

DOI: 10.14042/j.cnki.32.1309.2023.02.003

1956—2016年中国年降水量及其年内分配演变特征

杜军凯¹, 仇亚琴¹, 李云玲², 卢琼¹, 郝春洋¹, 刘海滢¹

(1. 中国水利水电科学研究院, 北京 100038; 2. 水利部水利水电规划设计总院, 北京 100120)

摘要: 为分析中国降水时空演变格局, 本文在月尺度上对水利部门与国家基本气象站的降水量监测数据进行融合, 针对融合后的4 177个站点, 使用趋势分析、突变检验和年内分配向量法等方法分析了集中度、集中期和最大4个月累积降水量占全年之比等多个指数的分布格局, 分析了1956—2016年中国年降水系列的趋势性和突变性特征, 以及降水年内分配过程的时空演变。主要结论如下: ① 中国降水时空分布不均, 自东南到西北, 年降水量总体递减, 降水年内分布集中度递增; 站点年降水量序列的变化趋势呈现较强的地带性, 自东南到西北呈“增—减—增”的3个条带; 显著增加条带分别位于东南和西部地区, 显著减少的条带位于中部, 从东北地区向西南绵延至边境; 年降水序列的趋势性变化大多伴随着突变, 发生在20世纪80年代的站点最多。② 沿200 mm和400 mm年降水量等值线, 中国北方出现1个“汛期降水减少”条带, 但其时间尺度效应较强; 在月尺度上, 站点汛期降水占比下降, 非汛期降水占比增加; 而在日尺度上则相反, 连续3~7 d累积降水量的波幅加大, 表明降水事件的极端程度在增强。③ 降水序列变化与径流的同步性较好, 中国西北和东南地区年降水量呈增加趋势, 典型水文站的还原径流量同步增加; 年降水量显著减少、且最大4个月累积降水量占比指数减少超过10%的区域集中在北方的辽河、海河与黄河流域等非湿润区, 相应水文断面的还原径流量显著减少。

关键词: 降水; 年内分配; 降水集中度; 降水集中期; 演变规律

中图分类号: P333 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-6791(2023)02-0182-15

联合国政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告^[1]指出, 人类影响造成的气候变暖速率前所未有的, 全球极端天气与极端气候事件发生频率不断增强, 全球尺度的降水结构发生了显著变化^[2], 较大程度上影响了区域水安全和经济社会可持续发展^[3]。水循环是联系地球系统大气圈、水圈、岩石圈和生物圈的纽带。降水是水循环过程的总输入, 研究中国降水的时空分布与演变格局可为洪涝灾害应对、水资源情势分析及水生态修复等工作提供科技支撑, 具有重要的意义。

在降水时空分布与演变规律方面, 已有较多学者开展了相关研究。如在降水年际变化趋势分析方面, 王英等^[4]基于730个气象站的监测数据进行空间插值法和趋势分析, 结果表明中国降水量从20世纪60年代到90年代呈明显下降趋势; 施雅风等^[5]总结了西北地区气候变化特征, 指出西北地区气候向暖湿转型可能是世纪性的; 张强等^[6]分析了西北地区气候湿化趋势, 指出西北地区西部和东部从21世纪开始同时进入增湿期; 王米雪等^[7]研究了1960—2013年东南沿海地区年降水量变化特征, 指出2000年后东南沿海地区形成“重旱-重涝并重”的格局。在降水序列突变研究方面, 丁一汇等^[8]对青藏高原年平均气温和降水量序列进行突变检验, 研究指出气候要素突变方向、突变时间存在较大时空差异; 贾路等^[9]认为西北地区降水集中度指数均值序列存在显著的突变点; 张阿龙等^[10]认为锡林河和巴拉格尔河流域气候突变发生在20世纪90年代至2010年; Zuo等^[11]研究表明, 海河流域年降水量系列在1979年发生突变。在降水年内变化研究方面, 刘向培等^[12]从“信息熵”角度分析了厄尔尼诺与南方涛动、太平洋年代际涛动对中国降水集中程度的影响;

收稿日期: 2023-01-04; 网络出版日期: 2023-03-26

网络出版地址: <https://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1309.P.20230324.1649.002.html>

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2021YFC3201101); 国家自然科学基金资助项目(52279030)

作者简介: 杜军凯(1987—), 男, 河南禹州人, 高级工程师, 博士, 主要从事流域水循环及其伴生过程模拟研究。

E-mail: du_djk@163.com

通信作者: 仇亚琴, E-mail: qyq@iwhr.com

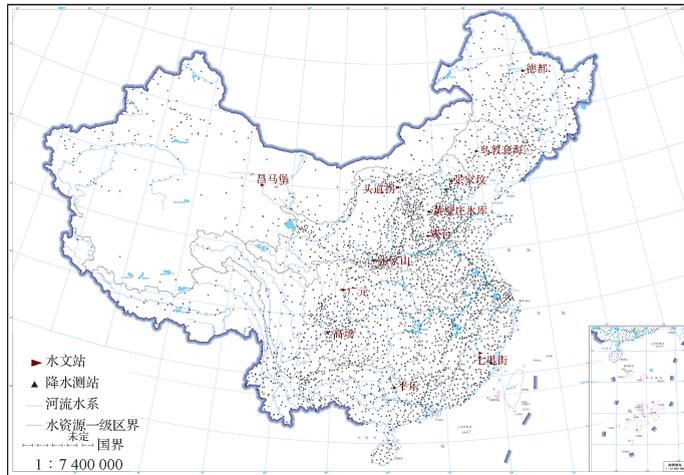
Zhang 等^[13]定义了降水年内集中度和年内集中期指数概念和计算方法, 该方法被广泛用于区域年内多尺度降水不均匀性和集中程度, 以及年际变化规律等研究中。此外, 另有学者关注降水分区区划、降水变化的周期性、雨日数与雨强演变特征、季节降水结构演变与平稳性、城市化对降水的影响, 以及极端降水时空变化特征等^[14-19]。

尽管当前研究取得了丰硕成果, 但在以下几个方面仍有待提升。首先, 受测站数量、密度、数据系列长度等条件制约, 当前针对全国范围的研究较少; 其次, 中国幅员辽阔, 地形、地貌复杂多变, 降水时空演化具有很强的地带性特征, 相关规律亟需总结; 再者, 针对降水年内丰枯变化的相关研究有待补充, 尤其是汛期降水在长时间尺度上的演变及其径流效应。鉴于此, 本文对气象站和水文站实测降水量进行月尺度融合, 以提升监测资料的时空完整性, 系统分析了多项指标的时空分布格局、地带性变化特征及其水文效应, 为揭示中国降水时空演变规律提供科技支撑。

1 数据与方法

1.1 基础数据

本文所用的降水量数据来源如下: 一是国家基本气象站的逐日数据, 来源于国家气象数据共享网; 二是水文部门上报的逐月降水量观测数据, 来源于全国第三次水资源调查评价上报的降水量数据集, 时间序列为 1956—2016 年; 另有水文部门提供典型站点的日尺度观测信息。对国家基本气象站和水文-雨量站的监测数据进行融合, 处理原则如下: ① 删除重复站点, 如水文-雨量站与基本气象站的空间位置相同, 则优先使用国家基本气象站的监测数据; ② 舍弃监测不全的站点, 如某站点在设站年份的监测数据缺失 1 个月以上, 则放弃; ③ 时间尺度统一, 将日观测成果转换到月。按上述原则处理后, 共得到 4 177 个融合站点(图 1)。本文所用降水量等值线图来自文献[20]。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4307 号的标准地图制作。

图 1 气象站点分布

Fig. 1 Location of the meteorological stations and the terrain landform of China

1.2 分析方法

(1) 趋势与突变检验

分别使用 Mann-Kendall(后文简称 MK)趋势检验法和 PETTITT 突变分析法进行趋势和突变检验。MK 趋势检验法^[21-22]是一种典型的非参数检验方法, 该检验方法在气象和水文领域得以广泛应用。PETTITT 检

验^[23]是一种非参数的突变检验方法,构造一个 Mann-Whitney 统计量,根据构造统计量的特征进行数据序列的突变点分析。

(2) 集中程度分析

采用降水年内分配的集中度(Precipitation Concentration Degree, PCD)指数和集中期(Precipitation Concentration Period, PCP)指数来表征降水分布的集中性特点,计算方法见式(1)和式(2)。PCD 指数取值介于 0 ~ 1, 值越大表示降水年内分配越不均匀; PCP 指数以角度为单位,将 0° ~ 360°分配到全年 12 个月,取值越大表明降水峰值越靠后。

$$D_{PC,i} = \sqrt{\left(\sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \sin \theta_j\right)^2 + \left(\sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \cos \theta_j\right)^2} / R_i \quad (1)$$

$$P_{PC,i} = \arctan\left[\left(\sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \sin \theta_j\right) / \left(\sum_{j=1}^{12} r_{ij} \times \cos \theta_j\right)\right] \quad (2)$$

式中: $D_{PC,i}$ 和 $P_{PC,i}$ 分别为测站第 i 年的降水年内分配 PCD 指数和 PCP 指数; r_{ij} 为第 i 年第 j 月的降水量, mm; R_i 为第 i 年的年降水量, mm; θ_j 为第 j 月中对应的角度, 角度与 1—12 月份的对应关系参见文献[12]。

使用年内最大 4 个月累积降水量占全年的比例(PEC)指数来表示站点汛期降水的分布特征,计算方法见式(3):

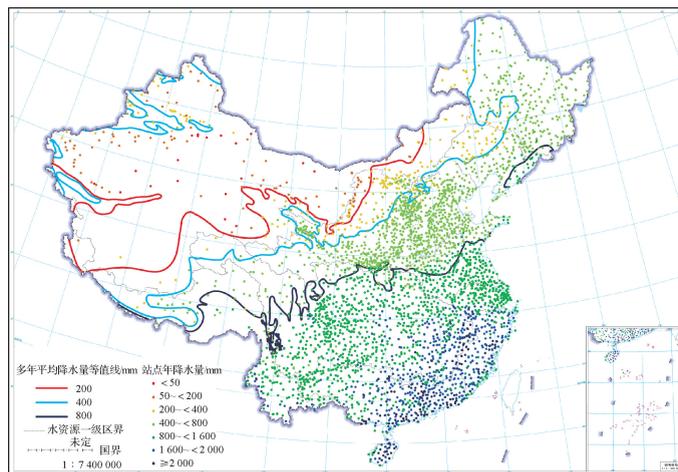
$$C_{PE} = \sum_{i=1}^4 \overline{P_i^*} / \sum_{j=1}^{12} \overline{P_j} \times 100 \quad (3)$$

式中: C_{PE} 为测站 PEC 指数, %; $\overline{P_j}$ 为 1—12 月的月平均降水量, mm; $\overline{P_i^*}$ 为年内最大 4 个月的月均降水量, mm。

2 降水量时空分布

2.1 年降水量分布格局

中国幅员辽阔,东部属季风气候,西北部属温带大陆性气候,青藏高原属高寒气候,降水空间分布不均匀,总体呈“东南高、西北低”的特征。融合后站点降水量与多年平均降水量等值线^[20]分布见图 2。多年平均年降水量 200 mm 等值线为中国干旱区与半干旱区的分界线,该线北起内蒙古高原中部,大致沿阴山-贺兰



注:该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4307 号的标准地图制作。

图 2 测站多年平均降水量的空间分布

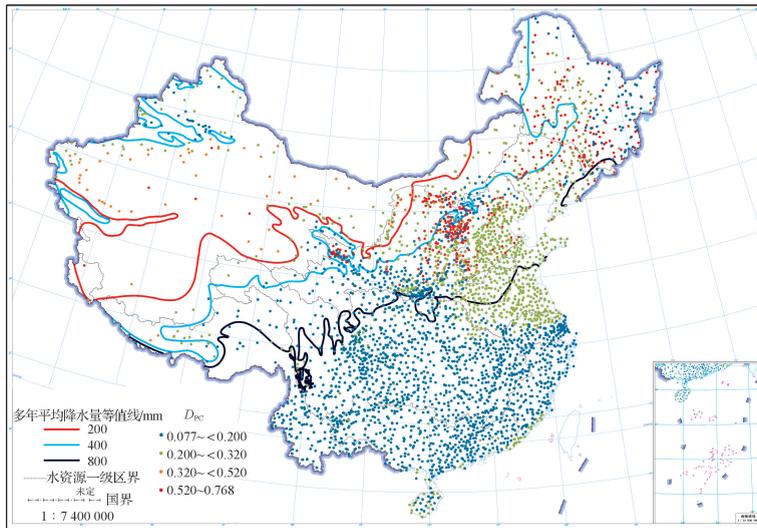
Fig. 2 Spatial distribution of annual mean precipitation at the meteorological stations

山-六盘山-祁连山-柴达木盆地-昆仑山一线; 多年平均年降水量 400 mm 等值线沿东北—西南方向斜贯中国全境, 系半干旱区与半湿润区分界线, 北起大兴安岭, 沿燕山-太行山-黄土高原北缘-祁连山东段分布; 多年平均年降水量 800 mm 等值线沿东西方向横贯全境, 系湿润区和半湿润区的分界线; 多年平均年降水量在 800~1 600 mm 的区域主要分布在“秦淮线”以南, 包括淮河中下游、长江中下游、四川盆地、云贵高原和广西大部等地; 多年平均年降水量超过 1 600 mm 的区域主要分布在东南沿海、湘赣山区、西南(云南、四川、西藏)部分山区, 其中, 海南岛部分区域、台湾岛^[20]大部分地区降水量超过 2 000 mm。

2.2 年内分配特征

根据式(1)和式(2), 分别计算了所有站点逐年月降水量的 PCD 指数、PCP 指数和最大 4 个月降水量占全年比例, 各站点多年平均月降水量的年内集中度空间分布见图 3, 集中期空间分布见图 4。

(1) 月降水量的年内集中度。由图 3 可见, 各站点 PCD 指数为 0.077~0.768, 大体呈现北高南低的分布格局。0.077 $\leq D_{PC}$ <0.200 的站点主要分布在长江以南, 即长江流域、珠江流域、东南诸河区和西南诸河区的大部分区域, 另有黄河河源区、渭河南山支流、伊洛河等流域, 以及位于天山北支与中支之间的伊犁河流域。0.200 $\leq D_{PC}$ <0.320 的站点集中分布在辽河区南部、海河区东部、淮河区大部和黄河中游部分区域, 以及阿尔泰山南麓的额尔齐斯河流域。0.320 $\leq D_{PC}$ <0.520 的站点主要分布在西北诸河区, 包括塔里木盆地、柴达木盆地及黑河上游等内陆河流域。0.520 $\leq D_{PC}$ \leq 0.768 的站点大多散乱分布在 400 mm 降水等值线两侧, 包括松花江区西部、辽河区北部、太行山区, 以及黄河上游大通河与湟水等流域。综上所述, 中国干旱区域 PCD 指数值大, 年降水量年内分配不均匀性强于降水量丰沛的区域。



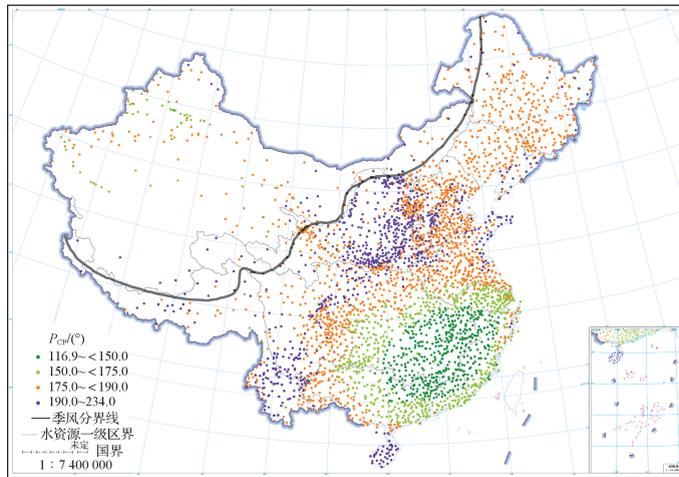
注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4307 号的标准地图制作。

图 3 测站月降水量的 PCD 指数

Fig. 3 PCD indexes of monthly precipitation at the meteorological stations

(2) 月降水量的年内集中期。由图 4 可见, 各测站月降水量 PCP 指数为 116.9°~234.0°, 自东南至西北总体呈低—高一低的分布特征, 两边 PCP 指数低、中部高。116.9° $\leq P_{PC}$ <150.0°(即集中期在 6 月中旬以前)的站点集中分布在长江中下游、东南诸河与珠江中下游地区, 这与梅雨气候有关。150.0° $\leq P_{PC}$ <175.0°(集中期 6 月中旬至 7 月中旬)的站点分布在长江中游江北地区、长三角、珠江中游南岭南麓区域、武夷山以东的沿海地带, 以及天山山区。175.0° $\leq P_{PC}$ <190.0°(集中期 7 月中下旬)的站点分布最广, 沿东北—西南方向斜贯全国, 包括东北大部、华北地区中部、青藏高原东部、四川盆地大部以及云贵高原东缘。190.0° $\leq P_{PC}$ \leq 234.0°(集中期 8 月上旬至 9 月中旬)的站点主要分布在黄河流域大部、山东半岛和辽东半岛沿海地带、

太行山区大部、金沙江上游、西南诸河以及海南岛等区域。

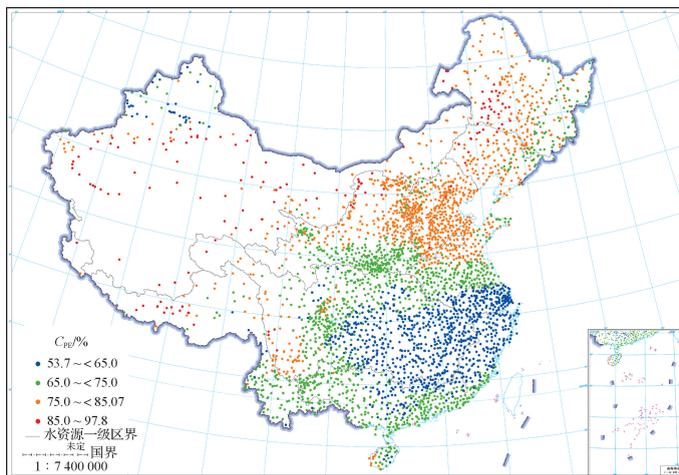


注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作。

图4 测站月降水量的PCP指数分布

Fig. 4 Distribution of PCP indexes of monthly precipitation at the meteorological stations

(3) 最大4个月累积降水占比。由图5可见，各测站PEC指数介于53.7%~97.8%，空间分布与PCP指数类似，总体呈西北高、东南低的格局。53.7% ≤ C_{PE} < 65.0%的站点绝大多数分布在长江中下游和东南诸河区，少部分位于南岭以南的柳江、西江流域，以及地处西北的天山山区。65.0% ≤ C_{PE} < 75.0%的站点在上一分级(53.7% ~ <65.0%)的外层，东北地区主要分布在长白山以东，中部集中在祁连山东侧-秦岭-淮河沿线，以及西南的四川盆地、云贵高原大部，华南的珠江流域大部等区域。75.0% ≤ C_{PE} < 85.0%的站点分布在东北平原、华北平原、黄土高原大部，以及西南的金沙江流域等。85.0% ≤ C_{PE} ≤ 97.8%的站点分布在大兴安岭山区、河套平原、柴达木盆地西部和塔里木盆地，以及青藏高原西南部等广袤地区。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作。

图5 测站PEC指数分布

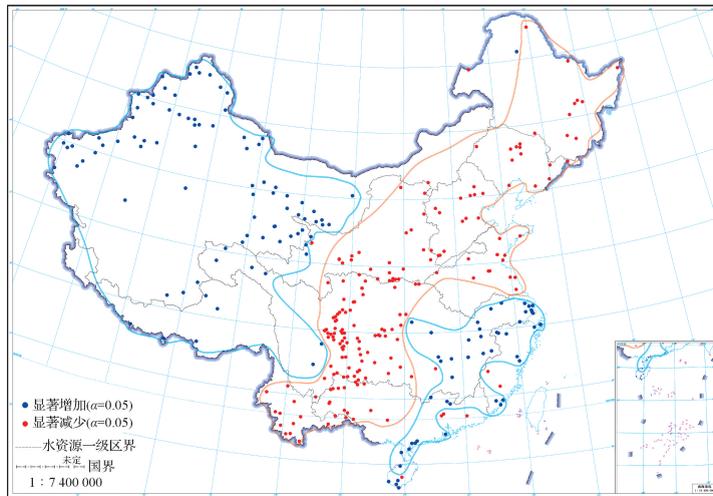
Fig. 5 Distribution of proportion indexes of the maximum accumulated precipitation in 4 months to annual precipitation

3 降水量时空演变

3.1 年降水量序列的趋势性

采用 MK 检验法对年降水量序列进行趋势分析, 共有 337 个站点通过显著性检验(显著性水平 $\alpha = 0.05$, 详见图 6)。通过显著性检验站点中, 呈显著增加趋势的站点共 142 个, 各站点年降水量的年际变化梯度为 $2.9 \sim 8.5 \text{ mm/a}$; 呈显著减少趋势的站点共 195 个, 变化梯度为 $-11.7 \sim -2.0 \text{ mm/a}$ 。在空间分布上, 各站点年降水量的变化趋势的规律性较强, 自东南到西北明显呈“增—减—增”的 3 个条带。

据图 6 可知, 站点年降水量显著减少的条带位于中部, 从中国东北地区向西南绵延至边境区域。站点年降水量显著增加的条带有 2 个, 分别位于西北和东南地区: 西北地区各站点变化趋势在空间上比较一致, 基本呈增加态势; 东南地区以增加为主, 但空间变异性更强, 沿海少数站点呈减少趋势。



注: 该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为 GS(2022)4307 号的标准地图制作。

图 6 测站年降水量序列的 MK 趋势检验结果

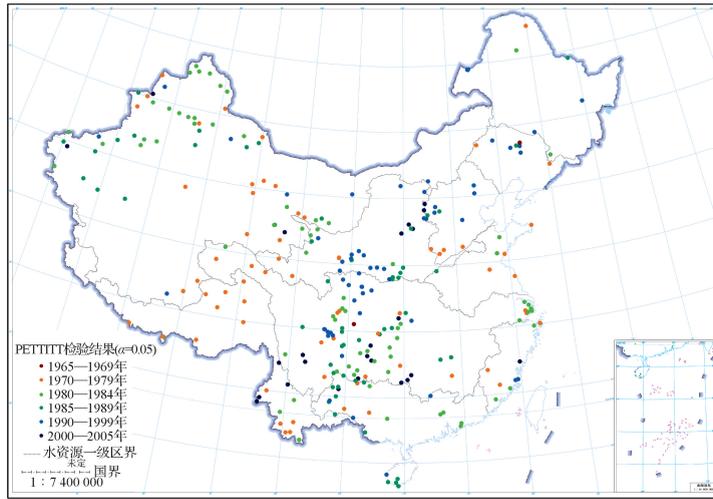
Fig. 6 Mann-Kendall trends of annual precipitation series at the meteorological stations

3.2 年降水量序列的突变性

采用 PETTITT 检验法对年降水量序列进行突变分析, 共有 282 个站点通过显著性检验(显著性水平 $\alpha = 0.05$, 详见图 7)。各站点突变年份介于 1965—2005 年, 具体如下: 1965—1969 年的站点共 2 个; 1970—1979 年的站点共 70 个; 1980—1989 年的站点共 128 个; 1990—1999 年的站点共 58 个; 2000—2005 年的站点共 24 个。对比图 6 和图 7 可知, 在空间分布上, 发生突变的站点与趋势变化显著的站点比较一致。这意味着站点年降水序列的趋势性变化大多与突变相伴。

3.3 最大 4 个月累积降水量占比变化

针对序列超过 50 a 的 2 575 个测站, 计算各站点 1960—1969 年、2007—2016 年平均 PEC 指数及其相对变幅。以 1960—1969 年为基准, 2007—2016 年平均 PEC 指数相对变幅超出 $\pm 10\%$ 的站点共有 123 个, 空间分布见图 8。其中, 共 106 个站点的 PEC 指数下降超过 10%, 共 17 个站点的 PEC 指数增加 10%。PEC 指数变幅超出 $\pm 10\%$ 的站点空间分布同样具有较强的地带性特征。减幅超过 10% 的站点大多数位于北方地区, 少部分位于南方地区; 这些站点空间分布与 200 mm 和 400 mm 年降水量等值线走势基本一致, 集中分布在 2 条等值线两侧, 如海河流域与黄河流域过渡地带、三江源地区, 以及天山西段、阿尔泰山之间的广大区域。增幅超过 10% 的站点集中分布在南方地区, 大多数位于 800 mm 等值线之南。

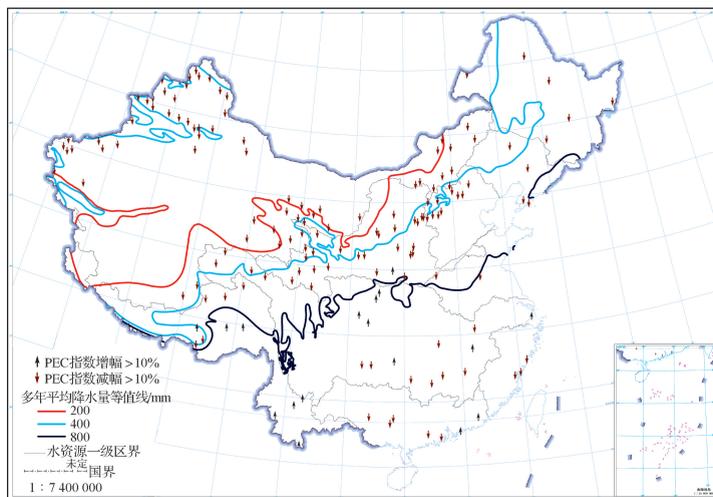


注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作。

图7 测站年降水量序列的PETTITT突变检验结果

Fig. 7 Results of PETTITT abrupt detections of annual precipitation series at the meteorological stations

200 mm、400 mm 多年平均年降水量等值线分别是中国半干旱与干旱区、半湿润与半干旱区的分界线，PEC 指数从月尺度上反映了汛期降水的集中性。上述分析结果表明，在中国北方较为干旱的区域，站点年降水量的年内分配呈现一定程度的“平均化”倾向，汛期降水占比下降，非汛期降水占比增加。



注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2022)4307号的标准地图制作。

图8 测站2007—2016年平均PEC指数较1960—1969年均值的变化

Fig. 8 Relative change of the mean PEC index from 2007 to 2016 compared with that from 1960 to 1969

4 讨 论

4.1 合理性分析

(1) PCP 指数和 PCD 指数分析结果的合理性。降水 PCD 指数和 PCP 指数分布与气候类型密切相关，中

国的降水主要受夏季风控制, 具有雨热同季特点。习惯上, 中国将大兴安岭-阴山山脉-贺兰山-乌鞘岭-巴颜喀拉山-唐古拉山-冈底斯山系作为季风区与非季风区的分界线^[24](图4)。春季, 中国大部分地区冷空气较强, 来自海洋的暖湿气流在华南、东南一带与之交锋, 这些区域进入降水集中的第1个时段, 即春雨期; 随时间推移, 季风强度不断加大, 暖湿气流在初夏时节运动到江淮地区, 产生梅雨锋面系统, 形成1条降水丰富的锋面雨带; 暖湿气流在夏、秋季节到达东北、华北和西北部分地区时, 集中产生夏雨和秋雨; 之后, 夏季风强度不断减弱, 雨带重回东南、西南和华南等地。总体而言, 降水年内分配过程存在多峰的地区, 集中度较低、集中期较早, 反之则集中度较高, 集中期相对延后。

据图4可知, 中国季风区降水体现出时空上的高度集中性^[25], 东北、华北和西南等地区月降水的PCP指数值大多高于非季风区。月降水量PCP指数空间分布与季风活动密切相关, 如梅雨气候控制的江南、江淮和长江中下游地区(见《梅雨监测指标: GB/T 33671—2017》)集中期明显提前至6—7月。海南岛雨源主要有锋面雨、热雷雨和台风雨等类型, 每年5—10月为多雨期, 其中台风多发生在8—10月^[26]。受台风调节, 海南岛月降水量集中期相对偏后。自东南向西北跨过分界线后, 非季风区月降水集中期有所提前。如北疆的天山和阿尔泰山地区, 其降水受盛行西风控制, 月降水PCP指数明显低于东北和华北等地。

与已有成果进行对比, 刘向培等^[12]指出40°N附近是中国年降水集中度分布的高值区, 35°N以南是其分布的低值区; 张天宇等^[27]指出华北地区年内各候降水PCD指数为0.19~0.58, PCP指数多集中在7月; 张运福等^[28]指出东北地区年内各旬降水量PCD指数为0.59~0.79, PCP指数集中在7月中到8月上; 张录军等^[29]的研究结果表明, 长江流域年内各旬降水量的PCD指数为0.35~0.51, PCD指数集中在4—7月; 杨金虎等^[30]指出西北五省(区)绝大部分地区年内各月降水量的PCD指数为0.16~0.76, PCP指数集中在6—7月。本文有关PCP指数计算结果与已有成果一致, PCD指数计算结果比部分文献偏低。究其原因, PCD指数计算结果受时段长短的影响, 时间尺度越大(如候一月一年), 其取值则越低。为提升监测数据时空完整性, 本文据月尺度降水量数据进行分析, 故PCD指数计算结果偏低。

(2) 年降水量系列趋势分析结果的合理性。与年降水量系列趋势分析相关成果进行对比, 玉米雪等^[7]的研究表明, 中国东南沿海地区降水呈波动上升趋势, 年际增速约为1.91 mm/a; 徐东坡等^[15]的研究表明, 中国西北地区和西藏等区域年降水系列存在显著增加趋势, 华北和东北部分地区降水量呈减少趋势, 上述成果与3.1节的趋势分析结果一致。本文得出全国降水年际变化在空间分布上呈“增—减—增”条带状分布的结论, 与《中国气候变化蓝皮书2021》^[31]有关中国年降水量变化速率分布图是一致的。为进一步分析趋势检验结果的稳定性, 本文将北京、郑州和广州3个气象站的监测资料延长到2020年, 对比1956—2016年序列与1956—2020年序列的异同, 结果见表1。据表1可知, 同一测站不同序列降水量的年际变化梯度值有所差别, 但其序列增/减趋势及显著性检验结果是一致的。需要说明的是, 降水演变过程和机理相当复杂, 针对1956—2016年序列的分析结果在未来是否能持续, 仍有待开展进一步的研究。

表1 典型站点不同序列趋势分析结果

Table 1 Trend analysis results of different time series at the 3 meteorological stations

站点名称	年际梯度值/(mm·a ⁻¹)		MK 检验 Z 统计量	
	1956—2020 年	1956—2016 年	1956—2020 年	1956—2016 年
北京气象站	-2.21	-2.16	-1.66	-1.48
郑州气象站	0.02	0.66	0.01	0.45
广州气象站	6.64	6.84	2.16*	1.96*

注: 显著性水平 $\alpha=0.05$ 标准正态分布 Z 统计量的临界值为 1.96; * 表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验。

(3) 降水变化与季风强度变化的关系。中国降水的趋势性与突变性变化与季风气候的变化密切相关。东亚夏季风在 1961—2020 年间总体呈减弱趋势^[31], 在 20 世纪 60 年代初至 70 年代后期偏强, 在 70 年代末期至 21 世纪初偏弱, 之后转强。中国东北地区、华北地区和西南地区降水量与东亚夏季风强度之间存在显著

的正相关关系^[32], 西风带的水汽输送为中国西北大部分地区提供了基本的水汽来源^[33], 热带气旋降水量是中国东南沿海地区降水的重要组成部分。从地域分布分析, 东亚夏季风强度减弱是年降水量减少条带呈“东北—西南”分布(图6)的重要原因。类似地, 郝立生等^[34]认为东亚夏季风减弱使得从南边界进入的水汽通量大量减少, 进而导致了华北地区降水量减少; Zhang等^[35]的研究表明, 中国西北地区的西风环流和垂直方向的上升气流呈增强趋势, 给西北地区输送了更多的水汽, 导致区域降水量偏多。青藏高原的水汽来源^[36]包括海源、陆源和再循环水汽三大部分, 关于高原降水量增加的原因, 众多学者认识不一: 如Zhang等^[37]认为大尺度环流变化导致的水汽输送增加是主因; 汤秋鸿等^[38]认为西南季风控制区和高原区本地水汽贡献增加是主因; 黄伟^[39]研究指出中国东南沿海地区热带气旋降水强度显著增加, 这可能是该区域降水偏多的重要原因。

已有研究表明, 西北地区年降水量系列突变点多发生在20世纪80年代和90年代, 东北地区年降水系列突变点多发生在1980—1988年^[15,40]; 长江流域8个降水变化敏感区年降水量系列的突变点发生在1977—1998年; 黄河流域上、中、下游年降水量系列突变点发生年份波动较大, 变化范围介于1965—1995年^[41-42]。本文成果与上述文献的计算结果总体一致, 20世纪80年代是测站年降水系列突变较集中的一个时期, 这与季风强度年代际转换有关。李明聪等^[43]的研究结果表明, 东亚夏季风关系在20世纪70年代末发生了年代际转变, 南亚季风在20世纪80年代中期发生了“强—弱”转换。此外, 由于数据来源、系列长度、突变分析方法存在差异, 不同文献的分析结果有所不同。

4.2 汛期降水变化的尺度效应

2000年以来, 中国极端天气现象频现, 出现诸如北京“7·21”特大暴雨、郑州“7·20”特大暴雨和广州“5·22”特大暴雨等多个极端降水事件。为进一步探究汛期降水变化的尺度效应, 本文选取分别位于北京市(A站)、郑州市(B站)和广州市(C站)的3个典型气象站, 以1960—2021年逐日降水量序列为基础, 分析年内连续3 d、连续5 d和连续7 d最大降水量的代际变化特征, 各年段相应的统计值见表2。

典型测站年内连续3、5、7 d最大降水量在代际间呈波动变化, 但近期(2010—2021年均值)均处于全序列(1960—2021年)高值区。其中, A站和B站历史最大暴雨事件恰好发生在此时段内, 拉高了近期平均水平; C站自1970年以后, 日尺度降水集中度出现较稳定增长。年内连续3、5、7 d最大降水量指标的空间异质性较强。A站连续3 d降水量在代际间呈先减后增特点, 从60年代的136.2 mm减至2000—2009年的年均82.0 mm, 再增长到2010—2021年的年均142.9 mm; B站则不同, 连续3 d降水量在代际间基本呈增长趋势; C站位于湿润区, 代际间波动性小于A站和B站。

表2 典型站点连续3—7 d降水量最大值统计

Table 2 Cumulative precipitation statistics from 3 to 7 days at the 3 meteorological stations 单位: mm

统计时段	A站(北京市)			B站(郑州市)			C站(广州市)		
	3 d	5 d	7 d	3 d	5 d	7 d	3 d	5 d	7 d
1960—1979年平均	136.2	159.2	167.8	102.5	113.4	124.0	182.6	207.8	236.1
1970—1979年平均	123.9	141.7	170.5	110.9	130.2	138.2	153.2	195.0	224.2
1980—1989年平均	122.3	136.1	147.8	104.6	115.5	123.1	172.3	220.4	242.6
1990—1999年平均	100.3	111.4	139.2	112.4	125.5	137.8	186.1	218.9	235.2
2000—2009年平均	82.0	90.9	105.9	120.6	137.6	158.3	194.9	221.6	251.7
2010—2021年平均	142.9	152.5	162.4	172.4	198.4	205.9	225.7	263.5	291.3
1960—2021年极大值	381.7	381.8	394.4	948.4	989.0	990.9	329.0	409.3	421.1
极大值发生年份	2016年	2016年	2016年	2021年	2021年	2021年	2001年	1989年	1989年

典型测站的分析结果与前文“106个站点月尺度降水呈现一定程度的均化倾向”并不冲突。二者相结合,

恰好说明汛期降水演变复杂的时间尺度效应: 在月尺度上, 汛期降水减少, 非汛期降水增加; 在日尺度上, 汛期降水量和波动幅度加大, 天气事件的极端性增强。

4.3 降水与径流变化的同步性

降水是水循环的总输入, 经截留、入渗、蒸发、产流和汇流等过程后转化为径流, 这决定了径流变化过程往往与降水同步, 且波动性更强。鉴于此, 本文选择跨多个水资源一级区的12个水文站(站点空间分布见图1), 使用MK趋势检验法分析了径流演变特征, 进一步验证降水趋势分析成果(见章节3.1)。各水文站1956—2016年还原径流序列时程变化见图9, 检验结果见表3。

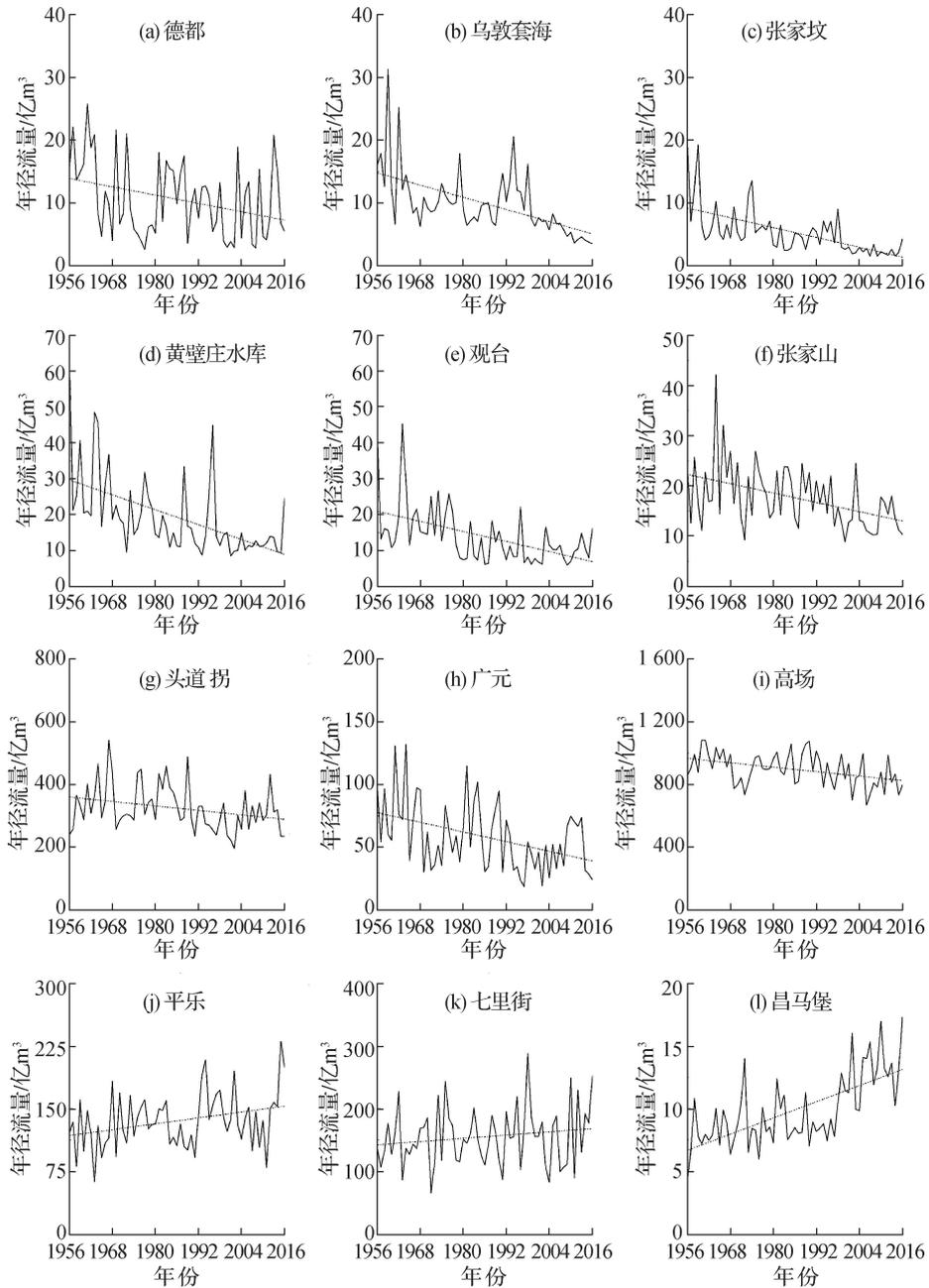


图9 典型水文站还原年径流量的年际变化

Fig. 9 Interannual changes of the naturalized annual runoff series at the 12 hydrological stations

图6结果显示,1956—2016年降水量显著减少的195个站点沿“东北—西南”方向斜贯全国,呈现出1个降水减少条带,其两侧各有1个降水增加条带,分别位于中国的东南与西部地区。结合水文站点位置(图1)和径流变化特征(表3)可知,位于讷谟尔河的德都站、辽河西段的乌敦套海站、潮白河的张家坟站、滹沱河的黄壁庄水库站、漳河的观台站、泾河的张家山站、黄河干流的头道拐站、白龙江的广元站和岷江的高场站等共9个站点集中分布在此“降水减少”条带上。该9个站还原径流量序列的年际变化梯度值为 -2.35 亿 ~ -0.09 亿 m^3/a ,相应 Z 统计量为 $-5.55\sim -2.21$,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,其中7个站通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。与之相反的是,富屯溪(闽江支流)的七里街站、贺江(西江支流)的平乐站、疏勒河的昌马堡站(突变年份1991年)等分别位于中国东南和西北的“降水增加”条带上,该3个站还原径流量系列的年际变化梯度值为 0.10 亿 ~ 3.21 亿 m^3/a ,相应 Z 统计量为 $2.09\sim 5.87$,均通过了 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,其中2个站通过了 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

表3 代表水文站还原年径流量的年际变化

Table 3 Interannual variations of naturalized annual runoff series at the 12 hydrological stations

序号	站称	所在河流	所在一级水资源分区	MK 检验结果	
				年际梯度/(亿 $\text{m}^3 \cdot \text{a}^{-1}$)	Z 统计量
1	德都	讷谟尔河	松花江区	-0.11*	-2.44
2	乌敦套海	辽河	辽河区	-0.14**	-5.47
3	张家坟	潮白河	海河区	-0.09**	-5.55
4	黄壁庄水库	滹沱河	海河区	-0.24**	-5.19
5	观台	漳河	海河区	-0.16**	-4.07
6	张家山	泾河	黄河区	-0.99*	-2.21
7	头道拐	黄河	黄河区	-0.18**	-4.22
8	广元	白龙江	长江区	-2.35**	-3.07
9	高场	岷江	长江区	-0.54**	-2.96
10	平乐	贺江	珠江区	3.21**	5.87
11	七里街	富屯溪	东南诸河区	0.55*	2.09
12	昌马堡	疏勒河	西北诸河区	0.10**	5.27

注:显著性水平 $\alpha=0.05$ 、 $\alpha=0.01$ 对应标准正态分布 Z 统计量的临界值分别为1.96、2.58; *表示通过 $\alpha=0.05$ 的显著性检验; **表示通过 $\alpha=0.01$ 的显著性检验。

综合前文分析成果,降水量年际间显著减少条带(图6)、PEC指数减少超过10%条带(图8)相重叠的地带,大多位于中国北方的辽河、海河与黄河流域等非湿润区。由于这些区域以超渗产流机制为主,汛期降水量占比的下降,势必影响到流域产流量。所用12个水文站的空间分布、还原径流量序列变化趋势、显著性检验结果与降水高度一致,这从侧面反映了本文成果的合理性。同时需要指出的是,径流变化受气候、地形、地质、地表覆被和地下水动态变化等下垫面因素以及经济社会取、用水的多维综合影响。以昌马堡站为例,李洪源等^[44]研究表明,气温升高、降水偏多是该站径流增加的主要原因,且冰川融水对径流增加的贡献占比为48%,非冰川区降水增加的贡献率为52%。受资料和研究深度限制,本文定性分析了典型站点降水和径流变化的同步性,下一步拟结合分布式水文模型进行径流演变的定量归因。

5 结 论

本文采用趋势分析、突变检验和年内分配向量法等方法,基于融合后的4177个降水测站长系列逐月降水量观测数据,系统分析了1956—2016年中国年降水量及其年内分配演变特征,主要结论如下:

(1) 中国降水时空分布不均,自东南到西北,年降水量总体递减,降水年内分布集中度递增。站点年降水量序列的变化趋势呈现较强的地带性,自东南到西北呈“增—减—增”的3个条带。显著增加的条带分别位于东南和西部地区,显著减少的条带位于中部,从东北地区向西南绵延至边境。年降水序列的趋势性变化大多伴随着突变,发生在20世纪80年代的站点最多。

(2) 沿200 mm和400 mm年降水量等值线,中国北方出现1个“汛期降水减少”条带,但其时间尺度效应较强。在月尺度上,站点汛期降水占比下降,非汛期降水占比增加;而在日尺度上则相反,连续3—7 d累积降水量的波幅加大,表明降水事件的极端程度在增强。

(3) 降水序列变化与径流的同步性较好,中国西北和东南地区年降水量呈增加趋势,典型水文站的还原径流量同步增加。年降水量显著减少、且最大4个月累积降水量占比指数减少超过10%的区域集中在北方的辽河、海河与黄河流域等非湿润区,相应水文断面的还原径流量显著减少。

致谢: 本文撰写过程中得到了气象共享数据网和全国第三次水资源调查评价全国技术组的数据支持,在此致谢!

参考文献:

- [1] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis. contribution of working group I to the sixth assessment report of the intergovernmental panel on climate change[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [2] ZHANG W, VILLARINI G, VECCHI G A, et al. Urbanization exacerbated the rainfall and flooding caused by hurricane Harvey in Houston[J]. Nature, 2018, 563(7731): 384-388.
- [3] KOTZ M, LEVERMANN A, WENZ L. The effect of rainfall changes on economic production[J]. Nature, 2022, 601(7892): 223-227.
- [4] 王英,曹明奎,陶波,等. 全球气候变化背景下中国降水量空间格局的变化特征[J]. 地理研究, 2006, 25(6): 1031-1040, 1148. (WANG Y, CAO M K, TAO B, et al. The characteristics of spatio-temporal patterns in precipitation in China under the background of global climate change[J]. Geographical Research, 2006, 25(6): 1031-1040, 1148. (in Chinese))
- [5] 施雅风,沈永平,李栋梁,等. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨[J]. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164. (SHI Y F, SHEN Y P, LI D L, et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China[J]. Quaternary Sciences, 2003, 23(2): 152-164. (in Chinese))
- [6] 张强,朱飙,杨金虎,等. 西北地区气候湿化趋势的新特征[J]. 科学通报, 2021, 66(S2): 3757-3771. (ZHANG Q, ZHU B, YANG J H, et al. New characteristics about the climate humidification trend in Northwest China[J]. Chinese Science Bulletin, 2021, 66(S2): 3757-3771. (in Chinese))
- [7] 王米雪,延军平. 1960—2012年中国东南沿海地区降水变化特征及重涝灾害趋势判断[J]. 地球与环境, 2015, 43(6): 667-674. (WANG M X, YAN J P. Precipitation characteristics of flooding from 1960 to 2012 and serious flooding judgment for the southeast coast of China[J]. Earth and Environment, 2015, 43(6): 667-674. (in Chinese))
- [8] 丁一汇,张莉. 青藏高原与中国其他地区气候突变时间的比较[J]. 大气科学, 2008, 32(4): 794-805. (DING Y H, ZHANG L. Intercomparison of the time for climate abrupt change between the Tibetan Plateau and other regions in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 2008, 32(4): 794-805. (in Chinese))
- [9] 贾路,于坤霞,邓铭江,等. 西北地区降雨集中度时空演变及其影响因素[J]. 农业工程学报, 2021, 37(16): 80-89. (JIA L, YU K X, DENG M J, et al. Temporal and spatial evolution of rainfall concentration and its influencing factors in Northwest China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(16): 80-89. (in Chinese))
- [10] 张阿龙,高瑞忠,刘廷玺,等. 高原内陆河流域气候水文突变与生态演变规律: 以内蒙古锡林河和巴拉格河河流域为例[J]. 中国环境科学, 2019, 39(12): 5254-5263. (ZHANG A L, GAO R Z, LIU T X, et al. Identification on hydrometeorology mutation characteristics and ecological evolution pattern of the plateau inland river basin: taken Xilin River and Balager River of Inner Mongolia for instance[J]. China Environmental Science, 2019, 39(12): 5254-5263. (in Chinese))
- [11] ZUO D P, XU Z X, PENG D Z, et al. Simulating spatiotemporal variability of blue and green water resources availability with uncertainty analysis[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(8): 1942-1955.
- [12] 刘向培,佟晓辉,贾庆宇,等. 1960—2017年中国降水集中程度特征分析[J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 10-19.

- (LIU X P, TONG X H, JIA Q Y, et al. Precipitation concentration characteristics in China during 1960—2017[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 10-19. (in Chinese))
- [13] ZHANG L J, QIAN Y F. Annual distribution features of precipitation in China and their interannual variations[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 17(2): 146-163.
- [14] 梁圆, 千怀遂, 张灵. 中国近 50 年降水量变化区划(1961—2010 年)[J]. *气象学报*, 2016, 74(1): 31-45. (LIANG Y, QIAN H S, ZHANG L. Regionalization of the annual precipitation change in the last 50 years in China(1961-2010)[J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 2016, 74(1): 31-45. (in Chinese))
- [15] 徐东坡, 李金明, 周祖昊, 等. 1956—2018 年中国降水特征的时空分布规律研究[J]. *水利水电技术*, 2020, 51(10): 20-27. (XU D P, LI J M, ZHOU Z H, et al. Study on the spatial and temporal distribution of precipitation characteristics in China from 1956 to 2018[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2020, 51(10): 20-27. (in Chinese))
- [16] 孙翠凤, 窦坤, 吴雷柱, 等. 鲁西南近 50 年降水量和雨日雨强变化趋势[J]. *中国农业资源与区划*, 2014, 35(2): 29-34. (SUN C F, DOU K, WU L Z, et al. Precipitation in Southwest Shandong in recent 50 years and the variation trend of rainy days and raininess[J]. *Chinese Journal of Agricultural Resources and Regional Planning*, 2014, 35(2): 29-34. (in Chinese))
- [17] 吴雷, 许有鹏, 王强, 等. 长三角地区夏季降水结构演变及其非平稳性[J]. *水科学进展*, 2022, 33(5): 730-742. (WU L, XU Y P, WANG Q, et al. Evolution and non-stationary characteristics of summer precipitation structure over the Yangtze River Delta[J]. *Advances in Water Science*, 2022, 33(5): 730-742. (in Chinese))
- [18] 胡庆芳, 张建业, 王银堂, 等. 城市化对降水影响的研究综述[J]. *水科学进展*, 2018, 29(1): 138-150. (HU Q F, ZHANG J Y, WANG Y T, et al. A review of urbanization impact on precipitation[J]. *Advances in Water Science*, 2018, 29(1): 138-150. (in Chinese))
- [19] 黄国如, 陈易偲, 姚芝军. 高度城镇化背景下珠三角地区极端降雨时空演变特征[J]. *水科学进展*, 2021, 32(2): 161-170. (HUANG G R, CHEN Y S, YAO Z J. Spatial and temporal evolution characteristics of extreme rainfall in the Pearl River Delta under high urbanization[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(2): 161-170. (in Chinese))
- [20] 水利部水利水电规划设计总院. 中国水资源及其开发利用调查评价[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2014: 30-40. (General Institute of Water Resources & Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources. Investigation and evaluation of water resources and their development and utilization in China[M]. Beijing: China Water & Power Press, 2014: 30-40. (in Chinese))
- [21] MANN H B. Nonparametric tests against trend[J]. *Econometrica*, 1945, 13(3): 245-259.
- [22] KENDALL M G. Rank correlation methods[M]. London: Griffin, 1975: 161-171.
- [23] PETTITT A N. A non-parametric approach to the change-point problem[J]. *Applied Statistics*, 1979, 28(2): 126-135.
- [24] 杜军凯, 贾仰文, 李晓星, 等. 基于 TRMM 卫星降水的太行山区降水时空分布格局[J]. *水科学进展*, 2019, 30(1): 1-13. (DU J K, JIA Y W, LI X X, et al. Study on the spatial-temporal distribution pattern of precipitation in the Taihang Mountain region using TRMM data[J]. *Advances in Water Science*, 2019, 30(1): 1-13. (in Chinese))
- [25] 丁一汇, 柳艳菊, 宋亚芳. 东亚夏季风水汽输送带及其对中国大暴雨与洪涝灾害的影响[J]. *水科学进展*, 2020, 31(5): 629-643. (DING Y H, LIU Y J, SONG Y F. East Asian summer monsoon moisture transport belt and its impact on heavy rainfalls and floods in China[J]. *Advances in Water Science*, 2020, 31(5): 629-643. (in Chinese))
- [26] 吴胜安, 邢彩盈, 朱晶晶. 海南岛强台风事件的气候特征[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(6): 244-252. (WU S A, XING C Y, ZHU J J. Climate characteristics of violent typhoon events on Hainan Island[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(6): 244-252. (in Chinese))
- [27] 张天宇, 程炳岩, 王记芳, 等. 华北雨季降水集中度和集中期的时空变化特征[J]. *高原气象*, 2007, 26(4): 843-853. (ZHANG T Y, CHENG B Y, WANG J F, et al. Temporal and spatial change characteristics of precipitation concentration degree(PCD) and precipitation-concentration period(PCP) over North China in rainy reason[J]. *Plateau Meteorology*, 2007, 26(4): 843-853. (in Chinese))
- [28] 张运福, 胡春雨, 赵春雨, 等. 东北地区降水年内分配的不均匀性[J]. *自然灾害学报*, 2009, 18(2): 89-94. (ZHANG Y F, HU C L, ZHAO C Y, et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation in Northeast China[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2009, 18(2): 89-94. (in Chinese))
- [29] 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 L

- J, QIAN Y F. 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))
- [30] 杨金虎, 王鹏祥, 白虎志, 等. 中国西北降水年内非均匀性特征分析[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(5): 276-281. (YANG J H, WANG P X, BAI H Z, et al. Intra-annual inhomogeneity characteristics of precipitation over Northwest China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2007, 3(5): 276-281. (in Chinese))
- [31] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书(2021)[M]. 北京: 科学出版社, 2021: 1-35. (National Climate Center. *Blue book on climate change in China 2021*[M]. Beijing: Science Press, 2021: 1-35. (in Chinese))
- [32] 张国宏, 李智才, 宋燕, 等. 中国降水量变化的空间分布特征与东亚夏季风[J]. *干旱区地理*, 2011, 34(1): 34-42. (ZHANG G H, LI Z C, SONG Y, et al. Spatial patterns of change trend in rainfall of China and the role of East Asia summer monsoon[J]. *Arid Land Geography*, 2011, 34(1): 34-42. (in Chinese))
- [33] 王可丽, 江灏, 赵红岩. 西风带与季风对中国西北地区的水汽输送[J]. *水科学进展*, 2005, 16(3): 432-438. (WANG K L, JIANG H, ZHAO H Y. Atmospheric water vapor transport from westerly and monsoon over the Northwest China[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(3): 432-438. (in Chinese))
- [34] 郝立生, 闵锦忠, 丁一汇. 华北地区降水事件变化和暴雨事件减少原因分析[J]. *地球物理学报*, 2011, 54(5): 1160-1167. (HAO L S, MIN J Z, DING Y H. Analysis of precipitation events changes and causes for rainstorm events reduction in North China[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2011, 54(5): 1160-1167. (in Chinese))
- [35] ZHANG Q, YANG J H, WANG W, et al. Climatic warming and humidification in the arid region of Northwest China: multi-scale characteristics and impacts on ecological vegetation[J]. *Journal of Meteorological Research*, 2021, 35(1): 113-127.
- [36] 李颖, 苏凤阁, 汤秋鸿, 等. 青藏高原主要流域的降水水汽来源[J]. *中国科学: 地球科学*, 2022, 52(7): 1328-1344. (LI Y, SU F G, TANG Q H, et al. Sources of precipitation water vapor in main basins of Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Scientia Sinica Terrae*, 2022, 52(7): 1328-1344. (in Chinese))
- [37] ZHANG C, TANG Q H, CHEN D L. Recent changes in the moisture source of precipitation over the Tibetan Plateau[J]. *Journal of Climate*, 2017, 30(5): 1807-1819.
- [38] 汤秋鸿, 刘宇博, 张弛, 等. 青藏高原及其周边地区降水的水汽来源变化研究进展[J]. *大气科学学报*, 2020, 43(6): 1002-1009. (TANG Q H, LIU Y B, ZHANG C, et al. Research progress on moisture source change of precipitation over the Tibetan Plateau and its surrounding areas[J]. *Transactions of Atmospheric Sciences*, 2020, 43(6): 1002-1009. (in Chinese))
- [39] 黄伟. 近30年影响我国东南沿海的热带气旋降水强度变化特征分析[J]. *气候与环境研究*, 2013, 18(4): 507-516. (HUANG W. Changes in the intensity of tropical-cyclone-induced precipitation along the southeastern coast of China between 1978 and 2007[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2013, 18(4): 507-516. (in Chinese))
- [40] 冯新灵, 罗隆诚, 冯自立. 中国近50年降水变化趋势及突变的Hurst指数试验[J]. *干旱区地理*, 2009, 32(6): 859-866. (FENG X L, LUO L C, FENG Z L. Hurst index experiment on precipitation change trend and mutation of China in the near 50 years [J]. *Arid Land Geography*, 2009, 32(6): 859-866. (in Chinese))
- [41] 曾小凡, 翟建青, 姜彤, 等. 长江流域年降水量的空间特征和演变规律分析[J]. *河海大学学报(自然科学版)*, 2008, 36(6): 727-732. (ZENG X F, ZHAI J Q, JIANG T, et al. Spatial characteristics and evolutionary trends of annual precipitation in the Yangtze River basin[J]. *Journal of Hohai University (Natural Sciences)*, 2008, 36(6): 727-732. (in Chinese))
- [42] 常军, 王永光, 赵宇, 等. 近50年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 43-54. (CHANG J, WANG Y G, ZHAO Y, et al. Characteristics of climate change of precipitation and rain days in the Yellow River basin during recent 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 43-54. (in Chinese))
- [43] 李明聪, 李栋梁. 东亚冬夏季风关系在1970s末的年代际转变[J]. *气象科学*, 2017, 37(3): 329-338. (LI M C, LI D L. The decadal change of relationship between East Asian winter monsoon and East Asian summer monsoon in late 1970s[J]. *Journal of the Meteorological Sciences*, 2017, 37(3): 329-338. (in Chinese))
- [44] 李洪源, 赵求东, 吴锦奎, 等. 疏勒河上游径流组分及其变化特征定量模拟[J]. *冰川冻土*, 2019, 41(4): 907-917. (LI H Y, ZHAO Q D, WU J K, et al. Quantitative simulation of the runoff components and its variation characteristics in the upstream of the Shule River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2019, 41(4): 907-917. (in Chinese))

Evolution characteristics of the interannual and intra-annual precipitation in China from 1956 to 2016*

DU Junkai¹, QIU Yaqin¹, LI Yunling², LU Qiong¹, HAO Chunfeng¹, LIU Haiying¹

(1. *China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing 100038, China*; 2. *General Institute of Water Resources & Hydropower Planning and Design, Ministry of Water Resources, Beijing 100120, China*)

Abstract: To analyze the spatio-temporal distribution pattern of precipitation in China, the trend and mutation characteristics of the annual precipitation, as well as the temporal and spatial evolution of the intra-annual distribution, are summarized and analyzed using multiple methods based on the fused monthly precipitation monitoring data of the water conservancy department and the meteorological department of 4 177 stations from 1956 to 2016. These methods include the Mann-Kendall test, PETTTTT test, and vector algorithm for intra-annual distribution, which explores the distribution pattern of several indices, including the precipitation-concentration degree, precipitation-concentration period, and the proportion indices of the maximum accumulated precipitation in four months to one year. The following conclusions are drawn: ① The temporal and spatial distribution of precipitation across China is not uniform. In general, the annual precipitation decreases, and the concentration of annual precipitation distribution increases from southeast to northwest; the changing trend of the annual precipitation at the stations shows a strong zonality with three bands of “increase-decrease-increase” from the southeast to the northwest; the bands showing a significant increase are located in the Southeast and Western China, and the bands showing a significant decrease are located in the central region, stretching from the northeast to the southwest to the border; and abrupt changes are often accompanied with the trend changes of the annual precipitation, of which most sites occur in the 1980s. ② Along the 200 and 400 mm annual precipitation contours, one band shows “flood season precipitation reduction” with strong temporal variation in North China. On the monthly scale, the proportion of precipitation in the flood season of the station decreases, and it increases in the non-flood season, while the opposite is true on the daily scale. The amplitude of accumulated precipitation for 3—7 consecutive days increases, suggesting that the extreme degree of precipitation events is increasing. ③ The changes in the precipitation series and the changes in the runoff series are well synchronized. The annual precipitation in Northwest and Southeast China shows an increasing trend, and the statistical discharge of the typical hydrological stations increases synchronously. However, the stations at which the annual precipitation decreases significantly and where the proportion indices of the maximum accumulated precipitation in four months to one year declines more than 10%, are concentrated in the non-humid areas of Northern China, such as the Liaohe River basin, Haihe River basin, and Yellow River basin. In these regions, the statistical discharge of the hydrological stations has decreased significantly.

Key words: precipitation; intra-annual distribution; precipitation-concentration degree; precipitation-concentration period; evolution law

* The study is financially supported by the National Key R&D Program of China (No. 2021YFC3201101) and the National Natural Science Foundation of China (No. 52279030).