

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2019.04.013

基于 ArcGIS 与 GAP 分析的长株潭城市群 水安全格局构建

李 博,甘恬静

(中南大学建筑与艺术学院,湖南 长沙 410083)

摘要:为解决长株潭城市群较为突出的水生态安全问题,基于 ArcGIS 和 GAP 分析,构建综合水安全格局并分析其 GAP 的位置与类型。结果表明:长株潭城市群核心区水安全格局由总面积 256 km² 的 3 个水生态保护区斑块、总长度 654 km 的水生态蓝线廊道和总长度 516 km 的水生态绿线廊道构成;洪灾风险和地下水资源被破坏风险是研究区域最突出的水安全问题,其次是湿地生物多样性保护问题;水生态保护区有 3 个保护空缺 GAP 和 2 个修复空缺 GAP,水生态蓝线廊道有 7 个修复空缺 GAP,水生态绿线廊道有 2 个保护空缺 GAP 和 10 个修复空缺 GAP,它们是水安全格局中决定整体安全水平的“短板”,需要在下一步生态建设中被优先考虑。

关键词:水安全格局;ArcGIS;GAP 分析;水生态保护区;水生态廊道;长株潭城市群

中图分类号:TV213.4;X523 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2019)04-0080-09

Construction of water security pattern of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration based on ArcGIS and GAP analysis//LI Bo, GAN Tianjing(*School of Architecture and Art, Central South University, Changsha 410083, China*)

Abstract: In order to solve the prominent problem of water ecological security in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration, a comprehensive water security pattern was constructed and the location and type of GAP were analyzed based on ArcGIS and GAP analysis. The results show that the water security pattern in the core area of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration consists of three patches of water ecological protection zones with the total area of 256 km², water ecology blue line corridor with the total length of 654 km and water ecology green line corridor with the total length of 516 km. Flood risk and groundwater resources destruction risk are the most prominent water security issues in the study area, followed by the problem of wetland biodiversity conservation. There are three protection GAPs and two repair GAPs in the water ecology reserve, seven repair GAPs in the water ecology blue line corridor, two protection GAPs and ten repair GAPs in the water ecology green line corridor. These GAPs are short boards that determine overall safety in the water security pattern, and need to be prioritized in the next step of ecological construction.

Key words: water security pattern; ArcGIS; GAP analysis; water ecology reserve; water ecology corridor; Changsha-Zhuzhou-Xiangtan urban agglomeration

我国水安全问题十分突出,已经成为影响经济可持续发展和人民安居乐业的瓶颈制约^[1]。现有水安全研究成果主要聚焦在水质安全评价与利用^[2-5]、水生境安全评价^[6-7]、水灾害风险评价^[8-9]和综合水生态安全评价^[10-11]等方面。在水安全格局方面仍然需要深入研究,建立以水为核心生态要素的区域生态空间管制机制,从而实现区域水安全目

标^[12]。单一型水安全格局常作为国土尺度^[13]、市域尺度^[14]、区域尺度^[15-16]生态安全格局中的组成部分。综合型水安全格局研究集中在水资源保护、水生物保护、水灾害规避、水污染防控和海绵城市建设等方面,利用景观生态学的格局与过程互馈理论和地方知识,构建能综合解决水安全问题的整体格局^[17-19]。相关研究成果主要采用最小累积阻力模

基金项目:国家自然科学基金(51608535);湖南省哲学社会科学基金(09YBA158)

作者简介:李博(1978—),男,副教授,博士,主要从事绿色基础设施与景观生态安全格局研究。E-mail:libogw0910@163.com

型(minimal cumulative resistance, MCR)来构建生物保护安全格局,利用数字高程模型(digital elevation model, DEM)来分析不同级别的洪涝水位的无源淹没范围,应用“源-汇”理论和生态因子叠置法分析非点源污染的格局识别与优化^[20-21]。

水安全格局本质上是能够维护区域水安全的关键要素和空间位置,是最优配置的理想景观格局,但是并没有说明有哪些关键性的空间位置已被破坏或者没有得到较好保护,难以有针对性地开展生态修复和设置保护优先权。GAP分析正好能解决这个问题。GAP既指保护空缺区,又是一种评估物种、群系、生态系统至景观区域尺度生态多样性受保护程度的地理学方法^[22-23],本文主要基于第一种含义展开研究。GAP分析步骤一般包括土地覆盖制图、物种分布制图、土地利用制图和这3个图层的叠加^[24]。GAP分析可用于生态安全格局的分析与评价^[25],但是目前仅应用于辨识生态安全格局的生态源地^[26],较少见针对水安全格局的GAP分析和实证研究。本研究将GAP分析应用于识别水安全格局的保护与修复空白点,据此找到应该优先开展生态建设的位置,有助于提升区域水环境的整体安全水平。

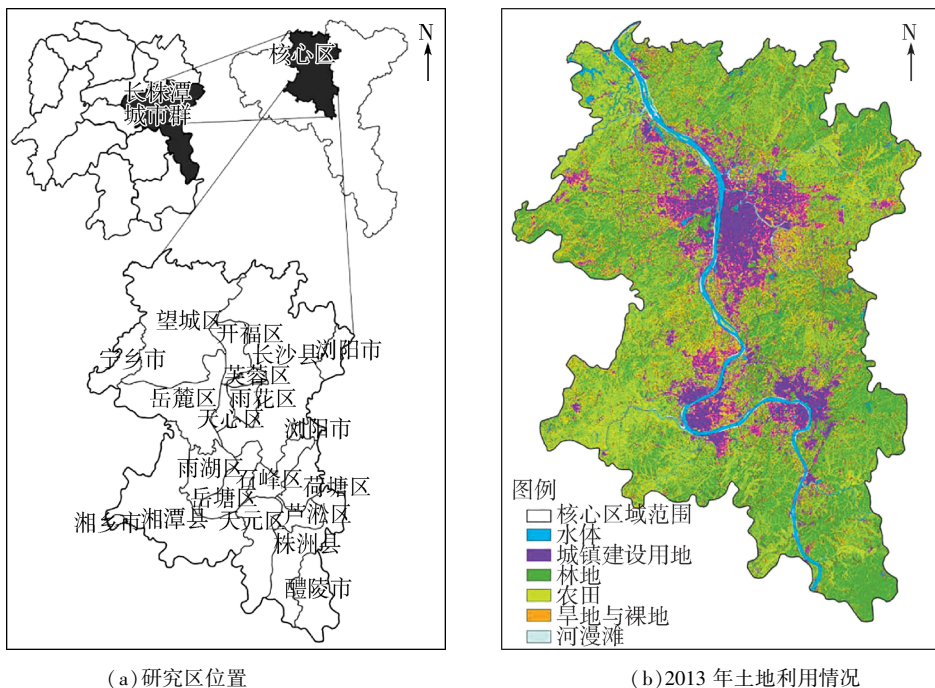
2007年国务院批准长株潭城市群成为“两型社会”配套改革试验区,探索一条资源利用与环境保护相协调的城市群可持续发展道路。然而区域内洪涝灾害频发^[27],水体污染较为严重^[28],湿地生境退化^[29],水安全问题突出^[30],亟须构建科学合理的水安全格局来为保障长株潭城市群的生态安全提供技术支持。本研究在ArcGIS平台上开展长株潭城市

群核心区水安全格局的分析,从防洪排涝、防治地下水污染以及保护湿地生物多样性3个维度辨析水生生态敏感格局,在此基础上构建由水生态保护区和水生态廊道组成的城市群核心区综合水安全格局,然后将其与现状和规划的土地利用图叠加分析,识别出两类GAP点,以高效保护湿地生境、地下水资源和规避水灾害风险。

1 研究区概况与数据来源

长株潭城市群位于湖南省东北部,地理坐标为27°45'N~28°55'N,112°59'E~133°35'E,是中部崛起的重要增长极,依据《长株潭城市群区域规划提升(2008—2020年)》(2014年调整),其核心区范围包括长沙市、株洲市、湘潭市的市区以及长沙县、浏阳市、宁乡县、醴陵市、株洲县、湘潭县、湘乡市的部分地区,总面积约6162.06 km²(图1)。研究区域地势东北高西南低,地貌类型多样,丘陵与盆地交错,盆地周边高低植被覆盖率高,林、水、田比例约为6:1:3。气候属亚热带季风气候,年均气温约为16~18℃,年均降水量约为1814 mm^[31],降水集中在夏季,水系主要有湘江干流和浏阳河、靳江河、涓水、涟水、渌水等支流。

研究采用的遥感影像和DEM数据主要来自地理空间数据云(www.gscloud.cn)的资源库,采用的城市建设用地规划数据来自2013—2016年修订的长株潭三市城市总体规划资料。根据研究范围遥感影像的清晰程度,选用空间分辨率30 m的1993年Landsat4-5 TM遥感影像、2013年Landsat8 OLI_TIRS



(a) 研究区位置

(b) 2013年土地利用情况

图1 长株潭城市群核心区区位和2013年土地利用情况

遥感影像以及空间分辨率为 30 m × 30 m 的 DEM 数据作为基础数据,每期均包括轨道 ID 号为 123-40 和 123-41 的 2 景影像。利用 ArcGIS9.2 和 ERDAS9.2 软件进行遥感影像的人机交互解译,结合 1993 年的谷歌地图与野外采样开展精度检验和校核修正,参考《我国土地利用现状分类》(GB/T21010—2007),将核心区的土地类型分为农田、林地、水域、滩涂、城乡建设用地以及旱地与裸地共 6 类。城市规划建设用地数据统一在 WGS1984 的坐标系统内与遥感解译数据图层配准,所有数据均转化为 30 m 精度的栅格文件。

2 研究方法

2.1 水生态敏感格局识别

水生态敏感格局可以理解为对城市群水环境产生重要影响,且抗外界干扰能力较差,最易出现水生态问题,需要进行保护与综合整治的关键区域^[32],其识别是构建水安全格局的基础。水污染风险、水灾害风险和水生态系统保护是水生态安全的核心问题^[33],因此水生态敏感格局包括保障水生态系统供给服务的地下水水质敏感格局、具有水生态系统调节功能的洪灾敏感格局与涝灾敏感格局、具有生命支撑作用的水生境敏感格局。

2.1.1 地下水水质敏感格局

根据 2015 年湖南省地质调查研究院的长株潭城市群地质环境调查相关研究成果^[34],综合考虑地下水污染分布、土壤污染分布和地下水应急水源分布情况,将保障城市群供水安全的应急水源区划为一级敏感区,将地下水污染区划为二级敏感区,将工业、生活和矿山污染造成的土壤污染区划为三级敏感区,可以得到地下水水质敏感格局,其中一级敏感区占水生态保护区总面积的 68.27% (图 2)。

2.1.2 洪灾敏感格局

长株潭城市群核心区的防洪工程建设较为完备,大部分防洪堤按照百年一遇标准修建,因此主要考虑发生特大洪灾时,超出防护堤的洪水淹没情况。利用 DEM 数据分析无源淹没范围,可以识别出水系、湿地、湖泊、水库、低洼地等满足洪水宣泄的空间,辨识这些行洪空间格局可以有效降低洪灾风险^[35]。选用捞刀河堤顶高程 40 m、长沙城区河西堤顶高程 42 m、湘潭水文站堤顶高程 44.9 m 分别作为一级、二级、三级敏感区的标准^[36],与河湖湿地一起构成区域洪灾敏感格局,其中洪灾一级敏感区在水生态保护区总面积中的占比达 96.17% (图 3)。

2.1.3 涝灾敏感格局

一些地势较低的城市建成区填埋了原有的洼地、

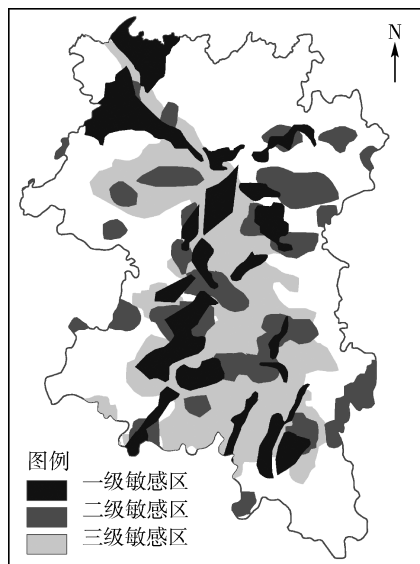


图 2 地下水水质敏感格局

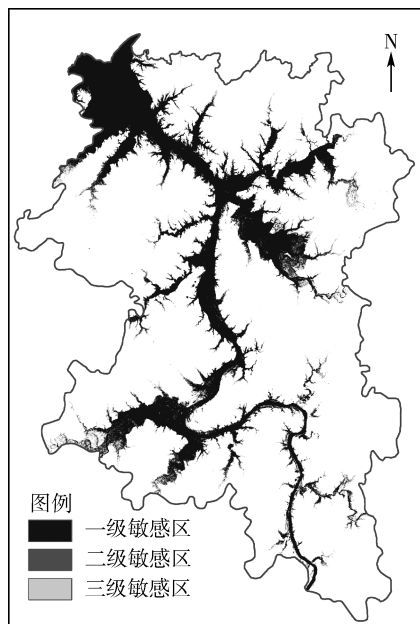


图 3 洪灾敏感格局

河滩、湿地,导致城市雨洪调蓄能力下降,暴雨期间易发涝灾。以 1993—2013 年建成区内消失的水域湿地作为涝灾生态敏感格局的分析对象,用 2013 年研究区域的城乡建设用地作为遮罩,提取 1993 年的水域范围,再转换为 shapefile 格式的 点数据,应用 ArcGIS 的点密度空间分析命令计算点密度的空间分布数据,采用自然断点(natural break)分类法将研究区分为 9 个等级,取前 3 级作为涝灾敏感格局的一、二、三级敏感区(图 4)。

2.1.4 水生境敏感格局

选用池鹭、黑斑蛙作为鸟类和两栖类湿地生境的指示物种,从垂直栖居过程与水平活动过程出发识别水生境敏感格局。基于垂直过程可以评价池鹭与黑斑蛙的栖息地适宜性。池鹭常栖息于稻田、池

表2 综合水生态敏感格局评价指标体系及权重

目标层	准则层	准则层权重	指标层	指标层权重	指标层综合权重
综合水生态敏感格局 构建要素重要性评价	自然灾害防治	0.52	地下水质污染	0.22	0.12
			洪灾防治	0.39	0.20
			涝灾防治	0.39	0.20
	水生境保护	0.48	池鹭生境保护	0.50	0.24
			黑斑蛙生境保护	0.50	0.24

是既能保障水鸟迁徙又能净化水质与滞留雨洪的水生态绿线廊道。构建水生态蓝线廊道要建立地表径流模型,首先在无洼地 DEM 上利用 ArcGIS 流向工具,凭借传统的 D8 算法^[41] 计算地表径流离开每一个栅格单元的水流方向,然后利用水流方向栅格数据计算每个栅格的汇流累计量,当汇流量达到一定值时就会产生地表径流,所有汇流量大于阈值的栅格就是潜在的水流路径,由这些水流路径构成的网络即为水生态蓝线廊道网络。构建水生态绿线廊道要同时使用 MCR 模型与地表径流模型。首先以池鹭的 MCR 模型计算出最小累积阻力面作为虚拟的 DEM,再利用地表径流模型来识别低阻力联通道和低阻力辐射道。这些通道是池鹭水平迁徙活动的潜在路径,需要作为生态廊道加以保护。

2.3 水安全格局的 GAP 分析

2.3.1 水生态保护区的 GAP 分析

池鹭与黑斑蛙生境敏感格局是经过叠加分析的生物栖息地和活动范围,即物种分布图层。将其和土地利用规划图中的水系与绿地保护区叠加,可以辨识没有被保护的 GAP;将其和现有城乡建设用地图叠加,可得到需要生态修复的 GAP。

2.3.2 水生态廊道的 GAP 分析

水生态廊道的连通性是保障亲水物种栖息活动的关键要素,因此廊道 GAP 将严重威胁湿地物种多样性。将水生态蓝线廊道与现有水系湿地图层相叠加,找到水体中断或缺失的位置,以及有水坝阻断鱼类洄游线路的河段,即水生态蓝线廊道的 GAP。水生态绿线廊道穿越大面积城镇建设用地区,其中工业仓储用地和道路与交通设施在一定程度上对湿地鸟类的迁徙活动造成了干扰和阻碍作用,因此将水生态绿线廊道分别与现状和规划的工业仓储用地、道路与交通设施用地图层相叠加,可以辨识湿地鸟类迁徙通道上生境质量较差的地段,即水生态绿线廊道的 GAP。

3 结果分析

3.1 综合水安全格局

长株潭城市群核心区的综合水安全格局由水生态保护区、水生态绿线廊道和水生态蓝线廊道组成,占核心区总面积的 16.12% (图 6)。

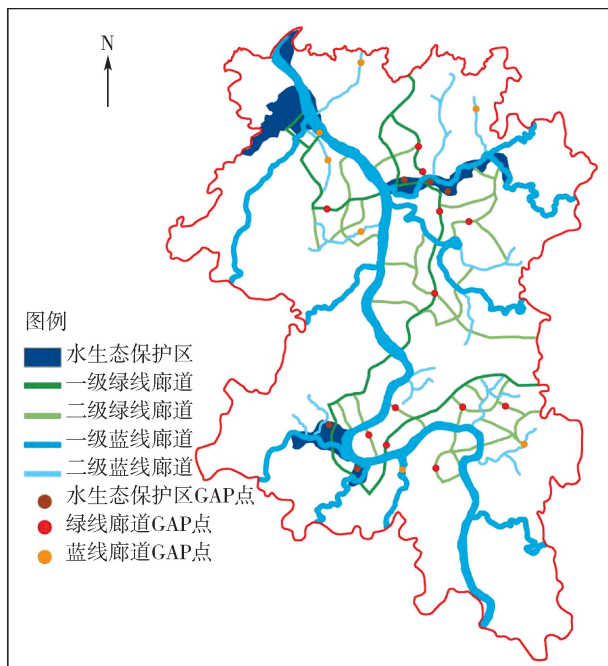


图6 综合水安全格局与 GAP 分布

3.1.1 水生态保护区

水生态保护区一般沿水系分布,主要包括位于望城区北部、开福区与长沙县的捞刀河沿线、湘潭县东北部的涟水与涓水沿线的 3 个水生态保护区,总面积约为 256 km², 占水安全格局总面积的 25.77%。其中望城区北部保护区面积为 117 km², 捞刀河保护区面积为 74 km², 湘潭县东北部保护区面积为 65 km²。水生态保护区的土地利用类型主要是农田、林地和水体(分别占总面积的 34.28%、22.69% 和 17.75%), 还有少部分城乡建设用地、旱地裸地和河漫滩(分别占总面积的 11.50%、8.98% 和 4.80%)。

表 3 为水生态保护区包含的一级生态敏感区面积。可以看出,望城区北部保护区有较大面积的土地存在洪灾风险与水质污染风险,还是池鹭的主要栖息地;该区域是城市群核心区的主要应急水源地,但是存在面源污染问题,亟须开展专项环境整治工程;该区域位于湘江下游且水系丰富,当超防洪标准的洪峰入境时有漫水和溃堤风险,需要连通沟渠湖坑与河网,建立海绵湿地系统来消纳洪水;长期的围湖造田和农业生产活动也威胁到湿地鸟类的生境安全,应设立湿地生态保护区进行控制管理。捞刀河

表3 水生态保护区包含的一级生态敏感区面积

km²

水生态保护区	地下水敏感区	洪灾敏感区	涝灾敏感区	黑斑蛙敏感区	池鹭敏感区
望城区北部保护区	91.41	113.20	0	11.22	82.51
捞刀河保护区	48.73	69.45	21.45	8.61	30.33
湘潭县东北部保护区	34.62	63.46	0	3.75	44.88

保护区的洪涝灾害风险突出,这里属于长沙盆地,低洼的地势容易积涝,城市建设活动导致湖荡坑塘湿地严重萎缩,雨季洪涝调蓄能力减弱,需要修复湿地生态系统,提升区域的抗洪排涝能力。湘潭县东北部保护区需要重点保护境内的涟水与涓水的河道与周边湿地的生态系统,兼顾防洪减灾、保护地下水源安全、保护湿地生境等生态建设要求。

3.1.2 水生态廊道

水生态蓝线廊道是水安全格局的骨架,范围包括河流域及其两侧的缓冲区,总长度约为654 km,根据水系等级可分为两个级别。一级蓝线廊道长度约445 km,占蓝线廊道总长度的68%,包括湘江干流和捞刀河、浏阳河、沩水等湘江一级支流的水域和两侧400 m缓冲区;它既是最重要的湿地生态系统和鱼类迁徙路径,又是泄洪和排涝的主要通道,还是城市群主要的水源和游憩带。二级蓝线廊道总长度约209 km,占蓝线廊道总长度的32%,包括二与三级支流、湖泊、湿地水体及其两侧200 m缓冲区;它是一级廊道水生态系统服务功能的延伸和扩展,对一级廊道的水质优劣、泄洪能力和水生物多样性有重要影响。

水生态绿线廊道是水安全格局的经脉,是山林地到水系湿地之间的有机连接通路,总长度约为516 km。将衔接3个水生态保护区的低阻力连通道列为一二级绿道,其他为二级绿道。由表4可知,一级绿线廊道长度约222 km,占绿线廊道总长度的43%,廊道控制范围应达到100~200 m,穿越的林地比重较大,生态环境质量较高,是池鹭在栖息地和觅食地之间安全迁移的主要路线。二级绿线廊道长度约294 km,占绿线廊道总长度的57%,廊道控制范围应达到50~100 m,穿越的建设用地与林地比重较大,是连接城镇绿地与城郊林地与湿地的绿色通廊和歇脚石。应严格控制绿线廊道内的建设工程,采用乡土植物绿化裸地,提高廊道的绿地面积。

3.2 水安全格局的GAP保护与修复

3.2.1 水生态保护区的GAP保护与修复

水生态保护区有3个保护空缺的GAP点,分别

位于长沙市松雅湖湿地东侧、捞刀河镇向阳坡和湘潭市雨湖区毛家屋场,其现状土地利用形式主要是农田、林地和水域,是黑斑蛙和池鹭的栖息地,也位于洪灾风险区和地下水应急水源地。但是在城市规划中,这些生态空间将被开发为居住用地与商业用地,其生态价值没有受到保护。建议在城市规划修编的过程中应优先考虑保护GAP点位置的自然生态系统,降低开发建设强度,提高防洪标准和海绵城市建设要求,保护地下水源。

水生态保护区还有2个修复空缺的GAP点,分别位于长沙县舒家湾和湘潭县三联村,都是水鸟的主要觅食区域,其现状土地利用形式主要是村镇建设用地。集中分布的村镇建筑群将原本较为完整的农田和湿地斑块分割成破碎的小斑块,干扰了池鹭的生存活动。需要增加村镇生态绿地面积,并建设绿道连通周边湿地、农田和林地,以增加生态斑块的连通性。

3.2.2 水生态廊道的GAP保护与修复

a. 水生态蓝线廊道。水生态蓝线廊道上共有7个修复空缺的GAP点,其中因分隔水域而形成的GAP点位于长沙望城区雷锋北大道一线;因水库水坝拦截鱼道而形成的GAP点分别位于长沙湘江航电枢纽、茶亭水库、关山水库、顺塘水库、湘潭向东渠水库、株洲大京水库。根据潜在水流路径模拟分析,望城区雷锋北大道沿线的张家湖、史家湖、斑马湖与东湖本是一片完整的湿地,现在被堤垸分割为多个仅有涵闸连接的鱼塘水池,存在养殖业污染水体和侵占两栖物种生境的问题。可以结合城市规划中计划新建的湿地公园,修复湿地生态系统,恢复湿地完整性和连通性。蓝线水系上的水库水坝是传统的土石坝或钢筋混凝土大坝,仅考虑防洪和蓄水功能,阻隔了水生物洄游通道,破坏了原有浅水湿地生态系统。对此,一方面需要在附近增建小型浅水湿地,另一方面增建水坝的鱼道、鱼梯设施,确保洄游道路通畅^[42]。

b. 水生态绿线廊道。水生态绿线廊道有2个保护空缺的GAP点,分别位于一级绿线廊道与规划

表4 水生态绿线廊道的土地利用类型构成

%

绿线廊道等级	水域	建设用地	林地	农田	旱地裸地	河漫滩
一级绿线廊道	5.78	23.22	34.01	21.57	14.68	0.74
二级绿线廊道	5.19	31.90	32.37	17.11	13.20	0.23

的长沙星沙联络道交界处以及二级绿线廊道与规划的株洲武广大道交界处;还有10个修复空缺的GAP点,其中4个位于高速公路和城市快速路截断绿线廊道之处,6个在城市工业仓储用地与绿道的交汇处。城市道路用地既降低了绿线廊道的景观连通度,又会直接干扰水鸟的水平迁徙活动。GAP位置的道路两侧需要种植冠幅大、分支点高的乔木形成连续的绿化带,弱化道路噪声与灯光的影响,也为水鸟提供休憩的踏脚石,同时需要采用限速、禁鸣等措施来降低干扰^[43]。工业仓储用地易污染地下水和空气,尤其是部分二类工业用地截断绿线廊道,威胁到水鸟的生存。必须外迁有严重污染的项目,在廊道控制范围内的工业用地应布置办公和生活区,并适当增加绿地面积。

4 结 论

a. 长株潭城市群核心区的水安全格局由水生态保护区斑块和水生态廊道构成,占核心区总面积的16.12%。其中水生态保护区占水安全格局总面积的25.77%,集中分布在望城区北部、捞刀河沿线、湘潭县东北部的3个斑块;水生态蓝线廊道总长度约为654 km,湘江干流及其一级支流是区域最重要的水生态屏障,作为一级蓝线廊道,占总长度的68%;水生态绿线廊道总长度约为516 km,其一级绿线廊道占总长度的43%。

b. 洪灾风险和地下水资源被破坏的风险是长株潭城市群核心区最为突出的水安全问题,其次是湿地生物多样性保护问题。洪灾一级敏感区占水生态保护区总面积的96.17%,虽然有防洪堤保护,但是一旦发生超百年一遇洪水位,都面临洪水漫堤和内部积涝的风险,需要控制建设强度和构建生态防洪设施,以弥补防洪工程的不足。地下水应急水源地占水生态保护区总面积的68.27%,应大力整治建设用地和农业用地的面源污染问题,确保应急水源安全。望城区北部是水鸟和蛙类的主要栖息地,需要结合生态廊道同步保护,形成能满足湿地物种生存活动空间需求的蓝、绿生态网络。

c. 水生态保护区有3个保护空缺GAP和2个修复空缺GAP,水生态蓝线廊道有7个修复空缺GAP,水生态绿线廊道有2个保护空缺GAP和10个修复空缺GAP。GAP区域决定了长株潭城市群核心区水安全格局的整体安全水平,必须作为亟须保护或修复的关键性战略位置,在水安全格局的建设实施过程中优先考虑。

参考文献:

[1] 夏军,石卫. 变化环境下中国水安全问题研究与展望

[J]. 水利学报,2016,47(3):292-301. (XIA Jun, SHI Wei. Perspective on water security issue of changing environment in China [J]. Journal of Hydraulic Engineering,2016,47(3):292-301. (in Chinese))

[2] TIWARI A K, MAIO M D, SINGH P K, et al. Evaluation of surface water quality by using GIS and a Heavy Metal Pollution Index (HPI) model in a coal mining area, India [J]. Bulletin of Environmental Contamination & Toxicology,2015,95(3):304-310.

[3] 刘传旺,吴建平,任胜伟,等. 基于层次分析法与物元分析法的水安全评价[J]. 水资源保护,2015,31(3):27-32. (LIU Chuanwang, WU Jianping, REN Shengwei, et al. Water safety assessment based on analytic hierarchy process and matter element analysis method [J]. Water Resources Protection,2015,31(3):27-32. (in Chinese))

[4] 卞戈亚,陈康宁,戴兆婷,等. 世界供水安全现状及其主要经验对我国供水安全保障的启示[J]. 水资源保护,2014,30(1):68-73. (BIAN Geya, CHEN Kangning, DAI Zhaoting, et al. World water supply security, key experiences, and lessons for China's water supply security assurance [J]. Water Resources Protection,2014,30(1):68-73. (in Chinese))

[5] 彭世彰,程胜,徐俊增,等. 劣质水安全利用研究综述[J]. 水资源保护,2014,30(4):1-6. (PENG Shizhang, CHENG Sheng, XU Junzeng, et al. Advances in safe utilization of poor-quality water [J]. Water Resources Protection,2014,30(4):1-6. (in Chinese))

[6] 王建华,田景汉,吕宪国. 挠力河流域河流生境质量评价[J]. 生态学报,2010,30(2):481-486. (WANG Jianhua, TIAN Jinghan, LYU Xianguo. Assessment of stream habitat quality in Naoli River watershed [J]. Acta Ecologica Sinica,2010,30(2):481-486. (in Chinese))

[7] TAMMINGA A, HUGENHOLTZ C, EATON B, et al. Hyperspatial remote sensing of channel reach morphology and hydraulic fish habitat using an Unmanned Aerial Vehicle (UAV): a first assessment in the context of river research and management [J]. River Research & Applications,2015,31(3):379-391.

[8] 蒋新宇,范久波,张继权,等. 基于GIS的松花江干流暴雨洪涝灾害风险评估[J]. 灾害学,2009,24(3):51-56. (JIANG Xinyu, FAN Jiubo, ZHANG Jiquan, et al. GIS-based risk assessment on rain and flood disasters of Songhua River [J]. Journal of Catastrophology,2009,24(3):51-56. (in Chinese))

[9] TEHRANY M S, PRADHAN B, MANSOR S, et al. Flood susceptibility assessment using GIS-based support vector machine model with different kernel types [J]. Catena,2015,125:91-101.

[10] 黄显峰,贾永乐,方国华. 基于投影寻踪法的城市水生

- 态文明建设评价[J]. 水资源保护, 2016, 32(6): 117-122. (HUANG Xianfeng, JIA Yongle, FANG Guohua. Evaluation of urban aquatic ecological civilization construction based on projection pursuit method[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(6): 117-122. (in Chinese))
- [11] 王繫玮, 陈星, 朱琰, 等. 基于 PSR 的城市水生态安全评价体系研究: 以“五水共治”治水模式下的临海市为例[J]. 水资源保护, 2016, 32(2): 82-86. (WANG Yiwei, CHEN Xing, ZHU Yan, et al. Study of urban aquatic ecological security evaluation system based on PSR model: a case study in Linhai City under mode of co-governance on five water categories[J]. Water Resources Protection, 2016, 32(2): 82-86. (in Chinese))
- [12] 彭建, 赵会娟, 刘焱序, 等. 区域水安全格局构建: 研究进展及概念框架[J]. 生态学报, 2016, 36(11): 3137-3145. (PENG Jian, ZHAO Huijuan, LIU Yanxu, et al. Progress and conceptual framework of regional water security pattern construction[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(11): 3137-3145. (in Chinese))
- [13] 俞孔坚, 李海龙, 李迪华, 等. 国土尺度生态安全格局[J]. 生态学报, 2009, 29(10): 5163-5175. (YU Kongjian, LI Hailong, LI Dihua, et al. National scale ecological security pattern[J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(10): 5163-5175. (in Chinese))
- [14] 蒙吉军, 王雅, 王晓东, 等. 基于最小累积阻力模型的贵阳市景观生态安全格局构建[J]. 长江流域资源与环境, 2016, 25(7): 1052-1061. (MENG Jijun, WANG Ya, WANG Xiaodong, et al. Construction of landscape ecological security pattern in Guiyang based of MCR model[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2016, 25(7): 1052-1061. (in Chinese))
- [15] 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. (SU Yongxian, ZHANG Hongou, CHEN Xiuzhi, et al. The ecological security patterns and construction land expansion simulation in Gaoming[J]. Acta Ecologica Sinica, 2013, 33(5): 1524-1534. (in Chinese))
- [16] 朱军, 李益敏, 余艳红. 基于 GIS 的高原湖泊流域生态安全格局构建及优化研究: 以星云湖流域为例[J]. 长江流域资源与环境, 2017, 26(8): 1237-1250. (ZHU Jun, LI Yimin, YU Yanhong. Study of construction and optimization of ecological security pattern of lake basin in plateau based on GIS: a case study of Xingyun Lake basin[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2017, 26(8): 1237-1250. (in Chinese))
- [17] 俞孔坚, 李迪华, 袁弘, 等. “海绵城市”理论与实践[J]. 城市规划, 2015, 39(6): 26-36. (YU Kongjian, LI Dihua, YUAN Hong, et al. “Sponge City”: theory and practice[J]. City Planning Review, 2015, 39(6): 26-36. (in Chinese))
- [18] 李孟颖, 陈介山. 京津冀地区面向人居环境之水安全格局初探[J]. 安全与环境学报, 2015, 15(3): 347-355. (LI Mengying, CHEN Jieshan. Investigation of water security pattern on human consumption for the Greater Beijing Municipality Area[J]. Journal of Safety and Environment, 2015, 15(3): 347-355. (in Chinese))
- [19] 衡先培, 王志芳, 戴芹芹, 等. 地方知识在水安全格局识别中的作用: 以重庆御临河流域龙兴、石船镇为例[J]. 生态学报, 2016, 36(13): 4152-4162. (HENG Xianpei, WANG Zhifang, DAI Qinqin, et al. The roles of local knowledge in identifying water security pattern: a case study of Longxing and Shichuan Township in Yulin Watershed, Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2016, 36(13): 4152-4162. (in Chinese))
- [20] 岳隽, 王仰麟, 李贵才, 等. 基于水环境保护的流域景观格局优化理念初探[J]. 地理科学进展, 2007(3): 38-46. (YUE Jun, WANG Yanglin, LI Guicai, et al. The conceptual framework of watershed landscape optimization concerning water environmental protection[J]. Progress in Geography, 2007(3): 38-46. (in Chinese))
- [21] 周璟, 刘永, 郭怀成, 等. 沁河流域水环境约束分区与景观格局优化[J]. 环境科学研究, 2012, 25(5): 481-488. (ZHOU Jing, LIU Yong, GUO Huaicheng, et al. Water environmental constraint regionalization and landscape pattern optimization for the Qinhe River basin[J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25(5): 481-488. (in Chinese))
- [22] 杨娜, 王正军, 张向新, 等. GAP 分析的方法及研究进展[J]. 生物技术通报, 2008(1): 100-107. (YANG Na, WANG Zhengjun, ZHANG Xiangxin, et al. The method and advance of GAP analysis[J]. Biotechnology Bulletin, 2008(1): 100-107. (in Chinese))
- [23] 郑岩岩, 刘吉平, 高俊琴. 我国 GAP 分析的研究进展[J]. 安徽农业科学, 2011, 39(27): 16762-16764. (ZHENG Yanyan, LIU Jiping, GAO Junqing. Research progress of GAP analysis in China[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2011, 39(27): 16762-16764. (in Chinese))
- [24] 刘吉平, 吕宪国, 殷书柏. GAP 分析: 保护生物多样性的地理学方法[J]. 地理科学进展, 2005(1): 41-51. (LIU Jiping, LYU Xianguo, YIN Shubai. GAP analysis: a geographic approach to protect biological diversity[J]. Progress in Geography, 2005(1): 41-51. (in Chinese))
- [25] 王棒, 关文彬, 吴建安, 等. 生物多样性保护的区域生态安全格局评价手段: GAP 分析[J]. 水土保持研究, 2006(1): 192-196. (WANG Bang, GUAN Wenbin, WU

- Jianan, et al. A method for assessing regional ecological security pattern to conserve biodiversity: GAP analysis [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2006(1): 192-196. (in Chinese))
- [26] 刘吉平, 吕宪国, 杨青, 等. 三江平原东北部湿地生态安全格局设计[J]. *生态学报*, 2009, 29(3): 1083-1090. (LIU Jiping, LV Xianguo, YANG Qing, et al. Wetland landscape ecological security patterns analysis and plan in northeast of Sanjiang plain [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2009, 29(3): 1083-1090. (in Chinese))
- [27] 莫宏伟, 李少青, 陶建军, 等. 湘江湖南段洪水灾害综合风险区划[J]. *长江流域资源与环境*, 2011, 20(11): 1405-1410. (MO Hongwei, LI Shaoqing, TAO Jianjun, et al. Risk zoning of flood disaster along Xiangjiang River in Hunan province [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2011, 20(11): 1405-1410. (in Chinese))
- [28] 丁昊天, 袁兴中, 曾光明, 等. 基于模糊化的长株潭地区地下水重金属健康风险评价[J]. *环境科学研究*, 2009, 22(11): 1323-1328. (DING Haotian, YUAN Xingzhong, ZENG Guangming, et al. Health risk assessment from heavy metals in groundwater of Changsha-Zhuzhou-Xiangtan district based on fuzzy theory [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2009, 22(11): 1323-1328. (in Chinese))
- [29] 邝奕轩. 城市群湿地可持续利用对策研究: 以长株潭城市群为例 [C] // 中国生态经济学会. 生态经济与美丽中国—中国生态经济学会成立 30 周年暨 2014 年学术年会论文集. 北京: 中国生态经济学会, 2014: 8.
- [30] 朱翔, 朱云, 翟云波, 等. 长株潭地区水环境生态安全评价[J]. *湖南大学学报(自然科学版)*, 2011, 38(1): 72-77. (ZHU Xiang, ZHU Yun, ZHAI Yunbo, et al. Assessment of the ecological security of water environment in Changsha-Zhuzhou-Xiangtan district [J]. *Journal of Hunan University (Natural Sciences)*, 2011, 38(1): 72-77. (in Chinese))
- [31] 张猛, 曾永年. 长株潭城市群湿地景观时空动态变化及驱动力分析[J]. *农业工程学报*, 2018, 34(1): 241-249. (ZHANG Meng, ZENG Yongnian. Temporal and spatial dynamic changes and driving forces analysis of wetland landscape of Chang-Zhu-Tan urban agglomeration [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2018, 34(1): 241-249. (in Chinese))
- [32] 汪军英, 达良俊, 由文辉. 城镇生态敏感区的划分及建设途径: 以上海市航头镇为例[J]. *城市问题*, 2007(1): 52-55. (WANG Junying, DA Liangjun, YOU Wenhui. The division and construction approach of urban ecological sensitive area: a case study of Hangtoun town in Shanghai [J]. *Urban Problems*, 2007(1): 52-55. (in Chinese))
- [33] 黄昌硕, 耿雷华, 王立群, 等. 中国水资源及水生态安全评价[J]. *人民黄河*, 2010, 32(3): 14-16. (HUANG Changshuo, GENG Leihua, WANG Liqun, et al. Evaluation on China water resources and water ecological security [J]. *Yellow River*, 2010, 32(3): 14-16. (in Chinese))
- [34] 徐定芳, 范毅, 何阳. 长株潭城市群地质环境调查有效服务“两型社会”建设[EB/OL]. (2015-04-16) [2018-08-26] http://www.cgs.gov.cn/xwl/cgkx/201603/t20160309_299380.html.
- [35] 李翀, 陆吉康, 叶柏生. 基于栅格 DEM 的沙兰河流域河网提取及局地暴雨洪水模拟[J]. *中国水利水电科学研究院学报*, 2005(3): 161-167. (LI Chong, LU Jikang, YE Baisheng. Simulation of storm flood basing on deriving drainage networks from grid DEM and 2-D hybrid approach in Shalan River Basin [J]. *Journal of China Institute of Water*, 2005(3): 161-167. (in Chinese))
- [36] 李博. 长株潭城市群绿色基础设施研究[M]. 长沙: 中南大学出版社, 2017.
- [37] 赵正阶. 中国鸟类志[M]. 长春: 吉林科学技术出版社, 2001.
- [38] 张鹏. 新疆两栖爬行动物[M]. 乌鲁木齐: 新疆科学技术出版社, 2005.
- [39] 赵在绪, 周铁军, 陈舒一郎, 等. 基于 GIS-AHP 方法的山地城镇生态格局安全评价研究: 以重庆北部新区为例[J]. *现代城市研究*, 2014(8): 74-78. (ZHAO Zaixu, ZHOU Tiejun, CHEN Shuyilang, et al. Research on mountainous towns' ecological pattern safety assessment based on GIS-AHP method: a case study of Chongqing New North Zone (CNNZ) [J]. *Modern Urban Research*, 2014(8): 74-78. (in Chinese))
- [40] 俞孔坚. 生物保护的景观生态安全格局[J]. *生态学报*, 1999(1): 10-17. (YU Kongjian. Landscape ecological security patterns in biological conservation [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1999(1): 10-17. (in Chinese))
- [41] O' CALLAGHAN J F, MARK D M. The extraction of drainage networks from digital elevation data [J]. *Computer Vision Graphics & Image Processing*, 1984, 28(3): 323-344.
- [42] 杨宇, 严忠民, 陈金生. 鱼道的生态廊道功能研究[J]. *水利渔业*, 2006(3): 65-67. (YANG Yu, YAN Zhongmin, CHEN Jinsheng. Study on the ecological corridor function of fishway [J]. *Reservoir Fisheries*, 2006(3): 65-67. (in Chinese))
- [43] 王云, 李麒麟, 关磊, 等. 纳帕海环湖公路交通噪声对鸟类的影响[J]. *动物学杂志*, 2011, 46(6): 65-72. (WANG Yun, LI Qilin, GUAN Lei, et al. Effect of traffic noise around Napahai wetland highway on birds [J]. *Chinese Journal of Zoology*, 2011, 46(6): 65-72. (in Chinese))

(收稿日期: 2018-09-15 编辑: 王芳)