DOI:10.12170/20210722001
刘玄, 唐培军, 吴同帅, 等. 山东省极端气候指数变化特征研究 [J]. 水利水运工程学报, 2022(2): 40-50. (LIU Xuan, TANG Peijun, WU Tongshuai, et al. Study on the characteristics of extreme climate indices in Shandong Province[J]. Hydro-Science and Engineering, 2022(2): 40-50. (in Chinese))

山东省极端气候指数变化特征研究

刘 玄[1], 唐培军[2], 吴同帅[1], 冯忠伦[1], 刁艳芳[1], 王 刚[1]
(1. 山东农业大学 水利土木工程学院, 山东 泰安 271000; 2. 潍坊市水文中心, 山东 潍坊 261031)

摘要: 为探究山东省极端气候指数的时空变化与特征, 选取山东省 1979—2020 年 95 个气象站点的逐日气温和降水量实测数据, 采用 Mann-Kendall(M-K)检验方法和 Sen 斜率估计法计算时间变化特征, 及 Inverse Distance Weight(IDW)反距离权重法探究空间变化趋势。结果表明: (1)山东省境内低温极端气温指数(TN10p 和 FD0)呈下降趋势, 下降速率分别为 0.004 8 和 6.42 d/(10 a), 高温极端气温指数(TX90p、TXx 和 SU25)呈上升趋势, 上升速率分别为 4.06 d/(10 a)、0.32 ℃/(10 a)和 2.31 d/(10 a); 其内陆区域和沿海区域极端气温指数表现出了与山东省整体较好的一致性, 空间趋势不明显。(2)极端降水指数均呈上升趋势, 沿海区域多大于内陆区域。降水强度指数(R95p、R99p 和 RX5day)呈显著增加趋势, 增加速率分别为 22.16、10.83 和 10.55 mm/(10 a), 空间分布上, 高值区域多分布在东部沿海区域和南部部分区域, 可能会增加洪涝灾害风险。

关 键 词: 极端气温; 极端降水; 极端气候指数; 时空变化
中图分类号: P333; TV822.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-640X(2022)02-0040-11

《中国气候变化蓝皮书(2020)》指出, 全球气候变暖趋势仍在持续, 自 20 世纪 80 年代以来, 每个连续 10 年都比前一个 10 年更暖。2019 年, 全球表面平均温度高出工业化前平均水平 1.1 ℃, 为有完整气象记录以来的第二暖年份[1]。全球气候的变暖可能会增加极端气候事件的发生频率和强度, 带来高气象灾害风险, 导致生存危机的加剧[2]。据世界气象组织(WMO)报告, 在 21 世纪初, 全球有超过 37 万人在极端气候事件中丧生[3]。

极端气候的变化引起了国内外学者广泛关注。Lucas 等[4] 研究了巴西欣古河流域 22 个极端气候指数, 发现极端气温指数呈明显上升趋势, 极端降水指数统计意义较小。Plummer 等[5] 研究表明, 自 1961 年以来, 强降水事件在澳大利亚部分区域呈不显著增加趋势。Ruml 等[6] 利用 Mann-Kendall 检验和线性回归法, 发现塞尔维亚自 1980 以来, 有明显的、空间均匀的显著变暖趋势。我国是全球气候变化的敏感区和影响显著区, 对极端气候的研究相对较多。赵翠平等[7] 研究了黄河流域极端降水指数的时空变化, 发现极端降水指数变化趋势不明显, 存在着时空差异。王琼等[8] 选取长江流域 16 个极端气温指数, 对长江流域极端气温事件进行了分析, 发现冷指数变暖幅度要大于暖指数。王怀军等[9] 对淮河流域极端气候事件的非平稳特征进行了研究, 发现低温极值大体呈现非平稳变化特征, 1 日最大降水量(Rx1day)和超门限降水(Pregpd)则表现为平稳性。黄强等[10] 分析了珠江流域极端气候指数时空变化趋势, 发现区域极端高温事件呈增加趋势, 极端低温事件呈减少趋势, 且极端气温事件变化趋势具有区域尺度上的一致性。在省级尺度上, 曹祥会等[11] 和刘学智等[12] 分别对河北极端气候指数时空变化特征和宁夏极端气温变化特征进行了研究, 发现了整体变暖的趋势, 这与我国其他地区高度吻合[13]。上述不同尺度上极端气候指数研究表明, 极端气温和降水

收稿日期: 2021-07-22
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41202174); 山东省自然科学基金资助项目(ZR202102220203); 山东省重点研发计划项目(2019GSF111043)
作者简介: 刘 玄(1997—), 男, 河南周口人, 硕士研究生, 主要从事水文及水资源相关研究。
E-mail: 2906138762@qq.com 通信作者: 王 刚(E-mail: gwang@sdau.edu.cn)

事件多呈增加趋势, 且存在空间变化性。

山东省位于我国黄河下游的东部区, 地理坐标为东经 114°47.5′~122°42.3′, 北纬 34°22.9′~38°24.01′(图 1), 既有内陆区又有沿海区。气候上属温带大陆性气候, 雨热同季, 降水主要集中在每年的 6—9 月份, 夏季易形成洪涝灾害, 冬、春及晚秋易发生旱灾。极端气候灾害(干旱、洪涝等)多发, 造成了严重的损失[14]。在已有的山东省极端气候研究中, 多数研究集中在单一降水指数[15] 或气温指数方面[16-17], 而对极端气温和降水指数的综合同步分析研究相对较少。探究二者在境内及内陆与沿海区的时空分布特征和差异性, 及其与极端气候事件发生之间的关系和可能带来的灾害风险具有重要的意义, 以期为山东省极端气候灾害防范提供参考和依据。

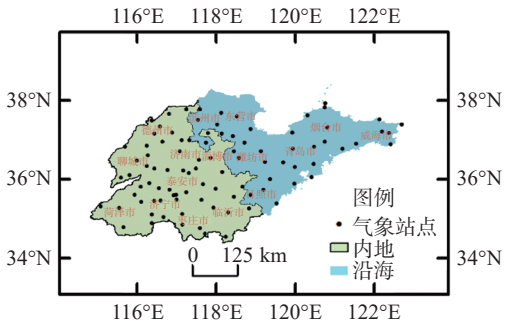

图 1　研究区气象站点和沿海内陆分布

Fig. 1　Distribution map of meteorological stations in coastal and inland areas under study

1　数据来源与研究方法

研究数据主要来源于国家气象科学数据中心和山东省气象局, 数据采集频次为逐小时。根据各测站原始数据采集及实际情况, 选取 1979—2020 年山东省境内 95 个气象站点(图 1)的日最高、最低气温和日降水量数据。对各站点数据进行严格的质量控制, 通过相邻站点间的数据记录进行比对分析, 逐项逐个检查, 剔除明显错误数据(如降水量为负值)、明显偏离本地区实际情况(即超出 3 倍标准差的值), 以确保数据的准确性。同时, 对采用的降水量数据通过差积曲线分析方法进行了“代表性”审查。

根据气候变化检测和指数专家组(Expert Team on Climate Change Detection and Indices, ETCCDI)定义的极端气候指数, 本文选取 8 个极端气温指数和 8 个极端降水指数(表 1)16 个极端气候指数进行分析计算。极端气候指数采用世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)推荐的 RclimDex1.0 计算程序进行计算。

表 1　极端气候指数的定义

Tab. 1　Definition of extreme climate indices

指数代码	指数名称	指　数　定　义	单位
TN10p	冷夜日数	日最低气温<10%分位值的日数	d
TX90p	暖昼日数	日最高气温>90%分位值的日数	d
TNn	日最低气温的极低值	月内日最低气温的最小值	℃
TXx	日最高气温的极高值	月内日最高气温的最大值	℃
SU25	夏日日数	年内日最高气温>25 ℃的日数	d
FD0	霜日日数	年内日最低气温<0 ℃的日数	d
DTR	气温日较差	年内日最高气温与日最低气温的差值	℃
GSL	生长季长度	日平均气温首先出现至少连续6日高于5 ℃, 以及首先出现在7月1日后(北半球)日平均气温至少连续6日低于5 ℃的总日数	d
CDD	持续干燥日数	日降水量<1 mm的最长连续日数	d
CWD	持续湿润日数	日降水量≥1 mm的最长连续日数	d
R20	大雨日数	每年日降水量≥20mm的总日数	d
R25	暴雨日数	每年日降水量≥25mm的总日数	d
R95p	强降水量	每年日降水量大于第95%分位值的降水量之和	mm
R99p	极强降水量	每年日降水量大于第99%分位值的降水量之和	mm
RX5day	连续5日最大降水量	每月连续5日最大降水量	mm
PRCPTOT	雨日降水总量	雨日(日降水量≥1mm)降水总量	mm

采用 Sen 斜率估计方法计算变化趋势，以及 Mann-Kendall(M-K)方法对指数的显著性进行检验。Sen 斜率估计是一种稳健的非参数统计趋势的计算方法，常用于长时间序列数据的趋势分析中，M-K 方法属于非参数检验方法，不需要样本遵从一定的分布，受异常值干扰较小，在水文、气象趋势变化相关研究中得到了大量成功应用[18-20]。M-K 方法中 Z 统计量用以显著性判别，若 $|Z|<1.96$，则指数呈弱显著变化趋势；$1.96\leqslant|Z|<2.56$，呈显著变化趋势(0.05 显著性水平)；$2.56\leqslant|Z|$，呈极显著变化趋势(0.01 显著性水平)。采用反距离权重法(IDW)进行空间插值，探究极端气候指数的空间变化趋势。

2 极端气温指数变化特征

2.1 时间变化特征

根据上述计算方法，表 2 给出了 8 个极端气温指数 M-K 检验统计结果。从表 2 可见：表征低温的极端气候指数霜日日数指数(FD0)和冷夜日数指数(TN10p)呈现下降趋势，FD0 下降速率最大，为 6.42 d/(10 a)，TN10p 下降速率最小，为 0.004 8 d/(10 a)，日最低气温的极低值指数(TNn)呈现出 0.72 ℃/(10 a)的上升趋势，只有 TN10p(Z=−0.04)没有通过显著性检验。极端高温指数暖昼日数指数(TX90p)、日最高气温的极高值指数(TXx)和夏日日数指数(SU25)呈现上升趋势，分别为 4.06 d/(10 a)、0.32 ℃/(10 a)和 2.31 d/(10 a)，只有 TX90p(Z=4.10)通过了显著性检验。气温日较差指数(DTR)(Z=−4.89)呈现出显著减小趋势，下降速率较小，为−0.35 ℃/(10 a)。生长季长度指数(GSL)(Z=2.52)呈现出显著的上升趋势，且上升速率最大，为 4.83 d/(10 a)。

表 2 极端气温指数 M-K 检验统计

Tab. 2 M-K test statistics of extreme temperature indices

指数	内陆区域		沿海区域		山东省	
	Z值	Sen斜率	Z值	Sen斜率	Z值	Sen斜率
TN10p	0.640 1	0.203 1	−1.566 4	−0.486 2	−0.041 0	−0.004 8
TX90p	4.126 9	4.027 0	3.936 3	4.076 1	4.099 5	4.058 1
TNn	2.029 7	0.602 4	2.547 3	0.835 6	2.383 5	0.723 2
TXx	1.294 1	0.239 8	1.962 0	0.403 6	1.756 9	0.315 8
SU25	1.225 4	2.043 5	1.988 9	3.111 0	1.471 1	2.306 3
FD0	−3.868 0	−6.455 0	−4.004 1	−6.308 5	−3.923 0	−6.423 8
DTR	−4.291 1	−0.319 0	−5.436 5	−0.392 1	−4.888 9	−0.346 3
GSL	2.492 3	5.108 5	2.206 1	4.734 5	2.520 0	4.832 1

空间分布上，内陆区和沿海区变化趋势上与山东省整体表现出较好的一致性，只有内陆区 TN10p 呈现相反的趋势。变化速率方面，表征高温的极端气候指数在内陆区域小于沿海区域；表征低温的极端气候指数除了 TN10p 外，与极端高温指数一致；DTR 和 GSL 在内陆区域大于沿海区域。在显著性方面，山东省 Z 值多介于沿海和内陆之间，只有 GSL(Z=2.52)大于两个区域。内陆区、沿海区和山东省具有较好的一致显著性，只有沿海区的极端高温指数 TXx(Z=1.96)和 SU25(Z=1.99)与山东省不一致，表现出显著变化趋势。

2.2 空间变化特征

图 2 给出了 8 个极端气温指数空间变化趋势(显著表示通过 0.05 的显著性水平检验)。可见，各极端气温指数空间差异较大，具有明显的空间异质性。极端低温指数中，TN10p 均值等值线为−0.29 d/(10 a)，大于等值线的区域主要分布在西部大部分和东部沿海局部及南部部分区域，高值中心聚集在威海市、临沂市和

济南市; TNn 空间变化呈现自南向北逐渐上升的趋势, 变化幅度为−0.03~2.12 ℃/(10 a), 高值中心在枣庄市和滨州市; FD0 没有明显的空间变化性, 变化幅度为−13.13~3.98 d/(10 a), 均值−6.28 d/(10 a)最低, 88.42% 的站点呈显著下降趋势, 高值中心主要在威海市。极端高温指数中, TX90p 表现出与 TNn 相反的分布特征, 所有站点都呈显著上升趋势; TXx 与 SU25 均值为正, 变化速率分别为−0.15~0.86 ℃/(10 a)和−1.28 ~ 6.27 d/(10 a), 下降站点比例分别为 5.26% 和 2.11%, TXx 高值中心在日照市和青岛部分区域, SU25 高值中心在青岛部分区域和威海部分区域。DTR 高值中心在威海南部区域, 86.31% 的气象站点呈显著下降趋势。GSL 呈现从中部向东西两端递减的趋势, 高值中心零星分布在滨州市、潍坊市和枣庄市。

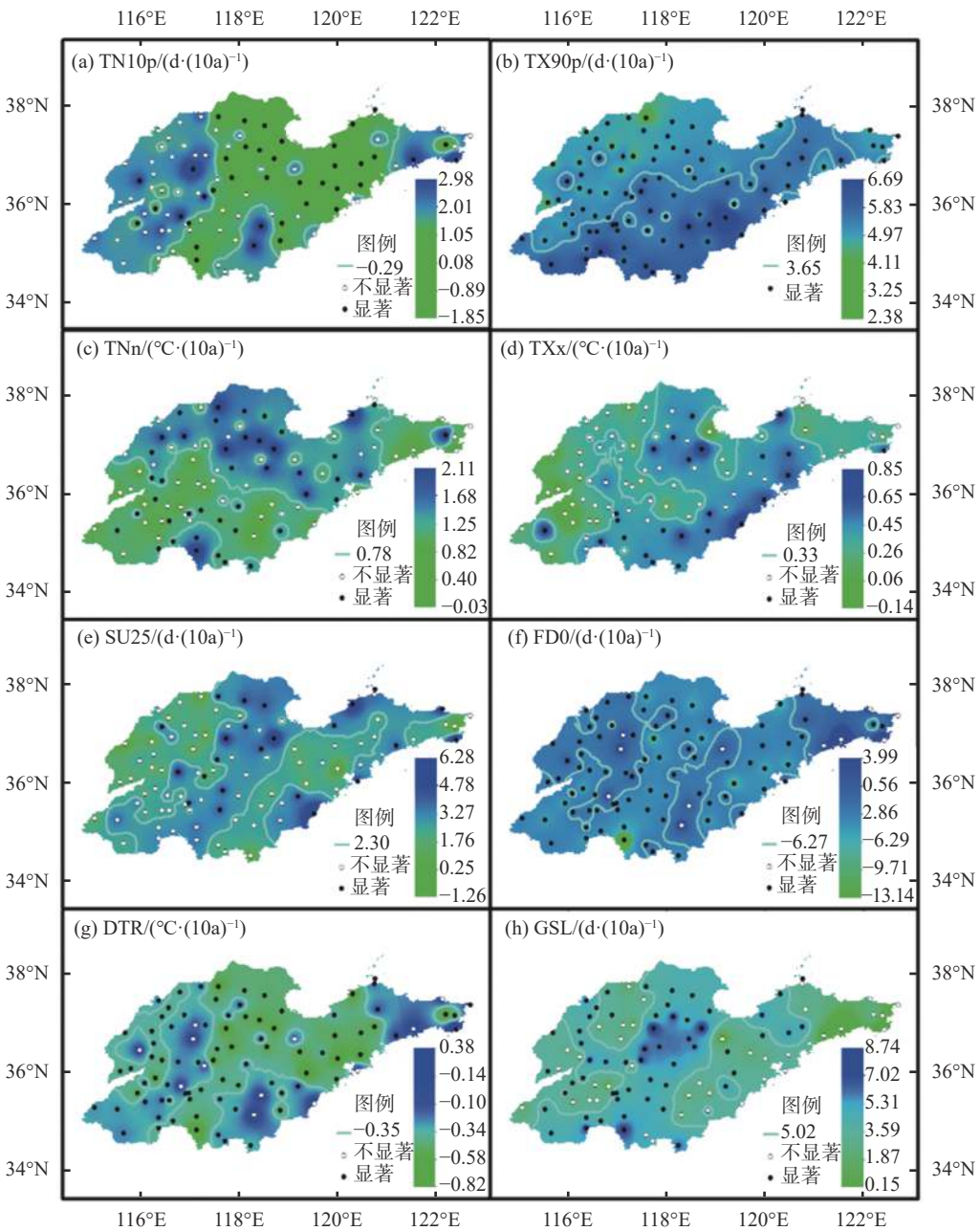

图 2　极端气温指数空间分布

Fig. 2　Spatial distribution of extreme temperature indices

3 极端降水指数变化特征

3.1 时间变化特征

表 3 为研究区 8 个极端降水指数 M-K 检验统计结果。从表 3 可以看出: 极端降水指数均呈上升趋势, 不同于极端气温指数。持续湿润日数指数(CWD)、大雨日数指数(R20)和暴雨日数指数(R25)上升速率较小, 分别为 0.12、0.42 和 0.37 d/(10 a); 持续干燥日数指数(CDD)上升速率是 CWD 的 11.9 倍, 这表明山东省干燥日数增加较快, 这可能会增加干旱灾害风险。极强降水量指数(R99p)和连续 5 日最大降水量指数(RX5day)上升速率较大, 分别为 10.83 和 10.55 mm/(10 a)。强降水量指数(R95p)上升速率是 R99p 的 2.05 倍, 为 22.16 mm/(10 a)。雨日降水总量指数(PRCPTOT)上升速率最大, 为 26.49 mm/(10 a)。只有 R95p(Z=2.11)、R99p(Z=2.40)和 RX5day(Z=2.98)通过了 0.05 的显著性检验, 这表明山东省整体降水强度有显著增加的趋势, 且数值较大, 有短时强降水的风险。

表 3 极端降水指数 M-K 检验统计

Tab. 3 M-K test statistics of extreme precipitation indices

指数	内陆区域		沿海区域		山东省	
	Z值	Sen斜率	Z值	Sen斜率	Z值	Sen斜率
CDD	0.5579	1.1341	1.1567	1.9824	0.7910	1.4175
CWD	1.2245	0.1193	1.5129	0.1112	1.3215	0.1189
R20	1.0476	0.3889	1.5810	0.5658	1.3445	0.4221
R25	1.1715	0.3556	1.3758	0.4469	1.2656	0.3735
R95p	1.2390	15.8138	2.4640	28.0128	2.1121	22.1634
R99p	1.5120	10.3211	2.4103	14.3521	2.4005	10.8345
RX5day	1.8923	8.3546	2.8459	12.7231	2.9821	10.5524
PRCPTOT	0.9681	19.1329	1.7671	34.6435	1.2688	26.4875

内陆区域和沿海区域在变化趋势上与山东省没有差异。在变化速率大小方面, 除了 CWD, 其余指数在内陆区域均小于沿海区域, 山东省介于两者之间, CDD 在沿海区域是内陆区域的 1.92 倍, 为各指数间的最大倍率。在显著性方面, 极端降水指数所有 Z 值都为正, 具有上升的变化趋势, 与 Sen 斜率估计趋势一致。内陆区域 Z 值均小于沿海区域, 山东省除了 RX5day(Z=2.98)大于两个区域外, 都介于两者之间。只有内陆区域 R95p(Z=1.24)、R99p(Z=1.51)和 RX5day(Z=1.89)表现出了显著性差异, 未通过 0.05 的显著性检验。

3.2 空间变化特性

图 3 给出了 8 个极端降水指数空间变化趋势, 可见各极端降水指数空间分布差异较大, 其均值均为正, 但部分站点呈减小趋势(显著表示通过 0.05 的显著性水平检验)。CDD 大致呈现自东南到西北逐渐减小的趋势, 中部地区有一条明显较长的均值等值线, 高值中心在烟台市、日照市、临沂市和德州市。CWD 变化幅度最小, 为−0.24~0.51 d/(10 a), 高值中心在德州市、日照市和威海市。R20 变化趋势类似 CDD, 变化幅度较小, 为−0.30~1.24 d/(10 a), 92.63% 的站点呈上升趋势, 但只有 5.26% 的站点显著上升。R25 无明显空间变化趋势, 高值中心在烟台市、青岛市、日照市和济宁市, 呈零星分布状态。R95p、R99p 和 RX5day 具有类似的空间分布, 东部沿海局部、西南局部和北部小范围区域为高值区域, 上升站点比例分别为: 84.21%、74.74% 和 85.26%, 显著上升站点比例分别为 8.42%、6.32% 和 14.74%。PRCPTOT 高值区域在东部沿海、西北部分区域和南部局部区域, 高值中心在威海北部和青岛西南部。

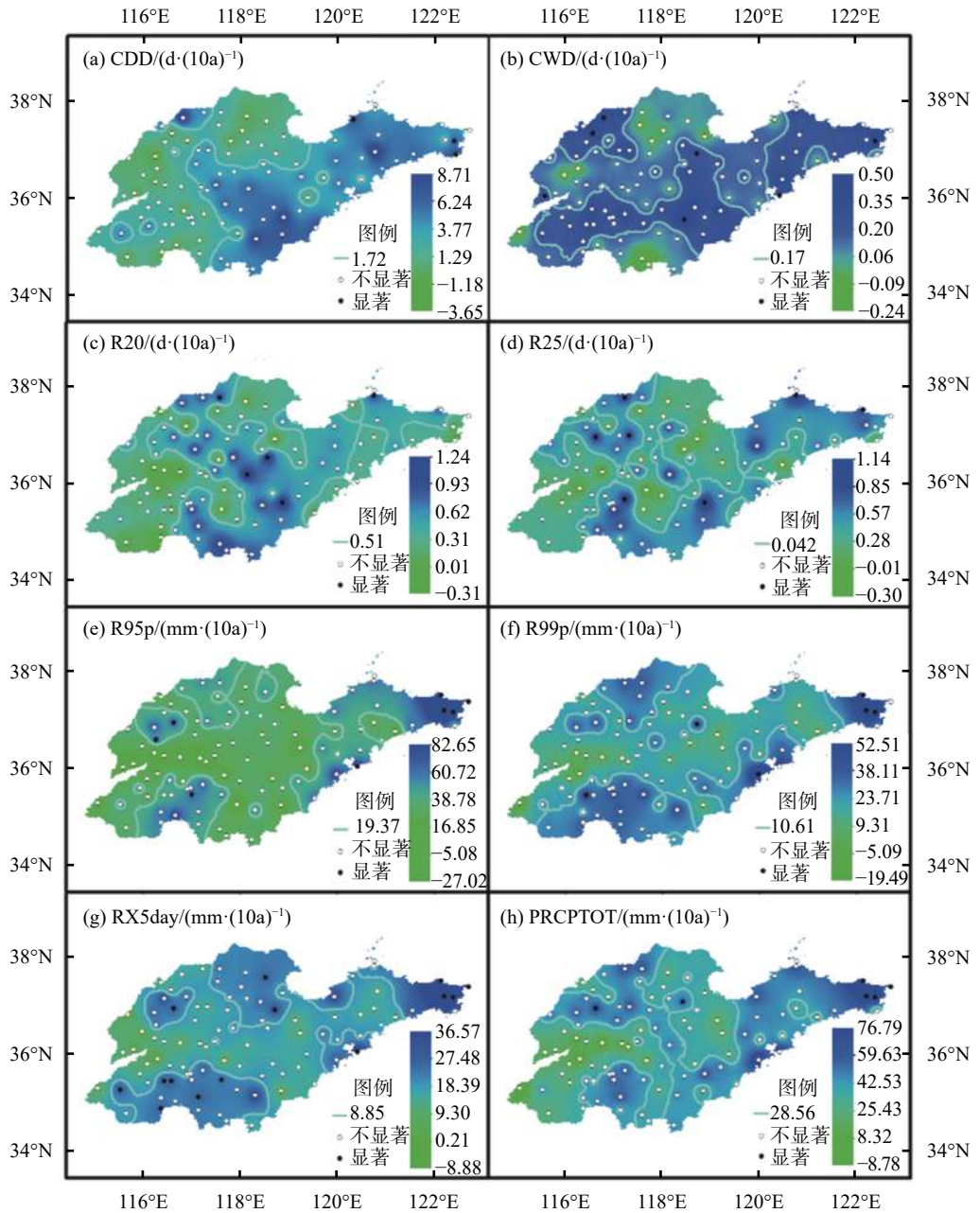

图 3　极端降水指数空间分布

Fig. 3　Spatial distribution of extreme precipitation indices

4　指数与经纬度和海拔相关关系

表 4 和图 4 分别给出了极端气候指数与经纬度和海拔相关关系。可以看出, 研究区 16 个极端气候指数与经度相关系数(用“r”表示相关系数)为−0.42~0.34, 相关关系较弱, 内陆区域和山东省具有一致的显著性, 除了 SU25 外, 其他指数具有一致的正负相关性(正负关系, 即若一致则表示相关系数均为正值或者负值), 而沿海区域与山东省的多个指数上呈现相反的正负相关性和显著性; 与纬度相关系数为−0.62~0.72, 但相关关系大多较弱, 沿海区域 CDD 相关性最强(r=0.72), 山东省、内陆区和沿海区显著性指数较多, TNn 和 DTR 等共 7 个指数达到了 0.05 的显著性水平, 具有较好的正负相关一致性; 与海拔的相关系数为−0.53~

0.36, 只有沿海区域 CDD(r=−0.53)相关性较强, 正负相关性无明显差异。同时, 在与纬度相关关系上, 16 个指数中只有 CDD 显著相关, 且有增加的趋势, 这表明研究区内从南到北持续干燥日数在逐渐增加, 北部区域有干旱灾害加剧的风险。

表 4 极端气候指数与经纬度和海拔相关系数

Tab. 4 Correlation coefficients between extreme climate indices and latitude, longitude and altitude

指数	经度	纬度	海拔	经度1	纬度1	海拔1	经度2	纬度2	海拔2
TN10p	**−0.23**	−0.02	0.13	**−0.27**	**0.29**	0.12	0.32	0.04	−0.10
TX90p	0.02	**−0.25**	−0.07	0.18	−0.15	−0.11	0.15	**−0.35**	0.11
TNn	−0.17	**−0.42**	0.11	−0.11	**−0.29**	0.13	−0.07	**−0.62**	0.12
TXx	−0.08	**0.37**	0.05	−0.03	**0.54**	0.09	−0.29	0.18	−0.02
SU25	−0.04	**0.34**	0.11	0.03	**0.53**	0.14	−0.23	0.11	0.10
FD0	0.06	0.16	**−0.22**	0.10	0.09	**−0.27**	0.11	**0.37**	−0.16
DTR	0.05	**0.39**	−0.02	0.13	**0.44**	−0.01	−0.25	**0.36**	−0.01
GSL	−0.01	0.12	**0.21**	−0.03	**0.37**	**0.36**	−0.21	−0.23	0.17
CDD	−0.13	**0.59**	−0.13	−0.21	**0.72**	−0.07	**−0.42**	**0.52**	**−0.53**
CWD	**0.24**	0.02	0.13	**0.30**	−0.07	0.17	0.10	−0.10	0.24
R20	**0.33**	−0.13	0.12	**0.32**	**−0.36**	0.19	0.27	−0.24	0.25
R25	**0.33**	−0.13	0.12	**0.32**	**−0.31**	0.21	0.25	−0.23	0.20
R95p	0.08	**−0.34**	0.12	0.15	**−0.37**	0.14	0.00	**−0.45**	0.23
R99p	0.15	**−0.22**	0.13	0.19	**−0.36**	0.17	−0.04	**−0.41**	**0.36**
PRCPTOT	**0.32**	**−0.21**	0.11	**0.31**	**−0.44**	0.18	0.25	**−0.31**	0.28
RX5day	**0.21**	**−0.26**	0.07	**0.34**	**−0.37**	0.08	0.07	**−0.47**	0.24

注: 表头中1代表内陆区域; 2代表沿海区域; 字体加粗表示在0.05水平下显著; 下划线表示相关关系较强。

图 5 为极端气候指数间相关系数图。从图 5 可以进一步看出: 山东省、内陆区和沿海区中, 极端气温指数间相关性较强($|r|\geq 0.5$)指数对个数相同, 均为 9 对(不计算自相关, 下同), 其中都包含 FD0-TNn、SU25-TXx、TXx-DTR、SU25-DTR 和 FD0-GSL; 极端降水指数间相关性较强指数对较多, 分别为 24、22 和 28 对, 只有 CDD 和 CWD 在山东省和内陆区域中与部分极端降水指数不相关; 极端气温指数和极端降水指数间相关性较强指数对分别为 9、12 和 15 对, 都包含 TXx-CDD、TXx-PRCPTOT、TXx-RX5day、DTR-CDD、DTR-R95p 和 DTR-RX5day。

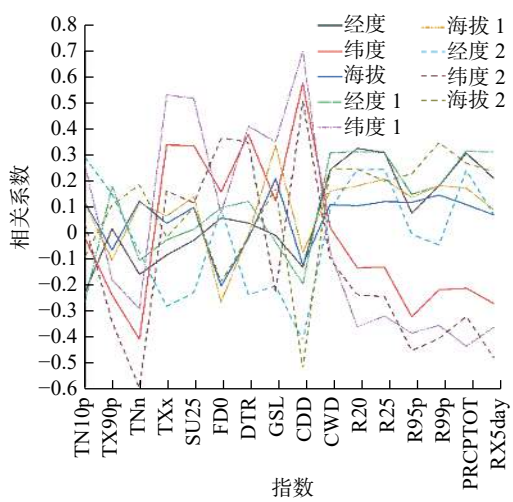

图 4 极端气候指数与经纬度和海拔相关系数

Fig. 4 Line chart of correlation coefficient between extreme climate indices and latitude, longitude and altitude

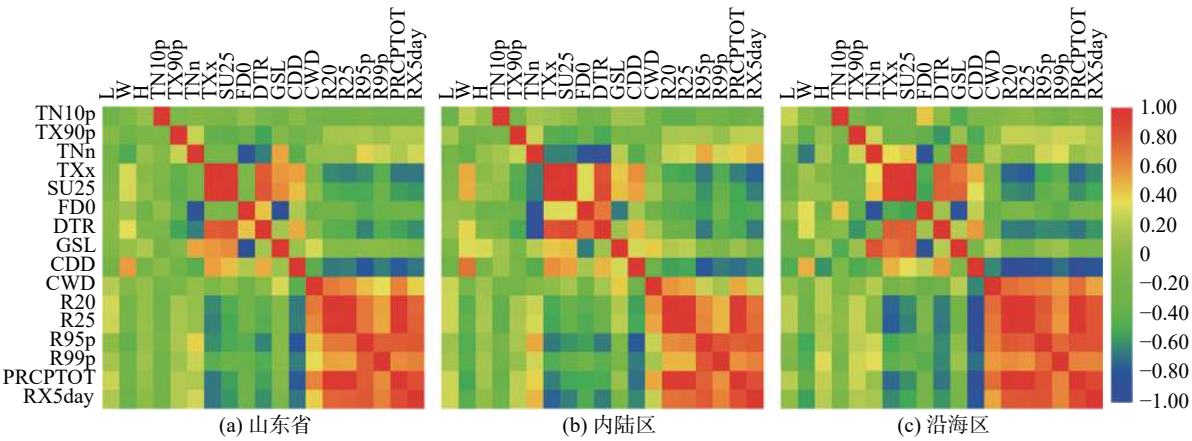

图 5　极端气候指数相关系数热图

Fig. 5　Heat map of correlation coefficient of extreme climate indices

5　讨　论

从上述分析可知, 山东省境内 TNn、TX90p、SU25、FD0 和 GSL 共 5 个极端气温指数呈现显著变化趋势。表征低温的极端气候指数(TN10p 和 FD0)呈下降趋势, 表征高温的极端气候指数(TX90p、TXx 和 SU25)呈上升趋势, 这表明整个研究区呈现出变暖的趋势。这一研究结果与中国区域[21]、长江流域[22] 和内蒙古地区[19] 研究结果整体一致。表 5 给出了上述研究区极端气温指数结果对比。可以看出, 本研究区 TN10p 下降速率最小; FD0 下降速率最大; TX90p 上升速率最大; SU25 上升速率介于 3 个区域之间; TXx 上升速率大于长江流域。TNn 与 TXx 呈上升趋势, TNn 上升速率是 TXx 上升速率的 2 倍多, 这与附近省份河南[23-24] 趋势一致。

表 5　不同区域极端气温指数对比

Tab. 5　Comparison of the extreme temperature indices in different regions

指数	中国	长江流域	内蒙古	山东
TN10p/(d·(10 a)$^{-1}$)	−1.87	−3.45	−3.67	−0.004 8
FD0/(d·(10 a)$^{-1}$)	−2.90	−3.04	−3.95	−6.42
TX90p/(d·(10 a)$^{-1}$)	1.15	1.71	2.20	4.06
TXx/(℃·(10 a)$^{-1}$)	\	0.14	\	0.32
SU25/(d·(10 a)$^{-1}$)	2.76	2.63	2.16	2.31

山东省极端高温指数的上升, 其境内城镇化率的迅速提高是重要影响因素。1949 年至 2020 年期间, 山东省城镇化率以平均每年 0.79% 的速度增加, 由 5.72% 增加到 61.80%。于凤硕等[25] 研究指出山东省城市化对高温指数的影响贡献率分别是 40.66%(SU35)、19.32%(TX90p)和 1.02%(TN90p), 进一步证实了城镇化率的提高对山东省极端高温指数上升有一定的影响。

山东省境内极端降水指数呈现出不同程度的上升趋势。R95p、R99p 和 RX5day 等 3 个极端降水强度指数呈显著增加趋势, 增加速率均大于 10.00 mm/(10 a), 高值区域主要分布在东部沿海, 尤其是处在高值中心的威海和青岛, 这表明该区域极端降水事件增多、增强可能性较大。影响极端降水指数上升的因素很多, 其中海温和大气环流是两个因素。鲍振鑫等[23] 探究了大气环流因子对海河流域年降水量的影响, 发现厄尔尼诺南方涛动(ENSO)与流域降水具有良好的正相关性, 而太平洋年代波动 (PDO) 和太平洋年代内的波动 (IPO) 则与流域降水具有良好的负相关性。另外, 陈烈庭[26] 在探究东太平洋赤道地区海温对我国汛期降水的可能影响机制中指出: 海温变化会影响大气环流, 进而对强降水产生一定的影响。山东省东部为半岛地形, 西部与太行山脉接壤。东部半岛的沿海地区容易受到海温变化影响, 当海温升高时, 海陆之间水循环加剧、大气环流加速, 大气中水分含量增加, 引起积雨云出现频率增多, 这可能是引起山东省境内极端降水指

数上升的原因。

影响极端气候指数的因素有很多,本文浅要探讨了城镇化对极端高温指数上升的影响,以及海温和大气环流对极端降水指数上升的影响。另有研究指出,地表覆盖[27]等因素对极端气候指数变化也有一定的影响。关于上述影响因子对本研究区极端气候指数的具体影响,还有待进一步研究。

6 结 语

整体上,山东省境内的极端低温指数(TN10p 和 FD0)呈下降趋势,极端高温指数(TX90p、TXx 和 SU25)呈上升趋势,TNn 呈显著上升趋势,变化率为 0.72 ℃/(10 a)。空间分布上,TNn 呈自南向北逐渐减小的趋势,高值中心在枣庄市和滨州市,TX90p 和 TXx 分布趋势与之大致相反。SU25、FDO、DTR 和 GSL 空间变化趋势不明显。

8 个极端降水指数均呈上升的趋势,CWD、R20 和 R25 变化速率较小,大雨暴雨频率趋于平稳。只有 R95p、R99p 和 RX5day 通过了 0.05 的显著性检验,变化速率较大,降水强度的显著上升,可能会加大洪涝灾害的风险。空间分布上,高值区域多为东部沿海区域和南部部分区域,呈下降趋势的站点多处于中部和西部区域。

在内陆和沿海区域,极端气温指数表现出了与山东省整体较好的一致性,在变化速率方面,只有 TN10p、DTR 和 GSL 在内陆区域大于沿海区域;极端降水指数在变化趋势上没有差异,在变化速率上,山东省整体大多介于两者之间。

山东省、内陆区和沿海区与经纬度和海拔相关性较弱,沿海区域相关性较强指数占比较多,只有 CDD 与纬度在 3 个区域显著相关。极端降水指数间相关性较强指数对较多,极端气温指数间的较少。

参 考 文 献:

[1] 中国气象局气候变化中心. 中国气候变化蓝皮书-2020[M]. 北京: 科学出版社, 2020.(Climate Change Center of China Meteorological Administration. Blue book on climate change in China-2020[M]. Beijing: Science Press, 2020.(in Chinese))

[2] ABBAS F, AHMAD A, SAFEEQ M, et al. Changes in precipitation extremes over arid to semiarid and subhumid Punjab, Pakistan[J]. Theoretical and Applied Climatology, 2014, 116(3/4): 671-680.

[3] WMO. The Global Climate 2001-2010: a decade of climate extremes-Summary Report[R]. Geneva: World Meteorological Organization, 2013: 20.

[4] LUCAS E W M, DE SOUSA F D A S, DOS SANTOS SILVA F D, et al. Trends in climate extreme indices assessed in the Xingu river basin-Brazilian Amazon[J]. Weather and Climate Extremes, 2021, 31: 100306.

[5] PLUMMER N, SALINGER M J, NICHOLLS N, et al. Changes in climate extremes over the Australian region and New Zealand during the twentieth century[J]. Climatic Change, 1999, 42(1): 183-202.

[6] RUML M, GREGORIĆ E, VUJADINOVIĆ M, et al. Observed changes of temperature extremes in Serbia over the period 1961—2010[J]. Atmospheric Research, 2017, 183: 26-41.

[7] 赵翠平, 陈岩, 王卫光, 等. 黄河流域近50 a极端降水指数的时空变化[J]. 人民黄河, 2015, 37(1): 18-22.(ZHAO Cuiping, CHEN Yan, WANG Weiguang, et al. Temporal and spatial variation of extreme precipitation indexes of the Yellow River Basin in recent 50 years[J]. Yellow River, 2015, 37(1): 18-22.(in Chinese))

[8] 王琼, 张明军, 王圣杰, 等. 1962—2011年长江流域极端气温事件分析[J]. 地理学报, 2013, 68(5): 611-625.(WANG Qiong, ZHANG Mingjun, WANG Shengjie, et al. Extreme temperature events in Yangtze River Basin during 1962-2011[J]. Acta Geographica Sinica, 2013, 68(5): 611-625.(in Chinese))

[9] 王怀军, 曹蕾, 肖明贤, 等. 淮河流域极端气候事件非平稳特征研究[J]. 中国农村水利水电, 2021, 462(4): 1-9.(WANG Huaijun, CAO Lei, XIAO Mingxian, et al. Non-stationary characteristics of extreme climate events:a case study of Huaihe

River Basin[J]. China Rural Water and Hydropower, 2021, 462(4): 1-9. (in Chinese))
[10] 黄强, 陈子燊. 全球变暖背景下珠江流域极端气温与降水事件时空变化的区域研究[J]. 地球科学进展, 2014, 29(8): 956-967. (HUANG Qiang, CHEN Zishen. Regional study on the trends of extreme temperature and precipitation events in the Pearl River Basin[J]. Advances in Earth Science, 2014, 29(8): 956-967. (in Chinese))
[11] 曹祥会, 龙怀玉, 张继宗, 等. 河北省主要极端气候指数的时空变化特征[J]. 中国农业气象, 2015, 36(3): 245-253. (CAO Xianghui, LONG Huaiyu, ZHANG Jizong, et al. Temporal and spatial variation analysis of the main extreme climate index in Hebei Province[J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2015, 36(3): 245-253. (in Chinese))
[12] 刘学智, 李王成, 苏振娟, 等. 1962—2015年宁夏平均气温和极端气温的变化特征[J]. 干旱区研究, 2018, 35(5): 1173-1180. (LIU Xuezhi, LI Wangcheng, SU Zhenjuan, et al. Change of mean temperature and extreme temperature in Ningxia during the period of 1962-2015[J]. Arid Zone Research, 2018, 35(5): 1173-1180. (in Chinese))
[13] 尹红, 孙颖. 基于ETCCDI指数2017年中国极端温度和降水特征分析[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(4): 363-373. (YIN Hong, SUN Ying. Characteristics of extreme temperature and precipitation in China in 2017 based on ETCCDI indices[J]. Climate Change Research, 2019, 15(4): 363-373. (in Chinese))
[14] 王建国. 山东气候[M]. 北京: 气象出版社, 2005. (WANG Jianguo. Shandong climate[M]. Beijing: China Meteorological Press, 2005. (in Chinese))
[15] 赵淑芳, 张立文, 王倩, 等. 山东极端强降雨分钟雨量、Z-R关系和风暴结构演变特征[J]. 干旱气象, 2017, 35(5): 806-814. (ZHAO Shufang, ZHANG Liwen, WANG Qian, et al. Analysis of minutely rainfall, Z-R relationship and structural evolution for extreme rainfall storms in Shandong Province[J]. Journal of Arid Meteorology, 2017, 35(5): 806-814. (in Chinese))
[16] 李胜利, 巩在武, 石振彬. 近50年来山东省极端降水指数变化特征分析[J]. 水土保持研究, 2016, 23(4): 120-127. (LI Shengli, GONG Zaiwu, SHI Zhenbin. Characteristics of change in extreme precipitation indices in Shandong Province in recent 50 years[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(4): 120-127. (in Chinese))
[17] 时晓曚, 王志轩, 孙即霖, 等. 山东夏季极端降水时空分布及环流特征分析[J]. 海洋湖沼通报, 2020(3): 45-51. (SHI Xiaomeng, WANG Zhixuan, SUN Jilin, et al. Analysis of spatial-temporal distribution of extreme precipitation in summer in Shandong Province[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2020(3): 45-51. (in Chinese))
[18] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 海河流域60年降水量的变化及未来情景分析[J]. 水利水运工程学报, 2014(5): 8-13. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Analysis of precipitation in the Haihe River basin during the last decades of years and future scenarios[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014(5): 8-13. (in Chinese))
[19] 雅茹, 丽娜, 银山, 等. 1960—2015年内蒙古极端气候事件的时空变化特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(3): 106-112. (YA Ru, LI Na, YIN Shan, et al. Characteristics of temporal and spatial variation of extreme climate events in Inner Mongolia during the period 1960—2015[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(3): 106-112. (in Chinese))
[20] 盛皓, 戴志军, 梅雪菲, 等. 长江口青草沙水库前沿河床演变与失稳风险研究[J]. 海洋工程, 2017, 35(2): 105-114. (SHENG Hao, DAI Zhijun, MEI Xuefei, et al. Research on evolution and instability risk of the frontal river bed along the Qingcaosha Reservoir, Changjiang Estuary[J]. The Ocean Engineering, 2017, 35(2): 105-114. (in Chinese))
[21] SHI J, CUI L L, MA Y, et al. Trends in temperature extremes and their association with circulation patterns in China during 1961—2015[J]. Atmospheric Research, 2018, 212: 259-272.
[22] GUAN Y H, ZHANG X C, ZHENG F L, et al. Trends and variability of daily temperature extremes during 1960-2012 in the Yangtze River Basin, China[J]. Global and Planetary Change, 2015, 124: 79-94.
[23] 鲍振鑫, 张建云, 严小林, 等. 海河流域60年降水量的变化及未来情景分析[J]. 水利水运工程学报, 2014, 147(5): 8-13. (BAO Zhenxin, ZHANG Jianyun, YAN Xiaolin, et al. Analysis of precipitation in the Haihe River Basin during the last decades of years and furure scenarios[J]. Hydro-Science and Engineering, 2014, 147(5): 8-13. (in Chinese))
[24] 高文华, 李开封, 崔豫. 1960—2014年河南极端气温事件时空演变分析[J]. 地理科学, 2017, 37(8): 1259-1269. (GAO Wenhua, LI Kaifeng, CUI Yu. Temporal and spatial variation of extreme temperature events in Henan Province during 1960—2014[J]. Scientia Geographica Sinica, 2017, 37(8): 1259-1269. (in Chinese))
[25] 于凤硕, 廉丽姝, 李宝富, 等. 城市化对山东省极端气温事件的影响[J]. 气象科技, 2019, 47(1): 129-139. (YU Fengshuo, LIAN Lishu, LI Baofu, et al. Effect of urbanization on extreme temperature events in Shandong Province[J]. Meteorological Science and Technology, 2019, 47(1): 129-139. (in Chinese))

[26] 陈烈庭. 东太平洋赤道地区海水温度异常对热带大气环流及我国汛期降水的影响[J]. 大气科学, 1977, 1(1): 1-12. (CHEN Lieting. The effects of the anomalous sea-surface temperature of the equatorial Eastern Pacific Ocean on the tropical circulation and rainfall during the rainy period in China[J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 1977, 1(1): 1-12. (in Chinese))

[27] WU L Y, ZHANG J Y, DONG W J. Vegetation effects on mean daily maximum and minimum surface air temperatures over China[J]. Chinese Science Bulletin, 2011, 56(9): 900-905.

Study on the characteristics of extreme climate indices in Shandong Province

LIU Xuan[1], TANG Peijun[2], WU Tongshuai[1], FENG Zhonglun[1], DIAO Yanfang[1], WANG Gang[1]

(1. *College of Water Conservancy and Civil Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271000, *China*; 2. *Weifang Hydrological Center*, *Weifang* 261031, *China*)

Abstract: In order to explore the temporal and spatial changes of the extreme climate indices in Shandong Province, based on the daily temperature and precipitation data of 95 meteorological stations in Shandong Province from 1979 to 2020, we used the Mann-Kendall (M-K) test and Sen slope estimation methods to calculate the time-varying characteristics and the Inverse Distance Weight method (IDW) to explore the trend of spatial change. The results show that: (1) The extreme temperature indices (TN10p and FD0) characterized by low temperature in Shandong Province show a downward trend, and the decline rates are 0.004 8 and 6.42 d/(10 a) respectively, and TX90p, TXx and SU25 characterized by high temperature show an upward trend, and the ascent rates are 4.06 d/(10 a), 0.32 ℃/(10 a) and 2.31 d/(10 a) respectively. The extreme temperature indices in the inland and coastal areas show good consistency with Shandong Province, but the spatial trend is not obvious. (2) The extreme precipitation indices are upward, and most indices in the coastal area are larger than those in the inland area. The precipitation intensity indices (R95p, R99p and RX5day) show a significant increasing trend, and the ascent rates are 22.16, 10.83 and 10.55 mm/(10 a) respectively. In terms of spatial distribution, the high value areas are mostly the eastern coastal areas and some areas in the south, which may increase the risk of flood disasters.

Key words: extreme temperature; extreme precipitation; extreme climate indices; temporal and spatial changes