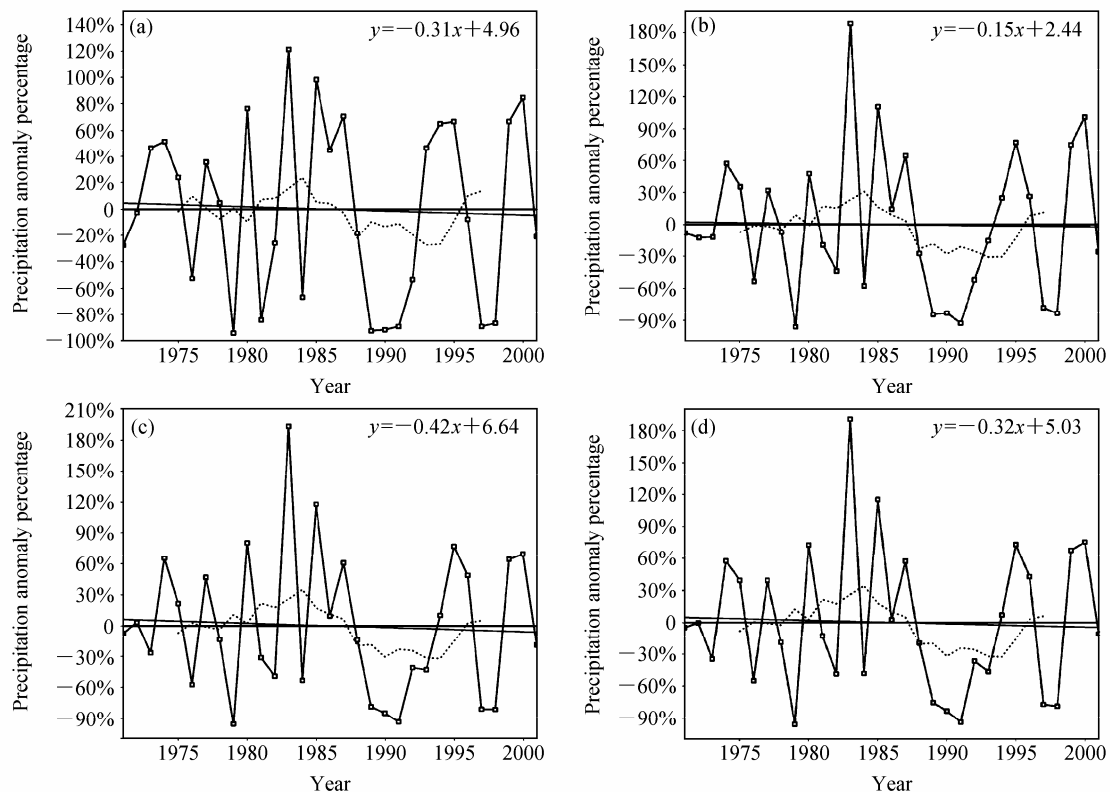


图5 同图4, 但为河南省10月各分区降水距平百分率 M 的年际变化曲线:(a)分区1;(b)分区2;(c)分区3;(d)分区4

Fig. 5 Same as Fig. 4, but for the interannual variation in October: (a) Area 1; (b) Area 2; (c) Area 3; (d) Area 4

极大值,而且各分区出现降水负正距平极小值的年份也基本上同步,说明在秋季出现降水的范围一般较大。然而,4个分区出现正负极值的变化幅度却有所不同,而且以分区1的变化幅度最小,而分区2、分区3、分区4的变化幅度基本相同,说明河南省降水距平年际变化和年代际变化在最北部地区最小。从降水距平百分率的年际演变趋势(见图5中线性趋势线)来看,31年来各分区降水均呈现出不同程度的减少趋势,位于河南省中部地区分区3降水减少的线性倾向最大,减幅为 $4.2\% (10\text{ a})^{-1}$,远大于全省降水年际的减幅(见图3b),即分区3降水的减少对于全省的影响较大;河南省中南部地区分区2的最小,减幅为 $1.5\% (10\text{ a})^{-1}$,远小于全省降水年际的减幅,即分区2降水的减少对于全省的影响较小。4个分区降水减少的幅度从大到小依次为分区3、分区4、分区1、分区2。在2001年以后,各分区降水仍有下降的趋势。从图5还看到,各分区降水的年际变化较大,干湿年份往往交替出现,但少雨期相对占主要地位;各分区均存在明显的少雨期,但各分区少雨期的开始年份和持续时间略有差异,分区2、分区3和分区4明显的少雨期

均出现在1987~1996年,分区1明显的少雨期持续时间稍短,出现在1987~1995年。4个分区的降水在年代际变化上几乎一致,且与10月全省的年代际变化一致,均存在两个气候段:10月存在两个气候段:20世纪70年代至80年代中后期为相对多雨期,年际波动较大,20世纪80年代中后期至21世纪初为少雨期,年际波动较小。

从图5中9年滑动平均曲线上看,降水呈波动变化,各分区均存在一个波谷和一个波峰,波谷和波峰的振幅强弱相当,波峰发生在1984年,波谷发生在1994年;多雨期和少雨期期间均存在几次3~6年周期的微小波动。

与4月的情况类似,10月各分区间也存在旱涝年份上的差异。统计了10月4个分区的旱涝年份(见表4),其中,大旱年出现年份以位于河南省最北部的分区1最多(为10年,约占时间序列长度的32.3%),位于河南省最南部的分区4最少(为7年,约占时间序列长度的22.6%);偏旱年份以位于中部的分区3和分区4最多(为5年,约占时间序列长度的16.1%),分区1最少(为2年,约占时间序列长度的6.5%);偏涝年份以分区1和分区

2 最多 (为 4 年, 约占时间序列长度的 12.9%), 分区 3 的最少 (为 2 年, 约占时间序列长度的 6.5%); 大涝年份以北部的分区 1 最多 (为 9 年, 约占时间序列长度的 29.0%), 中南部地区的分区 2 最少 (为 7 年, 约占时间序列长度的 22.6%), 其余分区均为 8 年。由此可得, 10 月 4 个分区大旱年份和大涝年份较多, 偏旱年份和偏涝年份较少; 大旱年份和偏涝年份数同 4 月的近似, 但大涝年份数较 4 月的多, 偏旱年份数较 4 月的少。这些结果说明, 10 月河南省各分区降水的时空分布很不均匀, 旱涝情况较严重, 最北部地区 (分区 1) 是旱涝年发生最为频繁的区域, 其余分区旱涝年出现频数较接近。

表 4 河南省 10 月 4 个分区出现旱涝年份统计
Table 4 Drought and flood years occurring in each area of Henan Province in October

分 区 号	大旱年 ($M \leq -50\%$)	偏旱年 ($-50\% < M \leq -25\%$)	偏涝年 ($25\% \leq M < 50\%$)	大涝年 ($M \geq 50\%$)
1	1976、1979、1981、 1984、1989、1990、 1991、1992、1997、 1998	1971、1982	1973、1977、 1986、1993	1974、1980、1983、 1985、1987、1994、 1995、1999、2000
2	1976、1979、1984、 1989、1990、1991、 1992、1997、1998	1982、1988、 2001	1975、1977、 1980、1996	1974、1983、1985、 1987、1995、1999、 2000
3	1976、1979、1984、 1989、1990、1991、 1997、1998	1973、1981、 1982、1992、 1993	1977、1996	1974、1980、1983、 1985、1987、1995、 1999、2000
4	1976、1979、1989、 1990、1991、1997、 1998	1973、1982、 1984、1992、 1993	1975、1977、 1996	1974、1980、1983、 1985、1987、1995、 1999、2000

3.2 不同强度降水日数的时空分布特征

叶家东和程克明 (1979) 认为, 在人工增雨效果检验中, 当对比区的自然雨量强度小时, 人工增雨试验效果好, 而随着自然雨强的增大, 效果变差; 并认为, 降水量的变化可由降水强度的变化引起, 也可由降水日数的变化引起, 或是由降水强度和降水日数的共同变化引起, 说明降水强度和降水日数的变化对人工增雨效果有重要的影响。因此, 有必要在上述研究的基础上, 进一步研究各分区降水强度和降水日数的时空变化特征。本文将单站 08:00 (北京时间, 下同) 至次日 08:00 24 h 内出现的降水过程计为一个雨日, 并根据中央气象台的标准将日降水量 R 划分为 5 个等级: 无降水 ($R < 0.1 \text{ mm}$)、小雨 ($0.1 \text{ mm} \leq R < 10 \text{ mm}$)、中雨 ($10 \text{ mm} \leq R < 25$

mm)、大雨 ($25 \text{ mm} \leq R < 50 \text{ mm}$)、暴雨 ($R \geq 50 \text{ mm}$)。由各分区各站点某个等级降水的累积总日数除以该分区的站点数得到该分区的雨日数。

3.2.1 无降水日数的时空分布特征

图 6 给出了河南省 4 月和 10 月各分区无降水日数的年际变化曲线。从图 6 可看出, 4 月和 10 月各分区无降水日数年际变化趋势有很好的 consistency。4 月各分区无降水日数最多的出现在位于河南省最北部的分区 1, 年平均日数为 24.4 d; 最少的出现在位于河南省最南部的分区 5, 年平均日数为 19.8 d; 6 个分区中平均无降水日数从多到少依次为分区 1、分区 3、分区 2、分区 4、分区 6、分区 5。这些结果说明, 河南省无降水日数的地区分布呈现出北多南少、东北多西南少的地理分布特征; 并且, 2000 年之后无降水日数略有下降趋势, 即雨日数有增多的趋势。从各分区无降水日数的年际演变趋势上看, 31 年来各分区的无降水日数均呈增加趋势, 但增加幅度很小。其中, 位于河南省最南部的分区 5 的增幅最大, 为 $1.4 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$; 位于河南省西北部地区分区 4 的最小, 仅为 $0.5 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 。

10 月各分区无降水日数最多的同样出现在位于河南省最北部的分区 1, 年平均日数为 24.7 d, 最少的出现在位于河南省最南部的分区 4, 年平均日数为 21.2 d, 它们均比 4 月的相应值多一些。10 月的 4 个分区中无降水日数从多到少依次为分区 1、分区 3、分区 2、分区 4, 即呈现出北多南少的地理分布特征, 这个特征与 4 月的情况基本相似, 但在 2000 年之后 10 月各分区无降水日数略有增加趋势, 即雨日数有减少的趋势, 呈现了与 4 月相反的变化趋势。各分区无降水日数的年际演变趋势除了位于河南省最南部的分区 4 呈现减少趋势 (即雨日数呈增加趋势) 外, 其余分区同样呈增加趋势。

以上结果表明, 河南省春季和秋季无降水日数呈现出全省范围的区域性特征, 尤其是在秋季 (如 1979、1984、1986、1991 年的 10 月 4 个分区的无降水日数非常接近), 但也有个别年份各分区的无降水日数相差较大。

3.2.2 小雨雨日数的时空分布特征

图 7 给出了河南省 4 月和 10 月各分区小雨雨日数的年际变化曲线。从图 7 可看出, 4 月和 10 月各分区小雨 ($0.1 \text{ mm} \leq R < 10 \text{ mm}$) 雨日数年际变化趋势有很好的 consistency。4 月 (图 7a) 小雨雨日数出现最多的分区是分区 5 (河南省最南部地区), 年

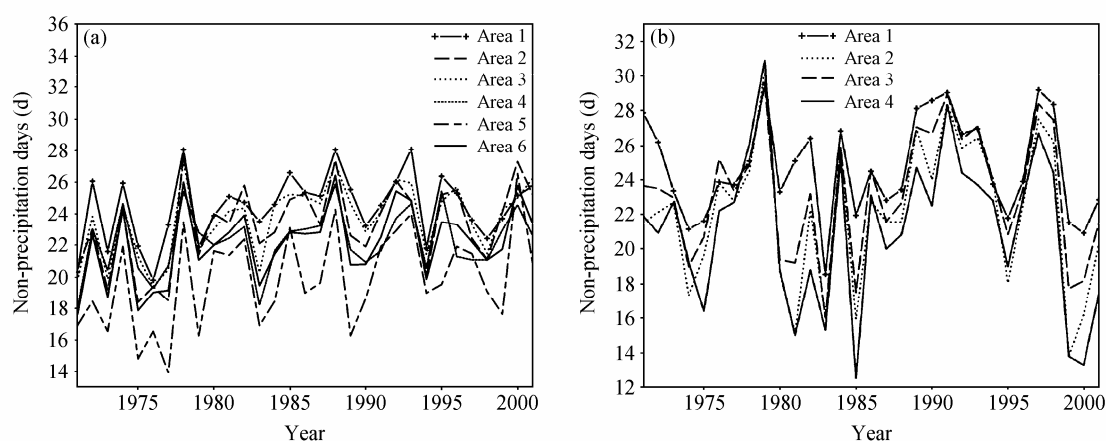


图6 河南省 (a) 4 月和 (b) 10 月各分区无降水日数的年际变化曲线

Fig. 6 The interannual variation curves of non-precipitation days occurring in (a) April and (b) October in Henan Province

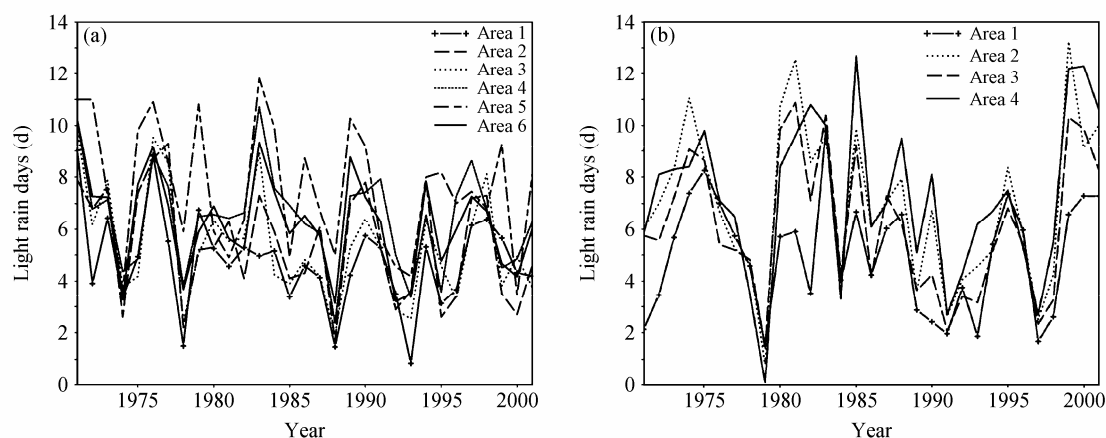


图7 河南省 (a) 4 月和 (b) 10 月各分区小雨雨日数的年际变化曲线

Fig. 7 The interannual variation curves of light rain days occurring in (a) April and (b) October in Henan Province

平均日数为 7.6 d; 最少的出现在分区 1 (河南省最北部地区), 年平均日数为 4.8 d。4 月 6 个分区中, 小雨雨日数从多到少依次为分区 5、分区 4、分区 6、分区 2、分区 3、分区 1, 呈现出南多北少、西南多东北少的地理分布特征。在 2000 年之后 4 月小雨雨日数有增多的趋势。分析各分区小雨雨日数的年际演变趋势可得, 31 年来各分区 4 月的小雨雨日数均呈减少趋势, 但减少幅度很小, 平均减幅为 $0.7 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 。10 月 (图 7b) 各分区小雨雨日数最多的出现在分区 4 (河南省最南部地区), 年平均日数为 7.2 d; 最少的出现在分区 1 (河南省最北部地区), 年平均日数为 5.0 d。10 月 4 个分区中小雨雨日数从多到少依次为分区 4、分区 2、分区 3、分区 1, 即呈现出南多北少的地理分布特征。2000 年之后除分区 2 外, 其余各分区小雨雨日数均有减少的趋势。其各分区小雨雨日数的年际演变趋势除了位于最南部的分区 4 呈现弱增加趋势外, 其余分区均呈减

少趋势, 且减幅较 4 月的小。

3.2.3 中雨雨日数的时空分布特征

图 8 给出了河南省 4 月和 10 月各分区中雨雨日数的年际变化曲线。从图 8 可看出, 4 月和 10 月各分区中雨 ($10 \text{ mm} \leq R < 25 \text{ mm}$) 雨日数有明显的年际变化。4 月 (图 8a) 各分区中雨雨日数最多的出现在处于河南省最南部的分区 5, 年平均日数为 1.8 d; 最少的出现在处于河南省最北部的分区 1, 年平均日数为 0.6 d。4 月 6 个分区中雨雨日数从多到少依次为分区 5、分区 6、分区 4、分区 2、分区 3、分区 1, 即呈现出南多北少、西南多东北少的地理分布特征。2000 年之后 4 月中雨雨日数有增多的趋势。分析 4 月各分区中雨雨日数的年际演变趋势可得, 31 年来各分区的中雨雨日数均呈减少趋势, 且减少幅度很小, 平均减幅为 $0.2 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 。10 月 (图 8b) 各分区中雨雨日数最多的出现在处于河南省最南部的分区 4, 年平均日数为 1.8 d; 最少的出

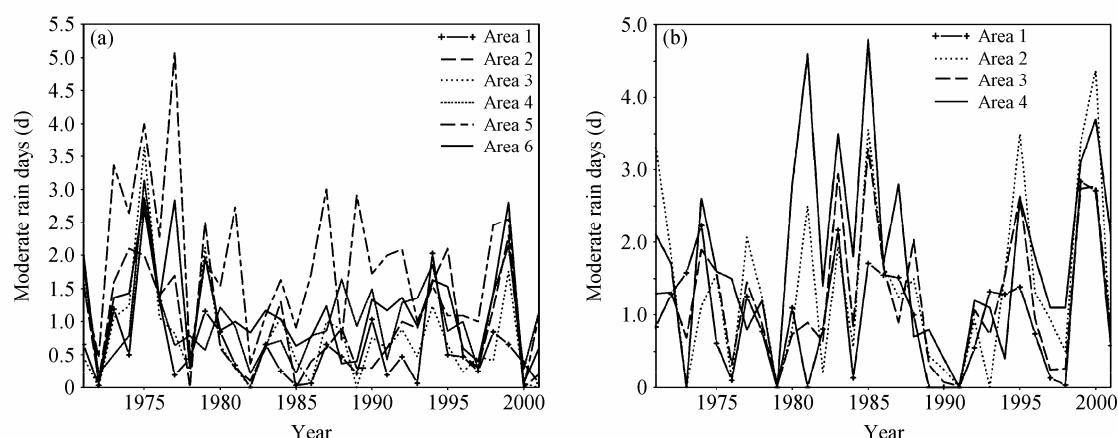


图8 河南省 (a) 4 月和 (b) 10 月各分区中雨雨日数的年际变化曲线

Fig. 8 The interannual variation curves of moderate rain days occurring in (a) April and (b) October in Henan Province

现在处于河南省最北部的分区 1, 年平均日数为 1.0 d。4 个分区中雨雨日数从多到少依次为分区 4、分区 2、分区 3、分区 1, 呈现出南多北少的地理分布特征; 2000 年之后 10 月中雨雨日数有减少的趋势。

比较 4 月和 10 月中雨雨日数的年际变化情况可看到几个明显的不同点: (1) 在 20 世纪 70 年代 4 月 6 个分区的中雨雨日数均存在很大的起伏, 进入 20 世纪 80 年代后起伏相对较小, 而 10 月中雨雨日数在 1980~1990 年、1995 年和 2000 年存在几个明显的起伏, 其他时间段则起伏较小; (2) 进入 20 世纪 90 年代之后 4 月和 10 月的中雨雨日数出现反位相变化, 说明 4 月中雨雨日数的起伏与 10 月相比是不同步的。其各分区中雨雨日数的年际演变趋势均呈弱增加趋势, 平均增幅为 $0.08 \text{ d} (10 \text{ a})^{-1}$ 。

本文亦分析了 4 月和 10 月各分区大雨 ($25 \text{ mm} \leq R < 50 \text{ mm}$) 雨日数和暴雨 ($R \geq 50 \text{ mm}$) 雨日数的年际变化 (图略)。分析结果发现, 4 月和 10 月各分区大雨和暴雨雨日数的地理分布情况同各分区小雨和中雨雨日数的地理分布情况相同, 即 4 月雨日数最多的出现在处于河南省最南部的分区 5, 最少的出现在处于河南省最北部的分区 1, 呈现出南多北少、西南多东北少的地理分布特点; 10 月雨日数最多的出现在处于河南省最南部的分区 4, 最少的出现在处于河南省最北部的分区 1, 呈现出南多北少的地理分布特点。但各分区大雨雨日数均少于中雨日数, 暴雨雨日数均少于大雨雨日数; 且各分区年际变化不一致、起伏均较大, 表明大雨和暴雨的出现不是全省范围的, 而是一种区域现象。从雨日数的年际变化演变趋势上看, 4 月和 10 月各分区雨日数均呈弱减少趋势。

从上面分析结果可以看到, 河南省 4 月和 10 月各分区雨日数的变化具有如下特征: (1) 1971~2001 年 31 年来河南省 4 月和 10 月降水量 (图 4、图 5) 和雨日数的空间分布情况基本上是一致的, 均呈现出南多北少、西南多东北少的地理分布特征; 各分区无降水日数最多, 少雨日均较多, 随着降水强度的增强, 雨日数呈减少趋势, 暴雨雨日数最少。由此可以表明, 河南省 4 月和 10 月降水量从北向南增加的变化情况是降水日数的变化起决定性的作用, 且主要是强度较小降水 (小雨和中雨) 雨日数的增加起作用。(2) 31 年来 4 月各分区降水量和雨日数的长期变化均呈减少趋势; 但 10 月各分区降水量和雨日数的长期变化趋势并不十分一致, 10 月各分区降水量的长期趋势均是减少的, 但分区 4 的小雨雨日数和各分区中雨雨日数并没有同步的减少趋势, 而是呈相反的增加趋势。(3) 4 月和 10 月各分区中雨雨日数年际变化 (图 8a 和 8b) 同全省降水距平百分率的年际变化 (图 3a 和 3b) 有很好的对应关系, 这表明中雨对总降水量的分布情况起到主导作用。

4 结论与讨论

通过对河南省 1971~2001 年 31 年来 114 个站点 4 月和 10 月各分区降水时、空变化特征和变化趋势的分析, 可得到如下结论:

(1) 基于具有分类显著性检验的聚类统计检验分析方法, 可将河南省 4 月和 10 月降水分别划分为 6 个分区和 4 个分区, 且两两相邻分区的相关性明显优于距离较远的两区的相关性。

(2) 4 月和 10 月降水量和雨日数在空间分布上均呈现出北少南多、东北少西南多的区域性分布特征; 降水量从北向南的增加主要是雨日数从北向南的增加起决定性的作用, 其中弱强度降水(小雨和中雨)雨日数(尤其是中雨雨日数)的增加起主导作用。

(3) 4 月各分区降水量和雨日数的年际演变趋势有很好的一致性, 均为减少趋势; 10 月各分区的降水量和雨日数年际演变趋势之间并没有很好的对应关系, 各分区降水量的长期趋势均是减少的, 但各分区不同强度降水的雨日数变化趋势并不同步, 个别分区弱强度降水的雨日数呈相反的增加趋势。

(4) 31 年来, 4 月各分区降水量总体上均呈减少趋势, 其中, 河南中南部地区(分区 6)减少得最快, 而最北部地区(分区 1)减少得最慢, 各分区降水在未来仍有减少的趋势; 6 个分区均以干旱、少雨年居多, 其中, 河南省最北部地区(分区 1)和最南部地区(分区 5)是干旱年出现最为频繁的区域, 其余分区干旱年出现的频数较接近; 6 个分区均是无降水日、小雨雨日占多数, 各等级强度降水的日数均是河南最南部地区(分区 5)的最多, 最北部地区(分区 1)的最少。

(5) 31 年来, 10 月各分区降水总体上均呈弱减少趋势, 减幅较 4 月的小。分区 3(河南中部)减少得最快, 分区 2(河南中南部)减少得最慢, 各分区降水在未来仍有减少的趋势; 4 个分区旱涝年出现均较为频繁, 但仍以少雨年居多, 分区 1(河南北部)是旱涝年发生最为频繁的区域, 其余分区大旱年和大涝年出现频数均较频繁; 4 个分区均是无降水日、小雨雨日占多数, 各等级强度降水的雨日数均是河南最南部地区(分区 4)最多, 而最北部地区(分区 1)最少。

提高人工增雨效果评估的功效, 关键是提高作业期作业区自然降水量估算的准确性, 这就要求作业区和对区两区地形大体相仿, 更重要的是作业区和对区两区天气系统相同、降水类型相似, 即两区降水量相关系数高。在增雨效果和样本数相同的情况下, 提高相关系数是提高增雨效果显著度的重要因素(房彬等, 2008b)。CA-FCM 方案引入了聚类分析, 提高了作业区自然降水量估计值的准确度和相关系数, 评估效果较其他非随机化试验方案而言是最好的(房彬等, 2008a, 2008b)。在 CA-FCM 方案分区结果的基础上进一步了解地方区域历史降水的时空自然起伏状况, 包括区域降水量、

降水强度和雨日数的自然起伏状况, 使得在进行人工增雨作业选择作业区时, 可选择有利于催化作业的天气条件和时机, 有效减少降水自然起伏的影响, 减少作业区估计雨量的误差, 从而取得较好的检验效果; 在进行人工增雨效果检验时, 可选择作业区所属分区中未受作业影响的站点和与作业区所属分区相关性高的其他分区中的未受作业影响的站点的历史同期降水样本作为对比参考单元, 提高 t 检验显著度水平, 从而提高增雨评估效果。

本文中各分区降水的时空分布特征及其变化趋势主要是通过统计分析方法得到的, 对于该区域特征的形成原因还需要从物理角度作进一步的探讨。此外, 还需要进一步分析不同类型降水云(层状云、积状云及积层混合云)降水时空分布的区域特征, 以更全方位地指导人工影响天气作业的进行。

参考文献 (References)

- 房彬, 肖辉, 王振会, 等. 2005. 聚类分析在人工增雨效果检验中的应用 [J]. 南京气象学院学报, 28 (6): 739-745. Fang Bin, Xiao Hui, Wang Zhenhui, et al. 2005. Application of cluster analysis to the statistical assessment of the effect of artificial rain enhancement [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 28 (6): 739-745.
- 房彬, 肖辉, 班显秀. 2008a. CA-FCM 方案与其它几种人工增雨评估方案的比较 [J]. 气象科技, 36 (5): 612-621. Fang Bin, Xiao Hui, Ban Xianxiu. 2008a. Comparison between CA-FCM and some other methods for evaluating precipitation enhancement effectiveness [J]. Meteorological Science and Technology (in Chinese), 36 (5): 612-621.
- 房彬, 肖辉, 班显秀, 等. 2008b. 一次人工增雨作业中 CA-FCM 与其他评估方案的比较研究 [J]. 气象与环境学报, 24 (4): 13-18. Fang Bin, Xiao Hui, Ban Xianxiu, et al. 2008b. Comparison between CA-FCM and other precipitation enhancement effect evaluation methods on cloud seeding operation [J]. Journal of Meteorology and Environment (in Chinese), 24 (4): 13-18.
- Gong X F, Richman Michael B. 1995. On the application of cluster analysis to growing season precipitation data in North America east of the Rockies [J]. J. Climate, 8 (4): 897-931.
- 黄荣辉, 徐予红, 周连童. 1999. 我国夏季降水的年代际变化及华北干旱化趋势 [J]. 高原气象, 18 (4): 465-476. Hang Ronghui, Xu Yuhong, Zhou Liantong. 1999. The interdecadal variation of summer precipitations in China and the drought trend in North China [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 18 (4): 465-476.
- 江志红, 丁裕国. 1994. 近 40 年我国降水量年际变化的区域性特征 [J]. 南京气象学院学报, 17 (1): 73-78. Jiang Zhihong, Ding Yuguo. 1994. Regional features of interannual variation of rainfall over China over the past four decades [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 17 (1): 73-78.
- 焦建丽, 康雯瑛. 2007. 河南省年降水的区域特征分析 [J]. 华北水利水电

- 电学院学报, 28 (4): 7–10. Jiao Jianli, Kang Wenying. 2007. Analysis on regional characters of the annual rainfall in Henan Province [J]. Journal of North China Institute of Water Conservancy and Hydroelectric Power (in Chinese), 28 (4): 7–10.
- 李大山, 章澄昌, 许焕斌, 等. 2002. 人工影响天气现状与展望 [M]. 北京: 气象出版社, 586pp. Li Dashan, Zhang Chengchang, Xu Huanbin, et al. 2002. The Status and Development Prospects of Weather Modification (in Chinese) [M]. Beijing: China Meteorological Press, 586pp.
- 李周, 郑世林, 高媛媛, 等. 2008. 黄河中下游夏季降水时空分布及演变特征 [J]. 气象与环境科学, 31 (2): 104–107. Li Zhou, Zheng Shilin, Gao Yuanyuan, et al. 2008. Space-time distribution and evolution characteristics of summer precipitation in middle and lower reaches of Yellow River [J]. Meteorological and Environmental Sciences (in Chinese), 31 (2): 104–107.
- 林云萍, 赵春生. 2009. 中国地区不同强度降水的变化趋势 [J]. 北京大学学报(自然科学版), 45 (6): 995–1002. Lin Yunping, Zhao Chunsheng. 2009. Trends of precipitation of different intensity in China [J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis (in Chinese), 45 (6): 995–1002.
- 马京津, 高晓清, 曲迎乐. 2006. 华北地区春季和夏季降水特征及与气候相关的分析 [J]. 气候与环境研究, 11 (3): 321–329. Ma Jingjin, Gao Xiaqing, Qu Yingle. 2006. The character of precipitation and its relation to climate change over North China in spring and summer [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (3): 321–329.
- 孙安健, 郭艳君. 2003. 我国西北地区春季旱涝气候特征研究 [J]. 气候与环境研究, 8 (1): 1–8. Sun Anjian, Guo Yanjun. 2003. A study of climate features of flood/drought during spring season in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 8 (1): 1–8.
- 孙杰, 许杨, 陈正洪, 等. 2010. 华中地区近 45 年来降水变化特征分析 [J]. 长江流域资源与环境, 19 (21): 45–51. Sun Jie, Xu Yang, Chen Zhenhong, et al. 2010. Characteristics of precipitation in central region of China over 45 years [J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin (in Chinese), 19 (21): 45–51.
- 孙景兰, 徐文明. 2008. 近 50 年河南初夏旱涝异常特征分析 [J]. 热带气象学报, 24 (4): 430–434. Sun Jinglan, Xu Wenming. 2008. Analyses of the characteristics of early-summer drought and flood in Henan in the past 50 years [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 24 (4): 430–434.
- 陶树旺, 刘卫国, 李念童, 等. 2001. 层状冷云人工增雨可播性实时识别技术研究 [J]. 应用气象学报, 12 (增刊): 14–22. Tao Shuwang, Liu Weiguo, Li Niantong, et al. 2001. A study of real-time identification of seedability of cold stratiform clouds [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 12 (s1): 14–22.
- 王小玲, 屠其璞. 2002. 我国旬降水量的时空分布特征 [J]. 南京气象学院学报, 25 (5): 664–670. Wang Xiaoling, Tu Qipu. 2002. Spatial and temporal characteristics of dekad precipitation in China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (5): 664–670.
- 玄枕生. 1994. 用于数值分类的聚类分析 [J]. 海洋湖沼通报, 4 (2): 1–12. Yao Zhengsheng. 1994. Cluster analysis used in numerical classification [J]. Transactions of Oceanology and Limnology (in Chinese), 4 (2): 1–12.
- 杨绚, 李栋梁. 2008. 中国干旱气候分区及其降水量变化特征 [J]. 干旱气象, 26 (2): 17–24. Yang Xuan, Li Dongliang. 2008. Precipitation variation characteristics and arid climate division in China [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese), 26 (2): 17–24.
- 叶家东. 1979. 人工降水的试验设计和效果检验 [J]. 气象, 5 (2): 26–29. Ye Jiadong. 1979. Test design and effect test of artificial precipitation [J]. Meteorological and Environmental Research (in Chinese), 5 (2): 26–29.
- 叶家东, 程克明. 1979. 古田水库地区人工降水试验效果统计分析 [J]. 大气科学, 3 (2): 131–140. Ye Jiadong, Cheng Keming. 1979. Statistical evaluation of the artificial rainfall stimulation experiment in Gutian Reservoir region, Province Fujian [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 3 (2): 131–140.
- 叶家东, 范蓓芬. 1982. 人工影响天气的统计数学方法 [M]. 北京: 科学出版社, 386pp. Ye Jiadong, Fan Peifen. 1982. Weather Mathematical Statistical Method on Artificial Influence (in Chinese) [M]. Beijing: Science Press, 386pp.
- 叶家东, 李铁林. 2001. 区域趋势控制协变量回归分析效果评估方法研究 [J]. 气象科学, 21 (1): 64–72. Ye Jiadong, Li Tielin. 2001. Evaluation methods of cloud seeding effect with regional control and covariable regression analysis [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 21 (1): 64–72.
- 叶家东, 程克明, 曾光平. 1981. 闽中雨季区域雨量统计特性及人工影响的效果 [J]. 气象学报, 39 (4): 474–482. Ye Jiadong, Cheng Keming, Zhen Guangping. 1981. The statistical characteristics of areal rainfall and the effects of randomized cloud seeding experiment in Gutian Fujian [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 39 (4): 474–482.
- 曾光平, 高建芸, 朱鼎华, 等. 1998. 降水气候变化对人工降水效果评价的影响 [J]. 气象, 24 (11): 12–15. Zeng Guagnping, Gao Jianyun, Zhu Dinghua, et al. 1998. Influence of the climatic variation of rainfall on the evaluation of precipitation enhancement effect [J]. Meteorological and Environmental Research (in Chinese), 24 (11): 12–15.
- 翟羽. 2006. 人工增雨效果统计检验方法的改进 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文, 66pp. Zhai Yu. 2006. Improvement on statistical evaluation method of artificial precipitation enhancement effects [D]. M. S. Thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology, 66pp.
- 翟羽, 肖辉, 杜秉玉, 等. 2008. 聚类统计检验在人工增雨效果检验中的应用 [J]. 南京气象学院学报, 31 (2): 228–233. Zhai Yu, Xiao Hui, Du Bingyu. 2008. Application of the cluster statistical test to effectiveness evaluation of artificial precipitation enhancement [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 31(2): 228–233.
- 周连童, 黄荣辉. 2006. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 11 (1): 1–13. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2006. Characteristics of interdecadal variability of the difference between surface temperature and surface air temperature in spring in arid and semi-arid region of Northwest China and its impact on summer precipitation in North China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 11 (1): 1–13.
- 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 2004. 中国近 50 年气温及降水量的变化趋势分析 [J]. 高原气象, 23 (2): 238–244. Zuo Hongchao, Lü Shihua, Hu Yinqiao. 2004. Variations trend of yearly mean air temperature and precipitation in China in the last 50 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 23 (2): 238–244.