

周玉良,周磊,周平,等. 秦岭-淮河地区降水空间聚类分析[J]. 南水北调与水利科技(中英文), 2024, 22(6): 1100-1109. ZHOU Y L, ZHOU L, ZHOU P, et al. Spatial clustering of the Qinling-Huaihe region based on precipitation indexes[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2024, 22(6): 1100-1109. (in Chinese)

秦岭-淮河地区降水空间聚类分析

周玉良,周磊,周平,张宇亮,崔毅,金菊良

(合肥工业大学土木与水利工程学院, 合肥 230009)

摘要: 秦岭-淮河地区受复杂地形与多变季风气候影响,降水在年际和年内波动较大,空间分布呈明显区域性。通过分析不同时间尺度降水量,年降水量丰平枯状态和相邻年份年降水量变化的增平减趋势,对秦岭-淮河地区进行降水空间聚类。结果表明:根据候降水量指标可将秦岭-淮河地区分为江淮、黄淮、秦岭以南、秦岭以北 4 个区,据年降水量丰平枯状态联系系数指标可将该地区分为江淮、黄淮、秦岭-淮河交界附近、秦岭以北高原和秦岭以南西段 4 个区,据相邻年份年降水量变化增平减趋势联系系数指标可将该地区分为江淮、黄淮、秦岭 3 个区;融合 3 个降水指标的区域划分结果,可将秦岭-淮河地区划分为 6 个区:江淮、黄淮、秦岭以南、秦岭以北西段和高原区、关中区、秦岭-淮河交界过渡区。基于线性矩法的分区一致性检验表明分区内无奇异站点。

关键词: 降水空间聚类;候降水量;年降水量丰平枯状态;相邻年份年降水量变化;集对分析;秦岭-淮河

中图分类号: TV125; P339 **文献标志码:** A **DOI:** 10.13476/j.cnki.nsbdqk.2024.0109

秦岭-淮河沿线地处我国东部季风区,我国地势第二阶梯与第三阶梯的分界线南北向经过该地区,其降水受地形和季风影响大,具有较强的季节性和区域性。受季风北进南退的时间、强度、范围等要素的随机性影响,降水在年际和年内变化大^[1]。该地区是我国南北气候过渡区、主要产粮地区和南水北调中线影响区,研究该地区降水的空间分布特征,有助于进一步认识我国降水的空间分异规律,可为该地区水旱灾害防御和经济社会发展等提供数据支撑。

已有较多关于秦岭-淮河地区的部分区域降水时空特征及其演变规律的研究^[2-5],但将秦岭-淮河地区视为整体的研究^[6]还相对较少。行星尺度的天气系统(尤其是北半球的副热带高压带)移动的快慢和笼罩的范围,是降水季节性和区域性的控制性条件,而这种行星尺度天气系统(跳跃、滞留等)移动的时间与月、季等便于统计和管理所使用的时间尺度并不完全匹配,也就是说具有相同形成机制的降水过程并不总是发生在某个月、季内,而存在跨月、季的现象^[7-8];行星尺度天气系统影响的区域与地面高大山脉有密切的联系,如青藏高原东缘的秦岭以

南和以北的降水可能存在显著的区域差异性,但这种区域的分界线与行政区域界线、经纬线等不完全重合。因此以月、季等时间尺度来分析降水特征可能割裂了具有相同形成机制的降水过程或将具有不同形成机制的降水过程聚集在一起,以秦岭区域、淮河区域或者以行政区作为分析降水特征的空间范围可能会使研究区域内降水过程存在明显的空间不均匀性。水文气象研究^[9-13]常以秦岭和淮河为南北区域的分界,将该地区直接分为秦岭以南、秦岭以北、淮河以南、淮河以北等区域,或以行政区作为研究区域的边界^[2-5],分析降水的时空分布规律及其演变机理等^[14-16]。基于观测降水的统计特征对秦岭-淮河整个地区进行区域划分的研究尚不多见,大多情况下也没有考虑基于不同时间尺度降水量的区域划分的异同,更未见根据年降水量丰平枯状态、相邻年份年降水量变化的增平减趋势等特征对秦岭-淮河地区的区域划分研究。为此,基于秦岭-淮河地区长序列日降水观测数据,从不同时间尺度上的多年平均降水量、年降水量的丰平枯状态、相邻年份年降水量变化增平减趋势的角度,采用逐步聚

收稿日期: 2024-05-05 修回日期: 2024-09-02 网络出版时间: 2024-09-27

网络出版地址: <https://link.cnki.net/urlid/13.1430.TV.20240927.0856.002>

基金项目: 国家重点研发计划项目(2023YFC3206604-02; 2023YFC3006605); 国家自然科学基金项目(42271084; 52379006; 52209011); 安徽省自然科学基金项目(230808US13; 2208085QE179)

作者简介: 周玉良(1982—),男,安徽舒城人,教授,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: ZYL54600@163.com

通信作者: 周平(1982—),女,安徽巢湖人,高级实验师,博士,主要从事水文水资源研究。E-mail: chaohupingping@126.com

类法^[17-19]对该地区的降水区域性进行识别,以期为区域水旱灾害防御和水资源配置利用等提供理论依据。

1 数据与方法

1.1 研究区域和数据来源

秦岭-淮河沿线是我国重要的南北气候分界线^[14],

以黄河、长江、嘉陵江和海岸线所围区域作为研究区域。以研究区域内以及紧邻区域周边的降水数据较完整的 89 个站(1960—2019 年中完整资料年数超过 45 年)为研究站点,站点见表 1。89 个站 1960—2019 年的逐日降水量来自中国气象局(<http://data.cma.cn/site/index>)。

表 1 秦岭-淮河地区各省雨量站

Tab. 1 Rainfall stations of each province in the Qinling-Huaihe region

省份	站点数	站点名称
江苏	13	南京、徐州、吴县、盱眙、溧阳、淮安、东台、吕泗、高邮、射阳、南通、赣榆、常州
安徽	13	阜阳、亳州、蚌埠、砀山、宿州、滁州、寿县、合肥、巢湖、六安、安庆、芜湖、霍山
山东	12	青岛、济南、潍坊、泰山、泰安、淄博、兖州、沂源、莒县、菏泽、临沂、日照
湖北	3	房县、老河口、枣阳
河南	17	固始、安阳、郑州、新乡、开封、商丘、许昌、信阳、三门峡、孟津、栾川、驻马店、西华、宝丰、南阳、西峡、卢氏
山西	3	阳城、临汾、运城
陕西	19	略阳、铜川、镇安、华山、汉中、西安、绥德、商州、长武、洛川、武功、佛坪、延安、石泉、吴旗、安康、宝鸡、横山、榆林
甘肃	7	岷县、西峰、平凉、华家岭、天水、武都、临洮
四川	2	万源、松潘

1.2 研究方法

1.2.1 基于不同时间尺度降水量指标的空间聚类

采用逐步聚类法对站点进行空间聚类^[17-19]。雨量站空间逐步聚类的过程是先将每个站点单独作为一类,此时类间距或类间关联度即为 2 个样本间的距离或关联度;后将类间距最近或关联度最高的 2 个类合并为 1 个新类,再计算各类之间的距离或关联度,此时需要通过 2 个类的类内所有样本的距离或关联度计算类间距或关联度;再将距离最小或关联度最高的 2 个类聚为 1 个新类,这样每次减少 1 个类,直到所有站点都被合并为一类。逐步聚类法通过 $N-1$ 次合并完成对 N 个站点的区域划分,可用谱系图表达合并过程。

站点间的距离一般用欧氏距离表达。设站点 i 和 j 多年平均的各时段降水量为 $X_{(i)}(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{im})$ 和 $X_{(j)}(x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{jm})$, m 为一年中的时段数,如时间尺度为候,则 $m=72$ 。基于降水指标的站点 i 和 j 的欧氏距离 d_{ij} 为

$$d_{ij} = \sqrt{\frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (x_{ik} - x_{jk})^2} \quad (1)$$

类内样本数为 n_p 、 n_q 的 2 个类 G_p 、 G_q 之间的距离 D_{pq} 为

$$D_{pq} = \sum_{i \in G_p, j \in G_q} d_{ij} / n_p n_q \quad (2)$$

若聚类的指标为样本 i 和 j 间的关联度 r_{ij} (如样本间的联系数),则样本数为 n_p 、 n_q 的 2 个类 G_p 、 G_q 之间的关联度 R_{pq} 采用下式计算:

$$R_{pq} = \sum_{i \in G_p, j \in G_q} r_{ij} / n_p n_q \quad (3)$$

1.2.2 基于站点年降水量丰平枯状态联系数指标的空间聚类

采用均值标准差法将年降水量转换为丰、平、枯 3 种状态,基于集对分析构建站点间的联系数,进而通过减法集对势进行空间聚类。具体步骤如下:

步骤 1, 年降水量状态划分: 对每个站点计算其 1960—2019 年年降水量的均值(\bar{x})和标准差(σ), 将年降水量位于 $[0, \bar{x} + k_1\sigma)$ 、 $[\bar{x} + k_1\sigma, \bar{x} + k_2\sigma)$ 和 $[\bar{x} + k_2\sigma, \infty)$ 的记为枯、平、丰年。根据正态分布的性质, 设置 $k_1 = -0.43$ 、 $k_2 = 0.43$, 使年降水量被划分为丰、平、枯 3 个等级的概率各约为 1/3。

步骤 2, 基于集对分析的站点间联系数计算: 对于任意两个站点 i 和 j , 将其年降水量序列 $X_i = \{x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{i60}\}$ 和 $X_j = \{x_{j1}, x_{j2}, \dots, x_{j60}\}$ 转换为对应的丰、平、枯状态序列。再根据集对分析理论, 比较两个站点在同一年份的降水状态, 统计同(同丰、同平、同枯)、异(一平一枯、一平一丰)、反(一丰一枯)的年份数

量,分别记为 S 、 F 、 P 。然后,计算站点 i 和 j 的联系数 $u_{ij}=a+bI+cJ$, 其中: 同一度 $a=S/N$, 差异度 $b=F/N$, 对立度 $c=P/N$; N 为集合项数; S 、 F 、 P 分别为集对中同、异、反元素的数量; I 为不确定性系数, 在 $[-1, 1]$ 取值; J 为对立度系数, $J=-1$ 。

步骤 3, 减法集对势与聚类: 利用得到的联系数 u_{ij} 计算减法集对势 $s_j(u_{ij})=a-c+ba-bc$ [20-21], 减法集对势越大, 表示两站点在降水丰平枯状态上的关联度越高。记 $U_{ij}=s_j(u_{ij})(i=1, 2, \dots, 89; j=1, 2, \dots, 89)$ 为站点间的减法集对势矩阵, 相应地类与类之间的关联度采用式(3)计算。

1.2.3 基于相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数指标的空间聚类

计算站点相邻年份年降水量的变化量, 将变化量分为增、平、减 3 种趋势, 通过站点年降水量的增、平、减趋势计算站点间的联系数, 以基于联系数的减法集对势为指标进行空间聚类, 具体步骤如下:

步骤 1, 相邻年份年降水变化量计算: 计算 1960—2019 年相邻年份的年降水量的变化量, 记站点 i 的变化量序列为 $\Delta_i=\{\Delta_{i1}, \Delta_{i2}, \dots, \Delta_{i59}\}$ 。

步骤 2, 变化量的趋势划分: 与年降水量状态划分类似, 通过均值标准差法将 Δ_i 分为增、平、减 3 种趋势。

步骤 3, 集对分析与聚类: 对站点 i 和 j , 比较它们在同一年份的年降水量变化的趋势, 统计同(同增、同平、同减)、异(一增一平、一平一减)、反(一增一减)的年数。基于相邻年份年降水量变化趋势的站点间的联系数和减法集对势的计算以及站点的聚类方法与 1.2.2 中的方法相同。

1.2.4 聚类数确定与分区一致性判别

逐步聚类时, 每次合并均减少 1 个类, 类间距随着类的合并和减少而不断增加, 亦或类间的关联度不断下降。若某次合并前后的类间距相比于此前合并过程中类间距突然增加或类间关联度急剧下降, 则以该次合并前的分类结果作为空间聚类的初步结果, 分析类中是否有空间位置异常的个别站点, 剔除异常站点或转移至包含该站点位置的类中。

线性矩法在水文时间序列统计参数估计中具有良好的稳健性, 被广泛应用于分区内站点的水文序列统计参数的一致性检验 [22-25]。一般用四阶线性矩计算分区内站点的不一致测度 D , 当 D 小于一定阈值时认为区内无奇异站点。设区内有 N 个站点, 站点 i 的样本容量为 n_i , 从大到小排序的样本序列为

$(x_{1(i)}, x_{2(i)}, \dots, x_{n_i(i)})$, 计算样本线性矩差系数 $t_{(i)}$ 、偏态系数 $t_{3(i)}$ 、峰度系数 $t_{4(i)}$, 组成的列向量 $u_i=(t_{(i)}, t_{3(i)}, t_{4(i)})^T$, 则:

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i \quad (4)$$

$$A = \sum_{i=1}^N (u_i - \bar{u})(u_i - \bar{u})^T \quad (5)$$

$$D_i = \frac{1}{3} N (u_i - \bar{u})^T A^{-1} (u_i - \bar{u}) \quad (6)$$

$$t_{(i)} = l_{2(i)}/l_{1(i)} \quad t_{3(i)} = l_{3(i)}/l_{2(i)} \quad t_{4(i)} = l_{4(i)}/l_{2(i)} \quad (7)$$

$$\begin{cases} l_{1(i)} = M_{1(i)} & l_{2(i)} = 2M_{2(i)} - M_{1(i)} \\ l_{3(i)} = 6M_{3(i)} - 6M_{2(i)} + M_{1(i)} \\ l_{4(i)} = 20M_{4(i)} - 30M_{3(i)} + 12M_{2(i)} - M_{1(i)} \\ M_{j(i)} = \sum_{n=1}^{n_i} x_n^{(i)} \prod_{k=0}^{j-2} (n_i - k - n) \Big/ \prod_{k=0}^{j-1} (n_i - k) \end{cases} \quad (8)$$

当区内所有站点的 $D_i < (N-1)/3$ 时, 可认为区内无奇异站点。更严格的条件为 D_i 应同时满足 $D_i < 3$ 。

2 基于不同降水指标的秦岭-淮河地区空间聚类结果与分析

2.1 基于不同时间尺度降水量指标的空间聚类

不同时间尺度降水量指标的空间聚类分析。分析以多年平均日、候、旬、月、季、年降水量为指标的雨量站的空间聚类。不失一般性, 以多年平均候降水量作为空间聚类指标, 对秦岭-淮河地区 1960—2019 年 89 个雨量站的多年平均候降水量进行分析, 其逐步聚类的谱系见图 1。

由图 1 可见, 安庆站、万源站与其他站点在候降水量特征上差别大, 被分为单独的类。主要是安庆站和万源站处于研究区域的最南端, 降水总量及其在候时间尺度上的分布与其他站差别大。考虑空间分区的连续性, 将安庆站和万源站分别纳入图 1 中的类 I 和类 III。类 I 和类 II₁ 合并后的类 A, 与类 II₂、III、IV 合并后的类 B, 再次合并后就将除安庆站、万源站之外的所有站点聚为一类, 此时类间距明显增加, 故应将类 A 和类 B 分开。合并到类 I 中的霍山站和类 II₁ 中的泰山站与其他站点差别较大, 主要是霍山站和泰山站海拔比周围站点高, 山地地形雨致其降水较多。考虑到分区的连续性, 仍将它们分到地理位置最近的区中。类 II₁ 中除泰山站外, 其他站点所形成的类内差别很小, 同时与类 I 也有较大的差别, 故将类 I 和类 II₁ 中站点划为不同的分

区更合适。同样地,类 II_2 和类IV合并会导致类内距离突然增加,故应将类 II_2 和类IV中的站点划为不同的分区,进而类III中的站点也被划为一个分区。

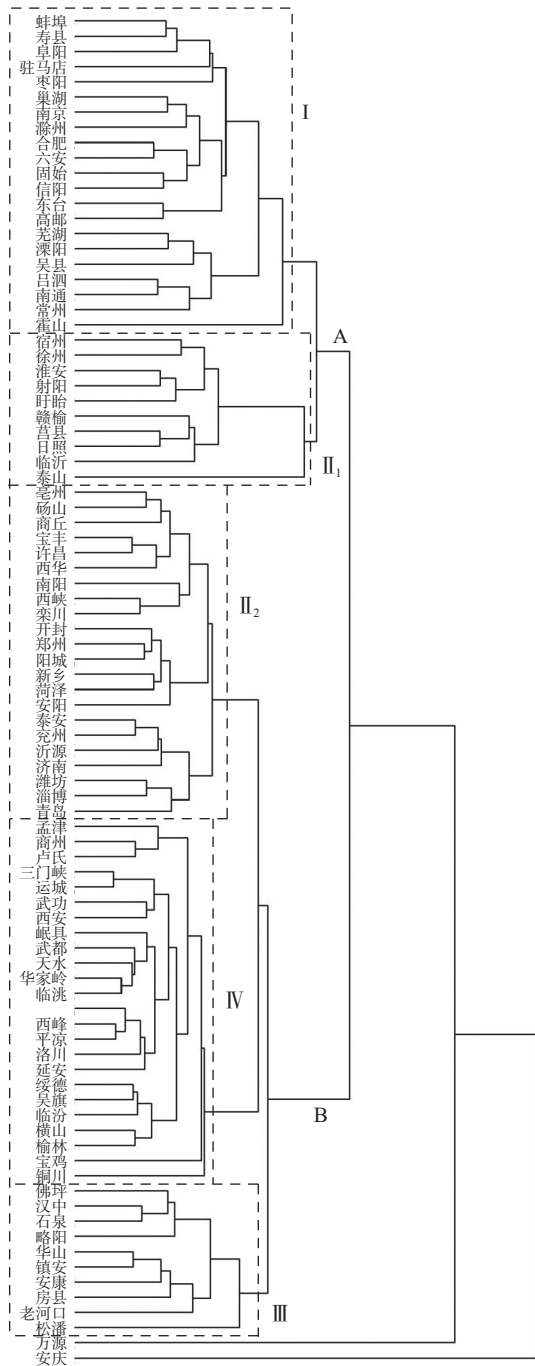


图1 候降水量指标聚类分析谱系图

Fig. 1 Spectrogram of cluster analysis based on pentad precipitation

去除类 II_1 中的泰山站,按式(3)计算类 II_1 与类I、类 II_2 之间的距离分别为7.17和5.59 mm,可见类 II_1 与类 II_2 更接近。图1中类 II_2 与类IV之间的距离为5.46 mm,稍小于类 II_2 与类 II_1 之间的距离5.59 mm。考虑到分区的连续性和类间距,将 II_1 和类 II_2 合并为类II。

华山站与商州站在分类结果中与其附近的站点不在一起。华山站地处秦岭以北,因其海拔高,受地形雨的影响,年均降水量达806.4 mm,致使华山站与秦岭以南的站点被划分为同类。考虑到同海拔的山脚降水量与其附近无显著差别,仍将华山站归类到秦岭以北区域。商州站地处陕南与关中地区的过渡地带,其降水量少于秦岭以南的周边站点,致使商州站与秦岭以北的站点划为同一类。类III中的略阳站、镇安站和松潘站的多年平均年降水量略小于800 mm。

基于候降水量指标识别的4个区见表2,分别为江淮区、黄淮区、秦岭以南区、秦岭以北区。其中:江淮区和黄淮区在东段主要以淮河为界,在西段以800 mm年降水量等值线为界;秦岭以南和秦岭以北区的分界线为秦岭和800 mm年降水量等值线。

不同时间尺度降水量指标的空间聚类结果比较。比较日、候、旬、月、季、年尺度降水量指标的逐步聚类结果,发现:年、月尺度多年平均降水量指标下秦岭-淮河地区聚类中会出现同属一类的站点地理位置较远的情况,即年、月尺度上的降水量接近,更小时间尺度上的降水特征存在差异的站点被归为一类;多年平均日降水量指标下划分的部分类中站点数量很少,导致分类数较多,主要是随机性较强的日降水在空间上分布不均匀导致邻近站点在指标上的差别造成的;多年平均旬、候降水量指标下聚为同类的站点,其地理位置也很接近。

候尺度与耕作层土壤供给农作物蒸散发的水分消耗时间密切相关,如秦岭-淮河地区蒸散发强度一般为3~5 mm/d,耕作层土壤张力水的有效蓄水量约为15~25 mm,则土壤张力水在蓄满的情况下,1候内可满足作物蒸散发的水分需求。故基于候降水量识别的干旱过程与实际旱情可能很接近。为使划分的区域在水旱灾害防御等研究中具有适用性,以候降水量指标划分的区域作为时段降水量的空间聚类结果。

假设降水量近似服从正态分布,运用 U 检验,可对各分区的降水量是否存在差别进行显著性检验。表2中江淮区年降水量序列 $X_1 \sim N(1084.2, 186.8^2)$,黄淮区年降水量序列 $X_2 \sim N(762.9, 131.6^2)$,秦岭以南区年降水量序列 $X_3 \sim N(876.0, 129.3^2)$,秦岭以北区年降水量序列 $X_4 \sim N(551.7, 90.3^2)$ 。在各分区年降水量均值 $u_1=u_2$ 相等的零假设下,对各分

区的降水量进行 U 检验:

$$U_{12} = \frac{\bar{X}_1 - \bar{X}_2 - (\mu_1 - \mu_2)}{\sqrt{\sigma_1^2/N_1 + \sigma_2^2/N_2}} \sim N(0, 1) \quad (9)$$

计算得 II、III 之间的 U 统计量最小, 为 2.404, 超过

$|U_{0.05/2}|=1.960$; 其他类之间的 U 统计量均超过 $|U_{0.01/2}|=2.576$ 。在 0.05 的显著性水平下拒绝零假设, 说明秦岭-淮河地区不同分区的降水具有显著差异。

表 2 基于候降水量指标的秦岭-淮河流域划分结果及其年降水特征

Tab. 2 Regional division of the Qinling-Huaihe River based on pentad precipitation and their precipitation characteristics

类别	站点数	站点名称	区域位置及特征	年降水均值±标准差/mm
I	22	蚌埠、寿县、阜阳、驻马店、枣阳、巢湖、南京、滁州、合肥、六安、固始、信阳、东台、高邮、芜湖、溧阳、吴县、吕泗、南通、常州、霍山、安庆	江淮区 年降水大于 900 mm	1 084.2±186.8
II	32	II ₁ 宿州、徐州、淮安、射阳、盱眙、赣榆、莒县、日照、临沂、泰山 (914.4±88.7) II ₂ 亳州、砀山、商丘、宝丰、许昌、西华、南阳、西峡、栾川、开封、郑州、阳城、新乡、菏泽、安阳、泰安、兖州、沂源、济南、潍坊、淄博、青岛 (663.9±80.4)	黄淮区 II ₁ 年降水 800~1 000 mm II ₂ 年降水 600~800 mm	762.9±131.6
III	10	佛坪、汉中、石泉、略阳、镇安、安康、房县、老河口、松潘、万源	秦岭以南 年降水大于 800 mm	876.0±129.3
IV	25	孟津、商州、卢氏、三门峡、运城、武功、西安、岷县、武都、天水、华家岭、临洮、长武、西峰、平凉、洛川、延安、绥德、吴旗、临汾、横山、榆林、宝鸡、铜川、华山	秦岭以北 年降水小于 800 mm	551.7±90.3

2.2 基于站点年降水量丰平枯状态联系系数指标的空间聚类

按 1.2.2 节的步骤计算秦岭-淮河地区站点间年降水量丰平枯状态的减法集对势, 进行逐步聚类。若两个站年降水量丰平枯状态相同的年份所占的比例低于 50%, 认为两站应归属于不同的类。当联系系数的同、异、反的比例分别为 50%、25%、25% 时, 其减法集对势 $s_f(u)=(a-c) \times (1+b)=(0.5-0.25) \times (1+0.25)=0.31$, 故不将类间联系系数小于 0.31 的两类合并。同样地, 当联系系数的同、异、反的比例分别为 60%、20%、20% 时, 其减法集对势为 0.48, 一般将联系系数高于 0.48 的两类合并为同类。

逐步聚类时, 最后被合并的类(类 IV)与其他类之间的联系系数为 0.22(小于 0.31), 而形成类 IV 的最后一次合并的类间联系系数为 0.50(高于 0.48), 故类 IV 应被分为单独一类。倒数第 2 次合并的类(类 I、合并 II 和 III 的类)之间的联系系数为 0.30(小于 0.31), 而形成类 I 的最后一次合并的类间联系系数为 0.51(高于 0.48), 故类 I 应被分为单独一类。倒数第 3 次合并的类(类 II、类 III)之间的联系系数为 0.35, 其联系系数稍高于 0.31, 但形成类 II 和类 III 的最后一次合并的类间联系系数达到 0.44(类 II)和 0.47(类 III), 类 II 和类 III 合并导致联系系数快速下降, 应将类 II、类 III 分别作为一类。站点分为 4 类的结果见表 3。

表 3 基于年降水量丰平枯状态联系系数指标的秦岭-淮河地区的区域划分结果及其年降水特征

Tab. 3 Regional division of the Qinling-Huaihe region based on annual precipitation states and their characteristics

类别	站点数	站点名称	区域位置及特征	年降水均值±标准差/mm
I	22	淮安、盱眙、东台、高邮、射阳、蚌埠、寿县、固始、阜阳、霍山、六安、合肥、南京、滁州、巢湖、吕泗、南通、常州、溧阳、芜湖、安庆、吴县	江淮区 年降水大于 900 mm	1 084.7±126.1
II	27	宿州、徐州、亳州、砀山、商丘、赣榆、临沂、莒县、青岛、日照、泰山、泰安、兖州、沂源、潍坊、宝丰、开封、郑州、新乡、菏泽、许昌、孟津、阳城、安阳、临汾、济南、淄博	黄淮区 年降水小于 900 mm	714.8±124.3
III	21	驻马店、信阳、枣阳、南阳、老河口、安康、房县、西华、栾川、西峡、万源、石泉、镇安、卢氏、华山、铜川、武功、西安、商州、三门峡、运城	秦岭-淮河交界附近	786.2±176.7
IV	19	汉中、佛坪、宝鸡、略阳、长武、西峰、平凉、岷县、天水、华家岭、临洮、绥德、吴旗、横山、延安、榆林、洛川、松潘、武都	秦岭以北高原区和秦岭以南西段	581.5±145.9

由表 3 可知: 类 I 中的站点主要分布在长江和淮河之间, 记为江淮区, 区域内站点的多年平均年

降水量均大于 900 mm; 类 II 中的站点分布在淮河以北和黄河以南, 记为黄淮区, 区域内位于黄淮区东

部的赣榆站和海拔较高的泰山站的多年平均年降水量高于 900 mm(分别为 920.7 和 1 062.6 mm),其余站点小于 900 mm;类 III 中的站点主要分布在秦岭-淮河交界附近;类 IV 中的站点主要位于秦岭以北的高原区和秦岭以南的西段(松潘、武都位于秦岭以南的西段)。

2.3 基于相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数指标的空间聚类

按 1.2.3 节的步骤计算站点间相邻年份年降水量变化增平减趋势的减法集对势,进行逐步聚类。逐步聚类时,最后被合并的类(类 III)与其他类之间的联系数为 0.283,其联系数小于 0.31,形成类 III 的

最后一次合并时的类 III₁ 和类 III₂ 的联系数为 0.44(接近于 0.48),形成类 III₁、类 III₂ 的最后一次合并时的类间联系数分别为 0.64、0.50,表明形成类 III 的最后一次合并未造成联系数的明显下降(0.50 降到 0.44),故将类 III 单独作为一类。同时为表示类内区别,将类 III 细化为类 III₁、类 III₂。类 I 和类 II 合并时的类间联系数为 0.35,虽稍大于 0.31,但形成类 I、类 II 的最后一次合并的类间联系数分别为 0.48(类 I)、0.49(类 II),类 I 和类 II 合并导致联系数快速下降,故应将类 I、类 II 单独作为一类。站点分为 3 类的聚类结果见表 4。

表 4 基于相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数指标的秦岭-淮河区域划分及其年降水特征

Tab. 4 Regional division of the Qinling-Huaihe region based on annual precipitation change and their characteristics

类别	站数	站点名称	区域位置及特征	年降水均值±标准差/mm
I	28	淮安、射阳、东台、高邮、盱眙、蚌埠、霍山、巢湖、合肥、六安、滁州、南京、溧阳、常州、芜湖、安庆、吴县、吕泗、南通、寿县、固始、信阳、阜阳、驻马店、南阳、枣阳、房县、老河口	江淮区 年降水大于 900 mm	1 043.9±144.5
II	22	宿州、亳州、徐州、砀山、许昌、开封、西华、商丘、赣榆、日照、沂源、莒县、兖州、青岛、潍坊、临沂、安阳、泰山、泰安、菏泽、济南、淄博	黄淮区 年降水小于 900 mm	747.4±114.1
III	39	III ₁ 宝丰、西峡、栾川、孟津、郑州、新乡、阳城、运城、万源、安康、汉中、卢氏、石泉、佛坪、镇安、商州、三门峡 (749.5±148.1) III ₂ 略阳、宝鸡、长武、西峰、华山、西安、武功、铜川、平凉、岷县、天水、华家岭、临洮、绥德、吴旗、洛川、延安、临汾、横山、榆林、武都、松潘 (559.4±109.3)	秦岭区 III ₁ 秦岭-淮河交界附近和秦岭以南 III ₂ 秦岭以北	642.3±171.7

由表 4 可见:类 I 中的站点主要分布在长江和淮河之间,记为江淮区,28 个站中有 24 个多年平均年降水量大于 900 mm,位于淮河源头附近的南阳、枣阳、房县、老河口等站点的多年平均年降水量略小于 900 mm;类 II 中的站点主要分布在淮河与黄河之间,记为黄淮区,22 个站中有 20 个多年平均年降水量小于 900 mm,赣榆、泰山站略大于 900 mm。类 III₁ 中站点主要分布在秦岭-淮河交界处东西过渡区,类 III₂ 中的站点主要位于秦岭以北。

2.4 多个降水指标下秦岭-淮河地区的空间聚类综合分析

基于候降水量、年降水量丰平枯状态联系数、相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数指标,可将秦岭-淮河地区分为 4、4、3 类。将 3 个指标均划为同类的站点归为同类区域,将 3 个指标划分的类有部分相同的站点归为过渡区域。最终识别出 5 个同类区域和 1 个过渡区域,见表 5。

据候降水量指标划为类 II₁ 的盱眙站、射阳站、

淮安站的多年平均年降水量分别为 1 034.2、998.7、946.5 mm,由表 2 可知这 3 个站的年降水量与类 I 的均值很接近,从年降水量角度可将盱眙站、射阳站、淮安站归为类 I,故结合另外 2 个降水指标可将它们归为江淮区。

由表 3 可见,据年降水量丰平枯状态联系数指标,西华站被划为类 III,但它和划为类 II 的商丘、亳州、许昌站的年降水量丰平枯状态的联系数均超过 0.7,分别为 0.76、0.72 和 0.70,而仅和位于类 III 的栾川的联系数为 0.78,与类 III 其他站点的联系数均小于 0.7,故从年降水量丰平枯状态的角度将西华划归为类 II,进而结合另外 2 个降水指标将该站归为黄淮区。

据候降水量指标划为类 III 的略阳、松潘站多年平均年降水略小于 800 mm,由表 2 可知它们的年降水小于类 III 中的其他站点,介于类 III 和类 IV,故结合另外 2 个指标将它们归为秦岭以北西段和高原区。

表 5 秦岭-淮河地区各雨量站聚类统计

Tab. 5 Clustering result of rainfall stations in Qinling-Huaihe region based on three indexes

站点	降水指标				综合	站点	降水指标				综合	站点	降水指标				综合
	1	2	3	综合			1	2	3	综合			1	2	3	综合	
安庆	I	I	I			亳州	II	II	II			长武	IV	IV	III		
芜湖	I	I	I			砀山	II	II	II			洛川	IV	IV	III		
霍山	I	I	I			许昌	II	II	II			延安	IV	IV	III		
巢湖	I	I	I			商丘	II	II	II			吴旗	IV	IV	III		
六安	I	I	I			开封	II	II	II			绥德	IV	IV	III		
合肥	I	I	I			莒县	II	II	II			横山	IV	IV	III		
滁州	I	I	I			日照	II	II	II			榆林	IV	IV	III	秦岭以北	
寿县	I	I	I			赣榆	II	II	II			岷县	IV	IV	III	西段和	
蚌埠	I	I	I			临沂	II	II	II			天水	IV	IV	III	高原区	
吴县	I	I	I	江淮区		泰安	II	II	II	黄淮区		临洮	IV	IV	III	(17站)	
溧阳	I	I	I	(22站)		兖州	II	II	II	(22站)		华家岭	IV	IV	III	545.2±	
常州	I	I	I	1 084.7±		沂源	II	II	II	747.4±		平凉	IV	IV	III	105.5 mm	
南通	I	I	I	126.1 mm		济南	II	II	II	114.1 mm		西峰	IV	IV	III		
南京	I	I	I			潍坊	II	II	II			武都	IV	IV	III		
吕泗	I	I	I			徐州	II	II	II			宝鸡	IV	IV	III		
高邮	I	I	I			青岛	II	II	II			松潘	III	IV	III		
东台	I	I	I			菏泽	II	II	II			略阳	III	IV	III		
固始	I	I	I			安阳	II	II	II			临汾	IV	II	III		
阜阳	I	I	I			宿州	II	II	II			阳城	II	II	III		
盱眙	II ₁	I	I			淄博	II	II	II			孟津	IV	II	III		
射阳	II ₁	I	I			泰山	II	II	II			郑州	II	II	III		
淮安	II ₁	I	I			西华	II	III	II			新乡	II	II	III	秦岭-	
万源	III	III	III			卢氏	IV	III	III			宝丰	II	II	III	淮河	
石泉	III	III	III	秦岭		三门峡	IV	III	III			南阳	II	III	I	交界	
安康	III	III	III	以南		商州	IV	III	III	关中区		西峡	II	III	III	过渡区	
镇安	III	III	III	(6站)		运城	IV	III	III	(8站)		栾川	II	III	III	(14站)	
汉中	III	IV	III	920.0±		武功	IV	III	III	619.3±		信阳	I	III	I	162.4 mm	
佛坪	III	IV	III	157.8 mm		西安	IV	III	III	85.4 mm		驻马店	I	III	I		
						华山	IV	III	III			枣阳	I	III	I		
						铜川	IV	III	III			房县	III	III	I		
												老河口	III	III	I		

注: 指标1为候降水量, 指标2为年降水量丰平枯状态, 指标3为相邻年份年降水量变化增平减趋势, 综合为3个降水指标聚类结果的区域划分, 区域名称下方数字为多年平均年降水量±标准差

由表 3 可见, 据年降水量丰平枯状态联系数指标, 汉中、佛坪站被划为 IV 类。但汉中站与秦岭以南的佛坪站、秦岭以北的宝鸡站联系数最大, 均为 0.79, 佛坪站与宝鸡站的联系数最大, 达 0.89, 但与秦岭以南的汉中、略阳、镇安、石泉站的联系数也均超过 0.7, 故从年降水量丰平枯状态的角度将汉中、佛坪站划归为 III 类也是合理的, 进而结合另外 2 个

降水指标将它们归为秦岭以南区。

表 5 中西安、铜川、武功、华山等关中区的站点及其周边的运城、卢氏、三门峡、商州站点在 3 个降水指标中均被分在相同的类, 记所对应的分区为关中区。

表 5 中将秦岭-淮河地区除位于 5 个同类区域外的站点归为过渡区, 该过渡区大致以秦岭-淮河交

界为中心呈南北向的带状,与经过秦岭-淮河地区的我国地势第二阶梯向第三阶梯过渡的地带基本重合。

江淮区和黄淮区的南北分界线大致与淮河平行,由表2至表4可知,该分界线与900 mm年降水量

等值线基本重合。秦岭以北西段和高原区的东南边界与关中平原北界、800 mm年降水等值线基本重合,该区的降水量最小。采用式(4)~(8)的线性矩法计算6个分区内站点的不一致测度 D 见表6。

表6 分区内雨量站点的不一致性测度 D 计算结果

Tab. 6 Calculated results of discordancy coefficient D for each subregion

区域	江淮区	黄淮区	秦岭以南区	关中区	秦岭以北西段和高原区	过渡区
D 最大的站点及 D 值	安庆站 3.35(阜阳站 2.06)	日照站 2.85	安康站 1.57	西安站 1.86	松潘站 3.26(岷县 2.40)	西峡站 2.06
阈值 $(N-1)/3$	7.00	7.00	1.67	2.33	5.33	4.33

由表6可见:江淮区的安庆站 D 为3.35,超过阈值3;但阜阳站 D 为次大值2.06,未超过3。秦岭以北西段和高原区的松潘站 D 为3.26,超过3;但岷县站 D 为次大值2.40,未超过3。这表明安庆站、松潘站与其所归属分区的特征有所差异,安庆站、松潘站分别为研究区域中最南端、西段的站点,实际上与其所划分的分区中其他站点的降水特征的确有所差别。除上述站点外,区域内其他站点均非异常站点。各分区内站点的最大 D 值均不超过 $(N-1)/3$,表明各分区具有较好的一致性。

3 结论

基于候降水量、年降水量丰平枯状态联系数和相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数3个降水指标,秦岭-淮河地区可被分为江淮区、黄淮区、秦岭以南区、秦岭以北西段和高原区、关中区、秦岭-淮河交界过渡区6个区域。基于线性矩法的分区站点不一致测度计算表明,6个分区内均无异常站点。

基于候降水量指标,秦岭-淮河地区可分为江淮区、黄淮区、秦岭以南、秦岭以北4个区域。其中:黄淮区和江淮区在东段主要以淮河为界,在西段以800 mm年降水量等值线为界;秦岭以南和秦岭以北地区主要以秦岭和800 mm年降水量等值线为界。

基于年降水量丰平枯状态联系数指标,秦岭-淮河地区可分为4个区域,分别为年降水量高于900 mm的江淮区、年降水量小于900 mm的黄淮区、秦岭-淮河交界附近区、秦岭以北高原区和秦岭以南西段。

基于相邻年份年降水量变化增平减趋势联系数指标,秦岭-淮河地区可分为江淮区、黄淮区、秦岭区3个区域。

参考文献:

- [1] ZHOU Y L, ZUO Y L, ZHANG Y L, et al. Identification and characteristics analysis of Meiyu in Anhui Province based on the National Standard of Meiyu monitoring indices[J]. *Hydrology Research*, 2021, 52(5): 975-988. DOI: 10.2166/nh.2021.042.
- [2] 罗志文,王小军,刘梦洋,等.基于地区线性矩法的陕西省极端降水时空特征[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(5): 1295-1305. DOI: 10.13866/j.azr.2021.05.11.
- [3] 陈家栋,田宏伟,黄进,等.1970—2019年河南省年内降水分配非均匀性的时空演变[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3): 342-349. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.03.044.
- [4] 何刚,张世玉,鲍珂宇,等.区域水资源承载力时空分异及驱动因子分析:以安徽省为例[J]. *水利水电技术(中英文)*, 2023, 54(7): 88-101. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2023.07.008.
- [5] 李鹏,徐宗学,叶陈雷,等.济南市1972—2016年降水特性[J]. *南水北调与水利科技(中英文)*, 2021, 19(2): 237-245. DOI: 10.13476/j.cnki.nsbdkq.2021.0025.
- [6] 盛宇裕,毕硕本,路明月,等.1951—2011年ENSO事件对秦岭-淮河地区旱涝灾害的影响分析[J]. *河南大学学报(自然科学版)*, 2019, 49(4): 418-428. DOI: 10.15991/j.cnki.411100.2019.04.005.
- [7] 周平,周玉良,金菊良,等.基于梅雨监测指标的安徽江淮地区梅雨过程识别[J]. *水利水运工程学报*, 2020(6): 9-15. DOI: 10.12170/20200823003.
- [8] ZHOU Y L, ZHOU P, ZHANG Y L, et al. Characteristics of precipitation during Meiyu and Huang-Huai rainy seasons in Anhui Province of China[J]. *Frontiers in Earth Science*, 2021, 9: 751969. DOI: 10.3389/feart.2021.751969.
- [9] 卢睿,朱志伟,李天明,等.淮河流域夏季极端降水频次空间分布的客观分类及其形成机理[J]. *大气科学*, 2021, 45(6): 1415-1432. DOI: 10.3878/j.issn.1006-9895.2105.20223.
- [10] 宋琳琳,郝成元,何素楠.秦岭南北降水空间分异研

- 究 [J]. *地球与环境*, 2021, 49(6): 615-622. DOI: [10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.049](https://doi.org/10.14050/j.cnki.1672-9250.2021.49.049).
- [11] 李双双, 汪成博, 延军平, 等. 面向事件过程的秦岭南北极端降水时空变化特征 [J]. *地理学报*, 2020, 75(5): 989-1007. DOI: [10.11821/dlxb202005008](https://doi.org/10.11821/dlxb202005008).
- [12] 胡佳岚, 李双双. 1970—2020 年秦岭南北夏季昼晴夜雨强度变化趋势及其影响因素 [J]. *水土保持学报*, 2024, 38(1): 149-157. DOI: [10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.008](https://doi.org/10.13870/j.cnki.stbxb.2024.01.008).
- [13] 杨璐莹, 霍艾迪, 赵志欣, 等. 基于 CMIP6 的秦岭北麓未来极端降水洪涝风险分析 [J]. *人民黄河*, 2024, 46(2): 55-60. DOI: [10.3969/j.issn.1000-1379.2024.02.010](https://doi.org/10.3969/j.issn.1000-1379.2024.02.010).
- [14] 丁一汇, 王绍武, 郑景云, 等. *中国气候* [M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [15] 陈茜茜, 屈艳萍, 吕娟, 等. 南水北调中线工程水源区和受水区的降水时空变化特征及丰枯遭遇 [J]. *水土保持通报*, 2024, 44(1): 136-146. DOI: [10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.015](https://doi.org/10.13961/j.cnki.stbctb.2024.01.015).
- [16] 苏桐, 张文江, 覃光华, 等. 中国昼夜降水特征的空间分异规律 [J]. *水电能源科学*, 2024, 42(4): 10-14. DOI: [10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231740](https://doi.org/10.20040/j.cnki.1000-7709.2024.20231740).
- [17] ZHANG Q F, WU Z F, GUO G H, et al. Explicit the urban waterlogging spatial variation and its driving factors: The stepwise cluster analysis model and hierarchical partitioning analysis approach [J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 763: 143041. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2020.143041](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.143041).
- [18] WANG F, HUANG G H, LI Y P, et al. Development of a stepwise-clustered multi-catchment hydrological model for quantifying interactions in regional climate-runoff relationships [J]. *Water Resources Research*, 2022, 58(3): e2021WR030035. DOI: [10.1029/2021WR030035](https://doi.org/10.1029/2021WR030035).
- [19] 郭芳, 刘信勇, 张鋆, 等. 基于层次聚类和水质指数法的南水北调中线总干渠典型年份水质变化特征分析 [J]. *环境工程学报*, 2024, 18(3): 644-652. DOI: [10.12030/j.cjee.202309079](https://doi.org/10.12030/j.cjee.202309079).
- [20] 周亮广, 金菊良, 周玉良, 等. 基于集对分析的江淮丘陵区农业水土资源匹配分析 [J]. *水资源保护*, 2023, 39(4): 118-125. DOI: [10.3880/j.issn.10046933.2023.04.015](https://doi.org/10.3880/j.issn.10046933.2023.04.015).
- [21] ZHOU R X, JIN J L, CUI Y, et al. Agricultural drought vulnerability assessment and diagnosis based on entropy fuzzy pattern recognition and subtraction set pair potential [J]. *Alexandria Engineering Journal*, 2022, 61(1): 51-63. DOI: [10.1016/j.aej.2021.04.090](https://doi.org/10.1016/j.aej.2021.04.090).
- [22] 李孟芮, 敖天其, 黎小东. 基于地区线性矩法对四川省水文频率分析的研究 [J]. *水利水电技术*, 2018, 49(11): 54-61. DOI: [10.13928/j.cnki.wrahe.2018.11.008](https://doi.org/10.13928/j.cnki.wrahe.2018.11.008).
- [23] 胡静, 王帅人, 覃光华, 等. 基于地区线性矩法的四川省 24 h 极值降雨频率分析 [J]. *人民长江*, 2024, 55(1): 113-119. DOI: [10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.01.016](https://doi.org/10.16232/j.cnki.1001-4179.2024.01.016).
- [24] LI M, WANG G W, CAO F Q, et al. Determining optimal probability distributions for gridded precipitation data based on L-moments [J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 882: 163528. DOI: [10.1016/j.scitotenv.2023.163528](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.163528).
- [25] MMARKOVIC L, FASKO P. Regional frequency analysis for maximum 5-day precipitation totals using L-moments approach in Slovakia [J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2024, 155(7): 5679-5693. DOI: [10.1007/s00704-024-04970-2](https://doi.org/10.1007/s00704-024-04970-2).

Spatial clustering of the Qinling-Huaihe region based on precipitation indexes

ZHOU Yuliang, ZHOU Lei, ZHOU Ping, ZHANG Yuliang, CUI Yi, JIN Juliang

(College of Civil Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Precipitation in Qinling-Huaihe region not only varied greatly at both the inter- and intra-annual time scales, but also exhibited strong spatial variability due to complex and diverse landforms, along with unstable monsoon climate. The amount of precipitation amount as well as its variation showed strong regional characteristics over multi-year time scale, especially in case of multi-year annual precipitation. However, the current research adopted study area for the spatial-temporal characteristics analysis of precipitation in Qinling-Huaihe region which is identical to the administrative regions, or was directly bounded by Qinling Mountains or Huaihe River. Therefore, spatial variability of precipitation in Qinling-Huaihe region has not been fully reflected.

Three types of precipitation indexes were used to divide the subregions of Qinling-Huaihe with step-wise clustering method. They were the multi-year average precipitation amount at different time scales, including multi-year average (daily, monthly, yearly and five years and 10 years) precipitation amount, the connection numbers of

every two stations in terms of the abundant, normal, or dry states of annual precipitation at each site, and the connection number of every two stations based on the trends of annual precipitation change in adjacent years. Average and standard deviation analysis method was used to identify the abundant, normal, or dry states of annual precipitation at each site, assuming that each state had equal probability, and this method was also suitable to identify the trends of increase, decrease, and unchangeability, of annual precipitation change in adjacent years. The Qinling-Huaihe region can be divided into four subregions based on the pentad precipitation according to the indexes of multi-year average precipitation amount at different time scales, namely the subregion between Yangtze and Huaihe, the subregion between Huanghe and Huaihe, the subregion north of Qinling Mountains, and the subregion south of the Qinling Mountains. Furthermore, with the connection number of stations based on the annual precipitation amount of abundant, normal, or dry states, the Qinling-Huaihe region could be divided into four subregions, namely the subregion between Yangtze and Huaihe with multi-year annual precipitation greater than 900 mm, the subregion between Huanghe and Huaihe with multi-year annual precipitation less than 900 mm, the subregion of surrounding area near the junction of Qinling Mountains and Huaihe River, and the subregion containing Loess Plateau Region at the north of Qinling Mountains and west section at the south of the Qinling Mountains. At the same time, with the connection number of stations based on the increase, decrease or unchangeability state of annual precipitation change in adjacent years, the Qinling-Huaihe region could be divided into three regions, namely the subregion between Yangtze and Huaihe, the subregion between Huanghe and Huaihe, and the subregion containing the south and north regions of the Qinling Mountains. After combining the results of subregion with the three precipitation indexes, the Qinling-Huaihe region could be spatially divided into six regions, i.e., five major subregions and one transitional subregion, namely, the subregion between Yangtze and Huaihe, the subregion between Huanghe and Huaihe, the subregion at the south of Qinling Mountains, the subregion of west section at the north of the Qinling Mountains and the loess Plateau Region at the north of Qinling Mountains, the subregion of Guanzhong Plain and its nearby regions, and the transitional region between Qinling and Huaihe River in north-south orientation.

The discordancy measure test was carried out using the L-moment ratios approach, and the results showed that six subregions divided in this study could be considered as homogeneous regions.

Key words: dynamic spatial clustering of precipitation; pentad rainfall; annual precipitation state; variability of annual precipitation in adjacent years; set pair analysis; Qinling-Huaihe region