

祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析

贾文雄^{1,2}, 何元庆¹, 李宗省¹, 庞洪喜¹, 院玲玲¹, 宁宝英¹, 宋波¹, 张宁宁¹

(1. 中国科学院寒区旱区环境与工程研究所冰冻圈科学国家重点实验室, 兰州 730000;

2. 西北师范大学地理与环境科学学院, 兰州 730070)

摘要: 利用 8 个气象站的气温和降水资料, 运用一元回归分析法和 5 年趋势滑动, 进行了气候变化的趋势分析, 结果表明: 祁连山区在 20 世纪 80 年代中后期气温持续升高, 90 年代以后明显变暖, 其中秋、冬季升温幅度较大; 60 年代降水量最少, 之后逐渐增多, 80 年代达到最多, 90 年代又减少, 2000 年以来又明显增多; 气温变化在空间上表现为南北差异, 以黑河干流为界, 中东部升温幅度从南到北呈增大趋势, 而中西部从南到北呈减小趋势; 降水变化的空间差异也明显, 东部表现为东西差异, 降水量增加幅度从东到西呈减小趋势, 而中、西部表现为南北差异, 降水量增加幅度从南到北呈减小趋势。在此基础上, 利用滑动 T 检验法、Cramer 法、Mann-Kendall 法进行气候突变分析, 结果表明: 祁连山区气温突变比降水突变明显, 不同方法检验的结果比较一致; 春、夏季气温在 1997 年发生突变, 而秋、冬季在 1985 年左右发生突变。

关键词: 年际变化趋势; 气候突变; 祁连山区

1 引言

祁连山位于青藏高原东北边缘, 长约 850 km, 山区降水量 400~700 mm, 海拔 4000 m 以上的高山发育着现代冰川。祁连山区是内陆河流石羊河、黑河和疏勒河的发源地和河西绿洲的水源地。IPCC 第四次评估报告指出^[1], 过去 100 年来全球地表温度升高 0.74 °C, 变暖幅度自 20 世纪 90 年代以来明显加速, 1850 年以来最暖的 12 年中有 11 年出现在 1995-2006 年, 未来 100 年全球气温可能会升高 1.1~6.4 °C。近百年来, 我国气候变化趋势与全球变化总趋势基本一致, 气温上升了 0.4~0.8 °C, 近 50 年增暖尤其明显, 主要在 20 世纪 80 年代中期以后, 气温增加了 1.1 °C, 贡献最大的是秋、冬季^[2-6]。近 40~50 年来, 我国年降水量呈减少趋势, 但西部降水量增长趋势明显, 其中西北地区最为明显^[7-9]。施雅风等人提出我国西北地区的气候由暖干向暖湿转型, 祁连山及其北侧的中西段地区是气候转型显著的区域之一^[10-12]。有关祁连山北坡的气候及径流变化已有大量研究^[13-21], 结果表明自 20 世纪 50 年代以来气温总体上呈波状上升趋势, 进入 90 年代以后加速上升, 同时降水量也呈增加趋势。以往研究中, 有关祁连山区气候年际变化的研究主要集中在黑河上游地区, 作为出山径流年际变化背景的气候因素也作过一些研究, 但有关整个山区气候变化的区域差异特征详细分析不多。本文主要探讨全球气候变暖背景下祁连山区气候变化的区域差异特征及突变, 旨在对比分析不同环流系统影响下气候变化的区域差异, 为河西绿洲水资源合理开发利用提供气候变化背景。

收稿日期: 2007-07-16; 修订日期: 2007-11-18

基金项目: 国家自然科学基金重点项目(90511007,90702001); 国家自然科学基金委群体项目(40121101); 中国科学院创新群体项目(CXTD-Z2005-2); 中国科学院重要方向性项目(KZCXZ-YW-317)资助 [Foundation: Key Project for National Natural Science Foundation of China, No.90511007, 90702001; The Project for Outstanding Young Scientists of National Natural Science Foundation of China, No.40121101; The Knowledge Innovation Program of the CAS, No.CXTD-Z2005-2; The Project for Important Directionality Foundation of the CAS, No. KZCXZ-YW-317]

作者简介: 贾文雄 (1974-), 男, 甘肃渭源人, 博士研究生, 主要从事冰川水文及气候变化研究.E-mail: wxjiaxy@163.com

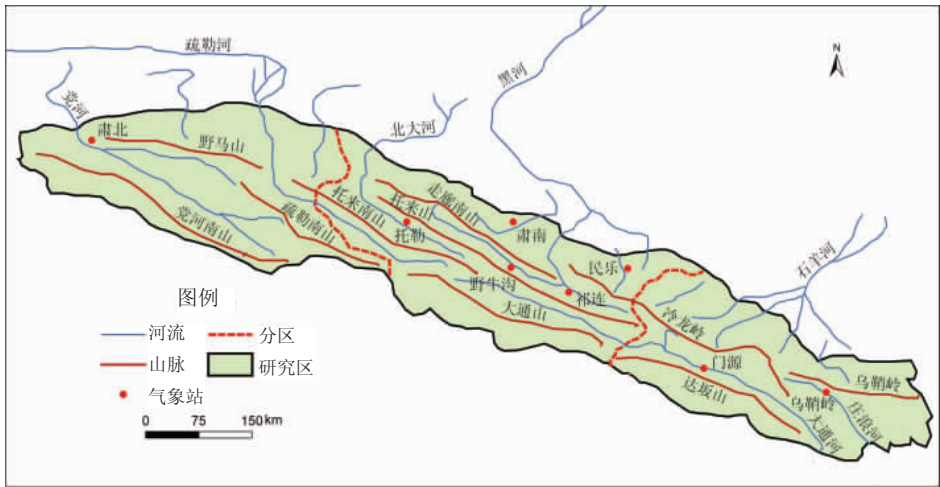


图 1 祁连山区气象站点分布及分区图

Fig. 1 The study area and the distribution of stations in Qilian Mt. region

表 1 祁连山区气象站的基本情况

Tab. 1 The basic information of stations in Qilian Mt. region

| 站名 | 经度 | 纬度 | 海拔高度(m) | 资料长度(年) |
|-----|----------|---------|---------|-----------|
| 乌鞘岭 | 102°52'E | 37°12'N | 3043 | 1951-2005 |
| 门源 | 101°37'E | 37°23'N | 2851 | 1957-2005 |
| 民乐 | 100°49'E | 38°27'N | 2272 | 1958-2005 |
| 祁连 | 100°15'E | 38°11'N | 2789 | 1957-2005 |
| 肃南 | 99°37'E | 38°50'N | 2311 | 1957-2005 |
| 野牛沟 | 99°21'E | 38°37'N | 3180 | 1960-2005 |
| 托勒 | 98°25'E | 38°48'N | 3368 | 1957-2005 |
| 肃北 | 94°53'E | 39°30'N | 2200 | 1973-2005 |

2 资料与方法

2.1 资料来源

选用祁连山区 8 个气象站 (图 1, 表 1) 逐年逐月的气温和降水量资料, 资料来源于国家气象信息中心 (<http://www.nmic.gov.cn/>)。在资料处理之前, 根据祁连山区降水量的空间分布^[22, 23]对气象站进行了划分, 乌鞘岭和门源站代表祁连山东部地区, 民乐、祁连、肃南、野牛沟和托勒站代表祁连山中部地区, 肃北站代表祁连山西部地区, 以区域各站点的平均气候序列代表该地区的气候序列。

2.2 气候数据序列的质量和一致性

由于各气象站所处海拔高度以及方位和下垫面条件的不同, 对气候变化的响应程度肯定存在一定的区域差异, 因此以区域各站点的平均气候序列代表该地区的气候序列, 肯定会影响气候变化研究的真实性。从祁连山区各区域平均气候序列与各站点原始序列的相关性可以看出 (表 2), 气温、降水均表现出很好的相关性, 可见平均气候序列不仅可以很好地反映各站点的实际气候变化, 而且可以从大尺度上反映区域气候变化。由于祁连山区气象站分布少, 并且各气象站建站的时间不同, 这给气候变化的区域差异研究造成一定困难, 特别是 1961 年建站, 1962 年停站, 1973 年又恢复建站的肃北站。为了数据的一致性, 本文利用线性回归法恢复了肃北站 1960-1972 年的气温和降水数据, 所用数据资料长度都为 1960-2005 年。由于敦煌站距肃北站最近, 并且它们 1973-2005 年的气温、降水表现出很好的相关性, 相关系数分别为 0.9929、0.7159, 均通过 0.0001 的显著性检验水平, 所以利用敦煌站的气温和降水资料恢复肃北站的气温和降水数据是可行的。数据恢复之后, 用肃北站 1961 年 5 月至 1962 年 5 月气温和降水的实测资料与恢复后的数据作相关分析, 结果相关系数分别为 0.9968、0.7053, 分别通过了 0.0001、0.01 的显著性检验水平。可见, 恢复的数据可以用于气候变化的趋势和突变分析。

2.3 计算及分析方法

分别计算 8 个台站各年份的年及季节气温、降水量的平均值, 再计算东、中、西部

各年份的年及季节气温、降水量的平均值和距平值, 利用一元回归分析法和 5 年趋势滑动, 进行气候变化的趋势分析, 然后利用滑动 T 检验法、Cramer 法、Mann-Kendall 法进行气候突变分析, 通过对比分析来确定较为可靠的突变年份。滑动 T 检验法和 Cramer 法的原理基本相同, 都是通过样本数 n 值的变化来计算统计量 t 的值, 再

表 2 祁连山区气温和降水的年、季平均序列与各站点序列的相关系数
Tab. 2 Correlation coefficients of annual and seasonal sequence of mean temperature and precipitation with that of each station in Qilian Mt. region

| | | 中部 | | | | 东部 | | |
|----|----|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | 民乐 | 肃南 | 祁连 | 野牛沟 | 托勒 | 乌鞘岭 | 门源 |
| 春季 | 气温 | 0.9283 | 0.9279 | 0.9348 | 0.9753 | 0.9567 | 0.9477 | 0.9414 |
| | 降水 | 0.8375 | 0.8735 | 0.8394 | 0.8949 | 0.8179 | 0.8521 | 0.9277 |
| 夏季 | 气温 | 0.8141 | 0.7064 | 0.7789 | 0.8116 | 0.8514 | 0.8959 | 0.9355 |
| | 降水 | 0.8245 | 0.8698 | 0.8523 | 0.8469 | 0.7226 | 0.8816 | 0.8173 |
| 秋季 | 气温 | 0.9473 | 0.9040 | 0.7970 | 0.9619 | 0.9223 | 0.9260 | 0.9163 |
| | 降水 | 0.8964 | 0.8909 | 0.8863 | 0.8562 | 0.8231 | 0.9043 | 0.9285 |
| 冬季 | 气温 | 0.9244 | 0.8644 | 0.8456 | 0.9543 | 0.9322 | 0.8586 | 0.8890 |
| | 降水 | 0.7670 | 0.8301 | 0.7365 | 0.6604 | 0.6558 | 0.7956 | 0.8244 |
| 全年 | 气温 | 0.9463 | 0.9125 | 0.9630 | 0.9020 | 0.9646 | 0.9081 | 0.9396 |
| | 降水 | 0.7944 | 0.8097 | 0.8267 | 0.8040 | 0.7777 | 0.8642 | 0.8504 |

给定不同置信度水平检验突变年份^[24]。运用滑动 T 检验法和 Cramer 法进行突变分析时, 将所求出的 t 值绘成曲线, 然后给定置信度水平, 将超过临界线的波峰所对应的年份作为突变点。Mann-Kendall 法是一种非参数的检验方法, 样本不必遵从某一特定的分布, 同时也不受个别异常值的干扰, 能够客观地表征样本序列的整体变化趋势^[25, 26]。运用 Mann-Kendall 法进行突变分析时, 先绘制 UF、UB 曲线, 再给定置信度水平, 若 UF、UB 曲线超过临界线, 且在临界线之间有交点, 则将交点所对应的年份作为突变点。

3 气候年际变化的区域差异特征分析

3.1 气温年际变化的区域差异

在全球变暖背景下, 不同区域对全球升温的响应程度有差异, 并且明显升温的季节也有差异, 任国玉等人^[27]对我国地面气候变化特征研究说明了这个问题。与大尺度相比, 祁连山区气温的变化不会出现太大的差异, 即气温变化的总趋势基本一致, 但季节的增温幅度、年际变化趋势、空间分布特征也表现出一定的区域差异。

3.1.1 气温年代际变化的特征 祁连山区的年平均气温在 20 世纪 60、70、80 年代偏低, 90 年代以后偏高, 气温总体上呈上升趋势(表 3)。东、中、西部年平均气温的年代际变化虽大体一致, 但也存在一定的区域差异: 中、东部气温在 60 年代最低, 而西部在 70 年代最低; 东部气温在 70、80 年代变化平稳, 中部在 60、70 年代变化较小, 而西部变化较大, 60 年代气温高于 70、80 年代; 90 年代以来, 东、中、西部气温变化趋势一致, 不过中、西部在增温幅度上略大于东部。气温的季节年代际变化也表现为上升趋势, 而且存在一定的区域差异: 1) 春季气温区域差异明显, 60 年代中、东部气温略偏高, 而西部略偏低, 中、东部气温在 80 年代最低, 而西部在 70 年代最低, 中、东部气温自 90 年代以来偏高, 而西部在 2000 年以后偏高; 2) 夏季气温在 90 年代之前区域差异明显, 东部气温在 60 年代最低, 70 年代略偏低, 80 年代又偏低, 而中部变化平稳, 西部变化与东部相反; 3) 秋季气温东、中、西部变化一致, 自 60 年代以来气温均持续升高, 不过中部气温在 80 年代已经偏高, 而东、西部在 90 年代以后偏高; 4) 冬季气温与秋季变化一致, 不同在于西部气温在 80 年代也偏高。

90 年代以来, 祁连山区的年平均气温升高 0.55~0.59 °C, 其中冬季升温幅度最大, 这与我国升温主要在冬季的特征一致。季节的增温幅度也表现出一定的区域差异, 春季是中部大于东、西部, 夏季从东到西有增大的趋势, 秋季是西部大于中、东部, 冬季是中、西部大于东部。在 90 年代以后, 祁连山区普遍明显升温, 这与我国和西北地区气温

表 3 祁连山区年、季平均气温距平的年代际变化 (单位: °C)

Tab. 3 Interdecadal variation of annual and seasonal mean temperature in Qilian Mt. region (°C)

| 年代 | 20 世纪 | | | | 2000-2005 年 | 1990-2005 年 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------------|-------------|
| | 60 年代 | 70 年代 | 80 年代 | 90 年代 | | |
| 东部 | 春季 | 0.04 | -0.27 | -0.48 | 0.30 | 0.67 |
| | 夏季 | -0.40 | -0.14 | -0.29 | 0.33 | 0.83 |
| | 秋季 | -0.59 | -0.27 | -0.06 | 0.51 | 0.67 |
| | 冬季 | -0.84 | -0.35 | -0.21 | 0.47 | 1.04 |
| | 全年 | -0.37 | -0.26 | -0.26 | 0.40 | 0.81 |
| 中部 | 春季 | 0.06 | -0.32 | -0.43 | 0.35 | 0.60 |
| | 夏季 | -0.31 | -0.30 | -0.31 | 0.32 | 0.97 |
| | 秋季 | -0.54 | -0.39 | 0.08 | 0.44 | 0.71 |
| | 冬季 | -0.96 | -0.45 | 0.01 | 0.70 | 1.14 |
| | 全年 | -0.39 | -0.38 | -0.17 | 0.44 | 0.84 |
| 西部 | 春季 | -0.25 | -0.82 | -0.64 | -0.03 | 0.38 |
| | 夏季 | 0.15 | -0.66 | -0.43 | 0.28 | 1.14 |
| | 秋季 | -0.68 | -0.51 | -0.02 | 0.75 | 0.81 |
| | 冬季 | -0.92 | -0.48 | 0.03 | 0.79 | 0.99 |
| | 全年 | -0.14 | -0.54 | -0.27 | 0.44 | 0.82 |

显著升高的时间一致^[5-8, 28], 表明对全球气候变暖的响应也比较明显。

3.1.2 气温年际变化的趋势 祁连山区年平均气温的年际变化总体上呈上升趋势, 但在 20 世纪 80 年代中期之前有一定的区域差异(图 2), 如东部气温在 70 年代初之前呈上升趋势, 之后呈下降趋势, 而中部自 60 年代以来变化平稳, 西部在 70 年代中期之前呈下降趋势, 之后呈波状上升趋势。气温的季节年际变化总体上也呈上升趋势, 但存在一定的区域差异: 1) 春季气温在 80 年代中期之前有差异, 中、东部在 70 年代初之前呈上升趋势, 之后呈波状下降趋势, 而西部在 70 年代中期之前呈下降趋势, 之后至 80 年代初上升, 之后又下降; 2) 夏季气温在 80 年代中期之前也有差异, 中、东部在 60 年代中期之前下降, 之后至 70 年代初上升, 之后又呈波状下降趋势, 而西部在 70 年代中期之前呈下降趋势, 之后变化平稳; 3) 秋季气温区域差异很小, 东、中、西部自 60 年代以来均呈缓慢波状上升趋势; 4) 冬季气温区域差异明显, 东部 80 年代中期之前呈波状下降趋势, 之后呈波状上升趋势, 而中部与秋季气温变化趋势一致, 西部在 60 年代中期之前下降, 之后呈波状上升趋势。80 年代中期以来, 东、中、西部气温的变化趋势基本一致, 均呈大幅度波状上升趋势, 年平均气温在 1987 年以后为正距平, 表明气候明显变暖, 但春、夏季气温在 1994 年以后为正距平, 而秋、冬季在 1986 年以后为正距平, 表明秋、冬季气候变暖明显早于春、夏季。

东、中、西部年平均气温的年际变化倾向率分别为 0.30 、 0.33 、 0.27 $^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$, 表明在全球气候变暖背景下, 祁连山区的年平均气温呈上升趋势, 并且气温与年份的相关系数分别为 0.6908 、 0.7202 、 0.5614 , 表明气候显著变暖。东部春、夏、秋、冬季气温的年际变化倾向率分别为 0.17 、 0.27 、 0.35 、 0.40 $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 中部分别为 0.18 、 0.27 、 0.35 、 0.56 $^{\circ}\text{C} (10\text{a})^{-1}$, 西部分别为 0.18 、 0.23 、 0.45 、 0.53 $^{\circ}\text{C} \cdot (10\text{a})^{-1}$, 表明东、中、西部四季气温均呈上升趋势, 而且冬季增温幅度最大, 秋季次之。东部春、夏、秋、冬季气温与年份的相关系数分别为 0.2977 、 0.5559 、 0.5948 、 0.5226 , 中部分别为 0.2946 、 0.4838 、 0.6144 、 0.6755 , 西部分别为 0.2814 、 0.3777 、 0.6579 、 0.5234 , 表明东、中、西部除春季升温不明显外, 其他季节升温都明显, 其中东、西部秋季增温最明显, 而中部冬季升温最显著。

3.1.3 气温变化的空间分异 在全球变暖背景下, 祁连山区的气温普遍呈上升趋势, 但气温的变化存在一定的空间分异(图 3): 1) 春季升温区域差异明显, 东部的中东部表现

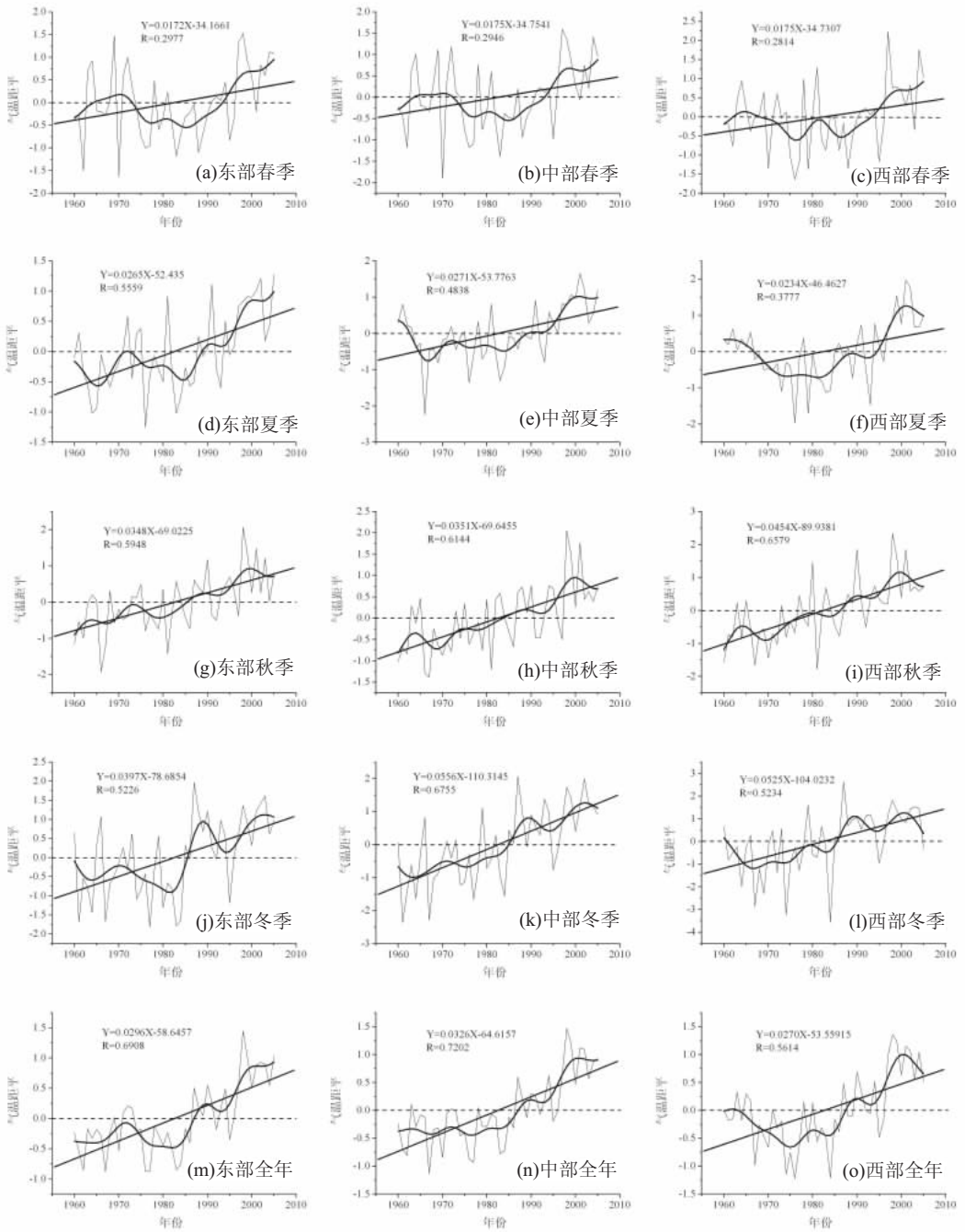


图 2 祁连山区年、季平均气温的年际变化趋势 (1960-2005 年)

Fig. 2 Interannual variation of annual and seasonal mean temperature in Qilian Mt. region (1960-2005)

为东西差异，增温幅度从东到西呈增大趋势，其中最东端的气温还出现了下降，中西部表现为南北差异，增温幅度从南到北呈增大趋势，而中、西部也表现为南北差异，但增温幅度从南到北呈减小趋势；2) 夏季升温区域差异也明显，东部表现为东西差异，增温幅度从东到西呈增大趋势，而中部表现为东西差异，增温幅度从东到西为先减小后增大，西部增温幅度在空间上差异不大；3) 秋季升温与春、夏有所不同，大致以黑河干流为界，

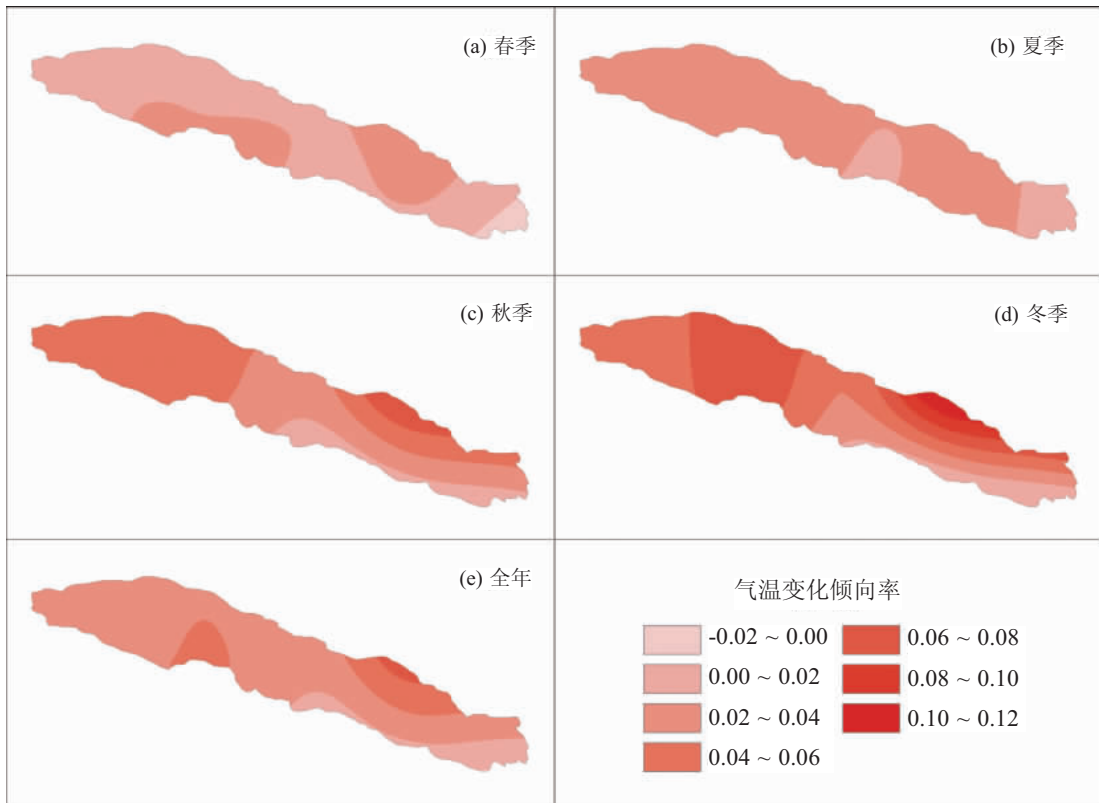


图3 祁连山区年、季气温变化倾向率的空间分布 (1960-2005年)

Fig. 3 The regional distribution of annual and seasonal variation of temperature in Qilian Mt. region (1960-2005)

中东部表现为南北差异, 增温幅度从南到北呈增大趋势, 而中西部表现为东西差异, 增温幅度从东到西呈增大趋势; 4) 冬季升温与秋季相似, 即以黑河干流为界, 中东部也表现为南北差异, 增温幅度从南到北呈增大趋势, 其中东部最南端气温还出现了下降, 而中西部表现为东西差异, 增温幅度从东到西是先增大后减小; 5) 全年升温与秋、冬季增温的空间分异相似, 表明秋、冬季升温对年平均气温上升影响比较大, 所不同的是全年升温表现为南北差异, 即以黑河干流为界, 中东部的增温幅度从南到北呈增大趋势, 其中南部还出现了降温, 而中西部的增温幅度从南到北呈减小趋势。

相比较而言, 春、夏季增温幅度小, 而秋、冬季增温幅度大, 表明秋、冬季升温比春、夏季更明显, 对全年气温的升高贡献更大。总体上, 中东部增温幅度变化大, 北部增温显著且增温幅度大, 南部增温幅度小甚至出现了降温, 而中西部增温幅度变化小, 但增温趋势明显且增温幅度比较大。

3.2 降水量年际变化的区域差异

祁连山区东西跨越约 10 个经度, 东部受西南和东南夏季风的影响, 西部受西风环流的控制, 中部处于两种环流系统的交汇处, 再加上青藏高原季风的影响, 复杂的大气环流系统使降水量的空间差异比较大, 主要表现为从东到西、从南到北降水量减少。在全球变暖背景下, 不同环流系统的强弱变化使祁连山区降水量变化的区域差异更加复杂。

3.2.1 降水量年代际变化的特征 祁连山区年降水量的年代际变化起伏明显, 20 世纪 60 年代降水量最少, 之后逐渐增多, 80 年代达到最多, 90 年代又减少, 2000 年以来又明显增多, 大体经历了“少—多—少—多”的变化过程 (表 4)。东、中、西部年降水量变化趋势虽基本一致, 但也表现出一定的区域差异, 如 70 年代中、东部偏少, 而西部偏多, 90 年代中、西部略偏多, 而东部略偏少。降水量的季节年代际变化与年降水量变化

大体一致,但也存在一定的区域差异:1)春季降水量区域差异最明显,60年代东、西部偏少,而中部偏多,90年代中、西部偏少,而东部偏多,2000年以来西部比中、东部显著偏多;2)夏季降水量区域差异也明显,70年代西部显著偏多,而中、东部略偏多,90年代中、西部偏多,而东部明显偏少;3)秋季降水量东、中、西部变化趋势基本一致,不过60年代东部略偏多,而中、西部略偏少;4)冬季降水量区域差异也比较明显,中、东部自60年代以来逐渐增多,分别在80、90年代达到最多,之后呈减少趋势,而西部自60年代以来一直持续增加。

2000年以后,祁连山区降水量普遍增多,年降水量增加幅度在14.6~18.4 mm之间,中、东部增加幅度大于西部,秋季对年降水量增加贡献最大。相比较而言,春季降水量西部增加幅度最大,东部次之,中部最小;夏季降水量东、中、西部均表现为减少,并且减少幅度从东到西呈增大趋势;秋季降水量增加最明显,中部增加幅度最大,东部次之,西部最小;冬季降水量增加幅度最小,但西部增加幅度大于中、东部。2000年以来,祁连山区中、东部秋季降水量增多明显,而西部春季降水量增多显著,降水量的这些变化对内陆河流径流量的增加以及河西走廊绿洲的建设是非常有意义的。

3.2.2 降水量年际变化的趋势 祁连山区年降水量的年际变化趋势复杂,东部在20世纪60年代中期之前呈减少趋势(图4),之后呈波状增加趋势,在80年代末又减少,而中、西部在80年代初之前呈增加趋势,之后呈波状减少趋势,到90年代中期以后东、中、西的变化趋势基本一致,降水量又呈增加趋势。降水量的季节年际变化与年降水量的变化趋势差异较大,而且具有明显的区域差异:1)春季降水量东、中、西部的变化趋势大体一致,自60年代以来均呈波状增加趋势,但西部增加趋势更明显,特别是90年代末降水量显著增加;2)夏季降水量在60年代中期之前有差异,东部减少,而中、西部增加,之后东、中、西部的变化趋势大体一致,80年代初之前呈波状增加趋势,之后呈波状减少趋势;3)秋季降水量东、中、西部的变化趋势也基本一致,60年代中期之前减少,之后至70年代中后期增加,不过东部变化平稳,到80年代又减少,之后又变化平稳,90年代中后期又呈增加趋势;4)冬季降水量区域差异大,东部在60年代之前下降,之后呈波状增加趋势,而中部在70年代初之前减少,之后呈波状增加趋势,80年代中后期又呈波状减少趋势,西部70年代中后期之前呈增加趋势,之后有所下降,80年代中后期又呈波状增加趋势。

东、中、西部年降水量的年际变化倾向率分别为10.0、12.6、12.2 mm (10a)⁻¹,表明在全球变暖背景下,祁连山区的年降水量呈增加趋势,并且降水量与年份的相关系数分别为0.2071、0.3637、0.3487,中、西部的相关系数通过0.01的显著性检验,表明中、西部年降水量增加趋势明显。东部春、夏、秋、冬季降水量的年际变化倾向率分别为3.7、0.2、-0.4、1.0 mm·(10a)⁻¹,中部分别为0.4、6.9、1.0、0.3 mm·(10a)⁻¹,西部分别为5.5、

表4 祁连山区年、季平均降水量距平的年代际变化(单位:mm)

Tab. 4 Interdecadal variation of annual and seasonal mean precipitation in Qilian Mt. region (mm)

| 年代 | 20世纪 | | | | 2000-2005年 | |
|----|------|-------|-------|------|------------|-------|
| | 60年代 | 70年代 | 80年代 | 90年代 | | |
| 东部 | 春季 | -3.8 | -12.0 | 6.9 | 5.5 | 5.3 |
| | 夏季 | -16.6 | 7.8 | 18.1 | -4.9 | -6.9 |
| | 秋季 | 2.3 | 4.9 | -0.8 | -13.9 | 14.3 |
| | 冬季 | -2.0 | -1.6 | 1.0 | 1.7 | 1.5 |
| 中部 | 全年 | -26.0 | -6.9 | 29.4 | -7.5 | 18.4 |
| | 春季 | 7.4 | -11.2 | 2.5 | -1.5 | 4.6 |
| | 夏季 | -23.6 | 1.3 | 17.3 | 10.8 | -9.8 |
| | 秋季 | -3.2 | 9.2 | -5.7 | -11.6 | 18.8 |
| 西部 | 冬季 | -0.7 | -0.6 | 1.1 | 0.1 | 0.0 |
| | 全年 | -29.4 | -4.5 | 20.0 | 2.7 | 18.3 |
| | 春季 | -6.7 | -9.8 | 7.3 | -2.5 | 19.8 |
| | 夏季 | -28.5 | 20.0 | 13.5 | 7.7 | -20.8 |
| | 秋季 | -1.5 | 1.8 | -3.7 | -4.1 | 12.2 |
| | 冬季 | -3.0 | -0.1 | 0.0 | 0.9 | 3.5 |
| | 全年 | -39.7 | 11.9 | 17.0 | 2.0 | 14.6 |

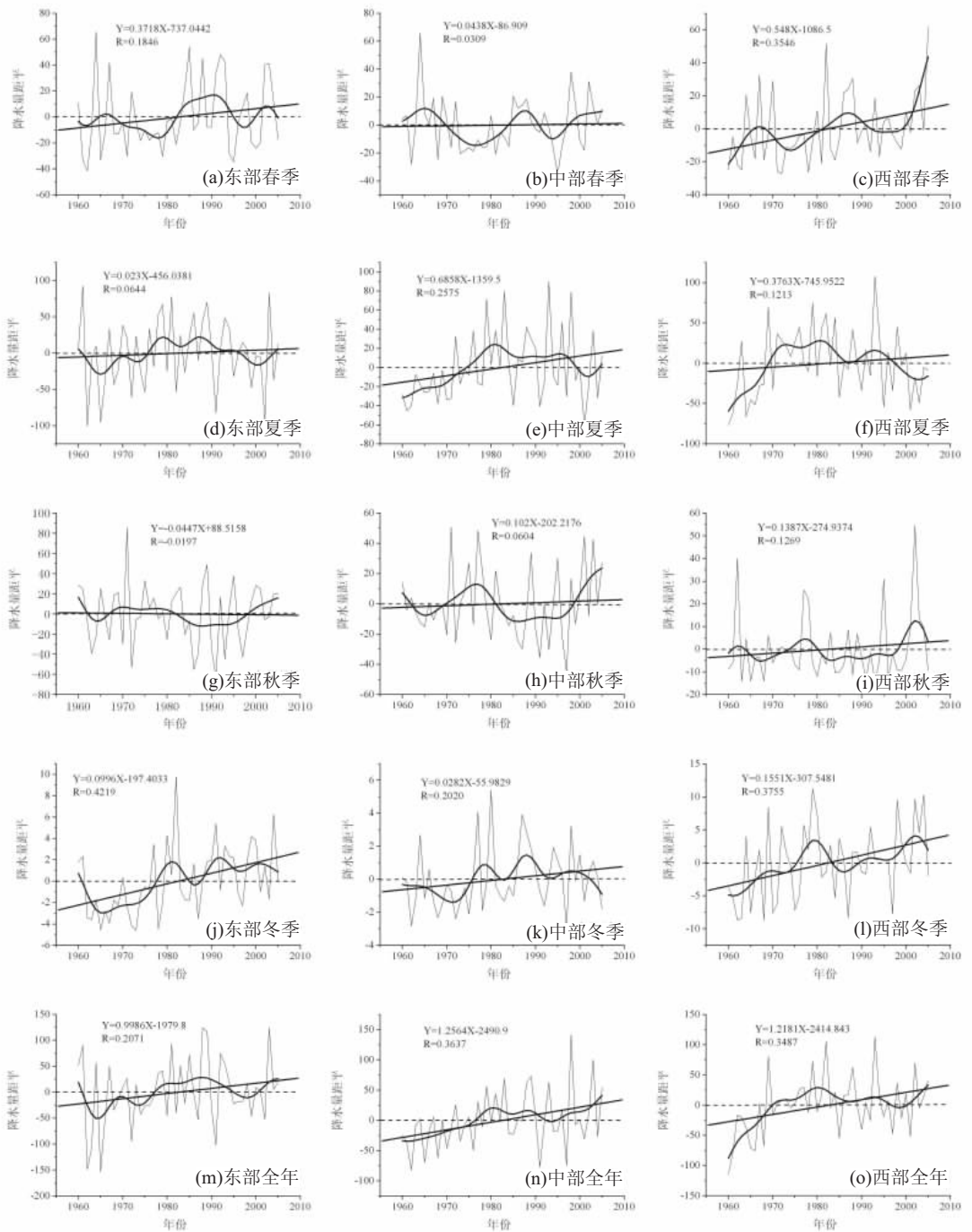


图4 祁连山区年、季平均降水量的年际变化趋势 (1960-2005年)

Fig. 4 Interannual variation of annual and seasonal mean precipitation in Qilian Mt. region (1960-2005)

3.8、1.4、1.6 $\text{mm}\cdot(10\text{a})^{-1}$, 表明除东部秋季降水量呈减少趋势外, 其他季节都呈增加趋势, 其中东、西部春季增加幅度最大, 夏季次之, 而中部夏季增加幅度最大。东部春、夏、秋、冬季降水量与年份的相关系数分别为0.1846、0.0644、-0.0197、0.4219, 中部分别为0.0309、0.2575、0.0604、0.2020, 西部分别为0.3546、0.1213、0.1269、0.3755, 表明东部冬季降水量增加趋势明显, 西部冬、春季增加趋势明显, 但中部四季增加趋势都

不明显。据朱锦红等人研究^[29]，20 世纪 60 年代以后，特别是 80 年代中期以来，对流层中纬度西风有明显加强的趋势。李栋梁等人研究^[12]指出，80 年代中期至 90 年代，冬季 (1 月) 我国西北地区西风偏弱，南风偏强，有利于源自印度洋及西太平洋的南方水汽向北输送，而偏弱西风输送的水汽也在增强，有利于凝结降水。可见，祁连山区东、西部春季降水量增加幅度大，冬季降水量增加显著，这是对西风势力增强和南来水汽增多的响应。

3.2.3 降水量变化的空间分异 祁连山区的降水量普遍呈增加趋势，但增加幅度有很大的区域差异 (图 5)：1) 春季降水量变化的空间差异比较大，东部表现为南北差异，降水量增加幅度从南到北呈增大趋势，而中部降水量明显减少，西部表现为东西差异，降水量增加幅度从东到西呈增大趋势，但其东部降水量明显减少；2) 夏季降水量变化的空间差异也比较大，但东、中、西部均表现为东西差异，东部降水量增加幅度从东到西呈减小趋势，其西部降水量明显减少，而中部降水量增加幅度从东到西是“增大—减小—增大”，西部降水量增加幅度从东到西呈减小趋势；3) 秋季降水量的空间变化与春、夏季明显不同，主要表现为南北差异。以黑河干流为界，中东部降水量从南到北呈增加趋势，其南部降水量减少，北部增加，并且南部减少幅度从南到北呈减小趋势，北部增加幅度从南到北呈增大趋势，而中西部降水量从南到北呈减少趋势，其南部降水量增加，北部减少，并且南部增加幅度从南到北呈减小趋势，北部减小幅度从南到北呈增大趋势；4) 冬季降水量变化的空间差异比较特殊，即表现出了东西差异，也表现出南北差异。以黑河干流为界，中东部降水量从东到西呈减少趋势，从南到北呈增加趋势，其西南部降水量明显减少，而中西部降水量从东到西为先减少后增加，其中东部降水量从南到北呈减少趋势；5) 季节降水量变化对年降水量变化产生很大影响，但东、中、西部年降水量均呈增加趋势。不过东部表现为东西差异，降水量增加幅度从东到西呈减小趋势，而中、西部表现为南北差异，降水量增加幅度从南到北呈减小趋势。

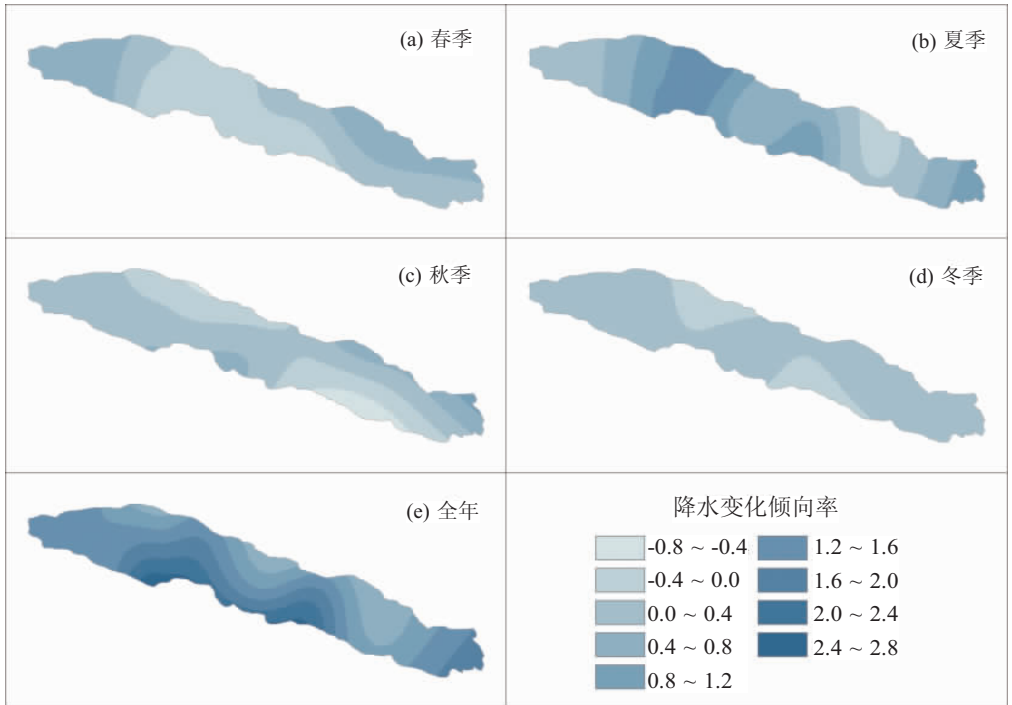


图 5 祁连山区年、季降水量变化倾向率的空间分布 (1960-2005 年)

Fig. 5 The regional distribution of annual and seasonal variation of precipitation in Qilian Mt. region (1960-2005)

4 气候年际变化的突变分析

从检验结果看(表5),除Cramer法没有检验出降水的突变外,不同方法对气温突变的检验结果基本一致,而降水突变的检验结果不一致,说明祁连山区气温的突变明显,而降水的突变不明显。

祁连山区的气温突变也具有一定的区域差异:春季气温东、中、西部突变年份一致,都在1997年发生突变;夏季气温东部在1997年发生突变,而中、西部在1994、1997年发生突变,但1997年t值的波峰比1994年高,说明1997年气温突变比1994年更明显;秋季东、西部在1987年发生突变,而中部在1982年发生突变,中部突变年份早于东、西部;冬季气温东、中、西部突变年份也一致,都在1985年发生突变;季节气温的变化对年平均气温变化有一定影响,根据季节气温突变的年份推断,年平均气温有可能在1987、1997年发生突变。总体来看,祁连山区春、夏季气温在1997年发生突变,而秋、冬季气温大致在1985年左右发生突变,秋、冬季气温突变年份早于春、夏季,并且与我国西北地区气温突变年份基本一致,而春、夏季突变比我国西北地区气温突变晚10年^[28]。由于秋、冬季升温幅度大于春、夏季,可以推断年平均气温在1987年比1997年突变更明显。

祁连山区降水突变虽不明显,但也存在一定的区域差异:春季降水中部没有发生突变,东部有可能在1982年左右发生突变,而西部有可能在2001年左右发生突变,降水表现为突变前偏少,突变后偏多;夏季降水东部没有发生突变,中部在1972年发生突变,而西部在1969年发生突变,因为1972年是中部t值的最高波峰,1969年是西部t值的最高波峰,降水表现为突变前偏少,突变后偏多;秋季降水突变不明显,东、中、西部没有发生突变,降水变化比较稳定;冬季降水突变较明显,

表5 祁连山区年、季气候突变年份分析

Tab. 5 Analysis of annual and seasonal abrupt change of climate in Qilian Mt. region

| | | 气温突变 | | | 降水突变 | | |
|----|---------|--------------------|-------------------------------|--------------------|----------------------------|----------------------------|------------------|
| | | 滑动T检验法 | Cramer法 | M-K法 | 滑动T检验法 | M-K法 | |
| 东部 | 春季 | 1997*** | 1997** | 1997* 2001* | 1984* | 1980** | |
| | 夏季 | 1997*** | 1988*** | 1997*** | - | - | |
| | 秋季 | 1987*** | 1987*** | 1987*** | - | - | |
| | 冬季 | 1985*** | 1985** | 1987*** 1996*** | 1977*** 1980*** | 1980*** | |
| | 全年 | 1987*** 1997*** | 1987*** | 1993*** | - | 1980*** | |
| | 中部 | 春季 | 1997*** | 1996** | 1996* 2001* | - | - |
| | | 夏季 | 1994*** 1997*** | 1994** | 1997** | 1972** | 1966** |
| | | 秋季 | 1982*** 1987*** 1998*** | 1982*** | 1982*** | 2001* | - |
| | | 冬季 | 1985*** | 1985** | 1985*** | 1976* | 1977* 1979* |
| | | 全年 | 1987*** 1997*** | 1987*** | 1992*** | 1972** 1977** 1979** | 1967** 1971** |
| | | 西部 | 春季 | 1997*** | 1997*** | 1997* 2001* | 2002** |
| | 夏季 | | 1994*** 1997*** | 1994** | 1997* | 1969*** | 1961** 2001** |
| 秋季 | 1988*** | | 1977** 1987** | 1987*** | 2001* | - | |
| 冬季 | 1985*** | | 1985* | 1986*** | 1969** 1972** 1977** | 1967** 1969** 1972** | |
| 全年 | 1997*** | | 1987*** | 1993*** | 1967*** 1969*** | 1967*** | |

注: *、**、***分别表示通过0.05、0.01、0.001置信度检验。

东部在 1980 年发生突变, 而中部在 1977 年左右发生突变, 西部在 1969、1972 年发生突变, 但 1972 年 t 值的波峰比 1969 年高, 说明前者的突变比后者大, 东、中、西部降水都表现为突变前偏少, 突变后偏多; 年降水东部没有突变, 而中部在 1972 年发生突变, 西部有在 1967 年发生突变, 降水表现为突变前偏少, 突变后偏多。根据文献[30]中东亚夏季风强度指数累积距平曲线、印度夏季风强度指数累积距平曲线和北大西洋涛动指数曲线看出, 东亚夏季风强度在 1980 年开始加强, 1987 年以后明显势力增强, 印度夏季风在 1987 年以后势力也明显增强, 而中纬度西风强度在 1964 年开始加强, 1969 年以后明显势力增强。说明东、中、西部降水分别在 1980、1972、1969 年有突变, 中、西部降水量开始增多的年份比东部早, 这是不同环流系统影响造成的结果。

5 结论

(1) 祁连山区气温在 20 世纪 80 年代中后期大幅度升高, 90 年代以后气候明显变暖, 这与我国和西北地区气温变化规律基本一致, 对全球气候变暖响应比较明显。东、中、西部除春季增温不明显外, 其他季节增温都比较明显, 特别是秋、冬季升温显著, 而且增温幅度比较大。全年气温变化在空间上表现为南北差异, 以黑河干流为界, 中东部气温的上升幅度从南到北有增大趋势, 而中西部气温的上升幅度从南到北呈减小趋势。

(2) 祁连山区降水量经历了“少—多—少—多”的变化过程, 90 年代中后期以后降水量有增加的趋势, 中、东部秋季降水量增加明显, 西部春季降水量增加显著, 这是对全球变暖背景下西南和东南夏季风势力增强, 以及西风环流系统势力加强的响应。全年降水变化在空间上差异明显, 东部表现为东西差异, 降水量增加幅度从东到西呈减小趋势, 而中、西部表现为南北差异, 降水量增加幅度从南到北有减小趋势。

(3) 祁连山区气温突变比较明显, 春、夏季在 1997 年发生突变, 而秋、冬季在 1985 年左右发生突变, 秋、冬季突变年份早于春、夏季, 与我国西北地区气温突变年份基本一致, 而春、夏季突变比我国西北地区气温突变晚 10 年。由于秋、冬季升温幅度大于春、夏季, 说明年平均气温在 1987 年比 1997 年突变更明显。降水量突变不明显, 东、中、西部分别在 1980、1972、1969 年有可能发生突变, 降水量开始增加的时间从东到西有所提前。

参考文献 (References)

- [1] The Report of IPCC Climate Change 2007. The Physical Basis Climate. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [2] Ding Yihui, Ren Guoyu, Shi Guangyu et al. National assessment report of climate change (I): Climate change in China and its future trend. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 1(2): 3-8. [丁一汇, 任国玉, 石广玉等. 气候变化国家评估报告(I): 中国气候变化的历史和未来趋势. *气候变化研究进展*, 2006, 1(2): 3-8.]
- [3] Wang Shaowu, Ye Jinlin, Gong Daoyi et al. Construction of mean annual temperature series for the last 100 years in China. *Quarterly Journal of Applied Meteorology*, 1998, 9(4): 392-401. [王绍武, 叶瑾琳, 龚道溢等. 近百年中国气温序列的建立. *应用气象学报*, 1998, 9(4): 392-401.]
- [4] Ding Yihui, Dai Xiaosu. Temperature variation in China during the last 100 years. *Meteorological Monthly*, 1994, 20(12): 19-26. [丁一汇, 戴晓苏. 中国近百年来的温度变化. *气象*, 1994, 20(12): 19-26.]
- [5] Chen Longxun, Zhu Wenqin, Wang Wen et al. Study on climate change in China in recent 45 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 1998, 56(3): 257-271. [陈隆勋, 朱文琴, 王文等. 中国近 45 年来气候变化的研究. *气象学报*, 1998, 56(3): 257-271.]
- [6] Ren Guoyu, Xu Mingzhi, Chu Ziyang et al. Change of surface air temperature in China during 1951-2004. *Climate and Environment Research*, 2005, 10(4): 717-727. [任国玉, 徐铭志, 初子莹等. 近 54 年中国地面气温变化. *气候与环境研究*, 2005, 10(4): 717-727.]
- [7] Wang Zunya, Ding Yihui, He Jinhai et al. An updating analysis of the climate change in China in recent 50 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(2): 228-236. [王遵娅, 丁一汇, 何金海等. 近 50 年来中国气候变化特征的再分析. *气*

象学报, 2004, 62(2): 228-236.]

- [8] Chen Longxun, Zhou Xiuji, Li Weiliang et al. Characteristics of the climate change and its formation mechanism in China in last 80 years. *Acta Meteorologica Sinica*, 2004, 62(5): 634-646. [陈隆勋, 周秀骥, 李维亮等. 中国近80年来气候变化特征及其形成机制. *气象学报*, 2004, 62(5): 634-646.]
- [9] Ye Baisheng, Li Chong, Yang Daqing et al. Variation trend of precipitation and its impact on water resources in China during last 50 years (I): Annual variation. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2004, 26(5): 587-594. [叶柏生, 李翀, 杨大庆等. 我国过去50年来降水变化趋势及其对水资源的影响(I): 年系列. *冰川冻土*, 2004, 26(5): 587-594.]
- [10] Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2002, 24(3): 219-226. [施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号影响和前景初步探讨. *冰川冻土*, 2002, 24(3): 219-226.]
- [11] Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang et al. Discussion on the present climate change from warm-dry to warm-wet in Northwest China. *Quaternary Sciences*, 2003, 23(2): 152-164. [施雅风, 沈永平, 李栋梁等. 中国西北部气候由暖干向暖湿转型的特征和趋势探讨. 第四纪研究, 2003, 23(2): 152-164.]
- [12] Li Dongliang, Wei Li, Cai Ying et al. The present facts and the future tendency of the climate change in Northwest China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2003, 25(2): 135-142. [李栋梁, 魏丽, 蔡英等. 中国西北现代气候变化事实与未来趋势展望. *冰川冻土*, 2003, 25(2): 135-142.]
- [13] Chen Rensheng, Kang Ersi, Yang Jianping et al. Variance tendency in the 50-year annual meteorological and hydrological series of Hexi region of Gansu Province. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2002, 38(2): 163-170. [陈仁升, 康尔泗, 杨建平等. 甘肃河西地区近50年气象和水文序列的变化趋势. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2002, 38(2): 163-170.]
- [14] Li Dongliang, Liu Honglan. Responding of Heihe river runoff to decadal climate change in Qilian Mountain Area. *Journal of Desert Research*, 2004, 24(4): 385-391. [李栋梁, 刘洪兰. 黑河流量对祁连山气候年代际变化的响应. *中国沙漠*, 2004, 24(4): 385-391.]
- [15] Gong Jiadong, Li Xiaoyan. Spatial variation of climate for different landscape area in the Heihe river basin. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2001, 23(4): 423-431. [龚家栋, 李小雁. 黑河流域不同下垫面区域的气候变化特征. *冰川冻土*, 2001, 23(4): 423-431.]
- [16] Lan Yongchao, Ding Yongjian, Kang Ersi. Variations and trends of temperature and precipitation in the mountain drainage basin of the Heihe River in recent 50 years. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(5): 723-727. [蓝永超, 丁永建, 康尔泗. 近50年来黑河山区汇流区温度及降水变化趋势. *高原气象*, 2004, 23(5): 723-727.]
- [17] Lan Yongchao, Kang Ersi, Zhang Jishi et al. Air temperature series and its changing trend in Qilian mountains area since 1950s. *Journal Desert Research*, 2001, 21(suppl.): 53-57. [蓝永超, 康尔泗, 张济世等. 祁连山区近50来的气温序列及变化趋势. *中国沙漠*, 2001, 21(增刊): 53-57.]
- [18] Ding Yongjian, Ye Baisheng, Liu Shiyin. Impact of climate change on the alpine stream flow during the past 40 a in the middle part of the Qilian Mountains, northwestern China. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2000, 22(3): 193-199. [丁永建, 叶柏生, 刘时银. 祁连山中部地区40a来气候变化及其对径流的影响. *冰川冻土*, 2000, 22(3): 193-199.]
- [19] Lan Yongchao, Wu Yanqing, Kang Ersi et al. Response of runoff from the northern slope of the Qilian mountain to global climatic changes. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2001, 37(4): 125-132. [蓝永超, 仵彦卿, 康尔泗等. 祁连山北麓出山径流对气候变化的响应. *兰州大学学报(自然科学版)*, 2001, 37(4): 125-132.]
- [20] Zhang Jie, Han Tao, Wang Jian. Changes of snow-cover area and snow line altitude in the Qilian Mountains, 1997-2004. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2005, 27(5): 649-654. [张杰, 韩涛, 王建. 祁连山区1997-2004年积雪面积和雪线高度变化分析. *冰川冻土*, 2005, 27(5): 649-654.]
- [21] Wang Jian, Li Shuo. Impact of climate change on snowmelt runoff in the mountainous regions of Northwest China. *Science in China (Series D)*, 2005, 35(7): 664-670. [王建, 李硕. 气候变化对中国内陆干旱山区融雪径流的影响. *中国科学(D辑)*, 2005, 35(7): 664-670.]
- [22] Zhang Jie, Li Dongliang. Analysis on distribution character of rainfall over Qilian mountain and Heihe valley. *Plateau Meteorology*, 2004, 23(1): 81-88. [张杰, 李栋梁. 祁连山及黑河流域降雨量的分布特征分析. *高原气象*, 2004, 23(1): 81-88.]
- [23] Tang Maocang. The distribution of precipitation in Mountain Qilian. *Acta Geographica Sinica*, 1985, 40(4): 323-332. [汤懋苍. 祁连山区降水的地理分布特征. *地理学报*, 1985, 40(4): 323-332.]
- [24] Fu Congbin, Wang Qiang. The definition and detection of the abrupt climate change. *Scientia Atmospherica Sinica*, 1992, 16(4): 482-493. [符淙斌, 王强. 气候突变的定义和检测方法. *大气科学*, 1992, 16(4): 482-493.]
- [25] Wei Fengying. *Modern Technology of Statistics, Diagnosis and Forecast for Climate*. Beijing: China Meteorological Press, 1999. 62-67. [魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术. 北京: 气象出版社, 1999. 62-76.]

- [26] Ma Zhuguo, Shao Lijuan. Relationship between dry/wet variation and the Pacific decade oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years. *Chinese Journal of Atmospheric Science*, 2006, 30(3): 464-474. [马柱国, 邵丽娟. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系. *大气科学*, 2006, 30(3): 464-474.]
- [27] Ren Guoyu, Guo Jun, Xu Mingzhi et al. Climate changes of China's mainland over the past half century. *Acta Meteorologica Sinica*, 2005, 63(6): 942-956. [任国玉, 郭军, 徐铭志等. 近 50 年中国地面气候变化基本特征. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.]
- [28] Yu Shuqiu, Lin Xuechun, Xu Xiangde. The climatic change in Northwest China in recent 50 years. *Climatic and Environmental Research*, 2003, 8(1): 9-18. [于淑秋, 林学椿, 徐祥德. 我国西北地区近 50 年降水和温度的变化. *气候与环境研究*, 2003, 8(1): 9-18.]
- [29] Zhu Jinhong, Wang Shaowu, Zhang Xiangdong. Basal model of atmospheric breaking under the background of global warming. *Progress in Natural Science*, 2003, 13(4): 417-421. [朱锦红, 王绍武, 张向东等. 全球气候变暖背景下的环流基本模态. *自然科学进展*, 2003, 13(4): 417-421.]
- [30] Yang Jianping, Ding Yongjian, Chen Rensheng. The fluctuation of day and wet climate boundary and its causal analyses in China. *Acta Meteorologica Sinica*, 2003, 63(3): 364-373. [杨建平, 丁永建, 陈仁升. 近 50 年中国干湿气候界线波动及其成因初探. *气象学报*, 2003, 63(3): 364-373.]

The Regional Difference and Catastrophe of Climatic Change in Qilian Mt. Region

JIA Wenxiong^{1,2}, HE Yuanqing¹, LI Zongxing¹, PANG Hongxi¹,
YUAN Lingling¹, NING Baoying¹, SONG Bo¹, ZHANG Ningning¹

(1. *The State Key Laboratory of Cryosphere Science, Cold and Arid Region Environment and Engineering Research Institute, CAS, Lanzhou 730000, China;*

2. *College of Geography and Environment Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, China)*

Abstract: Based on climatic data of 8 stations in the Qilian Mt. region, methods of regression analysis and moving average were used to study the climatic changing trend of the study area under the background of global warming. Results showed that the temperature increased after the mid-1980s and climatic warming has accelerated since the 1990s due to the rise of temperature in autumn and winter. The precipitation experienced a changing trend, that is lower (the 1960s)--higher (the 1980s)--lower (the 1990s)--higher (after 2000). The regional difference in temperature rise is, with the main Heihe River as the divide, characterized by the fact that it is increasing from south to north in the middle-eastern Qilian Mt. region while decreasing from south to north in the middle-western. Also the precipitation presents obvious spatial change. The rising range is decreasing from east to west in the eastern Qilian Mt. region, while decreasing from south to north in the western. What's more, methods of T checking, Cramer and Mann-Kendall were employed to analyze climatic break, indicating that the abrupt change of temperature was more noticeable than that of precipitation in the study area. The abrupt change of spring and summer temperature happened in 1997 while that of autumn and winter appeared in 1985. Moreover, the temperature abrupt change in 1987 was more obvious than in 1997 because the scale of temperature rise was higher in autumn and winter than in spring and summer, and the precipitation break in the eastern, middle and western regions happened in 1980, 1972 and 1969, respectively.

Key words: interannual changing trend; abrupt change of climate; Qilian Mt. region