

青藏高原城市洪涝缓解能力评估 ——以拉萨市为例*

戴开璇¹⁾ 沈石^{1)†} 程昌秀^{1,2)} 耿佳辰¹⁾ 张天媛¹⁾

(1)北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室,环境演变与自然灾害教育部重点实验室,地理科学学部地理数据与应用分析中心,100875,北京; 2)国家青藏高原科学数据中心,100101,北京)

摘要 通过耦合 FUTURES 城市扩张模拟模型和城市洪涝缓解能力评估模型,综合不同气候变化和城市扩张情景对拉萨市洪涝缓解能力的历史及未来变化进行了定量评估。结果发现:1)2000—2015年,拉萨市各区洪涝缓解能力平均降低了 5.34%。其中城关区和堆龙德庆区分别降低了 4.63% 和 8.55%,仅达孜区的缓解能力提高了 1.13%。2)城关区未来洪涝缓解能力在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下分别平均降低了 15.01% 和 29.52%,堆龙德庆区则分别降低了 16.16% 和 31.95%。3)城关区和堆龙德庆区的新增城镇用地造成其缓解能力比原自然地表降低 50% 以上,在城市扩张中采取保护水体措施,能够有效减少缓解能力的退化。4)未来城市扩张造成拉萨市未来洪涝缓解能力的大幅降低,而气候变化进一步扩大了其退化程度。因此,拉萨市在未来应该遏制城市建设向水体、草地扩张的趋势,提高城市土地利用效率,并且应当加强城市内部绿色基础设施的建设,适度提高防洪排水设施标准,以应对气候变化可能造成的极端降水事件。

关键词 极端降水;城市洪涝;城市扩张;FUTURES 模型;InVEST-UFRM 模型

中图分类号 P931.1;TU982

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2022027

0 引言

气候变化与城市化加剧了全球城市洪涝风险,我国 62% 的城市每年至少发生 1 次暴雨洪涝灾害,对社会经济和人民生活造成严重影响,城市内涝已成为我国急需解决的社会问题之一^[1-4]。城市化使不透水面迅速扩张,导致地表下渗减少、径流总量增加,直接加剧了城市暴雨洪涝风险^[5-7]。气候变暖加快了水文循环过程,使大气持水能力增强、稳定性降低,造成极端降水事件的强度增大、频率增加,间接加剧城市暴雨洪涝风险^[8-9]。在城市化和气候变化的双重影响下,城市地区将会面临更严峻的洪涝灾害威胁。

城市洪涝缓解能力是指城市生态系统消纳雨水、减少地表径流,从而降低城市洪涝风险的能力^[10-11]。当前,相关学者对国内外不同地区的生态系统洪涝缓解能力开展了一系列研究,但其评估的空间尺度及分析角度存在差异。国外学者大多聚焦于大洲、国家等区域尺度,评估不同区域生态系统洪涝缓解能力的时空演变过程,并分析洪涝缓解能力的自然供给与社会需求的分布情况,为人类合理利用自然洪涝缓解能力提供指导^[12-14]。国内学者则主要在城市尺度上开展洪

涝缓解能力评估,研究关注城市扩张、城市土地利用格局变化,以及气候变化对于洪涝缓解能力的影响,侧重于对城市内部的精细分析,为城市景观格局的合理配置和城市防洪设施建设提供指导^[15-17]。在已有研究中,基于水文模型模拟评估的方法得到了广泛应用,如 SWAT、SWMM、MIKE、InfoWorks 等模型^[18-20]。SCS (Soil Conservation Service) 模型作为水文模型中通用的产流模型,在城市洪涝缓解能力评估中应用较多^[21-22]。

青藏高原是对气候响应最为敏感的地区之一,其未来极端降水事件强度将显著增强^[23-26]。随着高原地区城市化水平的提高,城市不透水面加速扩张,进一步影响高原城市水文循环过程^[27-28]。在气候变化和城市化的双重影响下,青藏高原城市未来将会面临更为严峻的洪涝灾害风险。然而目前还缺少对高原城市洪涝缓解能力评估的研究。

拉萨市是西藏的中心城市,近年来城市建设用地快速扩张^[29],同时其降水强度和频次在过去 40 年呈现上升趋势^[30-31]。现有研究大多仅考虑城市下垫面变化对洪涝缓解能力的影响,缺少综合考虑气候变化与土地利用变化背景下的洪涝缓解能力的评估。因此,

* 科技部重点研发课题资助项目(2019YFA0606901);第二次青藏高原综合科学考察研究资助项目(2019QZKK0608)

† 通信作者:沈石(1990—),博士,讲师。研究方向:时空大数据分析 with 建模。E-mail: shens@bnu.edu.cn

收稿日期:2022-02-05

本研究通过综合城市洪涝缓解能力评估模型与土地利用模拟模型, 评估拉萨市历史及未来洪涝缓解能力时空变化, 定量分析不同气候变化和土地利用变化情景对缓解能力的影响, 以期为拉萨市城市规划、城市防涝能力建设提供科学依据。

1 研究区概况

拉萨市位于青藏高原中南部, 雅鲁藏布江最大支流拉萨河右岸, 平均海拔约 3 600 m (图 1)。拉萨市属高原温带半干旱大陆性气候, 多年平均降水量约 445.8 mm, 全年降水主要集中在 6—9 月, 并且多发生

在夜间, 夜雨率超过 75%^[32]。拉萨市地处冲积河谷的下游地区, 地形狭长, 人口密集, 缺少洪水蓄滞区域, 容易受到洪水、泥石流等灾害的侵袭^[33]。2010 年 7 月, 拉萨市持续降水引发洪涝灾害, 致使多处防洪堤被冲毁, 多处农田、房屋被毁, 造成了严重的社会经济损失^[34]。目前, 拉萨河谷底部的平坦地区几乎已经被城关区和堆龙德庆区的城市建设用地所占据^[35]。为了拓展城市发展空间, 拉萨市政府提出“东延、西通、南通, 一城两翼三区”的发展规划, 并开发建设了位于河道中心的太阳岛和仙足岛, 进一步增加了城市防洪难度^[36]。

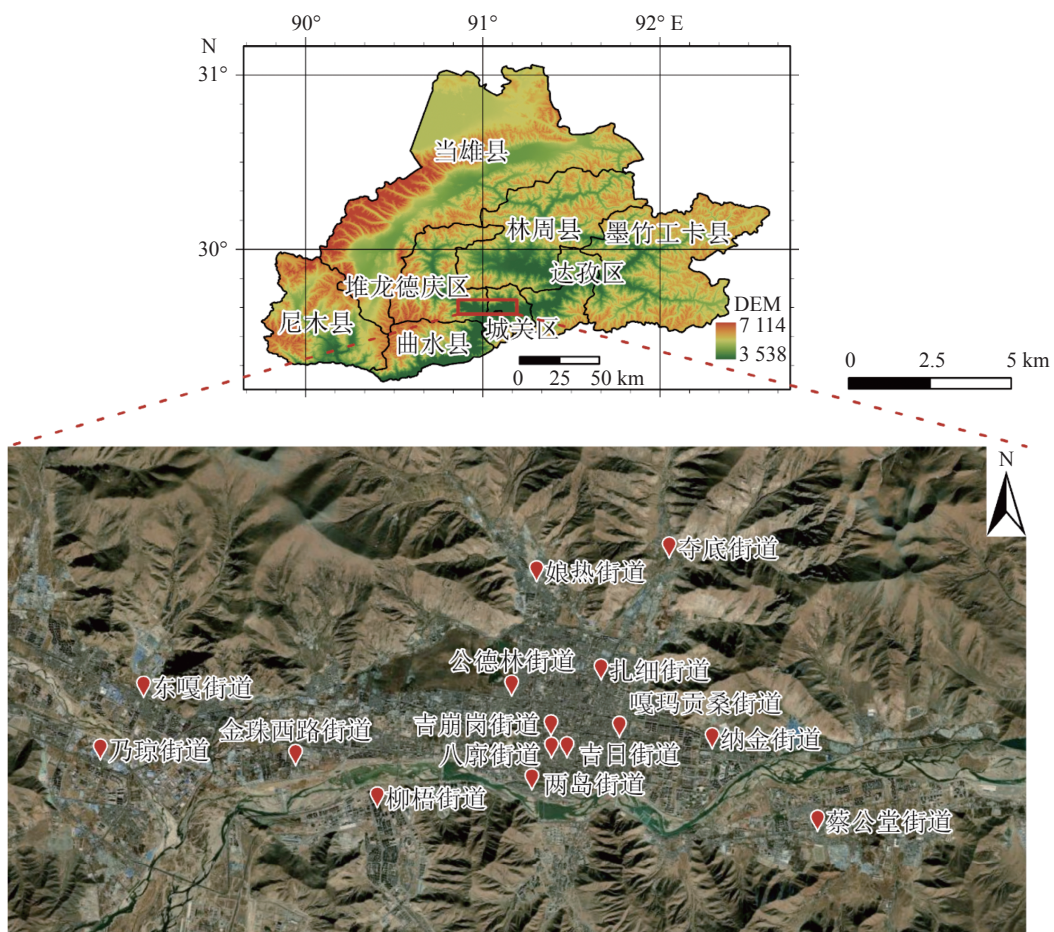


图 1 研究区概况

2 研究方法及数据来源

2.1 研究数据 研究中土地利用模拟模型所需的数据包括人口数据、土地利用数据、土地利用变化驱动数据等。历史人口数据来自拉萨市统计年鉴, 未来人口数据来自 Chen 等^[37] 公布的不同共享社会经济路径 (shared socioeconomic pathways, SSPs) 情景下中国未来人口预测数据集。土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心提供的 30 m 分辨率土地利用遥感监测数据集。土地利用变化驱动数据包括 GDP

空间分布数据、夜间灯光数据、DEM 数据、路网密度数据、POI 数据等。

城市洪涝缓解能力评估模型的输入数据有土地利用数据、降水量数据、土壤类型数据等。历史极端降水量根据站点实测数据获取, 未来降水数据来自 Pan 等^[38] 提供的不同代表性浓度路径 (representative concentration pathways, RCPs) 情景下中国未来气候数据集。土壤类型数据来自美国橡树岭实验室公布的全球水文土壤组分布数据集^[39]。所有栅格数据均经过

重采样操作将分辨率统一到 30 m, 详细的数据说明见表 1.

2.2 研究流程 研究流程如图 2 所示: 1) 评估拉萨市 2000—2015 年的城市洪涝缓解能力; 2) 通过分析该时期拉萨市土地利用变化情况, 探究城市扩张对历史洪涝缓解能力变化的影响; 3) 通过对拉萨市未来城市洪涝缓解能力进行评估, 比较不同未来情景下城市洪涝缓解能力的变化情况; 4) 结合气候变化与土地利用格局的变化情况, 分析其对拉萨市未来洪涝缓解能力变化的影响.

2.3 城市扩张模拟 本研究利用 FUTURES 模型模

拟拉萨市未来城市扩张. 该模型是一个基于地理元胞自动机和多层次逻辑回归模型的城市扩张模拟模型, 能够实现城市发展形态的动态调整, 且方便与其他模型进行耦合^[40]. 目前 FUTURES 模型已经在未来城市发展形态模拟、城市生态系统服务变化、城市用水需求预测等方面得到应用^[41-43]. FUTURES 模型由城市用地需求预测模型、城市扩张潜力计算模型和城市图斑增长模型 3 个独立的子模型组成^[44]. 城市用地需求预测模型通过建立历史人口数量与城市用地面积之间的关系, 预测未来的城市扩张面积. 城市扩张潜力计算模型利用多层次逻辑回归算法, 建立城市

表 1 研究数据描述与来源

| 模型类型 | 数据名称 | 年份 | 空间分辨率 | 数据源 |
|----------|-----------------|--------------------------|-----------|--|
| 城市扩张模拟模型 | 拉萨市历史人口 | 2000、2005、2010、2015 | 全市各区县 | 拉萨市统计年鉴 |
| | 拉萨市未来SSPs情景预测人口 | 2020—2100 | 30 m | Chen等 ^[37] |
| | 中国土地利用遥感监测 | 2000、2005、2010、2015、2018 | 30 m | 中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn) |
| | GDP空间分布 | 2015 | 1 km | 中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn) |
| | 夜间灯光遥感 | 2013 | 1 km | 中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn) |
| | DEM数字高程 | 2009 | 30 m | 地理空间数据云(http://www.gscloud.cn) |
| | 路网 | 2015 | 矢量 | 国家基础地理信息数据库(https://www.webmap.cn) |
| | POI兴趣点 | 2015 | 矢量 | 高德地图API(https://lbs.amap.com) |
| | 拉萨市行政边界 | 2015 | 矢量 | 中国科学院资源环境科学数据中心(https://www.resdc.cn) |
| | 城市洪涝缓解能力评估模型 | 拉萨气象站降水观测 | 1955—2015 | 文本 |
| 中国未来降水预测 | | 2007—2099 | 0.25° | Pan等 ^[38] |
| 水文土壤组分布 | | 2015 | 250 m | Oak Ridge National Laboratory Distributed Active Archive Center(https://daac.ornl.gov) |

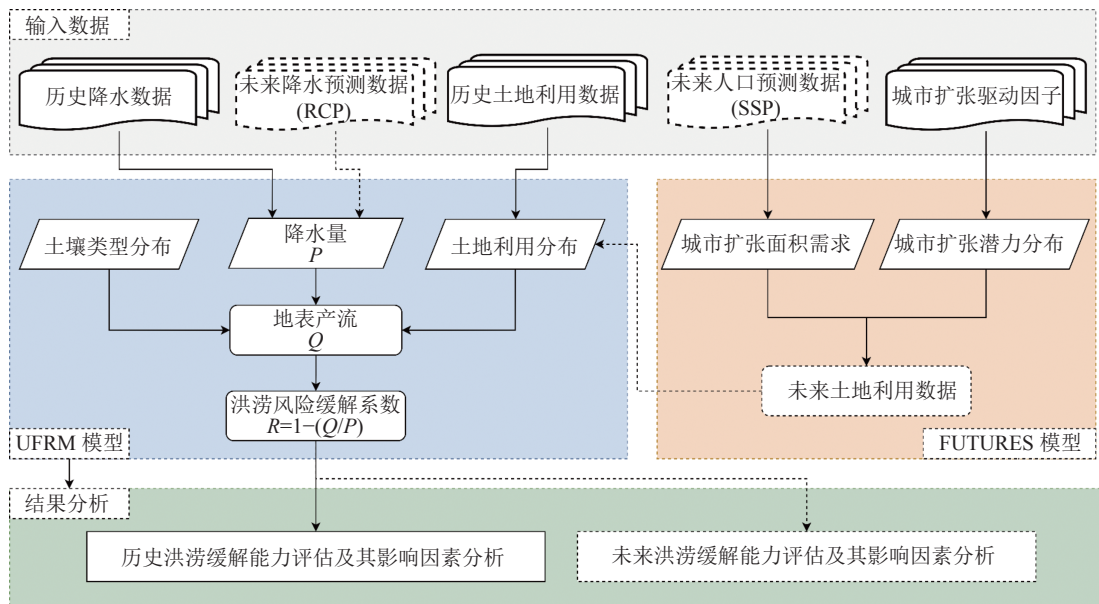


图 2 研究流程

扩张与驱动因子之间的关系,对栅格单元转换为城市的适宜性进行评价.城市图斑增长模型基于图斑的栅格转换算法,根据未来城市用地扩张面积需求,以及城市扩张潜力分布数据,对未来城市图斑的空间分布进行预测.

研究以Chen等^[37]预测的未来人口增长为驱动,模拟不同SSPs情景下的拉萨市未来城市扩张情况.SSPs种包括5种情景,分别是可持续发展情景(SSP1)、维持历史发展情景(SSP2)、区域竞争情景(SSP3)、区域不平等情景(SSP4)、化石燃料驱动情景(SSP5)^[45].此外,通过调整城市扩张占用水体的概率,研究中构建了采取水体保护措施和不采取水体保护措施2种城市扩张情况.当采取水体保护措施时,水体栅格转换为城市栅格的概率设置为0;当不采取水体保护措施时,其转换概率保持不变.因此本研究共模拟得到10种不同的未来城市扩张格局.

2.4 确定极端降水量 历史和未来极端降水量分别来自历史观测数据和CMIP6气象模式数据.由于拉萨市的极端降水事件主要以持续1d的降水为主^[25, 46],因此研究中以日降水量作为分析指标.

首先,根据拉萨市气象站1955—2015年的降水观测资料,提取出日降水量>25mm(大雨)的降水事件,以其中的最大降水量值41.6mm作为历史时期极端降水量值.基于已有研究中对CMIP6多种气候模式的比较,加拿大区域气候模型(CanESM2)对青藏高原的降水预估精度较高^[47-48].因此,研究中基于Pan等^[38]提供的CanESM2预测数据确定拉萨市未来的极端降水量值,提取到拉萨市未来RCP4.5情景下的最大降水量为63.6mm,而RCP8.5情景下的最大降水量为94.2mm.拉萨市历史及未来发生>25mm降水事件的频率分布直方图及其核密度曲线如图3所示.

2.5 洪涝缓解能力评估 InVEST-UFRM(InVEST Urban Flood Migration Modes)基于美国农业部水土保持局研制的SCS-CN(soil conservation service-curve number)产流模型,根据降水量与径流量之间的水分平衡关系,评估城市下垫面减少径流产生的能力^[49].SCS-CN模型具有输入数据简单,能反映下垫面变化等优点,在我国有较好的适用性^[50-51].以往的研究多利用SCS-CN模型对地表产流量大小的计算,而忽视了模型在表征下垫面减少径流,缓解洪涝灾害方面的能力,UFRM为SCS-CN模型的应用提供了新的视角.

UFRM主要评价由暴雨事件引发的城市洪涝灾害.城市中的草地、林地等自然环境设施能够有效减少暴雨引起的地表径流并减缓流速^[52],而该模型能够对这种缓解能力进行定量评估^[53-54].对每一个栅格*i*,

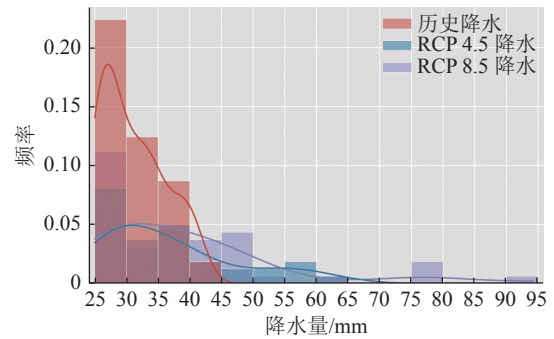


图3 拉萨市历史和未来降水事件频率分布

其产流量 Q_{P_i} (mm)受到降水量 P (mm)、土地利用类型、土壤类型的影响,公式为

$$Q_{P_i} = \begin{cases} \frac{(P - \lambda S_{\max,i})^2}{P + (1 - \lambda)S_{\max,i}}, & P > \lambda S_{\max,i} \\ 0, & P \leq \lambda S_{\max,i} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: λ 是土壤的下渗系数,设置为经验值0.2; $S_{\max,i}$ 表示栅格*i*在产流前的最大滞留率,其取值与栅格对应的 N_{C_i} (Curve Number)值有关,公式为

$$S_{\max,i} = 25400/N_{C_i} - 254. \quad (2)$$

最终,根据降水量与计算得到的产流量之间的差值,得到栅格*i*的径流缓解指数 R_i 为

$$R_i = 1 - Q_{P_i}/P. \quad (3)$$

由于拉萨市城市面积较小,因此研究中假设区域内各个栅格的降水量 P 是一致的.

3 结果与分析

3.1 拉萨市洪涝缓解能力时空演变 拉萨市2000—2015年的洪涝缓解能力评估结果如图4所示.图4中箱线图是拉萨市各区内栅格的洪涝缓解系数.根据缓解系数平均值的变化,2000—2005年,城关区的缓解能力降低了0.32%,而其余各区基本无变化.2005—2010年是各区缓解能力发生显著衰退的时期,除达孜区的缓解能力提升0.86%外,其余各区均呈现了降低的趋势.按照衰退程度由大到小分别为墨竹工卡县(-8.65%)、堆龙德庆区(-8.34%)、当雄县(-7.23%)、林周县(-5.90%)、尼木县(-4.44%)、城关区(-4.04%)、曲水县(-3.87%).2010—2015年,城关区、堆龙德庆区、林周县的缓解能力分别降低了0.30%、0.21%、0.56%,而达孜区的缓解能力提升0.18%.总的来说,2000—2015年,拉萨市各区洪涝缓解能力平均降低了5.34%,在各区中仅达孜区的缓解能力略微提高了1.13%,而其余各区均呈现降低的趋

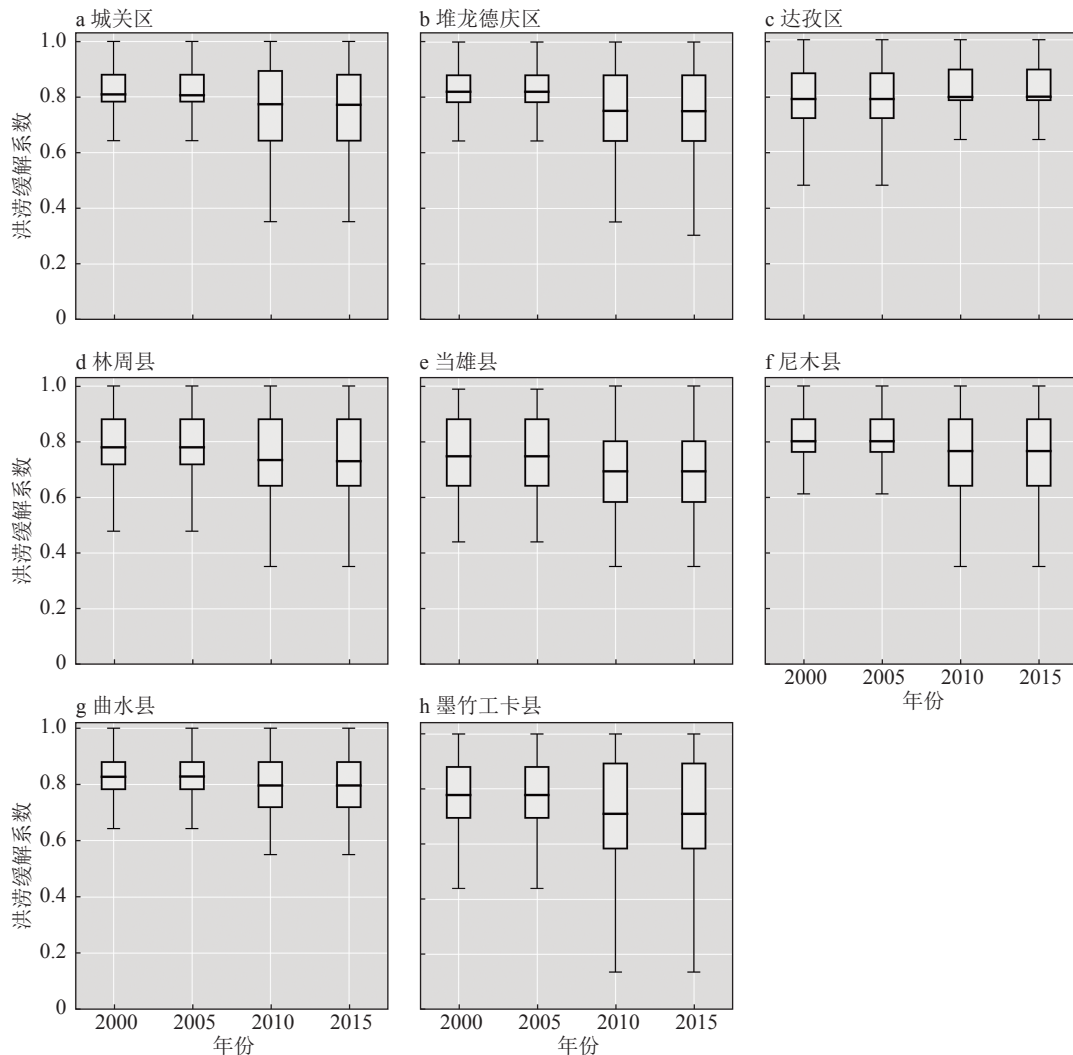


图 4 拉萨市历史洪涝缓解能力变化情况

势. 其中, 城关区和堆龙德庆区的缓解能力在 15 年内持续降低了 4.63% 和 8.55%.

3.2 城市化对拉萨市洪涝缓解能力的直接影响 基于拉萨市各区的历史土地利用变化情况(图 5), 对 3.1 节中洪涝缓解能力的评估结果进行分析. 可以看出, 2005—2010 年是各区土地利用变化最大的时间段, 其中草地的变化最剧烈, 并且不同区域草地的主要流向存在区别. 城关区、堆龙德庆区、当雄县、尼木县的草地主要转变成裸地, 而达孜区、林周县、曲水县、墨竹工卡县的草地主要转换成林地. 因此, 草地的减少是造成拉萨市整体洪涝缓解能力降低的最主要原因. 此外, 在过去 15 年中, 拉萨市城市扩张主要集中在城关区和堆龙德庆区, 这也是造成城关区、堆龙德庆区的洪涝缓解能力在持续降低的主要原因.

3.3 拉萨市未来城市扩张格局演变 利用 FUTURES 模型模拟在不同情景下, 城关区和堆龙德庆区未来城市扩张情况如图 6 所示. 总体上看, SSP3 情景下拉萨市未来城市扩张面积最大, 而 SSP1 情景下城市扩张

面积最小. 拉萨市未来城市扩张主要发生在城关区东部的纳金街道和蔡公堂街道, 以及堆龙德庆区东部的乃琼街道和柳梧街道. 此外, 城市扩张对水体的占用主要发生在城关区南部的拉萨河沿岸, 对耕地的占用主要发生在堆龙德庆区东部. 通过采取水体保护措施, 能够有效避免城市发展向河道逼近. 并且, 在所有 SSP 情景中, 采取水体保护措施均会导致城关区东南部和堆龙德庆区东部的城市扩张更加密集.

3.4 拉萨市未来洪涝缓解能力时空演变 根据城市扩张模拟结果, 拉萨市未来城市扩张主要集中在城关区和堆龙德庆区, 因此本文主要对这 2 个地区的未来洪涝缓解能力变化进行分析. 这 2 个区域在不同未来情景下的洪涝缓解能力变化结果如图 7 所示. 从气候变化情景上看, 2 个区域在 RCP 8.5 情景中的缓解能力降低程度大于 RCP 4.5 情景. 与历史情况相比, 城关区在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下分别平均降低了 15.01% 和 29.52%, 堆龙德庆区则分别降低了 16.16% 和 31.95%, 主要是由于 RCP 8.5 情景的暴雨降水量是 RCP 4.5

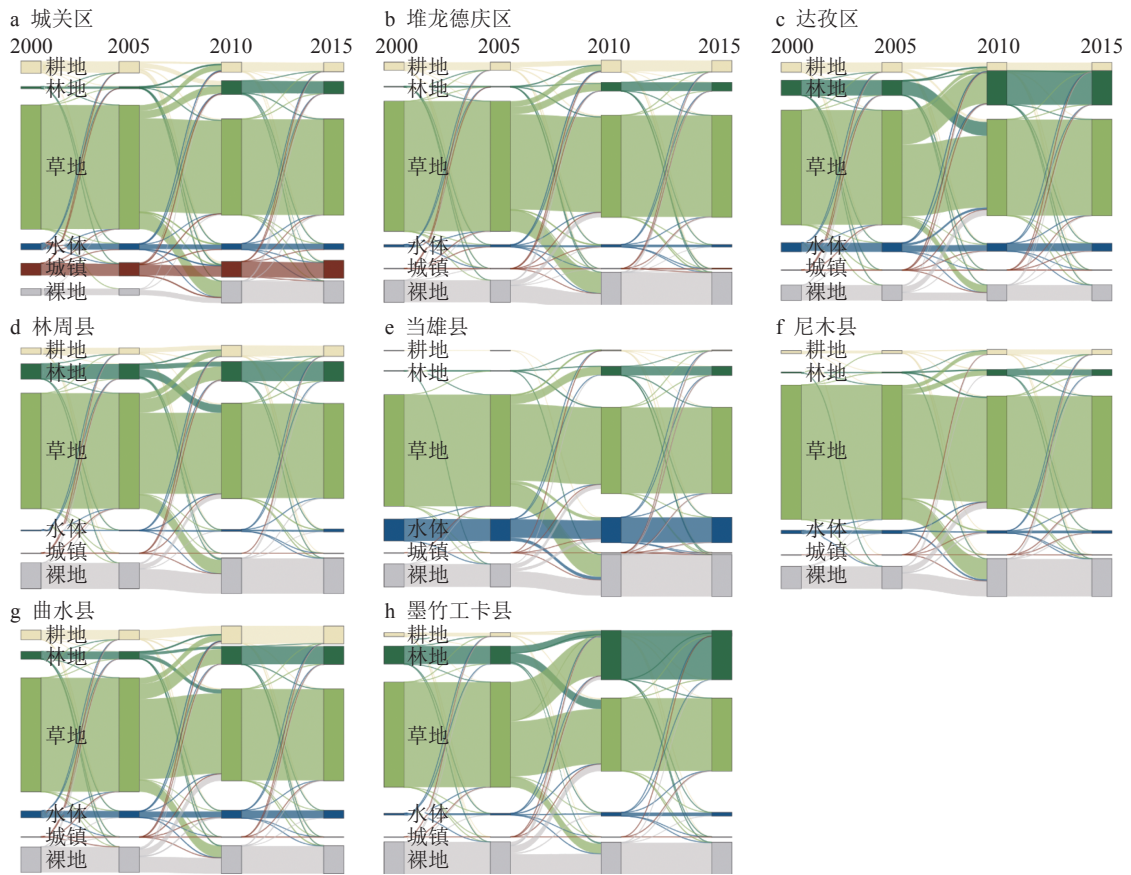


图 5 拉萨市各区(县)历史土地利用变化情况

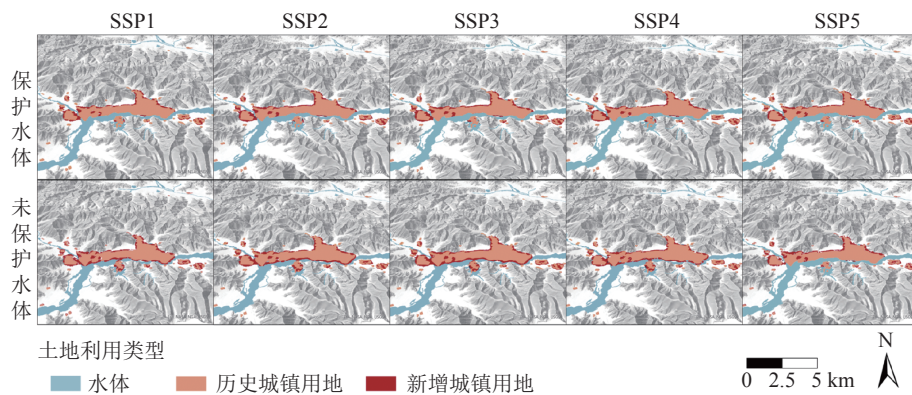


图 6 城关区、堆龙德庆区未来城市扩张情况

情景的 1.5 倍。从城市扩张情景上看, 2 个区域对不同 SSP 情景的响应存在区别, 城关区在 SSP3 情景下造成了最严重的缓解能力降低, 而堆龙德庆区在各 SSP 情景下的缓解能力差别不大。此外, 对城关区而言, 在所有 RCP 及 SSP 情景下, 通过采取水体保护措施减少了低缓解能力区域的产生, 起到了保护缓解能力的作用。而堆龙德庆区缓解能力对是否采取水体保护措施响应差别不大。

将未来与历史洪涝缓解系数栅格分别相减, 得到洪涝缓解系数的变化量的空间分布情况(图 8)。从空间上看, 拉萨市未来城市扩张主要集中在 4 个区域,

分别是城关区的纳金街道和蔡公堂街道, 以及堆龙德庆区的乃琼街道和柳梧街道, 其缓解能力均降低 50% 以上。当采取水体保护措施时, 缓解能力降低的区域在空间上更加聚集。但当不采取水体保护措施时, 城市的扩张将会导致城关区南部拉萨河沿岸地区缓解能力急剧降低。此外, RCP 8.5 情景的洪涝缓解能力退化程度整体上比 RCP 4.5 情景更加严重。综合来看, 新的城市扩张区域在 RCP 8.5 情景下的缓解系数比 RCP 4.5 情景进一步减少了约 10%。这说明了城市的扩张是造成其缓解能力大幅度降低的最主要原因, 而气候变化进一步扩大了降低的幅度。通过采取水

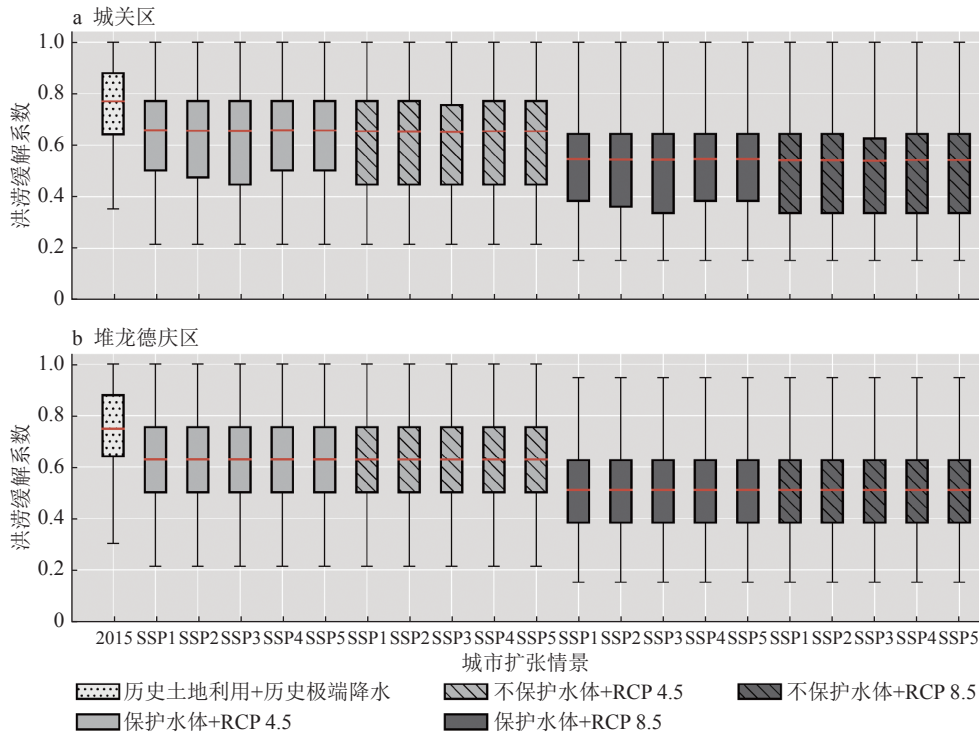


图 7 城关区、堆龙德庆区未来洪涝缓解能力变化情况

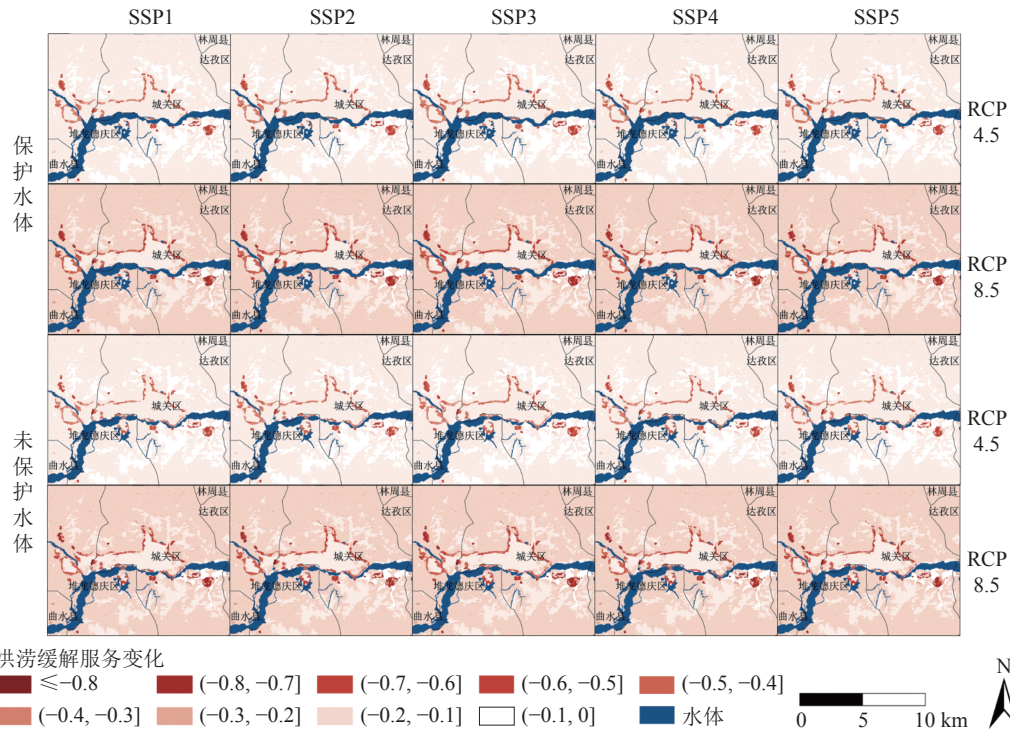


图 8 城关区、堆龙德庆区未来洪涝缓解能力变化情况

体保护措施,能够使未来城市扩张聚集到城关区东南部和堆龙德庆区北部,从而有效避免城市对湿地、河道等水体占用。

4 结论与讨论

研究通过综合 FUTURES 城市扩张模拟模型和

UFRM 城市洪涝缓解能力评估模型,探讨在不同气候变化和城市扩张情景下,拉萨市洪涝缓解能力的未来变化情况,研究结果表明:

1)2000—2015 年,拉萨市各区洪涝缓解能力平均降低了 5.34%。其中城关区和堆龙德庆区的缓解能力在 15 年中持续下降,分别降低了 4.63% 和 8.55%,仅

达孜区的缓解能力提高了 1.13%。

2) 从气候变化的影响上看, 城关区未来洪涝缓解能力在 RCP4.5 和 RCP8.5 情景下分别平均降低了 15.01% 和 29.52%, 堆龙德庆区分别平均降低了 16.16% 和 31.95%。

3) 城关区和堆龙德庆区的新增城镇用地造成其缓解能力比原自然地表面降低 50% 以上, 在城市扩张中采取保护水体措施, 能够有效减少缓解能力的退化。

4) 未来城市扩张造成拉萨市未来洪涝缓解能力的大幅降低, 而气候变化进一步扩大了其退化程度。这一结论与已有研究结果一致, 即城市不透水面的扩张以及降水量的增加均会加剧城市洪涝风险^[55]。

在针对北京市、沈阳市、深圳市等大城市的研究中, 研究人员建议通过合理配置城市中的商业区、居民区、绿化区分布, 以及增加绿地、水体等措施, 降低城市地区的洪涝灾害风险^[56-58]。然而, 拉萨市的城市规模较小, 城市内部排水和蓄水的空间有限, 可供绿化建设的土地较为稀缺, 与平原地区的大型城市相比, 由于处于河流交汇处的河谷地带更容易遭受河道洪水冲刷的侵袭, 并且, 受拉萨市经济发展水平的制约, 可用于城市防洪建设的资金投入较少, 城市防洪能力的建设和提升面临困难。

因此, 为了减轻未来气候变化和城市扩张对城市洪涝缓解能力的影响, 拉萨市在未来的发展过程中的首要任务是提高城市土地利用效率, 避免城市空间的无序蔓延。由于湿地、河流等具有较高的洪涝缓解能力, 因此尤其要严格制约城市向河漫滩、湿地过渡带等自然水体的扩张。同时, 应该利用好已有的城市公园等绿色设施, 进一步提高城市内部对于洪涝灾害的缓解能力。而为了应对全球气候变化造成整体性洪涝风险的提升, 需要重视城市防洪设施的建设, 针对未来气候变化适度提高防洪排水设施标准。

由于拉萨市城市规模较小, 而本研究中所使用的土地利用数据、降水预测数据分辨率较低, 因此限制了对城市内部缓解能力的评估。在未来的研究中, 需要通过输入更高分辨率的地表覆被数据、土壤数据、降水格网数据等, 以获取更加精细和准确的城市洪涝缓解能力评估结果。

5 参考文献

- [1] 宋晓猛, 张建云, 贺瑞敏, 等. 北京城市洪涝问题与成因分析[J]. 水科学进展, 2019, 30(2): 153
- [2] 谢映霞. 城市排水与内涝灾害防治规划相关问题研究[J]. 中国给水排水, 2013, 29(17): 105
- [3] 宋晓猛, 张建云, 王国庆, 等. 变化环境下城市水文学的发展与挑战: II. 城市雨洪模拟与管理[J]. 水科学进展, 2014, 25(5): 752
- [4] SHEN S, CHENG C X, SONG C Q, et al. Spatial distribution patterns of global natural disasters based on biclustering[J]. Natural Hazards, 2018, 92(3): 1809
- [5] 徐宗学, 叶陈雷. 从“城市看海”到“城市看江”: 极端暴雨情景下福州市洪涝过程模拟与风险分析[J]. 中国防汛抗旱, 2021, 31(9): 12
- [6] 汪梦涵, 赫晓慧, 郭恒亮. 土地利用数据分辨率对SCS模型在径流模拟中的影响[J]. 人民珠江, 2020, 41(10): 30
- [7] 李佩君, 左德鹏, 徐宗学, 等. 济南市降水变化特征分析及其与土地利用变化的关系[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2019, 55(5): 572
- [8] 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
- [9] 孟丹, 官辉力, 李小娟, 等. 北京7·21暴雨时空分布特征及热岛-雨岛响应关系[J]. 国土资源遥感, 2017, 29(1): 178
- [10] 李孝永, 匡文慧. 北京城市土地利用/覆盖变化及其对雨洪调节服务的影响[J]. 生态学报, 2020, 40(16): 5525
- [11] 韩宝龙, 欧阳志云. 城市生态智慧管理系统的生态系统服务评估功能与应用[J]. 生态学报, 2021, 41(22): 8697
- [12] NEDKOV S, BURKHARD B. Flood regulating ecosystem services—Mapping supply and demand, in the Etropole municipality, Bulgaria[J]. Ecological Indicators, 2012, 21: 67
- [13] STÜRCK J, POORTINGA A, VERBURG P H. Mapping ecosystem services: the supply and demand of flood regulation services in Europe[J]. Ecological Indicators, 2014, 38: 198
- [14] MORI S, PACETTI T, BRANDIMARTE L, et al. A methodology for assessing spatio-temporal dynamics of flood regulating services[J]. Ecological Indicators, 2021, 129: 107963
- [15] 姚磊, 卫伟, 于洋, 等. 基于GIS和RS技术的北京市功能区产流风险分析[J]. 地理学报, 2015, 70(2): 308
- [16] XU C, RAHMAN M, HAASE D, et al. Surface runoff in urban areas: the role of residential cover and urban growth form[J]. Journal of Cleaner Production, 2020, 262: 121421
- [17] PAMUKCU-ALBERS P, UGOLINI F, LA ROSA D, et al. Building green infrastructure to enhance urban resilience to climate change and pandemics[J]. Landscape Ecology, 2021, 36(3): 665
- [18] 杨钢, 徐宗学, 赵刚, 等. 基于SWMM模型的北京大红门排水区雨洪模拟及LID效果评价[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2018, 54(5): 628
- [19] 张旭兆, 林蓉璇, 徐辉荣, 等. 基于MIKE URBAN的广州市东濠涌片区暴雨内涝模拟研究[J]. 人民珠江, 2019, 40(7): 12
- [20] 黄国如, 王欣, 黄维. 基于InfoWorks ICM模型的城市暴雨内涝模拟[J]. 水电能源科学, 2017, 35(2): 66
- [21] 廖佳卉, 周安娜, 裘鸿菲. 城市绿地雨洪调蓄能力研究综

- 述[J]. 华中建筑, 2020, 38(8): 5
- [22] SHEN J, DU S Q, HUANG Q X, et al. Mapping the city-scale supply and demand of ecosystem flood regulation services: a case study in Shanghai[J]. *Ecological Indicators*, 2019, 106: 105544
- [23] 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
- [24] 游庆龙, 康世昌, 李剑东, 等. 青藏高原气候变化若干前沿科学问题[J]. *冰川冻土*, 2021, 43(3): 885
- [25] 曹瑜, 游庆龙, 马茜蓉, 等. 青藏高原夏季极端降水概率分布特征[J]. *高原气象*, 2017, 36(5): 1176
- [26] HU S, ZHOU T J. Skillful prediction of summer rainfall in the Tibetan Plateau on multiyear time scales[J]. *Science Advances*, 2021, 7(24)
- [27] 高卿, 苗毅, 宋金平. 青藏高原可持续发展研究进展[J]. *地理研究*, 2021, 40(1): 1
- [28] PAN X H, WANG Y H, LIU Z F, et al. Understanding urban expansion on the Tibetan Plateau over the past half century based on remote sensing: the case of Xining City, China[J]. *Remote Sensing*, 2020, 13(1): 46
- [29] 张懿锂, 刘林山, 王兆锋, 等. 青藏高原土地利用与覆被变化的时空特征[J]. *科学通报*, 2019, 64(27): 2865
- [30] 袁喆, 李艳, 杨志勇, 等. 近50年来西藏极端降水时空变化特征[J]. *水利水电技术*, 2014, 45(10): 19
- [31] 李红梅, 李林. 2℃全球变暖背景下青藏高原平均气候和极端气候事件变化[J]. *气候变化研究进展*, 2015, 11(3): 157
- [32] 多典洛珠, 周顺武, 郑丹, 等. 2005—2017年拉萨小时降水变化特征[J]. *干旱区地理*, 2020, 43(6): 1467
- [33] 拉萨市人民政府. 拉萨市防洪预案[A/OL]. (2010-06-07) [2022-02-27]. <https://sjj.lasa.gov.cn/lasa/yjgl/201006/3040e90fcb84edfa32e2d601ce9ea34.shtml>
- [34] 赵若, 索次. 拉萨部分县区遭受洪涝灾害: 受灾地县、乡政府及时组织抢险, 干部群众积极投入防汛抢险中[N]. *拉萨晚报*, 2010-07-16(9)
- [35] LUAN W F, LI X. Rapid urbanization and its driving mechanism in the Pan-Third Pole region[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 750: 141270
- [36] TANG W, ZHOU T C, SUN J, et al. Accelerated urban expansion in Lhasa City and the implications for sustainable development in a plateau city[J]. *Sustainability*, 2017, 9(9): 1499
- [37] CHEN Y D, GUO F, WANG J C, et al. Provincial and gridded population projection for China under shared socioeconomic pathways from 2010 to 2100[J]. *Scientific Data*, 2020, 7(1): 83
- [38] PAN X D, ZHANG L, HUANG C L. Future climate projection in northwest China with RegCM4.6[J]. *Earth and Space Science*, 2020, 7(2)
- [39] ROSS C W, PRIHODKO L, ANCHANG J, et al. HYSOGs250m, global hydrologic soil groups for curve-number-based runoff modeling[M/OL]. (2018-05-06) [2022-02-27]. ORNL Distributed Active Archive Center, 2018. https://daac.ornl.gov/cgi-bin/dsvviewer.pl?ds_id=1566. DOI: 10.3334/ORNLDAAC/1566
- [40] MEENTEMEYER R K, TANG W W, DORNING M A, et al. FUTURES: multilevel simulations of emerging urban-rural landscape structure using a stochastic patch-growing algorithm[J]. *Annals of the Association of American Geographers*, 2013, 103(4): 785
- [41] DAI K X, SHEN S, CHENG C X, et al. Trade-off relationship of arable and ecological land in urban growth when altering urban form: a case study of Shenzhen, China[J]. *Sustainability*, 2020, 12(23): 10041
- [42] SHOEMAKER D A, BENDOR T K, MEENTEMEYER R K. Anticipating trade-offs between urban patterns and ecosystem service production: scenario analyses of sprawl alternatives for a rapidly urbanizing region[J]. *Computers, Environment and Urban Systems*, 2019, 74: 114
- [43] SANCHEZ G M, TERANDO A, SMITH J W, et al. Forecasting water demand across a rapidly urbanizing region[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 730: 139050
- [44] 邓婧, 唐文武, 刘润润, 等. FUTURES: 一种新型区域城市增长模型[J]. *地理科学进展*, 2013, 32(1): 41
- [45] O'NEILL B C, KRIEGLER E, EBI K L, et al. The roads ahead: narratives for shared socioeconomic pathways describing world futures in the 21st century[J]. *Global Environmental Change*, 2017, 42: 169
- [46] 周天军, 张文霞, 陈晓龙, 等. 青藏高原气温和降水近期、中期与长期变化的预估及其不确定性来源[J]. *气象科学*, 2020, 40(5): 697
- [47] LUN Y R, LIU L, CHENG L, et al. Assessment of GCMs simulation performance for precipitation and temperature from CMIP5 to CMIP6 over the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(7): 3994
- [48] AYUGI B, JIANG Z H, ZHU H H, et al. Comparison of CMIP6 and CMIP5 models in simulating mean and extreme precipitation over East Africa[J]. *International Journal of Climatology*, 2021, 41(15): 6474
- [49] NATURAL CAPITAL PROJECT. Urban Flood Risk Mitigation model-InVEST documentation[EB/OL]. (2021-03-15) [2021-09-09]. http://releases.naturalcapitalproject.org/invest-userguide/latest/urban_flood_mitigation.html
- [50] 唐中楠, 杨国丽, 李军, 等. 基于文献计量学的中国流域SCS模型研究现状分析[J]. *人民长江*, 2021, 52(10): 95
- [51] 符素华, 王向亮, 王红叶, 等. SCS-CN径流模型中CN值确定方法研究[J]. *干旱区地理*, 2012, 35(3): 415
- [52] YANG X, YOU X Y, JI M, et al. Influence factors and prediction of stormwater runoff of urban green space in Tianjin, China: laboratory experiment and quantitative theory model[J]. *Water Science and Technology: a Journal*

- of the International Association on Water Pollution Research, 2013, 67(4): 869
- [53] HAMEL P, GUERRY A D, POLASKYS, et al. Mapping the benefits of nature in cities with the InVEST software [J]. *Npj Urban Sustainability*, 2021(1): 25
- [54] KADAVRUGU A, NAGESHWAR R C, VISWANADH G K. Quantification of flood mitigation services by urban green spaces using InVEST model: a case study of Hyderabad City, India[J]. *Modeling Earth Systems and Environment*, 2021, 7(1): 589
- [55] LI F Z, CHEN J Q, LIU Y Z, et al. Assessment of the impacts of land use/cover change and rainfall change on surface runoff in China[J]. *Sustainability*, 2019, 11(13): 3535
- [56] YAO L, CHEN L D, WEI W, et al. Potential reduction in urban runoff by green spaces in Beijing: a scenario analysis[J]. *Urban Forestry & Urban Greening*, 2015, 14(2): 300
- [57] LI C L, LIU M, HU Y M, et al. Effects of urbanization on direct runoff characteristics in urban functional zones[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 643: 301
- [58] 吴健生, 张朴华. 城市景观格局对城市内涝的影响研究: 以深圳市为例[J]. *地理学报*, 2017, 72(3): 444

Assessment of urban flood mitigation capacity on the Qinghai-Tibet Plateau: the case of Lhasa City

DAI Kaixuan¹⁾ SHEN Shi¹⁾ CHENG Changxiu^{1, 2)}
 GENG Jiachen¹⁾ ZHANG Tianyuan¹⁾

(1) State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Key Laboratory of Environmental Change and Natural Disaster, Center for Geodata and Analysis, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

2) National Tibetan Plateau Data Centers, Beijing Normal University, 100101, Beijing, China)

Abstract Precipitation on the Qinghai-Tibet Plateau has shown an overall increasing trend in recent years, both the intensity and frequency of extreme precipitation events have increased. Continued expansion of plateau cities have affected hydrological cycles, this coupling effect exacerbates the risk of urban flooding. Historical and future changes in flood mitigation capacity of Lhasa city were quantitatively assessed here, by coupling FUTURES urban expansion simulation model and urban flood mitigation capacity assessment model, to integrate different climate change and urban expansion scenarios. It was found that from 2000 to 2015 overall flood mitigation capacity of Lhasa city had decreased by 42.70%. In particular, Chengguan and Dulongdeqing districts each decreased 4.63% and 8.55%, respectively, but mitigation capacity of Dazi district increased 1.13%. Future flood mitigation capacity in Chengguan District was found to have decreased by an average of 15.01% and 29.52% under RCP4.5 and RCP8.5 scenarios, while in Duilongdeqing District it decreased by 16.16% and 31.95%. The new urban land in Chengguan and Duilongdeqing districts has had their mitigation capacity reduced by more than 50% compared to original natural surface. Measures to protect water bodies in urban expansion will likely reduce further degradation of mitigation capacity. Future urban expansion will lead to significant reduction in future flood mitigation capacity in Lhasa city, while climate change will further amplifies its degradation. In Lhasa city the trend of urban construction to expand into water bodies and grasslands must be curbed in the future, and urban land use efficiency must be improved. Construction of green infrastructure within the city will need to be strengthened, standard of flood control and drainage facilities will need to be improved to cope with possible extreme precipitation events due to climate change.

Keywords extreme precipitation; urban flooding; urban expansion; FUTURES model; InVEST-UFRM model

【责任编辑: 刘先勤】