

黑龙江省 1958—2017 年极端降水时空变化与灾害效应

王晓宁¹, 岳大鹏¹, 赵景波^{1,2}, 苏 敏¹, 王大菊¹

(1. 陕西师范大学 地理科学与旅游学院, 西安 710119;

2. 中国科学院 地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710075)

摘 要:根据黑龙江省 1958—2017 年 30 个气象站逐日降水数据,通过线性趋势分析、Man-kendall 突变检验、小波分析、克里金插值法等方法,对选取的 9 个黑龙江省极端降水指数的年际变化、突变及周期规律等时间序列上的变化以及空间分布特点进行了分析。结果表明:(1)从时间序列上来看,持续干期以 2.52 d/10 a 的速率显著下降,降水强度呈现微弱下降趋势,其余指数呈现上升趋势且年降水量以 1.81 d/10 a 的速率显著上升;多数指数的主要突变发生于 20 世纪 70 年代末且变化具有周期性,各指数的主周期为 20 a 前后,与阶段性变化相对应。(2)从空间上来看,各指数多年平均值的空间差异较显著,研究区中部及南部地区较西北部地区降水多但西部降水强度大。(3)中部伊春、铁力以及南部尚志等地区较其他地区发生暴雨、洪涝灾害的可能性大。黑龙江省西部变干趋势明显,易发生旱灾、大风灾害。

关键词:极端降水; 时空变化; 降水突变; 周期规律; 黑龙江省

中图分类号:P426

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2020)05-0138-09

Temporal and Spatial Variations and Disaster Effect of Extreme Precipitation from 1958 to 2017 in Heilongjiang Province

WANG Xiaoning¹, YUE Dapeng¹, ZHAO Jingbo^{1,2}, SU Min¹, WANG Daju¹

(1. School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 2. State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710075, China)

Abstract: According to the daily precipitation data of 30 meteorological stations in Heilongjiang Province during period from 1958 to 2017, linear trend analysis, Man-Kendall mutation test, Kriging interpolation method and wavelet analysis were used to detect the temporal variation such as annual changes, mutation and cycle rules and spatial characteristics of 9 selected extreme precipitation indices in Heilongjiang Province. The conclusions are as follows. (1) In terms of time series, the continuous dry period decreased significantly at the rate of 2.52 d/decade, the precipitation intensity showed a small downward trend, the other indices showed an upward trend and the annual precipitation increased significantly at the rate of 1.81 d/decade. The major mutations of most indices occurred in the late 1970s and the changes were cyclical, the main period of each index was around 20 years, corresponding to the periodic changes. (2) In terms of spatial variation, the spatial difference of multi-year average values of each index was significant. The precipitation in the middle and south of the study area was more than that in the northwest, but the precipitation intensity in the west was larger. (3) In the central Yichun, Tieli and southern Shangzhi areas, the possibility of rainstorm and floods was higher than other areas. In the west of Heilongjiang Province, the trend of drying was obvious, and drought and gale occurred readily.

Keywords: extreme precipitation; temporal and spatial variations; precipitation mutation; periodic regularity
Heilongjiang province

在全球变暖的背景下,气候变化成为科学研究中的重要问题,全球变暖最终导致了极端降水事件发生

普遍,而由此引发的洪水等自然灾害频频发生^[1-3]。顾西辉等^[4]在对 1951—2014 年中国极端降水事件时

收稿日期:2019-11-13

修回日期:2020-01-07

资助项目:国家自然科学基金“陕北黄土高原典型小流域近 500 年来侵蚀产沙量变化研究:以庞家沟流域为例”(41071012)

第一作者:王晓宁(1996—),女,河南兰考人,硕士研究生,主要从事水土资源评价方面的研究。E-mail:wxn1996@snnu.edu.cn

通信作者:岳大鹏(1964—),男,陕西兴平人,博士,教授,主要从事自然地理、土壤侵蚀和土地资源与环境研究。E-mail:yuedp@snnu.edu.cn

空特征的研究中得出,中国极端降水次数在全国大部分区域有明显增加的趋势。极端降水事件的频发,对全国或区域内的经济发展、农业生产以及生态环境都会产生一系列的不利影响,也将带来泥石流、洪涝或干旱等自然灾害,不仅会造成一定的经济损失,甚至会威胁到人类生命安全^[5]。黑龙江省东西跨 14 个经度,南北跨 10 个纬度,省内旱涝灾害发生频繁是影响黑龙江省农业生产举足轻重的因素之一。黑龙江省的农业生产在我国占有特殊位置,是我国重要商品粮基地之一,旱涝、霜冻等由极端降水带来的自然灾害给农作物生产带来了极大危害,在一定程度上对全省的经济发展产生很不利的影响。

近年来,众多学者在极端气候方面取得了一定的研究成果^[6-8]。梁丰等^[9]研究发现东北地区发生干旱的风险有所提高。董伟等^[10]研究指出,吉林省极端降水事件主要发生在夏季,且极端降水事件存在年代际差异。任景全等^[11]提出极端降水事件主要受气候环境、地形等环境因素影响。虽然前人对东北地区近 60 a 左右的极端降水进行了一定研究,但缺少对黑龙江省近 60 a 极端降水时空变化及灾害效应的系统研究,本文主要针对 1958—2017 年黑龙江省极端降水指数的时空分布特征与灾害效应进行分析并讨论影响黑龙江省极端降水事件时空变化的因素以及可能带来的灾害,对提高防灾减灾的能力、合理安排农业生产、降低极端降水事件导致的经济损失等具有重要意义。

1 研究区概况、材料及方法

1.1 研究区概况

黑龙江省(43°25′—53°33′N, 121°11′—135°05′E)位于中国最东北部,是中国纬度最高、经度最东的省份。地势大致为西北部、北部和东南部高,东北部、西南部低,主要由山地、台地、平原和水面构成。东北部的三江平原、西部的松嫩平原,是中国最大的东北平原的一部分。黑龙江省属寒温带大陆性季风气候,全省年平均气温多在 $-5^{\circ}\sim 5^{\circ}\text{C}$,年降水量 400~700 mm。全省蕴藏着丰富的气候资源,具有巨大的开发潜力,如风能资源较为丰富,各地年平均风速为 2~4 m/s。另一方面,丰富的气候资源又带来许多不利因素,容易产生气候灾害。

1.2 数据来源

所用数据资料来自“中国气象科学数据共享服务网”提供的地面日值数据集,经过对数据缺测过多的站点的筛选,最终选定了具有完整数据记录的 30 个地面气象站点(图 1)。所需气象数据内容包括 1958—2017 年的逐日降水量。运用 WMO 认可的

27 项极端气候指数计算软件 RClimdex 选取了 9 个极端降水指数^[12],详见表 1。

1.3 研究方法

本文采取目前国际最常用的百分位法定义不同台站的极端降水阈值^[13],根据黑龙江省 30 个气象站 1958—2017 年逐日降水数据,对黑龙江省极端降水的时间、空间变化特征以及突变特点、周期变化进行分析,主要采用线性趋势分析对极端降水数据进行时间变化趋势分析,采用 ArcGIS 数据处理平台中的克里金插值法进行极端降水指数的空间插值,对空间变化特点进行分析,采用 Mann-Kendall 检验方法结合阶段性变化与滑动 t 检验对黑龙江省极端降水数据进行突变检测,判断突变年份与极端降水变化趋势,采用 Morlet 小波分析方法对极端降水周期判断分析^[14]。

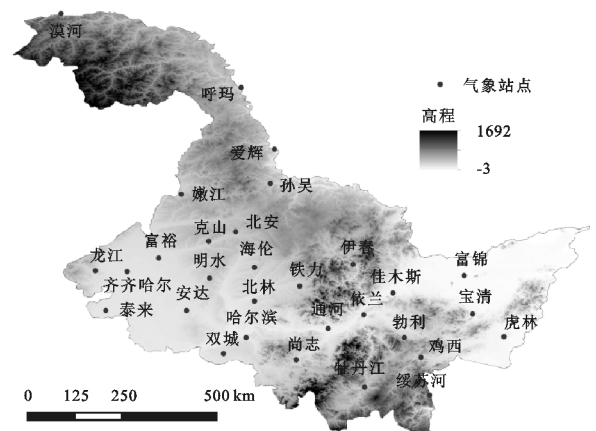


图 1 黑龙江省气象观测站分布

2 结果与分析

2.1 黑龙江省 60 a 来极端降水年际变化分析

通过计算 30 个气象站点的极端降水指数年平均值,运用线性回归与 5 a 滑动平均法作出各指数线性趋势图(图 2),并得到了各指数的 10 a 变率值(表 2)。强度指数中,日最大降水量与 5 日最大降水量的变化速率接近,均呈现微弱上升的趋势,降水强度以 $-0.01(\text{mm/d})/10\text{ a}$ 的速率微弱下降。从 5 a 滑动平均曲线来看,日最大降水量变化平稳,起伏不大,5 日最大降水量与降水强度在 20 世纪 70 年代末期前后出现较大幅度的波动。3 种绝对指数即强降水量、极端强降水量以及大雨日数均呈现增加趋势,极端强降水量以 $0.99\text{ mm}/10\text{ a}$ 的速率增加,大雨日数的增加趋势不明显,变率为 $0.006\text{ d}/10\text{ a}$,从 5 a 滑动平均来看,强降水量与大雨日数的 5 a 滑动平均曲线变化相似,在 1978 年前后出现最低值,极端强降水量的波动起伏相对较小。持续性指数中,年降水量以 $1.81\text{ mm}/10\text{ a}$ 的变率增加,持续干期以 $-2.52\text{ d}/10\text{ a}$ 的变化率显著下

降,持续湿期呈现微弱的增加趋势。从 5 a 滑动平均曲线来看,年降水量与持续湿期在 20 世纪 70 年代末波动幅度较大,持续干期在 1988—1998 年有一个较大的起伏,2000 年后 5 a 滑动曲线波动较小。

表 1 极端降水指数名称及其定义

指数类型	指数名称	定义	单位
强度	日最大降水量(RX1day)	年内最大一日降水量	mm
	5 日最大降水量(RX5day)	年内最大连续 5 日降水总量	mm
	降水强度(SDII)	年降水量/降水日数	mm/d
	强降水量(R95p)	日降水量>95%分位值的总降水量	mm
绝对	极端强降水量(R99p)	日降水量>99%分位值的总降水量	mm
	大雨日数(R25mm)	日降水量≥25 mm 日数	d
	年降水量(PRCPTOT)	日降水量≥1 mm 降水日累积量	mm
持续性	持续干期(CDD)	最长连续无降水日数	d
	持续湿期(CWD)	最长连续降水日数	d

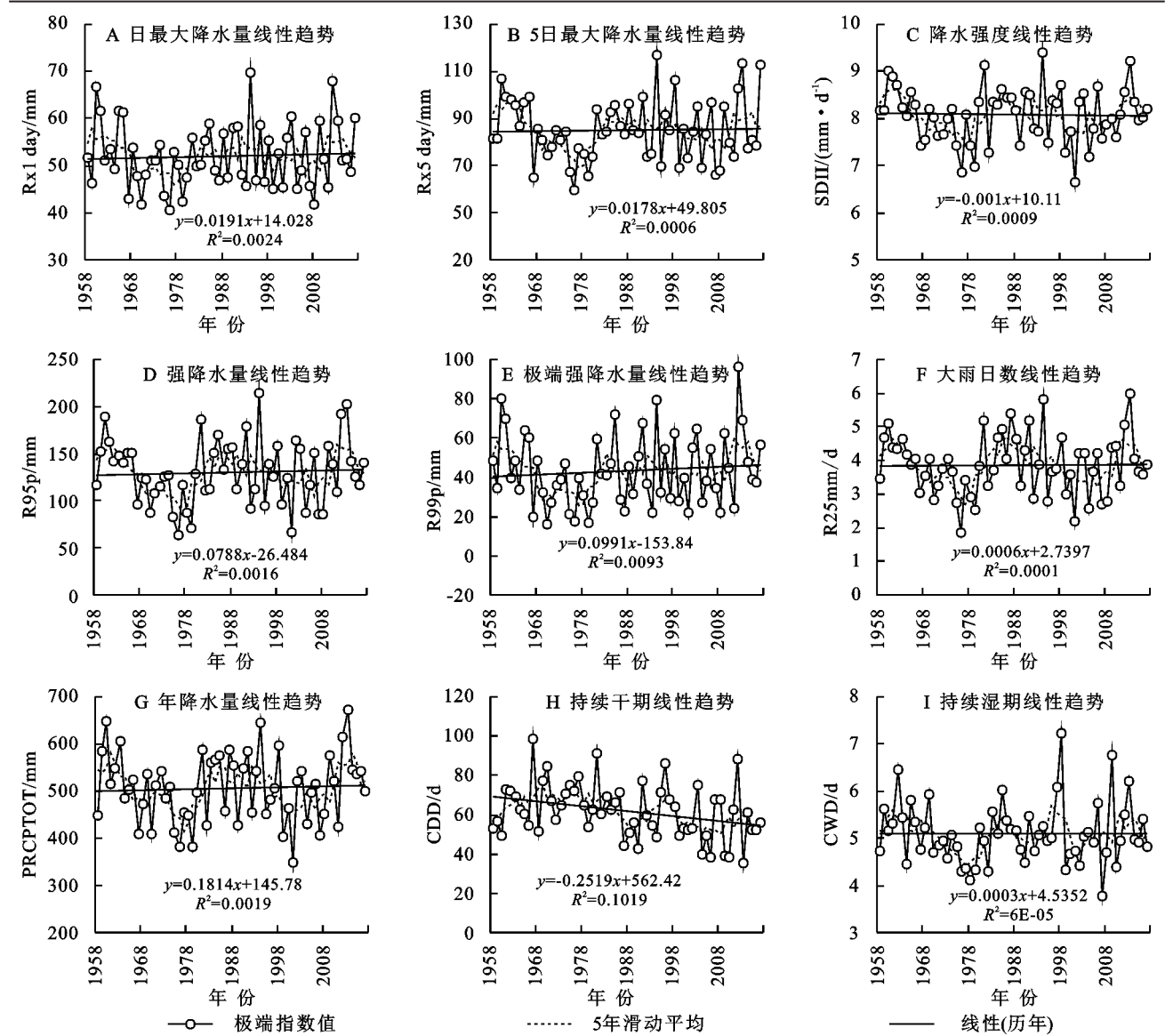


图 2 极端降水指数线性趋势

表 2 极端降水指数变化速率

1/10 a

名称	RX1day	RX5day	SDII	R95p	R99p	R25 mm	PRCPTOT	CDD	CWD
变化率	0.19	0.18	-0.01	0.79	0.99	0.006	1.81	-2.52	0.003

2.2 极端降水的突变与阶段性变化

通过 Mann—Kendall 突变检验得出了各个极端降水指数的突变结果,为便于判断,根据各极端降水指数年际变化规律划分了不同变化阶段,作出各个极端降水指数的阶段性变化图(图 3),且通过 5 a,10 a 滑动 t 检验辅助判断极端降水指数的突变年,得到各极端降水指数突变诊断结果(表 3)。根据各指数的 60 a 年际变化规律可将其划分为三到 4 个变化阶段。

除持续干期以外,日最大降水量等其余 8 个指数均可划分为 1958—1977 年、1978—1997 年、1998—2017 年 3 个变化阶段,持续干期则划分为 1958—1972 年、1973—1987 年、1988—2002 年以及 2003—2017 年 4 个阶段。日最大降水量总体呈阶段性增加的变化特点(图 3A),1978 年之后超过了 60 a 平均值。5 日最大降水量总体呈由少到多的变化特点(图 3B),从 1978 年前后开始有明显增加趋势,第三阶段

与第二阶段基本持平。降水强度总体呈“低—高一—低”的变化趋势(图 3C),从第二阶段开始即 1978 年前后,降水强度值显著增加且高于 60 a 平均值,1998 年开始出现明显下降的变化趋势。强降水量与大雨日数总体均呈现出“少—多—少”的变化趋势(图 3D、图 3F)),第二阶段初即 20 世纪 80 年代初,强降水量明显增加,第三阶段较第二阶段低,但仍高于 60 a 平均值。1978 年前后开始大雨日数增加,第三阶段略高于第一阶段。极端强降水量总体呈增加趋势(图 3E),第三阶段增势明显,高于 60 a 平均值。年降水量与持续湿期总体呈“少—多—少”的变化特点(图 3G、图 3I)。第二阶段即 1978 年前后的年降水量值与持续湿期明显增加,第三阶段的年降水量值高于第一阶段,而持续湿期的第三阶段略低于第一阶段。持续干期可划分为 4 个阶段(图 3H),第二阶段均值最大,从 1998 年前后开始持续干期减少,第四阶段最低。

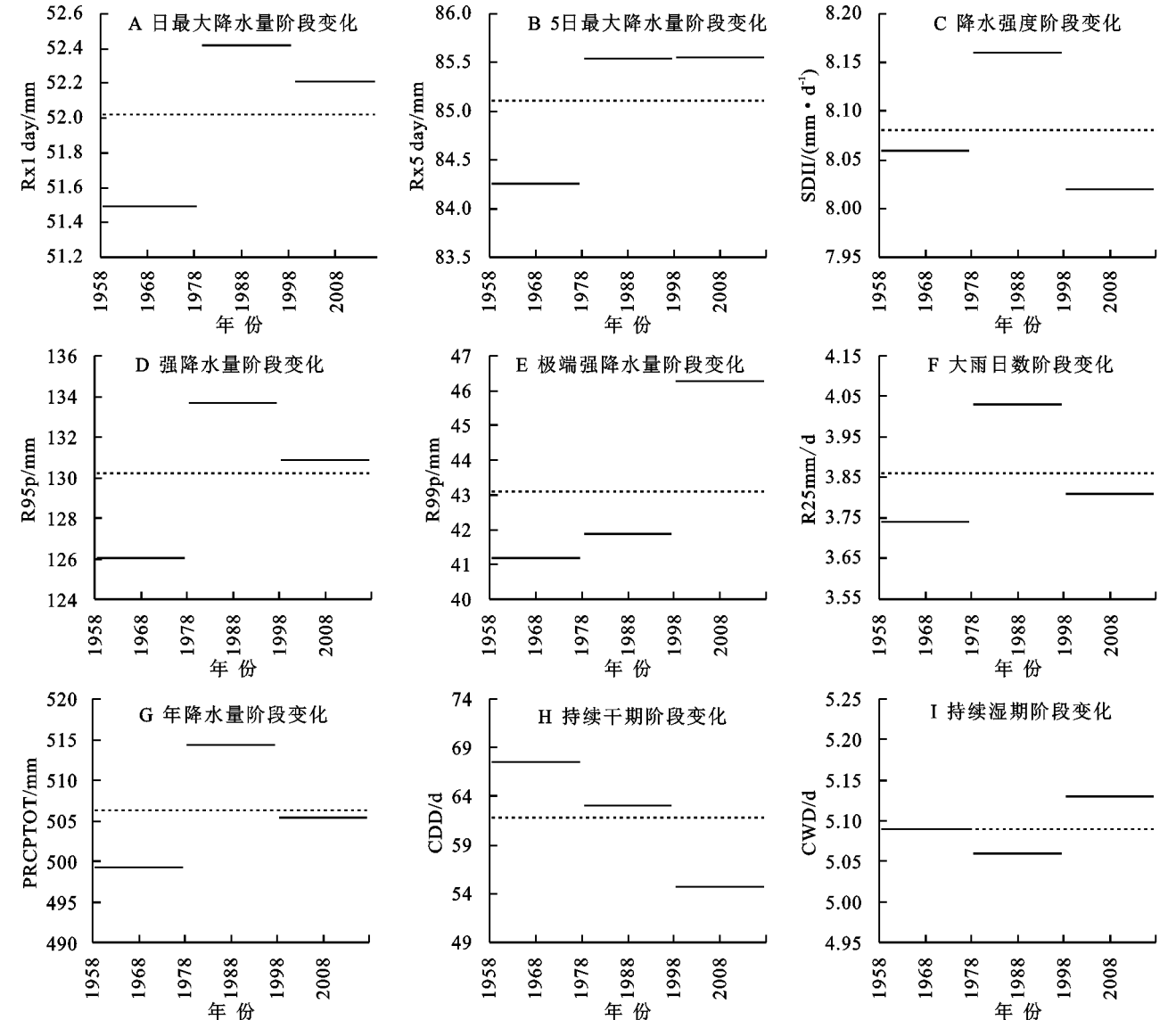


图 3 极端降水指数阶段性变化

表 3 各极端降水指数突变诊断结果

参数	RX1day	RX5day	SDII	R95p	R99p	R25mm	PRCPTOT	CDD	CWD
M-K 检验	1962	1963	1962	1962	—	1962	1966	1998	1965
5 年 MTT	1980	1980	1978	1978	1980	1978	1978	1985	1978
10 年 MTT	1980	1980	1978	1978	1968	1978	1978	1984	1978

综合表 3 中的检验结果可得,除极端强降水量无明显的突变年份以外,持续干期突变年位于 20 世纪 80 年代中期,其余 7 个指数较明显的突变发生在 20 世纪 70 年代末至 80 年代初。

2.3 极端降水周期变化分析

通过对极端降水指数年际变化进行小波分析得到小波系数实部等值线图(图 4)。小波变换通过将时间序列分解到时间频率域内得到时间序列的显著波动模式,即周期变化动态,以及周期变化动态的时间格局。图 4 中实线为正值区,虚线为负值区,正值区表示极端降水

指数值较大,负值区表示极端降水指数值较小。

日最大降水量、5 日最大降水量与降水强度均存在 16~23 a 尺度的周期变化规律,日最大降水量总体呈“减—增—减—增”趋势变化,20 a 为主周期,存在 2 个枯水期和 2 个丰水期。5 日最大降水量周期图中,16~23 a 周期震荡能量最大,贯穿整个分析时段,经历了“增—减—增—减—增”的交替转换,存在 2 个枯水期和 3 个丰水期。降水强度的主周期为 20 a,呈现“增—减—增—减”的变化趋势,存在 2 个枯水期和 2 个丰水期(图 4)。

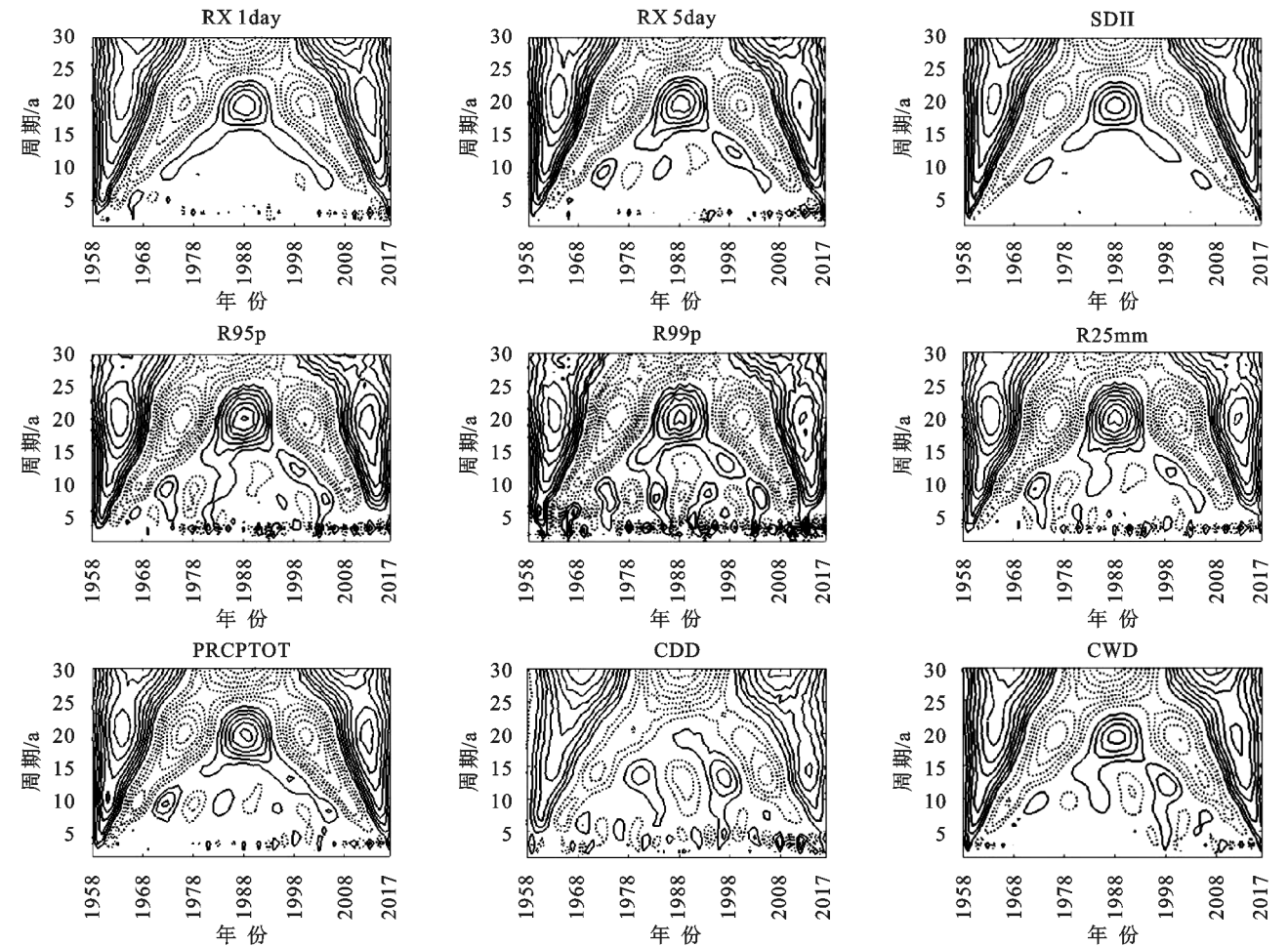


图 4 极端降水指数周期分析

强降水量存在 2~5 a,16~24 a 两类尺度的周期变化规律,其中 16~24 a 周期震荡能量最大,贯穿整个研究时期,经历了“增—减—增—减—增”的交替转换,存在 2 个枯水期和 3 个丰水期,3 a,20 a 为主周期。极端强降水量存在 2~5 a,5~10 a,16~24 a3

类尺度的周期变化规律,2~5 a 周期变化规律在 2010—2017 年表现明显,16~25 a 周期变化经历了“增—减—增—减—增”的交替转换,存在 2 个枯水期和 3 个丰水期。通过小波方差分析,20 a 为 R99p 的第一主周期。大雨日数存在 2~5 a,16~24 a 两类尺度

的周期变化规律,其中 16~24 a 周期震荡能量最大,贯穿整个研究时期,经历了“增—减—增—减—增”的交替转换,存在 2 个枯水期和 3 个丰水期(图 4)。

年降水量存在 2~5 a,5~13 a,16~24 a 3 类尺度的周期变化规律,16~24 a 贯穿整个研究时期,存在“增—减—增—减—增”的交替变换。从小波方差来看,年降水量的 3 a,10 a,20 a 分别为 3 类尺度周期变化的主周期。持续干期存在 2~6 a,10~16 a 两类尺度的周期变化规律,2~7 a 周期变化规律在 2000—2017 年表现明显,10~16 a 周期变化经历了“减—增—减—增—减”的交替转换。通过小波方差分析,15 a 为持续干期的第一主周期。持续湿期的小波系数实部等值线图中,15~25 a 周期震荡能量最

大,经历了“增—减—增—减—增”的交替转换(图 4),20 a 为主周期。

2.4 黑龙江省 60 a 来极端降水空间变化分析

将黑龙江省 30 个站点的各极端降水指数 1958—2017 年平均值计算并通过克里金插值法运用 ArcGIS 软件绘制出各个指数在研究区的空间分布图(图 5)。

日最大降水量在伊春、铁力等中部地区及齐齐哈尔以西的龙江地区较其他地区多,孙吴以北、佳木斯以东、北安以西地区较少。相比之下,5 日最大降水量空间差异较大,极大值多集中于伊春、铁力、尚志一带,黑龙江西北部以及东部地区的 5 日最大降水量少。降水强度在研究区北部、中部南部以及东部分布较为均匀,通河以西地区的降水强度较高。

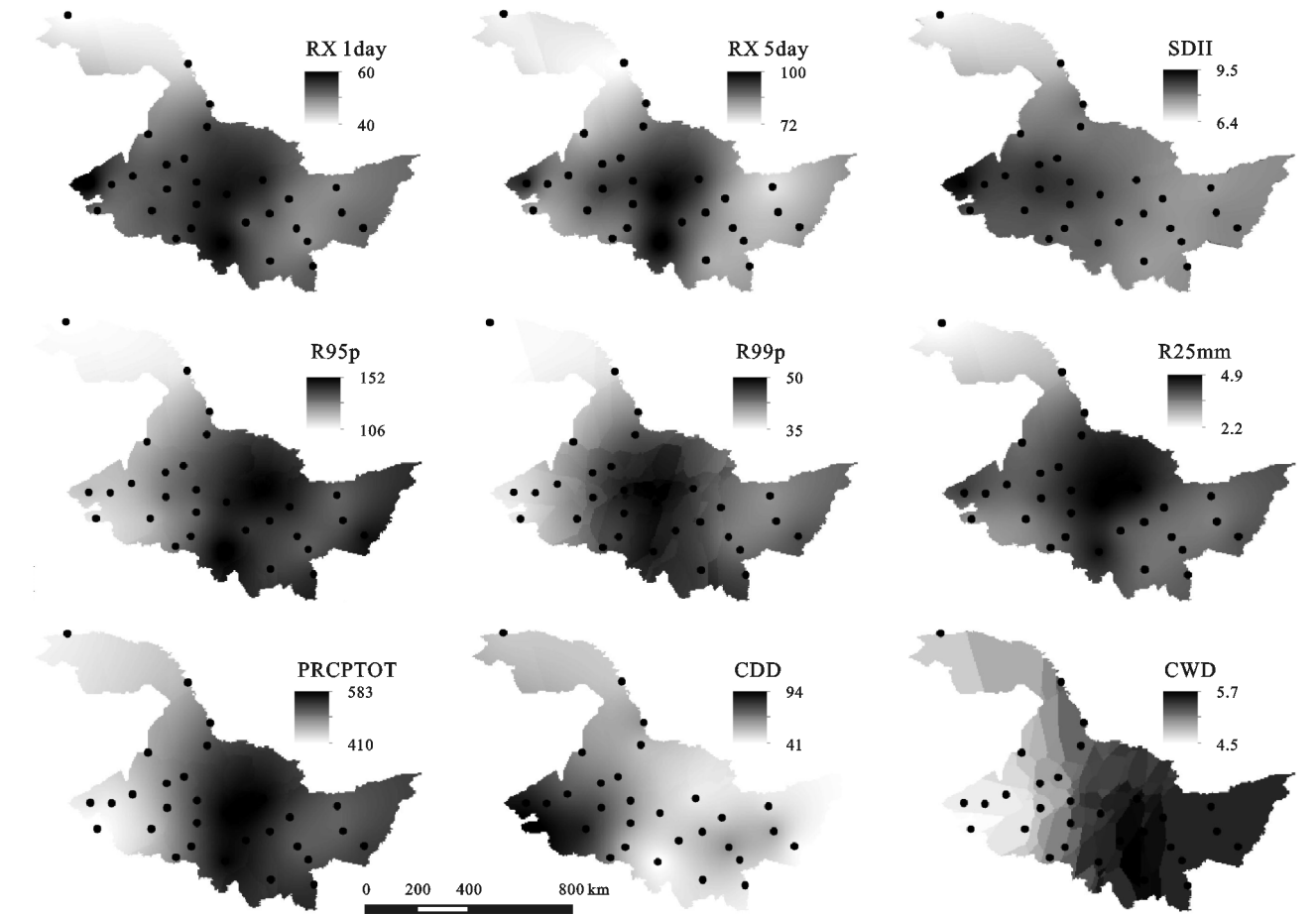


图 5 极端降水指数空间分布

强降水量的东西向变化显著,海伦、北林、哈尔滨一带以东地区有增加趋势,强降水量较大,孙吴以北及北安—海伦以西逐渐减弱。极端强降水量值的全省总体差值约为 15,最小值位于北部地区,最大值集中分布于海伦、铁力、伊春一带。大雨日数均值位于 2.2~4.9,佳木斯、依兰、通河以西、北安、海伦、北林以东的地区大雨日数较多,除中部地区外,东部与西部地区大雨日数变化幅度小。

年降水量较大值集中分布于中部及南部地区,东部有递减趋势但变化较小,北安—海伦以西地区的年降水量少。持续干期最大值集中分布于富裕—安达以西地区,北部、中东部地区变化幅度较小且与富裕—安达以西地区差异显著,差值较大。以呼玛、北安、海伦、北林、哈尔滨一线为界,持续湿期的东西差异明显,大致以呼玛—海伦—北林—哈尔滨为界,其西持续湿期少,通河、牡丹江等中南部及海伦以东地区持续湿期较多。

3 讨论

3.1 黑龙江极端降水变化的影响因素

极端降水事件的影响因素有很多,主要分为自然因素和人为因素两部分,自然因素包括全球变暖、地形因素的影响以及 ENSO 等,人为因素对极端降水的影响主要是通过由人类活动所导致的城市化进程加快、温室气体排放增多加以实现的。首先,在全球变暖的影响下,极端天气出现的频次增多,在东北地区增暖背景下,极端降水事件明显增加,频次和强度存在增加和增强趋势^[15]。从人为因素来看,由于人类活动排放大量温室气体,所带来的全球变暖又使得地表蒸发加剧,从而造成了降水增多的现象^[16]。其次,黑龙江省各极端降水指数的空间分布有所不同,这与黑龙江各地区地形地貌不同等因素有关。例如,从图 4 中年降水量指数的空间分布可以看出,从黑龙江西北地区到东南地区方向,年降水量呈大致增加趋势,最大值出现于伊春、铁力附近,那么从地形因素来分析,位于伊春市的小兴安岭及黑龙江省中南部的张广才岭的迎风坡有较好的地形抬升条件,各类天气系统在此过境后频发暴雨事件,因此该地区降水相对较多,甚至出现最值。有研究发现,ENSO 的发生也是极端降水事件发生的潜在因素^[17-18],我国东北地区的夏季低温是一种常见的气候灾害,这种几乎都发生在 ENSO 事件发生的年份。据统计,我国黑龙江省在 1955—1981 年,发生过五次低温冷害,恰好这 5 个年份都是厄尔尼诺年^[19]。人为因素中,城市化进程加快使得城市土地下垫面粗糙程度改变,影响气温的变化,从而对极端降水带来一定的影响。例如,从图 2 可以看出,1978 年我国改革开放以来,随着黑龙江省城市化进程的加快,降水强度与持续湿期波动幅度增大,极端气候事件发生频次增加^[20-21]。

3.2 黑龙江极端降水变化可能造成旱灾

黑龙江省极端降水事件的发生可能会带来许多气象灾害,主要包括暴雨、洪涝、干旱、冰雹、低温霜冻等几种灾害类型,对全省的经济发展造成不利的影响。东北地区近 50 a 的干旱发展研究中表明,1951—2000 年,内蒙古自治区东部地区的北部、黑龙江省西部地区、吉林省西部的干旱趋势比较显著,大气干旱指数上升趋势均在 0.216/10 a 到 0.288/10 a。随着全球气候的变暖,中国东北区的干旱趋势将更加严峻^[22]。李文亮等人研究发现,中部伊春地区为全省洪涝灾害高风险区,干旱成灾高风险区主要集中在

黑龙江省西部地区,基本上为四年三遇^[23]。徐虹等人在黑龙江主要气象灾害研究中发现,黑龙江省西部地区为大风与龙卷风灾害多发区,且自 20 世纪 60 年代开始,大风与龙卷风灾害开始增多,1901—2000 年的风灾发生次数为年均 3.82 次,仅次于暴雨与洪涝灾害发生频次^[24]。根据研究结果及极端降水指数的空间分布特征可以推测,黑龙江省西部地区发生旱灾、风灾的可能性较大。

3.3 黑龙江极端降水变化可能造成的涝灾

根据《中国气象灾害大典(黑龙江卷)》中的气象灾害数据得到,1901—2000 年,干旱、低温与霜冻灾害发生频次随时间变化波动不大,暴雨与洪涝灾害有 3 个明显波动期,20 世纪 80 年代后期波动最为明显,发生次数显著增加。潘华盛等人对黑龙江省夏季极端降水和暴雨变化规律的研究中得出,1961—2010 年期间,极端降水与暴雨呈略上升趋势,暴雨次数偏多区域主要分布于伊春、铁力以及尚志、五常等地区,极端降水与暴雨于 20 世纪 80 年代出现最高值,而后 90 年代呈下降趋势^[25]。这与本文图 3 中的大雨日数、强降水量、持续湿期的阶段性变化趋势以及图 5 中极端降水指数的空间分布变化较为一致。随着 R25mm, R95p, R99p 等指数的增加,全省暴雨、洪涝灾害发生的可能性增大,尤其是中部地区伊春、铁力一带及东部部分地区。

2003 年夏季黑龙江省大部分地区发生了连续降雨,中西部地区灾情严重,农作物被洪水长时间浸泡导致绝产,受灾农田 1 468 万 hm^2 ,直接经济损失达到 41.59 亿元^[26-30]。2013 年黑龙江省境内三江流域及支流发生大洪水,夏季暴雨频次大,从 1961 起到 2013 年止,先后在 1961 年、1965 年、1981 年、1984 年、1995 等年份出现较大暴雨频次^[31]。2014 年 7 月,同样受到连续降雨影响,哈尔滨、齐齐哈尔部分地区发生了洪涝灾害,受灾人口达 11 万余人,农作物受灾面积 86 317 hm^2 。据国家减灾中心统计,2018 年 7 月以来,受西风槽及台风“安比”减弱后气旋共同影响,黑龙江省多地发生强降雨,导致哈尔滨引发洪涝灾害,多地农作物受淹,洪涝灾害损失 10 亿余元。此外,由于降水分配不均匀导致的春旱秋涝加剧或造成了低温冷害的发生,低温霜冻灾害主要对农业生产方面产生影响,农作物产量损失大。根据 1984—2009 年初霜冻灾害发生次数及受灾面积统计分析得到,受霜冻灾害较重区域主要集中在大兴安岭南端,黑河大部,松嫩平原部分县市以及三江平原部分地区,其中

嫩江和肇东年均受灾面积超过 5 000 hm²,给农业生产带来了巨大损失^[32]。极端降水天气的频发不仅带来巨大的经济损失,同时也危害人类的生命安全。因此,做好极端降水天气的监测与预警,分析极端降水事件的成因与机理并采取有效应对措施对于降低灾害带来的损失有重大意义。

4 结 论

(1) 黑龙江省 60 a 来持续干期呈显著减少趋势,其次降水强度微弱下降,其余极端降水指数均呈增加趋势,年降水量增加尤为明显。近 60 a 黑龙江省各极端降水指数化的变化具有明显的阶段性,可分为 3~4 个阶段。

(2) 各极端降水指数中,极端强降水量变化无明显突变年,持续干期的主要突变发生于 20 世纪 80 年代中期,其余指数突变多出现于 1978 年、1980 年前后。

(3) 通过 Morlet 小波分析得到,除持续干期以外,其余极端降水指数均存在 15~25 a 尺度的周期变化规律,主周期集中于 20 a 前后。

(4) 极端降水指数空间分布不同,日最大降水量与 5 日最大降水量均呈现中部增强、北部与东部减弱的趋势,降水强度与持续干期的极大值分布于富裕、安达以西。绝对指数(R95p,R99p,R25mm)呈现铁力、伊春等中部地区及尚志等南部地区指数值较大,克山以西以北地区指数值较小的趋势,年降水量与持续湿期的较大值分布与研究区中部与南部。

(5) 通过研究指数的变化特征发现,各指数对黑龙江省旱涝具有一定的指示作用,R25mm,R95p,R99p 指数的年际变化呈现逐渐增加趋势,全省暴雨灾害发生的可能性增大,尤其是伊春、铁力以及尚志一带,要注重预防洪涝灾害。黑龙江西部的龙江、齐齐哈尔、泰来及其附近地区有变干趋势,遭受极端干旱与风灾的可能性高于其他地区。

参考文献:

[1] 任正果,张明军,王圣杰,等.1961—2011 年中国南方地区极端降水事件变化[J].地理学报,2014,69(5):640-649.

[2] Vyshkvarkova E V, Voskresenskaya E N. Changes of extreme precipitation in Southern Russia[J]. Iop Conference Series:Earth and Environmental Science, 2018, 107(1):1-6.

[3] 尹占娥,田鹏飞,迟潇潇.基于情景的 1951—2011 年中国极端降水风险评估[J].地理学报,2018,73(3):405-413.

[4] 顾西辉,张强,孔冬冬.中国极端降水事件时空特征及其

对夏季温度响应[J].地理学报,2016,71(5):718-730.

[5] 柏会子,肖登攀,刘剑锋,等.1965—2014 年华北地区极端气候事件与农业气象灾害时空格局研究[J].地理与地理信息科学,2018,34(5):99-105.

[6] Tandon N F, Zhang X B, Sobel A H. Understanding the dynamics of future changes in extreme precipitation intensity[J]. Geophysical Research Letters, 2018, 45(6):2870-2878.

[7] 李双双,杨赛宽,刘宪锋.1960—2013 年秦岭—淮南北极端降水时空变化特征及其影响因素[J].地理科学进展,2015,34(3):354-363.

[8] 鲁菁,张玉虎,高峰,等.近 40 年三江平原极端降水时空变化特征分析[J].水土保持研究,2019,26(2):272-282.

[9] 梁丰,刘丹丹,王婉昭,等.1961—2013 年东北地区夏季极端降水事件变化特征[J].干旱区地理,2016,39(3):565-572.

[10] 董伟,刘海峰,朱玉祥.吉林省夏季极端降水事件特征分析[J].自然灾害学报,2012,21(4):69-75.

[11] 任景全,郭春明,刘玉汐,等.1961—2015 年吉林省极端降水指数时空变化特征[J].冰川冻土,2017,39(5):1004-1011.

[12] 赵国永,韩艳,刘明华,等.1961—2013 年河南省极端降水事件时空变化特征[J].水土保持研究,2018,25(6):115-120.

[13] 苏志重,石顺吉,张伟,等.1960—2010 年福建省极端降水事件变化趋势分析[J].暴雨灾害,2016,35(2):166-172.

[14] 赵丽,韩雪云,杨青.近 50 a 西北干旱区极端降水的时空变化特征[J].沙漠与绿洲气象,2016,10(1):19-26.

[15] 杨素英,孙风华,马建中.增暖背景下中国东北地区极端降水事件的演变特征[J].地理科学,2008,28(2):224-228.

[16] 孔锋,史培军,方建,等.全球变化背景下极端降水时空格局变化及其影响因素研究进展和展望[J].灾害学,2017,32(2):165-174.

[17] Jiang R G, Wang Y P, Xie J C, et al. Assessment of extreme precipitation events and their teleconnections to ElNiño Southern Oscillation, a case study in the Wei River Basin of China[J]. Atmospheric Research, 2019, 218:372-384.

[18] Ge J, You Q L, Zhang Y Q. Effect of Tibetan Plateau heating on summer extreme precipitation in eastern China[J]. Atmospheric Research, 2019,218:364-371.

[19] 朱诚,谢志仁,申洪源,等.全球变化科学导论[M].南京:南京大学出版社,2003:193.

[20] 朱秀迪,张强,孙鹏.北京市快速城市化对短时间尺度降水时空特征影响及成因[J].地理学报,2018,73(1):154-159.

- [21] 任家璇.城市化对典型极端气候事件的影响分析:以辽宁省为例[D].辽宁大连:辽宁师范大学,2018.
- [22] 谢安,孙永罡,白人海.中国东北近 50 年干旱发展及对全球气候变暖的响应[J].地理学报,2003,58(S1):75-82.
- [23] 李文亮,张冬有,张丽娟.黑龙江省气象灾害风险评估与区划[J].干旱区地理,2009,32(5):754-760.
- [24] 徐虹,张丽娟,姜蓝齐.黑龙江省公元 612—2000 年主要气象灾害时空规律研究[J].自然灾害学报,2014,23(3):107-118.
- [25] 潘华盛,历超,吴玉影,等.黑龙江省夏季极端降水和暴雨变化规律的分析[J].黑龙江气象,2013,30(3):10-12,27.
- [26] 刘宇峰,原志华,李文正,等.1961—2013 年黄土高原地区旱涝特征及极端和持续性分析[J].地理研究,2017,36(2):345-360.
- [27] 李娟,董文杰,严中伟.中国东部 1960—2008 年夏季极端温度与极端降水的变化及其环流背景[J].科学通报,2012,57(8):641-646.
- [28] 谢志清,杜银,曾燕,等.江淮流域年极端降水事件分类特征及其致洪风险[J].中国科学:地球科学,2018,48(9):1153-1168.
- [29] 金龙海,肖建民,谢永刚.2003 年黑龙江省的洪涝灾害及其社会经济影响[J].自然灾害学报,2004,13(1):154-159.
- [30] 李占玲,王武,李占杰.基于 GPD 分布的黑河流域极端降水频率特征分析[J].地理研究,2014,33(11):2169-2179.
- [31] 李永生,张健,于梅,等.2013 年黑龙江省夏季洪涝灾害成因分析[J].气象与环境学报,2014,30(3):31-37.
- [32] 朱红蕊,于宏敏,姚俊英,等.黑龙江省水稻初霜冻灾害致灾因子危险性分析[J].灾害学,2012,27(2):96-99.

~~~~~

(上接第 137 页)

- [24] 张新和,郑粉莉,汪晓勇,等.上方汇水对黄土坡面侵蚀方式演变及侵蚀产沙的影响[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(3):105-110.
- [25] Lipiec J, Hatano R. Quantification of compaction effects on soil physical properties and crop growth[J]. Geoderma, 2003,116(1/2):107-136.
- [26] Parker D B, Michel T G, Smith J L. Compaction and water velocity effects on soil-erosion in shallow flow [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 1995,121(2):170-178.
- [27] 高建华,张承中.不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(4):192-196.
- [28] 肖海,刘刚,赵金凡,等.雨滴机械打击和消散作用对土壤团聚体的破坏特征[J].土壤学报,2017,54(4):827-835.
- [29] Morgan R P C. Vegetative-based technologies for erosion control[M]//Eco-and ground bio-engineering:The use of vegetation to improve slope stability,Dordrecht: Springer, 2007.
- [30] 瞿王龙,杨小鹏,张存涛,等.干旱、半干旱地区天然草原灌木及其肥岛效应研究进展[J].草业学报,2015,24(4):201-207.
- [31] Bhark E W, Small E E. Association between plant canopies and the spatial patterns of infiltration in shrubland and grassland of the Chihuahuan desert, New Mexico[J]. Ecosystems, 2003,6(2):185-196.
- [32] Turnbull L, Wainwright J, Brazier R E. A conceptual framework for understanding semi-arid land degradation:Ecohydrological interactions across multiple-space and time scales[J]. Ecohydrology:Ecosystems, Land and Water Process Interactions, Ecohydrogeomorphology, 2008,1(1):23-34.
- [33] Wilcox B P, Breshears D D, Allen C D. Ecohydrology of a resource-conserving semiarid woodland:effects of scale and disturbance [J]. Ecological Monographs, 2003,73(2):223-239.