

河网型城市土地利用对水安全的影响及其优化管控

——以岳阳市为例

杨帆 李祝 罗文丽¹

(中南大学建筑与艺术学院, 中国湖南 长沙 410075)

【摘要】: 在快速城镇化背景下, 流域城镇空间的高强度建设开发不仅推动经济社会发展, 同时也对流域的水生态系统造成深远的负面影响。流域内河网型城市建设用地面积急剧扩张、填埋大量支流等不合理的土地利用方式对城市水安全影响尤为显著。文章以典型河网型城市——岳阳市为例, 总结其 1990—2018 年以来土地利用的总体演变特征, 探究岳阳市土地利用方式对城市水安全的影响规律, 发现建设用地扩展规模和强度与水生态安全等级呈显著反相关关系, 进而构建水安全约束条件下岳阳市建设扩展适宜性评价体系, 依据评价结果划定城镇建设用地适宜建设区、较适宜建设区、较不适宜建设区、禁止建设区面积分别为 2551.52km²、3338.23km²、4858.59km²、3974.66km², 最后针对岳阳市建设扩展现状建立管控与问题反馈机制。

【关键词】: 河网型城市 生态阻力面 分级管理制度

【中图分类号】: F293.2 **【文献标志码】:** A **【文章编号】:** 1000-8462 (2021) 08-0177-10

快速城市化背景下我国各流域水环境破坏日益严重。流域高强度城镇扩张与重点开发区的建设, 导致流域水资源短缺、水质污染以及洪涝灾害等水环境安全问题更加突出。我国河网型城市广泛分布于长江中游、长江三角洲、珠江三角洲等地, 占全国城市约为 10.74%。其复杂水系构成的河网型地区是影响流域水安全水平的典型区域, 同时是我国城市化过程中经济发展与环境保护矛盾问题最为突出的区域^[1]。为此, 提出以水安全为主导约束城市土地利用的方式, 成为流域环境管理与可持续发展方向的领域热点关注和趋势之一。其相关研究主要围绕水环境治理方法、影响机制和城市空间管控三方面展开。一是关于水环境治理方法的研究。此方面美国在 20 世纪后期提出了可持续河流规划的治理理念。GeraldE 等基于 1993 年密西西比河的洪水情况提出了城市经济、文化以及生态可持续交叉融合的河流治理模式^[2]。德国针对河道治理的植物化和生命化需求提出“近自然河流治理”工程, 提升河流水环境自身的净化能力^[3]。日本对于河湖流域的建设倡导多自然型建设, 为此提出了“创造多自然型河川计划”, 强调用生态工程的方法治理水环境。我国自 1999 年水利部汪恕诚部长提出“人与自然和谐共处”的治理理念后, 一直延续该理念进行对水利工作的指导, 促进河流的综合治理和生态建设^[4]。二是关于城市土地利用对水环境的影响研究。Wolman 于 1967 年研究发现城镇化初期建导致土壤侵蚀加剧、河道泥沙淤积; 城市化中后期建设用地扩张侵蚀农业用地致使水土流失量减少, 而地表不透水面积增加导致径流量增大。2006 年 Alberti 等人通过分析水生态系统与土地开发强度和类型等城市土地结构的关系, 发现了二者间显著的相关性。2018 年姜畅等人以红枫湖流域为例, 研究了不同土地类型对水环境的影响, 发现该流域水质污染主要原因是由城镇工业、生活以及农业等污染源造成的^[5]。三是关于流域内城市空间管制的研究。针对流域空间进行合理的管控规划, 有利于实现水生态系统的可持续健康发展^[6], 其中美国环保局于 1987 年建立了一套基于水生态环境区划的水安全技术方法与管理体制^[7], 澳大利亚于 1997 年利用水生态环境管制分区来指导水生态调查以及城市空间结构优化^[8]。赵海

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (72174211); 国家自然科学基金青年项目 (51608535); 湖南省自然科学基金项目 (2018JJ3667); 湖南省研究生教改课题 (2020JGB139); 湖南省社会科学基金项目 (19YBA347)

作者简介: 杨帆 (1982-), 女, 湖南岳阳人, 博士, 副教授, 硕士生导师, 研究方向为大湖流域水生态与国土空间规划。E-mail: 582228988@qq.com

霞、蒋晓威等国内学者利用 GIS 空间分析技术，以格网为评价单元，对巢湖环湖带进行水生态敏感性和压力两者协同约束下的空间管制分区研究^[9-10]。

我国对城市土地利用规划与水环境效应的研究已日渐丰富，相关文献已涉及流域尺度上土地利用空间管制方法的思考。但不容忽视的是土地利用与水生态保护研究仍存在几大空白区域：在生态文明大背景下，探索城市土地利用与水安全等级的关系是水生态治理的根本保障，其驱动和约束机制有待深入研究^[11-14]。但较少提出从水安全角度来约束城市土地的发展模式，鉴于此，本文针对具有突出水安全问题的河网型城市，对土地利用演变过程与水系的耦合关系进行深入研究，探索从水生态安全底线约束角度下的城市土地利用进行适宜性情景模拟，并提出河网型城市土地利用模式针对性的优化策略，研究对具有此类特征的区域改善河湖及流域内水安全和科学规划土地利用具有一定的借鉴意义。

1 河网型城市土地利用对水安全的影响

1.1 传统河网型城市开发建设活动引发的水安全问题

传统河网型城市开发在人类生产生活的影响下，其建设空间具有地势平坦低洼地带建造、紧邻水系、依水系结构平摊等特点，1980 年代以来，河网型城市在高频率地开发经济价值较高的滨水土地后，导致流域内河网水系的结构出现河网调蓄能力下降^[12-14]、末端河流消失、河网形态破碎化等水环境问题，进而打破流域整体尺度上的水系格局，威胁到流域整体的水安全水平。

快速城市化背景下，河网型城市的围水、填水活动及建设用地的大量开发会继续加剧水质恶化，甚至会影响到人类社会的可持续发展，其中城市的建设扩展剧变是导致流域内水生态平衡被打破的重要原因（图 1）。为了流域系统及人类的健康，以水生态功能为导向管控建设扩展可成为解决水安全问题的有效途径。

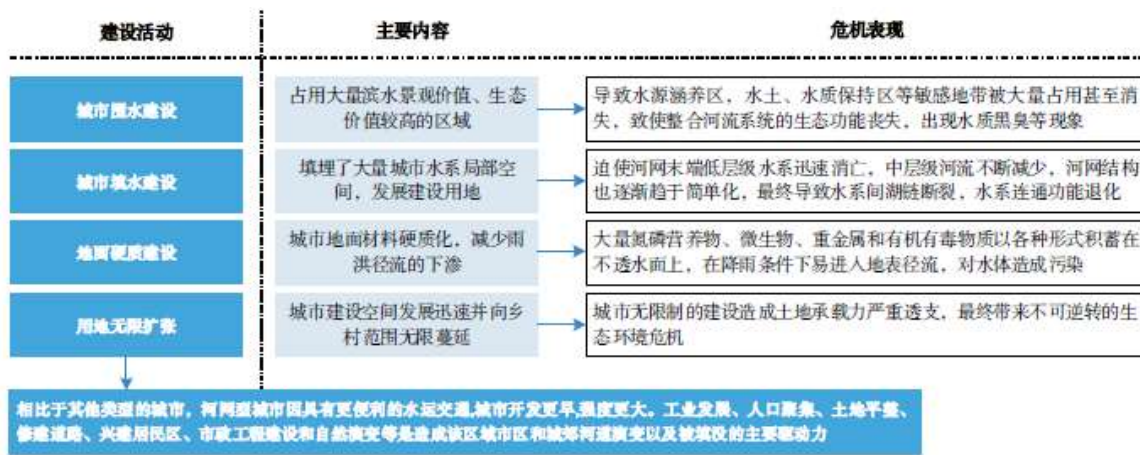


图 1 河网型城市开发建设活动影响水安全的主要表现

1.2 河网型城市土地利用对水安全的影响认知

平原水网地区自然地理环境复杂，水生态环境受到集水区点源与非点源污染的影响之外，很大程度上还受河流流向变化、上游来水水质等干扰，因此增加了土地利用方式对河流水安全影响的评判难度。已有大量研究对城镇土地利用格局与水环境之间的关系进行了研究，表明土地利用/覆被类型与水安全之间是存在紧密关系的，土地利用的方式及其土地覆被类型可以显著地影响水安全。本文主要考虑从分析城市土地规模、类型及形态变化对水环境质量的改变来反馈河网型地区水安全的影响机制^[15-18]。

1.2.1 土地利用规模对水环境产生的影响效应

土地利用规模是指非建设用地与建设用地等不同用地类型的数量及所占比例。其不同的用地结构和数量配比对水生态环境有着不同程度的影响。对于河网型城市而言，城市发展与建设的早期存在着比例较大的亲水开发与建设，其不透水表面的修建规模和数量较大。为此导致了城市内部河岸带植被破坏，径流内平均温度上升，进而破坏了城市水环境及其生态系统的健康。随着城镇化过程中河网型城市开发强度的增大，其逐渐出现了日益复杂的水系结构和不断恶化的水生态环境。其水系变化显著特征主要为大型水系面积减少、沟渠等零散水系被填埋或侵蚀，以及河网地区整体水系结构变得较为单一^[19-22]。

1.2.2 土地利用类型对水环境产生的影响效应

河网型城市土地利用类型对水环境的影响也呈现不同的效应，其中建设用地和非建设用地对水环境分别存在着负向和正向的效应。本文把居住、工业、公共和交通等用地对水环境的影响作为重点分析，明晰其不同用地类型的影响输出特征，进而对水环境关键区域的识别提供基础。众多研究表明在建设用地和非建设用地中，建设用地类型与 TP 和 TN 等指标有着明显的正相关关系，而非建设用地则呈现负相关关系，快速城镇化阶段，河网型城市较其他类型城市具有的建设用地剧增的显著特征，导致区域内水环境质量恶化呈明显加速态势。

1.2.3 土地利用形态对水环境产生的影响效应

综上所述，建设用地和非建设用地都对水环境有着不同程度的影响，在河网地区更加显得突出，主要有两个方面：①河网型城市的开发与建设早期因经济收益而不断侵蚀滨水空间，水域邻接的边界逐渐被建设用地侵占，导致颗粒状态的 TP 等物质无法在水域外沉降而大量快速地进入到水域中。②对于非建设用地，主要呈现破碎化和简单的形态化，导致水环境中 COD 和 BOD 浓度积累较高。为此，针对非建设用地的布局而言，为了达到较好的水环境质量大多采用大集中小分散的布局形式。对于高敏地区则划定一定适宜密度的非建设用地斑块，以更好地保持各类水环境指标的良好状态。总体而言，城市水环境下适度紧凑集中的建设用地和非建设用地布局形态，具有良好的生态环境意义^[23-24]。

2 基于水安全提升的河网型城市土地利用管控路径

基于对河网型城市土地利用与水环境关系的深入分析，表明河网型城市不合理的土地利用对水安全的影响尤为突出。故提出从优化水安全目标来管控城市土地利用的方式（图 2）。水安全提升目标导向下的土地利用管控路径分为三步：①基于 GIS 平台，处理土地利用和水环境相关的数据，完成底图底线底板搭建工作，深入了解建设扩展与城市水环境的驱动和约束机制，为水生态保护提供依据。②构建水安全导向下的河网型城市土地利用的生态适宜性评价体系，建立一套刚性弹性结合的全域土地管控体系。③提出水安全提升目标下土地利用的精细化管控内容，落实土地利用的分区管控，采取“源头防治”的途径减少水污染。

3 案例实证研究

本文选取河网型城市——岳阳市 1990、2000、2010、2018 年四期水系及城市用地数据，基于各级河网发育变化情况，得出同期水安全格局与土地扩张尤其是建设用地扩展叠加进行对比，识别城市急速发展与水安全变化冲突点及区域，探索河网型城市水安全导向下的土地利用管控实践路径。

3.1 研究区概况

本文研究范围为长江干流沿线的岳阳市区域，地形以平原为主，其间水网密布，具有典型的河网特征。岳阳全市地域东西

横跨 177.83km，南部纵长 157.86km，土地总面积 15087km²。其主要水系位于长江中游右岸，河长（干流航道长度）163km，是国内重要的内河黄金航运水道，也是湖南省对接“一带一路”倡议、融入长江经济带的重要水上通道。

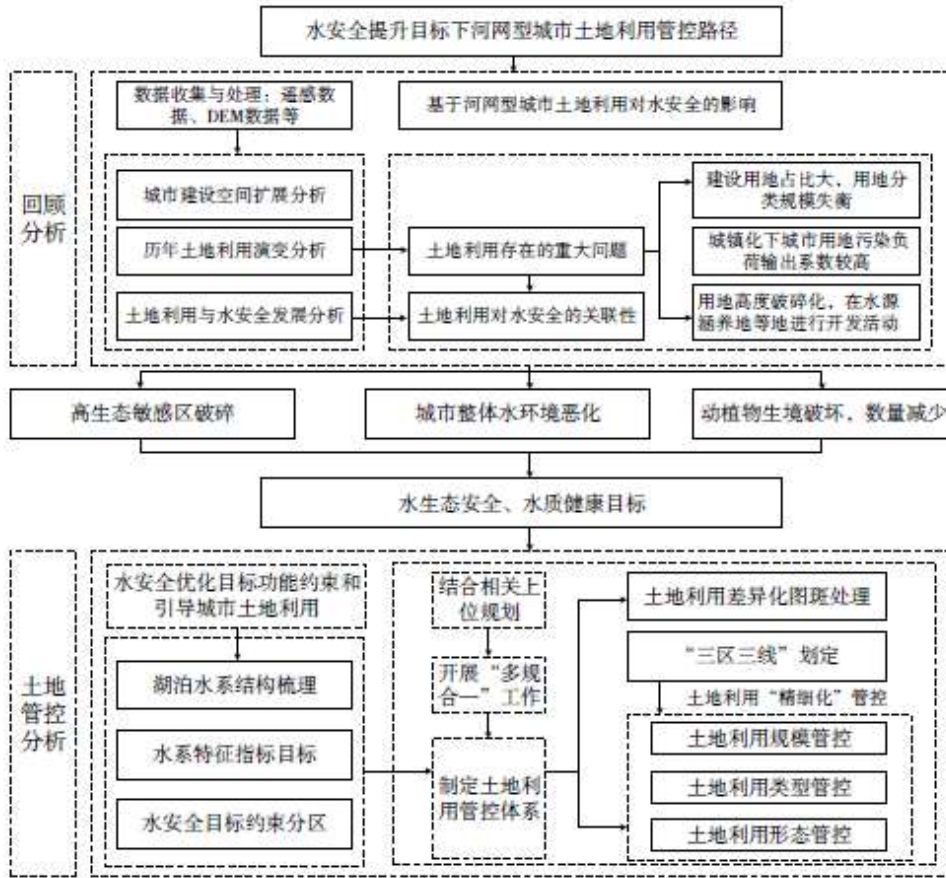


图 2 水安全提升目标下河网型城市土地利用管控路径图

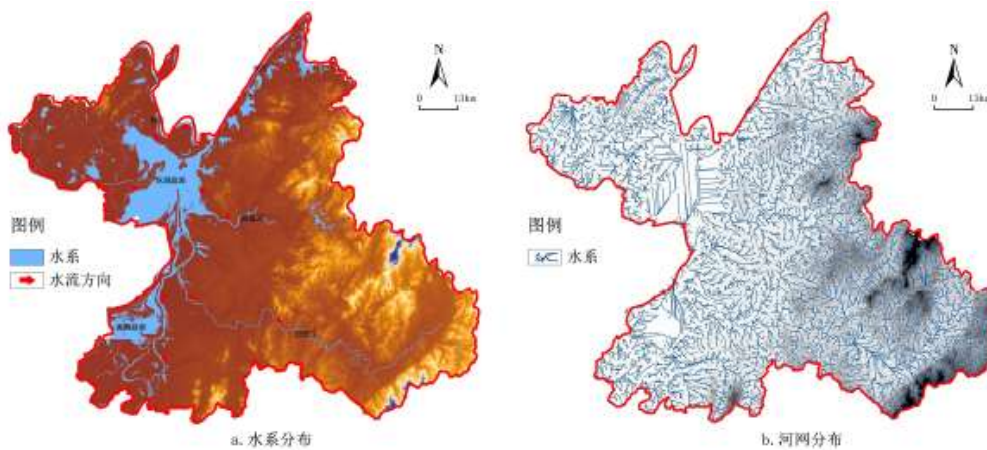


图 3 岳阳市境内水系及河网分布图

3.2 岳阳城市用地发展演变过程

近 30 年来，岳阳市开发建设迅速，城市土地利用格局变化显著。总体上，岳阳市 1990—2018 年的城乡建设用地面积明显增加，相对的是水域与自然保留地面积明显减少，城市生态系统平衡遭到严重破坏，城市用地扩张的趋势明显。

为进一步明确岳阳市在 1980—2018 年历史阶段土地利用的总体演变特征，利用 ArcGIS 软件导入 1990、2000、2010、2018 年 4 个年份的土地利用数据，将每种土地利用类型变化进行对比分析，构建岳阳市 1990—2018 年土地利用转移矩阵（图 4）。

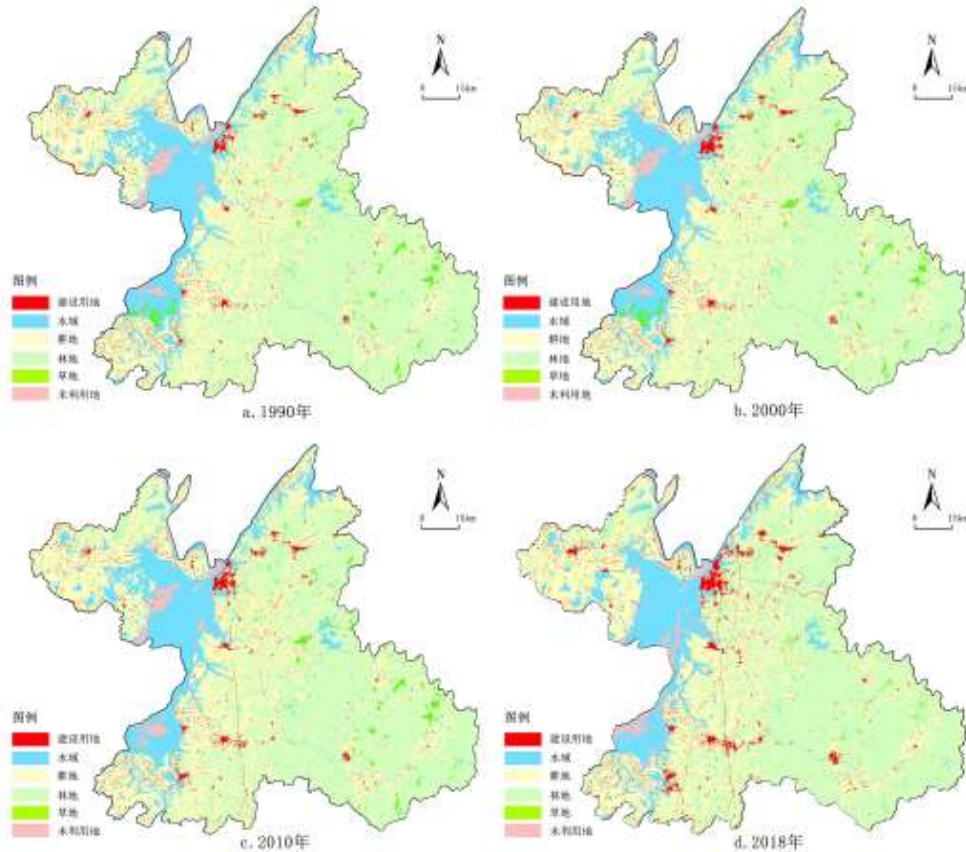


图 4 岳阳市 1990、2000、2010、2018 年土地利用变化图

从时间尺度来看，在岳阳城市的发展和扩展过程中，水域与建设用地、未利用地等的矛盾十分尖锐。1990—2018 年水域向建设用地转移的土地利用类型的面积逐年增加（图 5），速度也明显加快，建设用地的扩张会导致不透水层大面积增加，水环境容量和对污染物的稀释、吸纳能力严重降低，将会对洞庭湖水生态系统的健康造成巨大压力。水生态系统是洞庭湖生态的核心，管控城镇建设用地无序扩张也是洞庭湖流域综合治理的重要目标。

3.3 岳阳城市土地利用与水安全的关联性分析

3.3.1 岳阳市土地利用与水生态安全格局的关联

综上所述，岳阳市土地建设扩展占用了大面积的水域用地，导致湖泊水系结构被破坏；为进一步识别岳阳市土地利用变化胁迫水生态安全的关键空间，以对其城镇土地利用提出精细化的优化管控策略提供依据。本文选取岳阳市高程、坡度土地覆被、洪涝灾害、水源涵养等水生态阻力的重要因子（图 6），构建了岳阳市全域范围的水生态安全格局评价指标体系。权重的赋值根据专家打分法和层次分析法（AHP），借助 ArcGIS 进行栅格计算，结果根据自然间断法得到 5 个安全格局等级。

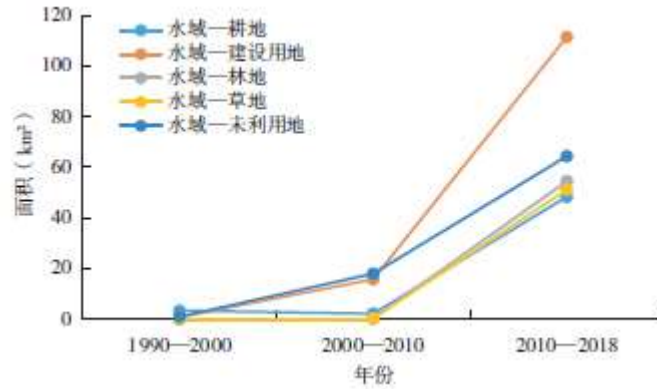


图5 1900—2018年岳阳市水域转其他类型用地变化趋势图

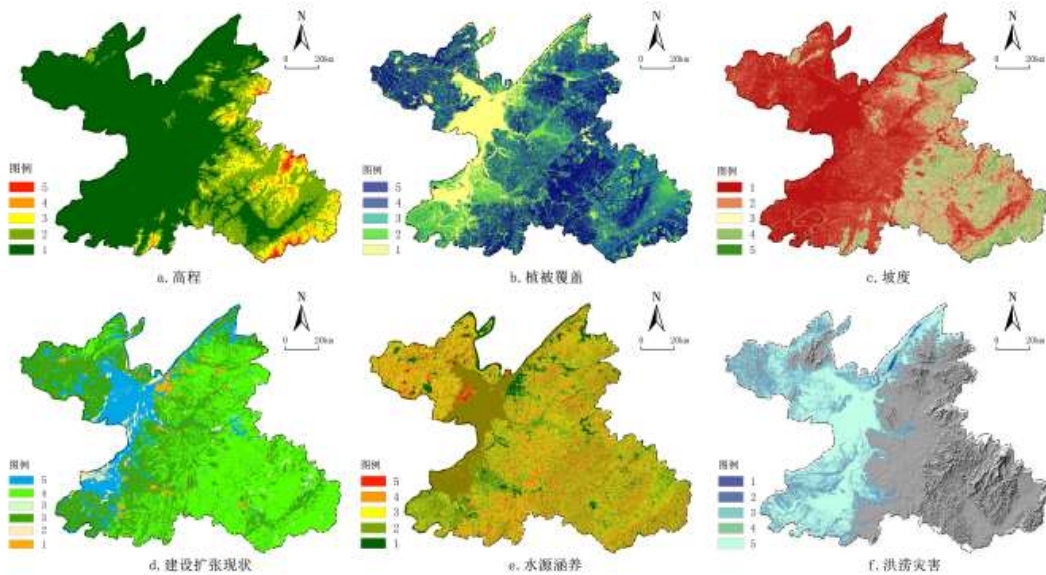


图6 水生态阻力重要因子

利用 ArcGIS10.2 空间分析工具对岳阳市 2018 年土地建设用地与水生态安全格局进行叠加分析（图 7），从图中可以看出，岳阳市 2018 年中心城区建设用地几乎都布局在水生态安全格局中的低安全或较低安全区域，仅有小部分区域分布在一般耕地以及山地等高水平安全区内。总体来说，岳阳市的城镇建设用地发展与水生态安全格局中的适宜建设区有一定的差异性，其土地利用的格局亟待优化管控。

3.3.2 水安全主导约束的岳阳市土地适宜性评价

具有丰富水网结构的岳阳市内部的土地用地扩展与水安全格局存在着较大冲突，在治理洞庭湖面积日益萎缩、洪涝调蓄能力减弱严峻情况的背景下，探索水安全主导约束下的湖区城镇土地建设扩展适宜性尤为重要，也是水生态功能保护的有效手段。以下将通过构建岳阳市建设用地扩张的阻力评价体系，应用最小累计模型（MCR）进行水安全导向下的城镇土地建设适宜性情景模拟研究。

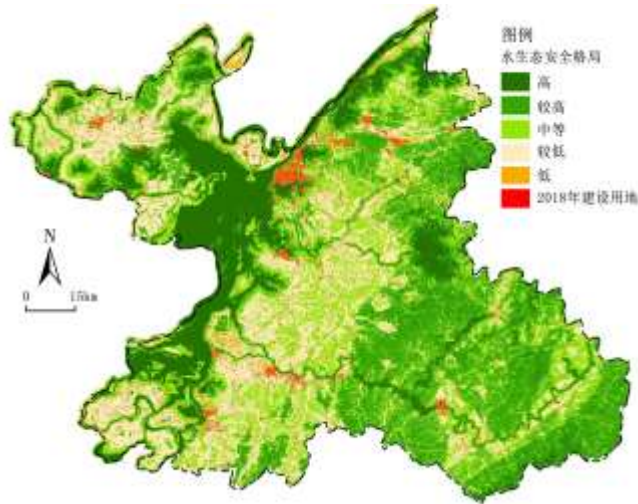


图 7 岳阳市水生态安全格局与建设用地叠加图

3.3.2.1 阻力因子及评价体系构建

结合岳阳市自然地理特征，其城镇土地建设发展的阻力因素重点考虑基于水生态安全格局、地质灾害易发性、生物多样性功能重要性为生态阻力因子及交通缓冲区的社会经济阻力指标因子。一般而言，水生态价值越高、地质灾害极易发、生物多样性重要等级越高的区域越不适宜于城镇建设，而越适宜生态用地扩展。

①地质灾害阻力因子：岳阳市地质灾害类型主要为山体滑坡与泥石流，相关研究表明，这两种灾害与地形地貌、植被覆盖度及人类工程活动密切相关，故借鉴前人的研究成果^[25]选取致灾因子分别进行赋值，再依据阻力面评价体系对不同等级的地质灾害易发程度进行阻力基面赋值。

②生物多样性阻力因子：由于生物多样性服务功能较高的地区能为物种生存提供较好的生境，不同土地利用类型能提供的生物多样性保护的服务存在差异，本研究根据谢高地等对不同土地利用类型的生物多样性服务价值当量的研究^[26]，计算岳阳市六类土地利用类型的生物多样性功能的重要性。并基于气象及高程数据对其进行修正。

③道路交通阻力因子：距道路距离采用高速路、铁路、一级公路、二级公路等不同道路类型，按距离大小赋值建立阻力基面。

本文选取的影响岳阳市土地建设扩展的地质灾害、生物多样性等生态阻力因子、道路交通等社会阻力因子基面生成结果依次如图 8。

本研究在评价城镇扩展的单个指标的阻力值时，将阻力值分成 5 个等级，分别用 1、2、3、4、5 表示相对阻力大小，阻力值的赋予和阻力因素的分层方法参考叶玉瑶等在城市扩展模拟中构建生态阻力面的方法^[27]，权重设置充分体现岳阳市域内资源条件的分异特点和内在差异性，对岳阳市土地建设扩展具有较高影响的指标赋以较高的权重，对于那些相对不够稳定，或者能够通过工程技术条件改变的指标赋以较低的权重。

3.3.2.2 土地建设扩展适宜性评价结果

通过 ArcGIS10.2 软件的 costdistance 模块分别模拟出岳阳市建设源地扩张的最小累积阻力表面（图 9）。

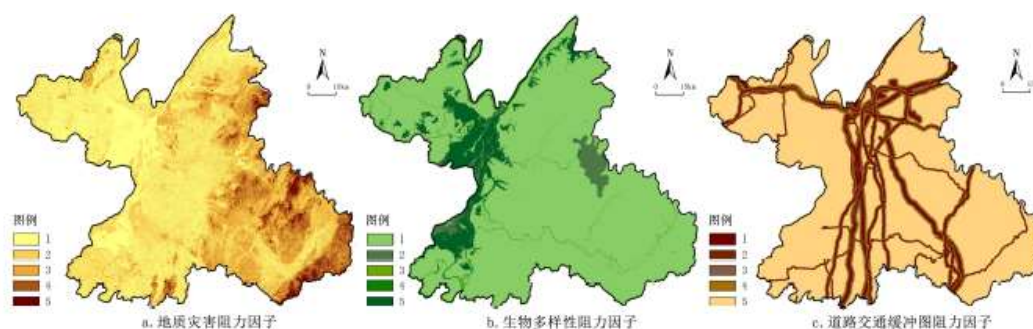


图 8 阻力因子基面

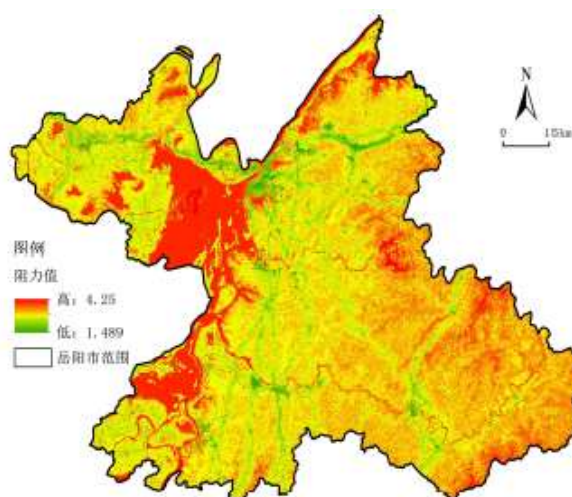


图 9 建设源地扩张阻力基面

基于建设源地的最小累计阻力值结果，为遵循岳阳市内江、湖、河、库水系本底特征，顺应水系格局，稳固湖区蓝色生态基底的基础上，优化岳阳市土地建设扩展空间，基于 ArcGIS 软件将湖泊水系、重大自然保护地、基本农田等生态红线保护区作为城镇用地扩展的底线，与建设源地最小累计阻力值结果进行最大值镶嵌叠加，得到修正之后的岳阳市土地建设扩展的适宜性结果，如图 10。

岳阳市范围内共有建设用地适宜性建设和较适宜建设区域面积为 2551.52km²、3338.23km²，分别占总面积的 17.33%和 22.68%，主要分布于中部的平原区，较适宜区域环绕于适宜区周边，两者受经济社会因素影响较大；较不适宜、禁建区占总面积的 33.33%、26.66%，主要为临近湖泊、河流、重大生态保护区域，主要受生态环境因素的制约。

在给岳阳市各区县划定水安全约束主导下的土地建设适宜性建设范围后，可为未来的城镇开发边界合理性方案提供一定的依据，提前为城市内各类空间的分布及设施的规划布局提供参考，进而对后续的岳阳市土地利用管控措施研究进行引导。

3.4 基于水安全提升的岳阳市土地利用管控措施

岳阳城市现状土地的粗放利用及针对水资源专项保护的城市编制规划极度缺乏，影响到洞庭湖水环境甚至长江流域整体的水生态系统安全，亟待编制自然资源保护专项规划及城市发展模式转型。对标《岳阳市城市规划区山体水体保护条例》，同时基于上述土地建设扩展适宜性评价结果，从多尺度管控用地规划、多层次分区分管控以及多目标评估反馈等方面进行转型创新，实现水安全目标优化下的岳阳城市土地利用优化管控实践。

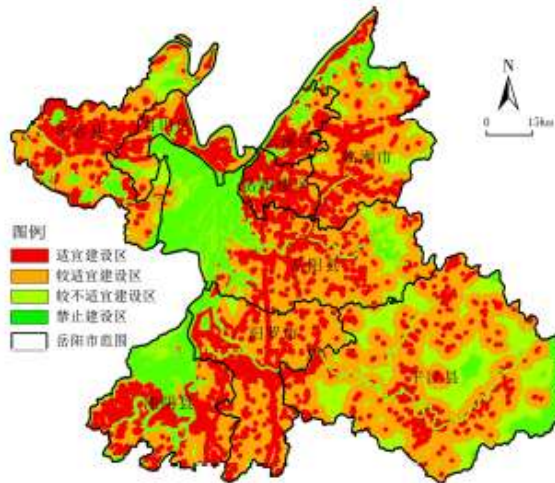


图 10 水安全主导约束下岳阳市土地建设扩展格局适宜性结果

3.4.1 多尺度管控用地规划

避免无序开发、科学管控建设空间。在岳阳市相关规划的基础上，以适宜性评价为依据划定城镇增长边界，健全城镇增长边界管控机制。引导城乡建成用地调整优化和发展建设用地规划协调，对于已处于禁建区内的建设用地，应制定相应的拆迁政策，并对已破坏的生态进行恢复。限建区应当以保护为主，城市建设尽量避开限建区，鼓励在限建区内建设生态廊道、生态隔离带等生态基础设施。在城市内部的用地规划中，离自然水系及湿地等生态重要区域较近的范围应严格控制建设规模和类型，在河流缓冲带外可选取与水生态相容性较高的复合型用地布局。

3.4.2 多层次分区分管控

岳阳市的低水生态低安全水平作为水环境变化中最激烈和最易出现问题的地区，也是洞庭湖水环境系统可持续发展及进行水环境综合整治的最关键地区，特别是岳阳楼、云溪区等建设强度较高的区域亟须划定需要重点保护的水生态敏感范围，并划分管控等级，建立保护名录，有针对性地进行保护。科学划分洞庭湖水域空间保护的生态红线，并恢复被大面积侵蚀的天然水域空间，确保不再减少目前的天然水域面积。此外，对于岳阳市范围内包括自然保护区、饮用水水源保护区、风景名胜区等生态敏感点区域，进一步划分多层次的管控区，实行有效的分级管理制度。

3.4.3 多目标评估反馈

在当前提倡生态文明改革的总体框架下，为充分衔接上位已有的水利改革基础，保障河网型城市建设扩展管控规划的顺利实施、建设管控的现实需求以及规划落实后期的反馈和调整等内容，亟须针对城市总体土地利用进行综合管控评估与反馈。

为保障在城市建设扩展下水环境质量提升的实现，本文从决策—规划—行动三个部分建立河网型城市土地管控的评估反馈体系，以宏观流域管理目标指导区域及城市土地管控办法，建立统一的土地管理与协调机构进行法定管控，确保规划和条例同

步实施的可操作性，并及时进行土地管控实施效果评估与反馈（图 11）。

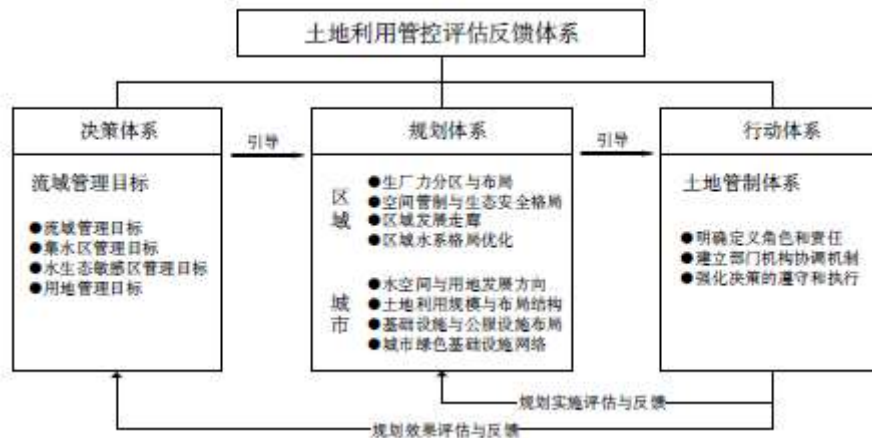


图 11 城市土地利用的管控评估及反馈体系

4 结语

进入生态文明时代，流域范围内建设与水生态系统的矛盾与挑战，如何科学地引导城市的进行合理的土地利用，特别是协调特殊地域—河网型城市建设用地保障与水生态环境的平衡关系已经成为当前流域生态学及流域国土空间规划方面急需解决的问题。本文以岳阳市为实例，进行水安全导向下的河网型土地利用优化管控研究，主要得到以下几种结论：①通过对岳阳市 1990—2018 年的土地总面积变化的定量分析，其中水域与自然保留地受到城市建设用地扩张影响较大，面积明显减少。此外，岳阳市的城镇建设用地发展与水生态安全格局中的适宜建设区有一定的差异性，大多处于低安全或较低安全区域。②借助最小累计模型（MCR）构建了水安全约束条件下岳阳市土地建设扩展的适宜性评价体系，并根据评价结果划定城镇建设用地适宜建设区、较适宜建设区、较不适宜建设区、禁止建设区等四类区域。③对比岳阳市现有规划管控成果，并基于水安全导向下的土地建设扩展的适宜性评价结果，提出多尺度管控用地规划、多层次分区管控以及多目标评估反馈等三类岳阳市建设扩展管控措施，进而实现水安全目标导向下的岳阳城市土地利用优化管控目标。

参考文献:

- [1]贺缠生, 傅伯杰. 美国水资源政策演变及启示[J]. 资源科学, 1998, 20(1): 71-77.
- [2]Gerald E, Galloway M. River basin management in the 21st century: Blending development with economic, and cultural sustainability[J]. Water International, 1997, 22(2): 82-89.
- [3]汪恕诚. 人与自然和谐相处——破解中国水问题的核心理念[J]. 今日国土, 2004, 22: 8-11.
- [4]焦胜, 曾光明, 何理, 等. 城市滨水区复合开发模式研究[J]. 经济地理, 2003, 23(3): 397-400.
- [5]Marina Alberti, Derek Booth, Kristina Hill, et al. The impact of urban patterns on aquatic ecosystems: An empirical analysis in Puget lowland sub-basins[J]. Landscape and Urban Planning, 2006, 80(4): 345-361.
- [6]姜畅, 刘鸿雁, 陈竹, 等. 基于 GIS 的红枫湖流域土地利用变化与水质响应[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(6): 1232-

1239.

[7]Omernik J M.Ecoregions of the conterminous united states[J].Annals of the Association of American Geographers, 1987, 77:118-125.

[8]Austrian Standards Institute.Guidelines for the ecological survey and evaluation of flowing surface waters[R].Vienna:Austrian Standards Norm M6232,1997:38.

[9]陈雯, 嵇振坤, 赵海霞, 等. 水环境约束分区与空间开发引导研究——以无锡市为例[J]. 湖泊科学, 2008(1):129-134.

[10]胡和兵. 城市化背景下流域土地利用变化及其对河流水质影响研究[D]. 南京:南京师范大学, 2013.

[11]张殷俊, 陈爽, 彭立华. 平原河网地区水质与土地利用格局关系——以江苏吴江为例[J]. 资源科学, 2009, 31(12):2150-2156.

[12]杨帆, 唐菲儿. 河网型城市雨洪生态空间规划:方法体系与控制框架——以岳阳市雨洪生态空间规划为例[J]. 城市发展研究, 2019, 26(8):23-30.

[13]叶强, 莫正玺, 许乙青. 1979—2014 年长沙市城市功能用地扩展与驱动力研究[J]. 地理研究, 2019, 38(5):1063-1079.

[14]张国平. 基于生态系统服务功能的龙河流域生态系统健康研究[D]. 重庆:重庆大学, 2006.

[15]焦胜, 魏春雨, 柳肃, 等. 长株潭城市群绿心保护性开发策略研究[J]. 经济地理, 2009, 29(10):1716-1719, 1742.

[16]崔丹, 陈岩, 马冰然, 等. 土地利用/景观格局对水环境质量的影响[J]. 水科学进展, 2019, 30(3):423-433.

[17]邹宇, 许乙青, 邱灿红. 南方多雨地区海绵城市建设研究——以湖南省宁乡县为例[J]. 经济地理, 2015, 35(9):65-71, 78.

[18]夏汉平. 论长江与珠江流域的水灾、水土流失及植被生态恢复工程[J]. 热带地理, 1999(2):29-34, 64.

[19]国家防汛抗旱总指挥部, 中华人民共和国水利部中国. 水旱灾害公报:2006[M]. 北京:中国水利水电出版社, 2007.

[20]Forman R T T, Godron M. Landscape Ecology[M]. New York:Wiley, 1986:121-155.

[21]邢忠. “边缘效应”与城市生态规划[J]. 城市规划, 2001(6):44-49.

[22]Steiner F R. The Living Landscape:An Ecological Approach to Landscape Planning[M]. Washington D. C: Island Press, 2008.

[23]李静芝, 闫雪, 李景保. 长江中游荆南三口河网地区生态系统健康评价[J]. 水土保持研究, 2019, 26(4):272-279.

[24]张殿发, 王世杰, 李瑞玲. 土地利用/土地覆被变化对长江流域水环境的影响研究[J]. 地域研究与开发, 2003(1):69-72.

-
- [25] 苏泳娴, 张虹鸥, 陈修治, 等. 佛山市高明区生态安全格局和建设用地扩展预案[J]. 生态学报, 2013, 33(5): 1524-1534.
- [26] 谢高地, 张彩霞, 张昌顺, 等. 中国生态系统服务的价值[J]. 资源科学, 2015(9): 1740-1746.
- [27] 叶玉瑶, 苏泳娴, 张虹鸥, 等. 生态阻力面模型构建及其在城市扩展模拟中的应用[J]. 地理学报, 2014, 69(4): 485-496.