

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.01.017

1956—2018年太湖流域降水统计特征及演变趋势

许钦^{1,2,3}, 叶鸣^{1,3,4}, 蔡晶^{1,3}, 刘露霖^{1,3}, 林晓清²

(1. 南京水利科学研究院水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098;
2. 长江保护与绿色发展研究院, 江苏南京 210098; 3. 南京水利科学研究院水文水资源研究所,
江苏南京 210029; 4. 河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098)

摘要:基于太湖流域133个代表性雨量站1956—2018年实测日降水资料序列,采用P-III型频率曲线、Mann-Kendall检验、Morlet小波分析等方法进行太湖流域及其水利分区降水演变趋势诊断及统计特征分析。结果表明:1956—2018年太湖流域年降水以0.557 mm/a的速率缓慢增长;太湖流域及其水利分区降水演变特征不一致,东南部平原区的降水波动大于西北部山丘区;各水利分区不同频率设计暴雨中百年一遇设计雨量空间分布差异性最大,其中最大7 d降水量表现最显著,最大3 d降水量次之,最大1 d降水量最弱;各水利分区年降水量的增长幅度不同,流域东北部变幅为每10 a 17.3~33.0 mm,西南部为每10 a 3.30~22.2 mm,整体呈自东向西逐渐减弱的趋势;太湖流域及其水利分区年降水呈现多尺度周期变化,35~62 a周期变化最显著。

关键词:降水量;降水特性;P-III频率曲线;Mann-Kendall检验;Morlet小波分析;太湖流域

中图分类号:TV125 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)01-0127-06

Precipitation statistical characteristics and evolution trend in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018//XU Qin^{1,2,3}, YE Ming^{1,3,4}, CAI Jing^{1,3}, LIU Lulin^{1,3}, LIN Xiaqing² (1. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210098, China; 2. Yangtze Institute for Conservation and Development, Nanjing 210098, China; 3. Hydrology and Water Resources Department, Nanjing Hydraulic Research Institute, Nanjing 210029, China; 4. College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: Based on the daily precipitation data series measured by 133 representative rainfall stations in the Taihu Lake Basin from 1956 to 2018, P-III frequency analysis, Mann-Kendall test method, Morlet wavelet method and other methods are used to diagnose the precipitation evolution trend and statistical characteristics analysis. The results show that the annual precipitation in the Taihu Lake Basin increases slowly at a rate of 0.557 mm/a from 1956 to 2018. The precipitation evolution characteristics of the Taihu Lake Basin and its water conservancy districts are inconsistent, and the precipitation fluctuations in the southeast plain area are greater than that in the northwest hilly area. The spatial distribution difference of design rainfall with 100 year return period is the largest among different frequency design rainstorms in each water conservancy district, with the largest 7 d rainfall being the most significant, followed by the largest 3 d rainfall, and the largest 1 d rainfall being the weakest. The annual precipitation growth rate of each water conservancy district is different. The range in the northeast of the basin is 17.3~33.0 mm every 10 years, and that in the southwest is 3.30~22.2 mm every 10 years. The overall trend is gradually weakening from east to west. The annual precipitation in the Taihu Lake basin and its water conservancy subarea presents a multi-scale periodic change, with the most significant 35~62a periodic change.

Key words: precipitation; precipitation characteristics; P-III frequency curve; Mann-Kendall test; Morlet wavelet analysis; Taihu Lake Basin

基金项目:国家自然科学基金面上项目(51879163,51779146)

作者简介:许钦(1980—),男,正高级工程师,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: qinxu@nhri.cn

通信作者:叶鸣(1997—),女,硕士研究生,主要从事流域水文模拟研究。E-mail: tenthbirdy@163.com

太湖流域是我国经济最发达的地区之一,人口众多,河网如织,湖泊密布,流域面积仅占全国国土面积 0.4%,2020 年末全流域 GDP 约占全国的 9.8%^[1],而流域人均水资源占有量为 456 m³,远低于全国平均水平^[2-3]。太湖流域多年平均年降水量为 1218 mm,属于相对丰水地区,然而受局地环流和地形影响,年降水空间分布不均,自东南向西北呈减少趋势^[4]。因此,对太湖流域整体及分区进行统计特征分析和降水演变趋势诊断,精细化掌握区域降水特征,对合理规划区域水资源及防汛减灾工作具有重要意义。Zhou 等^[5]基于太湖流域 96 个雨量站的年最大降水,利用 L 矩阵方法,发现极端降水逐渐集中在城市区域;董满宇等^[6]基于 1960—2017 年逐日降水数据,运用 R/S 分析方法揭示了年降水总量中,中雨量占比最大,为 32.05%;包云轩等^[7]采用 EOF 正交经验法、线性倾向率法研究环太湖地区 20 世纪 80 年代以来的气候变化,发现区域降水表现为北部增加、南部减少;杨凤等^[8]利用 Mann-Kendall(M-K)检验分析太湖流域及其水利分区的降水变化趋势,发现其降水指标均呈上升趋势,且东部地区上升趋势更明显。现有研究大多基于日降水数据,利用单一数理统计方法分析整个流域的降水规律,无法详尽展示太湖流域及其水利分区的降水规律。

本文基于太湖流域内 133 个代表性雨量站的实测日降水资料,采用 P-III 型频率曲线、M-K 检验、Morlet 小波分析等方法分析太湖流域 1956—2018 年降水趋势、周期波动等规律,同时诊断流域水利分区的降水变化特征,以期为太湖流域水资源综合管理提供参考。

1 研究区概况及站点分布

1.1 研究区概况

太湖流域地处长江三角洲南缘,是我国东部平原河湖分布最密集的区域^[9]。流域范围东经 119°08′~121°55′、北纬 30°05′~32°08′,行政隶属于江苏、浙江、安徽和上海三省一市,流域总面积为 3.69 万 km²。流域地势呈西高东低、四周高、中间低的碟形,地貌主要分为山地丘陵及平原两大类,其中山丘区约占 20%,平原区约占 80%。

太湖流域属于中亚热带季风气候区,受季风环流控制^[10],四季分明,气候温和,雨量丰沛,降雨主要集中在 5—9 月。形成流域径流量的主要降水为梅雨及台风雨^[11],其中梅雨多发生在 6 月中旬至 7 月中旬,总量大、历时长、范围广;台风雨多发生在 7 月下旬至 9 月中旬,雨强大、历时短、范围小。城市

化对水文过程的影响很大^[12],历史上,太湖流域曾于 1954、1991、1999、2016 年发生特大洪水,1971、1978、2003 年发生严重干旱。

1.2 站点分布

考虑到流域的空间变异性,根据地形及水系特点,将太湖流域划分为湖西区、浙西区、太湖区、武澄锡虞区、阳澄淀泖区、杭嘉湖区、浦西区和浦东区 8 个水利分区^[13]。全流域水文站有 80 余处,主要监测项目是水位以及上游入太湖、长江的水量,浙西山区分布着一些控制中小流域的水文测站;雨量站稳定在 200 处以上,可以较好地控制流域雨量的时空分布;蒸发站稳定在 30 处左右。本文选用的具有长期观测资料的雨量代表站共计 133 个,其中湖西区 21 个,武澄锡虞区 11 个,阳澄淀泖区 12 个,太湖区 6 个,杭嘉湖区 25 个,浦西区 5 个,浦东区 7 个,浙西区 46 个。

2 研究方法

2.1 P-III 型频率曲线法

P-III 型频率曲线法是一种在我国大多数地区应用且取得水文业界认可的方法^[14-15]。P-III 型频率曲线主要考虑均值 E_x 、变差系数 C_v 和偏态系数 C_s 3 个参数的影响。 E_x 代表系列的平均情况,能够说明系列的总体水平高低,是频率曲线分布的重要参数,也是水文现象的重要特征值; C_v 又称离差系数或离势系数,能够说明系列的离散程度,在水文现象中,其大小能反映水文要素的多年变化情况; C_s 是衡量系列偏态(不对称)程度的参数。

2.2 M-K 检验法

M-K 检验法是目前广泛应用于水文要素的非参数统计检验方法^[16],既可以检验时间序列变化趋势的显著性,也可以进行突变分析^[17]。统计值 Z 及倾斜度 β 分别代表序列的变化幅度和长期变化趋势^[18-19]。在给定 0.05 置信水平下,若 $|Z| \geq 1.96$,则时间序列上升或下降趋势显著。倾斜度 $\beta > 0$ 表示时间序列呈上升趋势,反之则表示呈下降趋势。本文选取置信水平 0.05、统计临界值 1.96 进行降水趋势分析。

2.3 Morlet 小波分析法

在水文要素周期性变化分析中,常用 Morlet 函数作为基函数。Morlet 小波分析法能够通过局部变换时域和频域来提取信号信息,从而定量分析研究区降水序列的周期性变化特征,广泛应用于水文领域^[20-22]。在一定时间尺度下,小波方差峰值对应序列主要周期。

3 结果与分析

3.1 降水特征值

图1为1956—2018年太湖流域降水量变化情况。采取平均年降水量及降水量距平百分率反映降水量趋势变化。1956—2018年太湖流域年降水以0.557 mm/a的速率缓慢增长,期间31年高于多年平均降水,32年低于多年平均降水。典型异常偏低年为1971年、1978年和2003年,典型异常偏高年为1991年、1999年和2016年,分别对应太湖流域典型干旱年和典型洪年。

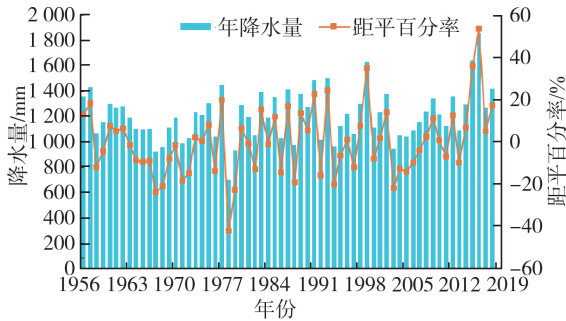


图1 1956—2018年太湖流域降水量变化情况

Fig. 1 Precipitation change in Taihu Lake Basin from 1956 to 2018

利用P-III型频率曲线将太湖流域及其水利分区的最大1 d、3 d、7 d降水量进行适线,设计频率分别取20% (5年一遇)、10% (10年一遇)、5% (20年一遇)、2% (50年一遇)、1% (100年一遇), $C_s = 3.5C_v$ [23], 得到各水利分区不同设计频率下最大1 d、3 d、7 d降水量(图2~4)。由图2~4可见,1%设计频率的降水空间分差异性大,其中最大7 d降水量表现最显著,最大3 d降水量次之,最大1 d降水量最弱。各水利分区相同设计频率的降水特征

值存在空间差异,呈现自西向东、自南向北逐渐增大的趋势。浙西山丘区由于地形抬升、下垫面变化剧烈等原因,各设计频率的降水特征值都较其他分区大,1%设计频率的最大1 d降水量为248.38 mm,最大3 d降水量为357.80 mm,最大7 d降水量为478.45 mm。除此之外,杭嘉湖区的降水特征值也比较大,因此湖州、安吉、嘉兴等浙西山丘区和杭嘉湖区城市的防洪压力较大。

各分区最大1 d、3 d、7 d的 C_v 值存在空间差异,均由北向南、由西向东逐渐增大,东南部平原区的降水波动大于西北部山丘区。 C_v 值变化幅度为0.30~0.66,呈正偏态分布,说明太湖流域及各水利分区出现小于平均降水的小降水概率较高,概率从北部向南部减小。各分区中杭嘉湖区的最大1 d、3 d、7 d的 C_v 值最大,分别为0.66、0.60、0.54;湖西区最小,分别为0.38、0.39、0.42,说明1956—2018年,最大1 d、3 d、7 d降水量波动幅度杭嘉湖区最大,湖西区最小。原因是杭嘉湖区南临钱塘江、杭州湾,相较湖西区水汽丰富,且杭嘉湖区属于平原区,便于水汽输送,而湖西区内有茅山山脉、界岭山脉阻挡水汽输送。另外,最大1 d降水量变幅最大,最大3 d降水量次之,最大7 d降水量最小,这一现象一定程度反映了太湖流域内降水日数增多且极端降水多发的趋势,这与IPCC第六次评估报告中结果吻合,即全球尺度陆地强降水频率及强度都可能增加[24]。

3.2 M-K 检验结果

利用M-K检验法分析1956—2018年太湖流域及其水利分区降水的趋势变化和突变节点,计算Z值及 β 值,综合判断时间序列的变化趋势,判断降水序列的突变年份,检验结果见表1。

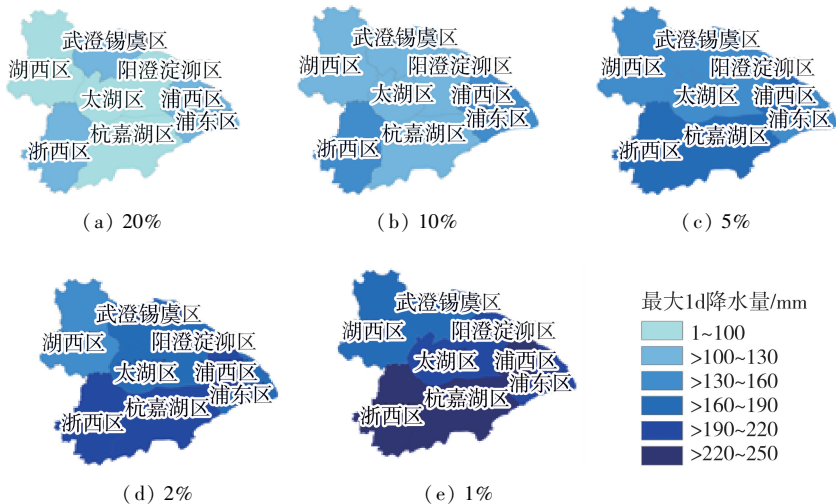


图2 各水利分区不同设计频率最大1 d降水量

Fig. 2 Maximum 1 d precipitation at different design frequencies in each water conservancy division

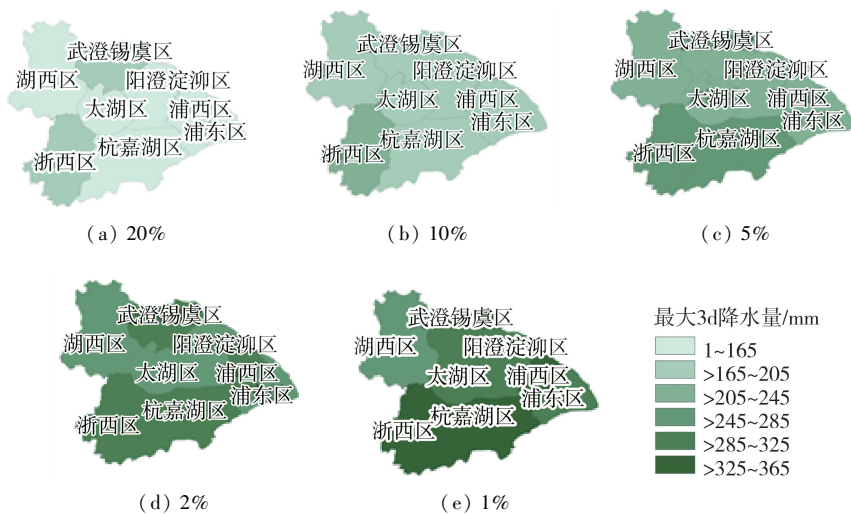


图3 各水利分区不同设计频率最大3d降水量

Fig. 3 Maximum 3 d precipitation at different design frequencies in each water conservancy division

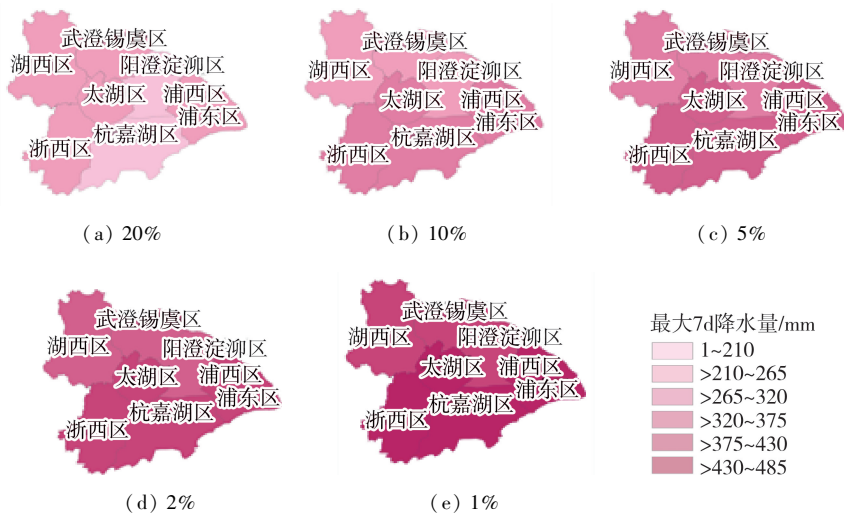


图4 各水利分区不同设计频率最大7d降水量

Fig. 4 Maximum 7 d precipitation at different design frequencies in each water conservancy division

表1 M-K 检验结果

Table 1 M-K inspection results

流域及水利分区	β	Z	趋势性
太湖流域	1.98	1.58	小幅增大
湖西区	2.22	1.66	小幅增大
武澄锡虞区	1.73	1.16	小幅增大
阳澄淀泖区	3.07	2.10	显著增大
太湖区	0.80	0.54	略微增大
杭嘉湖区	2.35	1.61	小幅增大
浙西区	0.33	0.19	略微增大
浦东区	3.30	2.00	显著增大
浦西区	3.27	2.42	显著增大

由表1可见,1956—2018年太湖流域内整体年降水量变化规律基本一致,均呈增长趋势,全流域年降水量M-K倾向度达每10a 19.8 mm,但各水利分区的变化幅度不同,整体呈自东向西逐渐减弱的趋势。流域东北部年降水量变幅大多在每10a 17.3~

33.0 mm,而西南部大多在每10a 3.30~22.2 mm。其中,浦东区、浦西区增长最为显著,分别达每10a 33.0 mm和32.7 mm;湖区及浙西山丘区尽管都呈增长趋势,但增幅远不如平均水平,仅为每10a 8.0 mm及3.3 mm。另外,阳澄淀泖区及湖区正逆序列交点范围较广,分别在1996—2000年及1986—1993年发生较为频繁和复杂的波动。太湖流域在20世纪六七十年代存在持续时间较长的少雨期,年降水量连续低于平均水平,20世纪80年代后降水有所增多^[25]。2000—2007年,太湖流域年降水量平均每年减少81.6 mm,造成流域连续干旱。1999年和2016年发生特大洪水,均由当年强降水引起。

3.3 Morlet小波分析结果

图5、图6为1956—2018年太湖流域及其水利分区降水量Morlet小波实部时频变化及小波方差,图中清晰地揭示了年降水量的周期变化、突变点分

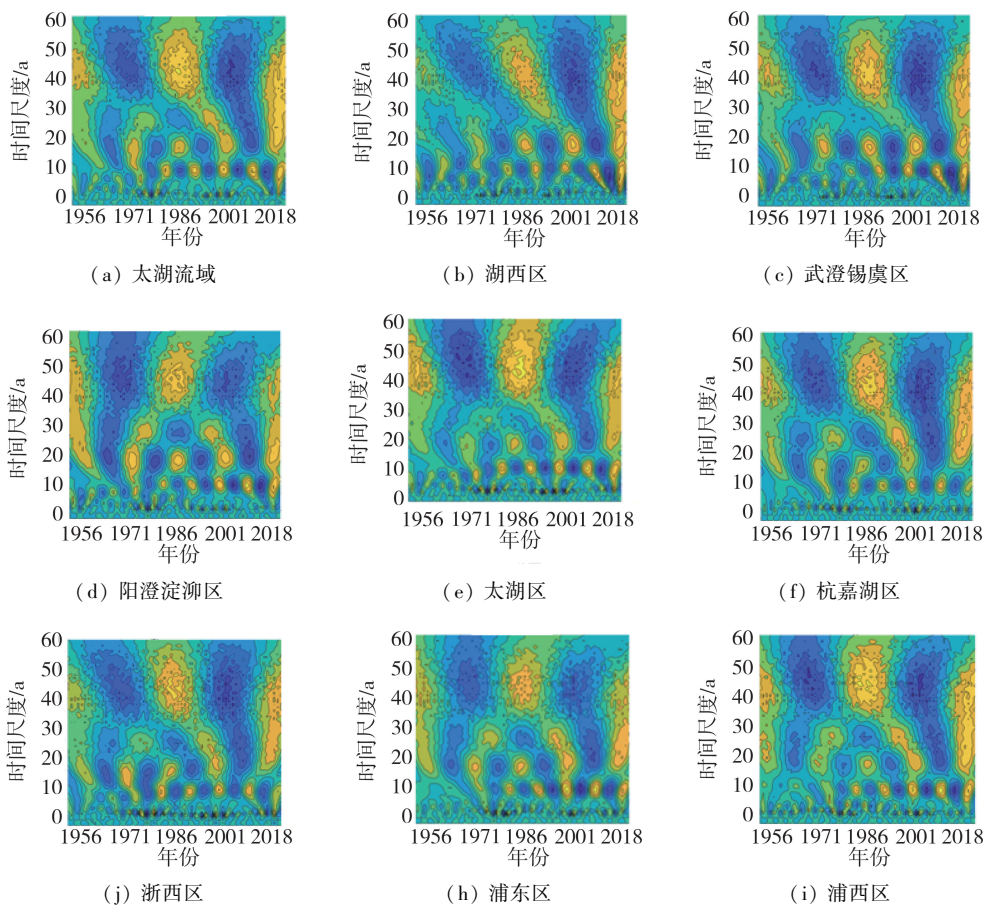


图5 1956—2018年太湖流域及其水利分区降水量 Morlet 小波实部时频变化

Fig. 5 Wavelet analysis of the Taihu Lake Basin and its water conservancy divisions from 1956 to 2018

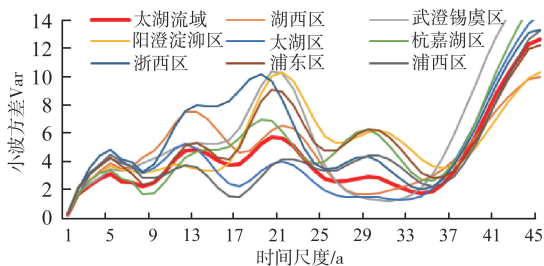


图6 1956—2018年太湖流域及其水利分区降水量小波方差

Fig. 6 Variance diagram of the Taihu Lake Basin and its water conservancy divisions in the past 63 years

布及其相位结构。由图5、图6可见,太湖流域37~58 a时间尺度非常突出,中心时间尺度在48 a左右,经历了2次准震荡,1981年后10~13 a表现显著,存在20 a、13 a主周期;湖西区和浙西山丘区的中心时间尺度均为20 a左右,且都在1978年后18~27 a震荡周期显著;武澄锡虞区存在39~58 a主震荡周期,具有全域性,正负相位交替出现,丰枯特性表现明显,20 a主周期显著;阳澄淀泖区存在3个震荡周期,分别为41~56 a、17~23 a、11~13 a,其中17~23 a在1964年后较为显著,经历了4次准震荡;湖区和杭嘉湖区存在全域性较强的38~59 a震荡周期;

浦东区、浦西区周期变化较为相似,存在39~57 a震荡周期,中心时间尺度约为46 a,均经历2次准震荡,浦东区20 a第一主周期较为明显。

4 结论

a. 1956—2018年太湖流域年降水以0.557 mm/a的速率缓慢增长。太湖流域及其水利分区降水演变特征不一致,东南部平原区的降水波动大于西北部山丘区。不同设计频率的降水特征值中1%频率的空间分布差异性大,其中最大7 d降水量表现最显著,最大3 d降水量次之,最大1 d降水量最弱。最大1 d、3 d和7 d降水量变化存在空间差异性,最大7 d降水量变幅最大,最大3 d降水量次之,最大1 d降水量最小,一定程度上反映太湖流域内降水日数增多且极端降水多发趋势。

b. 太湖流域各水利分区年降水量的增长幅度不同,整体呈自东向西逐渐减弱的趋势,流域东北部变幅为每10 a 17.3~33.0 mm,西南部为每10 a 3.30~22.2 mm。

c. Morlet小波实部时频变化及方差图显示太湖流域及其水利分区年降水量呈现多尺度周期变

化,35~62 a 周期变化最显著,均在 20 世纪 80 年代后变得稳定,湖西区及杭嘉湖区的年降水周期变化较其他水利分区模糊。

参考文献:

[1] 水利部太湖流域管理局. 2020 年太湖流域及东南诸河水资源公报[R]. 上海: 水利部太湖流域管理局, 2021.

[2] 邹磊, 夏军, 张印, 等. 海河流域降水时空演变特征及其驱动力分析[J]. 水资源保护, 2021, 37(1): 53-60. (ZOU Lei, XIA Jun, ZHANG Yin, et al. Spatial-temporal change characteristics and driving forces of precipitation in the Haihe River Basin[J]. Water Resources Protection, 2021, 37(1): 53-60. (in Chinese))

[3] 赵静, 胡庆芳, 王腊春, 等. 基于 MSWEP 数据的太湖流域降水特性分析[J]. 水资源保护, 2020, 36(2): 27-33. (ZHAO Jing, HU Qinfang, WANG Lachun, et al. Design flood revision for the upper Huaihe River Basin based on SWAT model[J]. Water Resources Protection, 2020, 36(2): 27-33. (in Chinese))

[4] 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 Xiaofan, ZHAI Jianqing, JIANG Tong, 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))

[5] ZHOU Z, LIU S, HU Y, et al. Analysis of precipitation extremes in the Taihu Basin of China based on the regional L-moment method[J]. Hydrology Research, 2017, 48(2): 468-479.

[6] 董满宇, 田相佑, 胡木兰, 等. 1960—2017 年太湖流域不同等级降水时空特征[J]. 热带地理, 2020, 40(6): 1063-1074. (DONG Manyu, TIAN Xiangyou, HU Mulan, et al. Spatio-temporal variation in precipitation for different grades in the Taihu Lake Basin during 1960-2017 [J]. Tropical Geography, 2020, 40(6): 1063-1074. (in Chinese))

[7] 包云轩, 何琰, 蒯志敏, 等. 环太湖地区气候变化特征研究[J]. 大气科学学报, 2018, 41(6): 872-880. (BAO Yunxuan, HE Yan, KUAI Zhimin, et al. Patterns and characteristics of climate changes around the Taihu Lake area[J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 2018, 41(6): 872-880. (in Chinese))

[8] 杨凤, 高颖会, 陈钢. 太湖流域 1961—2015 年降水趋势分析[J]. 中国防汛抗旱, 2020, 30(3): 51-54. (YANG Feng, GAO Yinghui, CHEN Gang. Analysis of precipitation trend in Taihu Lake Basin from 1961 to 2015 [J]. China Flood & Drought Management, 2020, 30(3): 51-54. (in Chinese))

[9] 陈星, 许钦, 何新玥, 等. 城市浅水湖泊生态系统健康与保护研究[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 77-81. (CHEN

Xing, XU Qin, HE Xinyue, et al. Research on health evaluation and protection of urban shallow lake ecosystem [J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 77-81. (in Chinese))

[10] 陈星, 余钟波, 许钦. 太湖流域典型丘陵区分布式水文模拟[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2012, 40(1): 19-22. (CHEN Xing, YU Zhongbo, XU Qin, et al. Distributed hydrological simulation for a typical hilly watershed in Taihu Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2012, 40(1): 19-22. (in Chinese))

[11] 耿玉琴. 太湖流域降雨时空分布规律分析[J]. 海河水利, 2003(3): 33-35. (GENG Yuqin. Analysis on the temporal and spatial distribution of rainfall in Taihu Lake Basin [J]. Haihe Water Resources, 2003(3): 33-35. (in Chinese))

[12] CHEN X, TIAN C, MENG X, et al. Analyzing the effect of urbanization on flood characteristics at catchment levels [J]. Proc IAHS, 2015, 370: 33-38.

[13] 许钦, 任立良, 刘九夫, 等. 基于 DEM 的入库洪水预报模型研究及系统开发[J]. 岩土工程学报, 2008(11): 1748-1751. (XU Qin, REN Liliang, LIU Jiufu, et al. Forecast model of reservoir inflow based on DEM and its system development [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2008(11): 1748-1751. (in Chinese))

[14] 谢崇宝, 袁宏源, 郭元裕. P-III 型理论频率曲线参数估计: 模糊极值法 [J]. 水文, 1997(3): 2-9. (XIE Chongbao, YUAN Hongyuan, GUO Yuanyu. A new estimation way of pearson type III distribution parameter of frequency curve: fuzzy maximum value method [J]. Journal of China Hydrology, 1997(3): 2-9. (in Chinese))

[15] 高伟, 王西琴, 曾勇. 太湖流域西苕溪 1972—2008 年径流量变化趋势与原因分析[J]. 中国农村水利水电, 2010(6): 33-37. (GAO Wei, WANG Xiqin, ZENG Yong. A trend analysis of observations of runoff in the Xitiaoxi River in the Taihu Lake between 1972 and 2008 [J]. China Rural Water Resources and Hydropower, 2010(6): 33-37. (in Chinese))

[16] 吴浩云, 王银堂, 胡庆芳, 等. 太湖流域 61 年来降水时空演变规律分析[J]. 水文, 2013, 33(2): 75-81. (WU Haoyun, WANG Yintang, HU Qinfang, et al. Temporal change of precipitation in Taihu Lake Basin during recent 61 years [J]. Journal of China Hydrology, 2013, 33(2): 75-81. (in Chinese))

[17] 孟秀敬, 张士锋, 张永勇. 河西走廊 57 年来气温和降水时空变化特征 [J]. 地理学报, 2012, 67(11): 1482-1492. (MENG Xiuqing, ZHANG Shifeng, ZHANG Yongyong. The temporal and spatial change of temperature and precipitation in Hexi Corridor in recent 57 years [J]. Acta Geographica Sinica, 2012, 67(11): 1482-1492. (in Chinese))

(下转第 173 页)

- (in Chinese))
- [14] 杨浩,李一平,蒲亚帅,等. 张家港市河道水质时空分布特征研究分析[J]. 环境科学学报,2021,41(10):4064-4073. (YANG Hao, LI Yiping, PU Yashuai, et al. Spatio-temporal distribution characteristics and the river water quality of Zhangjiagang City [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2021, 41(10):4064-4073. (in Chinese))
- [15] 潘泓哲,李一平,唐春燕,等. 多目标优化下平原河网引调水改善水环境效果评估[J]. 湖泊科学,2021,33(4):1138-1152. (PAN Hongzhe, LI Yiping, TANG Chunyan, et al. Evaluation of the effect of water diversion on improving water environment in plain river network under the multi-objective optimization[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4):1138-1152. (in Chinese))
- [16] 夏玉宝,王华,何新辰,等. 太湖流域典型滨湖河网水动力与水质时空异质性[J]. 湖泊科学,2021,33(4):1100-1111. (XIA Yubao, WANG Hua, HE Xinchun, et al. Spatiotemporal heterogeneity of hydrodynamic forces and water quality in typical lakeside river networks in Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2021, 33(4):1100-1111. (in Chinese))
- [17] 崔广柏,陈星,向龙,等. 平原河网区水系连通改善水环境效果评估[J]. 水利学报,2017,48(12):1429-1437. (CUI Guangbai, CHEN Xing, XIANG Long, et al. Evaluation of water environment improvement by interconnected river network in plain area[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2017, 48(12):1429-1437. (in Chinese))
- [18] 张涛,陈求稳,易齐涛,等. 太湖流域上游平原河网区水质空间差异与季节变化特征[J]. 湖泊科学,2017,29(6):1300-1311. (ZHANG Tao, CHEN Qiuwen, YI Qitao, et al. Spatial and seasonal variations of water quality in the upstream plain river networks of the Taihu Basin[J]. Journal of Lake Sciences, 2017, 29(6):1300-1311. (in Chinese))
- [19] 杨荣金,王逸卓,李秀红,等. 官厅水库水质评价及时空变化特征[J]. 水资源保护,2021,37(6):135-141. (YANG Rongjin, WANG Yizhuo, LI Xiuhong, et al. Water quality evaluation and spatiotemporal variation characteristics of Guanting Reservoir [J]. Water Resources Protection, 2021, 37(6):135-141. (in Chinese))
- [20] 张怡雅,袁飞,张利敏,等. 南水北调中线工程调水前后汉江中下游干流水质变化特征[J]. 水利水电科技进展,2022,42(3):14-19. (ZHANG Yiya, YUAN Fei, ZHANG Limin, et al. Variation characteristics of water quality in middle and lower reaches of the Hanjiang River before and after Middle Route of South-to-North Water Diversion Project [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2022, 42(3):14-19. (in Chinese))
- [21] 翟淑华,张红举,胡维平,等. 引江济太调水效果评估[J]. 中国水利,2008(1):21-23. (ZHAI Shuhua, ZHANG Hongju, HU Weiping, et al. Evaluation on result of Yangtze-Taihu water diversion [J]. China Water Resources, 2008(1):21-23. (in Chinese))
- (收稿日期:2021-12-02 编辑:熊水斌)

(上接第132页)

- [18] PARVAIZ A T, MAPBOOL B, FAYAZ A L. Seasonal spatio-temporal variability in temperature over North Kashmir Himalayas using Sen slope and Mann-Kendall test[J]. Journal of Climatology & Weather Forecasting, 2021, 9(5):1-12.
- [19] 马良,姜广辉,左长清,等. 江西省50余年来降雨侵蚀力变化的时空分布特征[J]. 农业工程学报,2009,25(10):61-68. (MA Liang, JIANG Guanghui, ZUO Changqing, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of rainfall erosivity changes in Jiangxi Province over more than 50 years[J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(10):61-68. (in Chinese))
- [20] 陈沪生,周玉良,周平,等. 基于小波和ARIMA的黄山市年降水量分析及预测[J]. 南水北调与水利科技,2019,17(5):50-55. (CHEN Husheng, ZHOU Yuliang, ZHOU Ping, et al. Analysis and prediction of annual precipitation in Huangshan City based on wavelet and ARIMA[J]. South-to-North Water Transfers and Water Science & Technology, 2019, 17(5):50-55. (in Chinese))
- [21] 陶佳辉,卞锦宇,敖天其,等. 南水北调东线调水区及受水区降水径流变化特征[J/OL]. 水资源保护:1-16 [2022-01-06]. (TAO Jiahui, BIAN Jinyu, AO Tianqi, et al. Variation characteristics of precipitation and runoff in the water diversion and water-receiving area of the Eastern route of the South-to-North water diversion Project [J/OL]. Water Resources Protection:1-16[2022-01-06]. (in Chinese))
- [22] 徐利岗,周宏飞,梁川,等. 中国北方荒漠区降水多时间尺度变异性研究[J]. 水利学报,2009,40(8):1002-1011. (XU Ligang, ZHOU Hongfei, LIANG Chuang, et al. Multi-time scale variability of precipitation in the desert region of North China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(8):1002-1011. (in Chinese))
- [23] 王家祁,张建云. 中国暴雨统计参数图集[M]. 北京:中国水利水电出版社,2006.
- [24] IPCC. Climate change 2021: the physical science basis [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2021.
- [25] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京:气象出版社,2007.
- [26] GUAN Tiesheng, XU Qin, CHEN Xing, et al. A novel remote sensing method to determine reservoir characteristic curves using high-resolution data [J]. Hydrology Research, 2021, 52(5):1066-1082. (收稿日期:2022-01-17 编辑:王芳)