

基于质心分析的我国降水时空演变特征

胡勇^{1,2}, 绪正瑞³, 韩冬梅^{2,4}, 杨志勇²

(1. 东华大学 环境科学与工程学院, 上海 201620; 2. 中国水利水电科学研究院 流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100038; 3. 济南市卧虎山水库管理处, 济南 250115; 4. 河北工程大学 水电学院, 河北 邯郸 056038)

摘要: 通过引入年内唯一的特征时间点——年降水质心时间, 即年降水过程线和时间轴间面域几何质心的时间轴投影, 解决了频域规律识别不能反映降水事件发生时间的难题。根据年降水质心时间的时域、空域、频域规律, 定量识别出我国降水时空演变规律。研究认为: (1) 质心时间对大雨及以上等级降水发生时间的响应较为敏感; (2) 空间变化规律与主雨季峰值降水时间的空间分布较一致, 从西北至东南呈现“早-晚-早”规律; (3) 时间序列多为纯随机过程, 且非随机特性以周期性为主, 趋势性以提前趋势为主, 非随机性站点显著聚集于华中、华北地区; (4) 年内各等级的时间分布不一致, 大雨及以上等级发生时间晚于其它等级, 微雨等级降水年内分布最不稳定; (5) 年内降水不均匀的地区, 年际变异愈加显著, 即该区域年内主要降水过程的时间分布愈加不稳定。

关键词: 降水; 质心时间; 时空分异性; 时空演变; 不对称性; 不均匀性; 中国

中图分类号: P42; X43 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0010-07

Spatial and Temporal Variations of Precipitation in China Based on Centroid Principle

HU Yong^{1,2}, XU Zheng rui³, HAN Dong mei^{2,4}, YANG Zhi yong²

(1. School of Environmental Science and Engineering, Donghua University, Shanghai 201620, China; 2. State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China; 3. Jínan City Wohushan Reservoir Management Office, Jínan 250115, China; 4. School of Water Conservancy and Hydroelectric Power, Hebei University of Engineering, Handan 056038, China)

Abstract: The unique characteristic time in a year, known as centroid time of annual precipitation, was introduced to solve the problem of identifying occurrence time of precipitation by frequency domain analysis. The centroid time is the time projection of annual precipitation process line and domain centroid. The spatial, temporal, and frequency domain characteristics of centroid time of annual precipitation were analyzed to identify the spatial and temporal variations of precipitation quantitatively in China. The results suggested that (1) the centroid time is sensitive to the response of the occurrence time of heavy precipitation; (2) the spatial variation of centroid time is consistent with that of peak precipitation time of rainy season, showing "early-late-early" characteristics from northwest to southeast; (3) the time series of centroid time of the primary meteorological stations are pure random process with the non-random process is mainly shown at the stations located in central and northern China. The non-random characteristics are mainly periodicity, and the trend characteristics are mainly advanced trend; (4) the temporal distribution of precipitation grades are not even. The occurrence time of heavy precipitation is later than that of other precipitation grades, and the intra-annual distribution of moderate and light precipitation is the most unstable; and (5) the more uneven of intra-annual precipitation distribution, the more obvious of inter-annual variation of centroid time, indicating the unstable temporal distribution of precipitation in this area.

Key words: precipitation; centroid time; spatial and temporal diversity; spatial and temporal variations; asymmetry; unevenness; China

气候观测事实和模式预估表明, 降水时空分异程度呈现 加剧态势, 且旱涝等极端降水事件呈现出频发、广发、连发等

收稿日期: 2013-09-25 修回日期: 2014-03-31 网络出版时间: 2014-05-07

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.003.html>

基金项目: “十二五”国家科技支撑计划项目(2012BAC19B03); 国家自然科学基金项目(51009148; 51021066)

作者简介: 胡勇(1990), 男, 安徽巢湖人, 硕士研究生, 主要从事水循环及伴生过程研究。E-mail: huyongdh@163.com

通讯作者: 杨志勇(1979-)男, 湖南常德人, 高级工程师, 博士, 主要从事气候变化对水资源影响研究。E-mail: yangzy@iwahr.com

态势^[1-3]；降水是形成水资源的主要源头和气候变化的敏感因子，定量识别降水不均匀特性，是优化水资源配置和应对气候变化的重大基础问题^[4-5]。当前，在国内外相关研究中，采用了不均匀系数^[6]、分配系数^[6]、基尼系数^[7]和向量分析^[8-9]等方法，试图对降水年内时间分布的不均匀特性进行表达。然而，不均匀系数、分配系数、基尼系数等指标主要基于降水量的频域特性，难以刻画各频率降水的时间分布与累积特征；而基于年内降水集中度和集中期的向量分析方法，虽然可以反映降水的时间过程，但该方法假设降水事件与降水集中期间存在正弦关系，使得降水矢量方向角计算直接影响到降水集中期的计算结果，且年始/末时间点降水矢量间的合成缺乏合理性，难以客观表达降水的不均匀特征。

本文拟构建基于质心分析的降水不均匀性计算方法，分析近 50 年来我国(大陆地区)降水时空分异性，旨在为降水不均匀性分析提供新的思路与方法，并为我国制定极端降水事件的应对策略提供依据。

1 年降水质心时间及算法

1.1 降水质心时间的内涵

年降水过程由一组间断时域及发生在该时域的次降水过程组成，但受观测资料限制，常以日降水数据描述年降水过程，并表示成一组以日降水量为高的柱状图，如图 1(a)所示。在研究次降水过程不对称性时，以降水峰值发生时间将次降水过程分为两段，并以峰值前/后的降水时长、频次来研究次降水演变过程的不对称结构^[10]。将上述方法拓展至年降水过程不对称研究中时，由于年内降水多由间断的多个次降水过程组成，造成确定降水峰值发生时间存在困难，尤其是年内降水呈现双峰型、三峰型的区域^[11]。所以，探寻有效表达年内降水峰值发生时间且具唯一性的物理量尤为重要。由于质心唯一性和对峰值响应较为敏感^[12]，并且在融雪径流、降雨洪水过程模拟中得到广泛应用^[13-14]，因此将质心概念引入至年降水日变化规律研究中，并将其定义为年降水质心，其在时间轴投影定义为年降水质心时间。所以，年降水质心时间是年内某特征时间点来概化年内降水时间过程，以实现降低降水要素维度的目的，该时间点在内具有唯一性，且能集中反映主要降水过程的发生时间。

将两个有雨日的降水质心时间抽象为图 2(a)，当雨强不同时，降水质心时间更加靠近较大雨强的发生时间，且随着雨强差异的增大，这一趋势更加显著，说明降水质心时间能反映出主有雨日的发生时间。将三个有雨日的降水质心时间抽象为图 2(b)，其质心时间是各有雨日发生时间间隔、雨强等综合因素作用的结果，在等时间间隔时，除非前后两有雨日沿中间有雨日呈对称分布，否则降水质心时间和中间有雨日发生时间不重合，即降水过程具有不对称结构。基于此，按日降水量等级计算可以得到的某等级降水的质心时间(反映该等级降水在年内分布的特征时间)，若发生在特征时间点之前和之后等级降水对质心影响相同，即认为该等级降水沿降水质心时间呈现近似对称分布规律；若某等级降水质心时间和总降水质心时间不重合，则反映各等级降水在年内分布规律的不一致，即年内降水具有非均匀性。

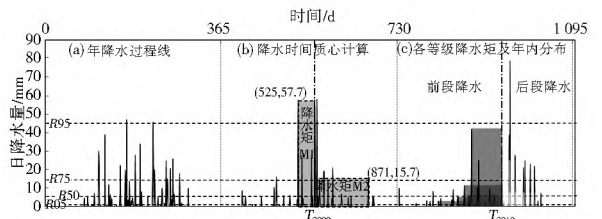


图 1 2008 年-2010 年北京站的年降水质心时间

Fig.1 Intrr annual precipitation centroid time at Beijing Station from 2008 to 2010

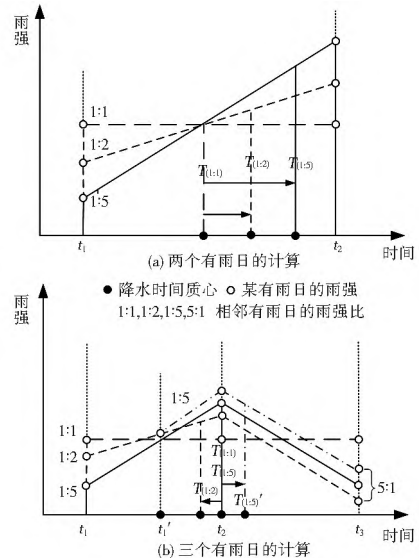


图 2 降水质心时间物理意义示意图

Fig.2 Schematic diagram of the physical meanings of centroid time

1.2 降水质心时间的算法

从年降水过程线可知，器测时间分辨率或统计基本时间单位内雨强和时间轴构成了一个矩形面域^[4]，该面域可抽象为面积(降水量 p_i)、特征时间点(t_i)两个基本要素，特征时间点和某时间点(T)的时间差与降雨量(p_i)的乘积组成该面域的矩(M)，即以 $t \rightarrow T$ 为底、 p_i 为高的矩形面积，定义为降水矩。年内必定存在且唯一的时间点使得总的年降水矩为 0，该时间点就是年降水质心时间 T (单位为 d，取值范围为 0~365/366)，计算方法和示意图分别见式(1)和图 1(b)。

按照百分位法划定降水等级^[2, 8, 15-16]，分别以升序排列有雨日降水数据的 95%^[2]、75%、50%^[8, 16]、5% 等百分位日降水量来划定暴雨($\geq R95$)、大雨($R75 \sim R95$)、中雨($R50 \sim R75$)、小雨($R5 \sim R50$)、微雨($< R5$)等降水等级，用式(1)计算各等级降水的年降水质心时间 T_j 。

$$\sum M_{(j)} = \sum_{i=1}^k p_{i(j)} (t_{i(j)} - T_{(j)}) \approx 0 \quad (1)$$

式中， k 表示天数，闰年为 366，其它为 365； j 为降水等级，取值为 1~5，分别代表微雨、小雨、中雨、大雨和暴雨，缺省时为总的降水质心时间的计算。

根据 T 计算结果将一年划分为两段时间，发生在 T 之前或之后降水 p 的降水矩分别为前段降水矩(M_{pre})和后段降水矩(M_{pro})，见图 1(c)。分别采用式(2)计算各等级降水(j)对降水质心时间(T)的权重 DT_{pre} 和 $DT_{pro, j}$ ，若 $DT_{pre/pro, j} > 1$ ，说明前/后段降水中 j 等级降水矩占总的降水矩 $M_{pre/pro}$ 比例大于 j 等级降水的百分位限差($j_{Up} - j_{Low}$)，即 j 等级降水决

定了年降水质心时间; 当 $DT_{pre,j} \neq DT_{pro,j}$, 即各段降水 j 等级降水矩不同, 说明 j 等级降水年内分布沿年降水质心 T 呈不对称分布; 若 $DT_{pre,j} > DT_{pro,j}$, 则该等级降水主要发生在降水质心时间之前。

$$\left\{ \begin{aligned} DT_{pre,j} &= \frac{\sum_{i=1}^{floor(T)} p_i \times (t_i - T)}{\sum M_{pre}} \Big|_{(j_{Up} - j_{Low})}, \\ &\quad (p_{j_{Low}} \leq p_i < p_{j_{Up}}) \\ DT_{pro,j} &= \frac{\sum_{i=ceil(T)}^k p_i \times (t_i - T)}{\sum M_{pro}} \Big|_{(j_{Up} - j_{Low})}, \\ &\quad (p_{j_{Low}} \leq p_i < p_{j_{Up}}) \end{aligned} \right. \quad (2)$$

式中, $floor$ 为向 0 取整, $ceil$ 取为大于该数的最小整数, j_{Up} 和 j_{Low} 分别表示 j 等级降水对应的降水百分位上限和下线。

2 资料来源、处理

以中国气象科学数据共享网的中国地面气候资料日值数据集为原始数据, 该数据已经过极值检验和时间一致性检验。筛选出包含 1961 年 - 2010 年完整日降水数据序列的 550 个气象站点作为研究站点(见图 3 所有圆点, 以下简称完整站点), 用以研究降水质心时间的时域特性、空间变化规律。本文以日降水量 $\geq 1 \text{ mm}$ 作为有效降水日(简称有雨日)^[17-18]进行计算。

为形象表达各等级降水质心时间和年内降水分布状况, 需尽可能选择典型站点来控制横轴的分辨率(气象站点数量)。本文以郑景云等^[19]提出的中国气候区划方案及其建议的代表站点为特征站点, 即依据 1970 年 - 2000 年气温、降水数据及地带性特征将我国区划为 56 个气候区(大陆地区为 54 个气候区), 各气候区(除昆仑高山高原亚寒带干旱区外)均有特征站点, 且地形差异较大的贵州高原山地中亚热带湿润区、川西南滇北山地中亚热带湿润区的山地和谷地分别以贵阳和芷江、会泽和叙永等站点为特征站点, 此外拉萨(藏南高山谷地高原温带半干旱区)和察隅(东喜马拉雅南翼高原亚热带山地湿润区)缺测 60 年代部分降水数据, 分别以同一气候区内具有完整降水序列的山南站和贡山站代替。各气候区分布及其特征站点见图 3, 具体气候区名称和特征站点详见文献^[19]。

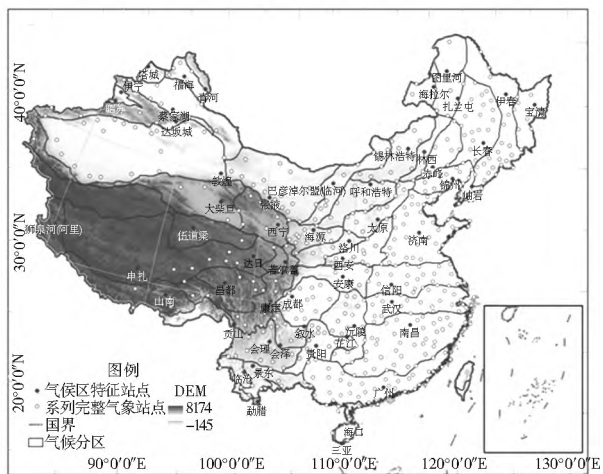


图 3 完整站点、气候分区及其特征站点分布

Fig. 3 The distribution of meteorological stations with full time series and climate zones

3 我国年降水质心时间序列的时域规律

本文分别计算了完整站点 1961 年 - 2010 年的年降水质心时间, 并以先后顺序组成年降水质心时间的时序序列, 采用时序序列分析方法进行年降水质心时间年际变化的时域规律识别。首先, 计算时序序列(序列长为 n) 在某一延迟期数($m < n/4$) 时的自相关系数, 采用适用于小样本的 LB 统计量检验, 若满足 $LB(m) < X_{1-\alpha}(m)$ 时属于纯随机序列^[20], 即该站点年降水质心时间的时序序列的非随机特性(趋势、周期、突变等)不显著; 其次, 若仅部分站点的时间序列是纯随机序列时, 则采用空间自相关(Global Moran's I) 检验非随机站点在空间分布是否为随机性, 若否, 则进一步采用聚类分析和异常值分析方法(Anselin Local Moran's I) 分析空间异常点^[21]; 最后, 分别采用 $M-K$ 检验、功率谱、滑动 t 检验等方法, 识别空间异常点的年降水质心时间年际变化的趋势性、周期性、突变性等非随机特性, 方法的原理和步骤详见文献^[22]。

研究结果表明, 完整站点 ($N = 550$) 中多数站点年降水时间质心时间序列为纯随机性过程(图 4(a) 空心圆点), 完整站点、特征站点中非随机序列分别仅占对应站点数的 18.5%、18.2%。空间自相关分析结果表明随机性站点在空间上并非随机分布($z > 1.96$)^[21], 且异常点主要位于四川、湖北、山西、陕西、山东、江苏、河北、北京等省市。特征站点中空间异常点的非随机性识别结果见表 1, 可以看出, 各站点的非随机特性并不一致, 且以周期性变化为主; 多数站点趋势变化不显著(65.5% 站点, $\alpha = 0.1$ 时), 见图 4(b), 且多数站点呈现出提前的趋势(80.9%), 说明我国多数地区的前段降水增加, 后段降水减少, 表现为春夏季降水增多、秋冬季降水减少; 仅部分站点(40%) 存在突变点, 且多在 20 世纪 80 年代, 这些区域年内降水分布发生显著变异。

表 1 非随机性特征站点的周期、突变、趋势性结果统计

Table 1 Periodicity, mutability, and tendency indicated by the non random time series of typical stations

站点名称	周期性 /a	趋势性 /(d · a)	突变性
太原	2, 7, 9, 15	- 0.0581	1974- 1980
洛川	3, 14, 20	- 0.0735	—
林西	2, 7, 11, 19	- 0.0932	—
赤峰	3, 7, 20	- 0.1600**	—
济南	7, 9, 11, 15, 17	- 0.1187	—
山南	2, 5, 19, 21	- 0.0466	1984, 1994- 1999
昌都	5, 7, 13, 16	- 0.0220	—
安康	3, 11, 13	- 0.0649	1983- 1984, 1986- 1988, 1998
武汉	4, 9, 13, 15, 17, 19	- 0.2367*	1977- 1979, 1985- 1989
芷江	3, 7, 11, 17	- 0.2393**	—

注: ** 表示通过了置信度 0.05 的检验; * 表示通过了置信度 0.1 的检验。

4 我国降水质心时间的空间分布及变化

对年降水质心时间的空间分布的分析发现, 总体上, 沿西北至东南的方向, 年降水质心时间呈现“早 - 晚 - 早”的规律(图 5(a)), 与降水集中期计算结果^[6]、我国主雨季的空间变化规律^[3]、年降水极大值分布时段^[23]一致。

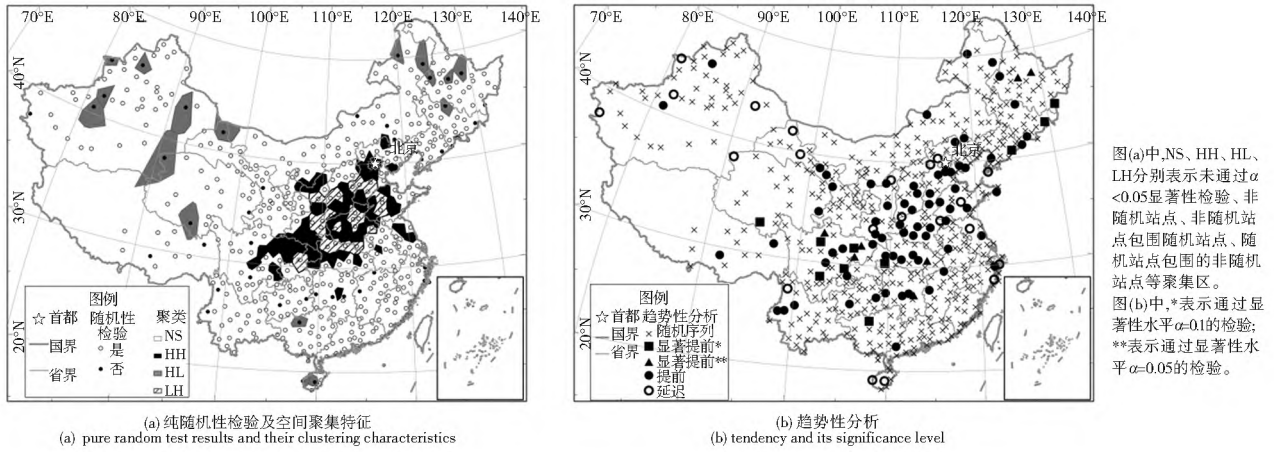


图 4 年降水水质心时间序列时域特征的空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of time domain features of the intrannual centroid time

为分析年降水水质心时间随经/纬向的变化趋势,建立了年降水水质心时间-经/纬度线性拟合曲线(图 5(b)、图 5(c)),可以看出年降水水质心时间沿经度方向变化不明显,而随着纬度升高,年降水水质心时间推迟。同时发现,年降水水质心时间沿经度、纬度变化表现出明显的南北、东西分异性,其原因在于东西部气候类型的差异和主雨季推进方向不一致^[3,24]。依据经纬线 $\pm 0.5^\circ$ 范围内尽可能多包含完整站点的原则,甄别出 100°E 、 117°E 等经线剖面 and 37°N 、 27°N 等纬线剖面,定量分析典型经纬线剖面上年降水水质心时间随经/纬度的变化规律,见图 5(b)、图 5(c)。剖面 B-B' 和 C-C' 显示,年降水水质心时间在 $(27^\circ\text{N}, 100^\circ\text{E})$ 处存在跃变,这可能与该区域地形复杂有关;沿着 37°N 的经向变化(A-A'剖面),在新疆和田(80°E)至甘肃景泰(104°E)段呈上升趋势,后基本稳定,这与刘扬等^[24]研究发现“北方地区以 100°E 为界东西部年降水变异显著不同”的观点基本一致;沿着 27°N 的经向变

化(B-B'剖面),从贡山站(98.7°E)开始增加,木里站(101.3°E)达到极大值后开始逐步下降(南岳站 112.7°E 有所增加,与该站点海拔较大有关),并在邵武站 117.5°E 达到极小值,其变化规律与长江流域的雨带年内移动规律基本一致^[25];沿着 117°E 的纬向变化(D-D'剖面),满洲里(49.6°N)~泰山(36.25°N)段年降水水质心时间基本维持稳定值,从泰山站开始减小,邵武站(27.3°N)达到极小值,后开始稳步增加。

5 我国年降水水质心时间的频域规律分析

5.1 特征站点各等级降水年内分布及决定系数

分别按式(1)、式(2)计算 1961 年-2010 年各等级降水对前段和后段降水矩决定系数 $DT_{pre/pro,j}$ 、年降水水质心时间 $T_{i,j}$,图 6-图 7 分别为特征站点 DT_{pre}/DT_{pro} 和 $T_{i,j}$ 的多年平均值统计结果。可以看出,各等级降水对年降水水质心影响程度不同,大雨及以上等级降水在年降水水质心时间的 $DT_{pre/pro}$ 均

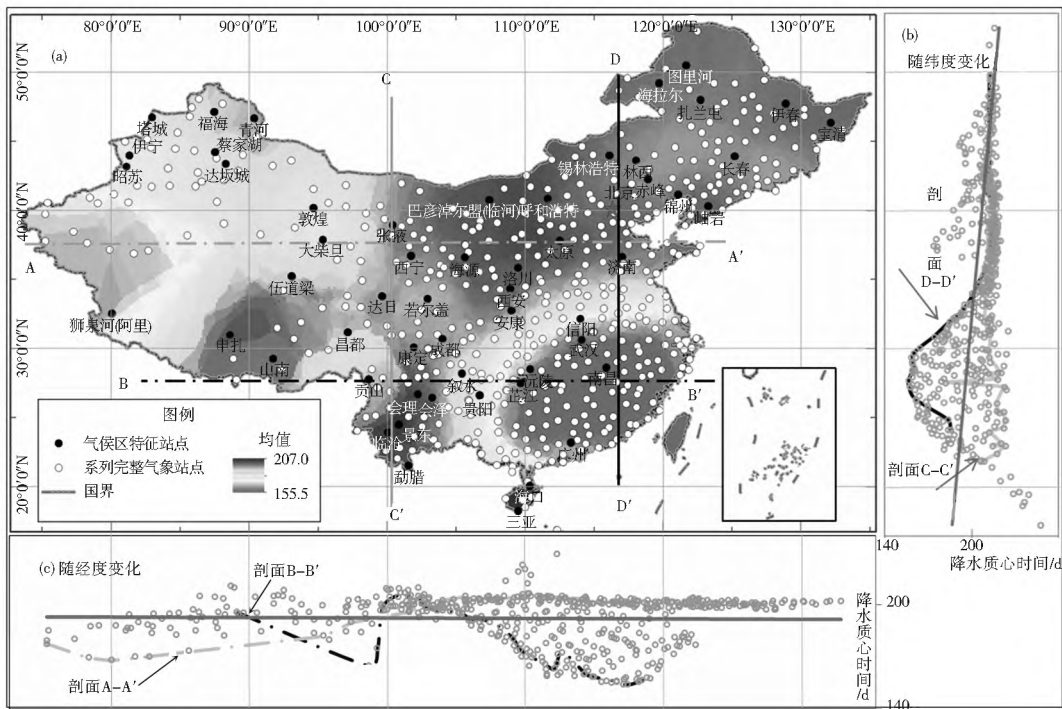


图 5 年降水水质心时间的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of the intrannual centroid time

大于 1(90.9% 的特征站点), 说明年降水水质心时间主要受年内大雨及以上等级降水事件发生时间决定; 不同站点各等级降水对年降水水质心时间决定作用的排序基本相似, 除蔡家湖等 6 个特征站点外, 均呈现“暴雨 > 大雨 > 中雨 > 小雨 > 微雨”规律, 同时由于降水等级是依据日降水量排频结果划分的, 因此有雨日降水量频率/ 概率的时间分布是决定年降水水质心时间的关键因素; 各等级降水对前段降水和后段降水矩的决定系数不同, 前段降水中暴雨(除蔡家湖等 5 个站点外)

和大雨(除达坂城等 13 个站点外)对降水矩的决定作用小于其在后段降水, 且与降水等级对应的年降水水质心时间 $T_{i,j}$ 晚于总的年降水水质心时间 T_i , 而中雨、小雨、微雨等呈现相反的规律, 说明年内各等级降水分布规律并不一致, 且大雨以上等级降水事件发生时间要总体上晚于中雨及以下等级降水的发生时间; 通常, 因为微雨等级有雨日雨量相近, 而其年降水水质心时间的极差要远大于微雨 - 大雨(图 7), 所以年内微雨等级降水发生时间的年际变异性最为显著。

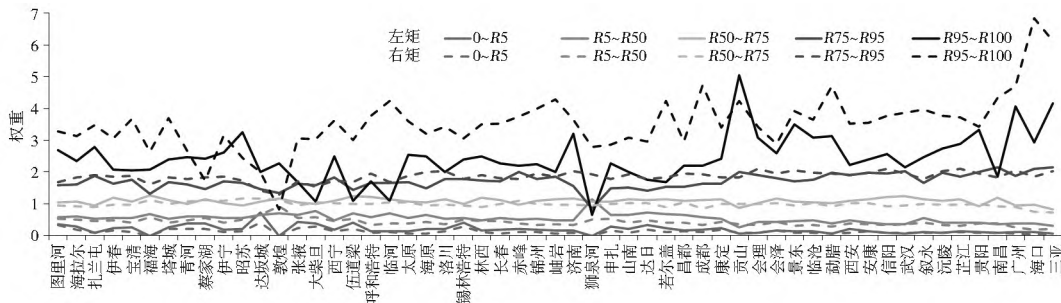


图 6 特征站点各等级降水对降水矩的权重

Fig. 6 The determination coefficient of certain grade to intrannual centroid time of typical stations

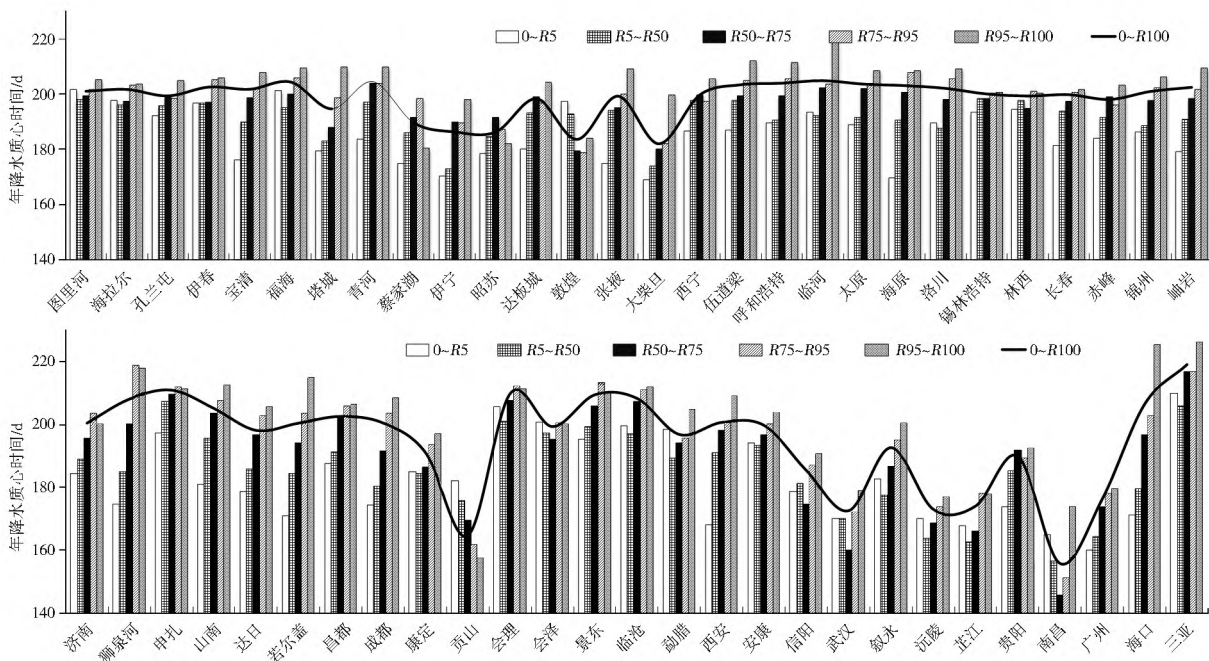


图 7 特征站点各等级降水的降水水质心时间

Fig. 7 The intrannual precipitation centroid time of certain grade precipitation of typical stations

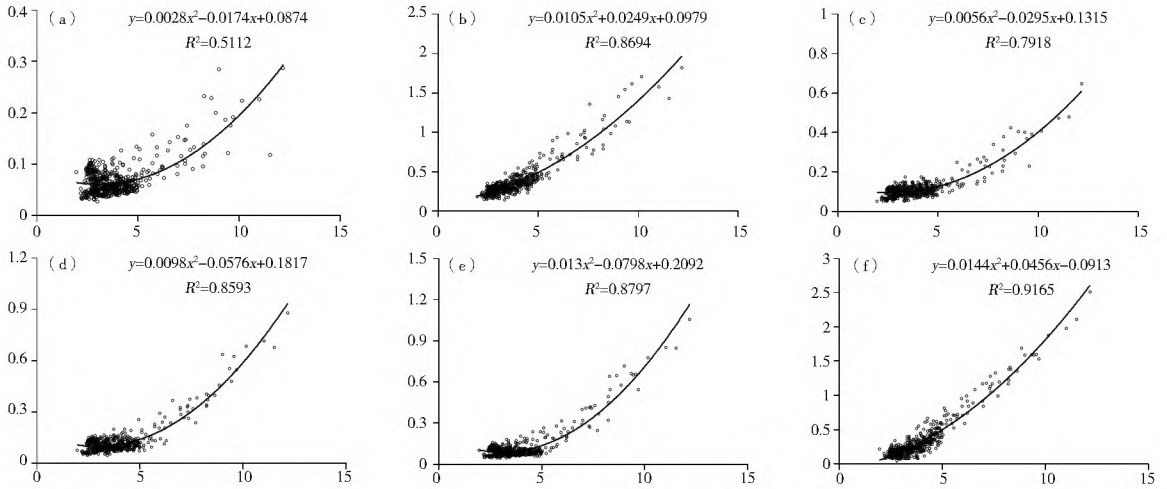
5.2 年内降水非均匀性和年际年降水水质心时间的相关分析

年降水水质心时间反映年内降水的不对称性, 并不能完全表征出年内降水不均匀特征。因此采用传统的年内降水变差系数 C_{v_over} 表示某气象站点处年内降水频域特征的不均匀性, 分析其与年际降水水质心时间的变差系数相关性, 若两者间呈现显著相关, 进一步进行回归分析。

经计算, 完整站点年内降水非均匀性 (C_{v_over}) 和总的及各等级的年降水水质心时间年际变差系数 C_{v_Tj} 间均呈现显著相关 ($\alpha < 0.01$), 采用二次型能够有效拟合, 拟合结果见图 8。由图可见, 除总降水水质心时间随年内降水非均匀性呈现下降

外(在 $C_{v_over} < 3.11$ 时), 其它回归分析(图 4)结果显示两者均为正相关关系, C_{v_over} 和 $C_{v_T(j)}$ 的相关系数 R^2 均大于 0.80, 说明年降水水质心时间变异性能有效反映该区域年内降水非均匀程度。

由于各个站点均有任一等级的、总的年降水水质心时间的年际变差系数, 所有完整站点构成了某一等级的或总的年际变差系数序列, 这些序列均能通过单样本 Kolmogorov-Smirnov 检验, 说明它们均服从正态分布, 因此可采用适用于双变量正态分布检验的 Person 相关分析来检验其它序列的相关性^[29]。检验总的及各等级的年降水水质心时间变差系数相关性, 结果见表 2。结果表明总的和各等级年降水水质心时间年际变差系数相关关系显著。



说明: 图中横坐标均为年内日降水变系数的多年平均值; (a) 至 (f) 的纵坐标分别表示总的及微雨、小雨、中雨、大雨和暴雨等降水等级的年降水质心时间的变差系数。

图 8 年降水质心时间变差系数与年内降水变差系数多年平均值的回归分析

Fig. 8 Regression analysis of variation coefficient of intr-annual centroid time with the average value of variation coefficients of intr-annual precipitation

表 2 总的及各等级年降水质心时间变差系数的 Person 相关系数(N = 550)

Table 2 The Person correlation coefficients of variation coefficient of total intr-annual centroid time with certain grades

项目	微雨	小雨	中雨	大雨	暴雨	总值
微雨	1					
小雨	0.848**	1				
中雨	0.877**	0.929**	1			
大雨	0.875**	0.926**	0.960**	1		
暴雨	0.928**	0.848**	0.876**	0.894**	1	
总值	0.725**	0.850**	0.861**	0.864**	0.727**	1

注: ** 表示在 0.01 水平 (双侧) 上显著相关

6 结论

将年降水过程线和时间轴间面域的几何质心在时间轴的投影作为年降水质心时间,其在年内具有唯一性且能集中反映年内主要降水过程的时间分布特征,尤其是暴雨、大雨等频率降水的发生时间。本文首先计算年降水质心时间,再利用 GIS 技术将其向空间上拓展,将质心概念推广至时空的多维空间,以此探讨了我国降水的时、空、频域规律及降水过程多时空尺度演变规律。研究认为: (1) 空间上,我国年降水质心时间从西北至东南呈现“早-晚-早”规律,没有明显的经向或纬向规律,年降水质心时间的分布与我国主雨季空间分布相吻合; (2) 时间上,多数站点年降水质心时间的时序列为纯随机性序列,非随机性站点在空间上具有显著的空间聚集特征,主要位于华中和华北地区,且非随机特性主要表现为周期性,趋势性、突变性不显著,年降水质心时间多为提前趋势为主,说明降水年内分布的年际变化趋势为春夏降水增多、秋冬降水减少; (3) 年降水质心时间主要由年内大雨以上等级降水发生时间决定,且年内各等级降水主要降水过程的年内分配不一致,表现为大雨及以上等级降水发生时间晚

于中雨及以下等级降水; (4) 年内降水愈不均匀的地区,年降水质心时间的年际变异愈加显著,表现为年降水质心时间的变差系数愈大,年降水质心变差系数能用于表征区域内降水不均匀特性。

参考文献 (References):

- [1] IPCC. Climate change 2007: Synthesis report [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] 张利平, 杜 鸿, 夏 军, 等. 气候变化下极端水文事件的研究进展 [J]. 地理科学进展, 2011, 30 (11): 1370-1379. (ZHANG Li ping, DU Hong, XIA Jun. Progress in the Study of Extreme Hydrologic Events Under Climate Change [J]. Progress in Geography, 2011, 30 (11): 1370-1379. (in Chinese))
- [3] 王遵娅, 丁一汇, 何金海, 等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析 [J]. 气象学报, 2004, 62 (2): 230-236. (WANG Zuyua, DING Yi hui, HE Jinhai, et al. An Updating Analysis of the Climate Change in China in Recent 50 Years [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2004, 62 (2): 230-236. (in Chinese))
- [4] S Michaelides, V Levizzani, E Anagnostou, et al. Precipitation: Measurement, Remote Sensing, Climatology and Modeling [J]. Atmospheric Research, 2009, 94 (4): 512-533.
- [5] 王浩, 王建华, 秦大庸, 等. 基于二元水循环模式的水资源评价理论方法 [J]. 水利学报, 2006, 37 (12): 1496-1502. (WANG Hao, WANG Jianhua, QIN Dayong, et al. Theory and Methodology of Water Resources Assessment Based on Dualistic Water Cycle Model [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2006, 37 (12): 1496-1502. (in Chinese))
- [6] 王纪军, 裴铁璠, 顾万龙, 等. 降水年内分配不均匀性指标 [J]. 生态学杂志, 2007, 16 (9): 1364-1368. (WANG Jijun, PEI Tieshan, GU Wanlong, et al. Nonuniformity Index of Annual Precipitation Distribution [J]. Chinese Journal of Ecology, 2007, 16 (9): 1364-1368. (in Chinese))
- [7] Shi W L, Yu X Z, Liao W G. Spatial and Temporal Variability of Daily Precipitation Concentration in the Lancang River Basin, China [J]. Journal of Hydrology, 2013, 495 (12): 197-207.

- [8] 杨金虎,李耀辉,王鹏祥,等.中国极端强降水事件年内非均匀特征分析[J].自然资源学报,2007,22(4):623-633.(YANG Jir hu, LI Yao hui, WANG Peng xiang, et al. Analyses on Intra-annual Inhomogeneity Characteristic of Extreme Strong Precipitation Events in China[J]. Journal of Natural Resources, 2007, 22(4): 623-633. (in Chinese))
- [9] Zhang Lujun, Qian Yongfu. Annual Distribution Features of Precipitation in China and their Interannual Variations[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2003, 17(2): 146-163.
- [10] Yu Rucong, Yuan Weihua, Li Jian. The Asymmetry of Rainfall Process. Chinese Science Bulletin, 2013, 58(16): 1850-1856.
- [11] 王遵娅,丁一汇.中国雨季的气候学特征[J].气象学报,2008,32(1):1-13.(WANG Zun ya, DING Yi hui. Climatic Characteristics of Rainy Seasons in China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2008, 32(1): 1-13. (in Chinese))
- [12] 巩宪锋,李忠富,王长松,等.质心原理在光纤光栅传感波长解调中的应用[J].北京科技大学学报,2004,26(4):429-432.(GONG Xian feng, LI Zhong fu, WANG Chang song, et al. Application of Centroid Principle to Wavelength Demodulation of Fiber Grating Sensors[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2004, 26(4): 429-432. (in Chinese))
- [13] Stewart I T, Cayan D R, Dettinger M D. Changes in Snowmelt Runoff Timing in Western North America under a "Business as Usual" Climate Change Scenario[J]. Climatic Change, 2004, 62: 217-232.
- [14] 万荣荣,杨桂山,李恒鹏,等.中尺度流域次降雨洪水过程模拟——以太湖上游西苕溪流域为例[J].湖泊科学,2007,19(2):170-176.(WAN Rong rong, YANG Gui shan, LI Heng peng, et al. Simulating Flood Events in Mesoscale Watershed: a Case Study from River Xitiaoxi Watershed in the Upper Region of Taihu Basin[J]. Journal of Lake Science, 2007, 19(2): 170-176. (in Chinese))
- [15] M D Mart nez, X Lana, A Burgue c, et al. Spatial and Temporal Daily Rainfall Regime in Catalonia (NE Spain) Derived from Four Precipitation Indices, Years 1995-2000[J]. International Journal of Climatology, 2007, 27: 123-138.
- [16] Huang G, Wen G. H. Spatial and Temporal Variations of Light Rain Events over China and the Mid-high Latitudes of the Northern Hemisphere[J]. Chinese Science Bulletin, 2013, 57(1): 1-10.
- [17] 符娇兰,林祥,钱维宏.中国夏季分级雨日的时空特征[J].热带气象学报,2008,24(4):367-373.(FU Jiao lan, LIN Xiang, QIAN Wei hong. The Temporal and Spatial Characteristics of Graded Summer Rain Days over China[J]. Journal of tropical meteorology, 2008, 24(4): 367-373. (in Chinese))
- [18] 胡乃发,王安志,关德新,等.1959-2006年长白山地区降水序列的多时间尺度分析[J].应用生态学报,2010,21(3):549-556.(HU Nai fa, WANG An zhi, GUAN De xin, et al. Multiple Time Scales Analysis of Precipitation Series in Changbai Mountain Region in 1959-2006. Chinese Journal of Applied Ecology, 2010, 21(3): 549-556. (in Chinese))
- [19] 郑景云,尹云鹤,李炳元.中国气候区划新方案[J].地理学报,2010,65(1):3-13.(ZHENG Jing yun, YIN Yun he, LI Bing yuan. A New Scheme for Climate Regionalization in China[J]. Acta Geographica Sinica, 2010, 65(1): 3-13. (in Chinese))
- [20] G M Ljung, G E P Box. On a Measure of a Lack of Fit in Time Series Models[J]. Biometrika, 1978, 65(2): 297-303.
- [21] Anselin L. Local Indicators of Spatial Association—LISA[J]. Geographical analysis, 1995, 27(2): 93-115.
- [22] 唐蕴,王浩,严登华,等.近50年来东北地区降水的时空分异研究[J].地理科学,2005,25(2):172-176.(TANG Yun, WANG Hao, YAN Deng hua, et al. Research on the Spatial-Temporal Differentiation of Precipitation in Northeast China in Recent 50 Years[J]. Scientia Geographica Sinica, 2005, 25(2): 172-176. (in Chinese))
- [23] 刘扬,韦志刚,李振朝,等.中国北方地区降水变化的分区研究[J].高原气象,2012,31(3):638-645.(LIU Yang, WEI Zhi gang, LI Zhen chao, et al. Study on Division of Precipitation in Northern China[J]. Plateau Meteorology, 2012, 31(3): 638-645. (in Chinese))
- [24] 韦志刚,董文杰,惠小英.中国西北地区降水的演变趋势和年际变化[J].气象学报,2000,58(2):234-243.(WEI Zhi gang, DONG Wen jie, HUI Xiao yin. Evolution of Trend and Interannual of Oscillatory Variabilities of Precipitation over Northwest China[J]. Acta Meteorologica Sinica, 2000, 58(2): 234-243. (in Chinese))
- [25] 张录军,钱永甫.长江流域汛期降水集中程度和洪涝关系研究[J].地球物理学报,2004,47(4):622-630.(ZHANG Lu jun, QIAN Yong fu. A Study on the Feature of Precipitation Concentration and Its Relation to Flood Producing in the Yangtze River Valley of China[J]. Chinese Journal of Geophysics, 2004, 47(4): 622-630. (in Chinese))
- [26] Pearson K. On the Criterion that a Given System of Deviations from the Probable in the case of a Correlated System of Variables is such that It can be Reasonably Supposed to Have Arisen from Random Sampling[J]. Philosophical Magazine, 1900, 50(5): 157-175.