

山东省近 40 a 来的气温和降水变化趋势分析

徐宗学 孟翠玲 赵芳芳

(北京师范大学水科学研究院水沙科学教育部重点实验室, 北京 100875)

摘 要 本文利用非参数检验法(Mann-Kendall 法)分析了山东省 15 个站点近 40 a(1958—1998)来气温和降水的长期变化趋势。结果表明:全省气温除西南的莘县、兖州有下降趋势外,大部分地区呈现上升趋势,全省平均上升 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。分季情况为:春季和冬季气温有上升趋势,其中冬季气温上升对全省气温上升的贡献率最大。夏季气温基本保持不变,秋季气温有下降趋势。全省除济南降水量呈略微上升趋势外,其余地区的降水倾向率均为负值,全省的降水倾向率为 -3.05 mm/a 。表明山东省自 1960 年以来,年均降水量呈现减少趋势。减少幅度东南部大于西北部,以东南沿海平均减少幅度最大。

关键词 气温 降水 非参数检验 趋势

分类号 P467 **文献标识码** A

引 言

气候变化给生态环境、工农业生产和城乡人民生活带来了不同程度的影响,因而受到了各级政府和科技界的广泛关注。检测气候变化并做出科学分析更是气象界责无旁贷的任务,也是拓宽气候业务服务的重要内容^[1-4]。降水量的变化与生态环境及生态安全密切相关,它必将对水资源、农业和生态系统产生深刻的影响。所以,降水量始终是气候变化研究的一个重要方面^[5]。气温和降水是气候的重要因素,因此,研究气温和降水的变化规律,对促进农业生产、旅游业,合理规划水资源利用有重要意义。

目前趋势分析的方法很多,常用的有线性倾向估计、累积距平、滑动平均、二次平滑、三次样条函数、Mann-Kendall 秩次相关法^[6-7]、小波分析等方法。这些方法被广泛应用于气温和降水的变化趋势分析中。如刘晋秀、江崇波等用线性回归方法,近似地揭示黄河三角洲近 40 a 来气候变化的总趋势^[8]。彭梅香等使用一元线性回归方程对黄河中游泾渭洛河近 50 a 来的降水变化特点进行了分析^[9]。黄玉霞、李栋梁等利用西北五省(区)137 个测站 1961—2000 年历年月降水量资料,采用 EOF、REOF、小波分析对西北地区年降水量的时空分布、演变规律及各异常区的周期特征进行了诊断分析^[10]。胡桂芳、张苏平等用子波变换的方法分析了山东烟台、青岛、济南近百年降水距平序列^[11]。江田汉利用非趋势波动分析方法队对我国近百年气温的长程相关规律进行了研究^[12]。段安民用离散和连续的小波变换分析了拉萨最近 44 a 的气温和降水变化^[13]。以上研究均采用了以参数估计为主的趋势检验方法来研究一个地区的气温和降水变化特征,而非参数方法 Mann-Kendall 方法则很少被采用。因此,本文用非参数的 Mann-Kendall 方法对山东省近 40 a 来的气温和降水趋势进行分析,以期对山东省气候变化提供依据。

1 研究区概况

山东省位于中国东部沿海,黄河下游,东经 $114^{\circ}47'\sim 122^{\circ}43'$,北纬 $34^{\circ}23'\sim 38^{\circ}24'$ 。境内以平原、山地丘陵为主。鲁西有东平湖、微山湖等湖群。京杭大运河经此,黄河自北部入海。比较重要的河流有徒骇河、沂河、小清河、淮河。山东属暖温带半湿润季风气候,四季分明,全省年平均气温 $11\sim 14\text{ }^{\circ}\text{C}$,年均降水量 $600\sim 900\text{ mm}$,全年无霜期 $6\sim 7$ 个月。

收稿日期:2005-08-18;修改稿日期:2006-06-27

基金项目:北京师范大学“京师学者”特聘教授启动经费

第一作者简介:徐宗学(1962-),男,山东淄博,博导,多年从事水文水资源方向的研究

山东省不仅是我国的人口大省,而且是我国的经济大省和农业大省。近年来,随着当地经济社会的高速发展,水资源短缺已成为山东经济社会发展的主要制约因素,对区域内气温和降水趋势的分析,是进行合理规划水资源利用的必要步骤。因此,研究山东省气温和降水量的时空变化特征,对改善地区降水的不利影响,促进山东省经济社会的可持续发展具有重要的现实意义。

2 资料来源与趋势分析方法

2.1 数据来源与处理

结合山东省气温和降水资料的实际情况,本研究选取了山东省 15 个气象站点近 40 a 的气温和降水观测资料作为基本资料(所用资料由国家气象局气象中心提供,且通过初步质量控制),并对部分站所缺观测年、月的资料,根据邻近测站的实际资料进行插补延长,以保证气温、降水序列的完整性。最后统一取 1958—1998 年逐月气温和降水量作为本文统计分析的基本资料。

2.2 趋势分析方法

本文采用非参数检验方法(Mann-Kendall 法)来检测山东省气温和降水的长期变化趋势。Mann-Kendall 趋势检验是一种非参数统计检验方法。它通常用于检验趋势的显著性,因而被广泛用于水文趋势检验研究^[14]。在趋势检验中,原假设 H_0 表示数据集 X 的数据样本独立同分布,没有趋势存在。可选假设 H_1 则表示数据集 X 中存在一个单调的趋势。Mann-Kendall 统计检验如下表示

$$Z_c = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{var}(S)}}, & S < 0 \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{k=i+1}^n \text{sgn}(x_k - x_i) \quad (2)$$

$$\text{var}[S] = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{i=1}^n t_i i(i-1)(2i+5)}{18} \quad (3)$$

式中 x_k 和 x_i 为样本数据值, n 为数据集合长度, t_i 为结长等于 i 的结的个数^[15]。当 θ 大于、等于和小于 0 时, $\text{sgn}(\theta)$ 相应地分别等于 1、0 和 -1。如果 $-Z_{1-\alpha/2} \leq Z_c \leq Z_{1-\alpha/2}$, 原假设 H_0 即被接受, 其中, $\pm Z_{1-\alpha/2}$ 是标准正态偏差, α 为检验的置信水平。另外一个很有用的指标是 Kendall 倾斜度 β , 即单位时间内的变化量, 以此来量化单调趋势。 β 可以表示为:

$$\beta = \text{Median}\left(\frac{x_i - x_j}{i - j}\right), \forall j < i \quad (4)$$

式中, $1 < j < i < n$ 。当 $\beta > 0$ 时, 则反映了上升的趋势, 反之则反映了下降的趋势^[16-17]。

3 气温的空间分布与变化趋势分析

对山东省 15 个气象站点 1958—1998 年的气温序列在 95% 的置信水平上进行了 Mann-Kendall 统计检验分析, 并借助专业绘图软件 Sufer7.0 将计算所得的 Kendall 倾斜度绘制成年和月的气温序列等值线图。

3.1 年平均气温的空间分布特征

山东省气温的分布呈现出明显的东部低于西部, 平均低 1~2 °C。其中济南为高值中心, 年平均气温为 14.38 °C, 比全省平均气温高 2.21 °C。泰山站为一低值中心, 年平均气温只有 5.37 °C, 比全省平均气温低 6.79 °C, 这主要是由于泰山站海拔较高的原因。

表 1 列出了山东省各代表性站点的统计值。

表 1 代表性站点气温的统计特征

Table 1 Statistics of air temperature for typical meteorological stations

	平均值(°C)	标准差	偏态系数	峰态系数	最小值(°C)	最大值(°C)	极差(°C)
龙口	11.89	0.58	0.73	1.01	10.70	13.69	2.99
青岛	12.36	0.54	0.18	-0.37	11.10	13.68	2.58
潍坊	12.31	0.60	-0.49	-0.34	11.00	13.30	2.30
济南	14.38	0.59	0.05	-0.33	13.20	15.98	2.78
德州	13.01	0.56	-0.05	-0.84	11.80	14.00	2.20
临沂	13.29	0.50	-0.13	-0.71	12.20	14.20	2.00
菏泽	13.61	0.47	-0.30	-0.85	12.60	14.50	1.90

3.2 年气温序列趋势分析

从图 1 可以看出,全省除西南的莘县、兖州有下降趋势外,大部分地区呈现上升趋势,全省平均上升 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。其中,龙口为一上升中心,Mann-Kendall 倾斜度达到 $0.23\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。济南、德州也是上升中心,上升温度分别为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 、 $0.15\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

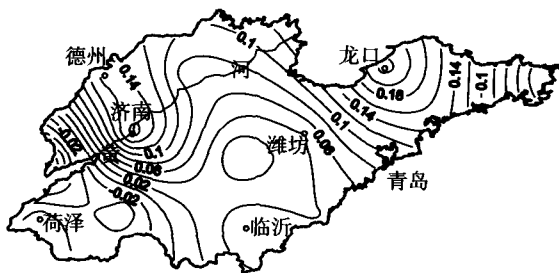
图 1 年平均气温序列的 Kendall 倾斜率等值线图($^{\circ}\text{C}/10\text{a}$)

Fig. 1 Long-term trend of annual temperature

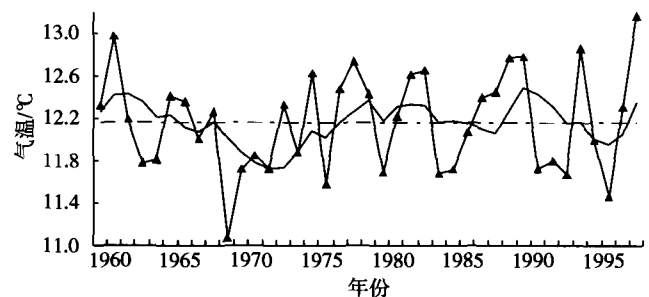


图 2 山东省年气温变化

—5a滑动平均 - - -平均 —▲—实测平均

Fig. 2 Annual temperature in Shandong Province

从图 2 可以看出,全省气温呈增加趋势。除 60 年代到 70 年代前期气温有下降趋势外,其他年代均有上升趋势,特别是 90 年代以来,气温呈现明显的上升趋势,为近 40 a 来最暖的时期。这与胡桂芳等研究的山东省近百年来气温变化趋势是一致的^[18]。

3.3 季气温序列趋势分析

根据山东省的气候特征,将 3—5 月划分为春季、6—8 月为夏季、9—11 月为秋季、12 月至次年 2 月为冬季^[3]。

将山东省各季节的 Kendall 倾斜率绘制成等值线图,如图 3 所示。

从图 3 可以看出,冬季气温对全年气温升高的贡献率最大。

春季:莘县气温呈现降低趋势,平均降温幅度为 $0.09\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。全省其它地区气温普遍升高,为 $0.19\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。沿海气温升高的幅度明显大于西部地区。其中龙口上升幅度最大,高达 $0.48\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,比平均值高 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。青岛、日照、济南也分别为气温升高中心。高于(或等于)年平均气温升高值的站数占总站数的 53.3%。

夏季:夏季气温保持不变。在所选 15 个站中,有 6 个表现出下降趋势,8 个表现出上升趋势,1 个气温基本无变化。气温下降的站点基本分布在中南部山地丘陵区 and 鲁西、北平原区,如莘县的下降幅度最大,为 $0.17\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$,其余的如菏泽、德州、惠民等地下降趋势也很明显。

秋季:除莘县、潍坊、兖州有下降趋势外,其余地区气温普遍升高。全省年平均气温升高 $0.1\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。龙口、海阳分别为高值中心,均为 $0.29\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。其它地区,如济南、日照等也接近 $0.2\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。

冬季:全省气温均呈上升趋势,与其它季节相比,冬季增温显著。年平均增温达 $0.036\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。沿海地区的

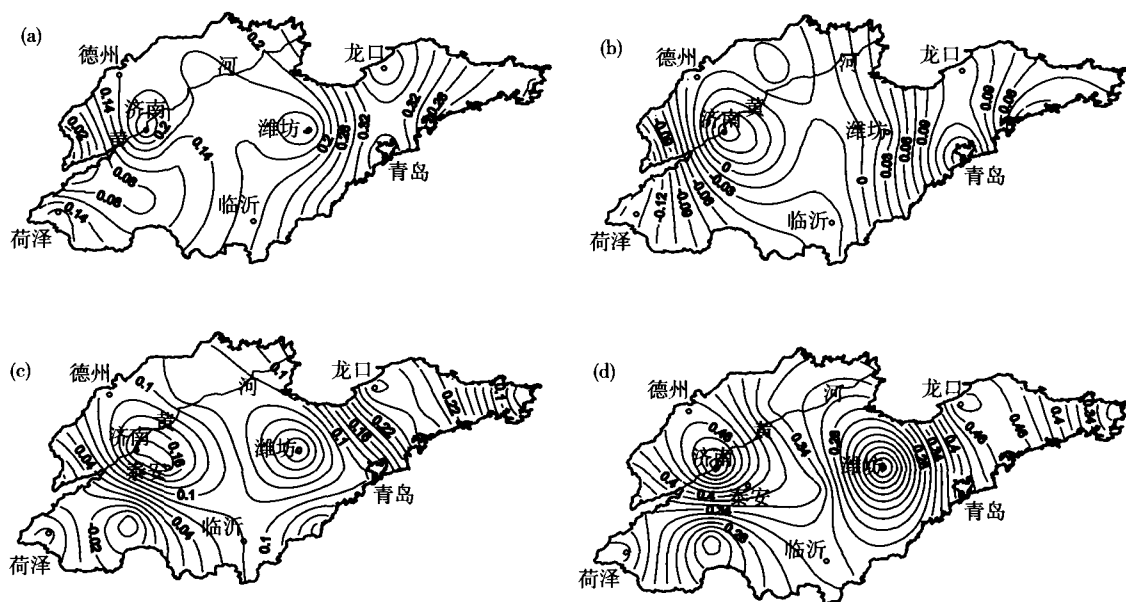


图3 山东省四季气温序列的 Kendall 倾斜率等值线图

(a)春季 (b)夏季 (c)秋季 (d)冬季

Fig. 3 Long-term trend of seasonal temperature

(a) spring (b) summer (c) fall (d) winter

平均升温幅度高于内陆地区,如沿海的龙口、海阳、青岛年增温均超过 0.04°C 。其中济南增温最显著,高达 $0.54^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。在所选的 15 个站点中,有 6 个年增温超过 0.04°C ,有 12 个超过 0.03°C 。所以,冬季气温上升对山东省全年气温升高的贡献最大,是春季的 4 倍,秋季的 3.6 倍。

4 降水的空间分布与变化趋势

4.1 降水的空间分布特征

从图 4 可以看出,山东省降水量在空间分布上有以下几个特点:

(1)自东南向西北递减。鲁中南山地和胶东半岛为多雨区,年降水量达 700 mm 以上;鲁北平原为少雨区,年降水量在 550~600 mm 左右。

(2)沿海多于内陆。胶东半岛与其它地区相比,降水明显偏多,这主要是因为该区距离海洋较近,来自海上的东南气流受山列抬升,容易产生降水。因此,年降水量要多于内陆。

(3)山地多于平原。由于山坡地形的抬升作用,暖湿气流与山地极易成云致雨。许多丘陵山区的迎风坡,常成为降水日数多、降水量最大的地区。例如,鲁中、南低山丘陵区要比鲁西北平原地区高出 100 mm 左右。

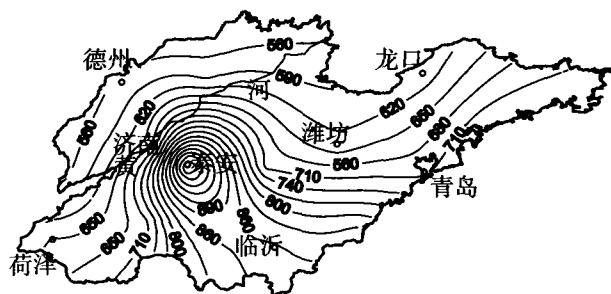


图4 年平均降水量空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of annual precipitation

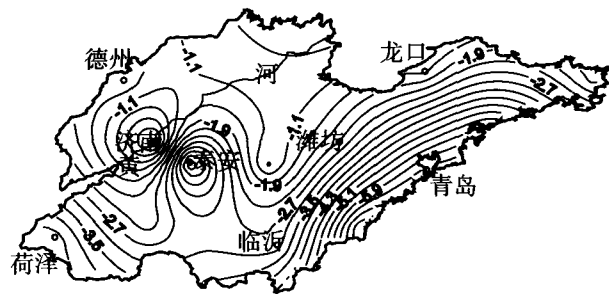


图5 年降水序列的 Kendall 倾斜率等值线图

Fig. 5 Long-term trend of annual precipitation

4.2 年降水序列趋势分析

从图 5 可以看出,全省除济南降水量呈略微上升趋势外(平均每年上升 0.837 mm),其余地区的降水倾向率均为负值,全省的降水倾向率为 -3.05 mm/a 。表明山东省自 1960 年以来,年均降水量呈现减少趋势。减少幅度东南部大于西北部,以东南沿海平均减少幅度最大。其中日照为一减少中心,年均减少 7.59 mm,青岛、海阳的减少幅度也都超过 6 mm/a。中部地区的泰安也是减少中心,达 -5.17 mm/a 。减小幅度最小的是沂源,为 -0.62 mm/a 。

从图 6 可以看出,山东省降水量有明显的干湿期之分。全省降水量呈下降趋势。60 a 代为丰水期,降水量为近 40 a 来最多的。但自 60 年代中期降水量呈现下降趋势,到 70 年代初期降水量又开始增多,70 年代为多雨期。80 年代到 90 年代为干旱少雨期。全省的降水倾向率为 -30.5 mm/10a ,即平均每 10 a 减少 30.5 mm。

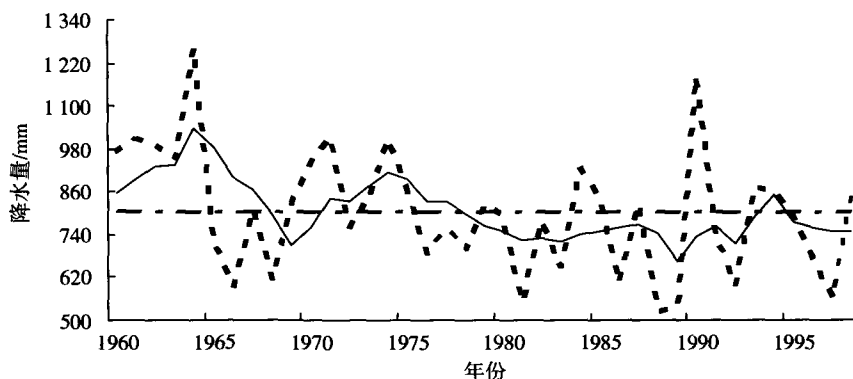


图 6 山东省年降水量的变化
—— 5a 滑动平均 - - - 平均 ··· 实测平均
Fig. 6 Annual precipitation in Shandong Province

4.3 季降水序列趋势分析

表 2 给出了山东省四季和全年降水的统计值,从表 2 可以看出,山东省全年降水量主要集中在夏季,约占全年降水总量的 63.2%,春季和秋季为少雨季节,冬季则呈现干旱少雨的趋势。

表 2 降水统计值
Table 2 Statistics for precipitation series

	平均值(mm)	方差	标准差	偏态系数	峰态系数	最小值(mm)	最大值(mm)	极值(mm)
春季	102.4	2 446.1	48.9	0.90	0.61	27.3	238.3	195.8
夏季	443.2	26 108.2	159.1	0.65	0.23	161.0	863.6	702.6
秋季	132.1	5 780.2	73.4	0.83	0.63	25.5	340.5	314.9
冬季	33.9	324.2	17.5	0.70	-0.01	3.5	76.0	72.5
全年	711.6	8 664.7	74.7	0.77	0.37	54.3	379.6	321.4

季降水趋势分析表明,春季全省降水呈现出上升趋势,平均每年增加 0.25 mm。除潍坊、青岛、临沂有下降趋势外,大部分地区有不同程度的上升。增加幅度由鲁西向胶东半岛递减。其中,莘县、菏泽为上升中心,分别达到 0.96 mm/a 和 0.77 mm/a。海阳上升幅度最小,为 0.005 mm/a。夏季降水有明显的减少趋势,变率为 -2.24 mm/a 。全省除少数地区,如龙口、济南外,均呈现出不同程度的下降趋势。沿海地区的下降幅度最大,鲁西北平原的下降幅度最小。下降幅度最大地区位于日照,变率值为 -5.56 mm/a 。秋季降水也有减少趋势,但比夏季幅度明显减小,平均变率为 -0.91 mm/a 。全省各地均表现出下降趋势,其中日照为下降中心,达到 1.88 mm/a,泰安、龙口、海阳也为下降中心,变率分别为 -1.76 mm/a 、 -1.48 mm/a 、 -1.34 mm/a 。冬季全省降水普遍有下降趋势,但下降趋势不明显,变率仅为 -0.022 mm/a 。除胶东半岛有上升趋势外,其余各地均呈现不同程度的下降趋势。

从全省近 40 年来的气温和降水变化趋势可以看出,气温呈现上升趋势,而降水却呈现下降趋势,两者呈相反的变化趋势。利用统计软件 SPSS 对两者进行相关性检验,相关系数为 -0.063 ,相关不显著。

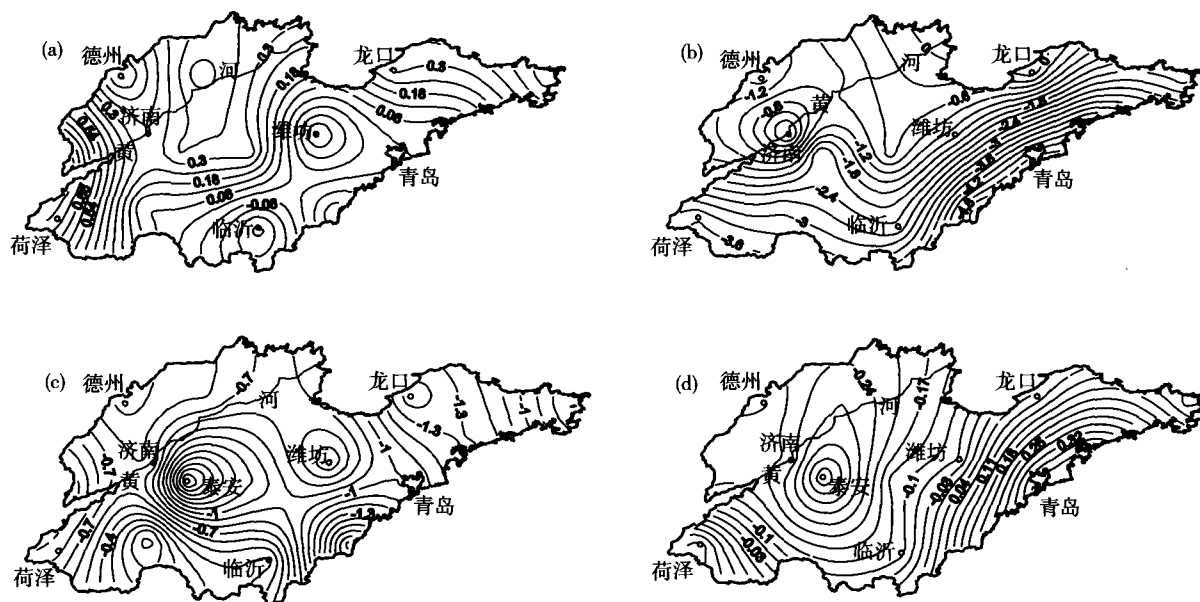


图 8 山东四季降水序列的 Kendall 倾斜率等值线图

(a) 春季 (b) 夏季 (c) 秋季 (d) 冬季

Fig. 8 Long-term trend of seasonal precipitation

(a) spring (b) summer (c) fall (d) winter

5 结 论

本文利用 Mann-Kendall 检验方法,对山东省分布均匀的 15 个气象站点 1958—1998 年的气温降水序列进行了长期趋势检验分析。结果表明:全省气温除西南的莘县、兖州有下降趋势外,大部分地区呈现上升趋势,全省平均上升 $0.06\text{ }^{\circ}\text{C}/10\text{a}$ 。特别是 90 年代以来,气温呈现出明显的上升趋势,为近 40 a 来最暖的时期。年内春季和冬季气温有上升趋势,其中冬季气温上升对全省气温上升的贡献率最大。夏季气温基本保持不变,秋季气温有下降趋势。全省除济南降水量呈略微上升趋势外,其余地区的降水倾向率均为负值,为 -3.05 mm/a 。表明山东省自 1960 年以来,年均降水量呈现减少趋势。减少幅度东南部大于西北部,以东南沿海平均减少幅度最大。山东省全年降水量主要集中在夏季,约占全年降水量的 63.2%,春季和秋季为少雨季节,冬季则呈现干旱少雨的趋势。在区域分布上,胶东半岛的降水量明显高于内陆地区。本文仅对山东省气温和降水的长期变化趋势进行了分析,对引起山东省气温和降水变化的原因有待进一步研究分析。

参 考 文 献

- [1] 黄文堂. 近 50 a 福建气温降水变化的统计特征. 气象, 20(2): 19-25.
- [2] 许吟隆. 中国 21 世纪气候变化的情景模拟分析. 南京气象学院学报, 2005, 28(3): 323-329.
- [3] 秦爱民, 钱维宏, 蔡亲波. 1960—2000 年对中国不同季节的气温分区及趋势. 气象科学, 2005, 25(4): 338-345.
- [4] 梁泽学, 江静. 中国北方地区 1961—2000 年干旱半干旱化趋势. 气象科学, 2005, 25(1): 9-17.
- [5] 左洪超, 吕世华, 胡隐樵. 中国近 50 a 气温及降水量的变化趋势分析. 高原气象, 2004, 23(2): 238-244.
- [6] 曾燕. 黄河流域实际蒸发分布式模型研究:[博士学位论文]. 北京: 中国科学院, 2004.
- [7] 加买尔, 龚葵, 陆维松. 近 14 a 也门降水异常的气候特征. 南京气象学院学报, 2006, 29(6): 847-849.
- [8] 刘晋秀, 江崇波. 黄河三角洲近 40 a 来气候变化趋势及异常特征. 海洋预报, 2002, 19(2): 32-35.
- [9] 彭梅香. 黄河中游泾渭洛河近 50 a 来降水分布特征及其变化特点分析. 陕西气象, 2003, (1): 19-23.
- [10] 黄玉霞, 李栋梁. 西北地区近 40 a 年降水异常的时空特征分析. 高原气象, 2004, 23(2): 245-252.
- [11] 胡桂芳, 张苏平. 山东近百年降水的层次结构及趋势诊断. 气象科学, 1998, 12(2): 381-388.
- [12] 江田汉. 我国近百年气温的非趋势波动分析. 气象科学, 2004, 24(2): 199-204.
- [13] 段安民. 拉萨气温和降水变化特征的小波分析. 高原气象, 1994, 86: 40-44.
- [14] Yue S, et al. The influence of autocorrelation on the ability to detect trend in hydrological series. Hydrol. Process, 2002 (16): 1807-1829.
- [15] Maidment D R. Handbook of Hydrology // Statistical Analysis of Hydrologic Data (Chapter 13). McGraw-Hill Inc., New York, 1993.
- [16] Xu Z X, et al. Monotonic trend and step changes in Japanese precipitation. Journal of Hydrology, 2003 (279): 144-150.
- [17] Burn D H, Hag Elnur M A. Detection of hydrologic trends and variability. Journal of Hydrology, 2002, (255): 107-122.
- [18] 胡桂芳, 薛德强. 山东近百年来的气温变化. 山东气象, 2003, 3: 8-11.

LONG-TERM TREND ANALYSIS FOR TEMPERATURE AND PRECIPITATION IN SHANDONG PROVINCE

Xu Zongxue Meng Cuiling Zhao Fangfang

(Key laboratory of Water and Sediment Sciences, Ministry of Education
College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875)

Abstract The Mann-Kendall statistic test is a rank-based, non-parametric method. It has been widely used to estimate the significance of long-term trends in hydro-meteorological time series such as water quality, streamflow, temperature, and precipitation, etc. Temperature and precipitation are two kinds of the most important climate factors. It is of great importance for the development of economics and agriculture to analyze the long-term trends of temperature and precipitation. The long-term trend of temperature and precipitation in Shandong Province was analyzed in this paper. The data used in this paper were observed at 15 meteorological stations. The Mann-Kendall test was applied to annual and monthly temperature and precipitation time series. The results show that the temperature exhibited an increasing trend during the past 40 years, especially in winter, during which the slope was $0.36\text{ }^{\circ}\text{C}/(10\text{a})$. The 1990s is the warmest periods in the past 40 years, and the eastern region of the study area show more obvious increasing trend. The precipitation exhibited significant decreasing trend and the slope is 3.05mm/a . The north-eastern area of Shandong Province contributed the most to decreasing trend of the precipitation.

Key words Temperature Precipitation Trend Non-parametric test