

1961~2010年中国大尺度区域暴雨时空分布特征研究

孔 锋^{1,2,3}, 刘 凡^{2,3,4}, 吕丽莉¹, 方 建⁵, 方佳毅^{2,3,4},
史培军^{2,3,4}, 郭建平⁶

(1. 中国气象局发展研究中心, 北京 100081; 2. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院, 北京 100875; 3. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875; 4. 北京师范大学环境演变与自然灾害教育部重点实验室, 北京 100875; 5. 武汉大学资源与环境科学学院, 湖北 武汉 430079; 6. 中国气象科学研究院大气成分研究所, 北京 100081)

摘 要: 长时间大范围的区域暴雨作为一种极端天气气候事件, 是人民生产生活的一大威胁, 已成为社会和学界的关注焦点之一, 亟需研究中国长时间序列区域暴雨的时空演变特征。通过定义的区域暴雨事件, 选取持续天数、影响站点数、最大日降雨量和最大累积降雨量4项指标, 统计分析了1961~2010年中国区域暴雨的时空变化格局。结果表明: 在空间格局上, 1961~2010年中国区域暴雨主要分布在黑龙江漠河至云南腾冲一线以东的东部沿海季风区, 而西北内陆则无区域暴雨发生; 在省际分布上, 多集中发生在以广东为首的东部沿海省市; 在时间序列上, 中国区域暴雨存在准10a(6.5a和13a)的周期振荡, 以1997年前后年份发生次数较多, 年内多集中在5~9月, 且4项指标均在6月份达到最高。

关键词: 区域暴雨; 大尺度格局; 年际变化; 月际变化; 中国

中图分类号: TV125

文献标识码: A

文章编号: 1004-8227(2017)04-0631-10

DOI: 10.11870/cjlyzyhj201704017

中国东南地区地处东亚季风气候区, 降水过程频繁, 暴雨洪水集中、洪涝灾害严重, 针对中国地区的暴雨事件的研究一直备受关注。极端降水频发, 对灾区可持续发展带来深远影响, 已经成为全球和区域灾害与环境风险的重要因素, 因此, 越来越受到学术与社会各界的关注^[1~4]。

暴雨是不同尺度和多个影响系统叠加的结果, 当不同影响系统之间达到最佳配置时容易形成长时间暴雨, 从而可能引起持续性和群发性的极端事件^[5~7]。持续性暴雨过程是一种高影响的强降水事件, 降水强度大、范围广、持续时间长且落区稳定。群发性极端事件是指在持续性环流或大范围强迫条件作用下, 多种极端天气或气候事件重复发生或连续传播现象, 它可以造成严重或大范围的气象灾害^[6, 7], 其后果常常是破纪录的, 且目前尚难以预测群发性极端事件^[8~11]。目前局地暴雨研究, 多关注降水极值的变化, 主要集中在小区域短期暴雨过程和暴雨的气候背景分析, 各

模式下强降水的模拟, 暴雨的周期和突变点等方面, 一般都是持续时间很短, 区域很小的暴雨过程^[12~14]。而区域性暴雨和特大范围暴雨作为致灾性较大的群发暴雨, 研究相对较少。相对单日发生站点较少的暴雨而言, 持续时间长、波及范围较大的暴雨强度相对更大, 暴雨预报预警服务中应考虑其更大的致灾可能性^[15]; 预报员对站点发生暴雨最长持续日数的了解, 可以减少连续多日预报该站点暴雨的情况, 以减少暴雨的空报率, 从而提高暴雨预报准确率^[16]。与此同时, 伴随着经济活动的发展, 人类活动加剧, 城市化进一步发展。中国城镇化率从2000年的36.22%增加到2014年的54.77%, 京津冀、长三角、珠三角等地区甚至接近或超过了80%^[11]。城市化在一定程度上增大了人类社会与生态环境之间的相互作用, 从而引发一系列的社会-环境-生态问题^[17~19]。因此, 研究大尺度区域性暴雨不仅有利于促进对群发性极端事件的理解, 同时也是城市暴雨洪涝风险防范

收稿日期: 2016-07-27; **修回日期:** 2016-11-22

基金项目: 国家自然科学基金项目“基于未来情景的长江流域洪水灾害风险评估”(41601561) [National Natural Science Foundation Project “Flood risk assessment in Yangtze River basin based on future scenarios” (41601561)]; 国家自然科学基金创新研究群体项目(41621061) [National Natural Science Foundation of Innovative Research Group Project (41621061)]

作者简介: 孔 锋(1986~), 男, 工程师, 博士, 主要研究方向为气候变化与自然灾害. E-mail: kongfeng0824@foxmail.com

的现实需求。

从全球和区域来看,现有观测研究结果认为,全球变暖使得地表蒸发加剧,导致大气保水能力增加,全球和区域水循环加快,势必造成部分地区降水增多^[19,20],其中对流性降水的增多大于层状降水^[21]。自1950年以来的观测证据表明,在全球尺度上,极端强降水事件数量显著增加的区域可能多于显著减少的区域^[22]。IPCC SREX和IPCC AR5中指出,当温室气体CO₂加倍时,极端强降水显著增加,其幅度远大于平均强度的降水^[23,24]。气候模式输出的结果证明,人为气候强迫可能已导致全球极端降水的加强(高信度)^[25,26],且温带地区的增加具有一致性,而热带地区年际变异较大^[27]。观测和模拟均发现温室气体的排放,使得北半球2/3的陆地区域暴雨强度增强^[28]。利用全球气候模式和区域气候模式的模拟结果均发现欧洲的极端强降水在目前和未来均呈现增加趋势,且未来的极端降水增加的比例更大^[29]。利用WRF模式模拟发现,在化石燃料密集排放的情境下,美国东部地区的年极端强降水要比目前状况严重的多,大约增加了107.3 mm^[30]。区域大气模式模拟表明,澳洲悉尼盆地地表植被的减少,影响大气水分和能量收支平衡,从而对暴雨增加起了作用^[31]。需要特别强调指出的是,在对比模式结果与观测结果后,发现气候变暖下暴雨的实际增加大于模式结果^[32,33]。中国全国尺度上的总降水量趋势变化不明显,但暴雨强度在增强^[34-36],遭受异常强降水事件的地区也在增加^[37]。长江流域降水增加主要是由于降水强度加大且极强降水事件的增多^[38,39];华南近年来暴雨雨量与雨日均呈显著升高趋势^[40]。西南地区年总体降水量呈微弱的减少趋势,年总雨量和年总雨日在春、冬季的呈增多趋势,而夏秋季的呈减少趋势,尤其是中雨日和小雨日呈明显减少趋势,但暴雨雨日、大雨雨日均呈增加趋势。利用不同气候模式在不同情景下预估的结果均一致表明,未来中国极端强降水的强度和频次都存在显著增加的趋势,尤其是在全球变暖的背景下,中国绝大多数地区极端强降水都呈增加趋势。东南沿海地区,长江流域和中国北方河流中下游的地区预计将比现在经历更多极端强降水^[40]。在严重污染的情况下,湿润地区夏季云厚度可比低污染时高出一倍,进而导致雷暴天气显著增加,强降水事件增强^[41]。

因此,在这种背景下研究中国近年来的长时间大范围的区域暴雨时空格局具有十分重要的意义,既是制定城市暴雨洪涝防灾减灾预案的前提条件,也是大力建设海绵城市和智慧城市的重要一环。

1 数据和方法

1.1 数据来源

本文采用的1961~2010年的气象站点数据来自中国气象科学数据共享服务网地面气象资料数据库的地面气候资料日值数据集。由于中国大多数站点是1960年之后建立,1960年之前很多站点缺测较多,因此,本文选取1961~2010年为研究时段,对相关数据进行校验,对于其中缺失的数据利用临近站点和缺失站点的相邻前后年份相加后的均值补缺该日值,最后得到可用降水观测站点597个,站点分布如图1所示。由于站点数据的观测和获取限制,本文中的站点数据不包括港、澳、台地区。本文采用的1949~2013年的洪涝面积和受洪水影响县数数据来自《新中国统计60年》和《中国民政统计年鉴》等多种统计资料。

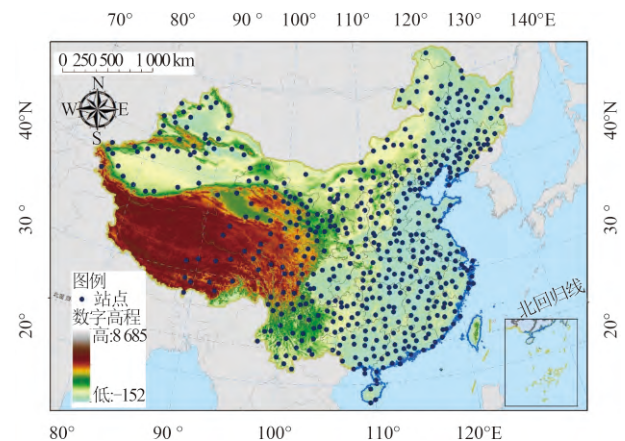


图1 中国数字高程和气象台站分布

Fig.1 Digital Elevation and Distribution of Meteorological Stations in China

1.2 计算方法

中国气象局颁布的降水强度等级中将日降雨量达到50 mm的降水定义为暴雨。在此基础上,本文定义了单站和区域暴雨事件。单站暴雨事件的定义:①对于仅持续一天的事件,日降水量必须 ≥ 50 mm;②如果事件持续多天,则每天的日降水量超过第90百分位,且最大日降水量 ≥ 50 mm。

③处于单站暴雨事件中的站点称为极端站点。区域暴雨事件的定义: 如果连续至少3天出现暴雨区域, 并且区域中心每天的移动不超过5度, 就形成一次区域暴雨事件。区域暴雨站点的相关定义如下: ①相邻站点: 距离在300 km以内的两个站点; ②暴雨区域: 包含至少5个相邻极端站点的区域; ③区域中心: 区域包含的各个极端站点的平均经纬度。由上述单站暴雨和区域暴雨事件的定义可知, 要满足区域暴雨事件必须满足单站暴雨事件定义, 即单站暴雨事件的定义是区域暴雨事件定义的子集, 包含于区域暴雨事件定义之中。本文基于以上定义, 本文定义区域暴雨事件指标如下: ①中心位置: 区域暴雨过程中每天区域中心的平均; ②影响站数: 整个区域暴雨过程影响的不同极端站点个数; ③最大日降水量: 计算每天区域暴雨影响的极端站点的降水平均值, 取其中最大值; ④最大累积降水量: 计算每个极端站点在一次区域暴雨过程中的累积降水, 取最大值。此外, 我们还采用功率谱分析1961~2010年中国区域暴雨的周期变化特征。

2 结果与分析

2.1 中国区域暴雨空间分布格局

由区域暴雨的定义计算得到的中国的区域暴雨主要由以下几个特征: (1)在整体时间和空间变化上, 1961~2010年中国区域共计发生了456次区域暴雨, 主要发生在黑龙江漠河-云南腾冲一线以东的东部季风区, 尤其是以淮河以南, 四川以东为多。这一地区是中国地形的一、二级阶梯, 海拔相对较低, 且距离海岸较近, 有利于水汽的爬升与输送。同时这些地区也是中国水汽较为充足的区域(图2)。(2)在持续天数方面, 中国的区域暴雨的持续天数主要是3~5天为主, 其中持续3、4和5天的区域暴雨分别发生了254、110和48次, 占总的区域暴雨次数的比例分别是55.70%、24.12%和10.53%, 三者占总的区域暴雨次数的比例高达90.35%(图2-a)。(3)在影响站点数方面, 中国区域暴雨影响的站点数主要集中在10~50个之间, 其中影响10~20、20~30、30~40和40~50个的区域暴雨发生次数分别是133、142、81和50次, 占总的区域暴雨次数的比例分别是29.17%、31.14%、17.76%

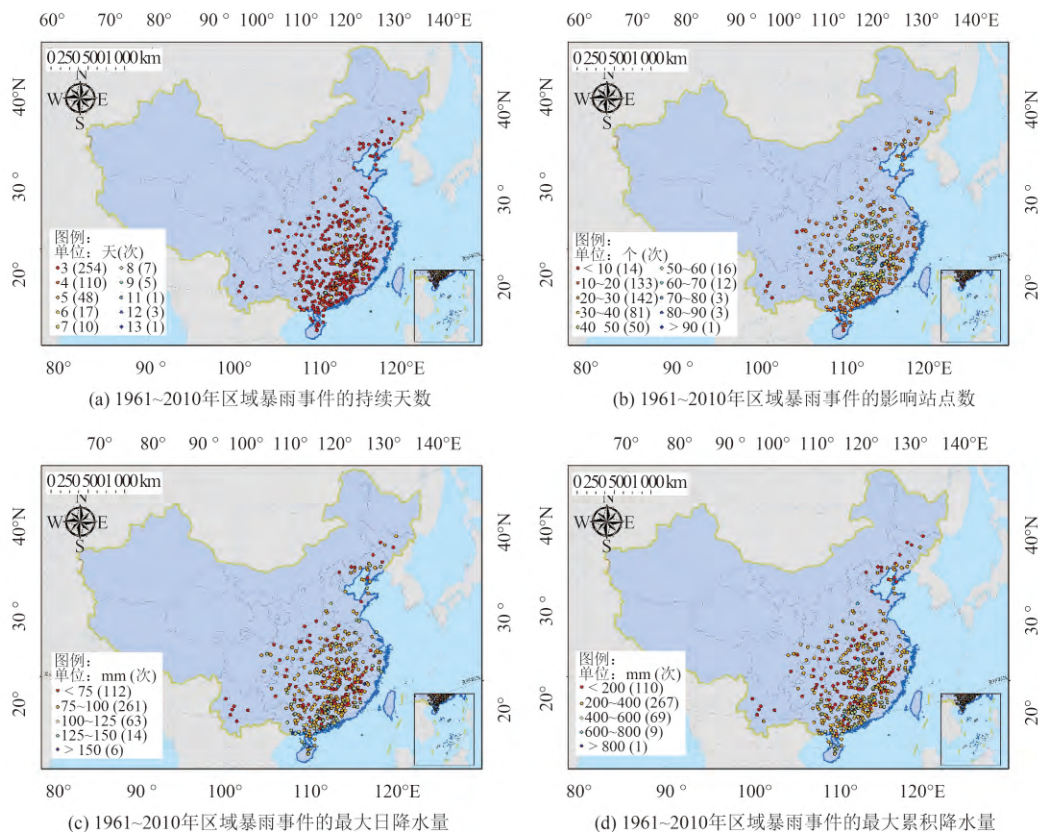


图2 1961~2010年中国的区域暴雨空间格局

Fig.2 Spatiotemporal Pattern Change of Regional Heavy Rainfall in China (1961–2010)

和10.96%， 四者占总的区域暴雨次数的比例高达89.04%(图2-b)。(4)在最大日降水量方面，中国区域暴雨最大日降水量主要集中在50~125之间。其中最大日降水量小于75、75~100和100~125 mm的区域暴雨发生次数分别是112、261和63次，占总的区域暴雨次数的比例分别是24.56%、57.24%和13.82%，三者占总的区域暴雨次数的比例高达95.61%(图2-c)。(5)在最大累积降水量方面，中国的区域暴雨主要集中在小于600 mm的区间。其中小于200、200~400和400~600 mm的区域暴雨分别发生了110、267和69次，占总的区域暴雨次数的比例分别是24.12%、58.55%和15.13%，三者占总的区域暴雨次数的比例高达97.81%(图2-d)。

从省际变化来看，1961~2010年中国发生区域暴雨的省份只24个，如表1所示。其中发生次数最多的是广东，达107次。最少的是北京、内蒙古和天津，只发生过1次。并且持续天数总和、影响站点数总和、最大累积降水量总和最多的也是广东，超过了排名第二和第三的广西和江西两者之和。

2.2 中国区域暴雨时间序列动态变化

在年际变化上，1961~2010年的中国区域暴雨存在准10a的周期振荡(图3)。进一步我们采用功率谱分析1961~2010年中国区域暴雨的发生次数、持续天数总和、影响站点数总和以及最大累积降水量总和，可以发现1961~2010年中国区域暴雨存在6.5a和13a的振荡周期，且大都通过0.05显著性水平

的检验(图4)。其中，中国的区域暴雨发生次数最多的年份是1997年，达到了19次，最少的年份是1979年和2005年只有4次，多年平均为9次(图3-a)；持续天数总和最多的年份是1997年，达到了70 d，最少的年份是1979年和2005年，只有13 d(图3-b)；影响站点数最多的年份是1997年，达到了529个，最少的年份是1980年，只有102个(图3-c)；累积降水量总和最多的年份是2001年，达到了5 543.5 mm，最少的年份是1979年，只有1 110.2 mm(图3-d)。

在月际变化上，1961~2010年的中国区域暴雨在年内的变化呈单峰型，主要集中在5~9月之间(图5)。其中，中国的区域暴雨发生次数最多的月份是6月，达129次，其中12月份没有区域暴雨；区域暴雨持续天数、影响站点数和最大累积降水量最大的是6月份，这与副热带高压控制下的雨带推移过程密切相关。

3 结论及讨论

3.1 结论

中国的区域暴雨在1961~2010年具有明显的时空分布特征，主要表现为以下几方面：①在空间上，中国的区域暴雨主要集中在黑龙江漠河-云南腾冲一线以东的东部季风区，尤其是以淮河以南，四川以东为多。在省际分布上，主要集中在广东、广西、福建、安徽和湖南等东部距海较近

表 1 中国区域暴雨的省际差异

Tab.1 Provincial Differences of Regional Heavy Rainfall in China

省份	发生次数(次)	持续天数总和(d)	影响站点数总和(d)	最大累积降水量总和(mm)	单次日最大降水量(mm)
北京	1	3	22	148	58
内蒙古	1	3	13	183	72
天津	1	3	23	256	77
陕西	2	6	41	333	64
山西	2	8	52	486	70
吉林	5	15	110	812	74
山东	6	19	130	1 579	92
重庆	6	20	124	1 449	86
江苏	6	22	100	1 861	106
河北	6	24	156	2 105	85
云南	8	25	121	1 445	64
贵州	7	28	219	1 812	89
海南	10	31	154	3 742	109
辽宁	14	44	349	3 446	89
四川	15	49	277	4 045	81
浙江	15	51	376	4 281	90
河南	17	61	485	4 295	81
湖北	22	86	676	5 936	82
湖南	34	123	942	7 899	80
安徽	27	144	1 104	9 090	91
福建	40	160	1 138	10 999	79
江西	42	182	1 525	13 221	84
广西	61	254	1 853	20 282	93
广东	107	411	3 101	35 358	94

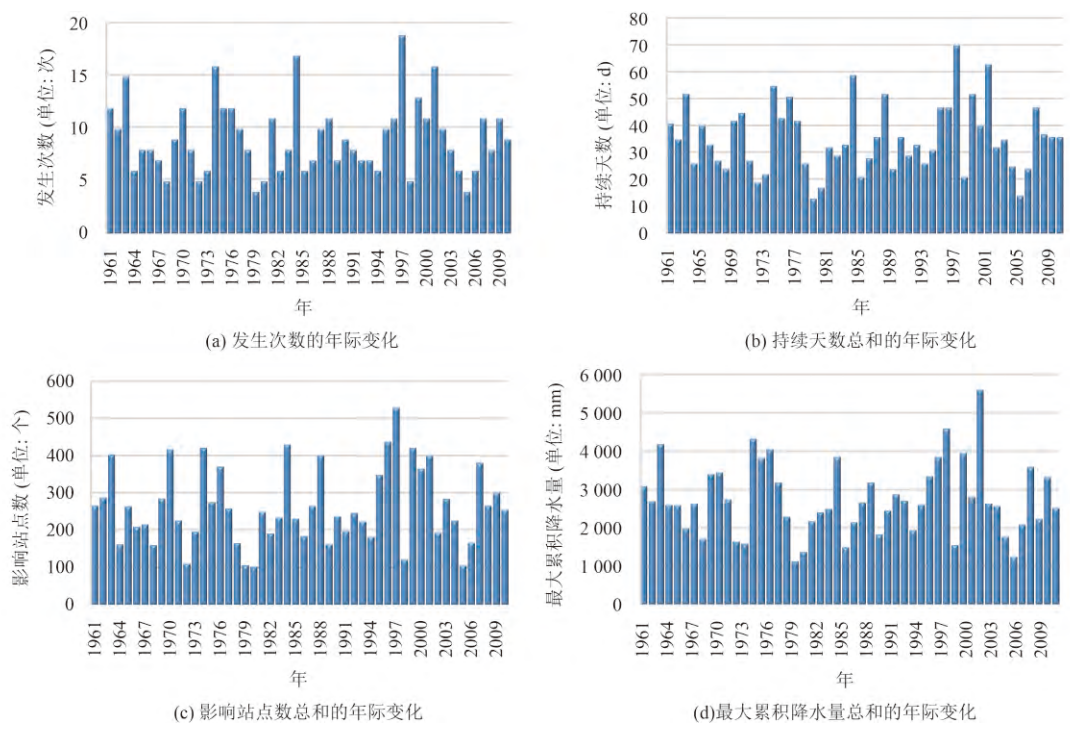


图 3 1961~2010 年中国的区域暴雨年际变化
Fig.3 Annual Variation of Regional Heavy Rainfall in China (1961–2010)

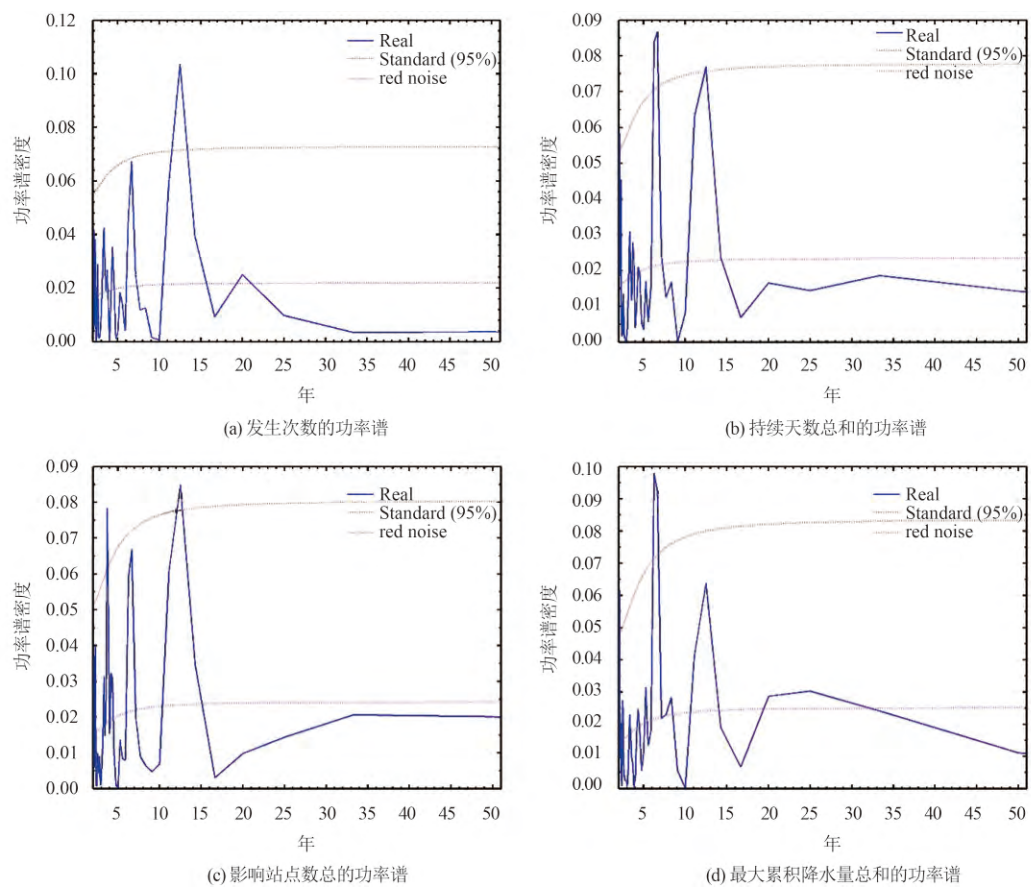


图 4 1961~2010 年中国的区域暴雨的功率谱
Fig.4 Spectral Power of Annual Regional Heavy Rainfall in China (1961–2010)

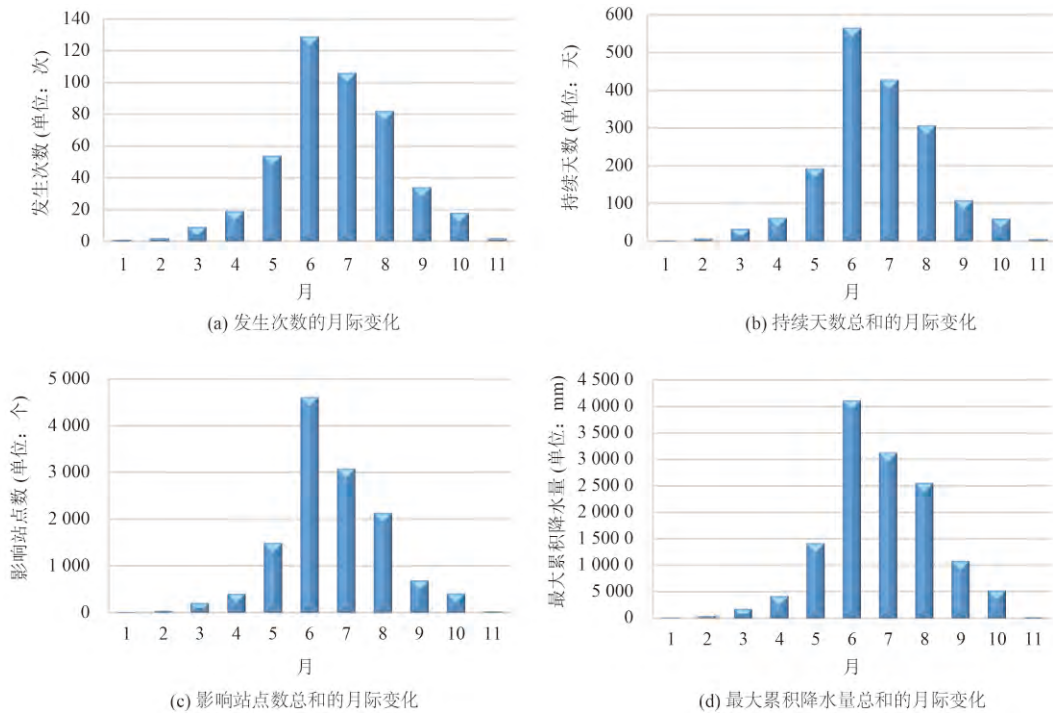


图5 1961~2010年中国的区域暴雨月际变化

Fig.5 Monthly Variation of Regional Heavy Rainfall in China (1961–2010)

的省份, 其中广东的发生次数最多, 超过了排名第二和第三的广西和江西两者之和。②在时间上, 从年际变化上, 中国的区域暴雨存在准10a的周期振荡, 功率谱分析表明存在6.5a和13a的周期变化, 大致都在10a左右。发生次数在1997年左右较多, 在1979年左右发生次数较少; 从月际变化上, 中国区域暴雨主要集中在5~9月之间, 尤其区域暴雨发生次数、持续天数、影响站点数和最大累积降水量最高的月份的是6月份。③在区域暴雨特征方面, 以持续3~5 d、影响站点数10~50个、最大日降水量主要集中在50~125 mm之间和最大累积降水量小于600 mm的区域暴雨为主, 其发生次数分别占区域暴雨总次数的比例为90.35%、89.04%、

95.61%和97.81%。

3.2 讨论和展望

3.2.1 讨论

(1)区域性暴雨致灾性的历史印证。中国是一个多暴雨的国家, 且暴雨常常带来严重的洪水灾害。建国以来发生的1954年长江大水, 1958年黄河大水, 1963年海河大水, 1975年淮河大水, 1998年的长江流域大洪水就是由持续性的大范围强暴雨造成。尤其是东南沿海暴雨出现最频繁, 年暴雨日数一般在5 d以上。在中国洪涝灾害占农作物总受灾面积的27%。其中1949~2013年中国洪涝面积和受洪水影响的县数在波动中呈现出增加的趋势(图6)。尤其是近10多年间频发的强降水事

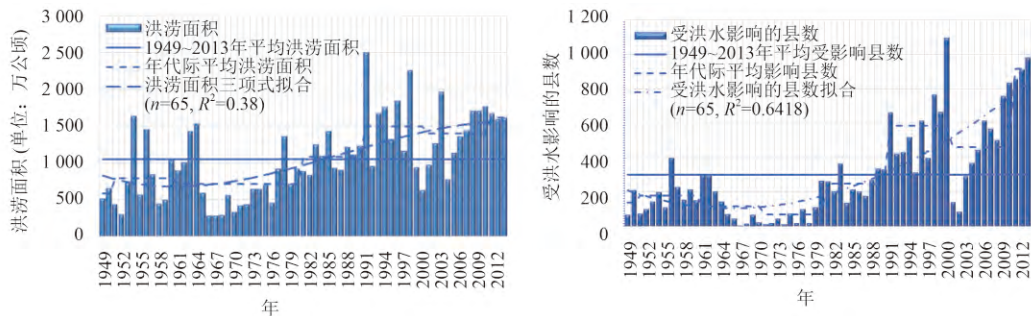


图6 中国洪涝面积和受洪水影响的县数(1949–2013)

Fig.6 China's Flood Area and County Number Affected by Flood(1949–2013)

件,使得“逢暴雨必涝”的景象在中国东部诸多城市频繁上演,已经给社会造成严重的经济损失,威胁着生态安全和社会安全。

(2)西部地区未出现区域暴雨的验证。为了进一步验证中国西部地区是否真的从未出现区域暴雨,我们采用了基于日值降水数据的90%分位数来计算597个站点的阈值,结果如图7所示,仅中国黑龙江漠河至云南腾冲一线以东地区的极端降水阈值在50 mm/d及以上,该线以西绝大多数站点的阈值都小于50 mm/d。尤其是西北内陆地区的极端降水阈值基本都在20 mm/d及以下,未能达到单站暴雨事件的定义。由于要满足区域暴雨事件定义首先必须满足单站暴雨事件的定义,因此,从侧面证明中国西北内陆地区未出现区域暴雨事件,中国的区域暴雨事件主要集中在东部地区。

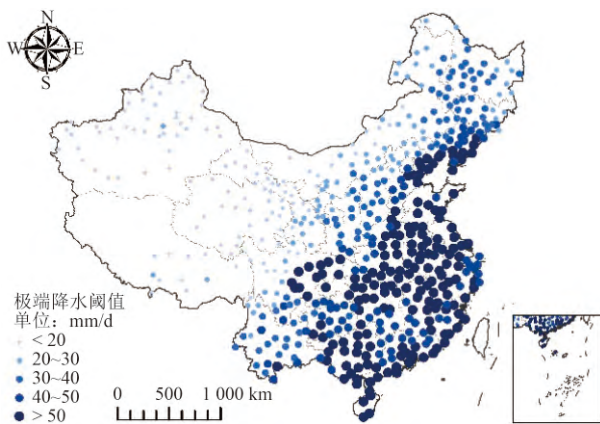


图7 基于日值降水数据的90%分位数的极端降水阈值(1961~2010)

Fig.7 Extreme Precipitation Threshold Based on 90 Percentile of Daily Precipitation(1961~2010)

(3)区域暴雨定义的合理性验证。从实际情况来看,天气过程带来的过程型暴雨会呈现出区域性现象,其涉及范围往往会涉及多个县,甚至跨省。对中国东部来说,单站暴雨事件有时可能会涉及相邻1~2个县。就全国的县域面积来说,全国(共计2 859个县级单位)平均县域面积按等圆计算,其直径为65.6 km;按正方形计算,其边长为58.0 km,平均范围幅宽(长)约为62 km,远小于本文所定义的300 km。据此,对中国东部而言300 km大致可以辐射5个县,对西部则至少可以辐射1~2个县。因此,从整体来看,本文定义区域暴雨相邻站点在300 km以内也是科学的。

(4)相邻站点间缺测代替的验证。如用临近的站点替代缺失站点的数据,则相邻两个站点绝对

满足相同状态。为了验证其是否合理,我们计算了597个站点间的单站暴雨的相关系数。首先,将所有站点以其中任意站点为中心,计算其与任何其他站点的相关系数;再依据该中心站点距任意站点的距离分为12个等级,即<50、50~100、100~200、200~300、300~400、400~500、500~600、600~700、700~800、800~900、900~1 000、>1 000 km。在此基础上,将12个等级内中心站点与任意站点的相关系数加和平均,得到各个等级的相关系数,结果如图8所示。对暴雨雨量来说,在12个等级内,站点间的相关系数均未通过0.05显著性水平的检验;同时结合上述讨论3,因此,我们认为不存在区域尺度上的显著空间自相关,在本研究中,临近站点不能代替缺测站点。

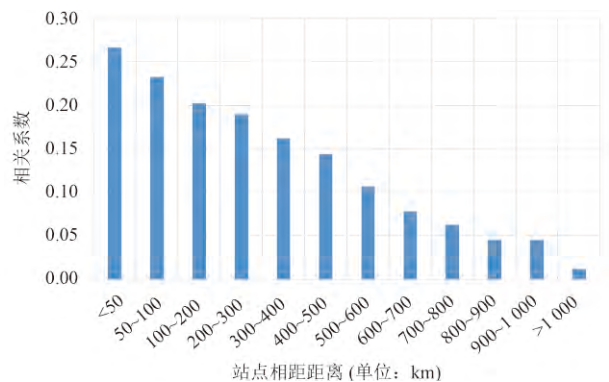


图8 中国暴雨雨量随距离的空间自相关系数

Fig.8 Correlation Coefficient of HRA Between Different Distances of Meteorological Station

3.2.2 展望

区域暴雨作为波及范围广、雨强大、持续时间长的暴雨类型,其致灾性远高于其它降雨类型。在构建安全城市、智慧城市和海绵城市的大背景下,研究区域暴雨事件的时空特征及其成因机制既应运而生,又势在必行。还需要从以下几方面深入开展研究:

(1)模式模拟验证。在对区域诸多大气、海洋等气候因子诊断分析的基础上,进一步通过高精度的区域气候模式模拟验证人文因子的作用,以进一步揭示区域暴雨明显的时空变化特征。一方面在给定观测的自然和人为强迫因子的条件下,合理再现和确认大尺度区域暴雨年际或年代际变化的稳健信号;另一方面,通过模拟加深对人类活动影响区域暴雨的热力、动力、云物理等过程的科学理解。

(2)多区域对比验证。不同地区的大尺度区域暴雨演变是一个相当复杂的系统过程,影响因素多种多样且相互影响,同时其对大尺度区域暴雨演变的作用方式、范围和程度也不同。大尺度区域暴雨时空演变驱动机制还需要深入研究。区域暴雨的周期现象和变化趋势是区域性现象,还是全球性现象?还需要通过对多个国家和地区的多个时空尺度进行对比和深化研究,从而进一步揭示暴雨显著增加机理。

(3)水汽因素和台风过程。中国胡焕庸线以东,尤其是东南沿海地区,地势较低,且面临太平洋,季风现象显著,水汽来源充足,这里也是天气系统和台风活动显著的区域。对流型的暴雨一般局地性很强,通常在7~8 km的范围。大尺度的区域暴雨,且持续时间长,极可能是台风和气旋等天气过程带来的过程型暴雨,这还有待于进一步的深入。

(4)多维度的区域暴雨综合风险防范。气候变化加剧,自然灾害频发,已影响到人类社会的可持续发展^[14]。区域性暴雨由于其较强的雨强和致灾性特点,往往容易成为诱发不同类型灾害的因子^[11, 16]。因此,针对不同地区需要统筹考虑社会-生态复合系统,根据大尺度区域性暴雨的内涵,从影响区域暴雨的影响因子出发,着眼于自然、社会、经济、技术、管理五个维度构建区域暴雨影响因素指标体系,利用多种数学计量方法考察指标、维度之间的影响关系,求得存在网络影响关系的指标及维度权重,更符合实际意义。

参考文献:

- 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: Atmospheres*, 2012, 111(D5): D05109.
- BENISTON M, STEPHENSON D B, CHRISTENSEN O B, et al. Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections[J]. *Climatic Change*, 2007, 81(S1): 71–95.
- BROWN P J, BRADLEY R S, KEIMIG F T. Changes in extreme climate indices for the Northeastern United States, 1870–2005[J]. *Journal of Climate*, 2010, 23(24): 6555–6572.
- YIN Y X, CHEN H S, XU C Y, et al. Spatio-temporal characteristics of the extreme precipitation by L-moment-based index-flood method in the Yangtze River Delta region, China[J]. *Theoretical and Applied Climatology*, 2016, 124(3): 1005–1022.
- ZHAO Y, XU X D, ZHAO T L, et al. Extreme precipitation events in East China and associated moisture transport pathways[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(9): 1854–1872.
- 史培军, 孔 锋, 方佳毅. 中国年代际暴雨时空变化格局[J]. *地理科学*, 2014, 34(11): 1281–1290.
【SHI P J, KONG F, FANG J Y. Spatio-temporal patterns of China decadal storm rainfall[J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2014, 34(11): 1281–1290.】
- DU S Q, SHI P J, VAN ROMPAEY A, et al. Quantifying the impact of impervious surface location on flood peak discharge in urban areas[J]. *Natural Hazards*, 2015, 76(3): 1457–1471.
- LIU L, XU Z X. Regionalization of precipitation and the spatiotemporal distribution of extreme precipitation in southwestern China[J]. *Natural Hazards*, 2016, 80(2): 1195–1211.
- SHOPE C L. Disentangling event-scale hydrologic flow partitioning in mountains of the Korean peninsula under extreme precipitation[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 399–415.
- XIAO M Z, ZHANG Q, SINGH V P. Spatiotemporal variations of extreme precipitation regimes during 1961–2010 and possible teleconnections with climate indices across China[J]. *International Journal of Climatology*, 2017, 37(1): 468–479.
- 张建云, 王银堂, 贺瑞敏, 等. 中国城市洪涝问题及成因分析[J]. *水科学进展*, 2016, 27(4): 485–491.
【ZHANG J Y, WANG Y T, HE R M, et al. Discussion on the urban flood and waterlogging and causes analysis in China[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(4): 485–491.】
- 戴泽军, 刘志雄, 李易芝, 等. 近54 a湖南区域暴雨的时空分布特征[J]. *暴雨灾害*, 2015, 34(1): 41–46.
【DAI Z J, LIU Z X, LI Y Z, et al. Climatic characteristics of regional heavy rain over Hunan during the last 54 years[J]. *Torrential Rain and Disasters*, 2015, 34(1): 41–46.】
- 赵雪雁, 王亚茹, 张 钦, 等. 近50 a青藏高原东部夏半年强降水事件的气候特征[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(4): 675–683.
【ZHAO X Y, WANG Y R, ZHANG Q, et al. Climatic characteristics of heavy precipitation events during summer half year over the Eastern Tibetan Plateau in recent 50 years[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(4): 675–683.】
- 翟盘茂, 刘 静. 气候变暖背景下的极端天气气候事件与防灾减灾[J]. *中国工程科学*, 2012, 14(9): 55–63, 84.
【ZHAI P M, LIU J. Extreme weather/climate events and disaster prevention and mitigation under global warming background[J]. *Engineering Science*, 2012, 14(9): 55–63, 84.】
- 钱 莉, 杨永龙, 张宇林, 等. 河西走廊东部极端降水的时空分布及影响因子分析[J]. *干旱区地理*, 2015, 38(2): 207–214.
【QIAN L, YANG Y L, ZHANG Y L, et al. Temporal and spatial distribution and influence factors of extreme precipitation in eastern Hexi Corridor[J]. *Arid Land Geography*, 2015, 38(2): 207–214.】
- 孙鸿鹄, 程先富, 陈翼翔, 等. 区域洪涝灾害恢复力时空演变研究——以巢湖流域为例[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1384–1394.
【SUN H H, CHENG X F, CHEN Y X, et al. Study on the temporal and spatial evolution of regional flood disaster resilience: taking the Chaohu basin as a case[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1384–1394.】
- 李 丹, 郭生练, 洪兴骏, 等. 汉江流域1960–2014年降雨极值时空变化特征[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(9): 1448–1456.

- 【LI D, GUO S L, HONG X J, et al. Temporal and spatial variation of rainfall extremes in Han river basin from 1960 to 2014[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(9): 1448–1456.】
- [18] 叶丽梅, 周月华, 向 7Nbsp;华, 等. 基于GIS淹没模型的城市道路内涝灾害风险区划研究[J]. *长江流域资源与环境*, 2016, 25(6): 1002–1008.
- 【YE L M, ZHOU Y H, XIANG H, et al. Risk regionalization of urban roads waterlogging disasters based on GIS rainstorm flood inundation model[J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2016, 25(6): 1002–1008.】
- [19] IPCC. Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change[M]. London: Cambridge University Press, 2012.
- [20] BENESTAD R E, NYCHKA D, MEARNES L O. 2012. Spatially and temporally consistent prediction of heavy precipitation from mean values[J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2(7): 544–547.
- [21] BERG P, MOSELEY C, HAERTER J O. Strong increase in convective precipitation in response to higher temperatures[J]. *Nature Geoscience*, 2013, 6(3): 181–185.
- [22] EASTERLING D R, EVANS J L, GROISMAN P Y, et al. Observed variability and trends in extreme climate events: a brief review[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2000, 81(3): 417–426.
- [23] ASADIEH B, KRAKAUER N Y. Global trends in extreme precipitation: climate models versus observations[J]. *Hydrology & Earth System Sciences Discussions*, 2014, 11(11):11369–11393.
- [24] GROUP R C. Evaluation of global climate models in simulating extreme precipitation in China[J]. *Tellus Series A-dynamic Meteorology & Oceanography*, 2013, 65(5):1393–1399.
- [25] ALLEN M R, INGRAM W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle[J]. *Nature*, 2002, 419(6903): 224–232.
- [26] O’GORMAN P A. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change[J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5(10): 697–700.
- [27] MIN S K, ZHANG X B, ZWIERS F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes[J]. *Nature*, 2011, 470(7334): 378–381.
- [28] DURMAN C F, GREGORY J M, HASSELL D C, et al. A comparison of extreme European daily precipitation simulated by a global and a regional climate model for present and future climates[J]. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 2001, 127(573): 1005–1015.
- [29] GAO Y, FU J S, DRAKE J B, et al. Projected changes of extreme weather events in the eastern United States based on a high resolution climate modeling system[J]. *Environmental Research Letters*, 2012, 7(4): 044025.
- [30] GERO A F, PITMAN A J, NARISMA G T, et al. The impact of land cover change on storms in the Sydney Basin, Australia[J]. *Global and Planetary Change*, 2006, 54(1/2): 57–78.
- [31] ALLAN R P, SODEN B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes[J]. *Science*, 2008, 321(5895): 1481–1484.
- [32] 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.
- [33] ZHAI P M, ZHANG X B, WAN H, et al. Trends in total precipitation and frequency of daily precipitation extremes over China[J]. *Journal of Climate*, 2005, 18(7): 1096–1108.
- [34] 钱维宏, 符娇兰, 张玮玮, 等. 近40年中国平均气候与极值气候变化的概述[J]. *地球科学进展*, 2007, 22(7): 673–684.
- 【QIAN W H, FU J L, ZHANG W W, et al. Changes in mean climate and extreme cliamte in china during the last 40 years[J]. *Advances in Earth Science*, 2007, 22(7): 673–684.】
- [35] ZHANG X B, ZWIERS F W, HEGERL G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends[J]. *Nature*, 2007, 448(7152): 461–465.
- [36] FENG L, ZHOU T J, WU B, et al. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model[J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2011, 28(2): 464–476.
- [37] FU G B, YU J J, YU X B, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961–2009[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 48–59.
- [38] WANG Y Q, ZHOU L. Observed trends in extreme precipitation events in China during 1961–2001 and the associated changes in large-scale circulation[J]. *Geophysical Research Letters*, 2005, 32(17): L17708.
- [39] YU R C, LI J. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China[J]. *Journal of Climate*, 2012, 25(19): 6851–6861.
- [40] ZHANG Y, XU Y L, DONG W J, et al. A future climate scenario of regional changes in extreme climate events over China using the PRECIS climate model[J]. *Geophysical Research Letters*, 2006, 33(24): L24702.
- [41] LI Z Q, NIU F, FAN J W, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation[J]. *Nature Geoscience*, 2011, 4(12): 888–894.

RESEARCH ON SPATIOTEMPORAL PATTERN OF LARGE-SCALE REGIONAL HEAVY RAINFALL IN CHINA FROM 1961 TO 2010

KONG Feng^{1,2,3}, LIU Fan^{2,3,4}, LU Li-li¹, FANG Jian⁵, FANG Jia-yi^{2,3,4}, SHI Pei-jun^{2,3,4}, GUO Jian-ping⁶

(1. Research Centre for Strategic Development, China Meteorological Administration, Beijing 100081, China; 2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Academy of Disaster Reduction and Emergency Management, Ministry of Civil Affairs & Ministry of Education, Beijing 100875, China; 4. Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster of Ministry of Education, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 5. School of Resources and Environmental Science, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 6. Institute of Atmospheric Composition, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081, China)

Abstract: China's flooding disasters by heavy rainfall occurred frequently in recent years. Regional heavy rainfall lasting long time and with a wide range is a kind of extreme weather events that is a serious threat to the society. Regional heavy rainfall has become the focus of attention of the society and academic circles. Therefore, it is necessary to study the spatiotemporal pattern of regional heavy rainfall in China in recent years. Selection based on the definition of regional heavy rainfall, last days, impact station number, maximum daily precipitation and cumulative precipitation as the four indicators, statistical analysis of the China regional heavy rainfall spatiotemporal pattern between 1961 and 2010 was carried out in this study. The results showed that: China's regional heavy rainfalls are mainly distributed in the east region as a result of monsoon of the line between Mohe in Heilongjiang province and Tengchong in Yunnan province. Regional heavy rainfalls are more concentrated in eastern coastal provinces and cities, led by Guangdong province. In temporal dimension, China's regional heavy rainfall is quasi periodic oscillations in ten years (6.5 and 13 years) and occurred more with around 1997. Regional heavy rainfall are more concentrated in May to September during a year from long-term period, and four indicators reached the highest in June.

Key words: regional heavy rainfall; large scale pattern; annual variation; monthly variation; China

孔锋，1986年生，山西临汾人，中国气象局发展研究中心工程师，2006-2016年就读于北京师范大学，并获得学士、硕士和博士学位。研究生期间师从中国知名地理学家史培军教授，博士论文题目为《区域暴雨时空变化格局及其相关因素研究》。2012-2013年赴美国马里兰大学大气海洋系/地球系统科学交叉学科中心(ESSIC)交流访问，合作导师为大气科学领域国际知名华裔学者李占清教授。目前研究领域主要为：自然地理学、环境演变与自然灾害、城市化与灾害风险、可持续发展科学。主要研究兴趣和方向：“一带一路”综合灾害风险研究；人口资源与环境风险问题；极端降水时空演变及其成因机制；极端降水灾害损失和风险评估；极端降水与暴雨洪涝灾害过程与机理研究；气候变化诊断与自然灾害风险研究；城市系统灾害风险研究；传统灾害风险与非传统灾害风险；全球系统性风险。孔锋长期从事地理领域包括人口、资源和环境相关的研究，多次参与国家级科研项目，具备丰富的科研经验，理论与实践水平突出；具备扎实的地理、规划、灾害风险管理以及防灾减灾理论基础，擅长将RS和GIS技术应用于自然灾害风险分析、自然灾害区划和风险区划、灾害与应急管理、灾后重建规划和可持续发展研究中。尤其是作为项目办公室的执行管理人员，负责多个巨灾风险分析相关科研项目，具备较优秀的项目管理以及科研报告撰写能力，擅于沟通和团队协作；具有扎实的巨灾风险分析理论基础，参与中国暴雨灾害风险模型研发；具有良好的双语表达和写作能力，擅于快速学习和总结经验；工作目标明确，务实、有效，追求结果；勇于承担责任，能承受工作压力，追求进步。