

1960—2014年祁连山南坡及其附近地区 降水时空变化特征

付建新^{1,2}, 曹广超^{1,2}, 李玲琴^{1,2}, 曹生奎^{1,2}, 唐仲霞^{1,2},
杨晓敏^{1,2}, 蒋刚^{1,2}, 虞敏^{1,2}, 袁杰^{1,2}, 刁二龙^{1,2}

(1. 青海师范大学 青海省自然地理与环境过程重点实验室, 西宁 810008; 2. 青海师范大学 地理科学学院, 西宁 810008)

摘要:祁连山区的生态是国家当前与今后重点保护的对象,该区域是“丝绸之路经济带”重要的水源涵养功能区,降水的多少直接影响生态环境的好坏,所以在新形势下,研究祁连山地区降水的变化具有重要的理论与现实意义。利用1960—2014年祁连山南坡及其附近19个气象站的降水日数与降水强度数据,使用线性趋势法、相关分析法、多项式趋势法、5年滑动平均、Mann-Kendall检验、滑动 t 检验、ArcGIS方法对其时间变化与空间分布进行了详细研究。多年降水日数与降水强度整体上表现为缓慢波动增长趋势,增长率分别为0.030 d/a与0.009 mm/a;除了冬季降水日数为增加趋势,其余季节均变化不大,夏季降水强度对全年贡献最大;20世纪90年代降水日数的变化趋势为负增长(-0.326 d/a),降水强度增长最大(0.381 mm/10 a),年代际变化波动较大。多年平均降水日数与降水量由于受东南季风与地形影响,整体上呈现出由东南向西北递减的趋势,南坡降水明显多于北坡的特点;降水日数与降水强度正负增长站点比例分别为10:9与17:2;四季降水强度正增长所占比例比降水日数正增长所占比例大,除了秋季突变不明显,春、夏、冬均发生了突变;各站点年代际变化的空间分布存在差异。

关键词:降水日数;降水强度;时空分布;祁连山

中图分类号:P426.6

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2018)04-0152-10

Analysis of Temporal and Spatial Variation Characteristics of Precipitation in the South Slope of Qilianshan Mountains and Its Nearby Regions During 1960—2014

FU Jianxin^{1,2}, CAO Guangchao^{1,2}, LI Lingqin^{1,2}, CAO Shengkui^{1,2}, TANG Zhongxia^{1,2},
YANG Xiaomin^{1,2}, JIANG Gang^{1,2}, YU Min^{1,2}, YUAN Jie^{1,2}, DIAO Erlong^{1,2}

(1. Key Laboratory of Qinghai Province Physical Geography and Environmental Process, Qinghai Normal University, Xining 810008, China; 2. College of Geography Science, Qinghai Normal University, Xining 810008, China)

Abstract: Qilianshan Mountain is a national ecological reserve at present and in the future, and is an important water conservation function area of ‘Silk Road Economic Belt’, the precipitation directly affects the quality of the ecological environment, so in the new situation, it has important theoretical and practical significance to study the precipitation change in Qilianshan Mountains area. Based on precipitation day and precipitation intensity data observed by 19 meteorological stations in the south slope of Qilianshan Mountains and its nearby regions from 1960 to 2014, the methods of linear regression, correlation analysis, polynomial trend, moving mean Mann-Kendall and moving test and ArcGIS were used to analyze the temporal variability and spatial distribution of air temperature. The results are as follows. The annual precipitation days and precipitation intensity showed a slow fluctuation growth trend, and the growth rates were 0.030 d/year and 0.009 mm/year, respectively; except for winter precipitation, the trend of diurnal variation was increasing, while the rest of the seasons had little change. The summer precipitation intensity had the great contribution to the annual precipitation; the variation trend of precipitation days in 1990s was negative growth (-0.326 d/year), and the trend of precipitation intensity was the biggest (0.381 mm/decade), and the interdecadal variation fluctuated greatly. The average number of days of precipitation and precipitation were influenced by southeast monsoon and terrain, showing an overall decreasing trend from southeast to northwest. The precipitation of

收稿日期:2017-09-07

修回日期:2017-10-08

资助项目:国家自然科学基金(41361005);国家重点研发计划项目(2017YFC0404304)

第一作者:付建新(1980—),男,山西大同人,博士研究生,研究方向为环境地表过程与生态响应。E-mail:fujx@163.com

通信作者:曹广超(1971—),男,山东苍山人,教授,博士生导师,主要从事青藏高原地区环境变化与地理信息系统应用研究。

E-mail:caoguangchao@126.com

the southern slope was more than precipitation of the north slope; ratios of the number of meteorological stations of precipitation days to precipitation intensity increase in both positive and negative is 10 : 9 and 17 : 2, respectively; the positive increase of precipitation intensity in the four seasons accounted for a larger proportion than the number of precipitation days, except that autumn precipitation mutation was not obvious, the mutation occurred in spring, summer and winter; and the spatial distribution of interdecadal variation of each site was different.

Keywords: precipitation day; precipitation intensity; spatial distribution; Qilianshan Mountains

IPCC 报告表明全球变暖已经是不容争辩的事实,全球变暖对降水有可能产生影响^[1]。秦大河等^[2]认为全球变暖可能造成中纬度地区降水增加,前人对于祁连山区的降水研究主要从时间尺度与空间尺度进行了分析。时间尺度包括小时、季节、年等角度。小时尺度:殷雪莲等^[3]对祁连山区 2003 年 7 月 25 日与 2005 年 6 月 30 日两次降水过程从环流背景、动力机制以及地形特征等方面做了研究。季节尺度:刘雪梅等^[4]对祁连山区夏季降水的日变化特征进行了分析;陈乾等^[5]对祁连山区 2006 年夏季降水过程从 3 类气流型进行了分析。年尺度:强芳等^[6]基于格点数据对祁连山区 1961—2012 年面雨量的特征进行了分析;魏锋等^[7]使用小波变换方法分析了祁连山地区 17 个测站 1960—2004 年 5—9 月逐日降水量的特征;张小明等^[8]对祁连山近 45 a 异常降水的时空特征进行了研究;张存杰等^[9]采用 EOF 和 REOF 等方法,研究了近 40 a 来祁连山附近气温和降水的时空分布特征。空间尺度包括流域、分段、整个区域。流域尺度:蓝永超等^[10]研究了黑河山区汇流区降水对全球变暖的响应;牛赞等^[11]对祁连山大野口流域降水特征进行了分析。分段尺度:王宁练等^[12]对祁连山中段北坡最大降水高度带进行了分析。整个区域:贾文雄^[13]对近 50 a 来祁连山及河西走廊降水的时空变化进行了研究;汤懋苍^[14]对祁连山区降水的地理分布特征进行了阐述。对降水成因的研究主要从经纬度、地形、大气环流等角度。陈少勇等^[15]认为祁连山主体的降水多于周围地区,祁连山东部降水比西部稳定;李岩瑛等^[16]分析了不同降水强度的时空分布特征及其与海拔的关系;贾文雄^[17]认为祁连山的气温与地理位置的关系存在相关性关系,降水与地理位置的关系较为复杂;程鹏等^[18]分析了高空西风急流对祁连山区降水的影响。也有学者从降水与祁连山区水源涵养的关系角度进行了阐述。常学向等^[19]研究了祁连山林区森林对降水的截留作用;张学龙等^[20]分析了祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应。前人对于祁连山区降水主要集中在时空视角、成因分析与对水源涵养的影响等方面,在方法上使用传统与信息技术结合的较少,本文主要对祁连山南坡附近的降水特征进行分析,使用传统气象分析方法与 GIS 与 SPSS 软件制图分析方法并用进行研究。

祁连山区的生态是国家当前与今后重点保护与建设的对象,该区域是“丝绸之路经济带”重要的水源涵养功能区^[21],所以在新形势下,研究祁连山南坡及其附近地区降水的变化具有重要的理论与现实意义。

1 研究区概况

本文研究区概况见图 1,核心区位于青海省境内,但是核心区气象站点较少,所以增加了外围区域的气象站点,外围区为核心区的南北两侧,分别位于青、甘两省。祁连山南坡,海拔 2 257~5 235 m,是我国重要的西北—东南走向的一系列山脉,是我国重要的地理分界线之一^[22],具有高原大陆性气候特征^[23]。祁连山南坡是青海省重要的水源涵养保护区,气候的变化直接会对当地植被等生态环境造成影响,通过研究祁连山南坡及其附近地区降水的变化为进一步研究祁连山南坡水源涵养区的生态系统等研究做铺垫。

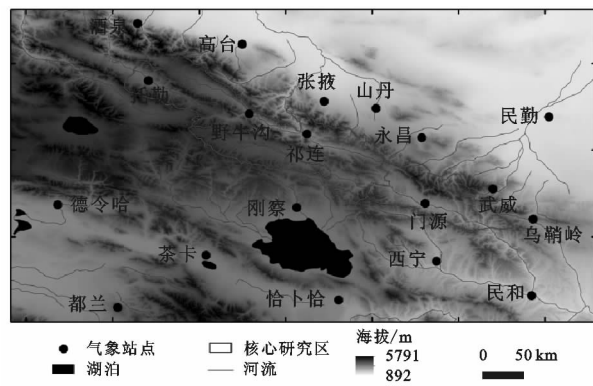


图1 祁连山南坡及其附近地区气象站点分布

2 数据来源与研究方法

本文数据来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),选取 1960—2014 年祁连山南坡及其附近地区 19 个气象站点的降水日数、降水量、降水强度数据,为了保证研究结果的准确性,所以对数据进行一致性检验的验证,对区域内平均降水序列与各站点降水的原始序列的相关性进行了检测,相关系数均在 0.793 以上,说明降水数据表现出较高的相关性,所以数据不仅能反映各站点的气候变化,同时也能反映出区域内的气候变化;降水日数为日降水量 ≥ 0.1 mm 日数的总和,降水强度为各等级降水总量与其对

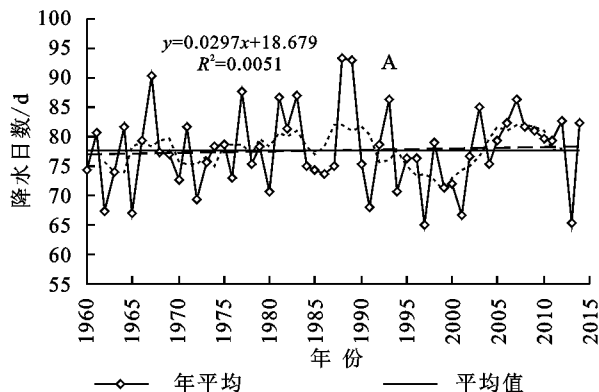
应降水日数之比。研究方法包括线性趋势法、相关分析法、多项式趋势法、5 a 滑动平均、Mann-Kendall 与滑动 t 检验^[24-25]法,利用 ArcGIS 10.0 对降水日数与降水强度的空间变化做制图分析,对于文中显著性检验,使用 SPSS 统计学软件中的相关性分析模块,对时间序列与原序列变量之间的相关系数进行不同程度的显著性检验($p < 0.05$, $p < 0.01$)。

3 降水的时间序列变化

3.1 多年降水日数与降水强度年际变化趋势

祁连山区的降水受到 3 种气流的影响:其一来自太平洋的东南季风带来的湿润水汽,其二受到来自大西洋冷湿气流的影响,夏季还要受到翻越高大青藏高原之后的印度洋暖湿气流的影响^[26]。

祁连山南坡及其附近地区 1960—2014 年多年降水日数(图 2A)为缓慢增长趋势(0.030 d/a),其平均值为



77.67 d,降水日数大于平均值的年份占 49.09%,小于平均值的年份占 50.91%;降水日数最多的为 93.42 d(1988 年),最少的为 64.89 d(1997 年),二者相差 28.53 d;90 d 以上占 5.45%,80 d 以上占 32.73%;从 5 a 滑动平均来看,多年降水日数 20 世纪 90 年代以后较以前变化大,大致分为 2 个大周期(20 世纪 80 年代中后期—21 世纪初期、21 世纪初期以来)与 3 个小周期(20 世纪 60 年代中期—70 年代中期、70 年代中期—80 年代初期、80 年代初期—后期)。降水强度(图 2B)整体为缓慢波动增长趋势(0.009 mm/a),降水强度的平均值为 3.247 mm/a,52.73%的年份降水强度超过了均值,47.27%的年份降水强度低于均值,最大值为 3.79 mm/a(2014 年),最小值为 2.63 mm/a(1962 年)二者相差 1.16 mm/a;从 5 a 滑动平均来看,其波动较降水日数小,期间存在 2 个大的周期(20 世纪 60 年代中期—70 年代中期、90 年代初期—21 世纪初期),同时还并存若干小的周期。

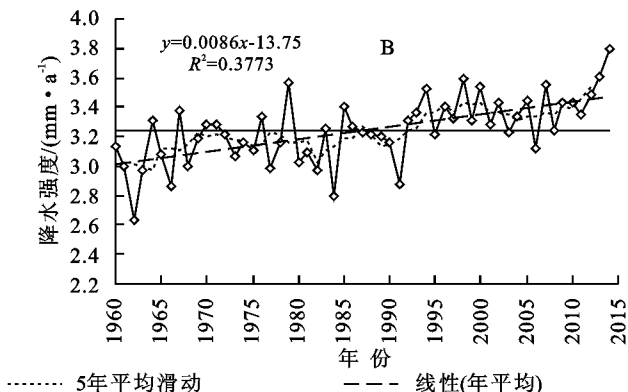


图 2 祁连山南坡及其附近地区多年平均降水日数与降水强度时间变化

3.2 降水日数与降水强度的季节变化趋势

从四季降水的线性回归图(图 3)得出,春季(3 月—5 月)、夏季(6 月—8 月)、秋季(9 月—11 月)、冬季(12 月—翌年 2 月)的降水日数倾斜率分别为:−0.000 2, 0.002 3, −0.000 04, 0.008 2 d/a,除了冬季降水日数为增加趋势,其余季节变化趋势不大,四季的降水日数的增加趋势均小于多年平均降水日数(0.034 9 d/a);降水强度倾斜率分别为:0.005 5 mm/a($p < 0.01$),0.013 6 mm/a($p < 0.01$),0.007 2 mm/a($p < 0.05$),0.005 mm/a($p < 0.01$),均通过了显著性检验,四季降水强度均为增加趋势,上升的速率由大到小依次为:夏、秋、春、冬,夏季降水强度的增长率高于多年平均降水强度的增长率(0.008 8 mm/a),说明夏季降水强度对全年降水贡献最大。

春季降水日数(图 3A)中最大值为 8.404 d(1967 年),最小值为 3.737 d(2013 年),二者相差 4.667 d,其中大于平均值(5.949 d)的占到 47.27%,小于平均值的占到 52.73%;5 a 滑动平均显示 3 个升降周期:20 世纪 60 年代中期—70 年代末、70 年代末—21 世纪初期、21 世纪初期—研究期末,其中第 2 个周期最长,包括了 1 个显著上升区(20 世纪 70 年代末—90

年代初)。夏季降水日数(图 3C)整体变化与春季相似,变化不明显,不同的是夏季略微上升,春季略微下降;最大值 14.754 d(1983 年)与最小值 9.702 d(1962 年)相差 5.052 d,其中大于平均值(11.908 d)的占到 45.45%;20 世纪 80 年代中期为 1 个降水日数高峰期。秋季降水日数(图 3E)变化趋势基本不变,平均值为 6.383 d,大于与小于平均值所占比重大致相当,基本上在平均值上下波动,20 世纪 70 年代中期—90 年代中期为 1 个较长下降区间,20 世纪 90 年代中期—21 世纪 10 年代初期为 1 个较长的上升区间。冬季降水日数(图 3G)的变化趋势较其他季节的变化大,呈现增长趋势(0.008 2 d/a),2008 年降水日数最多(5.035 d),比最少降水日数(1.456 d)多 3.579 d,小于平均值的比重比大于平均值的比重多 16.36%,5 a 滑动平均表现 4 个升降区间。

春季降水强度(图 3B)为上升趋势(0.005 5 mm/a),春季降水强度的平均值为 2.521 mm/a,41.82%的年份变化趋势大于均值,58.18%的年份变化趋势小于均值,最大值 3.799 mm/a(1985 年)与最小值差 1.440 mm/a(1995 年)差值较大,为 2.359 mm/a;5 a 平均滑动显示

两个大的周期,即 20 世纪 60 年代中期—80 年代中期与 20 世纪 80 年代中期—21 世纪初。夏季降水强度(图 3D)的倾斜率(0.013 6 mm/a)比春季、秋季、冬季降水强度的倾斜率分别高 0.008,0.006,0.009 mm/a;夏季降水强度范围为 3.343~5.014 mm/a,平均值为 4.298 mm/a,大于均值的比重为 52.73%,小于均值的比重为 47.27%,大致从 20 世纪 90 年代降水强度开始大于均值;5 a 滑动平均表现出 5 个周期,其中包括了多个小的

波动。秋季降水强度(图 3F)的增长率为 0.072 mm/a,平均值为 3.196 mm/a,期间包括 1 个大的周期与若干个小的周期,大的周期为 20 世纪 80 年代—90 年代中期。冬季降水强度(图 3H)的增长率(0.005 mm/a)是四季中最低的,其均值为 0.899 mm,大于均值的年份与小于均值的年份之比为 5 : 6,20 世纪 60 年代中期—70 年代中期为低于均值的 1 个较长周期,21 世纪开始了新的 1 个较长周期。

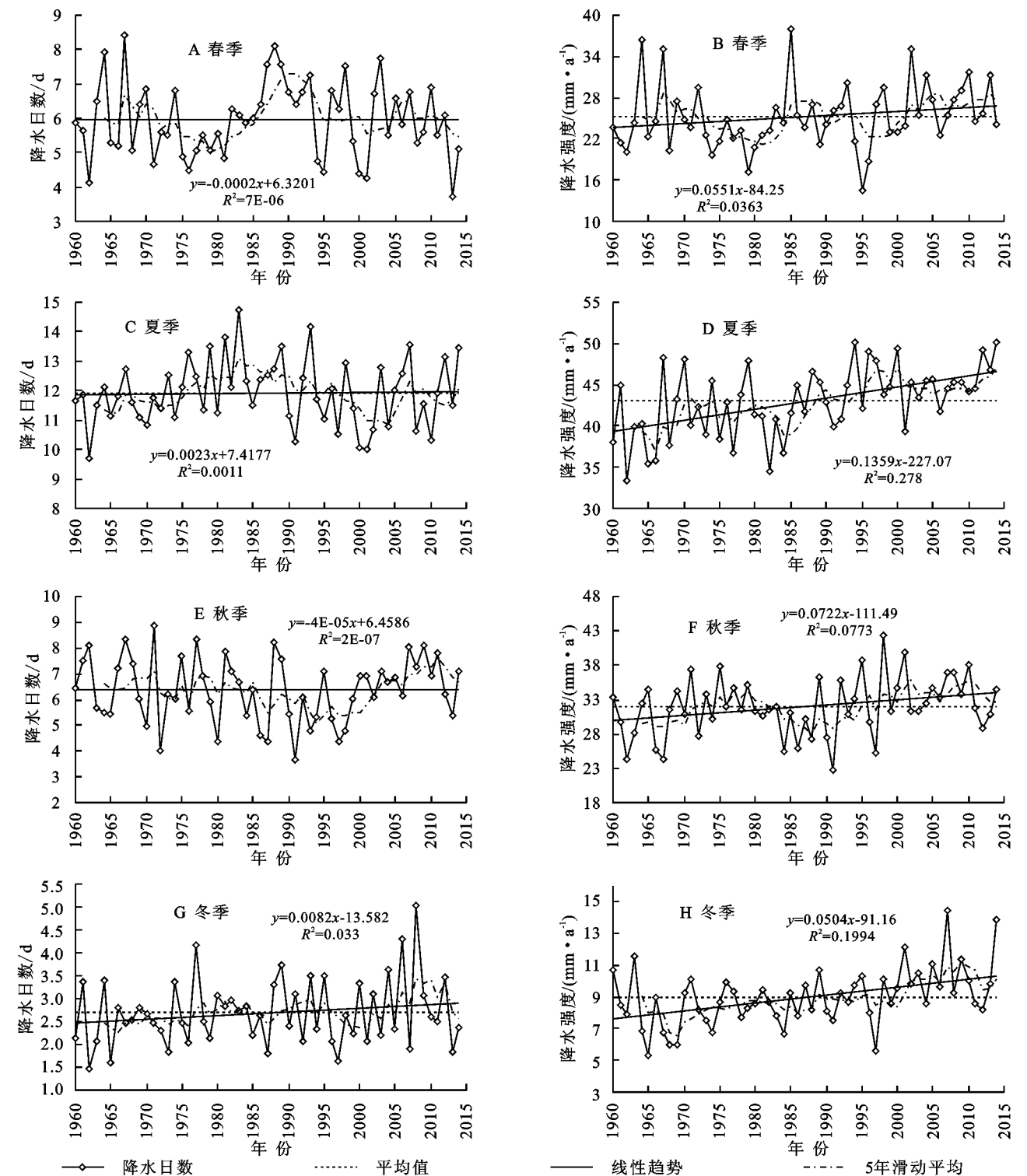


图 3 祁连山南坡及其附近地区降水日数与降水强度的季节变化

3.3 季节降水量的突变检验

春季降水量(图4A):正序列UF与反序列UB的交点是1982年,交点且位于 ± 1.96 临界线之间,所以1982年为突变开始的年份,这与贾文雄等^[27]对祁连山东部季节降水突变检验的结论一致,1986年降水量增加趋势明显,但是之后UF与UB基本没有超过临界线,UF只在1993年超过了临界线,所以突变并不明显;夏季降水量(图4B):正序列曲线UF的值于1973年大于0,之后降水量波动上升,期间UF与UB有有效的交点为3个,1972年、2008年、2010年,结合滑动 t 检验,当 $n_1=n_2=5,10$ 时,在 $\alpha=0.01$

的显著性检验,可以确定1972年为突变年份开始年份,1987—1991年、1993—2001年、2006—2009年、2010—2014年为突变时间段,一直到2010年突变明显加快;秋季降水量(图4C):突变开始的年份为2003年,但是正序列曲线UF一直没有超过临界线,突变不明显;冬季降水量(图4D):正序列UF与反序列UB的交点共有4个,为1989年、1993年、1996年、1998年,结合滑动 t 检验,当 $n_1=n_2=5,9$ 时,在 $\alpha=0.05$ 的显著性检验,确定为1998年为突变开始的年份,从1990年降水增多,尤其在2005年之后,增加趋势迅速。

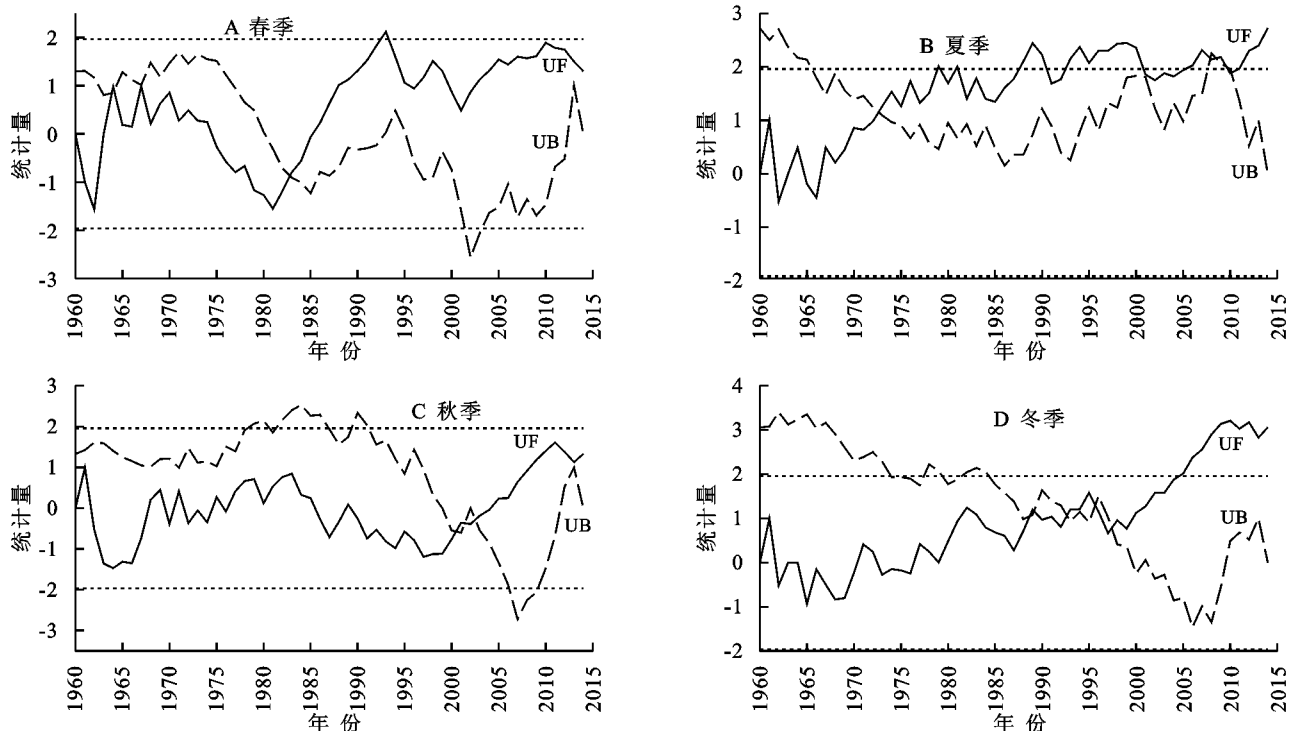


图4 祁连山南坡及其附近地区四季降水量突变检验

3.4 降水日数与降水强度的年代际变化趋势

年代际年平均降水日数(图5)由大到小依次为:81.03 d(20世纪80年代),79.97 d(2000—2014年),77.01 d(20世纪70年代),76.89 d(20世纪60年代),74.70 d(20世纪90年代),20世纪80年代与2000—2014年高于年降水日数平均值(77.67 d);20世纪80年代增长最快,为1.071 d/a,20世纪90年代为负增长(-0.326 d/a),二者相差1.397 d/a,年代际增长率波动较大。20世纪60,70,80,90年代、2000—2014年的平均降水强度分别3.055 mm,3.219 mm,3.144 mm,3.308 mm,3.448 mm,可以看出60—80年代降水强度较低,90年代之后降水强度增加明显,尤其进入21世纪降水强度增加愈加突出,这与中国60—80年代中期降水偏少,80年代中后期增多的趋势相似^[28];降水强度增长率最高的是0.381 mm/10 a(20世纪90年代),增

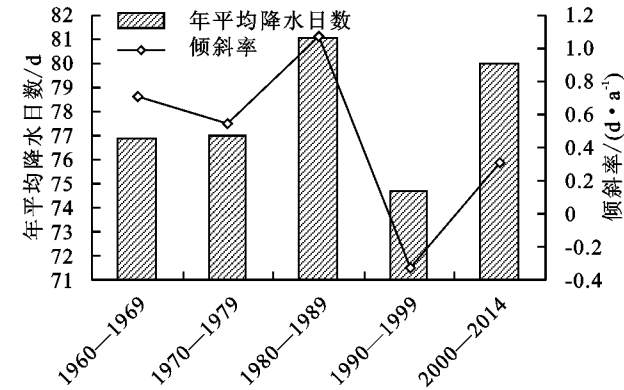
长率最低的是0.074 mm/10 a(20世纪70年代),大致在0~0.4 mm/10 a。

4 降水的空间变化

4.1 多年平均降水日数与降水量空间分布

从图6中可以看出,多年平均降水量与平均降水日数均呈现带状分布,大致为西北—东南走向,由东南向西北递减,主要因为夏季风东南季风对此区域影响由东南向西北减弱;研究区多年平均降水日数与降水量的均值分别为80.76 d与267.79 mm,降水日数排在前4位即降水日数大于100 d的站点为乌鞘岭、门源、野牛沟、祁连、刚察,这些站点均位于东南部,降水量大于400 mm的站点为门源、野牛沟、祁连、乌鞘岭,这4个站点同样均位于东南部;位于西北部的高台、酒泉降水日数大约分别为45,40 d,降水量大约分

别为 109.88 mm;祁连山南坡与北坡的降水量之比为 4 : 1,南坡多年降水量最多与最少的站点分别为门源(520.86 mm)、德令哈(180.39 mm),北坡多年降水量最多与最少的站点分别为永昌(204.29 mm)、酒泉(87.51 mm);南坡多年降水日数最多与最少的站点分别为乌鞘岭(136.53 d/a)、德令哈(52.53 d/a),北坡多年降水日数最多与最少的站点分别为永昌(7.82 d/a)、民



勤(39.46 d/a),南坡降水明显多于北坡,因为祁连山南坡为东南季风的迎风坡,来自西北太平洋的暖湿气流顺着湟水谷地沿着祁连山南坡不断爬升,受到地形的抬升作用,在一定海拔高度降水量增加,南坡形成了多雨区,北坡处于东南季风的背风坡,水汽受到山地阻挡,成为雨影区,气候类型为温带大陆性气候,海洋水汽影响弱,降水量少。

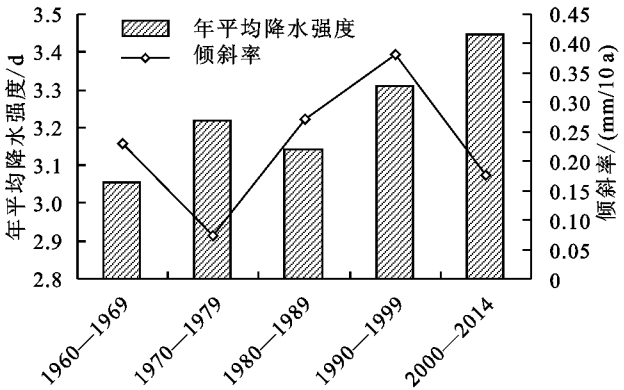


图 5 祁连山南坡及其附近地区降水日数与降水强度的年代际变化

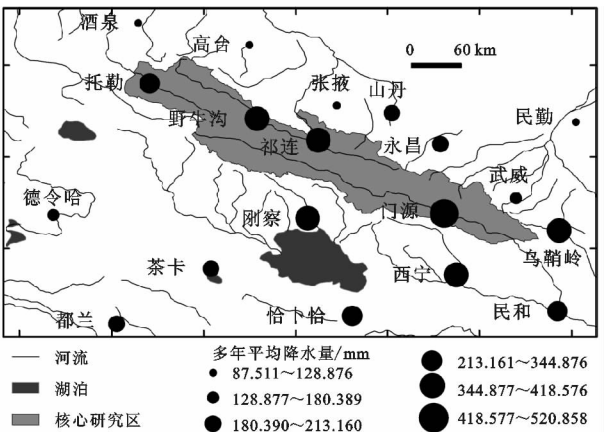
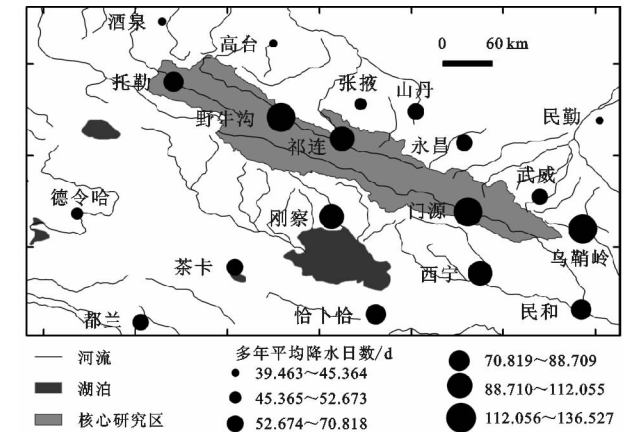


图 6 祁连山南坡及其附近地区多年平均降水量与平均降水日数空间分布

4.2 降水日数与降水强度年际变化趋势空间分布

从(图 7A)可知,1960—2014 年各站点的年降水日数为正增长的站点数量为 10 个,占到全部站点 52.63%,为负增长的站点数量为 9 个,占到全部站点 47.37%,正负增长之比大体相当;增长最快与最慢的站点分别为德令哈(0.365 d/a)与托勒(0.004 d/a),下降最快与最慢的站点分别为门源(−0.218 d/a)与西宁(−0.012 d/a);核心研究区倾斜率的平均值为 −0.09 d/a,呈下降趋势,外围研究区倾斜率的平均值为 0.051 d/a,呈上升趋势;祁连山南坡站点倾斜率平均值为 0.026 d/a,北坡站点倾斜率平均值为 0.020 d/a,南北坡降水日数基本相当;只有 3 个站点通过了显著性检验,德令哈为 $p<0.01$,门源、乌鞘岭为 $p<0.05$ 。

由图 7B 可知,1960—2014 年各站点的年降水强度除了民和(−0.023 mm/10 a)与恰卜恰(−0.002 mm/10 a)为负增长外,其余站点均为正增长,占全部

站点 89.47%;增长最快与最慢的站点分别为都兰(0.207 mm/10 a)与张掖(0.037 mm/10 a),二者相差 0.170 mm/10 a;倾斜率 >0.1 mm/10 a 的站点数量为 8 个,占到全部站点 42.11%,增长率 <0.1 mm/10 a 的站点数量为 11 个,占到全部站点 57.89%;核心研究区 3 个站点倾斜率 >0.1 mm/10 a,野牛沟(0.155 mm/10 a)、托勒(0.154 mm/10 a)、祁连(0.117 mm/10 a),倾斜率平均值为 0.120 mm/10 a,外围研究区倾斜率平均值为 0.079 mm/10 a,核心研究区的增长速度是外围研究区的 1.524 倍,增长较快;祁连山南坡站点倾斜率平均值为 0.100 1 mm/10 a,北坡站点倾斜率平均值为 0.066 mm/10 a,所以南坡增长速度大约是北坡的 1.513 倍;63.16%的站点通过显著性检验,其中 $p<0.01$ 的站点为 5 个,占全部站点 26.32%,占通过检验站点 41.67%; $p<0.05$ 的站点为 7 个,占全部站点 36.84%,占通过检验站点 58.33%。

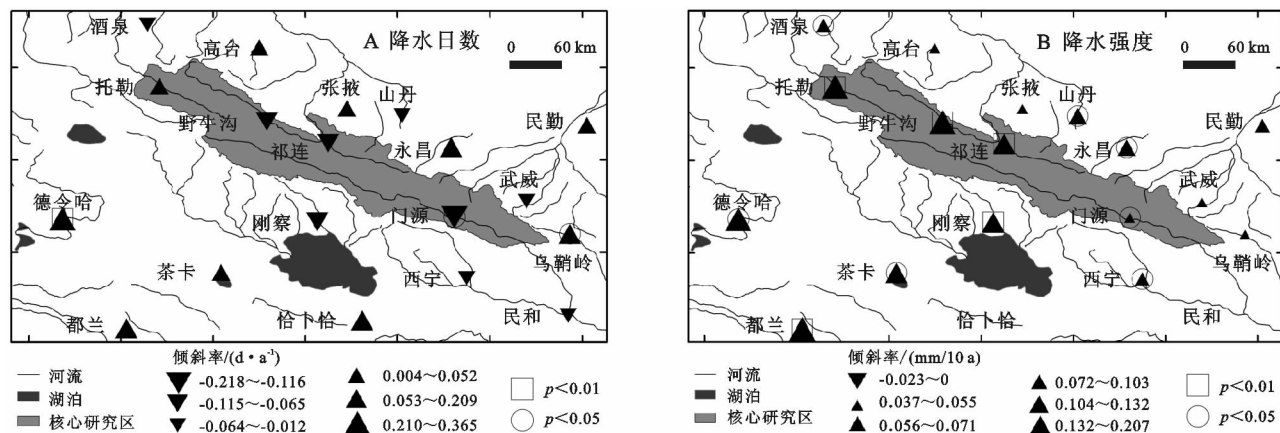


图 7 祁连山南坡及其附近地区降水日数与降水强度年际变化空间分布

4.3 降水日数与降水强度的季节变化空间分布

各站点的春季降水日数(图 8A)正负增长之比为 11 : 8, 分别占到全部站点 57.89% 与 42.11%; 正增长的范围为 0.002~0.062 d/a, 负增长的范围为 -0.105 8~-0.000 4 d/a, 增长最快与最慢的站点分别为德令哈与高台, 下降最快与最慢的站点分别为门源与张掖, 增长最快与下降最快的站点与年际变化的站点一致; 核心研究区倾斜率的平均值为 -0.049 d/a, 呈下降趋势, 外围研究区倾斜率的平均值为 0.008 d/a, 呈略微上升趋势; 祁连山南坡站点倾斜率平均值为 -0.008 d/a, 北坡站点倾斜率平均值为 0.003 d/a, 南北坡降水日数变化趋势差别不大; 门源、都兰、刚察 3 个站点通过了显著性检验 ($p<0.05$)。夏季降水日数(图 8C)正负增长的站点数量基本相当, 增长最快的站点 0.203 d/a(德令哈)与下降最快的站点 -0.112 d/a(门源)相差 0.315 d/a; 核心研究区野牛沟、祁连、门源呈下降趋势, 托勒呈增长趋势, 整体上呈下降趋势 (-0.025 d/a); 外围研究区整体上呈上升趋势 (0.023 d/a); 祁连山南坡站点整体上呈上升趋势 (0.029 d/a), 北坡整体上呈下降趋势 (-0.016 d/a); 通过显著性检验的站点占到全部站点 21.05%, 其中德令哈通过 ($p<0.01$) 的检验。秋季降水日数(图 8E)为正增长的站点数量为 10 个, 负增长的为 9 个, 整体上为略微下降趋势 (-0.005 d/a); 变化最大的两个站点为乌鞘岭 (0.079 d/a) 与野牛沟 (-0.072 d/a), 二者相差 0.151 d/a; 只有乌鞘岭通过了 ($p<0.05$) 相关性检验。冬季降水日数(图 8G)的正增长、零增长、负增长三者之比为 15 : 1 : 3, 整体上表现出正增长 (0.024 d/a), 增长最快的是乌鞘岭 (0.108 d/a), 降低最快的是 -0.034 d/a, 二者相差 0.074 d/a; 核心研究区整体上为增长趋势 (0.014 d/a), 托勒是唯一零增长的站点; 3 个站点通过了显著性检验。

各站点的春季(图 8B)、夏季(图 8D)、秋季(图 8F)、冬季(图 8H)(以下皆为此顺序)降水强度增长率之比分别为 15 : 4, 18 : 1, 13 : 6, 18 : 1, 增长率最高的站点分别为都兰 (0.251 mm/10 a)、永昌 (0.252 mm/10 a)、乌鞘岭 (0.629 mm/10 a)、高台 (0.155 mm/10 a), 下降最快的站点分别为茶卡 (-0.074 mm/10 a)、民和 (-0.102 mm/10 a)、酒泉 (-0.095 mm/10 a)、托勒 (-0.003 mm/10 a); 核心研究区的平均增长率分别为 0.069, 0.171, 0.096, 0.027 mm/10 a; 通过显著性检验的站点数量依次为 0, 3, 2, 10; 其中通过 $p<0.01$ 检验的站点数量为 1(秋季), 6(冬季), 春、夏均未通过此检验, 通过 $p<0.05$ 检验的站点数量为 3(夏季), 1(秋季), 4(冬季), 春季未通过此检验。

4.4 降水日数与降水强度的年代际变化空间分布

20 世纪 60 年代年均降水日数(图 9A)84.21% 的站点为正增长 (0.188~1.546 d/a), 15.79% 的站点为负增长 (-0.418~-0.273 d/a), 整体上表现出正增长 (均值为 0.708 d/a); 武威与门源成为增长最快与下降最快的站点, 二者相差 1.127 d/a; 核心研究区整体上为下降趋势 (均值为 -0.197 d/a); 其中武威与高台通过了 $p<0.05$ 的相关性检验。20 世纪 60 年代年均降水强度(图 9B)13 个站点为正增长 (0.127~1.238 mm/10 a), 6 个站点为负增长 (-0.288~-0.234 mm/10 a), 整体呈现正增长 (0.300 mm/10 a); 永昌与民和分别为增长最快与最慢的站点, 门源与德令哈为下降最快与最慢的站点; 核心研究区整体上呈上升趋势 (均值为 0.171 mm/10 a); 通过显著性检验的站点为祁连 ($p<0.01$)、永昌 ($p<0.01$)、都兰 ($p<0.05$)。20 世纪 70 年代年均降水日数(图 9C)正负增长之比为 14 : 5, 整体上呈正增长 (均值为 0.578 d/a); 核心研究区整体上呈略微下降趋势 (均值为 -0.001 5 d/a), 外围研究区呈

增长趋势(均值为 0.733 d/a)。20 世纪 70 年代年均降水强度(图 9D)整体上表现为上升趋势(均值为 0.066 mm/10 a),核心研究区的倾斜率为 0.326 mm/10 a,比全

部站点的倾斜率大 $0.260 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 外围区的倾斜率为 $-0.003 \text{ mm}/10 \text{ a}$, 呈现略微下降的趋势; 通过相关性检验的比例为 21.05% 。

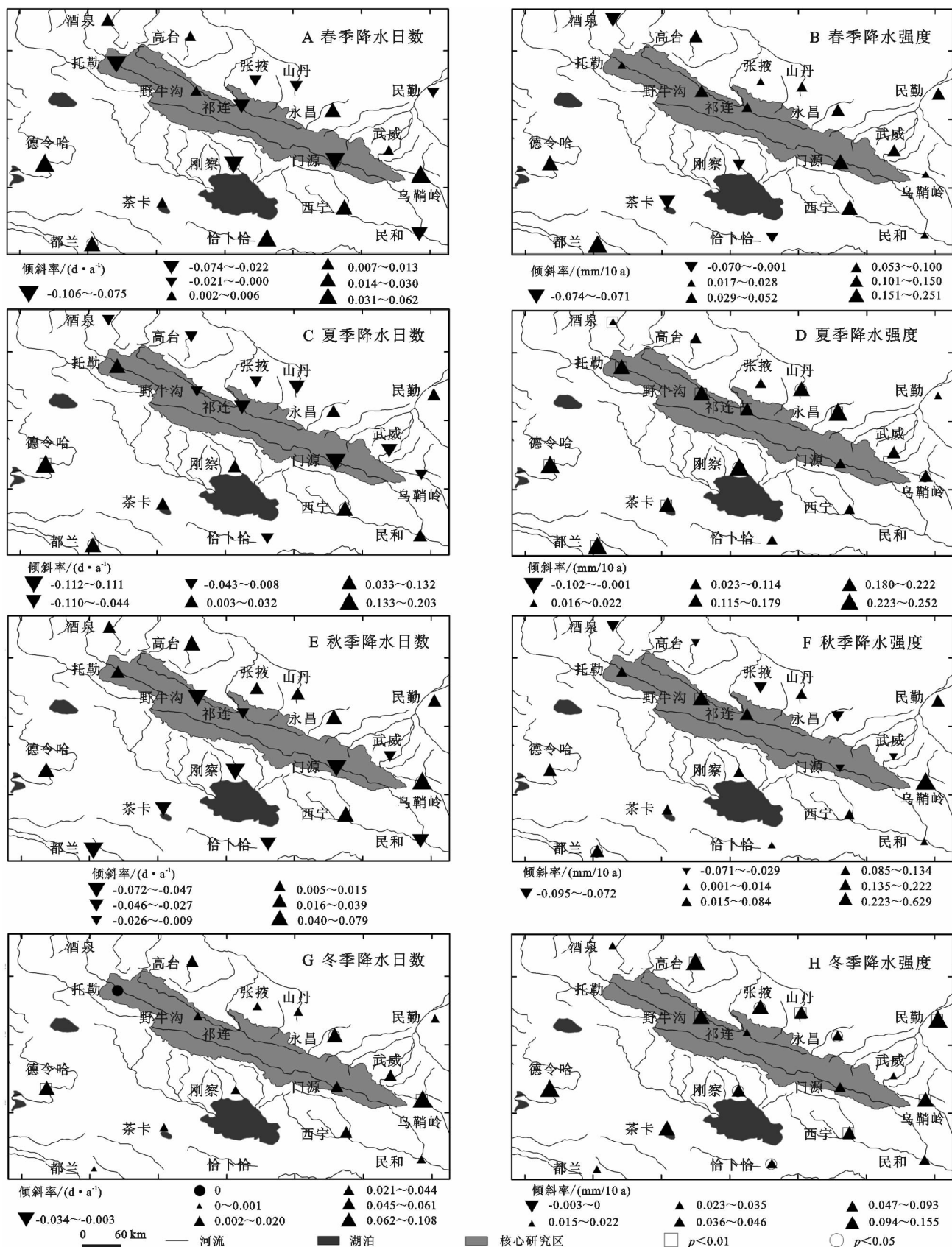


图 8 祁连山南坡及其附近地区降水日数与降水强度季节变化空间分布

20世纪80年代年均降水日数(图9E)变化范围为 $-0.709\sim 3.794$ d/a,二者相差 3.085 d/a,变化差异较大,整体上呈现增长趋势(均值为 1.071 d/a);核心研究区的倾斜率为 0.641 d/a,外围研究区的倾斜率为 1.186 d/a;正增长的站点数量为13,负增长的站点数量为6;刚察与托勒为增长最快与最慢的站点;刚察与野牛沟、茶卡、民和分别通过了 $p<0.01$ 与 $p<0.05$ 相关性检验。20世纪80年代年均降水强度(图9F)整体上呈增长趋势(0.249 mm/10 a),南坡倾斜率为 0.304 mm/10 a,北坡倾斜率为 0.130 mm/10 a,南坡较北坡增加的快;正增长的比例为 63.16% ,负增长的比例为 36.84% ;只有门源通过了相关性检验($p<0.05$)。20世纪90年代年均降水日数(图9G)68.42%的站点为负增长,下降最快的为民和(-1.606 d/a),核心研究区整体上为负增长(均值为 -0.406 d/a),外围研究区也为负增长(均值为 -0.253 d/a)。20世纪90年代年均降水强度(图

9H)正负增长之比为 $12:7$,正增长的范围为 $0.015\sim 1.383$ mm/10 a,增长最快与最慢的站点分别为刚察与门源,负增长的范围为 $-0.910\sim -0.081$ mm/10 a,下降最快与最慢的站点分别为酒泉与都兰;其中6个站点通过了相关性检验($p<0.05$)。2000—2014年年均降水日数(图9I)的平均值为 0.24 d/a,正增长范围为 $0.246\sim 1.021$ d/a,增长最快的为茶卡,民勤为零增长,正增长范围为 $-0.496\sim -0.068$ d/a,门源下降最快;茶卡与恰卜恰通过了 $p<0.05$ 的相关性检验。2000—2014年年均降水强度(图9J)正负增长之比为 $13:6$,平均值为 0.133 mm/10 a,正增长的范围为 $0.037\sim 0.812$ mm/10 a,负增长的范围为 $-0.564\sim -0.050$ mm/10 a;核心研究区的倾斜率为 0.310 mm/10 a,外围研究区的倾斜率为 0.086 mm/10 a;南坡的倾斜率为 0.202 mm/10 a,北坡的倾斜率为 0.016 mm/10 a;其中野牛沟通过了 $p<0.01$ 的相关性检验。

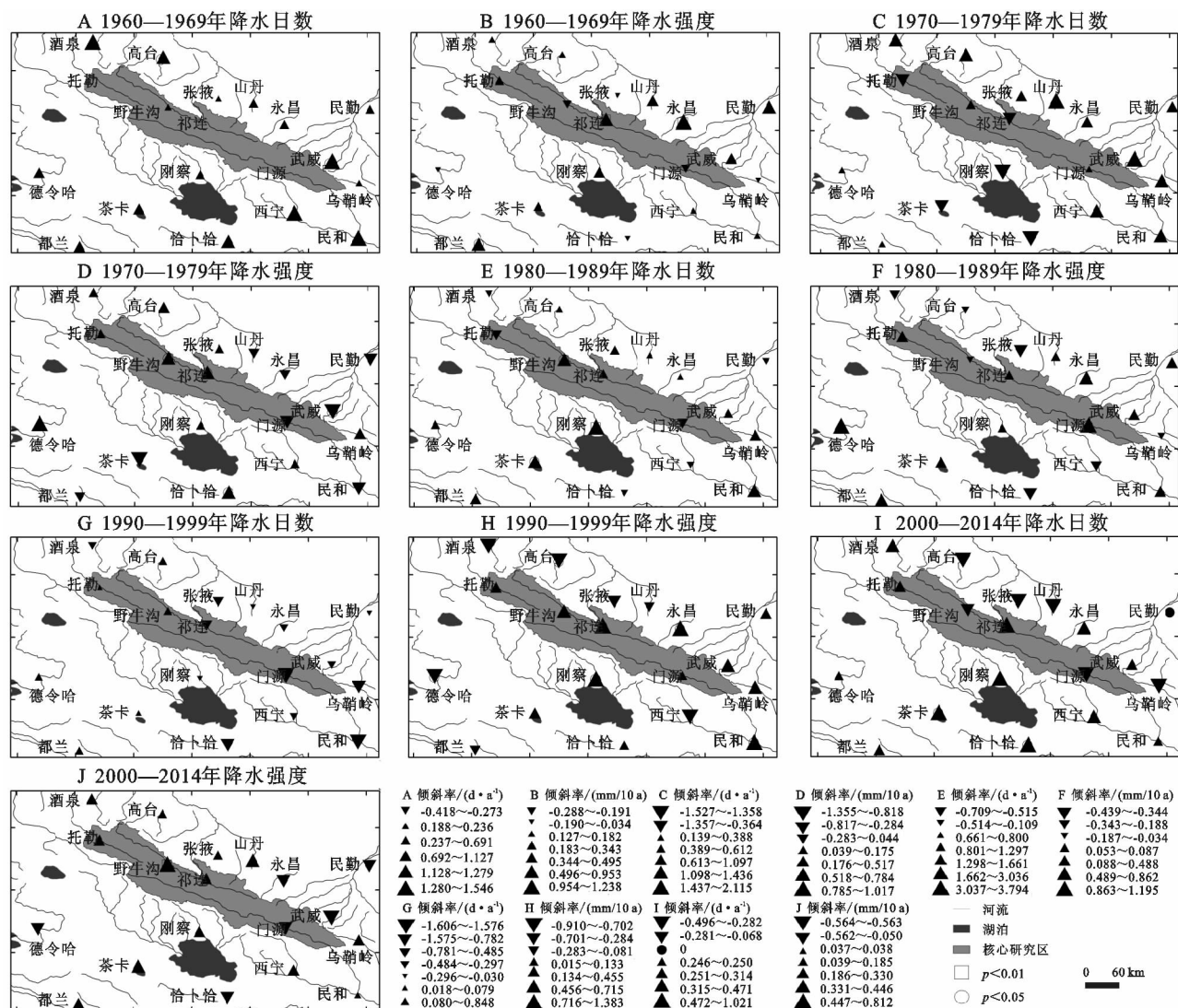


图9 祁连山南坡及其附近地区降水日数与降水强度年代际变化空间分布

5 讨论

(1) 时间序列变化。多年降水日数与降水强度整体上表现为波动缓慢增长趋势;祁连山区的降水主要受到太平洋暖湿气流的影响,同时也受到来自大西洋冷湿气流的影响,降水年际变化大,夏季降水强度对全年贡献最大;20世纪80年代中后期之后较60—80年代中期的降水强度有明显增加,这种趋势与全国降水特征一致;季节突变减压发现除了秋季突变不明显,春、夏、冬发生突变的年份分别为1982年、1972年、1998年。

(2) 空间分布规律。多年平均降水量与平均降水日数受到东南季风的影响,均呈现出西北—东南走向的带状分布,各个站点降水分布呈现的走向与山脉走向一致,南坡为东南季风的迎风坡降水明显多于处在背风坡的北坡;影响降水的因素诸多,海拔、地形、迎风坡与背风坡、大气环流等;1960—2014年各站点的年降水日数为正负增长的站点数量之比大体相当,为10:9,89.47%的站点年降水强度为正增长,这与张存杰等^[29]研究结论基本一致;夏季降水强度增长最明显。

(3) 20世纪80年代中后期降水强度有所增加,尤其进入21世纪增加更为明显,这会导致河流径流量增加,比如黑河干流的径流量从20世纪偏枯状态到21世纪年径流量出现回升的现象^[30]。

参考文献:

- [1] Wentz F J, Ricciardulli L, Hilburn K, et al. How much more rain will global warming bring[J]. *Science*, 2007, 317(5835):233-235.
- [2] 秦大河, Thomas Stocker. IPCC第五次评估报告第一工作组报告的亮点结论[J]. *气候变化研究进展*, 2014, 10(1):1-6.
- [3] 殷雪莲,郭建华,董安祥,等.沿祁连山两次典型强降水天气个例对比分析[J]. *高原气象*, 2008, 27(1):184-192.
- [4] 刘雪梅,张明军,王圣杰,等.2008—2014年祁连山区夏季降水的日变化特征及其影响因素[J]. *地理学报*, 2016, 71(5):754-767.
- [5] 陈乾,张久林,陈添宇.祁连山区2006年夏季降水过程的天气分析[J]. *干旱气象*, 2008, 26(4):22-28.
- [6] 强芳,张明军,王圣杰,等.基于格点数据的1961—2012年祁连山面雨量特征分析[J]. *地理学报*, 2015, 70(7):1125-1136.
- [7] 魏锋,王劲松,李宝梓,等.祁连山近45 a 5—9月日降水气候特征[J]. *干旱气象*, 2010, 28(3):285-290.
- [8] 张小明,魏锋,陆燕.祁连山近45 a年降水异常的气候特征[J]. *干旱气象*, 2006, 24(3):35-41.
- [9] 张存杰,郭妮.祁连山区近40年气候变化特征[J]. *气*

象, 2002, 28(12):33-39.

- [10] 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[J]. *高原气象*, 2004, 23(5):723-727.
- [11] 牛赞,刘贤德,敬文茂,等.祁连山大野口流域气温、降水、河川径流特征分析[J]. *干旱区地理:汉文版*, 2014, 37(5):931-938.
- [12] 王宁练,贺建桥,蒋熹,等.祁连山中段北坡最大降水高度带观测与研究[J]. *冰川冻土*, 2009, 31(3):395-403.
- [13] 贾文雄.近50年来祁连山及河西走廊降水的时空变化[J]. *地理学报*, 2012, 67(5):631-644.
- [14] 汤懋苍.祁连山区降水的地理分布特征[J]. *地理学报*, 1985(4):323-332.
- [15] 陈少勇,董安祥,韩通.祁连山东、西部夏季降水量时空分布的差异及其成因研究[J]. *南京气象学院学报*, 2007, 30(5):715-719.
- [16] 李岩瑛,张强,许霞,等.祁连山及周边地区降水与地形的关系[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(1):52-61.
- [17] 贾文雄.祁连山气候的空间差异与地理位置和地形的关系[J]. *干旱区研究*, 2010, 27(4):607-615.
- [18] 程鹏,陶健红,张新荣,等.高空西风急流对祁连山区降水的影响[J]. *气象科技*, 2007, 35(4):489-494.
- [19] 常学向,赵爱芬,王金叶,等.祁连山林区大气降水特征与森林对降水的截留作用[J]. *高原气象*, 2002, 21(3):274-280.
- [20] 张学龙,罗龙发,敬文茂,等.祁连山青海云杉林截留对降水的分配效应[J]. *山地学报*, 2007, 25(6):678-683.
- [21] 张强,杜志成.丝绸之路经济带区域生态安全评价研究:以祁连山冰川与水涵养生态功能区为例[J]. *生态经济:中文版*, 2016, 32(10):169-173.
- [22] 王海军,张勃,靳晓华,等.基于GIS的祁连山区气温和降水的时空变化分析[J]. *中国沙漠*, 2009, 29(6):1196-1202.
- [23] 戴声佩,张勃.基于GIS的祁连山植被NDVI对气温降水的旬响应分析[J]. *生态环境学报*, 2010, 19(1):140-145.
- [24] 符淙斌,王强.气候突变的定义和检测方法[J]. *大气科学*, 1992, 16(4):482-493.
- [25] 魏凤英.现代气候统计诊断与预测技术[M]. 2版.北京:气象出版社,2007.
- [26] 丁永建,叶柏生,周文娟.40年来西北干旱区黑河流域降水时空分布特征[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1):42-48.
- [27] 贾文雄,何元庆,李宗省,等.祁连山区气候变化的区域差异特征及突变分析[J]. *地理学报*, 2008, 63(3):257-269.
- [28] 秦大河,丁一汇,苏纪兰,等.中国气候与环境演变(上卷)[M].北京:科学出版社,2005.
- [29] 张存杰,郭妮.祁连山区近40年气候变化特征[J]. *气象*, 2002, 28(12):33-39.
- [30] 蓝永超,康尔泗,金会军,等.黑河出山径流量年际变化特征和趋势研究[J]. *冰川冻土*, 1999, 21(1):49-53.