

HAIMIAN CHENGSHI DIYINGXIANG KAIFA JISHU YU SHIJIAN

海绵城市

低影响开发技术与实践

贾海峰 主编



化学工业出版社

HAIMIAN CHENGSHI DIYINGXIANG KAIFA JISHU YU SHIJIAN

海绵城市 低影响开发技术与实践

贾海峰 主编



化学工业出版社

· 北京 ·

本书的主要内容择选于《2016 年国际城市低影响开发学术大会》中可以反映我国海绵城市建设实践的中文学术论文以及部分作者近几年的工作积累。主要涵盖以下内容：城市水文与水系统研究；降雨径流模拟分析与径流控制技术；城市绿色-灰色基础设施耦合研究；海绵城市与园林景观研究；海绵城市规划方法研究；各种海绵型城市土地单元的研究和实践；海绵城市建设和管理策略。

本书可供从事与海绵城市建设和管理相关的城市规划、给水排水、园林景观、环境工程、水利工程等行业的技术和管理人员参考，也可供高等学校相关专业师生参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

海绵城市低影响开发技术与实践/贾海峰主编. —北京:
化学工业出版社, 2018.1
ISBN 978-7-122-30654-8

I. ①海… II. ①贾… III. ①城市建设-中国-文集
IV. ①F299.2-53

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 232068 号

责任编辑：刘兴春 卢萌萌
责任校对：王素芹

文字编辑：汲永臻
装帧设计：王晓宇

出版发行：化学工业出版社（北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011）
印 装：大厂聚鑫印刷有限责任公司
787mm×1092mm 1/16 印张 31½ 彩插 12 字数 789 千字 2018 年 3 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询：010-64518888（传真：010-64519686） 售后服务：010-64518899
网 址：http://www.cip.com.cn
凡购买本书，如有缺损质量问题，本社销售中心负责调换。

定 价：198.00 元 版权所有 违者必究

《海绵城市低影响开发技术与实践》

编 委 会

主 编：贾海峰

副主编：徐洪磊 马洪涛

编 委：（按姓氏笔画排序）

丁文清	卫 超	马洪涛	王 帅	王 强
王卫红	王训迪	王思思	毛 羽	毛 坤
孔 锋	左剑恶	卢金锁	吕 恒	吕晓芳
刘 妩	刘 晖	刘小钊	刘小梅	孙海兰
杜鹏飞	李 菁	李莉华	杨一夫	杨青娟
杨富程	吴 丹	辛 涛	汪诚文	张玉虎
张 晋	张军飞	张迎霞	陈 凌	陈燕飞
易 洋	周 文	郑晓莉	胡 洁	骆天庆
贾海峰	徐 慧	徐丽贤	徐洪磊	郭 茹
唐博雅	黄光华	黄炳彬	崔荣兵	康 丹
梁尧钦	程 哲	裘鸿菲	蔡欣远	谭 琪
戴 忱				



在数十年我国快速城市化进程中，人们在享受城市化带来的带动区域经济发展、创造就业机会、提高生产效率、推进科技进步等红利的同时，也深刻认识到传统的城市化模式带来的负面效应。城市内涝、城市水环境污染、热岛、生态退化等已成为世界各国政府、专家和社会民众普遍关注的热点问题。

针对这些城市问题，国内外学者在反思城市化和传统排水系统发展的基础上，着眼于生态城市、低碳城市的建设，提出了城市低影响开发（low impact development, LID）的理念、理论和技术方法，指明了城市开发系统革命化变革的方向，已成为国际研究的热点。其他国家也提出并开展了一些理念相似的实践，例如英国的可持续城市排水系统（sustainable urban drainage systems）、加拿大的水平衡方法（water balance methodology）、澳大利亚的水敏感城市设计（water sensitive urban design）等。

我国从2013年年底开始实施建设海绵城市的国家战略，其核心内涵就是要践行城市低影响开发（LID）策略，特别要求要从源头控制雨水径流，强化雨水的自然积存、自然渗透和自然净化，提升水源涵养能力，缓解雨洪内涝压力，促进水资源循环利用，减少城市开发建设对自然生态环境的影响。我国还从2015年开始，考虑我国东、中、西的差异，南、北方的不同，先后分两批选择了30个城市作为海绵城市建设试点，涵盖了大、中、小不同规模的城市，试点面积近900平方千米，以期通过试点示范，形成可推广可复制的经验，推动我国海绵城市建设的健康有序发展，也为世界其他各国贡献中国城市建设与管理的模式和案例。

当前我国在LID理论、技术、产品、应用等方面的研究和实践热火朝天。在这种背景下，为借鉴国际经验，总结国内成果和经验教训，在相关政府部门的支持下，中国土木工程学会水工业分会（CCES CWIS）与美国土木工程学会环境与水资源分会（ASCE EWRI）联合众多本领域机构于2016年在中国北京国家会议中心举办了《2016国际城市低影响开发学术大会》。大会有逾千名LID学者、专家、政府官员和从业者参会，总共接收到中英文投稿800余篇（中国学者论文362篇，国际专家论文440篇），安排了248个口头专题演讲。作为大会的成果之一，在大会期间，国内外学者通过多次讨论和修改，大会还发布了

《城市低影响开发雨水管理——北京共识》(附后),可为推动世界城市的可持续降雨管理,以及促进我国海绵城市建设发挥重要作用。

本书的主要内容即为从本次学术大会的中文论文中筛选出了代表性成果,能够反映我国近年来海绵城市建设在各个方面的建设和管理实践,可以供国内外海绵城市建设和管理相关的专家、领导以及技术、管理人员学习和参考!

在此衷心感谢 2016 国际城市低影响开发(LID)学术大会的主办方、承办方、协办单位以及赞助单位的支持!感谢担任大会指导委员会、学术委员会、组织委员会主席和委员的各位前辈和同仁的大力支持与密切合作。

在本书编写过程中,虽已尽最大努力,但不足及疏漏之处仍难以避免,敬请专家、学者和有关部门同志批评指正。

编者

2017 年 6 月



第一篇 城市水文与水系统研究 / 001

- 1 基于国内外案例分析的快速城镇化与城市暴雨关联研究 / 002
- 2 1951~2014年北京城区降水变化分析 / 009
- 3 西北地区城市环境 LID 策略对绿地小气候影响初探 / 020
- 4 基于系统动力学和假设抽取法的天津市城市用水优化分析 / 026
- 5 长春市伊通河水系统综合解决方案研究 / 037
- 6 城市降雨径流控制 LID BMPs 及在中国的研究与实践 / 045
- 7 海绵城市建设中的气候变化适应关键问题分析 / 057

第二篇 降雨径流模拟分析与径流控制技术 / 063

- 1 生态滞留池模拟方式的研究 / 064
- 2 基于 SWMM 模型的厦门海绵城市建设规划研究 / 073
- 3 多情景下北京西郊蓄滞洪区的综合效益评估 / 079
- 4 城市径流控制 LID BMPs 规划方法及案例研究 / 089

第三篇 城市绿色-灰色基础设施耦合研究 / 103

- 1 基于软件模拟的城市建成区雨水管网与绿地系统协同优化设计研究 / 104
- 2 城市浅山区雨洪管理景观基础设施建设案例研究 / 113
- 3 基于低影响开发理念的花山生态新城水系布局优化 / 121
- 4 小城镇既有街区绿色水基础设施规划设计案例研究 / 126
- 5 长春空港示范区低影响开发 (LID) 设施规划研究 / 137
- 6 “灰色”与“绿色”雨水排放系统的技术经济比选案例研究 / 145
- 7 雨水贮集系统运用在供水与雨洪削减之可行性研究 / 155

第四篇 海绵城市与园林景观研究 / 165

- 1 山水城市 梦想人居——中国城市可持续发展探索 / 166
- 2 中国古典园林“坐雨观泉” 理法研究与解读 / 176

- 3 艺术与技术的结合——浅谈雨水花园 / 184
- 4 山地城市雨洪管理与精细化景观规划实践 / 190
- 5 海绵城市规划建设中的生态要素研究与应用探讨 / 198
- 6 基于 LID 理念的华中农业大学校园景观优化设计研究 / 205
- 7 基于 LID 的城市公园雨水利用案例研究 / 213
- 8 三维海绵体——安徽省池州市护城河遗址公园景观设计 / 219
- 9 沔西新城海绵城市建设中场地与种植设计实验与应用研究 / 229
- 10 LID 技术在城市绿道景观规划设计中的案例应用研究 / 238
- 11 基于 LID 的“绿色”城市道路规划断面研究与探讨 / 246

第五篇 海绵城市规划方法研究 / 259

- 1 基于综合指标体系的低影响开发设计方案评价 / 260
- 2 海绵城市理念在城市规划体系中的应用初探 / 268
- 3 基于低影响开发的山地城市规划探讨 / 273
- 4 以精细化为核心的中高强度山地城市低影响开发规划实践 / 281
- 5 以陕西省西咸新区为例探讨 LID 导向下的城市新区规划与管控体系 / 290
- 6 基于主体功能区划的海绵城市规划设计研究 / 298

第六篇 各种海绵型城市土地单元的研究和实践 / 303

- 1 海绵型生态停车场的设计、施工及养护案例分析 / 304
- 2 基于 LID 的绿色公路建设初探及案例分析 / 312
- 3 湿陷性黄土地区城市道路下凹绿地渗水模拟与影响分析 / 320
- 4 海绵型公园规划设计方法研究 / 328
- 5 基于沈阳东湖湿地公园案例分析的城市绿色海绵系统构建策略探究 / 342
- 6 基于唐山南湖生态城规划设计案例分析的采煤沉陷区与城市空间融合方法探索 / 355
- 7 LID 技术在生态校园改造中的应用案例研究 / 363
- 8 低影响开发技术在新校区规划中的应用 / 368
- 9 LID 策略在西北半干旱地区城市附属绿地更新规划设计方法中的研究 / 375
- 10 低影响开发技术在新城区小流域范围内的实际应用及其环境效应 / 389
- 11 基于 LID 的居住区雨水利用景观化案例研究 / 400
- 12 存量建筑屋顶绿化建设的技术难点与解决途径 / 409
- 13 “海绵型”城市绿地系统构建方法探讨 / 416

第七篇 海绵城市建设和管理策略 / 423

- 1 西部山地新城海绵城市建设指标及其分解研究 / 424
- 2 海绵城市构建中的低影响开发技术分类及应用策略 / 432

3	中国南北地区 LID 应用的研究与探索 / 439
4	安徽省海绵城市建设问题及路径探索 / 449
5	海绵城市建设 PPP 模式风险控制中政府作用的探讨 / 457
6	基于 PPP 的海绵城市投融资模式创新与关键点 / 463
7	海绵城市建设中黑臭水体治理的应用实例 / 472
8	超磁分离技术在海绵城市初期雨水治理中的应用研究 / 478
9	美国城市降雨径流控制法律体系变迁及对我国的借鉴 / 484
	2016 国际 LID 大会城市低影响开发雨水管理——北京共识 / 492



第一篇

城市水文与水系统研究

基于国内外案例分析的快速城镇化与城市暴雨关联研究

摘要：极端降水事件导致的严重灾害已经引起越来越多的关注，气候变化与极端降水之间的关系成为广泛关注的科学前沿问题之一。本文通过对比美国、欧洲、中国、巴西和印度的年际和年代际的暴雨雨量、雨日和雨强，来分析在不同城镇化发展速度国家的暴雨变化情况。结果表明，暴雨雨量、雨日和雨强在这五个国家和地区都呈现增加趋势，并且整体上在中国、巴西和印度的增加显著高于美国和欧洲。基于目前已有研究成果表明大气海洋等气候因子不能完全解释暴雨在这五个地区的增加趋势，因此，本文引入国民生产总值（GDP）、城市化率（UR）和黑炭气溶胶光学厚度（AOD）作为快速城镇化的表征因子，与五个国家和地区的暴雨雨量、雨日和雨强做相关和散点图，结果表明，在 GDP、UR 和 AOD 增长速率较快的中国、巴西和印度，暴雨雨量、雨日和雨强与 GDP、UR、AOD 的相关性明显高于美国和欧洲。因此，城镇化速率越快，越有可能触发暴雨的显著增加。

1.1 引言

全球气候变化背景下频发的极端强降水事件，给经济社会发展、生命安全和生态系统等诸多方面造成了巨大的危害，给受灾区域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，越来越受到学术与社会各界的关注^[1~3]。

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^[4,5]，其中对流性降水的增多大于层状降水^[6]。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^[7]。IPCC 第五次报告中指出，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^[8]。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）^[4,9]，且温带地区的增加具有一致性，而热带地区年际变异较大^[10]。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^[11]。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当前和未来均呈现增加趋势，且未来极端降水增加的比例更大^[12]。利用 WRF 模式模拟发现，在化石燃料密集排放的情况下，美国东部地区的年极端强降水要比目前状况严重得多，相比正常情况下大约增加了 107.3mm^[13]。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^[14]。需要特别指出强调的是，在对比模式结果与观测结果后，发现气候变暖背景下暴雨的实际增加量大于模式结果^[11,15]。

从中国来看,全国尺度上的总降水量变化趋势不明显,但暴雨强度在增强^[16~18],遭受异常强降水事件的地区也在增加^[19,20]。长江流域降水增加主要是由降水强度加大且极端强降水事件增多导致的^[21,22];华南近年来暴雨雨量与雨日均呈显著升高趋势^[23,24]。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。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的极端强降水^[25]。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1倍,进而导致雷暴天气显著增加,强降水事件增强^[26]。从人类贡献的认识上来看,在观测方面,人类贡献造成全球陆地强降水总量、频率和强度增加,具有中等信度(中等证据,中等一致性)。在模式模拟方面,相比CMIP3模式,CMIP5模式在模拟极端天气事件方面有了明显改善。虽然目前CMIP5中的地球系统模式对极端天气事件有一定的模拟能力,但一般模拟效果较差,尤其是对极端强降水的模拟效果更不理想。且模拟结果表明:21世纪前期全球许多陆地强降水总量、频率和强度可能增加(66%~100%);21世纪后期绝大部分中纬度陆地区域和潮湿热带地区很可能增加(90%~100%)。整体而言,由于证据有限,地球系统模式的一致性低,加之缺乏物理认识,因此,在人类对气候变化贡献认识方面具有低信度。

综上所述,区域年际和年代际暴雨的变化,既与温度的变暖不一致,也不能用大气和海洋主导的气候因子合理解释,且模式模拟极端降雨能力还很有限。因此,本文针对美国、欧洲、中国、印度和巴西五个国家和地区的暴雨分别进行统计分析,并加以对比,以此分析以快速城市化为标志的人类活动对区域暴雨变化的可能影响,从而为暴雨导致的城市内涝风险管理提供参考。

1.2 数据和方法

1.2.1 研究区介绍

本文的研究区选取了不同GDP增长速率、不同城镇化发展速率和不同排放的五个国家和地区,包括欧洲、美国(不包括阿拉斯加地区)、中国、印度和巴西。这五个地区是世界上发达国家和发展中国家的典型代表,并且国土面积大,分布范围广,人口众多,也是世界经济发展最快速的地区,具有十分重要的研究意义。

1.2.2 数据来源

本文所用降水数据来自1981~2010年欧洲中期天气预报中心(ECMWF)提供的ERA-Interim 6h再分析网格数据;GDP数据来自世界银行的世界发展指标(World Development Indicators)(<http://data.worldbank.org/indicator/NY.GDP.MKTP.CD>),单位为亿美元;城镇化率数据来自联合国的《世界城市化展望》(<http://esa.un.org/Unpd/Wup/>),单位为1%;黑炭气溶胶光学厚度(AOD)数据来自美国航空航天局哥达德太空飞行中心(NASA Goddard Space Flight Center)的模式数据,单位为无量纲的正值。

1.2.3 计算方法

降水数据的处理过程如下:首先,将6h再分析网格数据处理成日值数据;其次,根据国际上通用的95%分位数的方法计算各格点的阈值,超过阈值即为一个暴雨雨日;分别计

算了 1981~2010 年逐年的和 1981~1990 年、1991~2000 年、2001~2010 年 3 个年代内的每个格点的暴雨雨量 (HRA_i) 和暴雨雨日 (HRD_i) 的总和以及平均暴雨雨强 (HRI_i), 年代暴雨具体按式(1-1-1)~式(1-1-3) 分别计算。

$$HRA_i = \sum_{j=1}^{10} hra_{1980+10i+j} \quad (1-1-1)$$

$$HRD_i = \sum_{j=1}^{10} hrd_{1980+10i+j} \quad (1-1-2)$$

$$HRI_i = \sum_{j=1}^{10} hra_{1980+10i+j} / \sum_{j=1}^{10} hrd_{1980+10i+j} \quad (1-1-3)$$

式中, HRA_i 为某格点研究时段内的第 i 个年代中的暴雨雨量总和; $hra_{1980+10i+j}$ 为某格点研究时段内的第 i 个年代中第 j 年的暴雨雨量总和; HRD_i 为某格点研究时段内的第 i 个十年内的暴雨雨日总和; $hrd_{1980+10i+j}$ 为某格点研究时段内的第 i 个年代中第 j 年的暴雨雨日总和; HRI_i 为某格点研究时段内的第 i 个十年内的暴雨雨强; i 为研究时段内的年代数 ($i=1, 2, 3$); j 为研究时段内的年序 ($j=1, 2, 3, \dots, 10$)。

1.3 结果与分析

1.3.1 年际和年代际暴雨变化

在暴雨雨量方面, 美国、欧洲、中国、巴西、印度的年际和年代际暴雨雨量呈现持续增加的趋势 [书后彩图 1-1-1(a)、(d)]。从年际变化来看, 1981~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨量年均增长分别为 815mm、2449mm、4229mm、6353mm 和 30798mm; 年均增长率分别为 0.47%、1.53%、2.46%、2.57% 和 5.57%。从年代际变化来看, 从 1981~1990 年到 2001~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨量年代平均增长分别为 1.08×10^5 mm、 2.11×10^5 mm、 2.65×10^5 mm、 5.75×10^5 mm 和 22.11×10^5 mm; 年代平均增长率分别为 6.59%、13.92%、17.48%、25.55% 和 54.27% (表 1-1-1)。在暴雨雨日方面, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的年际和年代际暴雨雨日呈现持续增加的趋势 [书后彩图 1-1-1(b)、(e)]。从年际变化来看, 1981~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨日年均增长分别为 10d、13d、11d、87d 和 346d; 年均增长率分别为 0.40%、0.57%、0.46%、2.24% 和 4.70%。从年代际变化来看, 从 1981~1990 年到 2001~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨日年代平均增长分别为 1.27×10^3 d、 2.30×10^3 d、 0.92×10^3 d、 7.52×10^3 d 和 24.59×10^3 d; 年代平均增长率分别为 5.25%、9.48%、4.13%、20.99% 和 43.01% (表 1-1-1)。在暴雨雨强方面, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的年际和年代际暴雨雨强呈现持续增加的趋势 [书后彩图 1-1-1(c)、(f)]。从年际变化来看, 1981~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨强年均增长分别为 0.04mm/d、0.27mm/d、1.47mm/d、0.20mm/d 和 0.61mm/d; 年均增长率分别为 0.06%、0.43%、1.99%、0.32% 和 0.83%。从年代际变化来看, 从 1981~1990 年到 2001~2010 年, 美国、欧洲、中国、巴西和印度的暴雨雨强年代平均增长分别为 0.86mm/d、3.18mm/d、8.65mm/d、2.34mm/d 和 5.40mm/d; 年代平均增长率分别为 1.26%、5.11%、12.76%、3.73% 和 7.65% (表 1-1-1)。

表1-1-1 美国、欧洲、中国、巴西、印度年际和年代际暴雨

年份		1981	2010	1981~1990	2001~2010
地区暴雨					
暴雨雨量/mm	美国	1.64×10^5	1.88×10^5	1.60×10^6	1.81×10^6
	欧洲	1.29×10^5	1.99×10^5	1.42×10^6	1.84×10^6
	中国	1.20×10^5	2.42×10^5	1.40×10^6	1.93×10^6
	巴西	1.70×10^5	3.54×10^5	2.00×10^6	3.15×10^6
	印度	2.34×10^5	11.27×10^5	3.20×10^6	7.63×10^6
暴雨雨日/d	美国	2.43×10^3	2.73×10^3	2.37×10^4	2.62×10^4
	欧洲	2.16×10^3	2.55×10^3	2.31×10^4	2.77×10^4
	中国	2.17×10^3	2.48×10^3	2.19×10^4	2.37×10^4
	巴西	2.80×10^3	5.33×10^3	3.24×10^4	4.75×10^4
	印度	3.60×10^3	13.65×10^3	4.70×10^4	9.62×10^4
暴雨雨强/(mm/d)	美国	67.56	68.78	67.44	66.97
	欧洲	59.59	67.53	60.61	66.97
	中国	55.20	97.77	63.76	81.07
	巴西	60.52	66.40	61.55	66.23
	印度	64.98	82.57	67.92	78.72

1.3.2 暴雨与城镇化因子相关性

暴雨不仅受到诸多大气和海洋因子的影响，剧烈的人类活动也越来越显著地影响着降雨，尤其是极端降水过程。对此我们选取了国民生产总值（GDP）、城市化率（UR）和黑炭气溶胶光学厚度（AOD）来作为城镇化的因子。在GDP增长速率方面，美国、欧洲、中国、巴西和印度的GDP由1981年的 31.04×10^3 亿美元、 33.62×10^3 亿美元、 1.95×10^3 亿美元、 2.64×10^3 亿美元和 1.97×10^3 亿美元增加到2010年的 144.47×10^3 亿美元、 161.49×10^3 亿美元、 59.31×10^3 亿美元、 21.43×10^3 亿美元和 16.84×10^3 亿美元；1981~2010年GDP的年均增长率分别为5.45%、5.56%、12.51%、7.49%和7.68%。可见，中国、巴西、印度的GDP年均增长率显著高于美国和欧洲。在UR增长速率方面，美国、欧洲、中国、巴西和印度的UR由1981年的73.86%、88.04%、20.53%、68.18%和23.34%增加到2010年的82.30%、90.10%、49.87%、86.50%和30.10%；1981~2010年UR的年均增长分别为0.29%、0.07%、1.01%、0.63%和0.23%；年均增长率分别为0.37%、0.08%、3.11%、0.82%和0.88%。可见，中国、巴西、印度的UR年均增长率显著高于美国和欧洲。在AOD增长速率方面，美国、欧洲、中国、巴西和印度的AOD由1981年的1.51%、0.26%、8.97%、3.43%和7.55%增加到2010年的2.03%、0.43%、14.23%、6.35%和12.29%；1981~2010年AOD的年均增长分别为0.02%、0.01%、0.18%、0.10%和0.16%；年均增长率分别为1.02%、1.71%、1.60%、2.14%和1.69%。综上所述，总体上城镇化因子的增长速率在中国、巴西、印度要高于美国和欧洲。

为了验证快速城镇化因子与暴雨的关系，用1981~2010年逐年的GDP、UR、AOD与暴雨雨量、暴雨雨日和暴雨雨强分别做相关（表1-1-2）和散点图（书后彩图1-1-2）。从表1-1-2可以看出，在上述城市化因子增长速率较快的中国、巴西和印度的相关系数要显著高于美国和欧洲。并且中国、巴西、印度的相关系数均通过了0.01的显著性水平检验。从图1-1-2（不同的颜色代表不同的年代，不同的形状代表不同的国家）可以看出，中国、巴西

和印度相比美国和欧洲的散点图在不同年代呈现显著线性关系。可见在 GDP、UR、AOD 增长速率较快的中国、巴西和印度，城镇化因子与暴雨的关系要优于美国和欧洲。

表1-1-2 美国、欧洲、中国、印度、巴西年际暴雨与 GDP、UR、AOD 的相关系数($n = 30$)

地区 城镇化因子	暴雨雨量					暴雨雨日					暴雨雨强				
	美国	欧洲	中国	巴西	印度	美国	欧洲	中国	巴西	印度	美国	欧洲	中国	巴西	印度
GDP	0.39 ^①	0.46 ^①	0.88 ^②	0.76 ^②	0.96 ^②	0.33	0.46 ^①	0.91 ^②	0.75 ^②	0.95 ^②	0.45 ^①	0.46 ^①	0.83 ^②	0.63 ^②	0.89 ^②
UR	0.43 ^①	0.38 ^①	0.93 ^②	0.81 ^②	0.92 ^②	0.36 ^①	0.47 ^②	0.97 ^②	0.78 ^②	0.93 ^②	0.46 ^①	0.42 ^①	0.89 ^②	0.72 ^②	0.97 ^②
AOD	0.46 ^①	0.39 ^①	0.94 ^②	0.83 ^②	0.91 ^②	0.42 ^①	0.43 ^①	0.94 ^②	0.81 ^②	0.91 ^②	0.34	0.45 ^①	0.92 ^②	0.73 ^②	0.96 ^②

① 表示通过 0.05 显著性水平。

② 表示通过 0.01 显著性水平。

1.4 结论和讨论

1.4.1 结论

① 在美国和欧洲，暴雨雨量年均增长率分别为 0.47%、1.53%，年代平均增长率分别为 6.59%、13.92%。而中国、巴西和印度暴雨雨量年均增长率分别为 2.46%、2.57%和 5.57%，年代平均增长率分别为 17.48%、25.55%和 54.27%。暴雨雨日、雨强与暴雨雨量类似，在美国、欧洲、中国、巴西和印度均呈现增加趋势；并且整体上暴雨雨量和雨强在中国、巴西和印度的增加显著高于美国和欧洲。

② 根据 IPCC AR5 和目前已有研究，大气和海洋主导的气候因子不能完全合理地解释暴雨增加的原因。因为暴雨增加除了受到海气因子的作用外，人类活动也极可能是重要的触发因素。基于此，我们分析了 GDP、UR、AOD 为代表的快速城镇化因子与暴雨的相关性。结果表明，在城镇化因子发展速率较快的中国、巴西和印度，暴雨雨量、雨日、雨强与 GDP、UR、AOD 的相关性明显高于美国和欧洲，说明城镇化速率越快，越有可能触发暴雨的显著增加。

1.4.2 讨论

1981 年以来，随着全球总人口的不断增长，城镇人口数量也迅速增加，城市化率不断提高。城镇人口的增加使得对三大产业的需求增加，极大地改变了下垫面的土地利用格局；同时，随着城镇人口的增加，城镇人口居住与活动也会增加污染物的排放。污染物的大量排放和下垫面性质的改变均与人类的社会经济活动密切相关。污染物作为凝结核，是成云致雨的必要条件；下垫面性质的改变会导致地气交互作用的变化。因此，污染物的大量排放和下垫面性质的改变，极有可能与全球和区域的年际和年代际暴雨的变化具有密切相关性。因此，本文选取了 GDP、UR 和 AOD 作为快速城镇化的表征因子。此外，为了进一步证实快速城镇化触发了大面积暴雨的显著增加，深化区域与全球暴雨增加归因的研究是迫切需要的。

1) 模式模拟验证 在对区域大气可降水量、水汽通量及其他诸多大气、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,以进一步揭示暴雨显著增加机理和时空变化特征。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变化的稳健信号;另一方面,通过模拟加深对人类活动影响暴雨的热力、动力、云物理等过程的科学理解。

2) 大尺度区域对比 年际和年代际暴雨的增加是区域性现象,还是全球性现象?我们的研究初步表明,虽然全球暴雨的增加是一个普遍现象,如在城市化发展速度较慢的欧洲和美国暴雨也在增加,但是在城市化发展速度较快的中国、巴西和印度,暴雨的显著增加幅度远比欧美大。那么全球其他地区的暴雨增加具体表现如何?2015年全球已有54%的人口居住在城镇,预计到2020年,非洲和亚洲将分别有56%和64%的人口居住在城镇。这些地区暴雨变化的区域差异是否也是人类社会经济活动因素与自然气候因素共同作用所造成的,是以人文因素为主,还是以自然因子为主?这仍然需要从全球和区域尺度上开展更深入的观测诊断分析和模拟研究,并需要从机理上进一步探讨。

参 考 文 献

- [1] 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*, 2006, 111 (D5).
- [2] 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 (1): 71-95.
- [3] 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.
- [4] Managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation: special report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge University Press, 2012.
- [5] Benestad R E, Nychka D, Mearns L O. Spatially and temporally consistent prediction of heavy precipitation from mean values [J]. *Nature Climate Change*, 2012, 2 (7): 544-547.
- [6] 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.
- [7] 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.
- [8] IPCC AR5, Intergovernmental Panel on Climate Change Climate Change Fifth Assessment Report (AR5) [R]. Cambridge: Cambridge University Press, UK. 2013.
- [9] Allen M R, Ingram W J. Constraints on future changes in climate and the hydrologic cycle [J]. *Nature*, 2002, 419 (6903): 224-232.
- [10] O' Gorman P A. Sensitivity of tropical precipitation extremes to climate change [J]. *Nature Geoscience*, 2012, 5 (10): 697-700.
- [11] Min S K, Zhang X, Zwiers F W, et al. Human contribution to more-intense precipitation extremes [J]. *Nature*, 2011, 470 (7334): 378-381.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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): 57-78.
- [15] Allan R P, Soden B J. Atmospheric warming and the amplification of precipitation extremes [J]. *Science*, 2008, 321 (5895): 1481-1484.

- [16] Zhai P, Sun A, Ren F, et al. Changes of climate extremes in China [M] //Weather and Climate Extremes. Springer Netherlands, 1999: 203-218.
- [17] Zhai P, Zhang X, 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.
- [18] Qian W, Fu J, Zhang W, et al. Changes in mean climate and extreme climate in China during the last 40 years [J]. Advances in Earth Science, 2007, 7: 006.
- [19] Zhang X, Zwiers F W, Hegerl G C, et al. Detection of human influence on twentieth-century precipitation trends [J]. Nature, 2007, 448 (7152): 461-465.
- [20] Guo J, Deng M, Fan J, et al. Precipitation and air pollution at mountain and plain stations in northern China: Insights gained from observations and modeling [J]. Journal of Geophysical Research: Atmospheres, 2014, 119 (8): 4793-4807.
- [21] Li T, Luo J J. Projection of future precipitation change over China with a high-resolution global atmospheric model [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2011, 28 (2): 464-476.
- [22] Fu G, Yu J, Yu X, et al. Temporal variation of extreme rainfall events in China, 1961-2009 [J]. Journal of Hydrology, 2013, 487: 48-59.
- [23] Wang Y, 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 (9).
- [24] Yu R, Li J. Hourly rainfall changes in response to surface air temperature over eastern contiguous China [J]. Journal of Climate, 2012, 25 (19): 6851-6861.
- [25] Zhang Y, Xu Y, Dong W, 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).
- [26] Li Z, Niu F, Fan J, et al. Long-term impacts of aerosols on the vertical development of clouds and precipitation [J]. Nature Geoscience, 2011, 4 (12): 888-894.

◎ 作者介绍

孔锋^{1,2,3*}, 方建⁴, 吕丽莉¹

¹. 中国气象局发展研究中心, E-mail: kongfeng0824@qq.com

². 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室

³. 民政部/教育部减灾与应急管理研究院

⁴. 武汉大学资源与环境科学学院