

气候变暖背景下的果洛地区汛期强降水变化特征分析

韩有香¹, 陈海莲²

¹青海省果洛州久治县气象局, 青海 智青松多

²青海省黄南州河南县气象局, 青海 黄南藏族自治州

Email: 545277381@qq.com

收稿日期: 2020年9月6日; 录用日期: 2020年9月21日; 发布日期: 2020年9月28日

摘要

为了解果洛地区汛期强降水的变化情况,本研究利用1976~2018年果洛6站和2010~2018年14个区域站的日降水序列,用百分位法定义果洛各站的强降水阈值,用线性倾向估计法和小波分析法对洛地区的强降水量、强降水日数和强度进行变化趋势分析和周期分析,结果表明:果洛地区强降水的降水量和日数以 $-0.88\text{ mm}/10\text{a}$ 和 $-0.03\text{ d}/10\text{a}$ 的速率呈减少的趋势,强度以 $0.17\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 呈增强趋势;自1998年以来果洛地区强降水的降水量、日数和强度以 $14.96\text{ mm}/10\text{a}$ 、 $0.63\text{ d}/10$ 和 $0.68\text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 的速率呈增加趋势。近10年强降水量和日数的中心在玛沁大武乡铜矿,强度中心在久治索乎日麻乡;近5年强降水的中心在久治索乎日麻乡,日数中心在玛沁当洛乡当项,强度中心在久治索乎日麻乡。通过小波分析发现,强降水量9年的振荡周期、强降水日数10年的振荡周期和强降水强度6年和12年的振荡周期较为明显。强降水量由西北向东南方呈增加分布格局,其中玛多、玛多三叉路口和玛沁雪山乡减少明显;强降水强度从西北向东南方呈增多加强的分布格局,久治索乎日麻乡、达日满掌乡和班玛赛莱唐镇班脑河村强降水强度增强明显;强降水日数从玛沁大武乡铜矿向西北和东南方呈减少的分布格局。

关键词

气候变暖, 果洛地区, 汛期, 强降水, 百分位法

Analysis on the Characteristics of Heavy Precipitation in Flood Season over Golog Tibetan Autonomous Prefecture under the Background of Climate Warming

Youxiang Han¹, Hailian Chen²

¹Jiuzhi County Meteorological Bureau, Golog Tibetan Autonomous Prefecture, Chugqênsumdo Qinghai

²Qinghai Province Huangnanzhou Henan County Meteorological Bureau, Tibetan Autonomous Prefecture of Huangnan Qinghai

Email: 545277381@qq.com

Received: Sep. 6th, 2020; accepted: Sep. 21st, 2020; published: Sep. 28th, 2020

Abstract

In order to understand the change of heavy precipitation in flood season in Golog Tibetan Autonomous Prefecture, the daily precipitation series of 6 stations in Guoluo from 1976 to 2018 and 14 regional stations from 2010 to 2018 were used in this study. The threshold of heavy precipitation at each station in Golog Tibetan Autonomous Prefecture was defined by percentile method. By using the linear trend estimation method, Mann-Kendall method and wavelet analysis method, the trend analysis, mutation test and periodic analysis of the heavy precipitation, the number of days and intensity of the heavy precipitation in the Golog Tibetan Autonomous Prefecture area are carried out. The results showed that the precipitation amount and the number of days of heavy precipitation in the Golog Tibetan Autonomous Prefecture area decreased at the rate of -0.88 mm/10a and -0.03 d/10a, and the intensity increased at the rate of 0.17 mm/(d·10a). Since 1998, the precipitation, the number of days and the intensity of the heavy precipitation in Golog Tibetan Autonomous Prefecture area have been increased at the rates of 14.96 mm/10a, 0.63 d/10a and 0.68 mm/(d·10a). The center of the heavy rainfall and the number of days in the past 10 years was at Maqên County Dawu Mine, and the center of the heavy rainfall in the past 5 years was at Jiuzhi Suohuima Township, and the center of the number of days in the past 5 years was at Jiuzhi Suohuima Township, and the center of the heavy rainfall in the past 5 years was at Maqên County Dangluo township, the center of strength was in Jiuzhi Suohuima township. Wavelet analysis reveals that: The 9-year oscillation period of heavy precipitation, the 10-year Oscillation period of heavy precipitation days and the 6-year and 12-year Oscillation period of heavy precipitation intensity are obvious. The distribution pattern of heavy precipitation increased from northwest to southeast, among which the decrease of Madoi County, Madoi County, the intersection and Maqin Xueshan was obvious, and the distribution pattern of heavy precipitation intensity increased from northwest to southeast, in Jiuzhi Suohuima Township, Dari Manzhang and Banna River village of Bamasai Laitang, the intensity of heavy precipitation increased obviously, and the distribution pattern of heavy precipitation days decreased from Maqên County copper mine in Dawu to the northwest and southeast.

Keywords

Climate Warming, Goluo Region, Flood Season, Heavy Precipitation, Percentile Method

Copyright © 2020 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

IPCC 第五次评估报告(AR5)第一工作组报告指出, 在未来变暖的背景下, 极端事件将进一步增多, 中纬度大部分陆地区域强降水强度可能加大、发生频率可能增加[1] [2] [3]。近年来, 在全球气候变暖的

背景下, 各地洪涝灾害严重。最近几十年强降水事件的发生频率明显上升, 并且这种趋势会进一步发展 [4] [5]。彭芳等[6]曾利用贵州区域 84 站 1991~2009 年汛期(4~9 月)逐小时降水量, 分别定义各站点的小时降水量的强降水阈值, 分析出贵州各区域阈值分布的高低。韩廷芳等[7]利用格尔木市 1961~2015 年汛期(5~9 月)逐日降水资料, 分析极端强降水事件的变化特征以及对未来趋势的预测。肖莲桂等[8]利用天峻县 1961~2015 年逐日降水量资料, 分析了夏半年和冬半年极端降水变化情况。陈炯等[9]从气候角度统计分析了中国暖季不同量级短时强降水时空分布, 并得出短时强降水和中尺度对流系统的频率特征。多位气象工作者[10]-[17]也针对各个区域的不同形势以及不同角度研究分析了短时强降水天气的特征。

近年来, 国内许多学者从降水量、降水日数和降水强度等方向对降水的气候特征和变化规律等方面进行了大量的研究。王小玲等[18]研究发现, 年降水量在不同区域有不同的趋势变化, 但不同强度级别降水量的趋势变化表现出较为一致的特征, 强降水量的变化趋势最为显著, 降水量的变化主要由强降水量的变化引起。各级别降水频率变化对降水量趋势的贡献远远大于强度变化, 趋势变化主要由降水频率变化产生。

果洛州位于青海省东南部, 地处青藏高原腹地的巴颜喀拉山和阿尼玛卿山之间。东临甘肃省甘南藏族自治州和青海省黄南藏族自治州, 南接四川省阿坝藏族羌族自治州和甘孜藏族自治州, 西与青海省玉树藏族自治州毗连, 北和青海省海西蒙古族藏族自治州、海南藏族自治州接壤。在全球气候变暖的背景下, 果洛地区的降水发生了明显的变化, 未见果洛地区强降水变化情况的报道。因此, 深入探讨果洛地区强降水的变化规律, 在果洛地区生态恢复和社会经济可持续发展中具有举足轻重的地位, 对当地农牧业稳定发展、生态环境保护、防洪减灾措施的实施和应对极端气候变化具有重要意义。为果洛地区防灾减灾、生态环境保护、地方气象服务提供参考依据。

2. 资料与方法

2.1. 资料

为保证资料的统一性和连续性, 利用果洛地区玛沁、达日、玛多、班玛、甘德和久治 6 个国家气象站 1976~2018 年 5~9 月的日降水序列。由于区域站的建站时间和启用时间不一致, 至 2018 年果洛州共建成 68 个区域站(包括天气站、区域站、交通站和农业设施站) (详见图 1), 因此文中选用时间序列最长的 2009 年建成的 14 个区域站自 2010~2018 年 5~9 月的逐日降水序列。文中站点分布图用果洛地区的所有站点, 强降水量、强降水日数和强降水强度的空间分布用 6 个国家站和 14 个序列最长的区域站的资料。

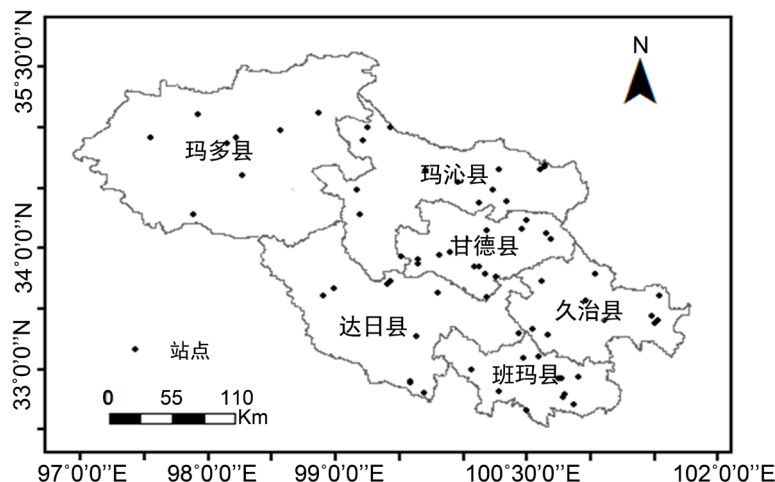


Figure 1. Distribution of weather stations in Golog Tibetan Autonomous Prefecture
图 1. 果洛地区气象站点分布图

2.2. 方法

本研究采用国内外通用的百分位算法, 定义果洛地区强降水事件的阈值。具体做法是, 将果洛地区 6 站 1976~2018 年 5~9 月汛期日降水序列由小到大排列, 取第 95 个百分位值定义为强降水阈值。某日降水量达到或超过这一阈值时, 称之为强降水事件。通过百分位值求得的果洛地区 6 站的阈值见表 1, 区域站的强降水阈值用区域站所属国家站的阈值。用 6 站的平均值代表果洛地区的强降水量、强降水日数和强降水强度。

采用线性倾向估计法[19]和小波分析[19]对果洛地区的强降水量、强降水日数和强度进行变化趋势分析和周期分析。

Table 1. Heavy rainfall thresholds at individual stations over the Golog Tibetan Autonomous Prefecture region, 1976-2018 (mm)
表 1. 果洛地区 1976~2018 年各站强降水阈值(mm)

站名	久治	达日	玛多	甘德	玛沁	班玛
阈值	17.8	17.4	12.0	14.7	15.3	16.9

3. 结果分析

3.1. 强降水量

3.1.1. 强降水量的变化趋势

由表 1 可知, 6 个国家站强降水的阈值, 6 站的阈值各不相同, 久治得阈值最大, 玛多的阈值最小。1976~2018 年果洛地区强降水量出现于 2007 年, 降水量为 169.6 mm, 最小值出现于 1991 年, 降水量为 51.7 mm, 两者相差 117.9 mm。由图 2(a)可知, 果洛地区的强降水量呈减少的趋势, 其速率为 $-0.88 \text{ mm}/10\text{a}$, 未通过显著性检验。6 个国家站的强降水量变化不同, 最大值出现于 1979 年的久治, 降水量为 330.3 mm; 最小值出现于 1988 年的玛多, 降水量仅为 13.7 mm; 久治、班玛和达日的强降水的降水量分别以 -12.74 、 -1.17 和 $-1.64 \text{ mm}/10$ 的速率呈减少的趋势, 甘德的强降水量以 $3.14 \text{ mm}/10$ 的速率呈增多的趋势。由于玛多和玛沁分别于 1983 年和 1984 年未出现强降水, 但从 1984 年和 1985 年起, 玛沁和的玛多强降水量以 $12.44 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $5.04 \text{ mm}/10\text{a}$ 的速度呈增加趋势。6 个国家站的强降水量均未通过显著性检验。

自 1998 年气温变暖以来[20], 果洛地区的强降水量呈增多的趋势, 其速率为 $14.96 \text{ mm}/10\text{a}$; 久治、班玛、达日、甘德、玛沁和玛多的强降水分别以 12.30 、 5.39 、 4.61 、 22.57 、 18.67 和 $26.25 \text{ mm}/10\text{a}$ 的速度呈增多的趋势。

Table 2. Trend rates of precipitation, number of days and intensity of heavy rainfall at various stations in Golog Tibetan Autonomous Prefecture ($\text{mm}/10\text{a}$, $\text{d}/10\text{a}$, $\text{mm}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$)

表 2. 果洛各站强降水降水量、日数和强度的倾向率($\text{mm}/10\text{a}$, $\text{d}/10\text{a}$, $\text{mm}/(\text{d} \cdot 10\text{a})$)

项目	年代	久治	班玛	达日	甘德	玛多	玛沁	果洛
降水量	1976~2018	-12.74	-1.17	-1.64	3.14	12.44	5.04	-0.88
	1998~2018	12.30	5.39	4.61	22.57	26.25	18.67	14.96
日数	1976~2018	-0.49	-0.13	-0.03	0.12	0.18	0.73	-0.03
	1998~2018	0.49	0.16	0.10	1.26	1.26	0.62	0.63
强度	1976~2018	-0.002	0.46	-0.17	0.18	0.45	0.20	0.17
	1998~2018	0.37	0.82	0.79	-0.45	1.72	0.82	0.68

区域站强降水量最大值出现于 2014 年的是 X6008 (玛沁县当洛乡当项), 降水量达 470.3 mm, 强降水最小值出现于 2014 年的是 X6011 (玛沁县雪山乡), 降水量仅为 15.8 mm, 两者相差 454.5 mm。由于区域站的强降水量序列较短, 因此不作趋势分析。

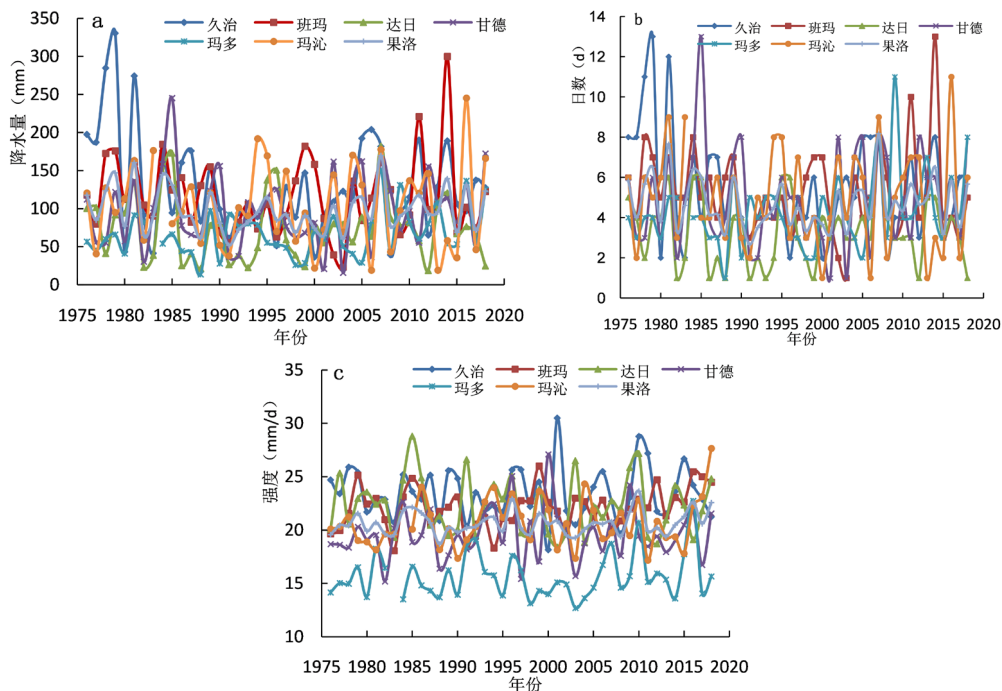


Figure 2. Heavy rainfall (a), number of days (b) and intensity (c) over Golog Tibetan Autonomous Prefecture from 1976 to 2018
图 2. 果洛地区 1976~2018 年强降水量(a)、日数(b)和强度(c)变化曲线图

由此可见, 果洛地区的强降水量呈减少的趋势, 久治、班玛和达日的强降水的降水量减少, 甘德、玛多和玛沁的强降水量增加; 1998 年以来果洛的强降水量呈增加的趋势, 6 个国家站的强降水量均呈增加趋势。

3.1.2. 强降水量的年际变化

由表 3 和图 3(a)可知, 70 年代末, 是果洛地区以及久治、班玛、达日和玛多强降水量相对较多的时期, 较平均值分别偏多 20、92、18 和 12%, 玛多偏少 16%; 从 80 年代起强降水量逐渐减少, 至 90 年代减少至最少, 较平均值偏少 15、26、17、16 和 16%; 21 世纪强降水量增加, 呈多 - 少 - 多的分布格局。而甘德在 70 年代末强降水量较少, 从 80 年代起强降水量逐渐增多, 90 年代又减少至最少, 21 世纪逐渐增多; 玛沁在 70 年代末强降水量较少, 从 80 年代起强降水量逐渐增加, 至 2010~2018 年强降水量增加至最多。

Table 3. Inter-decadal variability of heavy rainfall over Golog Tibetan Autonomous Prefecture from 1976 to 2018 (mm)
表 3. 果洛地区 1976~2018 年强降水量年代际变化(mm)

年代际	久治	班玛	达日	甘德	玛沁	玛多	果洛
1976~1979	250.0	136.6	83.7	96.0	86.2	56.9	118.2
1980~1989	129.5	128.6	77.6	110.3	106.2	59.3	103.0
1990~1999	95.5	96.4	62.7	101.5	87.5	56.8	83.4
2000~2009	117.9	99.4	85.0	94.7	97.1	74.9	94.9

Continued

2010~2018	128.6	131.7	68.6	108.2	107.2	84.0	104.7
1998~2018	122.5	118.9	72.9	98.4	98.7	74.3	97.6
2009~2018	124.9	125.1	69.5	103.8	107.1	88.7	103.2
2014~2018	131.4	133.4	70.9	109.9	110.3	85.1	106.8
1976~2018	129.9	115.7	74.5	98.1	102.7	67.5	98.3

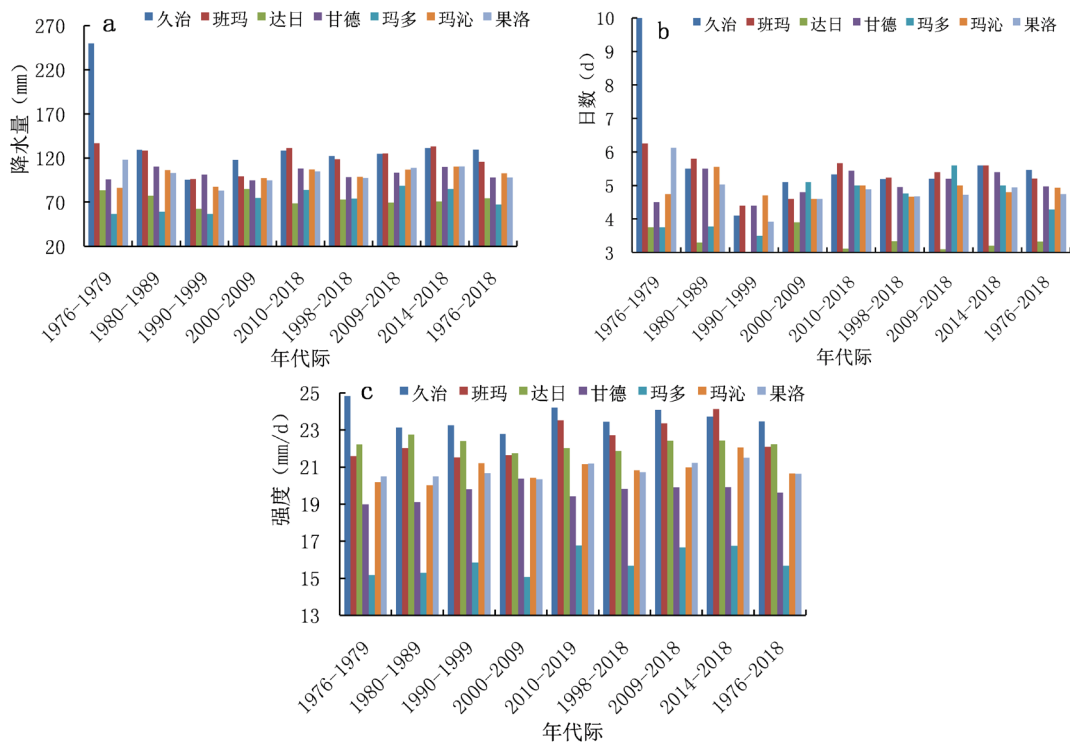


Figure 3. Interdecadal variability of heavy rainfall (a), number of days (b) and intensity (c) over Golog Tibetan Autonomous Prefecture from 1976 to 2018

图 3. 果洛地区 1976~2018 年强降雨量(a)、日数(b)和强度(c)年代际变化

1998 年以来是果洛地区强降雨量较少的时期，降水量为 97.6 mm，较平均值仅偏少 1%。自 1998 年气候变暖以来，久治的强降雨量仍然最多，达 122.5 mm；达日的强降雨量最少，仅为 72.9 mm。久治、玛沁、达日的强降雨量较少，较平均值分别偏少 6、4 和 2%；班玛、甘德、玛多自 1998 年来的较平均值分别偏多 3.0、0.3 和 10%。

近 10 年和近 5 年的强降雨量发生了变化。近 10 年，强降雨量最多的出现于 X6009 (玛沁大武乡铜矿)，总降水量达 1494.2 mm；强降雨量最少的出现于 X6011 (玛沁雪山乡)，总降水量仅为 368.6 mm。

近 5 年来，果洛地区的平均强降雨量为 541.8 mm，强降雨量最多的是 X6014 (久治索乎日麻乡)，总降水量达 748.7 mm，强降雨量最少的是 X6011 (玛沁雪山乡)，总降水量为 242.1 mm。

由此可见，70 年代末久治和班玛的强降雨量最多，玛沁最少，90 年代久治、班玛和达日的强降雨量最少；甘德强降雨量最多和最少的均在 21 世纪；玛沁在 2010~2018 年最多；自 1998 年以来，久治的强降雨量最多，达日最少；近 10 年强降雨量最多的是玛沁大武乡铜矿，最少的是玛沁雪山乡；近 5 年强降雨量最多的是久治索乎日麻乡，最少的是玛沁雪山乡。

3.1.3. 强降水量的周期变化

根据果洛地区汛期强降水量时间序列, 进行 Morlet 小波变换, 图 4 为果洛地区汛期强降水量的 Morlet 实部系数时-频分析图 4(a) 和小波模图 4(b)。由图 4 可知, 果洛地区的强降水量 9 年的振荡周期较为明显, 从 90 年代起存在 14 年的振荡周期, 70 年代末至 1985 年有 5 年的振荡周期。久治、班玛、达日、甘德、玛多和玛沁均有 5 年和 10 年的振荡周期, 70 年代末至 1985 年和 21 世纪的头十年有 3 年的振荡周期。

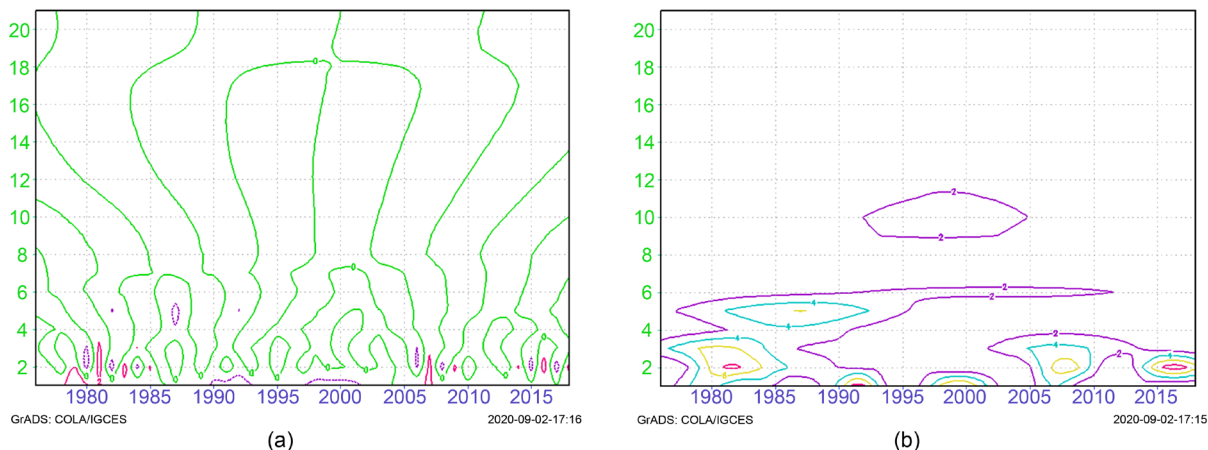


Figure 4. Time-frequency analysis of Morlet wavelet real part coefficients of heavy rainfall over Golog Tibetan Autonomous Prefecture area (a) and wavelet modulus map (b)

图 4. 果洛地区强降水量的 Morlet 小波实部系数时-频分析图(a)和小波模图(b)

3.2. 强降水日数

3.2.1. 强降水日数变化趋势

1976~2018 年果洛地区强降水的降水日数为 204 天, 平均天数为 4.7 天。降水量日数最多为 8 天, 降水量日数最少为 2.3 天。由表 2, 图 3(b)可知, 果洛地区的强降水量的日数呈减少的趋势, 其速率为 -0.03 d/10a, 未通过显著性检验。6 个国家站中强降水日数变化不同, 久治降水总日数为 235 天, 是果洛地区强降水日数最多的地区, 班玛的总降水日数次之, 达日是果洛地区强降水日数最少的地区, 强降水总日数为 143 天。久治、班玛和达日的强降水日数分别以 -0.49 、 -0.13 和 -0.03 d/10a 的速率呈减少的趋势, 甘德降水日数为以 0.12 d/10a 的速率呈增多的趋势。4 个站的强降水日数均未通过显著性检验。由于玛多和玛沁分别于 1983 年和 1984 年未出现强降水, 但从 1984 年和 1985 年起, 玛多和玛沁的强降水日数以 0.18 d/10a 和 0.73 d/10a 的速度呈增加趋势。

自 1998 年以来, 果洛地区的强降水日数为 98.3 天, 平均日数为 4.7 天, 占 1976~2018 年强降水日数的 48%, 从变化趋势来看, 果洛地区自 1998 年以来强降水日数以 0.48 d/10a 的速率呈增多的趋势。自 1998 年气候变暖以来, 班玛的强降水日数最多, 为 110 天, 久治的强降水日数次之, 达日的强降水日数最少, 只有 70 天, 久治、班玛、达日、甘德、玛沁和玛多的强降水日数分别以 0.49 、 0.16 、 0.10 、 1.26 、 0.62 和 1.26 d/10a 的速率呈增加的趋势。

由此可见, 果洛地区的强降水量日数呈减少的趋势, 久治、班玛和达日的强降水的降水量减少, 甘德、玛多和玛沁的强降水量增加; 1998 年以来果洛的强降水日数呈增加的趋势, 6 个国家站的强降水量均呈增加趋势。

3.2.2. 强降水日数的年际变化

由表 4、图 3(b)可知, 70 年代末, 是果洛地区、久治、班玛和达日强降水日数较多的时期, 较平均

值分别偏多 30、82、21 和 15%；甘德、玛多和玛沁的强降水日数较少的时期，较平均值分别偏少 10、12 和 2%。果洛地区、久治、班玛和达日强降水日数从 80 年代起逐渐减少，甘德、玛多和玛沁的强降水日数增加，至 90 年代果洛地区、久治、班玛、达日、甘德和玛多的强降水日数均减少至最少，较平均值分别偏少 17、25、15、15、12 和 19%；21 世纪果洛地区、久治、班玛、达日和甘德的强降水日数增加，呈多 - 少 - 多的分布格局，玛多 21 世纪的强降水量日数增加，呈少-多的分布格局，玛沁在 21 世纪头十年的强降水日数最少。

Table 4. Interdecadal changes in the number of days of heavy rainfall over Golog Tibetan Autonomous Prefecture from 1976 to 2018 (d)

表 4. 果洛地区 1976~2018 年强降水日数年代际变化(d)

年代际	久治	班玛	达日	甘德	玛多	玛沁	果洛
1976~1979	10.0	6.3	3.8	4.5	3.8	4.8	6.1
1980~1989	5.5	5.8	3.3	5.5	3.8	5.6	5.0
1990~1999	4.1	4.4	2.8	4.4	3.5	4.7	3.9
2000~2009	5.1	4.6	3.9	4.8	5.1	4.6	4.6
2010~2018	5.3	5.7	3.1	5.4	5.0	5.0	4.9
1998~2018	5.2	5.2	3.3	5.0	4.8	4.7	4.7
2009~2018	5.2	5.4	3.1	5.2	5.6	5.0	4.7
2014~2018	5.6	5.6	3.2	5.4	5.0	4.8	5.0
1976~2018	5.5	5.2	3.3	5.0	4.3	4.9	4.7

自 1998 年气候变暖以来，果洛地区的平均强降水日数和多年平均值相同。久治、班玛的强降水日数相同且最大，达 5.2 天，甘德的强降水日数次之；达日的强降水日数最小，仅为 3.3 天；玛多和玛沁的强降水日数为 4.8 天和 4.7 天。

近 10 年和近 5 年果洛地区的强降水日数发生了变化，近 10 年的平均强降水日数为 5.2 天。久治、班玛、达日、甘德、玛多和玛沁近 10 年的强降水日数占强降水总日数的 22、24、22、24、31 和 25%。强降水总日数最多的是 X6009 (玛沁大武乡铜矿)，达 71 天，X6002 (玛多花石峡镇)次之；最少的是 X6011 (玛沁雪山乡)，仅为 18 天。其他站的强降水总日数为 26~57 天。

近 5 年的平均强降水日数为 5.1 天，久治、班玛、达日、甘德、玛多和玛沁近 5 年的强降水日数占降水总日数的 12、13、11、13、14 和 12%。强降水总日数最多的是 X6008 (玛沁当洛乡当项)，降水日数达 41 天，X6002 次之；强降水总日数最少的是 X6011 (玛沁雪山乡)，只有 11 天。

由此可见，70 年代末果洛地区、久治和班玛强降水日数最多，90 年代强降水日数最少。近 10 年强降水日数最多的是玛沁大武乡铜矿，最少的是玛沁雪山乡。近 5 年玛沁当洛乡当项的强降水日数最多，达日窝赛乡的强降水日数最少。

3.2.3. 强降水日数的周期检验

根据果洛地区汛期的强降水日数时间序列，进行 Morlet 小波变换，图 5 为果洛地区汛期强降水日数的 Morlet 实部系数时 - 频分析图 5(a)和小波模图 5(b)。由图 5 可知，果洛地区的强降水日数 10 年的振荡周期较为明显，70 年代末至 1985 年有 3 年的振荡周期。久治、班玛、达日、甘德、玛多和玛沁均有 9 年的振荡周期，70 年代末至 1985 年有 3 年的振荡周期。

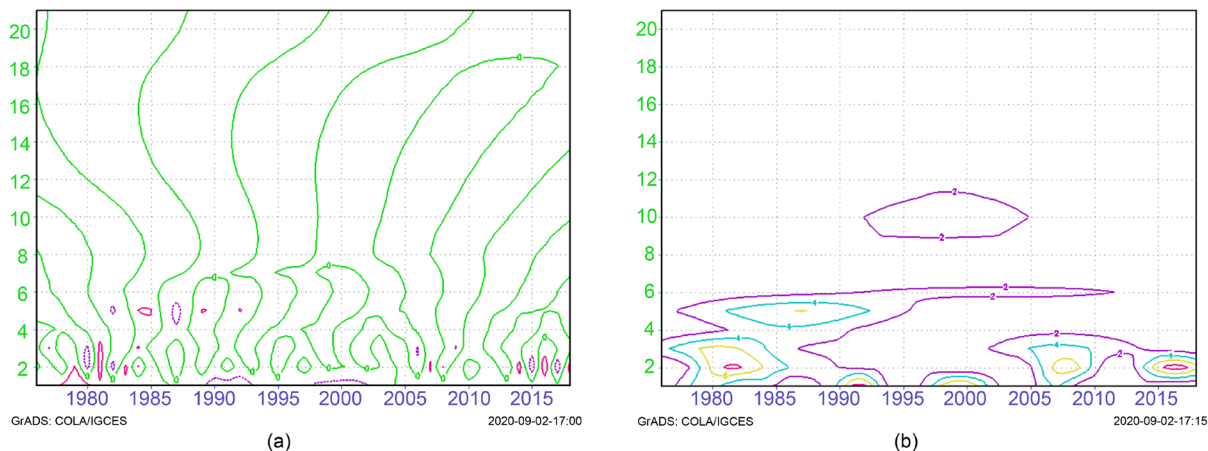


Figure 5. Time-frequency analysis (a) and wavelet modulus (b) of Morlet wavelet real part coefficients for heavy precipitation days over Golog Tibetan Autonomous Prefecture

图 5. 果洛地区强降水日数的 Morlet 小波实部系数时 - 频分析图(a)和小波模图(b)

3.3. 强降水强度

3.3.1. 强降水强度变化趋势

1976~2018 年果洛地区的平均强降水强度平均为 20.6 mm/d, 最大的为 23.6 mm/d, 最小的为 18.7 mm/d, 最大与最小相差 4.9 mm/d; 由表 2、图 2(c)可知, 1976~2018 年强降水的强度呈增加的趋势, 其速率为 0.17 mm/(d·10a)。由表 2 可知, 久治的强降水强度以减小最慢, 班玛的强降水强度增加最快。6 个国家站的强降水强度在 12.7~30.5 mm/(d·10a)之间, 久治和达日的强降水强度以 -0.002 mm/(d·10a)和 -0.17 mm/(d·10a)呈减弱的趋势, 班玛、甘德、玛多和玛沁的强降水强度以 0.46、0.18、0.45 和 0.20 mm/(d·10a)的速率呈增强的趋势。

自 1998 年气候变暖以来, 果洛地区区域站的强降水平均强度为 20.7 mm/d, 最大强度为 23.6 mm/d, 最小的强度为 19.3 mm/d, 最大与最小的强度相差 4.3 mm/d。1998~2018 年的强降水强度呈增加的趋势, 其速率为 0.68 mm/(d·10a)。自 1998 年以来, 6 个国家站的强度为 12.7~30.5 mm/d, 他们的变化趋势不一致。甘德的强降水强度以 -0.45 mm/(d·10a)的速率呈减弱的趋势, 久治、班玛、达日、玛多和玛沁的强降水强度分别以 0.37、0.82、0.79、1.72 和 0.82 mm/(d·10a)的速率呈增强趋势。由于区域站降水强度序列较短, 因此不作趋势分析。

由此可见, 果洛地区的强降水强度呈增强的趋势, 久治和达日的强降水强度呈减少的趋势, 而班玛、甘德玛多和玛沁的强降水强度呈增强的趋势。自 1998 年气候变暖以来, 果洛地区的强降水强度呈增强趋势, 除甘德的强降水强度呈减弱的趋势外, 其他国家站的强降水强度均呈增强趋势。

3.3.2. 强降水强度的年际变化

由表 5、图 3(c)可知, 果洛地区的强降水强度的年际变化不同。70 年代末、80 年代是果洛地区强降水强度较小的时期, 较平均值均偏小 0.1 mm/d; 90 年代有所增加, 较平均值偏大 0.1 mm/d, 较 70 年代末和 80 年代均偏大 0.2 mm/d; 21 世纪的头十年减小至最小, 较平均值偏小 0.3 mm/d, 较 70 年代末、80 年代和 90 年代分别偏小 0.2、0.2 和 0.4 mm/d; 2010~2018 年增加至最大, 较平均值偏大 0.6 mm/d, 较 70 年代末、80 年代、90 年代和 21 世纪头十年分别偏大 0.7、0.7、0.5 和 0.9 mm/d。

自 1998 年气候变暖以来, 果洛地区的平均强降水强度为 20.7 mm/d, 较平均值偏大 0.1 mm/d。自 1998 年以来, 久治的强降水强度最大且和平均值相同, 强度为 23.5 mm/d, 班玛次之, 较平均值偏多 0.6 mm/d;

玛多的强度最小且和平均值相同, 其值为 15.7 mm/d; 达日的强度较平均值偏小 0.3 mm/d, 甘德和玛沁的强度较平均值分别偏小 0.2 mm/d 和 0.1 mm/d。

Table 5. Interdecadal MMD of heavy rainfall intensity over the Golog Tibetan Autonomous Prefecture region from 1976 to 2018 (mm/d)

表 5. 果洛地区 1976~2018 年强降水强度的年代际(mm/d)

年代际	久治	班玛	达日	甘德	玛多	玛沁	果洛
1976~1979	24.8	21.6	22.2	19.0	15.2	20.2	20.5
1980~1989	23.1	22.0	22.8	19.1	15.3	20.0	20.5
1990~1999	23.3	21.5	22.4	19.8	15.9	21.2	20.7
2000~2009	22.8	21.6	21.8	20.4	15.1	20.4	20.3
2010~2018	24.2	23.5	22.0	19.4	16.8	21.2	21.2
1998~2018	23.5	22.7	21.9	19.8	15.7	20.8	20.7
2009~2018	24.1	23.4	22.4	19.9	16.7	21.0	21.1
2014~2018	23.7	24.1	22.4	19.9	16.8	22.1	21.2
1976~2018	23.5	22.1	22.2	19.6	15.7	20.7	20.6

近 10 年和近 5 年的强降水强度发生了变化, 近 10 年果洛的平均强降水强度为 21.1 mm/d, 强度最强的是 X6014 (久治索乎日麻乡), 强度为 25.3 mm/d, 强度最小的是 X6001 (玛多三岔路口), 强度为 16.1 mm/d。近 5 年果洛地区的平均强降水强度为 21.2 mm/d, 强度最强的是 X6014 (久治索乎日麻乡), 强度为 25.9 mm/d; 强度最小的是 X6001 (玛多三岔路口), 强度为 16.3 mm/d。

由此可见, 果洛地区 21 世纪头十年强降水强度最弱, 2010~2018 年的强降水强度最强, 近 10 年和近 5 年的强降水强度最大的是久治索乎日麻乡, 最小的是玛多三岔路口。6 个国家站在各年代中的变化各不相同。

3.3.3. 强降水强度周期分析

根据果洛地区汛期的强降水强度时间序列, 进行 Morlet 小波变换, 图 6 为果洛地区汛期强降水强度的 Morlet 实部系数时-频分析图 6(a)和小波模图 6(b)。由图 6 可知, 果洛地区的强降水强度 6 年和 12 年的振荡周期较为明显, 70 年代末至 1985 年有 3 年的振荡周期。久治、班玛、达日、甘德、玛多和玛沁均有 9 年的振荡周期, 1995 年和 21 世纪的头五年有 3 年的振荡周期。

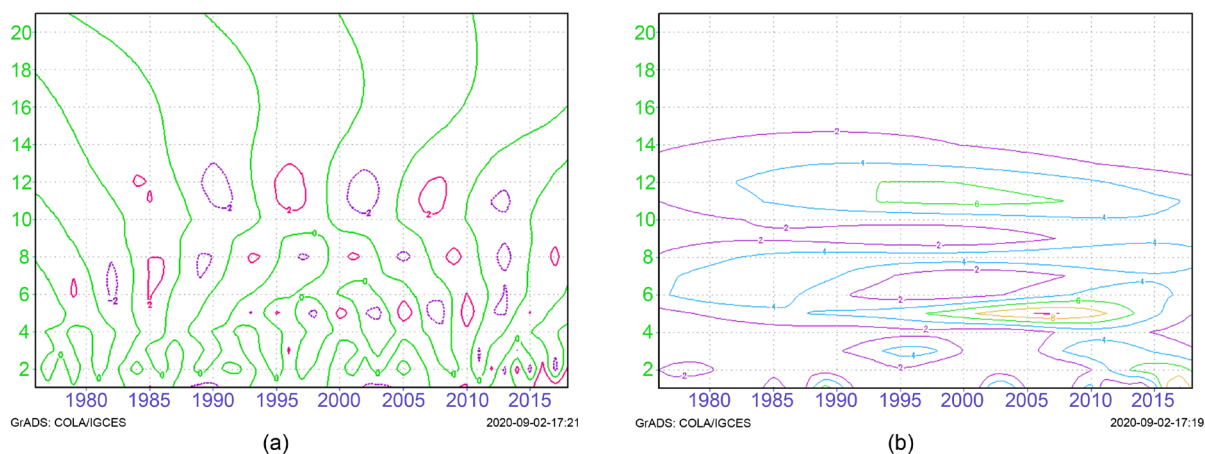


Figure 6. Time-frequency analysis (a) and wavelet modulus (b) of Morlet wavelet real part coefficients for precipitation intensity over Golog Tibetan Autonomous Prefecture

图 6. 果洛地区降水强度的 Morlet 小波实部系数时-频分析图(a)和小波模图(b)

4. 强降水量、强降水日数和强降水强度的空间分布

图 7 给出了果洛地区强降水量(a)、强降水日数(b)和强降水强度(c)的空间分布情况, 由图 7 可知, 果洛地区的强降水量呈由西北向东南方增加分布格局, 其中玛多、玛多路口和玛沁雪山乡减少明显; 强降水强度从西北向东南方呈增多加强的分布格局, 久治索乎日麻乡、达日满掌乡和玛赛菜唐镇班脑河村强降水强度增强明显; 强降水日数从玛沁大武乡铜矿向西北和东南方减少的分布格局。

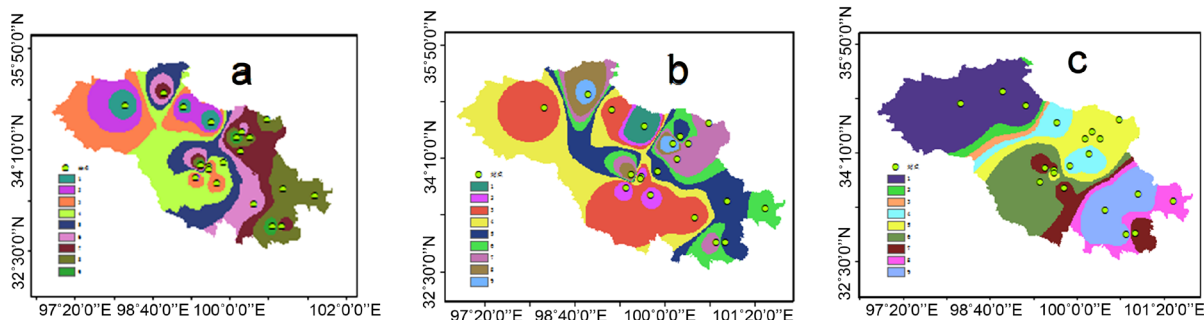


Figure 7. Spatial distribution of heavy rainfall (a), days (b) and intensity (c) over Golog Tibetan Autonomous Prefecture
图 7. 果洛地区强降水量(a)、强降水日数(b)和强度(c)的空间分布

5. 结论与讨论

(1) 果洛地区的强降水量和强降水日数以 $-0.88 \text{ mm}/10\text{a}$ 和 $-0.03 \text{ d}/10\text{a}$ 的速率呈减少趋势, 强降水强度以 $0.17 \text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 的速率呈增强趋势; 自 1998 年以来, 强降水量、强降水日数和强降水强度以 $14.96 \text{ mm}/10\text{a}$ 、 $0.63 \text{ d}/10\text{a}$ 和 $0.68 \text{ mm}/(\text{d}\cdot 10\text{a})$ 的速率呈增加趋势, 而且大于 1976~2018 年增加速率。

(2) 70 年代末果洛地区的强降水量和强降水日数最多, 从 80 年代起逐渐较少, 90 年代最少, 21 世纪有所增加。近 10 年强降水量、强降水日数和强降水强度的中心均出现在玛沁大武乡铜矿, 近 5 年的强降水量和强降水日数的中心出现在玛沁当洛乡当项、强降水强度的中心在久治索乎日麻乡。

(3) 强降水量 9 年的振荡周期、强降水日数 10 年的振荡周期和强降水强度 6 年和 12 年的振荡周期较为明显。

(4) 强降水量由西北向东南方呈增加的分布格局, 其中玛多、玛多路口和玛沁雪山乡减少明显; 强降水强度从西北向东南方呈增多加强的分布格局, 久治索乎日麻乡、达日满掌乡和班玛赛菜唐镇班脑河村强降水强度增强明显; 强降水日数从玛沁大武乡铜矿向西北和东南方呈减少的分布格局。

由于文中所选的站点较少, 分布不均, 区域站的序列较短, 对结果有一定的局限性。

基金项目

青海省气象局 2019 年基层专项。

参考文献

[1] IPCC (2013) Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Cambridge University Press, Cambridge.
 [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] 巢清尘, 周波涛, 宋颖, 等. IPCC 气候变化自然科学认知的发展[J]. 气候变化研究进展, 2014, 10(1): 7-13.
 [4] 张顺谦, 马振峰. 1961-2009 年四川强降水变化的时空特征[J]. 安徽农业科学, 2011, 29(23): 14202-14207.
 [5] 李欣, 郑广芬, 纳丽, 等. 宁夏近 50 年极端强降水事件的时空变化分析[J]. 安徽农业科学, 2013, 41(8):

3533-3535.

- [6] 彭芳, 吴古会, 杜小玲. 贵州省汛期短时强降水时空分布特征[J]. 气象, 2012, 38(3): 307-313.
- [7] 韩廷芳, 陈宏松, 石秀云, 等. 1961-2015 年格尔木市汛期极端降水事件变化特征[J]. 青海草业, 2018, 27(2): 51-55.
- [8] 肖莲桂, 石明章. 1961-2015 年天峻地区极端降水变化趋势[J]. 青海农林科技, 2016(4): 52-55.
- [9] 陈炯, 郑永光, 张小玲, 等. 中国暖季短时强降水分布和日变化特征及其与中尺度对流系统日变化关系分析[J]. 气象学报, 2013(3): 367-382.
- [10] Zhang, H. and Zhai, P.M. (2011) Temporal and Spatial Characteristics of Extreme Hourly Precipitation over Eastern China in the Warm Season. *Advances in Atmospheric Sciences*, No. 5, 1177-1183.
<https://doi.org/10.1007/s00376-011-0020-0>
- [11] Zhou, T., Yu, R., Chen, H., *et al.* (2008) Summer Precipitation Frequency, Intensity, and Diurnal Cycle over China: A Comparison of Satellite Data with Rain Gauge Observations. *Journal of Climate*, **16**, 3997-4010.
<https://doi.org/10.1175/2008JCLI2028.1>
- [12] 乔林, 陈涛, 路秀娟. 黔西南一次中尺度暴雨的数值模拟诊断研究[J]. 大气科学, 2009, 33(3): 537-550.
- [13] 韩宁, 苗春生. 近 6 年陕甘宁三省 5-9 月短时强降水统计特征[J]. 应用气象报, 2012, 23(6): 691-701.
- [14] 周明飞, 熊伟, 杜小玲. 贵州近 10 年短时强降水统计分析[J]. 成都信息工程学院学报, 2016(4): 425-432.
- [15] 黄春丽, 李佳. 广西汛期降水时空分布特征[J]. 农业与技术, 2018(11): 129-130.
- [16] 杨东, 程军奇, 李小亚, 等. 甘肃黄土高原各级降水和极端降水时空分布特征[J]. 生态环境学报, 2012(9): 1539-1547.
- [17] 徐慧燕, 邓霞君, 周国华. 丽水地区短时强降水时空分布特征及成因分析[J]. 气象与环境科学, 2016, 39(3): 44-49.
- [18] 王小玲, 翟盘茂. 1957-2004 年中国不同强度级别降水的变化趋势特征[J]. 热带气象学报, 2008(5): 459-466.
- [19] 魏凤英. 现代气候统计诊断预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 1999.
- [20] 张沅. 1998 年全球气候系统[J]. 气象科技, 2000, 28(1): 60-62.