



水利水电国际资讯摘要

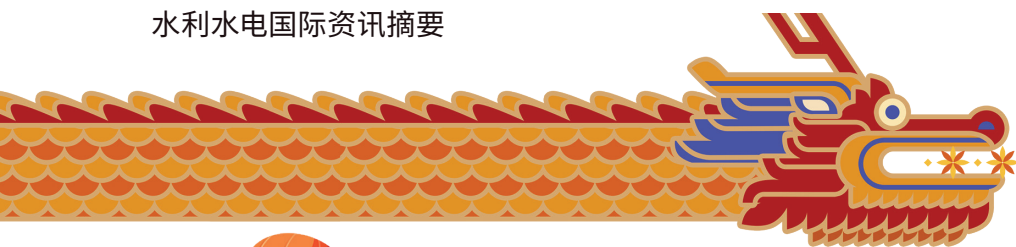
IWHR International Digest

中国水利水电科学研究院 主编: 孟志敏 责编: 孟圆 刘一帆 李文洋

2024
1
总346期

证据表明1985年以来全球洪涝区快速城市化





2024新年寄语

时光交错间,新春序章将启。值此新春佳节之际,《水利水电国际资讯摘要》编辑组向各位领导、专家和同事送上诚挚祝福,衷心感谢您对摘要的指导、陪伴和支持!

2023年,世界各国亲历气候变化带来的深刻影响,极端高温、暴雨、洪水、山火、地震等灾害多地频发。与此同时,百年变局持续演变,合作与共识在矛盾、冲突和不确定性中艰难求索。中国坚持引领和平发展、倡导践行多边主义,汇聚世界有识之士齐聚第三届“一带一路”国际合作高峰论坛,为全球繁荣与发展注入蓬勃动力。

2023年,也是中国全面贯彻党的二十大精神开局之年。“数字火炬手”点亮杭州亚运,“神舟”飞天再探穹宇,白鹤滩水电站获评“2023全球十大工程成就”,中国4项工程入选世界灌溉工程遗产名录……

2023年,中国水利深入贯彻习近平总书记“节水优先、空间均衡、系统治理、两手发力”的治水思路。从华北地区地下水超采治理获显著成效,到《黄河保护法》的正式实施,海河流域性特大洪水防御取得重大阶段性成果,再到联合国水大会、第18届世界水资源大会上传播中国治水智慧,水利成就不断呈现新亮点。

2023年,摘要共刊登50篇前沿科技文章,着眼全球涉水领域新动态,围绕我国新阶段水利事业高质量发展需求,分享行业报告、政策文件、最新研究、项目案例等多类内容。

展望2024年,我们将初心依旧,持续不断追踪国内外水利热点资讯,力求提供更高质量、更深更广的精品内容,期待继续获得您的指导和关注!

甲辰龙年到,摘要编辑组恭祝您和家人新年万事兴“龙”,平安顺遂!

摘要编辑组



证据表明1985年以来全球洪涝区快速城市化

洪涝灾害给人类社会造成的损失不断增加,越来越多的证据表明,气候变化正在推高极端自然灾害的发生概率。然而,事实证明,将气候变化作为一种外来力量,使灾害不受地方和国家政府的影响,在政治上也是一种权宜之计。然而,由地方决定的城市化和空间发展模式是人们面临气候冲击并易受其影响的关键因素。

本研究利用高分辨率的年度数据显示,自1985年以来,世界各地的人类居住区,从村庄到特大城市,都在不断迅速扩展到今天的洪涝区。在许多地区,最危险洪水区的城市化扩张速度远远超过了非暴露区的增长速度,特别是在东亚,高危居住区的扩张速度比洪水安全居住区甚至快了60%。这些结果系统地证明了各国洪灾风险的差异。许多国家非但没有及时将采取措施减少洪灾风险程度,反而任由日益频繁的气候冲击风险不断加大。

随着城市外围地区的人口迁移到城市寻找经济机会,全球范围内的城市化规模正在迅速发展。城市化和经济发展历来是相辅相成的,因为城市能够实现集聚经济效应,例如,实现为雇主与求职者、卖方与买方、资本与项目牵线搭桥,以及支持公共交通系统等生产性基础设施等。

然而,城市的快速发展也会引发拥堵效应,例如,增加自然灾害的风险以及对公共服务和基础设施造成的压力。这一点在低收入和中等收入国家尤为重要,这些国家缺乏根据风险进行城市和基础设施规划的能力,也缺乏投资交通和保护基础设施的资源。此外,安全的防洪空间不断被挤占,由此造成的土地稀缺会促使新的开发项目不成比例地进入以前避免开发的区域,包括河床和洪泛区(图1)。尽管城市化快速增长趋势与洪涝灾害之间的相互作用日益增强,但缺乏高分辨率的洪涝灾害风险地图和年度建筑区足迹数据一直是限制全球洪涝暴露趋势系统分析的关键因素。此前,借助历史洪水事件记录(如EM-DAT),

研究估算出了国家级别的洪涝灾害暴露指标。然而,由于缺乏有关洪涝灾害和人口空间分布的信息,也就无法准确评估持续演变的城市形态,从而使洪涝风险难以在不同时间尺度上进行比较。一项基于2000年至2018年卫星图像的研究为分析受洪水影响的人口增长情况提供了重要数据支撑⁷。虽然这些图像可以检测到许多过去发生的洪水事件,但它并不能揭示所有人类居住区的空间扩展和暴露模式。

由于数据的局限性,过去的研究仅侧重于某些类型的洪水,而非涵盖了全部类型洪(即河洪、冲积洪和沿海洪水等)的综合风险。还有一些研究只评估了部分国家的洪水风险,却未能覆盖全球的情况。同样,使用空间分辨率相对较低的洪水灾害数据进行的研究往往不能准确地反映主要洪泛区的情况,从而低估了受灾风险。

相比之下,这项研究首先通过考虑年尺度下的洪水暴露趋势,强调了持续监测不断变化的洪水暴露的重要性。其次,它区分了洪水暴露与洪

水安全空间发展的增长动态,记录了洪水暴露的分化,即随着城市化的发展,洪水暴露或增加或减少。第三,本报告不是聚焦某一种洪水类型,而是将不同的洪水类型结合起来,对总体洪水风险进行评估。第四,通过使用高分辨率的全球数据集,它采用统一的口径并以覆盖到全球的视角记录了发展趋势。最后,通过分解估算城市化和洪水暴露的空间趋势,它为政策制定者提供了详细科学的论据支撑,以确定预防、减少和防备风险措施的优先次序。

在全球范围内,洪水易发地区的城市化进程加速

本研究表明,2015年,全球至少有11.3%的建成区面临高度或极高度的洪水灾害风险,即淹没深度在100年一遇的洪水事件中至少达到50厘米(数据表1)。撒哈拉以南非洲(4.6%)和北美(4.5%)的洪灾风险最低,东亚和太平洋地区(18.4%)的洪灾风险最高。总体而言,全球各地区和收入群体的普遍面临很高的洪灾风险。

1985年至2015年间,全球建成居民区面积增长了85%,从69.3万平方公里增至超128万平方公里。与此同时,位于洪水安全

区的居住区比例下降了1.9个百分点,而位于高风险区的比例则有所上升。2015年,所有20%的居住区位于中等或更高洪水风险区,高于1985年的17.9%。位于最高洪灾风险等级的比例增长最大,从4.3%增至5.2%。在1985年以来建成的土地中,超过3.65万平方公里的土地在严重洪灾期间的淹没深度超过1.5米--相当于伦敦大都会地区面积的23倍,7.64万平方公里的土地暴露在0.5米以上的淹没风险中。

洪水灾害高发区的居住区扩张速度超过了洪水安全区的增长速度。尽管全球居住区的总面积增长了85.4%,但洪水灾害风险高的居住区却增长了105.8%,而受到最高洪涝风险水平影响的建筑区增长了121.6%(图2b)。逐年增长的估算证实,自

20世纪90年代初以来,承受洪水灾害风险等级最高的居住区每年增长近3%,一直超过洪水安全区的增长速度(图2c)。2007-2010年的居住区扩张放缓与全球经济衰的节奏退相吻合。

无论考虑哪种洪水类型,受洪涝暴露的建筑区增长速度都超过了洪涝安全区域的增长,而沿海洪水风险的增长速度最快(图2d-f)。

东亚地区洪灾风险增幅最为显著城市化和洪灾风险动态在各地区之间存在明显差异。东亚和太平洋地区尤为突出,该地区的洪水风险增幅最高、城市增长率最高以及居住区所占比例最大。

1985年至2015年期间,“无洪水灾害风险”的居住区扩大了100%,而“洪水灾害风险极高”的居住区扩大了160%(图3a)。

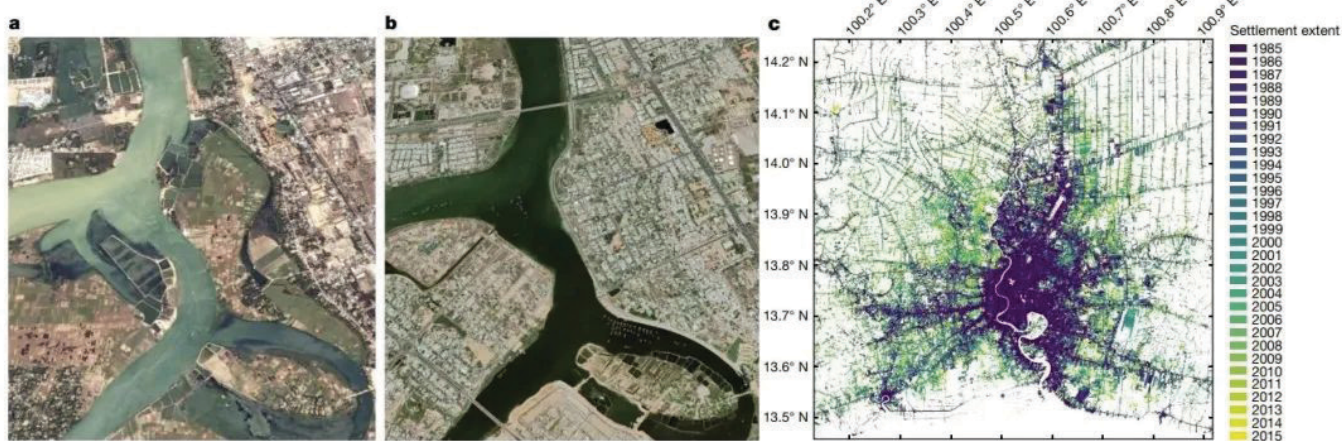
在拉丁美洲和加勒比地区、欧洲和中亚以及东亚和太平洋地区,洪水暴露区的增长超过了非洪水暴露区的增长,而在撒哈拉以南非洲地区、北美洲以及中东和北非地区,情况恰恰相反(图3a)。在北美洲,洪灾安全住区扩大了75%,而在洪灾风险最严重地区,这一比例仅为49%。然而,即使在这些地区,洪水高危区的居住区也在不断扩大,使越来越多的人和资产面临威胁。

按区域年度增长率分列的数据显示,居住区的扩大在根据时间和地区产生波动,介于1%到4%之间(数据图2),考虑是由包括经济基本面在内的一系列因素驱动的。

洪灾风险的差异越来越大

国家收入分组进一步阐明了城市化和洪水灾害模式(图3b)。自1985年以来,在最高危害区建造的3.65万平方公里的居住区中,1.1%位于低收入国家(LICs),20.5%位于中低收入国家(LMICs),60.8%位于中上收入国家(UMICs),17.6%位于高收入国家(HICs)。

自1985年以来,中等收入国家的城市发展速度最快,2015年,在全球14.46万平方公里的建成



a,b, 2002 年(a)和 2021 年(b)越南广南地区的卫星图像(来源:谷歌地球, Maxar Technologies)。
c, 1985 年至 2015 年泰国曼谷地区居住足迹(资料来源:德国航空和航天中心)。

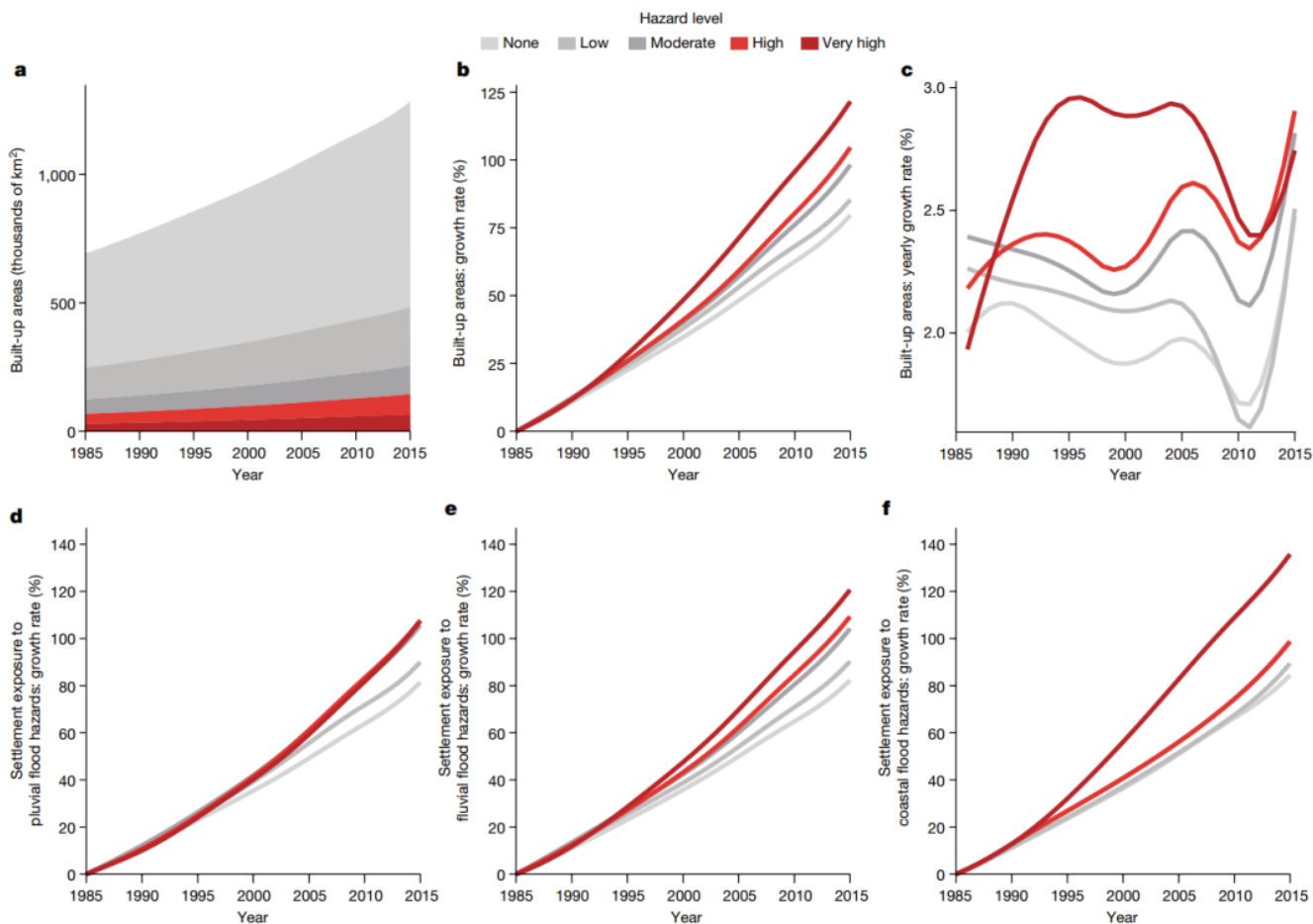


图 2 | 全球定居点增长最快的地区是洪灾最严重的地区。图像显示了在不同的洪水灾害综合等级下,全球定居点扩张的绝对值(a)、1985年至 2015 年的增长百分比(b)和同比增长率(c)。图像 d-f 将综合洪水灾害细分为冲积洪水(d)、河流洪水(e)和沿海洪水(e)。洪水(f)。风险等级是根据百年一遇洪水的估计淹没深度来定义的:无(洪水深度为 0 厘米)、低(洪水深度为15 厘米以下)、中(洪水深度为 50厘米以下)、高(洪水深度为150厘米以下)。很高(150 厘米以上)。

区中, 72%位于高洪水风险区。平均而言, 洪水高风险区的增长速度远远超过洪水安全区的增长速度(图 3b)。在低收入和中等收入国家, 自1985年以来, 最高风险区内的居住面积扩大了132%, 而总体居住面积增长率为86%。这些在高风险地区不断扩张的居住区进一步增加了洪水风险, 以及未来可能造成的损失, 同时也加大了防洪投资需求。中上收入国家在中高风险区域内的建筑区比其他任何组别都要多。自1985年以来, 这些地区的居住区面积增长了184%, 几乎是洪涝安全区域增长速度的两倍(96%)。

相比之下, 低收入和中等收入国家自 1985 年以来的居住区面积增长幅度不大。洪水安全区(87%)和高危或极高危地区(77%)的增长差异没有中等收入国家那么明显。平均而言, 高风险地区的居住区增长速度并没有超过洪水安全区的增长速度, 尽管随着经济增长和城市化进程的加快, 这一趋势有可能在未来发生逆转。

高收入国家的居住区面积扩张速度最慢(62%), 与相对较慢的经济增长和人口增长率相一致。实则许多高收入国家在 1985 年前就已经经

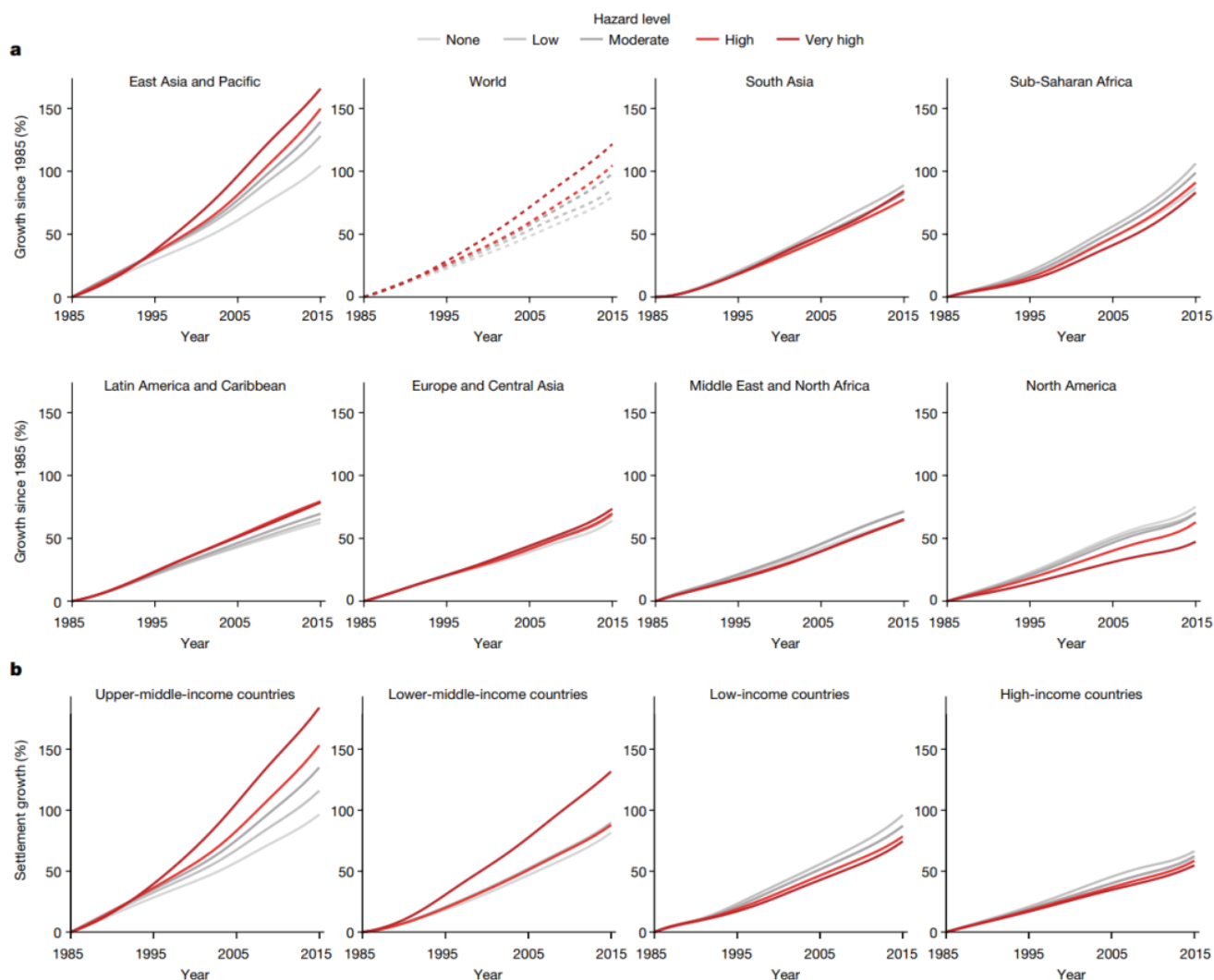


图 3 | 按灾害等级划分的居住区增长情况。图表显示了世界不同地区(a) 和不同收入组别(b) 在不同洪灾综合等级下居住区扩张的演变情况。图表从最快到最慢的高危害增长排序。

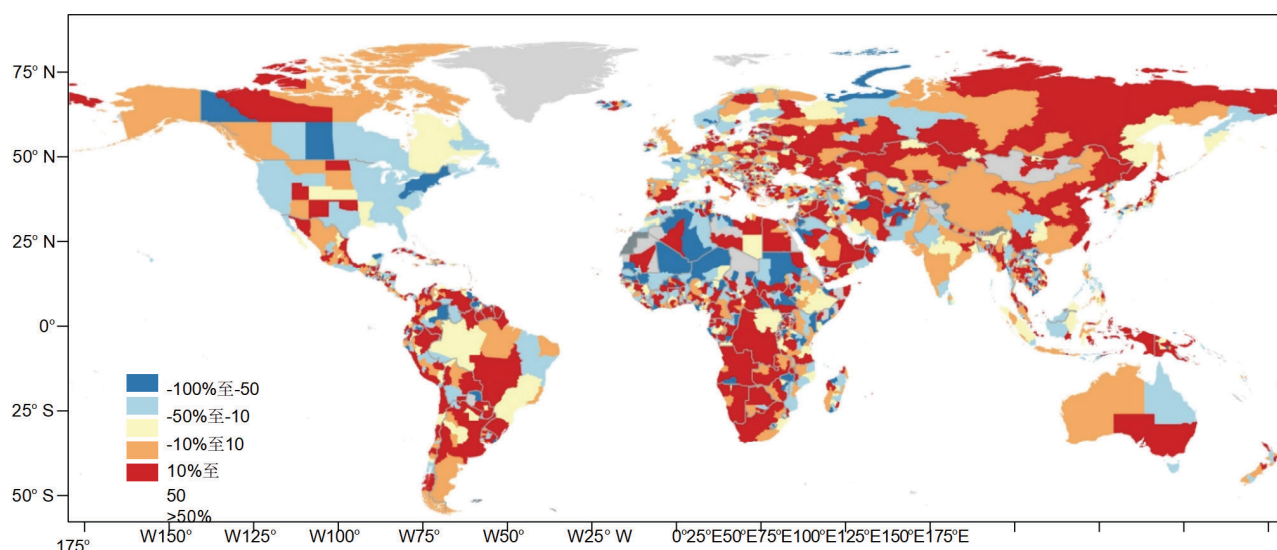


图 4 | 洪水安全区与洪水暴露区的增长:1985-2015 年间位于安全区与高风险区的居住区增长的相对差异。在红色区域,位于洪水暴露居住区的比例正在增加,即洪水高危地区的居住区比洪水安全地区的居住区至少扩大了 50%。在蓝色区域,洪水风险正在降低。

历了城市快速扩张期。平均而言,洪水安全区的城市增长速度快于高风险区(图 3b)。

总体而言,以上结果表明,不同国家面临的洪水灾害风险存在差异。虽然部分国家的洪水安全增长依然占主导地位,但仍有一些国家所面临的洪水相对风险持续攀升。根据次国家分列的结果显示,各地区国家内部也存在这种差异(图 4)。

中等收入国家洪灾风险的大幅增加的主要原因是中国城市化进程的加速。1985年至2015年间,中国的建成区面积增长了165%,其中位于洪灾风险最高的居住区面积增长了223%。针对具体国家的研究已经记录了这一趋势,尤其是在东北部和沿海地区的主要大都市周围,洪水风险暴增,洪水造成的损害急剧上升。

由于中国的居住区面积超过了任何其他国家,因此对中等收入国家和东亚及太平洋地区的趋势都有重大影响。在全球 7.64 万平方公里的新建高风险居住区中,中国占了 46%。越南和孟加拉国分别是洪水灾害风险等级最高的低收入和中等收入国家,此两国在高风险区的居住区面积也占比很大。

尽管在过去 30 年中,这些国家的发展相对缓慢,但洪水安全问题却没有受到影响,包括日本、

美国、荷兰等许多面临高危风险的国家在 1985 年前就已经在高危洪水区建有大片居住区,并投入巨资对其进行保护。在荷兰,海堤可以抵御高达一万年一遇的风暴潮。然而,即使在高收入国家,许多居住区也没有针对本研究中考虑的 100 年一遇洪水灾害提供保护。近期在美国、英国和德国发生的灾害表明,洪水在未来对生命、生计和财产将构成持续的挑战。

研究结果还发现一些较小的国家面临不成比例的高洪水风险。在四分之三的国家中,估计高危居住区占总居住区的比例不超过 4%,但在一些国家中,风险比例要高得多。图 5 列出了洪水风险居住区占比最高的 20 个国家。在荷兰,超过 35% 的居住区位于高水文和高程风险区域,尽管部分风险已通过先进的(但并非绝对可靠的)保护基础设施得到缓解。但大多数低收入国家和中等收入国家的情况并非如此,如老挝(34%)和越南(25.4%),在这些国家,许多居住区处于高度洪水风险区域中,却不具备强有力的防护系统,因此洪水风险较高。在那些居住区集中在河谷和盆地地区(如不丹、埃及和孟加拉国)以及沿海地区(如斐济和越南)的国家,洪水风险尤为突出。

气候变持续下的城市化

气候变化迫使各国适应日益加剧的自然灾害。然而,事实证明,跟踪各国在适应气候变化方面取得的成功并非易事,甚至具有误导性。除了不断变化的气候本身,人们遭受气候灾害的程度还取决于当地的空间发展选择。人口和经济增长伴随着人口从农村向城市地区的迁移,导致城市扩张,新的社区和工业园区如雨后春笋般出现,而这些地方往往位于洪涝区。此外,人们对气候冲击的脆弱性是由社会、经济、制度和历史等复杂因素决定的。

这项研究记录了各国在洪水灾害风险方面的差异。许多国家非但没有积极适应气候灾害的影响,反而通过城市化扩张变相增大了影响的范围。虽然高收入国家相对来说较少受到洪水的影响,但中等收入国家受洪水影响的增长速度却特别快,低收入国家未来可能也会面临同样的风险。这些趋势表明了一系列导致城市化增加洪涝暴露的潜在因素,包括土地稀缺、社会经济趋势以及机构和监管因素等。

如果城市规划能优先考虑最大程度利用洪水安全地区,尽量避免扩张到洪水风险区域,就能有

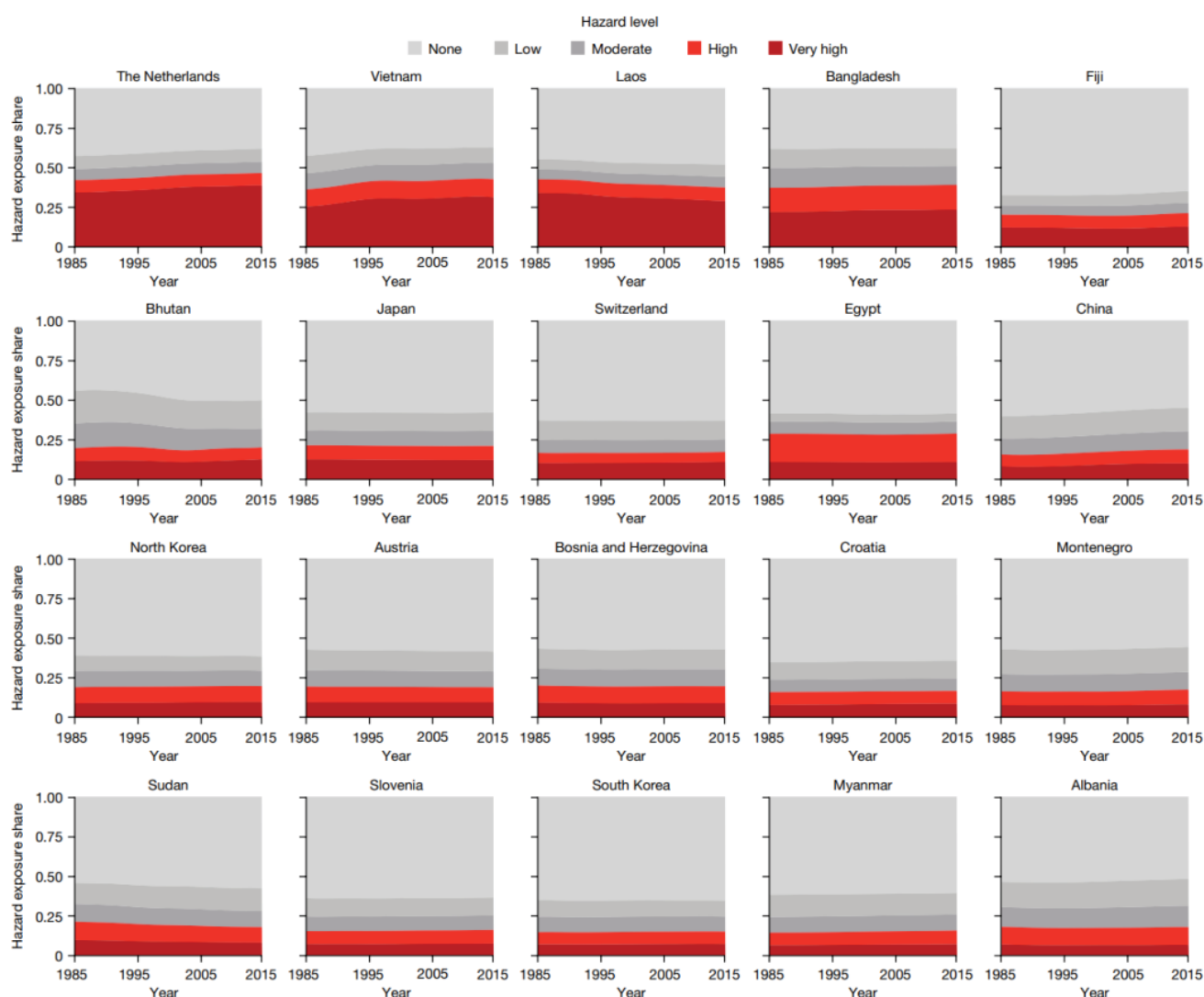


图 5 | 按洪水灾害等级划分的居住区面积最大的 20 个国家。各国按其“极高”灾害风险比例排名,显示了 1985 年至 2015 年期间风险比例的变化情况。图中未包含人口不足 10 万人的国家。

效遏制风险增加。例如,在越南,近三分之一的海岸线已经建成,最安全、生产力集中的地方不断被占用;因此,新的开发项目只得被迫进入风险地带和此前避免进入的区域,如河床或洪泛区。美国大西洋沿岸的证据表明,近几十年来,新建筑开发避开了稀疏地区的洪水易发区,而选择了密集地区"相对较安全"的洪水易发区进行建设。

在做出选址决定时,家庭和企业通常会在工作便利性和市场潜力与灾害风险之间进行权衡,在洪水易发地区定居可能会成为一种“理性”选择。然而,行为偏差、市场失灵和信息限制会导致采取冒险行径。而低效的土地市场会使安全的土地闲置,而危险的地区却被开发。在非正规低收入住区,由于缺乏包括排水系统在内的公共基础设施和社会支持系统,实际洪水风险往往更加严重。

研究表明,这些案例和机制反映了一种全球趋势。特别是在经济和城市中心快速发展的中等收

入国家,洪涝区的居住区增长速度超过了洪涝安全区的增长速度。在全球范围内,1985年至2015年间,总体居住区面积平均增加了85%,而那些面临最高洪水风险等级的居住区则增加了122%。

研究结果可为城市规划者和决策者提供具体依据,帮助做出决策。在洪水风险已经很高的地区,投资备灾对于减少损失至关重要。在洪水风险仍然较低但迅速增加的地区,迫切需要修订土地利用和城市化计划,同时更新风险知情的建筑规范和基础设施总体规划。尽管土地稀缺和地理限制可能意味着不可避免地避免在洪水风险区定居,但洪水防护系统和备灾措施仍可支持具有抗洪韧性的社会经济发展。除了解决易受影响的问题,从根本上增强人民的抵御能力也至关重要。

本节总结了本研究中用于跟踪居住区扩展的速度和形状以及估算洪水风险的数据、方法和敏感性检查。

洪水灾害数据

一项使用粗略洪水数据的研究预测,到2050年,全球遭受洪水灾害的人数将达到13亿,但最近的一项高分辨率研究表明,到2020年就已经超过了这一临界值至少39%。这表明,使用高分辨率数据来捕捉洪水危害的高度地方化性质以及人们避免在最危险地点定居的趋势非常重要。

本研究考虑了三种最常见的洪水类型,它们都可能造成城市洪水灾害:当强降水或过量降水或融雪导致河流泛滥时,即为河漫滩洪水;由于降水时间延长和排水不足,当地表水积聚超过土壤的吸收能力时,即为冲积洪水;由于海浪、潮汐、风暴潮和海平面变化,即为沿岸洪水。

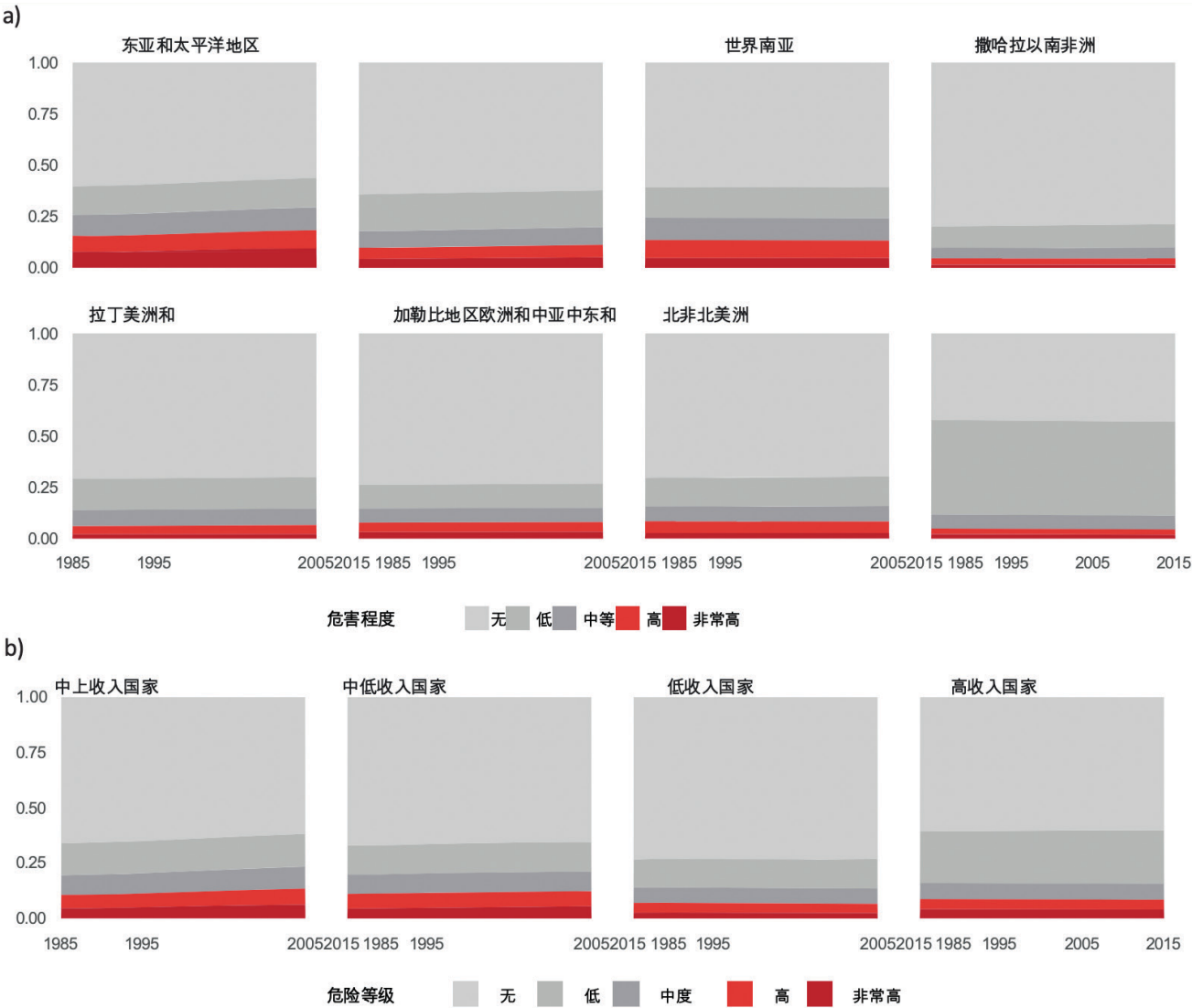
国家级冲积和河流洪水数据基于2019 Fathom Global洪水灾害数据集,文献中广泛使用这些洪水数据已在详细的案例研究中得到验证,包括美国、加拿大和英国的案例研究,以及尼日利亚和莫桑比克的验证研究。该研究发现,准确率与英国、加拿大和美国的报告值一致或仅略低于报告值。这些洪水数据以3弧秒的分辨率(相当于赤道90米)提供了洪水范围和深度的网格信息,模拟了5年一遇、20年一遇、50年一遇、100年一遇、250年一遇和500年一遇的洪水事件,适用于所有国家。这些地图基于MERIT DEM, MERIT DEM纠正了若干误差,包括绝对偏差、条纹噪声、斑点噪声以及树木和建筑物高度偏差,并经过广泛验证。在主要研究中,研究人员考虑了用100年一遇的洪水,以及5年一遇、20年一遇、500年一遇和1000年一遇的洪水作为敏感性测试。

此外,研究人员还使用全球沿海洪水图。该数据集的空间分辨率为3弧秒,由LISFLOOD-FP水

文模型生成。以MERIT DEM 作为输入, 沿海洪水模拟由重新分析波浪(使用 WAVEWATCH III 模型)和风暴潮(使用 MERIT DEM)得出的极端海平面情景驱动。)和风暴潮(使用 DFlow-FM模型结合潮汐信息与河道洪水和冲积洪水一样, 我们考虑了100年一遇以及5年一遇、20年一遇、500年一遇和1000年一遇的重现期, 作为敏感性测试。

本研究中使用的全球洪水地图没有包含堤坝等人工防洪设施的影响。此类数据限制在研究文献中普遍存在, 这是因为没有完整的全球洪水防

御设施清单。FLOPROS数据库虽可持续更新, 但仍未达到全面覆盖的程度。使用未设防洪水地图可能会高估防洪系统可抵御100年一遇(或更高)洪水的地区的能力。案例研究和世界银行的国家风险评估表明, 在低收入和中等收入国家和地区, 大多数暴露于洪水中的人都无法抵御100年一遇的洪水。许多低收入和中等收入国家甚至缺乏基本的排水系统来应对轻度洪水。可能只有高收入国家和一些超低收入国家为其相当一部分人口提供



扩展数据 图 1 | 洪灾暴露的沉降范围在不同时期的总体沉降范围中所占比例。b, 按收入组别、定居范围、归一化。危险等级的定义淹没深度的估计值。百年一遇洪水: 无(洪水深度为 0 厘米)、低(达 15 厘米)、中等(介于 15 至 50 厘米之间)、高(介于 50 至 150 厘米之间)和特大(超过 150 厘米)。

了这种洪水保护标准;然而,这些国家频繁发生的洪水灾害也表明,洪水保护的覆盖面还远远不够。

本研究考虑了100年一遇的洪水强度,以反映相对罕见和强烈的灾害。为了进行稳健性测试,还采用了更多的重现期(1/5年、1/20年、1/500年和1/1,000年)。然而,重现期的概念很容易被误解,致使概率被低估。平均而言,100年一遇的洪水在任何一年发生的概率为1%,这意味着十年内发生的概率为10%,一生(68年)内发生的概率为50%。这些概率都在政府规划范围之内。相比之下,荷兰的洪水防护系统可抵御10,000年一遇的洪水。此外,这些概率适用于任何特定的河流流域或小气候区(本研究中考虑了数十万个此类地点)。这意味着,在全球范围内,每年都会发生数百次百年一遇的洪水事件。由于没有随时间变化的洪水灾害数据集,因此假定洪水灾害在分析期间是随时间变化的。历史上的洪水事件记录清单是存在的,但往往会遗漏一些事件,而且只能确定受洪水影响的地区,不能确定那些在建成前可能已经面临洪水风险或受洪水影响的地区。在实践中,洪水灾害模式的变化可能是由于自然过程(如年代间气候多变性)造成的,也可能是由于人为干扰(如土地使用变化和水文基础设施)而加剧的。这种变化具有部分随机性,可能会增加或减少任何特定地点的洪水危害。然而,在分析期间,洪水灾害模式的变化相对于暴露程度的变化以及相对于总体危害而言可能较小。

自1985年以来的全球居住足迹数据

虽然卫星图像现在被广泛用于了解世界各地城市发展的空间模式,但大多数数据集只涵盖最近几年的情况。全球人类住区图层具有开创性意义,因为它提供了四个不连续的时间步骤--1975年、1990年、2000年和2014年的全球城市足迹;然而,观测数据的不准确性和巨大的时间差限制了对城市化模式及时动态的掌握。

年度高分辨率住区足迹数据对于监测人们遭受自然灾害的演变情况至关重要。在这项研究中,研究人员使用了德国航天中心开发的WSF-Evo数据集。通过该数据集,研究人员可以跟踪城市和小农村定居点中新开发的城市的洪水暴露情况。WSF-Evo基于存档的Landsat图像,以约 30×30 米的分辨率逐年概述了1985年至2015年的全球聚落范围,但不提供人口密度信息。对于每一年,研究人员都会收集在特定区域上空获取的所有可用Landsat 5和Landsat 7图像,并在进行云层和云影遮蔽后提取不同光谱指数的关键统计数据--时间平均值、标准偏差、最小值和最大值。其中包括:归一化差异堆积指数(NDBI)、归一化差异植被指数(NDVI)和修正归一化差异水分指数(MNDWI)。事实证明,如果通过至少七次无云/无云影的晴朗观测进行计算,时间特征一般都是较为稳定。因此,如果目标年份的某一像素点不满足这一约束条件,研究人员就将时间范围向后扩大(以1年为单位),直到满足条件为止。

通过联合利用光学(大地遥感卫星8号)和雷达(哨兵1号)多时相卫星图像生成的2015版WSF-Evo以 10×10 米分辨率概述了全球沉降范围。从2015年开始,研究人员迭代提取给定目标年份 t 的住区和非住区训练样本,方法是对为年份 $t+1$ 得出的住区进行形态学过滤,通过自适应阈值化时间平均NDBI、MNDWI和NDVI,排除可能的误标样本。基于住区增长随时间发生的假设,研究人员还在分析中忽略了在WSF2015中被归类为非住区的所有像素。最后,我们采用二元随机分类法。

为了评估数据集的准确性,研究人员在谷歌的支持下,通过对高分辨率航空和卫星历史图像进行众包照片解释,开展了广泛的验证工作。为此,研究定义了一个统计可靠且易于获取的规则:在1990年、1995年、2000年、2005年、2010年和2015年,我们在全球100个地点标注了约20万个 30×30 米的参照单元,总计约120万个验证样本。结果证实,WSF-Evo相对于其他全球聚落层(尤其是全球人类聚落层(GHSL)、全球不透水表面积

(GISA)、全球人工不透水面积(GAIA)和全球城市年度动态(GAUD))显示出更高的准确性,这表明WSF-Evo非常适合跟踪城市和农村地区的聚落趋势。WSF-Evo和参照层的Kappa系数在补充资料中进行了详细解释和介绍,并考虑了三种不同的评估标准。

Landsat 5和Landsat 7图像在世界各地和不同时期的可用性差异很大。与实施的方法无关,这

可能会导致研究人员收集到的场景很少或场景的住区轮廓不准确。因此,为了衡量大地遥感卫星图像的好坏,研究人员生成了一个输入数据一致性(IDC)分数:6=非常好;5=好;4=一般;3=中等;2=低;1=非常低。IDC分数定义为: $IDC \text{ 分数} = 7 - \min\{[(8 - \min\{\#clearObs, 7\}) \cdot \min\{6, (\#timeFrame)\}], 6\}$, 其中, $\#clearObs$ 表示每个像素可用的清晰观测数据的数量, $\#timeFrame$



扩展数据 图 2 | 聚居地逐年增长(%)。灾害等级是根据百年一遇洪水的估计淹没深度来定义的:无(洪水深度0厘米)、低(不超过15厘米)、中(介于15厘米和50厘米之间)、高(介于50厘米和150厘米之间)和极高(超过150厘米)。

表示相应时间段的年数。扩展数据图 4b 显示了全球数据集的 IDC 分数。

为了克服由于 2000 年前大地遥感卫星数据有限而可能造成的沉降高估/低估的弊端,我们对每个国家以下单位计算出的时间沉降范围剖面图应用了形状规范建模(SPM)。SPM 允许根据对基本过程的理解来选择模型及其数学形式--例如,呈现单调递减趋势或要求曲线通过给定的数据点。通过将先前的知识转化为建模函数中的约束条件,SPM 可以避免过度拟合。我们对物理现象了解得越多,函数形式就越精确。我们使用最小平方三次样条曲线对沉降范围进行建模,这种曲线在构建曲线时具有很高的灵活性。具体来说,该方法使我们能够:(1)强制单调递增,因为 WSF-Evo 是在假定沉降增长的情况下生成的;(2)根据 IDC 平均得分进行加权最小化,从而增加对数据可用性较高年份相应项目的信任度。

较低的 IDC 分值大多出现在 2000 年之前,因为当时只有大地遥感卫星 5 号,而且能够接收大地遥感卫星数据的国际地面站数量有限。我们首先汇总了所有 3307 个单位在国家以下一级的原始标准误差数据,然后对每个结果的标准误差增长曲线采用 SPM 方法,这有助于克服数据质量较差年份的不一致趋势。为每个国家以下各级单位计算的 IDC 年平均得分被用作权重。总之,我们使用 SPM 对五个灾害等级和四种洪水灾害(即冲积灾害、河道灾害、沿海灾害和综合灾害)的每个国家以下各级单位的定居点的时间曲线进行建模,总计超过 66,000 条曲线。

行政边界

研究人员对国家和次国家各级边界的定义遵循世界银行参照的全球行政区划图。总体而言,本研究涵盖 225 个国家和地区,并将其细分为 3,307 个国家以下单位。国家分组也符合世界银行对地理区域和收入组别的定义(基于其 2015 年人均国内生产总值水平)。

叠加年度城市化和洪水灾害数据

本研究估算了全球城市化土地中暴露于高洪水灾害水平的土地比例,并评估了这种暴露程度如何随着时间的推移而不断变化。利用高分辨率的全球洪水灾害和居住区范围数据集,我们可以对 225 个国家和地区(细分为 3307 个国家以下单位)进行分析。这代表了研究囊括了除生活在争议领土上的人口之外的全世界人口。本文介绍的结果是通过处理大量空间数据的计算工作流程得出的,我们可以将其简化为以下分析步骤:

步骤 1: 我们使用 WSF-Evo 数据集确定建筑密集区,该数据集将每个 30×30 米分辨率的像素点划分为居住区。

步骤 2: 将每个住区像素点归入根据生命和生计风险定义的五个洪水灾害类别之一(扩展数据表 2)。

步骤 3: 按年度计算每个次国家各级行政单位(如州或省)每种洪水灾害类别的总沉降面积,并计算其相对于相应总沉降面积的份额。

为了解决由于 2000 年前大地遥感卫星 5 号数据在世界某些地区的可用性较差而可能造成的定居点高估/低估的局限性,研究人员采用了 SPM 方法(见上文)。为了获得更广泛的趋势,研究人员进一步汇总了国家和地区层面的洪水风险估算值,并计算了住区洪水风险的长期趋势。在适当的情况下,对估算值进行了四舍五入。

估计数值的稳定性

本研究中的绝对沉降洪水暴露估计值对淹没深度阈值的选择非常敏感(扩展数据表 2)。本研究的结果尤其侧重于淹没深度超过 0.5 米的地区,从而突出了洪水影响较大的地区。然而,有证据表明,洪水深度仅为 0.15 米就会对经济活动和生计造成严重破坏。本研究进行的一项敏感性分析表明,降低洪水深度阈值会如何改变总的暴露沉降区(扩展数据图 4)。与之前的研究一致,研究发现冲积

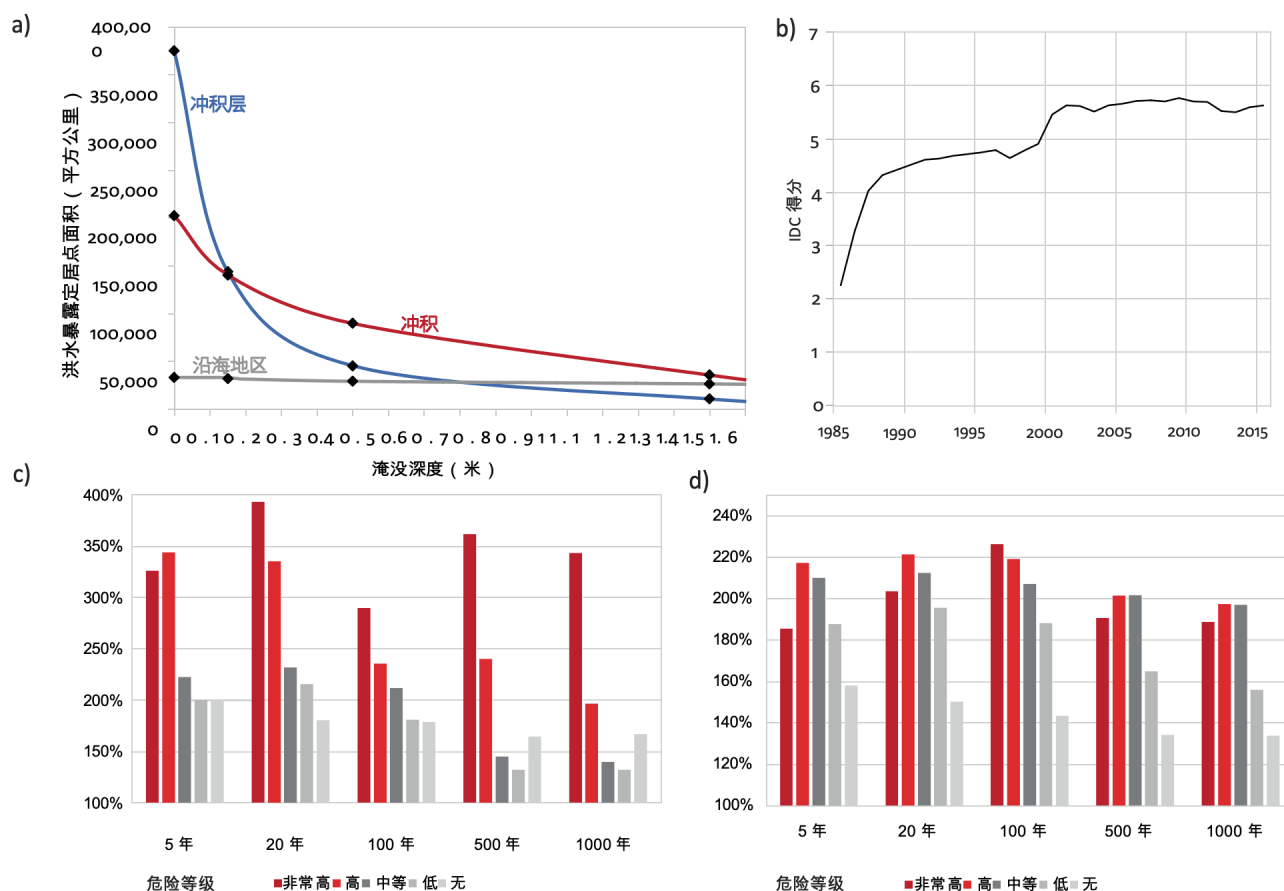
洪水对阈值的选择更为敏感,尤其是在淹没深度较低的情况下。

相对而言,这项研究表明,洪水暴露居住区的增长速度快于洪水安全居住区的增长速度。图 2d-f 显示,这一结果对于综合考虑洪水灾害或单独考虑冲积洪水、流体洪水和沿海洪水都是可靠的。同比增长率(图 2c)表明,这一趋势在不同时期也是一致的。此外,考虑到不同的洪水强度(代表 5 年、20 年、100 年、500 年和 1000 年重现期),这一结论也是可靠的。在中国和越南,高危害洪水区的居住区扩张速度始终快于洪水安全区(扩展

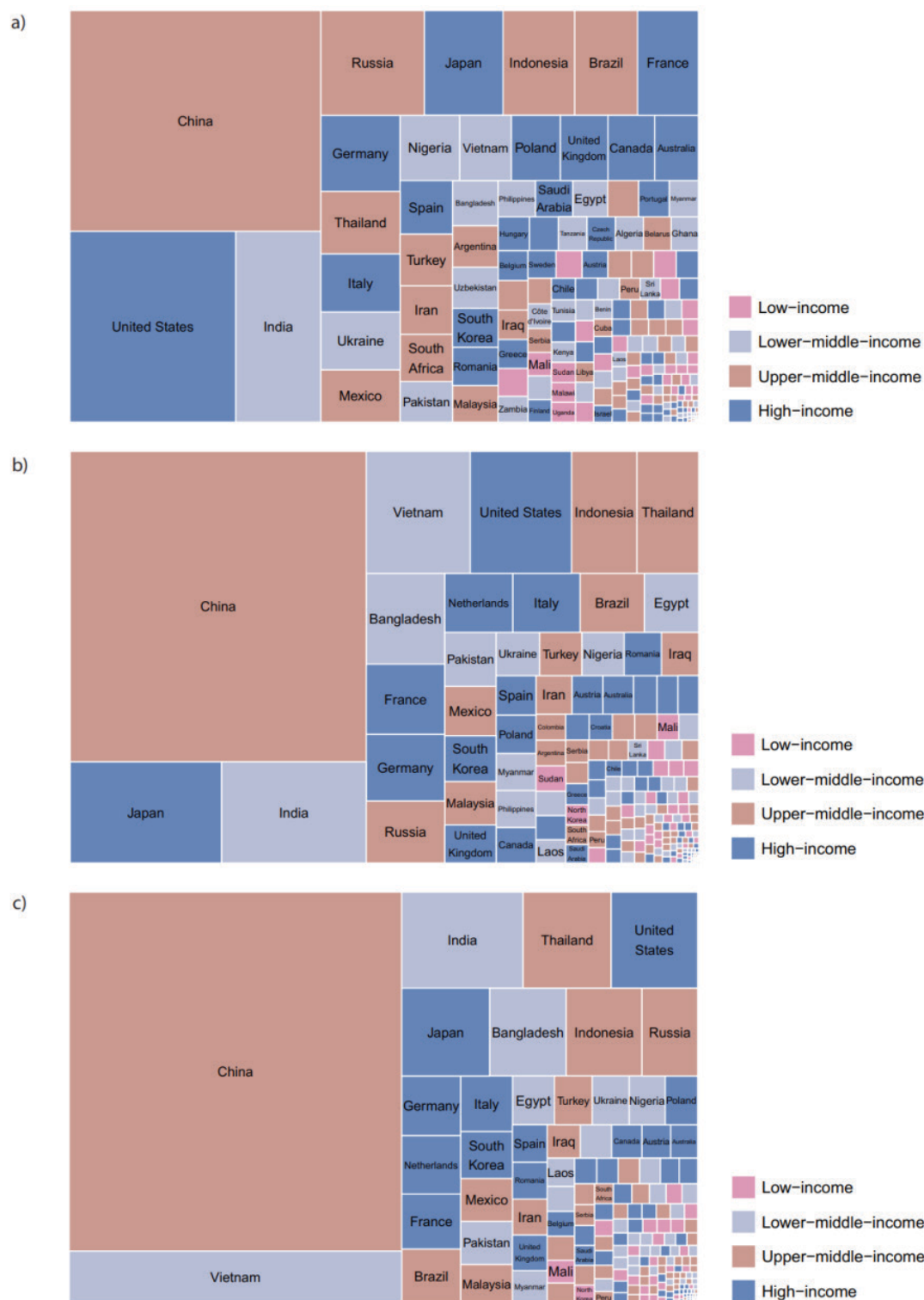
数据图 4c、d),这两个国家的居住区扩张速度占全球高危害洪水区居住区扩张速度的 53%。简而言之,洪水暴露区和洪水安全区的沉降增长相对速度在不同洪水类型、重现期、时间和淹没深度阈值下都很稳定。

报告摘要

有关研究设计的更多信息,请参阅本文链接的《自然组合报告摘要》。



a, 不同淹没深度阈值下的洪水暴露沉降区。b, IDC 分数。中国:按危险区和洪水重现期划分的定居点扩展情况 (1985-2015 年)。



扩展数据 图 3 | 聚落范围的比例表示。 **a**, 全球聚落 (2015 年总计 130 万公²)。 **b**, 高危洪水地区的聚落范围 (2015 年总计 14.46 万公²)。 **c**, 高危洪水地区的新聚落范围 (1985-2015 年总计 7.64 万公²)。这些数字提供了不同国家聚落面积的比例表示。在每个子图中, 所有瓦片的总和与括号中指定的总聚落范围 (单位: 公²) 相对应。

		Global settlement extent	Share (%) of global settlements facing... (Inundation depth during 100-year flood)				
			...no hazard (0 m)	...low hazard (0, 0.15 m]	...medium hazard (0.15, 0.5 m]	...high hazard (0.5, 1.5 m]	...very high hazard (> 1.5 m)
1985	%	100	64.2	17.8	8.1	5.5	4.3
	km ² ('000)	693	445	123	56	38	30
2015	%	100	62.3	17.8	8.7	6.1	5.2
	km ² ('000)	1,284	799	228	112	78	66
Change	Percentage points		-1.9	0	0.6	0.6	0.9

扩展数据表 1 | 世界建成区洪水风险的变化

Category	Hazard class	Flood depth (meters)	Description
0	None	0	Unaffected during a 1-in-100 year flood
1	Low	0 – 0.15	No significant risk to life or economic activity
2	Moderate	0.15 – 0.5	Disruptions to livelihoods and economic activity; some risk to life for select populations, especially vulnerable groups such as children and disabled people (including through water-borne diseases)
3	High	0.5 – 1.5	A significant share of the affected population is expected to face risk to life, especially if flood waters have a current; major disruptions to livelihoods
4	Very high	Over 1.5	Most affected people could face substantial risk to life and severe and prolonged disruptions to livelihoods

扩展数据表 2 | 本研究采用的洪水灾害分类法



欢迎关注中国水科院微信公众号
地址：北京市海淀区复兴路甲一号
本刊联系方式：中国水科院国际合作处
联系邮箱：dic@iwhr.com
2024 年 1 月 13 日