

引用格式: Li Zhongkui, Hu Zhuowei, Wei Lai, *et al.* Change in Extreme Precipitation Events over Northern China from 1951 to 2013[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2016, 31(4): 773-783. [栗忠魁, 胡卓玮, 魏铄, 等. 1951~2013年华北地区极端降水事件的变化[J]. 遥感技术与应用, 2016, 31(4): 773-783.]
doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2016.3.0773

1951~2013年华北地区极端降水事件的变化

栗忠魁, 胡卓玮, 魏铄, 肖敏

(首都师范大学资源环境与旅游学院, 北京 100048)

摘要: 利用华北地区90个气象站点1951~2013年逐日降水量资料, 计算了8个极端降水指数, 采用滑动平均、线性回归、Mann-Kendall非参数检验和Morlet小波分析等方法, 分析了华北地区极端降水事件的变化规律。结果表明: 华北地区近63 a连续干旱日数(CDD)呈明显的增加趋势, 连续5 d降雨量、连续湿日、年总降雨量趋于减少并通过0.05显著性检验, 其他4个极端降水指数都表现为减少趋势且不显著。各极端降水指数与年总降水量(PRCPTOT)有很好的相关性, 除连续干旱日数与之呈负的弱相关性以外, 其他指数均呈较强的正相关性。在近63 a的时间尺度上各项极端降水指数都存在2~4 a显著周期, 多数指数也存在8 a、16 a和32 a的周期。在时间转折上, 连续湿日(CWD)的突变点时间较早, 发生于1964年。从空间分布来看, 京津冀地区及山西大部是极端降水指数变化最为显著的区域, 连续干旱日数增加, 其他指数均呈现减小趋势。

关键词: 极端降水指数; 周期; 气候突变; 华北地区

中图分类号: TP 79 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-0323(2016)03-0773-11

1 引言

气候作为人类赖以生存的自然环境的重要组成部分, 它的任何变化不仅对社会和经济发展带来影响, 还对人类生活和生态环境构成威胁, 因此, 气候变化研究已成为近年来科学家关注的问题。特别是20世纪以来, 气候变暖背景下极端值和极端事件的变化引起了众多学者的关注, 极端天气事件频繁发生, 给社会、经济和人民生活造成了严重的影响和损失, 是当今世界影响最为深远的全球性环境问题之一。极端气候事件的形成机制是极其复杂的, 其形成原因还有待深入研究。研究极端气候事件的形成机制和变化规律既是科学发展的需要, 也是社会的迫切要求, 对极端气候事件变化的深入研究, 不仅有助于深入理解气候变化规律、探讨气候变化的原因, 而且也可以提高极端气候事件的预测, 为国家防灾

减灾提供参考和科学规划的依据, 同时也对制定可持续发展战略具有十分重要的现实意义。

随着全球气候变暖, 强降水事件在美国、中国、澳大利亚、加拿大、挪威和墨西哥、波兰和前苏联均有所增加^[1], 在全世界的许多区域研究都表明, 降水事件频率的变化要么很小, 要么就很大, 往往总降水量有一个增加, 强降水量就会以更大的比例增加。在中国, 过去主要集中在降水量和旱涝气候变化等方面^[2-6], 随着极端降水事件对我国影响加剧, 学者们逐渐认识到研究极端降水的重要性。翟盘茂等^[7]指出最近50年, 我国降水强度普遍趋于增加, 降水日数除西北地区外其他大部分地区显著减少; 张建华等^[8]通过分析北京地区逐日降水资料分析了北京地区极端降水变化趋势, 指出北京地区大部分站点的极端降水量呈现下降趋势, 极端降水频数与之相似, 但极端降水强度与降水量和降水频数的变化趋

收稿日期: 2015-03-20; 修订日期: 2016-04-17

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2013BAC03B04、2012BAH27B01), 国家自然科学基金项目(41301468)。

作者简介: 栗忠魁(1990—), 男, 河南鹤壁人, 硕士研究生, 主要从事极端降水方面的研究。E-mail: lizhongkui1990@outlook.com。

通讯作者: 胡卓玮(1979—), 男, 江西乐平人, 博士, 副教授, 主要从事地理信息建模与应用研究。E-mail: huzhuowei@mail.cnu.edu.cn。

势有明显不同;杜军等^[9]指出西藏近 52 a 连续干旱日数呈显著减少趋势,最大 5 d 降水量也趋于减少但不显著,大雨日数和强降水量的线性趋势不明显,年总降水量及降水强度表现为增加趋势且不显著。

随着全球气候变暖,华北地区极端事件频发。1996 年 8 月 3~4 日,河北省中南部地区出现特大暴雨天气,降水强度之大、雨量之集中历史少见。2012 年 7 月 21 日,北京及其周边地区遭遇 61 年来最强暴雨及洪涝灾害;2014 年 7 月 16 日,北京突降冰雹大风,暴雨致 18 车被淹。近来气象灾害带来的损失愈加严重,对当地农业、生态环境等敏感领域的影响尤为显著。目前针对华北地区极端降水事件全面的分析尚不多见,且分析资料截止年份较早^[10-13]。因而有必要采用最新的资料和统一的极端降水指数,对华北地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,力求为当地应对气候变化、防灾减灾提供参考,为评估未来气候变化的影响提供基础资料。

2 研究区概况与方法

2.1 研究区概况

华北地区指位于中国北部的区域,包含北京市、天津市、河北省、山西省和内蒙古自治区。地处我国东部暖温带半干旱季风型气候区,冬春寒冷干燥,夏季炎热多雨,光热、水等气候资源比较丰富,全区降水量在年内分配不均匀,全年降水量 80%集中在汛期 6~9 月份,往往春旱秋涝,七月份温度最高。

本文所用资料为华北地区 90 个气象站点(图 1)1951~2013 年的逐日降水量观测数据,并且经过了较为严格的质量控制^[14-15]。观察所获得的华北地区逐日降水数据发现,许多测站存在缺测值。赵庆云和李威等^[16-17]指出,假如一组与时间相关的降水资料有缺测值存在,并将缺测值设为零,那么在

研究降水变化趋势时引起误差。根据上述理论,本文将一年内缺测日数超过 20 d(约大于一年内实际观测日数的 5%)时,将其统计量设为缺测。当 53 a 序列中缺测总量超过 5 a 时,该测站被排除使用。如果缺测年份在一年以内的站点,将缺测值用临近 2 年同日的均值代替。最终,选出了华北地区 90 个气象观测站点,用于研究华北地区极端降水事件的变化特征。

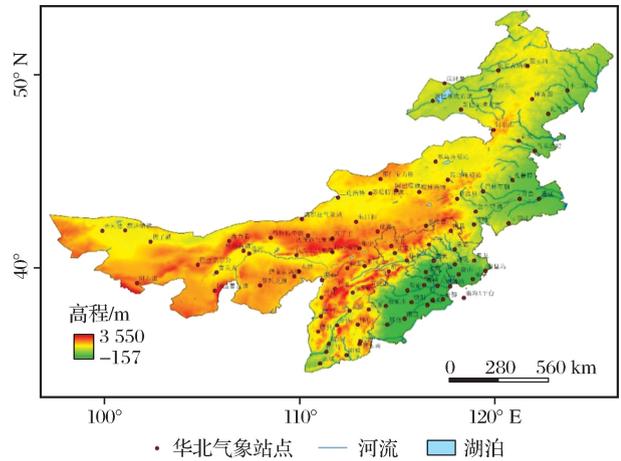


图 1 华北气象站的分布

Fig.1 Distribution of meteorological stations over Northern China

2.2 极端降水指数的定义

世界气象组织(WMO)气候学委员会(CCL)及气候变率和可预报性研究计划(CLIVAR)推荐了一系列极端气候指数^[18],其中部分指数的定义都是计算通过阈值的降水量或天数,从而消除了地域因素,使计算出的降水指数可以进行空间比较,具有较弱的极端性、噪声低、显著性强的特点。本研究选取其中 8 种极端降水指数来分析华北地区的极端降水事件特征,各指数具体定义见表 1。极端降水指数的计算采用基于 R 语言的 RCLimDex 软件(来源于 <http://cccma.seos.uvi.ca/ETCCDMI>)。

表 1 极端降水指数定义

Table 1 Definitions of extreme precipitation indicators

代码	名称	定义	单位
RX1day	最大 1 d 降雨量	每月最大 1 d 降水量	mm
RX5day	最大 5 d 降雨量	每月连续 5 d 最大降水量	mm
SDII	降水强度	日降水量 ≥ 1.0 mm 的总降水量与降水日数比值	mm/d
CDD	连续干旱日数	日降水量 < 1.0 mm 的最大连续日数	d
CWD	连续湿日	日降水量 ≥ 1.0 mm 的最大连续日数	d
R95P	强降水量	日降水量大于基准期内第 95% 分位值的总降水量	mm
R99P	极强降水量	日降水量大于基准期内第 99% 分位值的总降水量	mm
PRCPTOT	年总降水量	每年全部雨(雪)日降水量之和	mm

2.3 分析方法

基于 RCLimDex 软件分别计算 90 个站点 8 个极端降水指数并建立时间序列,华北地区平均极端降水指数序列采用 90 个站点的算术平均值。在分析各极端降水指数变化趋势时,选用线性回归对原序列变量进行拟合,对于变化趋势的显著性,采用时间 t 与原序列变量 y 之间的相关系数进行检验^[19]。本文用 Morlet 小波分析^[20]和 Mann-Kendall(M-K)法^[21-22]来检测极端降水指数的周期性特征及序列的长期变化趋势与突变特征。

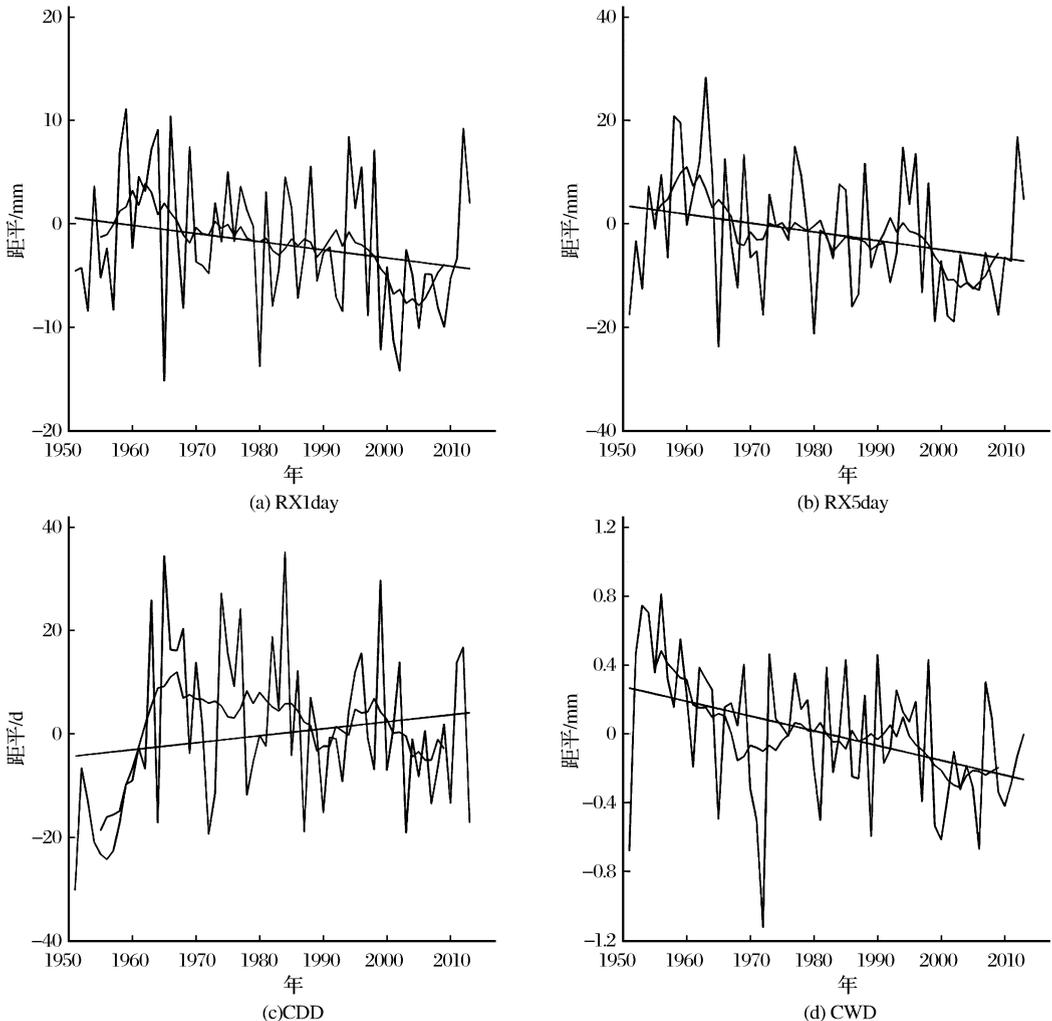
3 结果分析

3.1 极端降水指数年际变化

根据 1951~2013 年华北地区 8 种极端降水指数的 9 a 滑动平均曲线和线性变化趋势分析,华北地区最大 1 d 降水量(RX1day)20 世纪 50 年代至

60 年代中前期逐年增加,从 60 年代中后期之后的 5 a 逐年减少,70 年代至今在 10 mm 以内震荡,总体线性趋势呈明显的减少趋势,减幅为 1.18 mm/10 a。最大 5 d 降水量(RX5day)在 50~60 年代中期趋于增加,60 年代中期至今呈现逐年减少的趋势,总体线性趋势呈现为明显的减少趋势,减幅为 1.96 mm/10a(通过 0.05 显著性检验)。连续干旱日数(CDD)在 20 世纪 50~60 年代中期逐年增加,70 年代至今在 10 d 内震荡,总体线性趋势呈现较明显的增加趋势,平均每 10 a 增加 0.9 d。在过去的 63 a 间,连续湿日(CWD)基本呈现长时间窄幅振荡,进入 21 世纪趋于减少,总趋势趋于减少,平均每 10 a 减少 0.07 d(通过 0.01 显著性检验)。

强度是衡量极端降水的另一要素,强度越大越可能造成灾害^[22]。中国平均降水强度(SDII)在 20 世纪 50 年代至今,在 0.5 mm/d 的振幅大小内呈现



(折线为历年值,曲线为 9 a 滑动平均,直线为线性趋势)

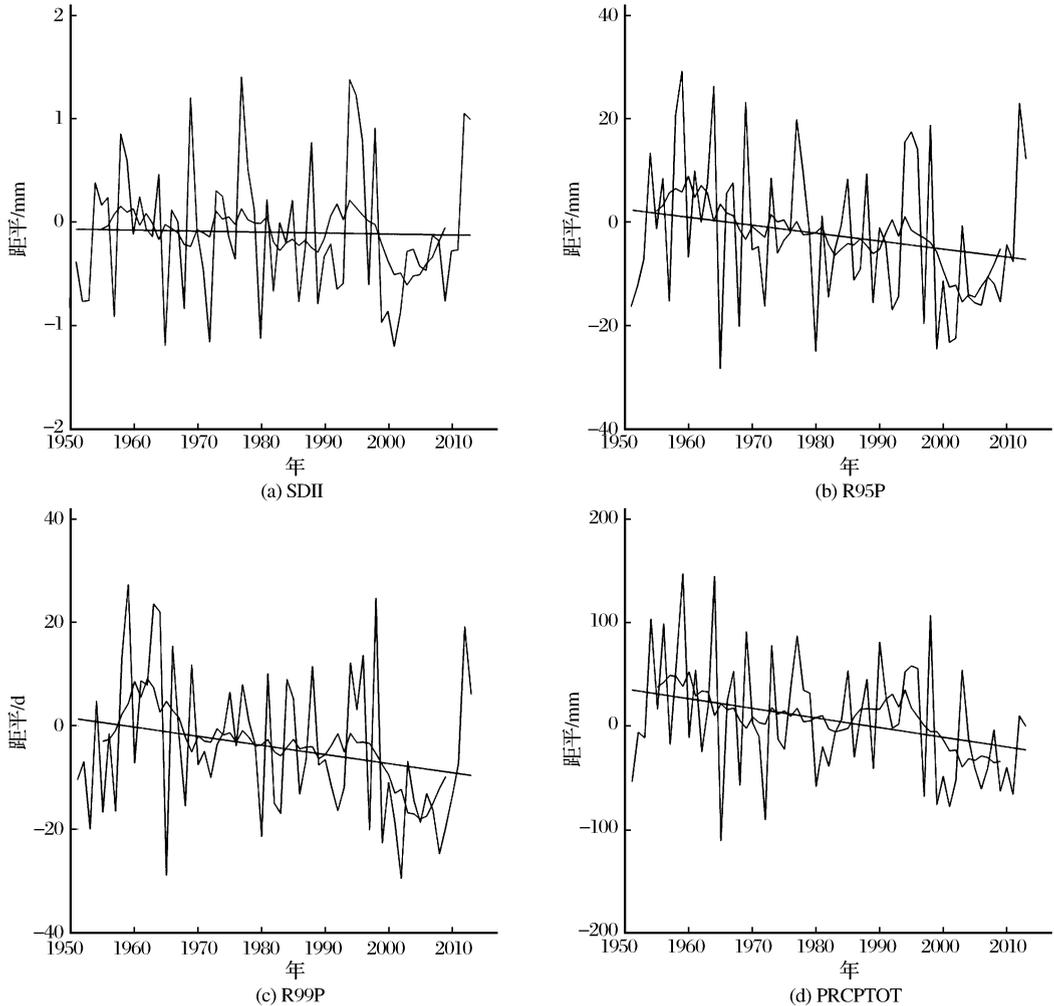
图 2 1951~2013 年华北极端降水年际变化

Fig.2 Inter-annual variation of precipitation extremes over Northern China 1951~2013

长时间的振荡,呈现不明显的减少趋势。在50~60年代强降水量(R95P)逐年增加,70年代至今呈现显著减小的趋势,减幅为4.32 mm/10a。极强降水量(R99P)趋势与强降水量(R95P)类似,50~60年代中前期逐渐增加,60年代中前期至今显著减少,每10 a减少3.41 mm。年总降水量(PRCPTOT)在

50~60年代先增加再减少,之后呈现较为明显的振荡,振幅为50 mm,平均每10 a减少10.8 mm(通过0.05显著性检验)。

总之,华北大部分极端降水指数趋于减少,变幅较大,说明华北地区降水的极端变化较明显。这与杨金虎^[22]、何佳等^[23]的研究结果一致。



(折线为历年值,曲线为9 a滑动平均,直线为线性趋势)

图3 1951~2013年华北极端降水年际变化

Fig.3 Inter-annual variation of precipitation extremes over Northern China 1951~2013

3.2 极端降水指数变化趋势的空间分布

从极端降水指数变化趋势的空间分布来看(图3),近63 a华北地区RX1day减少的站点有67%,主要分布在京津冀及山西,减幅为0.029~14.6 mm/10 a;其余站点的RX1day趋于增加,增幅为0.029~1.64 mm/10 a。其中,遵化减幅最大且通过0.01显著性检验,北京站的次之且通过0.01显著性检验,晋东南增幅最大,但未通过显著性检验。RX5day减少的地方主要集中在京津冀地区,其中遵化减幅最大,为17.26 mm/10 a。北京、密云、泊

头和保定次之,减幅为12.1~15.7 mm/10 a;RX5day增加的地方主要集中在内蒙的西部以及东北部地区,增幅为0.1~2.7 mm/10 a。

近63 a华北各地SDII增减幅度不大,有53%的站点呈增大趋势,主要分布在内蒙中部及西部,以及山西和河北等部分地区,为0.002~0.47 mm/(d×10 a),其中沧州增幅最大,其次是巴彦诺尔公,分别为0.47 mm/(d×10 a)、0.038 mm/(d×10 a)。PRCPTOT在华北大部分地区都表现为减少趋势,为0.01~76.7 mm/10 a。其中五台山减幅最大,但

未通过显著性检验。

图 4 给出了近 63 a 华北 CDD、CWD、R95P 和 R99P 变化趋势的空间分布,可以看出 CDD 变化分布比较平均,总体表现为增加趋势。其中,杭锦后旗、四子王减幅分别为 11.89 d/10 a、9.47 d/10 a,前者未通过显著性检验,后者通过 0.05 显著性检验;拐子湖、化德、五台山、多伦县和集宁表现为增加趋

势,增幅为 5.34 d/10 a~8.26 d/10 a,但未通过显著性检验。CWD 在华北地区的增减幅都不大,在 ±1.0 d/10 a 以内,其中 70% 的站点呈减小趋势,最大值为 0.39 d/10 a (通过 0.01 显著性水平检验);增幅最大的是晋东南,为 0.37 d/10 a,伊金霍洛旗次之,为 0.24 d/10 a,这两个站均未通过 0.10 显著性水平检验。

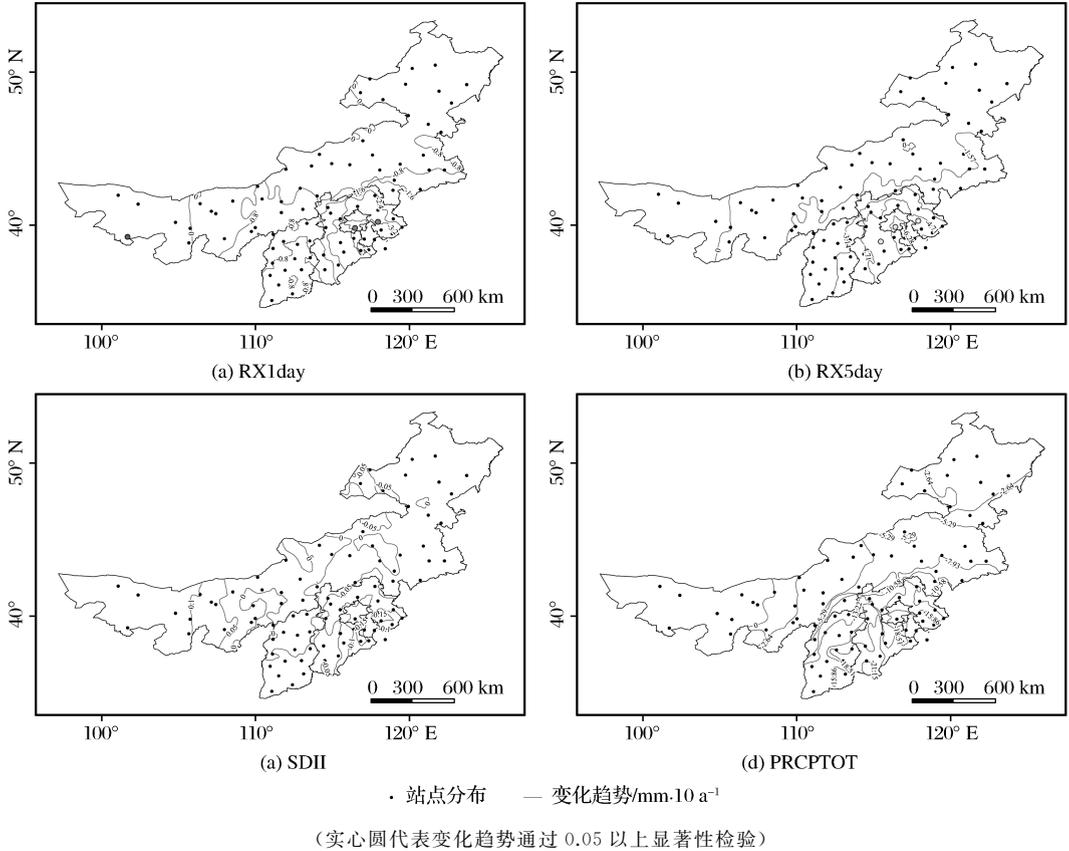


图 4 1951~2013 年华北 RX1day、RX5day、SDII 和 PRCPTOT 变化趋势的空间分布

Fig.4 Spatial distribution of linear tendency rate for RX1day,RX5day,SDII and PRCPTOT over Northern China 1951~2013 3.2.2 CDD、CWD、R95P 和 R99P

就 R95P 变化趋势而言,有 70% 的站点呈现减少趋势,主要分布在京津冀及内蒙古中部地区,减幅为 0.03~32.12 mm/10 a,以北京站减幅最显著,为 32.12 mm/10 a(通过 0.01 显著性水平检验);其余站点呈增加趋势,平均每 10 a 增加 0.06~7.21 mm,其中巴彦诺尔公增幅最大且通过 0.01 显著性检验。而 R99P 减少的站点占 73%,主要分布在京津冀及内蒙古中部地区,减幅为 0.01~25.8 mm/10 a(遵化最大),均未通过统计检验;其余站点趋于增加,主要集中于内蒙古西部及东部地区,增幅为 0.15~6.11 mm/10 a,以乐亭增幅最大但未通过 0.05 以上显著性水平检验。

出从西到东、由南至北逐渐减小的趋势。其中,尤以京津冀及山西大部极端降水指数变化最为显著,大多数指标呈减小的趋势,这与张建华^[8]关于北京地区极端降水事件的研究有相同的结论。杨方兴等^[18]在研究内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性时发现,研究区 5 日最大降水量(RX5day)、降水强度(SDII)、强降水量(R95P)与持续湿润指数(CWD)均呈现东高西低的格局,与之相反持续干旱日数(CDD)呈明显的西高东低之势。这个结论也可以作为对前述得出的极端降水指数空间分布的一种验证。连续干旱日(CDD)增加,连续湿日(CWD)、RX1day、RX5day 减小,预示着这个区域发生旱灾的可能性增加。

总体来说,大部分极端降水指数变化趋势呈现

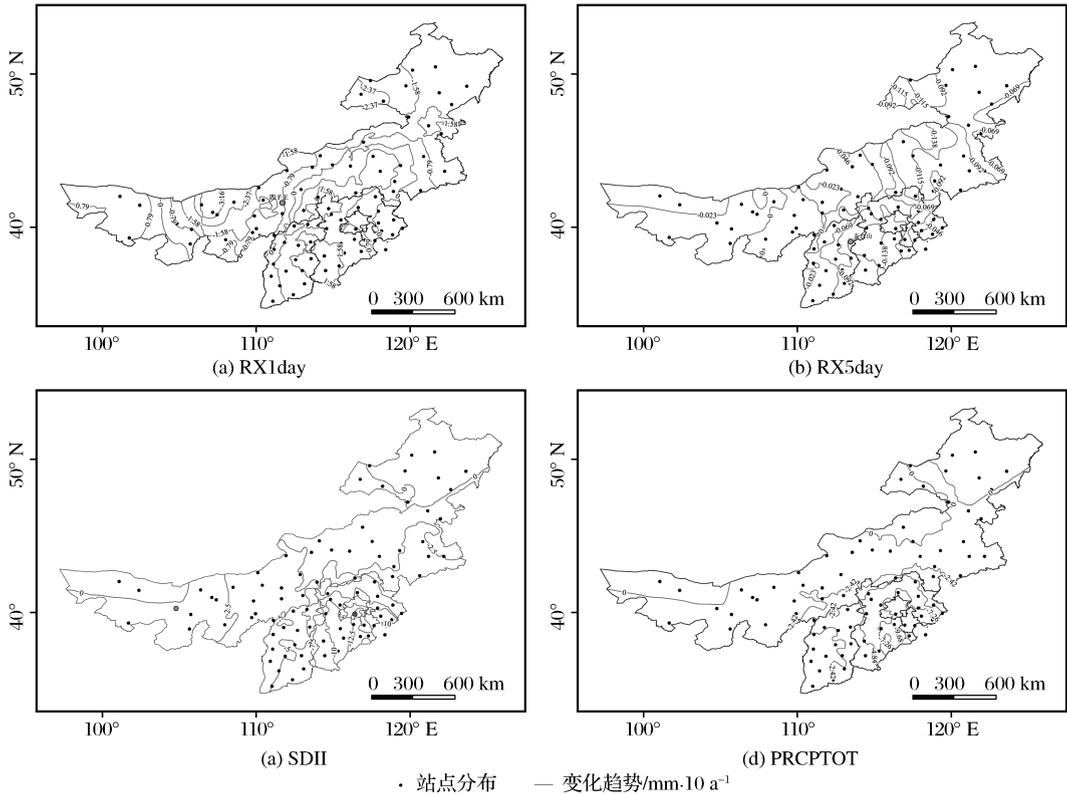


图 5 1951~2013 年华北 CDD、CWD、R95P 和 R99P 变化趋势的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of linear tendency rate for CDD,CWD,R95P and R99P over Northern China 1951~2013

3.3 极端降水指数与年总降水量的关系

研究认为地面温度的升高,使地表蒸发加剧,大气保持水分能力增强,将改变降水量和极端降水事件的频率和强度^[26]。杨金虎^[24]、翟盘茂等^[26]曾提出极端降水变化和总降水量变化关系十分密切,为了验证是否一致,因此对极端降水指数变化与 PRCPTOT 变化进行相关分析(表 2)。结果表明,

这些指数与 PRCPTOT 有很好的相关性。近 63 a, 华北各地 PRCPTOT 与 RX1day 间呈一致的正相关,并通过 0.01 显著性水平检验;与 RX5day 的相关系数在 0.5 以上,并通过 0.01 显著性水平检验;与 CDD 之间呈负的弱相关,并通过 0.05 显著性水平检验。与 CWD 的相关性在华北大部分地区呈较强的正相关,达到 0.01 的显著性水平。

表 2 1951~2013 年华北极端降水指数与年总降水量的相关系数

Table 2 Correlation coefficients of annual total precipitation and the extreme precipitation indices over Northern China during 1951~2013

指数类型	RX1day	RX5day	CDD	CWD	SDII	R95P	R99P
相关系数	0.695**	0.768**	-0.276*	0.652**	0.806**	0.891**	0.669**

注: *、** 分别表示通过 0.05 和 0.01 显著性检验水平

PRCPTOT 与 SDII 之间存在显著的正相关,相关系数达到 0.806,并通过 0.01 显著性水平检验;与 R95P 之间存在显著的正相关,相关系数为 0.891,并通过 0.01 显著性水平检验;与 R99P 之间存在较强的正相关性,并通过 0.01 显著性检验。

可以得出,各极端降水指数与 PRCPTOT 有很好的相关性,除 CDD 与之呈负的弱相关性以外,其

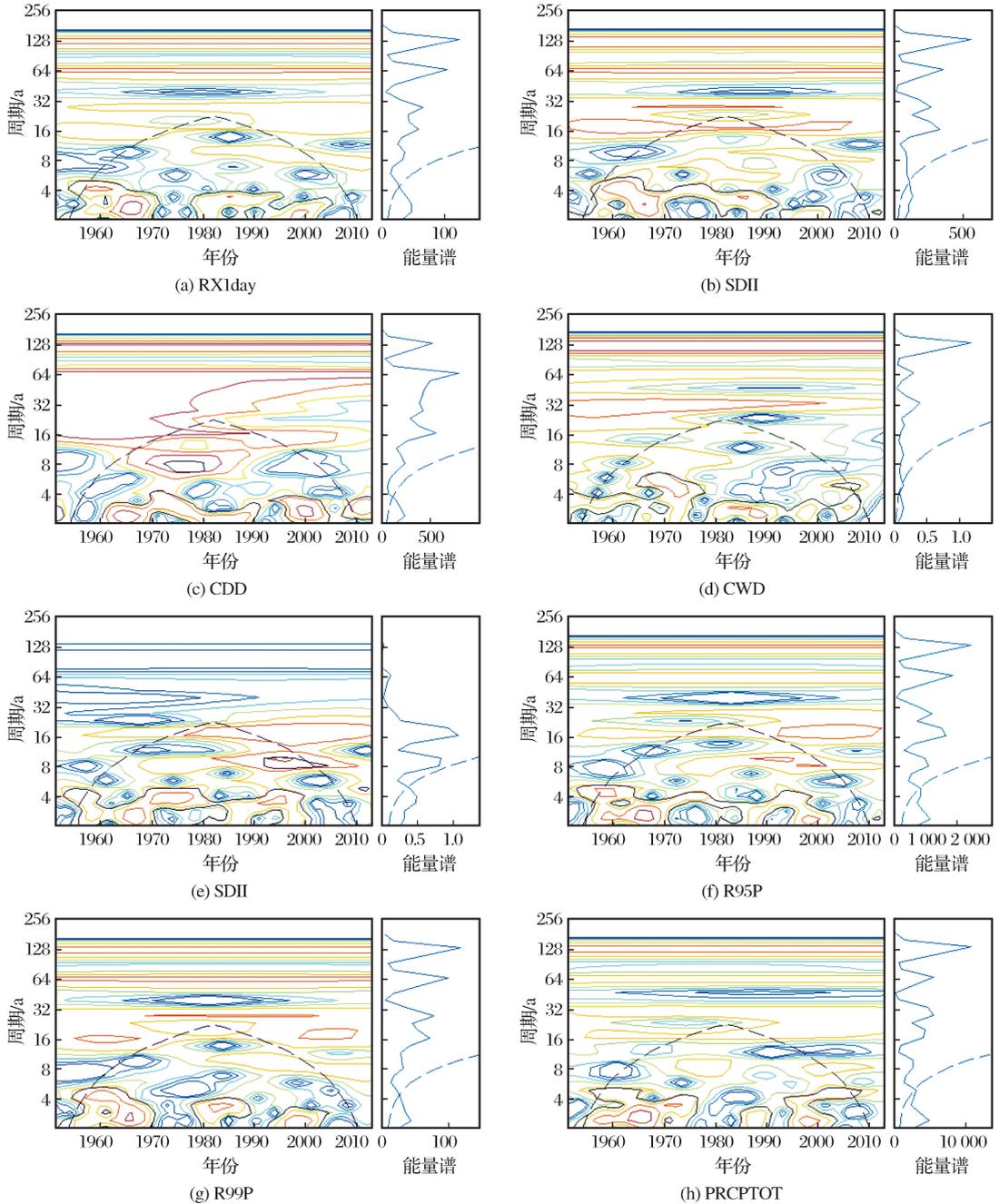
他指数均呈较强的正相关性。

3.4 极端降水指数的周期与突变分析

利用 Morlet 小波分析方法(<http://paos.colorado.edu/research/wavelets>),对 1951~2013 年华北地区极端降水指数的周期进行分析(图 5)。结果显示,各项极端降水指数都存在通过显著性水平检验的 2~4 a 振荡周期。此外,多数指数也存在 8、16

和 32 a 的周期,但这些周期未通过显著性检验且分布时段也不尽相同。这与李小亚等^[27]的研究基本一致。近 63aRX1day 存在准 4 a 周期,20 世纪 80 年代之前存在 8 a 的周期,之后存在 8~16 a 的振荡周期。RX5day 存在准 3 a 周期和 8~16 a 的振荡周期。SDII 存在 4 a 的准周期,20 世纪 60 年代中期

存在 8 a 周期,之后以 16 a 为主。PRCPTOT 存在 3~4 a 和 8~16 a 的振荡周期。R95P 和 R99P 过去 63 a 中都存在 2 a 的显著周期和 8 a 的长周期,不过 R99P 的 8 a 周期存在于 70 年代中期之前。CDD 和 CWD 近 63 a 都存在准 3 a 的显著周期,CDD 还存在 8 a 的长周期。



(虚线表示头部影响的临界线,黑实线内的区域通过了 0.05 信度的检验,实线为能量谱,其中超过虚线的部分通过了 0.05 信度的检验)

图 6 1951~2013 年华北极端降水事件的小波分析及小波全域能量谱

Fig.6 Wavelet analysis of extreme precipitation indices over Northern China 1951~2013 and the global wavelet power spectra

此外,通过 M-K 检验结果表明,近 63 a 华北地区有最大 1 d 降水 (RX1day)、最大 5 d 降水

(RX5day)、连续湿日 (CWD)、强降水量 (R95P)、极强降水量 (R99P) 和年总降水量 (PRCPTOT) 6 个极

端降水指数发生了气候突变(图 6),其中 RX1day 在 1986 年有明显突变,由一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期;RX5day 在 1980 年有明显突变,也是由一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期;CWD 的突变点出现在 1964 年,从一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期;R95P 从 1989 年开始,由一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期;R99P 从 1990 年开始,由一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期;

PRCPTOT 在 1968 年有明显突变,从一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期。1966~2013 年 CWD 这种减少趋势超过了显著性水平 0.05 临界线,甚至超过了 0.01 显著性水平($u_{0.01}=2.56$),表明 CWD 的减少趋势是十分显著的。而 RX1day、RX5day、R95P、R99P 和 PRCPTOT 的 UF 值绝大部分时段未超过临界线,说明这些要素的减少趋势不显著,但仍存在明显的突变点。

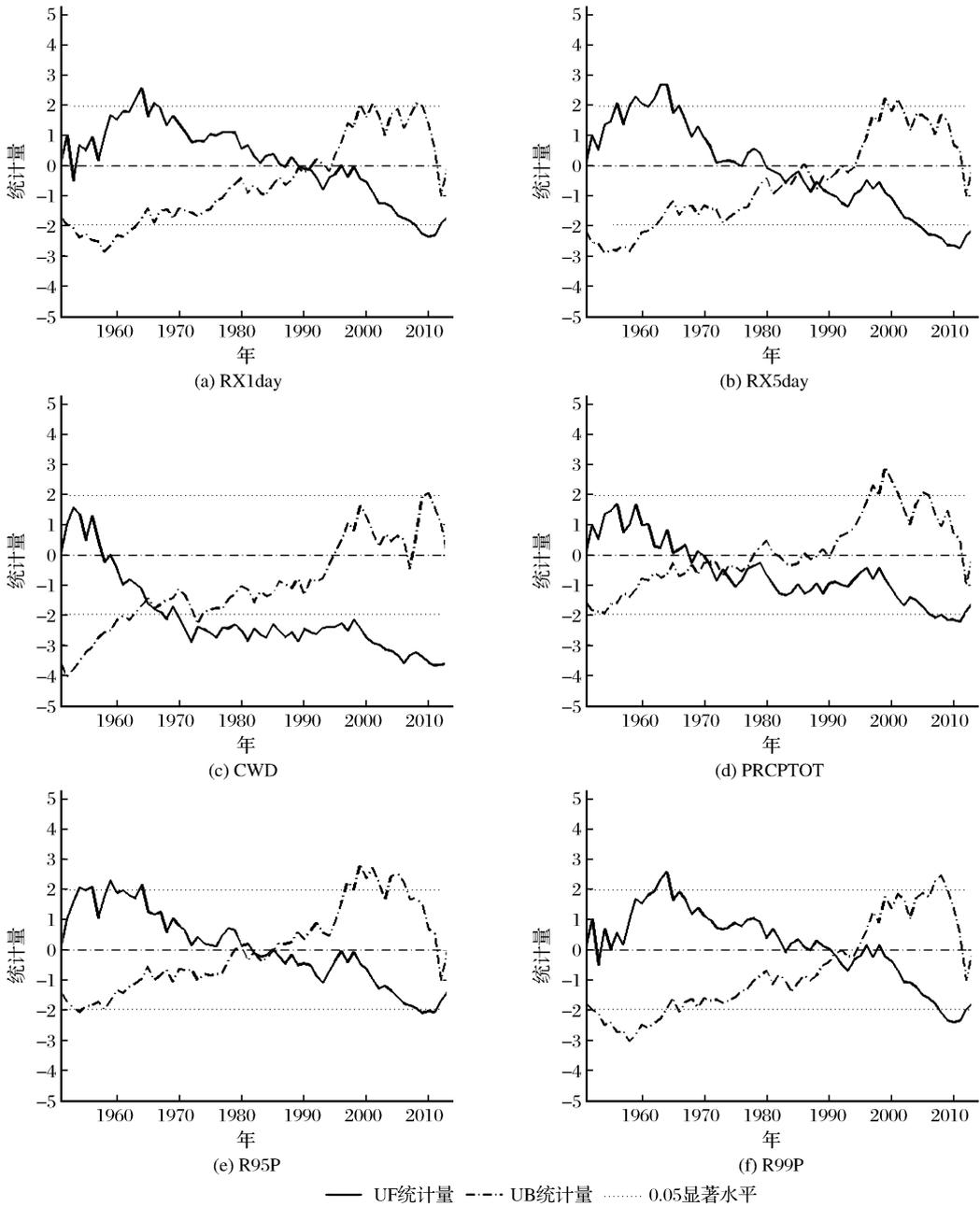


图 7 华北极端降水指数的 M-K 检验

Fig. 7 M-K verifying of the extreme precipitation indices over Northern China during 1951~2013

RX1day、RX1day、CWD、PRCPTOT、R95P 和 R99P 共 6 个极端降水指数,均由一个相对偏多期

跃变为一个相对偏少期。这表明,华北地区雨日减少,干旱天气逐渐增加。一方面,华北地区属于温带

季风气候,降水年际变化大,雨季较为集中;另一方面,河流径流量小,蒸发快,导致华北地区雨日减少,干旱情况增加。这与刘永林^[28]、杨艳娟等^[29]的研究结论相一致。

4 结 语

利用华北地区 90 个气象站点的逐日降水量数据,基于 8 个极端降水指数,分析了 1951~2013 年华北极端降水事件变化的特征,结果表明:

(1)近 63 a 华北地区 CDD 呈增加趋势但不显著,最大 1 d 降水量(RX1day)、平均降水强度(SDII)、强降水量(R95P)及极强降水量(R99P)呈现减少趋势但不显著,最大 5 d 降水量(RX5day)、连续湿日(CWD)及年总降水量(PRCPTOT)共 3 个极端降水指数都表现为减小趋势,分别通过了 0.05、0.01 和 0.05 的显著性检验。

(2)华北大部分站点 CDD 和 SDII 呈增加趋势,其他大部分极端降水指数呈减少趋势,但变化幅度都不显著。京津冀地区及山西大部是极端降水指数变化最为显著的区域,CDD 增加,其他指数均呈现减小趋势,预示着这个区域发生旱灾可能加大。

(3)各极端降水指数与 PRCPTOT 有很好的相关性,除 CDD 与之呈负的弱相关性以外,其他指数均呈较强的正相关性。

(4)华北各项极端降水指数都存在通过显著性水平检验的 2~4 a 振荡周期,多数指数也存在 8、16 和 32 a 的周期,但周期分布不同。其中 RX1day、RX1day、CWD、PRCPTOT、R95P 和 R99P 共 6 个极端降水指数发生了气候突变,均由一个相对偏多期跃变为一个相对偏少期。其中 CWD 的突变点时间较早,约从 1965 年开始,其次是 PRCPTOT,突变点发生在 20 世纪 70 年代初,其他指数突变时间大致为 20 世纪 80 年代初到 90 年代中期。

由于降水事件的复杂性,仅仅用某个时间段的降水量做研究,并不能很好地解释极端降水事件的原因、特征。而且,一个地域的降水与否往往与周围的区域环境密切相关,涉及到的因素很多。倘若仅从自然气候变率的角度解释上述极端降水发生年代际变化的原因,就必须研究各种尺度天气系统发生的年代际变化,这些都有待于做进一步的研究。

参考文献 (References):

[1] Groisman P Y, Karl T R, Easterling D R, *et al.* Changes in the

Probability of Heavy Precipitation: Important Indicators of Climatic Change[J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 243-283.

- [2] Li Lingping, Li Yanying, Qian Li, *et al.* A Study of 1961 to 2005 Changes in Extreme Precipitation Events in Eastern Hexi Corridor [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2010, 32(3): 497-504. [李玲萍, 李岩瑛, 钱莉, 等. 1961~2005 年河西走廊东部极端降水事件变化研究[J]. *冰川冻土*, 2010, 32(3): 497-504.]
- [3] Huang Jiayou. Correlation Moment Analysis of Eastern Equatorial Pacific Sea Surface Temperature and Rainy Summer Day [J]. *Acta Meteorologica Sinica*, 1989, (4): 475-478. [黄嘉佑. 赤道东太平洋海温与我国夏季雨日的相关矩分析[J]. *气象学报*, 1989, (4): 475-478.]
- [4] Sun Shuqing, Ma Shujie. Analysis and Numerical Experiments of The Impact of Sea Surface Temperature Anomaly on East Asian Summer Monsoon and Precipitation in the Yangtze River Basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(1): 36-52. [孙淑清, 马淑杰. 海温异常对东亚夏季风及长江流域降水影响的分析及数值试验[J]. *大气科学*, 2003, 27(1): 36-52.]
- [5] Wei Zhigang, Huang Ronghui, Dong Wenjie. Interannual and Interdecadal Variations of Air Temperature and Precipitation over The Tibetan Plateau [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences*, 2003, 27(2): 157-170. [韦志刚, 黄荣辉, 董文杰. 青藏高原气温和降水的年际和年代际变化[J]. *大气科学*, 2003, 27(2): 157-170.]
- [6] Gao Hong, Shineng, Bai Binren. 1948-2001 Global Terrestrial Long-term Change of Drought and Precipitation in December-February [J]. *Meteorological Science*, 2004, 24(4): 387-397. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2004.04.002. [高鸿, 施能, 白彬人. 1948~2001 年全球陆地 12~2 月降水旱涝长期变化[J]. *气象科学*, 2004, 24(4): 387-397. DOI: 10.3969/j.issn.1009-0827.2004.04.002.]
- [7] Xia Dongdong, Shi Neng, Chen Lüwen. Relation between ENSO and Global Land Precipitation in 1948~2000 [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 2003, 26(3): 333-340. [夏冬冬, 施能, 陈绿文. 1948~2000 年 ENSO 事件与全球陆地年降水量的关系[J]. *大气科学学报*, 2003, 26(3): 333-340.]
- [8] Zhai P M, Sun A J, Ren F M, *et al.* Changes of Climate Extremes in China [J]. *Climatic Change*, 1999, 42(1): 203-218.
- [9] Su Buda, Jiang Tong, Ren Guoyu, *et al.* Observed Trends of Precipitation Extremes in the Yangtze River Basin During 1960 to 2004 [J]. *Advances in Climate Change Research*, 2006, 1(2): 9-14. [苏布达, 姜彤, 任国玉等. 长江流域 1960~2004 年极端强降水时空变化趋势[J]. *气候变化研究进展*, 2006, 2(1): 9-14.]
- [10] Li Yaohui, Li Dongliang, Zhao Qingyun. An Analysis on Characteristic of Autumn Rainfall Anomaly in Northwest China [J]. *Plateau Meteorology*, 2001, 20(2): 158-164. [李耀辉, 李栋梁, 赵庆云. 中国西北地区秋季降水异常的特征分析[J]. *高原气象*, 2001, 20(2): 158-164.]

- [11] Zhai Panmao, Pan Xiaohua. Change in Extreme Temperature and Precipitation over Northern China during the Second Half of the 20 Century[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2003, 58(9): 1-10. [翟盘茂, 潘晓华. 中国北方近 50 年温度和降水极端事件变化[J]. *地理学报*, 2003, 58(9): 1-10.]
- [12] Jiang Zhihong, Ding Yuguo, Tu Qipu. Interdecadal Spatial Structure and Evolution of Extreme Temperatures in Winter and Summer over China during the Past 50 Years [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 1998, 10(Sup.): 97-103. [江志红, 丁裕国, 屠其璞. 中国近 50 年冬夏季极端气温场的年代际空间型态及其演变特征研究[J]. *应用气象学报*, 1998, 10(增刊): 97-103.]
- [13] Yan Zhongwei, Yang Chi. Geographic Patterns of Extreme Climate Changes in China during 1951~1997[J]. *Climatic and Environmental Research*, 2000, 5(3): 267-272. [严中伟, 杨赤. 近几十年中国极端气候变化格局[J]. *气候与环境研究*, 2000, 5(3): 267-272.]
- [14] Li Yungang, He Daming, Hu Jinming, *et al.* Spatial and Temporal Variations Characteristics of Extreme Precipitation Events in the Red River Basin during 1960~2007 [J]. *Natural Resources Journal*, 2012, 27(11). [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).]
- [15] Li Tie, Zou Liyao, Guo Shiyong. Meteorological Data Sets and Quality Control at Low Temperature in Northeast China [J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2004, 15: 164-167. [李铁, 邹立尧, 国世友. 东北地区低温气象资料数据集及其质量控制[J]. *应用气象学报*, 2004, 15: 164-167.]
- [16] Zhao Qingyun, Zhang Wu, Wang Shigong, *et al.* Change of Extreme Precipitation Events in Arid and Semi-arid Regions in the East of Northwest China[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(6): 904-909. [赵庆云, 张武, 王式功, 等. 西北地区东部干旱半干旱区极端降水事件的变化[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(6): 904-909.]
- [17] Li Wei, Zhai Panmao. Relationship between ENSO and Frequency of Extreme Precipitation Days in China[J]. *Advances in Climate Change Research*, 2009, 5(6): 336-342. [李威, 翟盘茂. 中国极端强降水日数与 ENSO 的关系[J]. *气候变化研究进展*, 2009, 5(6): 336-342.]
- [18] Yang Fangxing. Spatial and Temporal Variations and the Correlation with NDVI of Extreme Weather Events in Inner Mongolia [D]. Xi'an: Chang'an University, 2012. [杨方兴. 内蒙古地区极端气候事件时空变化及其与 NDVI 的相关性[D]. 西安: 长安大学, 2012.]
- [19] Wei Fengying. Progress in the Study of Climatological Statistical Diagnosis and Prediction Method—commemoration of the 50 Anniversary of the Establishment of China Academy of Meteorological Sciences[J]. *Journal of Applied Meteorology*, 2006, 17(6): 736-742. [魏凤英. 气候统计诊断与预测方法研究进展—纪念中国气象科学研究院成立 50 周年[J]. *应用气象学报*, 2006, 17(6): 736-742.]
- [20] Torrence C, Compo G P. A Practical Guide to Wavelet Analysis[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 1997, 79(1998): 61-78.
- [21] Du Jun, Lu Yajun, Jian Jun. Changes of Extreme Precipitation Events in Tibet during 1961-2010[J]. *Journal of Natural Resources*, 2014, (6): 990-1002. [杜军, 路红亚, 建军. 1961~2012 年西藏极端降水事件的变化[J]. *自然资源学报*, 2014, (6): 990-1002.]
- [22] Yang Zhigang, Jian Jun, Hong Jianchang. Temporal and Spatial Distribution Characteristics of Extreme Precipitation Events in Tibet during 1961~2010[J]. *Plateau Meteorology*, 2014, 33(1): 37-42. [杨志刚, 建军, 洪建昌. 1961~2010 年西藏极端降水事件时空分布特征[J]. *高原气象*, 2014, 33(1): 37-42.]
- [23] Cheng Junqi. Dynamic Characteristic of Extreme Precipitation Events in Gansu Loess Plateau in Recent 52 years [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [程军奇. 近 52 年甘肃黄土高原极端降水事件的变化特征[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [24] Yang Jinhua, Jiang Zhihong, Wang Pengxiang, *et al.* Temporal and Spatial Distribution of Extreme Precipitation Events Per Year in China [J]. *Climatic and Environmental Research*, 2008, 13(1): 75-83. [杨金虎, 江志红, 王鹏祥, 等. 中国年极端降水事件的时空分布特征[J]. *气候与环境研究*, 2008, 13(1): 75-83.]
- [25] He Jia, Niu Yumei. The Variation Characteristics of Summer Precipitation and Analysis of Annual Circulation Anomaly Characteristics of Extreme Precipitation More or Less [J]. *Ningxia Engineering Technology*, 2010, 09(3): 197-201. [何佳, 牛玉梅. 华北地区夏季降水变化特征和极端降水多、少年环流异常特征分析[J]. *宁夏工程技术*, 2010, 09(3): 197-201.]
- [26] Zhai Panmao, Wang Cuicui, Li Wei. Observe the Change of Extreme Precipitation Events [J]. *Progress of Research for Climate Changes*, 2007, 3(3): 144-148. [翟盘茂, 王萃萃, 李威. 极端降水事件变化的观测研究[J]. *气候变化研究进展*, 2007, 3(3): 144-148.]
- [27] Li Xiaoya. Changes of Precipitation Extreme in North China During 1960~2011 [D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2013. [李小亚. 1960~2011 年我国华北地区极端降水变化研究[D]. 兰州: 西北师范大学, 2013.]
- [28] Liu Yonglin, Yan Junping, Cen Minyi. Comprehensive Evaluation of Precipitation Heterogeneity in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, 70(3): 392-406. [刘永林, 延军平, 岑敏仪. 中国降水非均匀性综合评价[J]. *地理学报*, 2015, 70(3): 392-406.]
- [29] Yang Yanjuan, Li Mingcai. In Homogeneity Characteristic of Extreme Precipitation during Rainy Season in North China [J]. *Journal of Meteorology & Environment*, 2014. [杨艳娟, 李明财. 华北地区雨季极端降水量的非均匀性特征[J]. *气象与环境学报*, 2014(4): 57-62.]

Change in Extreme Precipitation Events over Northern China from 1951 to 2013

Li Zhongkui, Hu Zhuowei, Wei Lai, Xiao Min

(College of Resources Environment and Tourism, Capital Normal University, Beijing 100048, China)

Abstract: Variations and trends in extreme climate events are more sensitive to climate change than the mean values, which have received much attention. In this study, the features for 8 in-dices of precipitation extremes over Northern China are examined, broadly based on daily precipitation data from 90 meteorological stations during the period 1951~2013. The methods of 9-year smoothing average, linear regression, Mann-Kendall test and continuous wavelet transform were employed to delineate the rate of change, abrupt change points, statistical significance of the trends, and periodicity of extreme precipitation indices. The results show that Consecutive Dry Days (CDD) exhibited significant increasing trend during the recent 63 years, the maximum 5-day precipitation (RX5day), Consecutive Wet Days and Annual Total Wet-day Precipitation (PRCPTOT) decreased by 0.05 significance levels. Other 4 extreme precipitation indices showed a decreasing trend, and not notable. There is an obvious linear variation trend in all extreme precipitation and Annual Total Wet-day Precipitation. Consecutive Dry Days and Annual Total Wet-day Precipitation have a weak correlation, other indicators showed a strong positive correlation. With regard to the period of variation, almost all extreme precipitation indices vary at three or four years scale, and most indices have such periods as 8a, 16a and 32a. In terms of the change point, Consecutive Dry Days occurs in 1964, which much earlier than other indices. From the spatial distribution characteristics of extreme precipitation indices, the variation trend in central North China is more distinct. Consecutive Dry Days increases, and other indicators show a decreasing trend.

Key words: Extreme precipitation indices; Periods; Climate abrupt; Northern China