

冰川冻土
Journal of Glaciology and Geocryology
ISSN 1000-0240, CN 62-1072/P

《冰川冻土》网络首发论文

题目：高寒内流区极端降水的气候变化特征分析
作者：高文德，王昱，李宗省，王文胜，杨盛梅
收稿日期：2020-10-31
网络首发日期：2021-03-18
引用格式：高文德，王昱，李宗省，王文胜，杨盛梅. 高寒内流区极端降水的气候变化特征分析[J/OL]. 冰川冻土.
<https://kns.cnki.net/kcms/detail/62.1072.P20210316.2044.002.html>



网络首发：在编辑部工作流程中，稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定，且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式（包括网络呈现版式）排版后的稿件，可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定；学术研究成果具有创新性、科学性和先进性，符合编辑部对刊文的录用要求，不存在学术不端行为及其他侵权行为；稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准，正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性，录用定稿一经发布，不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容，只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认：纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊（光盘版）》电子杂志社有限公司签约，在《中国学术期刊（网络版）》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版，以单篇或整期出版形式，在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊（网络版）》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物（ISSN 2096-4188，CN 11-6037/Z），所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.7522/j.issn.1000-0240.2021.0042

GAO Wende, WANG Yu, LI Zongxing, et al. Analysis on the characteristics of climate change in the endorheic area in alpine region based on extreme precipitation index[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2021, 43(1):1-11. [高文德, 王昱, 李宗省, 等. 高寒内流区极端降水的气候变化特征分析[J]. 冰川冻土, 2021, 43(1):1-11.]

高寒内流区极端降水的气候变化特征分析

高文德^{1,2}, 王昱¹, 李宗省², 王文胜³, 杨盛梅³

(1. 兰州理工大学能源与动力工程学院, 甘肃兰州 730000; 2. 中国科学院西北生态环境资源研究院内陆河流域生态水文重点实验室, 甘肃兰州 730000; 3. 西藏自治区水文水资源勘测局昌都水文分局, 西藏昌都 854000)

摘要: 利用中国气象局1969—2017年高寒内流区25个气象站的日降水资料, 分析极端降水的变化特征, 结果表明: 1969—2017年高寒内流区降水量呈上升趋势, 这种上升很大程度上可能是由于夏季降水量增加导致的, 且20世纪90年代以后降水量增加趋势更加明显。极端降水指数除连续干旱日数外, 均呈不同程度的增加趋势, 其年际变化反映出在进入21世纪后高寒内流区降水向强降水量和日数更多、强度更强、极值更大的方向发展。极端降水指数空间差异性明显, 连续湿润日数、雨日降水总量、雨日降水强度、单日最大降水量、五日最大降水量、极端降水量和日降水大于10 mm日数表现显著增加趋势的台站百分率分别为5%、64%、42%、60%、32%、35%和43%, 连续干旱日数表现显著下降趋势的台站百分率为5%。极端降水事件具有一致性, 总降水量增加, 极端降水的频率、强度、极值也增加, 小雨日数增加是降水总量增加的因素之一。极端降水增湿幅度有随海拔升高有增大趋势, 高海拔区雨日降水量和雨日天数的增加是极端降水总量增加的主要因素。

关键词: 极端降水指数; 高寒内流区; 海拔; 气候变化

中图分类号: P468.0*24 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-0240(2021)01-0001-11

0 引言

20世纪50年代以来, 全球平均地表温度以 $0.12\text{ }^{\circ}\text{C}\cdot(10\text{a})^{-1}$ 的速度增长^[1]。随着全球气候变暖, 热浪、强降水、干旱等极端气候事件频繁发生, 地表水循环加速, 极端降水强度和频率发生改变, 给社会经济发展带来了许多负面影响^[2-8]。Alexander等^[9]指出20世纪以来全球降水日数有显著增加趋势, 特别在北半球的中高纬度区域。同时, 在未来温室气体浓度持续升高背景下, 极端降水事件的发生会更加频繁^[2,9-10]。极端降水带来的危害主要在三方面, 第一, 极端降水的发生常与洪水、干旱、山体滑坡及泥石流等自然灾害有关, 对生态环境和社会经济可持续发展造成了重大影响^[9,11-17]; 第二, 极端强降水事件会导致土壤过湿, 不利于农作物生长, 同时还会

引发病虫害^[18]; 第三, 极端降水事件趋于频繁, 水资源的不确定性会趋于严峻, 进一步导致水资源的时空配置调度趋于困难^[2,19]。因此, 极端降水事件的变化规律及其发生机制备受学者关注^[20-23]。

中国极端强降水事件在20世纪60年代以来整体上呈增多趋势^[24-25]。极端降水在不同流域上存在显著的区域差异^[26-30], 例如, 20世纪60年代以来, 西北地区^[31-32]、长江流域^[33]极端降水事件强度呈增加趋势, 极端降水频率呈减少趋势; 西南地区总降水量略有减少, 但极端降水频率和强度均增加^[34-35]; 华北地区极端降水强度和频率均呈减少趋势, 极端降水量减少^[36]。

高寒内流区位于青藏高原腹地, 是中国寒区内陆河的聚集地, 受东亚季风、高原季风和西风环流的交汇影响, 对区域及全球性的气候变化较为敏感。研究指出, 1960—2014年柴达木盆地极端降水

收稿日期: 2020-10-31; 修订日期: 2021-02-09

基金项目: 中国科学院“西部之光”交叉团队项目-重点实验室合作研究专项; 国家自然科学基金项目(42077187); 第二次青藏高原综合科学考察研究项目“生态安全屏障功能与优化体系”(2019QZKK0405); 国家“万人计划”青年拔尖人才项目资助

作者简介: 高文德, 硕士研究生, 主要从事气候变化研究. E-mail: 1357790513@qq.com

通信作者: 李宗省, 研究员, 主要从事寒区同位素水文与气候变化研究. E-mail: lizxhs@163.com

频率和强度均有所增加^[37],1961—2015年间青海湖流域降水量快速增加,波动快速增强,极端降水的强度与频数亦快速增加,极端降水事件可能性大大增加^[38]。然而作为中国重要生态屏障,对整个高寒内流区极端降水特征的研究处于空白,此外,作为一个独立的水文单元,其下垫面条件复杂多样,水资源调控困难,因而有必要采用最新的资料和统一的极端降水指数,对高寒内流区极端降水事件变化特征及其演变规律进行全面深入的分析。本文在以往研究基础上选取由气候变化检测、监测和指数专家小组(<http://cccma.seos.ubic.ca/etccdm/index.shtml>)推荐的12个极端降水指数中与本研究区生态环境密切相关的8个极端降水指数来研究极端降

水变化的规律和原因,为适应气候变化制订具有针对性的防灾减灾对策,同时为高寒内流区水资源调控及未来气候预测提供科学依据。

1 研究区概况

高寒内流区位于青藏高原腹地,总占地面积1 025 163.28 km²,占据青藏高原约45%的面积,地理位置为78.46°~101.45° E,29.52°~39.42° N,主要包括青海湖流域分区、柴达木盆地分区和羌塘盆地分区,行政区包括青海省、西藏和新疆,是内陆河区湖泊较为集中的地区。高寒内流区平均海拔4 000 m以上,气候寒冷干燥,全年降水量相较于全国大部分地区偏少,主要集中在5—9月份^[39-45]。

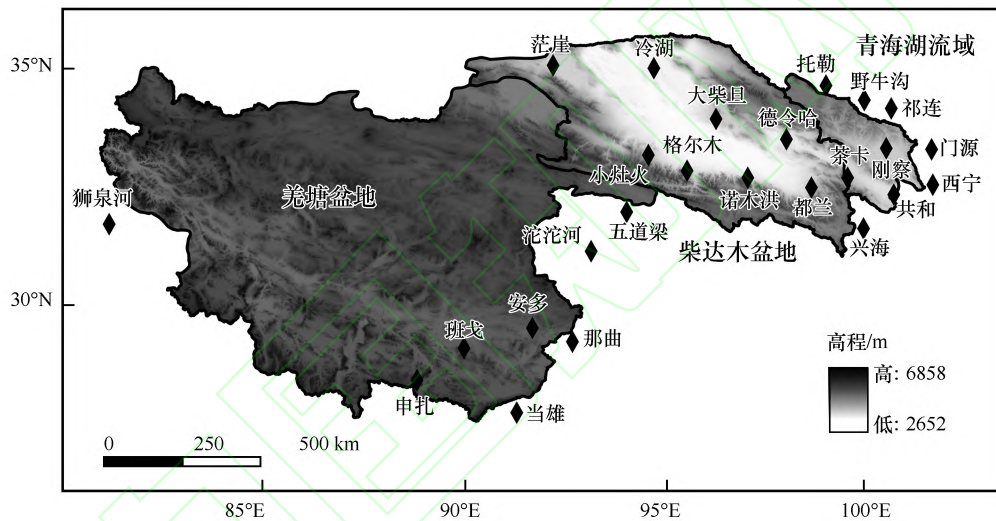


图1 高寒内流区区域图及站台分布

Fig. 1 The regional map and platform distribution of the endorheic area in alpine region

2 数据来源与研究方法

选取由中国气象科学数据共享服务网(<http://cdc.nimc.cn/home.do>)提供的,符合条件的25个气象站点1969年1月1日至2017年12月31日共49年日降水资料,利用基于R编辑器开发的RClimDex软件计算8个极端降水指数(表1);采用线性趋势法,5年滑动平均等分析高寒内流区极端降水的变化趋势;其中季节划分按照当地特殊自然地理环境,以4—5月为春季,6—8月为夏季,9—10月为秋季,11月至次年2月为冬季。

3 结果与分析

3.1 降水量时空变化特征

3.1.1 时间变化

高寒内流区1969—2017年平均降水量为270 mm,

年最大降水量出现在1989年,年降水量为331 mm;年最小降水量出现在1972年,年降水量为224 mm。1969—2017年年平均降水以 $11.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的趋势显著增加。1969—1995年保持稳定,20世纪90年代到21世纪前10年显著增加,之后波动下降。从季节变化上来看四季降水都呈明显增加趋势,其中夏季降水增加趋势最为明显,其增加值达到了 $6.11 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。春季降水在70年代中期到80年代中期上升,80年代中期到90年代初下降,90年代以后30年里呈波动上升趋势。夏、秋季降水年际上与全年变化相似,在波动中呈上升趋势;冬季降水在90年代之前上升,90年代之后波动下降。

3.1.2 空间变化

我国高寒内流区约有88%的台站年降水量呈增加趋势,有56%的台站增加趋势通过了显著性检

表1 极端降水指数的定义

Table1 Definition of extreme precipitation indices

指数代码	名称	定义	单位
PRCPTOT	雨日降水总量	日降水量大于 1 mm 的总降水量	mm
SDII	雨日降水强度	日降水量大于 1 mm 雨日的平均雨量	mm·d ⁻¹
RX1day	单日最大降水量	年内单日最大降水量	mm
RX5day	五日最大降水量	年内连续五日最大降水量	mm
R95	极端降水量	日降水量大于第 95 个百分点的雨日降 75 水总量	mm
CDD	连续干旱日数	日降水量小于 1 mm 的连续日数	d
CWD	连续湿润日数	日降水量大于 1 mm 的连续日数	d
R10 mm	日降水大于 10 mm 日数	日降水量大于 10 mm 的日数	d

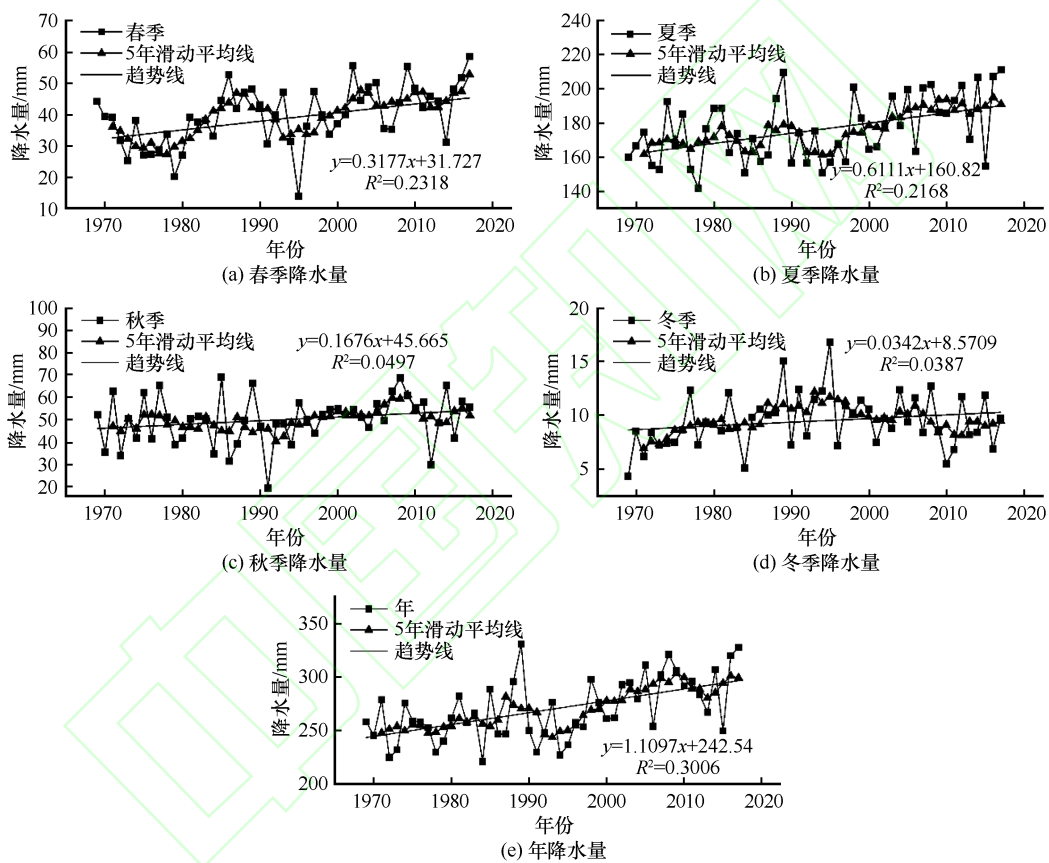


图2 1961—2017年高寒内流区降水年际变化趋势

Fig. 2 The temporal variation of precipitation in the endorheic area in alpine region during 1969—2017

验,显著增加的区域主要分布在青海湖流域,羌塘盆地南部地区也有较大增加趋势,表现降低的台站分布在柴达木中部北部地区。约92%的台站春季降水表现增加势头,但仅有43%的台站增加趋势通过了显著性检验且主要分布在羌塘盆地大部分台站及青海湖流域,增加幅度呈现自北向南递增的趋势。夏季降水显著增加的台站分布在高寒内流区东部地区,表现降低趋势的台站分布在柴达木盆地腹地。秋季降水量约有80%的台站表现出增加趋势,但仅有30%的台站通过了显著性检验,主要分

布在高寒内流区东部地区。冬季降水呈上升趋势的站点占76%,均未通过显著性检验,总体上呈由北向南增大的趋势,增幅最大值出现在羌塘盆地南部地区。

3.2 极端降水时空变化特征

3.2.1 时间变化

由高寒内流区极端降水指数变化趋势来看(图4),CDD(连续干旱日数)除20世纪90年代表现增加趋势外,其余时段均呈不同程度的降低趋势,总体以 $-3.54 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率显著降低,表明高寒内

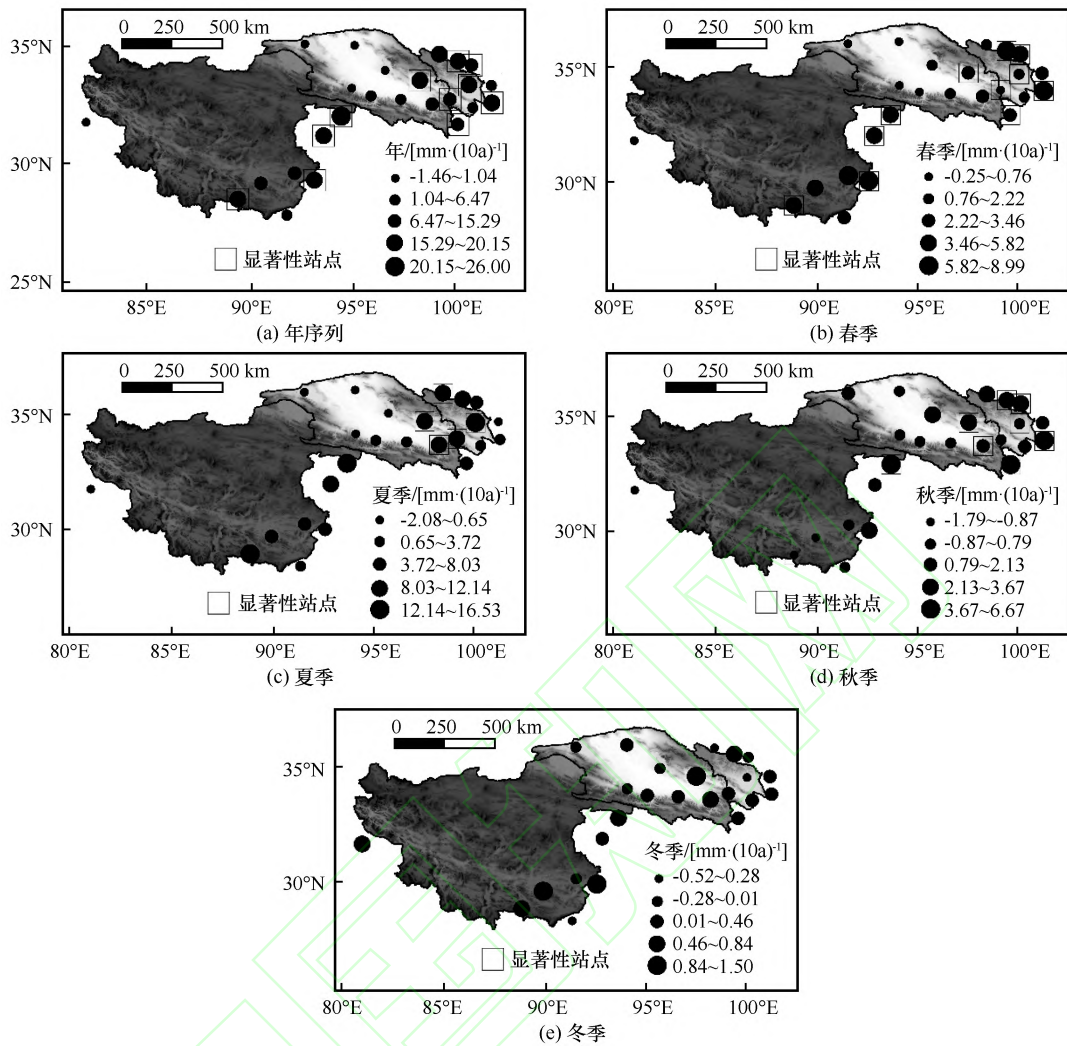


图3 1961—2017年高寒内流区降水量的空间分布

Fig. 3 Spatial variation of precipitation variations in the endorheic area in alpine region during 1969—2017

流区降水年内结构发生变化。研究段内CWD(连续湿润日数)在1969—1985年呈增加趋势,此后微弱降低,2000年以后又开始缓慢增加,总体上以 $0.06 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的趋势上升,但没有通过显著性检验。

1969—2017年PRCPTOT(雨日降水总量)在1969—1990年增加趋势缓慢,1990年之后剧烈增加,总体上呈上升趋势,变化幅度为 $11.06 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。研究段内SDII(雨日降水强度)展现出以10年为周期的波动变化,总体上以 $0.06 \text{ mm} \cdot \text{d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的速率显上升。

RX1day(单日最大降水量)和RX5day(五日最大降水量)在研究段内均为显著增加趋势,增湿幅度分别为 $1.06 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 和 $3.07 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。RX1day在1969—1980年呈降低趋势,1980年以后缓慢增加,21世纪呈现出更大的增加趋势。

RX5day在研究段内均呈增加趋势,同样在21世纪呈现出更大的增加趋势,表明新世纪以来高寒内流区气候向湿化发展。

研究区R95(极端降水量)在1969—1980年下降,之后表现出增加势头,2000年以后剧烈增加,总体上以 $4.35 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 速率增加。R10mm(日降水大于10mm日数)以 $0.43 \text{ d} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的倾向率显著增加;在1990年之后表现出更剧烈的增长趋势。

3.3 空间变化

我国高寒内流区极端降水指数空间差异明显,PRCPTOT约有88%台站为增加趋势,约有64%的台站的增加趋势通过了显著性水平检验(图5),表现增加趋势的台站主要分布在东部等高海拔地区(图6),这一结论证实该地区降水增加主要发生在高海拔地区。研究区内SDII有76%的台站表现出增加趋势,但只有42%的台站增加趋势通过了显著

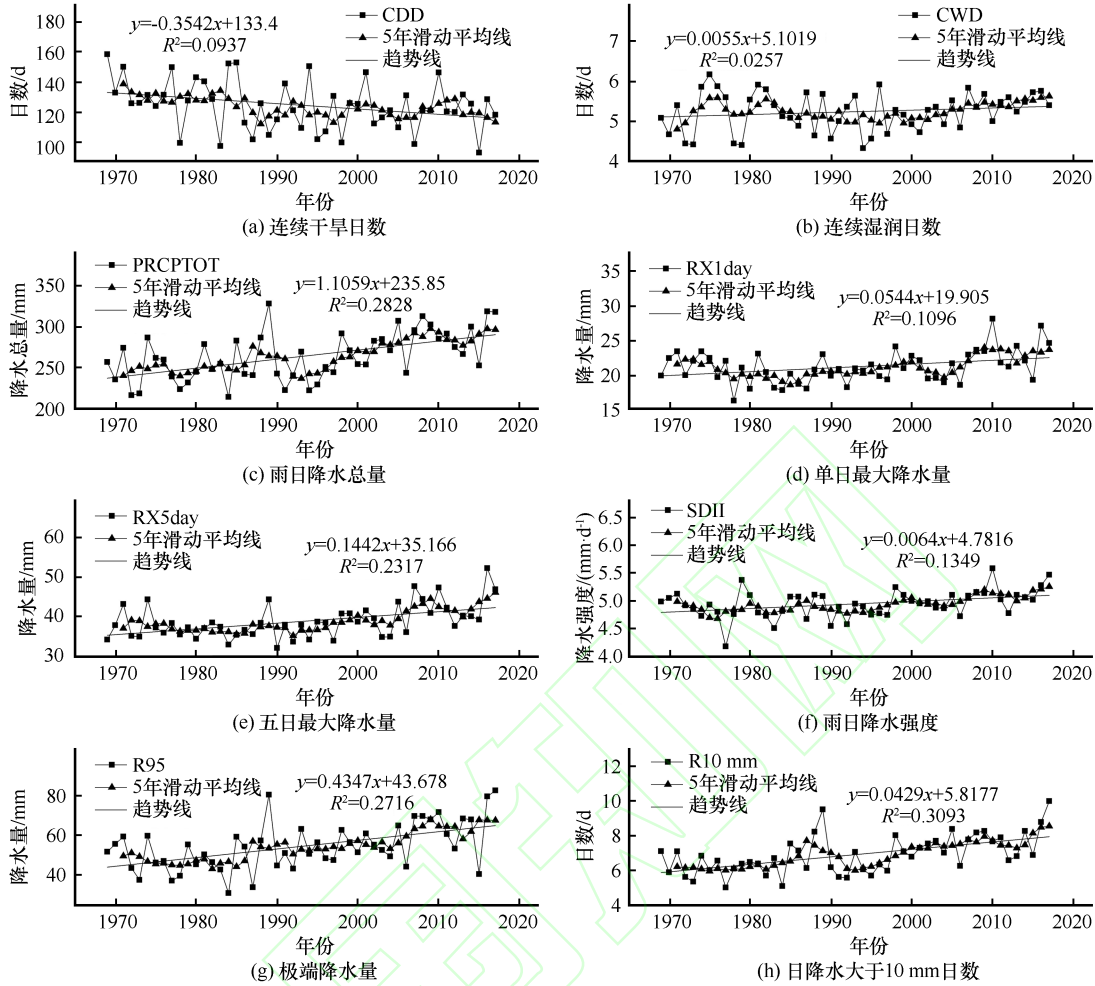


图4 1961—2017年高寒内流区极端降水指数年际变化曲线

Fig. 4 The annual variation curves of extreme precipitation index in the endorheic area in alpine region during 1969—2017

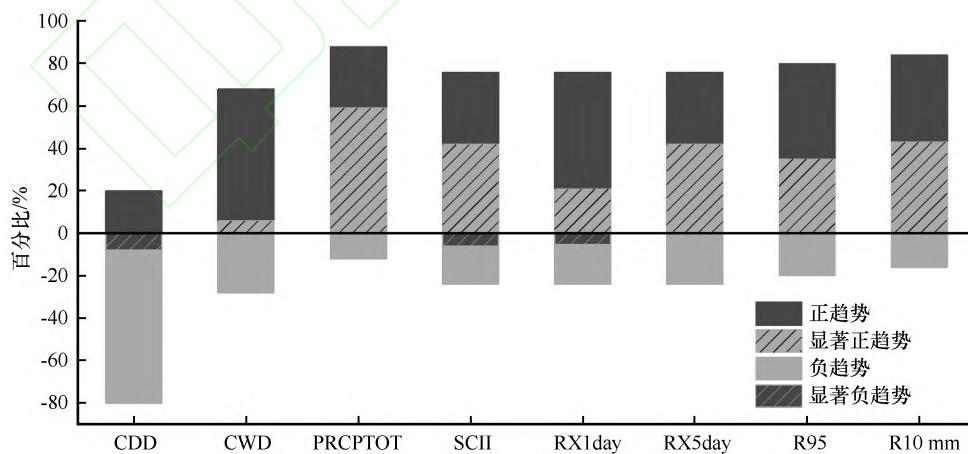


图5 极端降水指数显示正趋势和负趋势的气象台站百分比

Fig. 5 Percentage of stations showing positive and negative trends for indices of precipitation index

性检验,大部分SDII增加的台站与PRCPTOT呈增加趋势的台站相同,表明PRCPTOT与SDII在区域上表现出相同的分布规律,You等^[46]对青藏高原极端降水的研究也得到了这一结论。

RX1DAY和RX5day的变化趋势区域差异性明显,RX1day有76.92%的台站呈增加趋势,有60%的台站通过了显著性水平检验,这些台站主要分布高寒内流区东南部地区;RX5day有73.08%台站呈

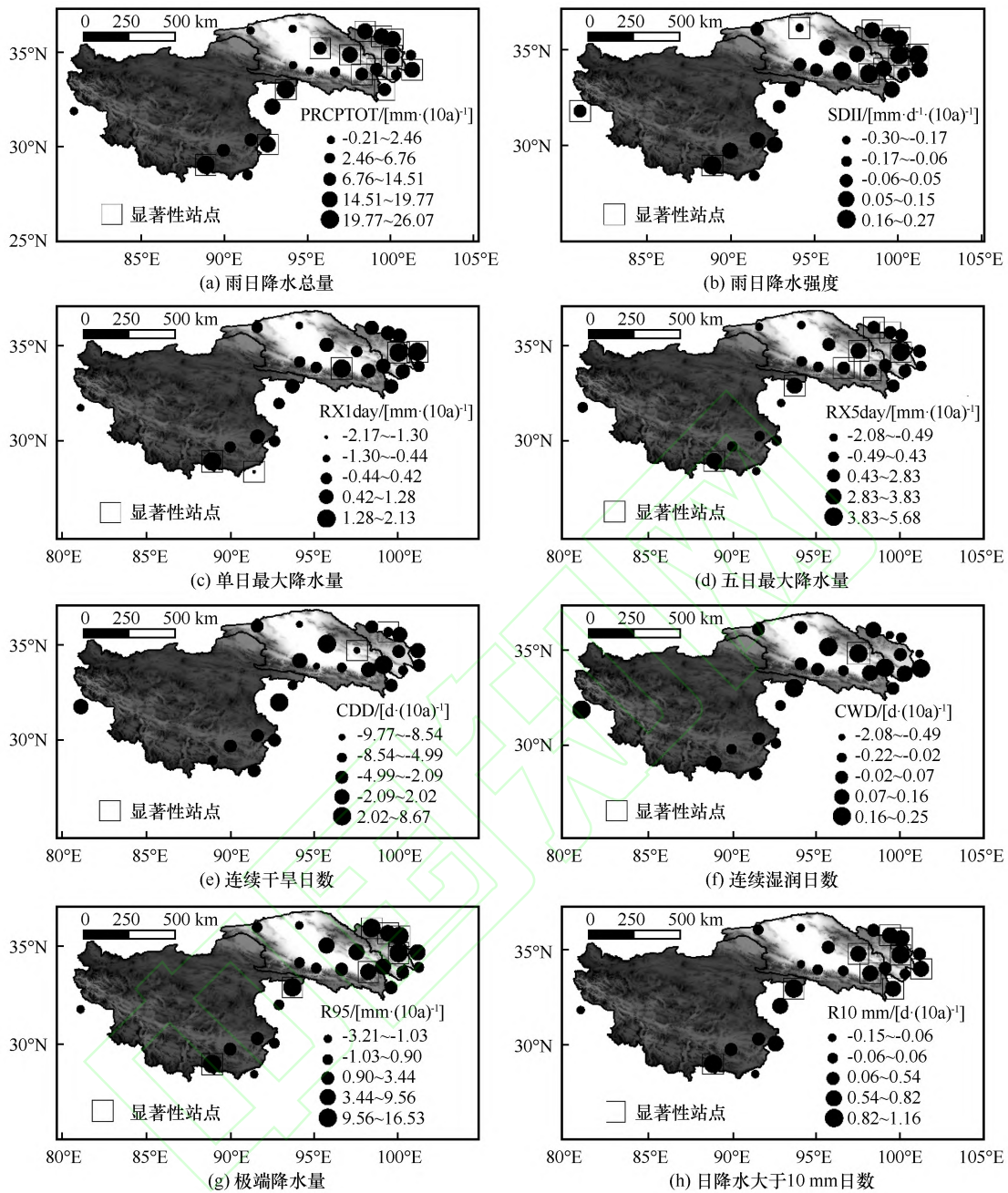


图6 1961—2017年高寒内流区极端降水指数变化幅度的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of change ranges of extreme precipitation index in the endorheic area in alpine region during 1969—2017

增加趋势,有32%的台站通过了显著性水平检验,变化趋势由东到西逐渐递增。

参与统计的25个台站中CDD有80%的台站呈降低趋势,但只有10%的台站降低趋势通过了0.05水平的显著性检验(图5),呈现增加趋势的台站主要分布在柴达木盆地(图6),反映了这一区域雨日天数的增加。整个研究区约72%的台站CWD上升,只有德令哈站通过显著性检验,表现增加趋势的台站主要分布柴达木盆地东部,表现降低趋势的台站主要分布在羌塘盆地南部。

R95约有80%的台站呈增加趋势,但只有35%的台站通过了显著性水平检验,主要集中在青海湖流域;降低的台站主要分布在柴达木盆地中部以及羌塘盆地南部。25个台站中有86%的台站R10 mm为增加趋势,约有43%的台站增加趋势通过了显著性检验,这一结果表明小雨日数的增加是引起研究区降水量增加的因素之一。

3.4 极端降水指数之间的相关性及其与海拔的联系

有学者研究表明降水与极端降水指数之间存

在密切的联系^[26,46],对高寒内流区极端降水指数进行相关性分析(表2),结果表明:在0.01显著性水平上,除CDD外,极端降水指数均与降水量呈正相关,

降水量与R10 mm和R95的相关系数分别为0.91和0.81,这一结果同样表明小雨日数及极端降水的增加是引起研究区降水量增加的因素之一。

表2 高寒内流区极端降水指数与降水量的相关性分析¹⁾

Table2 Correlation coefficients between extremes precipitation in the endorheic area in alpine region and precipitation

	降水量	CDD	CWD	PRCPTOP	RX1day	RX5day	SDII	R95	R10 mm
降水量	1	-0.18	0.48**	0.99**	0.56**	0.71**	0.50**	0.81**	0.91**
CDD	-0.18	1	-0.18	-0.19	0.17	-0.15	0.05	-0.07	-0.23
CWD	0.48**	-0.18	1	0.53**	0.21	0.38**	-0.05	0.19	0.27
PRCPTOP	0.99**	-0.19	0.53**	1	0.59**	0.73**	0.51**	0.82**	0.91**
RX1day	0.56**	0.17	0.21	0.59**	1	0.79**	0.57**	0.75**	0.49**
RX5day	0.71**	-0.15	0.38**	0.73**	0.79**	1	0.57**	0.81**	0.69**
SDII	0.50**	0.05	-0.50	0.51**	0.57**	0.57**	1	0.72**	0.67**
R95	0.81**	-0.07	0.19	0.82**	0.75**	0.81**	0.72**	1	0.85**
R10mm	0.91**	-0.23	0.27	0.91**	0.49**	0.69**	0.67**	0.85**	1

注: **在0.01级别(双尾),相关性显著; *在0.05级别(双尾),相关性显著。

极端降水指数之间的相关关系可以较为直观的反映极端降水^[26,46],CWD与RX1day、SDII、R95、R10 mm,CDD与各极端降水指数的相关性不显著,其余大部分指数之间均呈显著的正相关。其中PRCPTOT与R10 mm、R95、RX5day的相关系数分别为0.91、0.82、0.73,表明极端降水事件具有一致性,总降水量增加,极端降水的频率、强度、极值也增加。

8个极端降水指数中只有PCRPTOT和R10 mm的变化幅度表现出随海拔升高而显著的增加趋势(图7),反映出高海拔区雨日降水量和雨日天数的增加,除CWD、RX1day和RX5day外其余极端降水指数均呈随海拔升高而变化幅度增大的趋势,反映了降水量随海拔上升而增大。CDD最大降低幅度出现在海拔4 500~5 000 m(表3),表明高海拔区降水量增加,RX1DAY、RX5day、SDII、R95最高的变化幅度发生在3 000~4 000 m。PCRPTOT和R10 mm的最大增加幅度发生在海拔4 500~5 000 m之间,且这两个指数的变化幅度均随海拔上升而显著增大,表明高海拔区PCRPTOT的增加主要是R10 mm增加的结果。

4 结论

利用高寒内流区近57 a逐日降水资料,采用国际通用的极端气候指数,分析极端降水的变化特征及其原因,结果表明:

(1)1969—2017年间年均降水量以 $11.1 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 的趋势显著增加,在20世纪90年代以后增加趋势更加明显。季节降水量均呈增加趋势,以冬季上升最明显,变化幅度为 $6.11 \text{ mm} \cdot (10\text{a})^{-1}$ 。空间上年均降水量呈现出东多西少、南多北少的特征。

(2)极端降水指数除CDD外,均呈不同程度的增加趋势,其年际变化反映出在进入21世纪后高寒内流区降水向强降水量和日数更多、强度更强、极值更大、时间更集中的方向发展。

(3)极端降水指数变化的显著型水平较低且极端降水空间差异性明显,CWD、PRCPTOT、SDII、RX1DAY、RX5DAY、R95、R10表现显著增加趋势的台站百分率为5%、64%、42%、60%、32%、35%和43%,CDD表现显著下降趋势的台站百分率为5%,极端降水的空间分布反映出高海拔区雨日天数的明显增加。

(4)极端降水事件具有一致性,总降水量增加,极端降水的频率、强度、极值也增加,小雨日数增加是降水总量增加的因素之一。高寒内流区极端降水增湿幅度随海拔升高有增大趋势,高海拔区雨日降水量和雨日天数的增加是极端降水总量增加的主要因素。

由于利用站点观测资料很难获取高时空分辨率、时间一致和空间连续的降水资料,尤其是高原西部地区观测站点稀疏,使得高寒内流区极端降水的研究受到很大制约。IPCC第五次评估报告也指

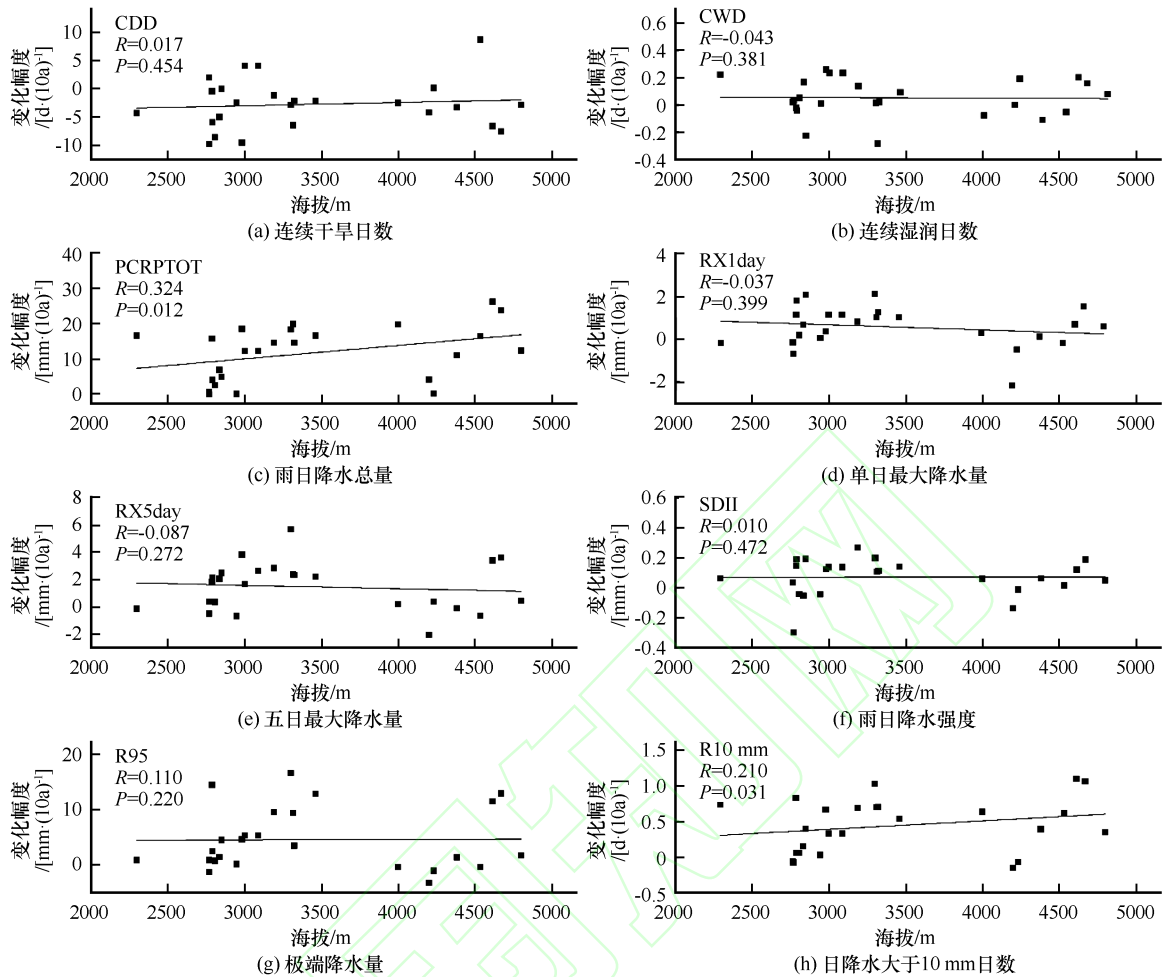


图7 1961—2017年高寒内流区极端降水指数变化幅度与海拔的相关性(R 为相关系数, P 为显著性)

Fig. 7 Correlation between elevations and linear trends of extreme precipitation indices in the endorheic area in alpine region during 1969—2017

表3 不同海拔区极端降水指数的变化幅度

Table 3 The mean trends per decade of precipitation extremes in categorized elevation ranks

海拔/m	CDD	CWD	PCRPTOT	RX1day	RX5day	SDII	R95	R10 mm
2 000~3 000	-4.57	0.05	6.95	0.54	1.2	0.03	5.06	0.28
3 000~4 000	-1.31	0.07	16.12	1.21	2.95	0.16	5.08	0.59
4 000~4 500	-1.76	-0.13	-0.66	-0.89	-1.57	-0.08	6.73	-0.08
4 500~5 000	-6.17	0.1	18.78	0.66	1.62	0.09	0.31	0.77

出,降水资料的缺乏会使评估结果存在一定的偏差和不确定性,未来需要用更长的时间序列、更多的数据源对其进行全面系统的机理性研究。

参考文献(References):

- [1] Stocker T F, Qin D H, Plattner G K, et al. IPCC, 2013. Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R]. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA.
- [2] Subash N, Singh S S, Priya N. Extreme rainfall indices and its impact on rice productivity: a case study over sub-humid climatic environment[J]. Agricultural Water Management, 2011, 98(9): 1373-1387.
- [3] Wang H L, Shao Z H, Gao T, et al. Extreme precipitation event over the Yellow Sea western coast: is there a trend?[J]. Quaternary International, 2017, 441: 1-17.
- [4] Wang X L, Hou X Y, Wang Y D, et al. Spatiotemporal variations and regional differences of extreme precipitation events in the Coastal area of China from 1961 to 2014[J]. Atmospheric Research, 2017, 197: 94-104.
- [5] Zhang X B, Hegerl G, Zwiers F W, et al. Avoiding inhomogeneity in percentile-based indices of temperature extremes[J]. Journal of Climate, 2005, 18(11): 1641-1651.
- [6] Cavalcanti I F A. Large scale and synoptic features associated

- with extreme precipitation over South America: a review and case studies for the first decade of the 21st Century[J]. *Atmospheric Research*, 2012, 118: 27-40.
- [7] Madsen H, Lawrence D, Lang M, et al. Review of trend analysis and climate change projections of extreme precipitation and floods in Europe[J]. *Journal of Hydrology*, 2014, 519: 3634-3650.
- [8] Chang Jun, Wang Yongguang, Zhao Yu, et al. Characteristics of climate change of precipitation and rain days in the Yellow River basin during recent 50 years[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 43-54. [吴军, 王永光, 赵宇, 等. 近50年黄河流域降水量及雨日的气候变化特征[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 43-54.]
- [9] Alexander L V, Zhang X, Peterson T C, et al. Global observed changes in daily climate extremes of temperature and precipitation[J]. *Journal of Geophysical Research*, 2006, 111(5): 05109.
- [10] Wu Jia, Zhou Botao, Xu Ying. Response of precipitation and its extremes over China to warming: CMIP5 simulation and projection[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2015, 58(9): 3048-3060. [吴佳, 周波涛, 徐影. 中国平均降水和极端降水对气候变暖的响应: CMIP5模式模拟评估和预估[J]. *地球物理学报*, 2015, 58(9): 3048-3060.]
- [11] Pal, Jeremy S. Consistency of recent European summer precipitation trends and extremes with future regional climate projections[J]. *Geophysical Research Letters*, 2004, 31(13): 137-151.
- [12] Li Z, Liu W Z, Zhang X C, et al. Assessing the site-specific impacts of climate change on hydrology, soil erosion and crop yields in the Loess Plateau of China[J]. *Climatic Change*, 2011, 105(1/2): 223-242.
- [13] Jiang C, Shaw K S, Upperman C R, et al. Climate change, extreme events and increased risk of salmonellosis in Maryland, USA: evidence for coastal vulnerability[J]. *Environment International*, 2015, 83: 58-62.
- [14] Powell J P, Reinhard S. Measuring the effects of extreme weather events on yields[J]. *Weather & Climate Extremes*, 2016, 12: 69-79.
- [15] Coumou D, Rahmstorf S. A decade of weather extremes[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 491-496.
- [16] Groisman P Y, Knight R W, Karl T R. Changes in intense precipitation over the Central United States[J]. *Journal of Hydro-meteorology*, 2012, 13(1): 47-66.
- [17] Zhang Cunjie, Huang Dapeng, Liu Changyi, et al. IPCC AR5 updated understanding of climate change impacts on human well-beings[J]. *Climate Change Research*, 2014, (4): 246-250. [张存杰, 黄大鹏, 刘昌义, 等. IPCC第五次评估报告气候变化对人类福祉影响的新认知[J]. *气候变化研究进展*, 2014, (4): 246-250.]
- [18] Carlos E González-Orozco, Porcel M, Diego F Alzate Velásquez, et al. Extreme climate variability weakens a major tropical agricultural hub[J]. *Ecological Indicators*, 2020, 111: 106015.
- [19] Cavalcanti I F, Carril A F, Penalba O C, et al. Precipitation extremes over La Plata Basin: review and new results from observations and climate simulations[J]. *Journal of Hydrology*, 2015, 523: 211-230.
- [20] Griffiths M L, Bradley R S. Variations of twentieth-century temperature and precipitation extreme indicators in the Northeast United States[J]. *Journal of Climate*, 2007, 20(21): 5401-5417.
- [21] Choi G, Collins D, Ren G, et al. Changes in means and extreme events of temperature and precipitation in the Asia-Pacific Network region, 1955 - 2007[J]. *International Journal of Climatology*, 2009, 29: 1906-1925.
- [22] Li Z, Zheng F L, Liu W Z, et al. Spatial distribution and temporal trends of extreme temperature and precipitation events on the Loess Plateau of China during 1961-2007[J]. *Quaternary International*, 2010, 226: 92-100.
- [23] Gunawardhana L N, Alrawas G A. Trends in extreme temperature and precipitation in Muscat, Oman[J]. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 2014, 364: 57-63.
- [24] Wu Wenbo, You Qinglong, Wangdai. Characteristics of extreme precipitation in China based on homogenized precipitation data[J]. *Journal of Natural Resources*, 2016, 31(6): 1015-1026. [武文博, 游庆龙, 王岱. 基于均一化降水资料的中国极端降水特征分析[J]. *自然资源学报*, 2016, 31(6): 1015-1026.]
- [25] Gao Tao, Xie Li'an. Study on progress of the trends and physical causes of extreme precipitation in China during the last 50 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2014, 29(5): 577-589. [高涛, 谢立安. 近50年来中国极端降水趋势与物理成因研究综述[J]. *地球科学进展*, 2014, 29(5): 577-589.]
- [26] Liu L, Xu Z X. Regionalization of precipitation and the spatio-temporal distribution of extreme precipitation in southwestern China[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 1195-1211.
- [27] Li Yungang, He Daming, Hu Jingming, et al. Spatial and temporal variations of extreme precipitation events in the Red River basin during 1960-2007[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(11): 1908-1917. [李运刚, 何大明, 胡金明, 等. 红河流域1960—2007年极端降水事件的时空变化特征[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(11): 1908-1917.]
- [28] Liu Haiwen, Ding Yihui. Analysis of daily precipitation characteristics over North China during rainy seasons[J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2010, 34(1): 12-22. [刘海文, 丁一汇. 华北汛期日降水特性的变化分析[J]. *大气科学*, 2010, 34(1): 12-22.]
- [29] Sun Fenghua, Wu Zhijian, Yang Suying. Temporal and spatial variations of extreme precipitation and dryness events in Northeast China in last 50 years[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2006, 25(7): 779-784. [孙凤华, 吴志坚, 杨素英. 东北地区近50年来极端降水和干燥事件时空演变特征[J]. *生态学报*, 2006, 25(7): 779-784.]
- [30] Yuan Wende, Zheng Jiangkun, Dong Kui. Spatial and temporal variation in extreme precipitation events in southwestern China during 1962-2012[J]. *Resources Science*, 2014, 36(4): 766-772. [袁文德, 郑江坤, 董奎. 1962-2012年西南地区极端降水事件的时空变化特征[J]. *资源科学*, 2014, 36(4): 766-772.]
- [31] Wang Y, Zhou B, Qin D, et al. Changes in mean and extreme temperature and precipitation over the arid region of northwestern China: observation and projection[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2017, 34: 289-305.
- [32] Wang Baolong, Zhang Mingjun, Wei Junlin, et al. The change in extreme events of temperature and precipitation over northwest China in recent 50 year[J]. *Journal of Natural Resources*, 2012, 27(10): 1720-1733. [汪宝龙, 张明军, 魏军林, 等. 西北地区近50气温和降水极端事件的变化特征[J]. *自然资源学报*, 2012, 27(10): 1720-1733.]
- [33] Wang Qiong. Changes in extreme events of temperature and precipitation in the Yangtze River basin during 1962-2011[D].

- Lanzhou: Northwest Normal University, 2014. [王琼. 1962-2011年长江流域极端气温和降水事件变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2014.]
- [34] Ding Wenrong. Spatial and temporal variability of the extreme daily precipitation in southwest China[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2014, 23(7): 1071-1079. [丁文荣. 西南地区极端降水的时空变化特征[J]. 长江流域资源与环境, 2014, 23(7): 1071-1079.]
- [35] Luo Y, Fan G Z, Zhou D W, et al. Extreme precipitation trend of Southwest China in recent 41 years[J]. Journal of the Meteorological Sciences, 2015, 35(5): 581-586.
- [36] Wang Ji, Jiang Dakai, Zhang Yingjuan. Analysis on spatial and temporal variation of extreme climate events in North China [J]. Chinese Journal of Agrometeorology, 2012, 33(2): 166-173. [王冀, 蒋大凯, 张英娟. 华北地区极端气候事件的时空变化规律分析[J]. 中国农业气象, 2012, 33(2): 166-173.]
- [37] Gegen Batu, Wei Wei, Zhang Xiao, et al. Spatiotemporal trends and periodic features of climate extremes over the Qaidam basin, China, during 1960-2014[J]. Arid Zone Research, 2020, 37(2): 304-313. [葛根巴图, 魏巍, 张晓, 等. 柴达木盆地极端气候时空趋势及周期特征[J]. 干旱区研究, 2020, 37(2): 304-313.]
- [38] Ji Qin, Yang Jianping, Chen Hongju. Comprehensive analysis of the precipitation changes over the Tibetan Plateau during 1961-2015[J]. Journal of Glaciology and Geocryology, 2018, 40(6): 1090-1099. [冀钦, 杨建平, 陈虹举. 1961-2015年青藏高原降水量变化综合分析[J]. 冰川冻土, 2018, 40(6): 1090-1099.]
- [39] Zhang Ming, Cao Xuezhong. Analysis of climate change and its characteristics in Qinghai Lake basin over the past 50 years [J]. Environmental Protection of Xinjiang, 2016, 38(4): 6-11. [张明, 曹学章. 青海湖流域近50年气候变化与特征分析[J]. 新疆环境保护, 2016, 38(4): 6-11.]
- [40] Chen Liang, Chen Kelong, Liu Baokang, et al. Characteristics of climate variation in Qinghai Lake basin during the recent 50 years [J]. Journal of Arid Meteorology, 2011, 29(4): 483-487. [陈亮, 陈克龙, 刘宝康, 等. 近50a青海湖流域气候变化特征分析[J]. 干旱气象, 2011, 29(4): 483-487.]
- [41] Chen Bishan, Pan Anding, Yang Muzhuang. Spatial and temporal characteristics and change trend of climatic elements of Qaidam basin in recent 50 years[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2010, 24(5): 117-123. [陈碧珊, 潘安定, 杨木壮. 近50年柴达木盆地气候要素分布特征及变化趋势分析[J]. 干旱区资源与环境, 2010, 24(5): 117-123.]
- [42] Shi Xinghe, Zhao Yanning, Dai Sheng, et al. Research on climatic change of Qaidam basin since 1961[J]. Journal of Desert Research, 2005, 25(1): 123-128. [时兴合, 赵燕宁, 戴升, 等. 柴达木盆地40多年来的气候变化研究[J]. 中国沙漠, 2005, 25(1): 123-128.]
- [43] Jiang Yongjian, Li Shijie, Shen Defu, et al. Climate change and its impact on the lake environment in the Tibetan Plateau in 1971-2008 [J]. Scientia Geographica Sinica, 2012, 32(12): 1503-1512. [姜永见, 李世杰, 沈德福, 等. 青藏高原近40年来气候变化特征及湖泊环境响应[J]. 地理科学, 2012, 32(12): 1503-1512.]
- [44] Yang Chunyan, Shen Weishou, Lin Naifeng. Climate change and its regional differences over the Tibet Plateau [J]. Arid Land Geography, 2014, 37(2): 290-298. [杨春艳, 沈渭寿, 林乃峰. 青藏高原气候变化及其差异性[J]. 干旱区地理, 2014, 37(2): 290-298.]
- [45] Mao Fei, Lu Zhiguang, Zhang Jiahua, et al. Analysis on climate characteristics in Naqu in recent 40 years[J]. Plateau Meteorology, 2007, 26(4): 708-715. [毛飞, 卢志光, 张佳华, 等. 近40年那曲地区气候特征分析[J]. 高原气象, 2007, 26(4): 708-715.]
- [46] You Q L, Kang S C, Aguilar E, et al. Changes in daily climate extremes in the eastern and central Tibetan Plateau during 1961-2005 [J]. Journal of Geophysical Research, 2008, 113(7): 07101.

Analysis on the characteristics of climate change in the endorheic area in alpine region based on extreme precipitation index

GAO Wende^{1,2}, WANG Yu¹, LI Zongxing², WANG Wensheng³, YANG Shengmei³

(1. School of Energy and Power Engineering, Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Eco-Hydrology of Inland River Basin, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China; 3. Tibet Bureau of Hydrology and Water Resources Survey, Chengde 854000, Xizang, China)

Abstract: Based on the daily precipitation of 25 meteorological stations from 1961 to 2017, the temporal and spatial variations in extreme precipitation events in the endorheic area in alpine region were analyzed. The results showed that the precipitation in study area delineates a significant increasing tendency, such an increase may largely stem from the contribution of the increase in summer precipitation, and the increasing trend of precipitation was more obvious after 1990s. Except CDD, the extreme precipitation index showed an increasing trend with different degrees, and the precipitation in the endorheic area in alpine region developed to the direction of heavier precipitation, more days, stronger intensity and greater extreme value after entering the 21st century. The percentage of stations with CWD, PRCPTOT, SDII, RX1Day, RX5Day, R95 and R10 showing a significant increasing trend was 5%, 64%, 42%, 60%, 32%, 35% and 43%, and the percentage of stations with CDD showing a significant decreasing trend was 5%. Extreme precipitation events were consistent. As total precipitation increased, the frequency, intensity and extreme value of extreme precipitation also increased, and the increase of light rain days was one of the factors contributing to the increase of total precipitation. The humidification amplitude of the extreme precipitation index increases with the increase of altitude. The increase of precipitation and number of rainy days in high altitude area was the main factor for the increase of total amount of extreme precipitation.

Key words: extreme precipitation index; the endorheic area in alpine region; altitude; climate change

(责任编辑: 游庆龙; 编辑: 周成林)