DOI:10.20040/j.cnki.1000-7709.2025.20240799

南昌市降水结构时空特征及其与大尺度气候的关联机制

刘卫林,胡林浩,张景嵘,郭 强

(南昌工程学院水资源调配与高效利用江西省重点实验室,江西 南昌 330099)

摘要: 为揭示南昌市降水结构时空特征及其与大尺度气候的关联机制,基于南昌市1965~2017年13个降水站点的逐日降水数据,采用线性趋势、滑动t检验、Morlet小波分析、小波相干、反距离插值法对南昌市各级别降水指标进行了时空特征分析,探讨了其与全球大尺度气候指标的相关性。结果表明,南昌市西北、东南地区各等级降水量、降水日数高于其余地区;暴雨、总降水雨量呈增加趋势,中雨呈减少趋势;暴雨雨强呈增加趋势;小雨、中雨降水量与降水日数存在28年周期,大雨、暴雨降水量与降水日数存在18年周期;各等级降水雨强均有明显的28年周期长度;南昌市降水与北大西洋涛动(NAO)、厄尔尼诺暖流(Nino3.4)、南方涛动指数(SOI)、副热带高压脊线及夏季季风指数(SASMI)均存在显著线性关系,其中SOI、Nino3.4及副高脊线在2000年前后对于暴雨等级降水均表现出时滞相干性。研究结果有助于南昌市防汛抗旱,并为适应大尺度气候变化的水资源管理提供了理论依据。

关键词: 南昌市;不同量级降水;时空变化;大尺度气候特征指标

中图分类号: TV125; P426.6 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-7709(2025)04-0040-05

1 引言

受全球变暖的影响,区域性洪涝、干旱等灾害呈广发和频发的趋势[1-2]。降水时空分布不均是引起不同地区洪涝、干旱等灾害的主要原因。开展区域降水结构特征研究,对认识区域气候变化和合理应对洪涝干旱具有重要意义。近年来,针对降水变化特征已进行了诸多研究。如刘卫林等[3]发现赣江流域大雨、暴雨的降水量呈增加趋势;陈蕾等[4]发现1980~2020年黑龙江省降水倾向率有明显上升趋势。此外,季风、太平洋副热带高压和气候涛动对我国大部分地区降水有显著影响;庞轶舒等[5]发现ENSO事件衰减对我国西南地区降水有影响;桓玉等[6]发现华南夏季降水与夏季南亚季风指数呈显著正相关。由于降水在时空上具有高度异质性,因此研究不同区域降水的变化特征和极端降水事件已成为当前全球气候变化研究的重要内容之一。南昌市作为我国长江中游地区重要的中心城市,近年来暴雨洪涝灾害频发。科学评估南昌市降水的时空特征及其与各大尺度气候因子的关联,对防洪抗旱工作具有实际意义。然而现有研究仅限于全年及极端降水的时空特征[7-10],对南昌市降水特征,尤其是各等级降水时空分布特征及其可能影响因子还需进行研究。鉴此,本文选取南昌市1965~2017年的13个降水站点日降水数据对南昌市各级别降水指标进行时空特征分析,探讨了其与全球大尺度气候指标的相关性。研究结果有助于该地区的防汛抗旱工作,并为适应大尺度气候变化的水资源管理提供了理论依据。

2 数据来源及方法

2.1 数据来源

采用的降水数据来源于江西省水文局及水文年鉴。根据中国气象局降水划分标准[11]将降水量划分成小雨、中雨、大雨、暴雨四个等级。同时为了解全球气候变化背景下南昌市降水特征对全球气候变化的响应,选用了北极涛动(AO)、北大

收稿日期: 2024-04-30,**修回日期:** 2024-05-27

基金项目: 国家自然科学基金项目(52069015);江西省优势科技创新团队建设计划项目(20171BCB24012);江西省高层次高技能领军人才培养工程项目

作者简介: 刘卫林(1978-),男,博士、教授,研究方向为水文水资源,E-mail:weilin_liu@nit.edu.cn

中国知网 https://www.cnki.net

西洋涛动(NAO)、太平洋年代际震荡(PDO)、厄尔尼诺暖流(Nino3.4)、热带印度洋偶极子(IOD)、南方涛动指数(SOI)、西太平洋型遥相关(WP)、东大西洋遥相关型(EA)、副热带高压指数及夏季季风指数。以上数据来源于美国大气海洋局(NOAA)(https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/)。

2.2　研究方法

2.2.1　线性趋势分析法

通过建立一元线性回归方程来研究降水长序列变化趋势:

$$y = A + Bx_i \quad i = 1,2,\cdots,n \tag{1}$$

式中,x_i 为对应时间序列;A 为回归常数;B 为回归系数。

2.2.2　滑动 t 检验法

滑动 t 检验是用来考察两组样本均值的差异是否显著来检验突变[12]。两组样本数据的均值差异超过了一定的显著性水平,即认为该值有突变产生。

2.2.3　Morlet 小波分析法

Morlet 小波分析是通过增减伸缩尺度的大小,从而获取信号的低频或高频信息,进而了解周期变化信息,并采用小波方差判断各序列主周期。小波变换定义及小波方差定义为:

$$W_f(a,b) = |a|^{-\frac{1}{2}} \Delta t \sum_{k=1}^{N} f(k\Delta t)\varphi\left(\frac{k\Delta t - b}{a}\right) \tag{2}$$

$$\mathrm{Var}(a) = \int_{-\infty}^{\infty} |W_f(a,b)|^2 \mathrm{d}b \tag{3}$$

式中,$W_f(a,b)$ 为小波变换系数;a 为时间尺度;b 为时间因子;$k=1,2,\cdots,n$,Δt 为取样时间间隔。

2.2.4　小波相干分析法(WTC)

交叉小波功率谱可以揭示这些序列共同的高能量值区域及其位置相关性[13]。而小波相干谱则可用来度量时频空间中两个时间序列在对应交叉小波功率谱低能量值区的局部相关密切程度[14]。设时间序列 x_i 为降水要素,y_i 为气候因子,$W_X(s)$、$W_Y(s)$ 分别为给定序列 x_i、y_i 的连续小波变换,则其交叉小波功率谱定义为:

$$W_n^{XY}(s) = W_n^X(s) W_n^{Y*}(s) \tag{4}$$

式中,$W_n^{Y*}(s)$ 为 $W_n^Y(s)$ 的复共轭;s 为伸缩尺度。

定义两个时间序列的小波相干谱 $R_n^2(s)$ 为:

$$R_n^2(s) = \frac{|S(s^{-1}W_n^{XY}(s))|^2}{S(s^{-1}|W_n^X(s)|^2) \cdot S(s^{-1}|W_n^Y(s)|^2)} \tag{5}$$

式中,S 为平滑算子;$|W_n^X(s)|$、$|W_n^Y(s)|$ 分别为对应的交叉小波功率谱密度。

3　结果与分析

3.1　南昌市各等级降水指标线性趋势分析

对南昌市 1965～2017 年各等级降水趋势进行分析,结果见表 1。由表 1 可知,暴雨和总降水量分别呈 7.8、4.9 mm/10a 的增加趋势,小雨、中雨、大雨量分别呈 0.2、2.5、0.2 mm/10a 的减少趋势。小雨、中雨、大雨和总降水强度变化较稳定,而暴雨强度呈 0.16(mm/d)/10a 的增加趋势。相对于降水量及降水强度,南昌市降水日数总体变化较为稳定。图 1 为贡献率变化趋势图,从降水量指标来看,暴雨呈 0.48%/10a 的增加趋势,中雨呈 0.32%/10a 的减少趋势,其中小雨、中雨、大雨、暴雨多年平均降水量贡献率分别为 18.23%、29.56%、29.27%、22.94%,从雨量贡献率来看,中雨及其以上强度降水量贡献率较大。对于降水日数,大雨、暴雨呈 0.02%/10a、0.09%/10a 的增加趋势,小雨、中雨呈 0.03%/10a、0.08%/10a 的减少趋势,从雨日贡献率来看,小雨日数贡献率最大,占全年总降水日数一半以上。综上所述,研究区域表现出暴雨总降水增加,小雨、中雨、大雨减少,该降水变化特征与刘卫林等[3]研究一致。

3.2　南昌市各等级降水指标突变分析

图 2(a)为各等级降水量滑动 t 检验图。由图 2(a)可知,1975～1985 年相对于 1985～1995 年为多雨期;1985～1995 年中雨及以上强度等级降水量呈现由多转少的变化,其中大雨雨量于 1990 年超过 0.05 的显著性检验且为负值,说明出现由多转少的明显突变;1985～1995 年相对于 1995～2005 年为少雨期,其中大雨和总降水于 1999 年出现由少转多的明显突变。各等级降水强度滑动

表 1　南昌市各等级降水线性方程变化趋势

Tab. 1　Variation trend of linear equation of precipitation of different grades in Nanchang City

指标	降水量回归方程	降水强度回归方程	降水日数回归方程	日数/d
小雨	$y=-0.019\,1x+317.4$	$y=0.000\,3x+2.680\,7$	$y=-0.011\,6x+106.1$	83
中雨	$y=-0.249\,3x+955.67$	$y=-0.004\,1x+24.144$	$y=-0.008\,1x+44.856$	29
大雨	$y=-0.019\,9x+498.38$	$y=-0.002\,8x+40.008$	$y=0.000\,6x+12.139$	13
暴雨	$y=0.779\,3x-1\,179.2$	$y=0.016\,6x+39.59$	$y=0.010\,4x-15.617$	5
总降水	$y=0.490\,9x+592.23$	$y=0.005\,5x+1.177\,9$	$y=-0.008\,8x+147.48$	130

中国知网　https://www.cnki.net

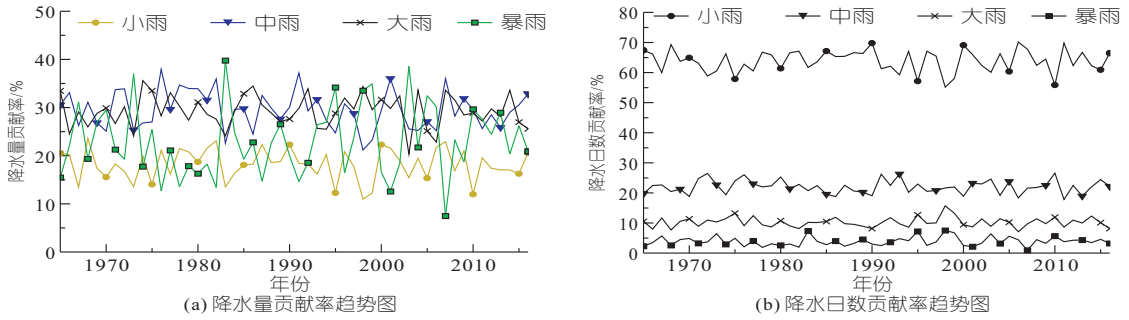


图 1 南昌市各等级降水量、降水日数对总降水贡献率变化趋势图

Fig. 1 Variation trend of contribution rate of precipitation and precipitation days to total precipitation in Nanchang City

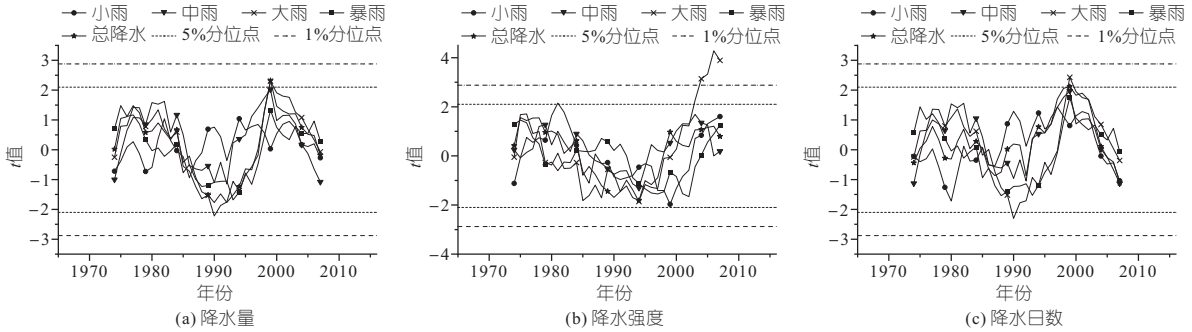


图 2 南昌市各等级降水量突变检验

Fig. 2 Mutation test of precipitation at different levels in Nanchang City

t 检验图(图 2(b))显示,1985 年后各项降水指标 t 值开始由正转负,表现为 1975～1985 年降水强度相对于 1985～1995 年更强;2005 年后 t 值由负转正,说明 2005 年后降水强度逐步增强。其中小雨雨强于 1981 年经历了由弱转强的显著突变,大雨雨强于 2003 年开始出现由弱转强的极显著性突变。根据各等级降水日数滑动 t 检验图(图 2 c)可知,大雨雨日于 1990、1999 年超过 0.05 的显著性检验,总降水于 1999 年超过 0.05 的显著性检验,这与降水量的突变时间相吻合。其中,大雨雨日 1990 年为负值,说明该年大雨雨日经历由多转少的显著突变,1999 年经历由少转多的显著突变;总降水日数于 1999 年经历由少转多的显著突变。该结果与熊丝等[7]研究基本吻合,说明本文采用 13 个水文站点更具可靠性。

3.3 南昌市各等级降水指标周期分析

利用小波分析法对南昌市各等级降水进行分析,得到小波方差曲线图(图 3)。结合南昌市各等级降水量小波方差曲线(图 3(a))可看出,小雨在 28 年时间尺度存在较明显的周期震荡,大雨、暴雨和总降水在 18 年周期尺度上有明显的周期震荡。从南昌市各等级降水强度小波方差图(图 3(b))可看出,各等级降水均存在以 28 年时间尺度为主的周期变化;除此之外,小雨雨强还存在较明显的 22 年周期尺度,总降水强度还具有较明显的 18 年周期尺度。从南昌市各等级降水日数小波方差图(图 3(c))可看出,小雨和总降水在 28 年时间尺度上存在周期震荡,大雨和暴雨日数具有 18 年周期尺度。研究结果与文献[7-8]研究结果基本相同。

3.4 南昌市各等级降水指标空间分布特征

由南昌市各等级降水空间分布特征可知,南昌市总降水量在空间上呈现西北、东南多的分布特征;大雨、暴雨的空间分布特征与总降水量吻合;小雨的降雨量分布呈现西北多、西南少的分布特征;中雨的降雨量分布呈现中间少、东南多的特点。南昌市总降水降水强度在空间上呈现东南部大的分布特征;小雨降水强度的空间分布呈现东部大、西北部小的分布特征;中雨降水强度在空间上呈现东北、东南部大,中部小的分布特征;大雨降水强度在空间上呈现中部大于其余地区的分布特征;暴雨降水强度在空间上呈现西北部多、东部少的分布特征。南昌市总降水日数在空间上呈现西北、东南多,西南少的分布特征;小雨降水日数的空间分布与总降水分布吻合;中雨降水日数在空间上呈现东南多,中部少的分布特征;总降水日数分布特征主要取决于小雨日数,以进贤县三阳站为例,该地平均每年有 5 d 的暴雨日数,暴雨日数较多,然而由于其小雨日数较少,因此总降水日数偏低,为 119 d。

中国知网 https://www.cnki.net

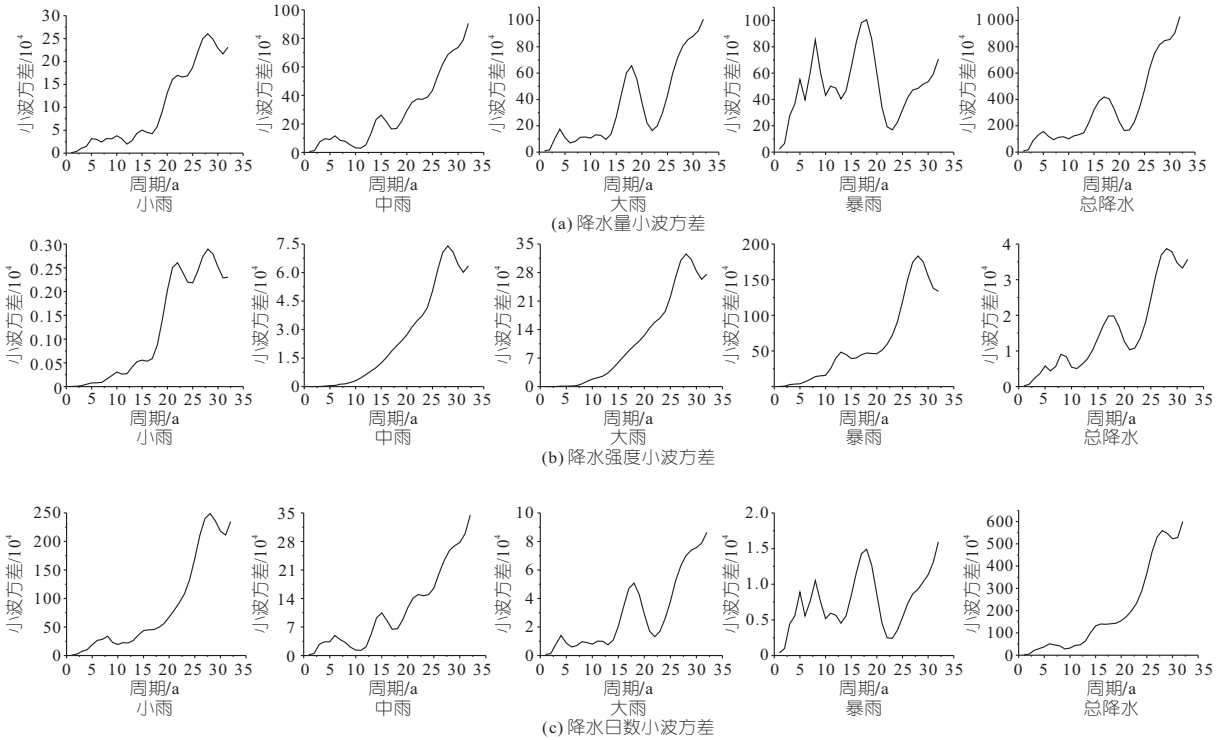


图 3　南昌市各等级降水要素小波方差图

Fig. 3　Wavelet square difference of precipitation days of different grades in Nanchang City

3.5　南昌市各等级降水指标与大尺度气候特征指标相关性分析

图 4 为南昌市各降水指标与 15 项大尺度气候指标相关系数图(图 4 中仅显示通过 95%显著性水平检验的数据。)。由图 4 可知,AO、NAO、IOD、Nino3.4、SOI、WP、SASMI 及副高脊线与南昌市各降水指标呈显著相关,表现为北大西洋气压偏高导致小雨雨量、中雨雨量和雨日、总降水雨日增加;在厄尔尼诺事件发生的情况下,暴雨等级的雨日、雨强、雨量及总降水雨强可能会增加,导致南昌市降水更丰沛,更易发生洪涝灾害;副高脊线位置经度偏大可能导致暴雨雨量、雨日、雨强及总降水雨量、雨强指标降低;季风指数(SASMI)增强可能会导致中雨、暴雨、总降水雨量减少及小雨、中雨、总降水雨日减少。

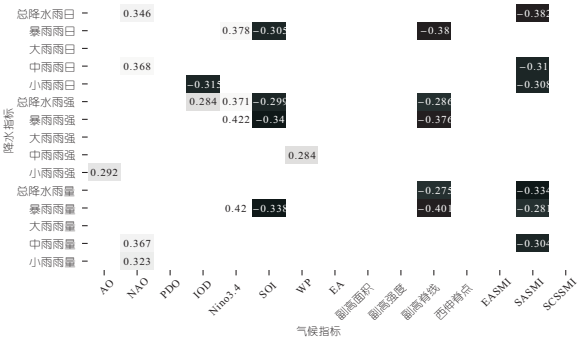


图 4　南昌市降水指标与气候指标相关系数

Fig. 4　Correlation coefficient between precipitation indices and large-scale climate factors in Nanchang City

为进一步分析各等级降水要素与存在显著相关性的大尺度气候因子在时频域内的共振周期及相互之间的相干性,对其进行交叉小波相干分析。结果表明,NAO 与中雨雨量和雨日在 9～12 年的周期尺度上呈正相关,NAO 延后约 1/8 个周期;NAO 与小雨雨量在 6 年尺度上呈负相关;NAO 与中雨雨量、中雨雨日在 4～6 年的共振周期上提前约 1/4 周期,即 1～1.5 年;NAO 与中雨雨量、中雨雨日、总降水雨日在 2000 年代初呈正相关。1970 年代 SOI 与暴雨雨量、暴雨雨日、总降水雨强在 0～4 年的共振周期上提前约 1/4 周期,同时在 2000 年前后存在 4～6 年的共振周期,呈现负相关关系;SOI 与暴雨雨强在 1978～2010 年存在 4～5 年的显著共振周期,表现为 SOI 相对滞后约 3/8 周期。Nino3.4 与暴雨雨量、暴雨雨日、总降水雨强,在 1985～2005 年存在 4～8 年的共振周期,呈正相关关系,约提前 1/8 个周期,同时在 1970 年代存在 0～2 年的共振周期,箭头指向上表现为 Nino3.4 延后约 1/4 个周期。副高脊线与暴雨雨量、暴雨雨强、暴雨雨日、总降水雨量、总降水雨强,在 1990 年代前后存在 4～8 年的共振周期且呈现负相关关系,表现为副高脊线滞后约 3/8 个周期。SASMI 与暴雨雨量在 1990～2005 年存在 5～8 年的共振周期;SASMI 与暴雨雨量,总降水的雨量与雨日在 1970～1980 年之间存在 0～4 年的共振周期,提前约 3/8 个周期。

中国知网　https://www.cnki.net

4 结论

a. 暴雨、总降水等级降水量呈增加趋势，中雨呈减少趋势，降水量以中雨及以上等级降雨量贡献为主；暴雨雨强呈增加趋势；各等级降水日数变化较为稳定。各等级降水指标主要以 28 年作为第一主周期。南昌市各等级降水量、降水日数西北、东南部地区高于其余地区。

b. 南昌市降水与 NAO、Nino3.4 呈显著正相关，与 SOI、SASMI 及副高脊线呈显著负相关。五种存在显著相关的大气环流指数在 2000 年左右大都表现出 4～6 年的共振周期。

c. 大尺度气象要素的动力影响机理及其对水循环的作用机理尚不清楚，仍需进一步研究。

参考文献：

[1] 李峰平，章光新，董李勤. 气候变化对水循环与水资源的影响研究综述[J]. 地理科学，2013，23(4)：457-464.

[2] 张强，姚玉璧，李耀辉，等. 中国干旱事件成因和变化规律的研究进展与展望[J]. 气象学报，2020，18(3)：500-521.

[3] 刘卫林，吴滨，李香，等. 赣江流域不同等级降水变化特征及其与大尺度气候相关性研究[J]. 长江流域资源与环境，2022，31(3)：659-672.

[4] 陈蕾，戴长雷，于成刚，等. 1980～2020 年黑龙江省降水量时空变化特征[J]. 水电能源科学，2023，41(4)：5-8.

[5] 庞轶舒，秦宁生，王春学，等. ENSO 事件的季节演变对西南夏季降水异常的影响分析[J]. 高原气象，2020，39(3)：581-593.

[6] 桓玉，李跃清. 夏季东亚季风和南亚季风协同作用与我国南方夏季降水异常的关系[J]. 高原气象，2018，37(6)：1563-1577.

[7] 熊丝，陆宝宏，程增辉，等. 南昌市主要气候要素变化特征及其预测[J]. 水电能源科学，2017，35(3)：15-19，39.

[8] 贺志明，邓诗茹，吴琼，等. 1963—2012 年南昌市气温和降水变化分析[J]. 气象与环境学报，2018，34(2)：35-43.

[9] 万一帆，刘卫林，刘丽娜，等. 南昌市城市化进程对极端降水的影响[J]. 水力发电，2020，46(8)：27-31.

[10] 汪红洲，陈鋆. 近 50 年南昌市城郊年降水量变化趋势分析[J]. 中国水运(下半月)，2015，15(6)：110-113，135.

[11] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 降水量等级：GB/T 28592-2012[S]. 2012.

[12] 魏风英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京：气象出版社，2007.

[13] 黄珊珊，董前进. 长江流域上中下游基流演变规律及与降水量关联分析[J]. 水电能源科学，2022，40(7)：10-13.

[14] 张菁，张珂，王晟，等. 陕甘宁三河源区 1971-2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版)，2021，49(3)：288-294.

Spatio-temporal Characteristics of Precipitation Structure in Nanchang City and Its Correlation with Large-scale Climate Indices

LIU Wei-lin，HU Lin-hao，ZHANG Jing-rong，GUO Qiang

(Jiangxi Provincial Key Laboratory of Water Resources Allocation and Effcient Utilization，Nanchang Institute of Technology，Nanchang 330099，China)

Abstract：To investigate the spatiotemporal characteristics of precipitation structure in Nanchang and its association with large-scale climate，based on the daily precipitation data from 13 precipitation stations in Nanchang during 1965-2017，the linear trend，sliding t-test，Morlet wavelet analysis，wavelet coherence and inverse distance interpolation were used to analyze the temporal-spatial characteristics of precipitation indexes in Nanchang City were analyzed. The correlation between various precipitation indicators and large-scale climate indices were explored. The results indicate that the precipitation and number of precipitation days at various levels in the northwest and southeast regions of Nanchang City were higher than those in other areas. There was an increasing trend in heavy rainfall and total precipitation，while moderate rainfall showed a decreasing trend，and heavy rainfall intensity exhibited an increasing trend. Additionally，there were 28-year cycles in the precipitation amount and number of precipitation days for light and moderate rainfall，and 18-year cycles for heavy and extreme rainfall. The precipitation intensity at each level exhibited significant 28-year cycle. There was a significant linear relationship between precipitation and North Atlantic Oscillation (NAO)，El Nino Warm Current (Nino3.4)，Southern Oscillation Index (SOI)，subtropical high ridge line and summer monsoon index (SASMI)，among which SOI，Nino3.4 and subtropical high ridge line showed time lag coherence with heavy rainfall around 2000. The research results are helpful for flood control and drought relief in Nanchang City，and provide theoretical basis for water resources management to adapt to large-scale climate change.

Key words：Nanchang City；precipitation of different magnitude；spatial and temporal distribution；large-scale climate indicators

中国知网 https://www.cnki.net