

珠江流域湿地保护优先格局构建与保护空缺识别^{*}

梁晨^{1,2)} 穆泳林²⁾ 智烈慧²⁾ 梁芳源²⁾ 李晓文^{2)†} 白军红²⁾ 李鹏³⁾

(1)北京清华同衡规划设计研究院有限公司, 100085, 北京;

2)北京师范大学环境学院水环境模拟国家重点实验室, 100875, 北京;

3)武汉市湿地保护中心, 430015, 湖北武汉)

摘要 基于湿地现状分布数据,对珠江流域湿地现状被保护情况进行综合评价,并以湿地生物多样性保护为目标,运用系统保护规划的理论和方法,综合考虑GDP、人口密度等社会经济因素,以Marxan作为空间优化模型构建珠江流域的湿地保护优先格局,优先建立的保护单元共87个,面积共27 681.79 km²,最终形成合理保护网络,并针对各子流域进行评估确定湿地保护空缺,提出合理优化格局构建建议。结果表明,珠江流域保护体系缺失严重,亟需重构湿地保护体系:1)珠江流域上游的湿地保护空缺主要集中在高原山区湖泊、河流湿地广泛分布区域;2)对于珠江中下游区域,重在面向大型湿地空缺建立大型自然保护区,强化重要生态储备资源的保护与修复;3)对人为干扰最为强烈、经济活动最为繁荣的珠江三角洲区域,则重在粤港澳大湾区区域的保护空间合理构架湿地公园或湿地小区,并因地制宜地开展针对性的滨海湿地修复项目,缓解围填海活动;4)海南岛及南海各岛诸河区域湿地保护空缺主要位于海南岛东侧与西侧部分地区,应根据各区域保护强度与发展程度不同,建立以不同类型的自然保护区、自然公园构成的以保护湿地为主的自然保护地体系。研究结果在一定程度上可作为珠江流域湿地保护体系调整的参考依据。

关键词 珠江流域湿地;系统保护规划;粤港澳大湾区;保护空缺;保护优先格局

中图分类号 X171.4; X176

DOI: 10.12202/j.0476-0301.2020434

湿地既是地球上生物多样性资源最丰富的生态系统类型之一,同时也是遭受人类破坏最为严重的生态系统类型之一。随着系统保护规划方法的应用推广,部分学者开始研究湿地生态系统的保护规划,但是相关研究主要集中在河流湿地生态系统,对于非河流湿地生态系统的研究较少^[1-5]。目前湿地系统保护规划的连接性研究,主要集中于各湿地生态系统类型间的横向联系,以及河流湿地生态系统上下游间的纵向联系,但各湿地生态系统类型和多维连接性的综合考虑,则是未来湿地系统保护规划研究的趋势或者焦点^[1,3]。

珠江流域的湿地众多,类型分布不均,且分布呈明显的地域性特征。自然湿地类型主要包括河流湿地、湖泊湿地、滨海湿地、沼泽湿地等,其中,滨海湿地包括浅海水域湿地、海草床湿地、珊瑚礁湿地、红树林湿地和三角洲湿地等。近海与海岸湿地主要分布在广东、广西沿海各地,其中广东的浅海水域大部分在珠江口西岸至湛江段海域;河口水域则集中分布在珠江的出海口及三角洲的沿海部分;

红树林湿地在沿海滩涂均有零星分布,广东红树林湿地大部分集中分布在珠江口西岸至粤西沿海,广西的红树林湿地主要分布于合浦、北仑河口和钦州湾。河流湿地在流域范围内各地均有分布,湖泊湿地和沼泽湿地相对较少,高原、山地河流湿地和高原湖泊湿地主要分布在珠江上游区域,其以河溪和高原湖泊水生生物类群构成的生物多样性具有独特而重要的保护价值。近年来,随着区域气候变化、人口增长及生产活动的加剧给区域湿地生态环境带来了沉重的压力^[6-11]。为保护区域湿地生态系统及其生物多样性,尽管珠江流域已建立多处各级各类湿地保护区,但目前以单个保护区为主的湿地保护体系已难以满足该区域丰富的生物多样性长期有效保护的要求。本文正是立足于现阶段我国湿地保护区建设和湿地保护战略的迫切需求,着眼于珠江流域湿地生态系统的保护规划,通过设定流域单元作为规划单元,将基于珠江流域气候-地貌分异的流域湿地分类单元作为生态系统水平保护目标,并考虑湿地水鸟分布作为物种层面保护目标,运用系统保护规

^{*} 国家自然科学基金资助项目(31770576; 31370535)

[†] 通信作者: 李晓文(1968—),男,博士,副教授。研究方向:湿地生态、景观生态及区域生物多样性保护规划。E-mail: lixw@bnu.edu.cn
收稿日期: 2020-08-04

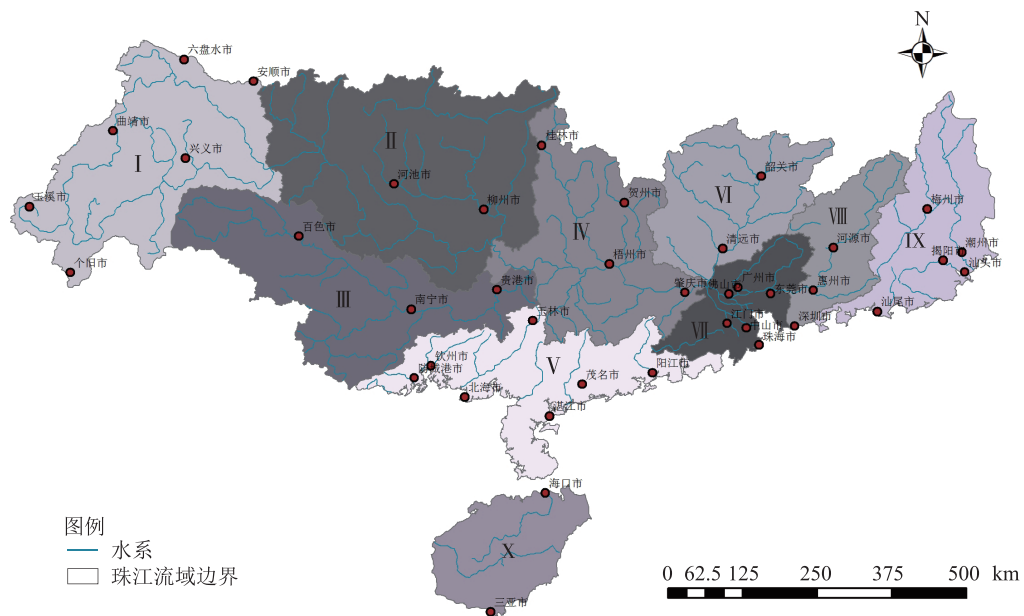
划的理论与方法, 对于珠江流域湿地系统保护的优先格局进行模拟, 并尝试建立湿地保护优化格局, 为珠江流域湿地系统保护与可持续发展提供科学依据和决策信息。

1 区域概况

珠江为我国境内第 3 长河流, 是我国 7 大江河之一。珠江流域跨越云南、贵州、广西、广东、湖南、江西 6 省(自治区)和香港、澳门特别行政区以及越南东北部, 总面积 45.37 万 km², 其中 44.21 万 km² 在我国境内。珠江由西江、北江、东江及珠江三角洲诸河组成, 其中, 西江最长, 通常被称为珠江的主干。珠江流域地处亚热带, 气候为热带、亚热带气候, 气候湿热多雨。多年平均气温 14~22 ℃, 多年平均湿度在 71%~80%。年均降水量约 1 200~2 000 mm, 年均

径流量 3 381 亿 m³。流域内地势呈现西北高、东南低。北靠南岭, 西部为云贵高原, 地势最高, 中部和东部为低山丘陵盆地, 东南部为三角洲冲积平原。珠江流域内山地、丘陵面积占 94.4%, 平原面积仅占 5.6%, 其中珠江三角洲是长江以南沿海地区最大的平原, 约占流域内平原面积的 80%^[6, 8]。

为更好地对接国家管理要求, 依据全国水资源分区管理的要求, 将本次研究区范围从珠江流域拓展至整个珠江水资源管理分区, 即包括珠江流域、韩江流域、粤桂沿海诸河、海南省诸河和澜沧江以东国际河流(不含澜沧江), 总面积为 578 960 km², 并最终将整个区域划分为南北盘江、红柳江、郁江、西江、北江、东江、珠江三角洲、韩江及粤东诸河、粤西桂南沿海诸河、海南岛及南海各岛诸河与红河共计 10 个水资源二级区(图 1)。



I. 南北盘江; II. 红柳江; III. 郁江; IV. 西江; V. 粤西桂南沿海诸河; VI. 北江; VII. 珠江三角洲; VIII. 东江; IX. 韩江及粤东诸河; X. 海南岛及南海各岛诸河。

图 1 珠江流域地理位置

2 研究方法

系统保护规划方法是一个决策支持系统, 它基于结构式的迭代运算, 根据反馈信息对运算结果不断修改, 直至得出一个相对完善的保护网络设计, 同时兼顾到各相关者利益。系统保护规划方法的目标, 是通过识别出重要的生物重点地区进行优先保护, 并与现有保护区系统综合构成一个高效的保护体系, 使有限的资金、人力和物力资源得到最佳配置利用, 同时也便于相关的保护和管理部门实施运行规划方案。该理论以及方法已在国际上广泛应用

并产生了重大的学术影响^[12-29]。

系统保护规划方法以现有保护体系为基础, 通过选取有代表性的物种、生境或生态系统以及生态过程作为保护对象, 在特定保护目标驱动下, 基于特定规划单元, 利用空间优化软件(Marxan、C-Plan、Zonation等)计算各规划单元的不可替代性, 依据不可替代性大小识别出未受保护的、重要的生态功能区 and 生物多样性热点区域。

基于野外调研、遥感和地理信息系统等手段, 以集水区为保护规划单元, 综合考虑基于生态地理分类的珠江流域湿地生态系统、保护物种分布等生

物信息和路网、居民分布、水坝等社会经济信息,以及已有湿地保护区信息,运用系统保护规划方法,利用 Marxan 模型,进行中国珠江流域湿地生态系统保护优先格局构建. 以期为珠江流域湿地保护体系的完善提供科学依据,为进一步构建全国层面湿地保护体系提供重要的理论和方法借鉴.

2.1 确定规划单元及边界 系统保护规划方法是基于规划单元进行的,对于规划单元,可以是网格、六

边形或者其他环境单元,比如集水区. 本文依据湿地生态系统特征,采用 ArcHydro 工具,利用 DEM、水系数据并结合中国三级流域单元及县域单元,建立珠江流域湿地研究范围内流域单元集水区单元(图 2),作为规划单元进行系统保护规划格局模拟. 集水区单元作为规划单元突出了流域湿地生态系统结构的完整性,最终建立集水区共 910 个,平均面积为 341.19 km² 作为优化格局的规划单元.

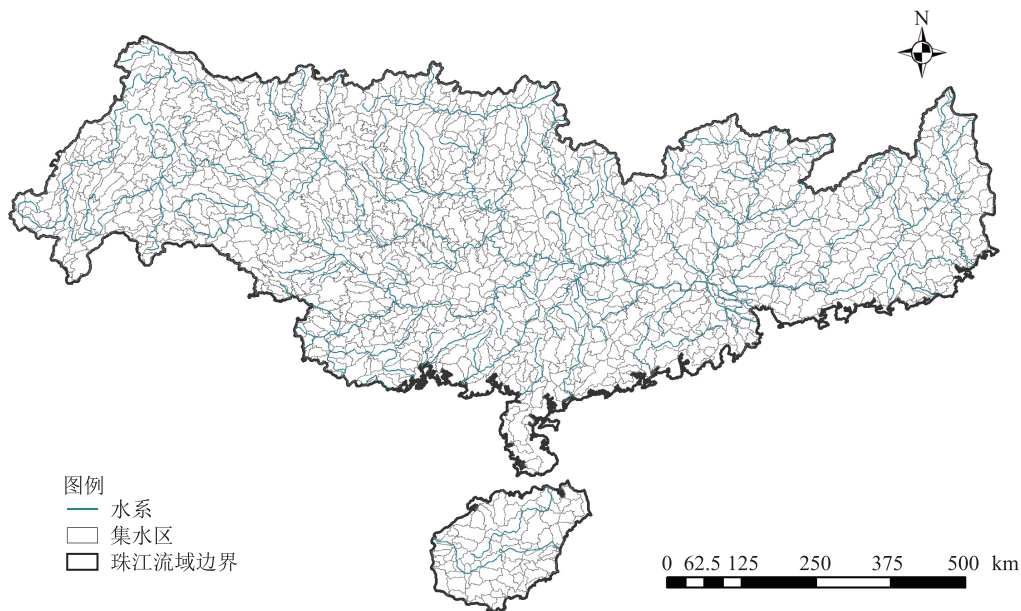


图 2 珠江流域湿地保护单元划分结果

2.2 确定保护对象

1) 珠江流域湿地生态系统类型划分. 对于系统保护规划中的保护对象一般来说可分为生境类型与具体保护物种. 在本次研究中保护生境对象的确定,

主要是依据梁晨等^[30]建立的全国湿地生态地理综合分类体系,在全国 90 种湿地生态地理综合分类中,珠江流域内总计共涵盖了 21 类湿地生态地理分类类型(表 1, 图 3).

表 1 珠江流域湿地生态地理类型

湿地类型	编号	湿地类型	编号
暖温带湿润及半湿润区高原湖泊湿地	40 103	亚热带湿润区平原河流湿地	60 402
暖温带湿润及半湿润区丘陵湖泊湿地	40 303	亚热带湿润区平原湖泊湿地	60 403
亚热带湿润区滨海湿地	60 001	亚热带湿润区平原沼泽湿地	60 404
亚热带湿润区高原河流湿地	60 102	热带湿润区滨海湿地	70 001
亚热带湿润区高原湖泊湿地	60 103	热带湿润区山地河流湿地	70 202
亚热带湿润区山地河流湿地	60 202	热带湿润区山地湖泊湿地	70 203
亚热带湿润区山地湖泊湿地	60 203	热带湿润区丘陵河流湿地	70 302
亚热带湿润区山地沼泽湿地	60 204	热带湿润区丘陵湖泊湿地	70 303
亚热带湿润区丘陵河流湿地	60 302	热带湿润区平原河流湿地	70 402
亚热带湿润区丘陵湖泊湿地	60 303	热带湿润区平原湖泊湿地	70 403
亚热带湿润区丘陵沼泽湿地	60 304		

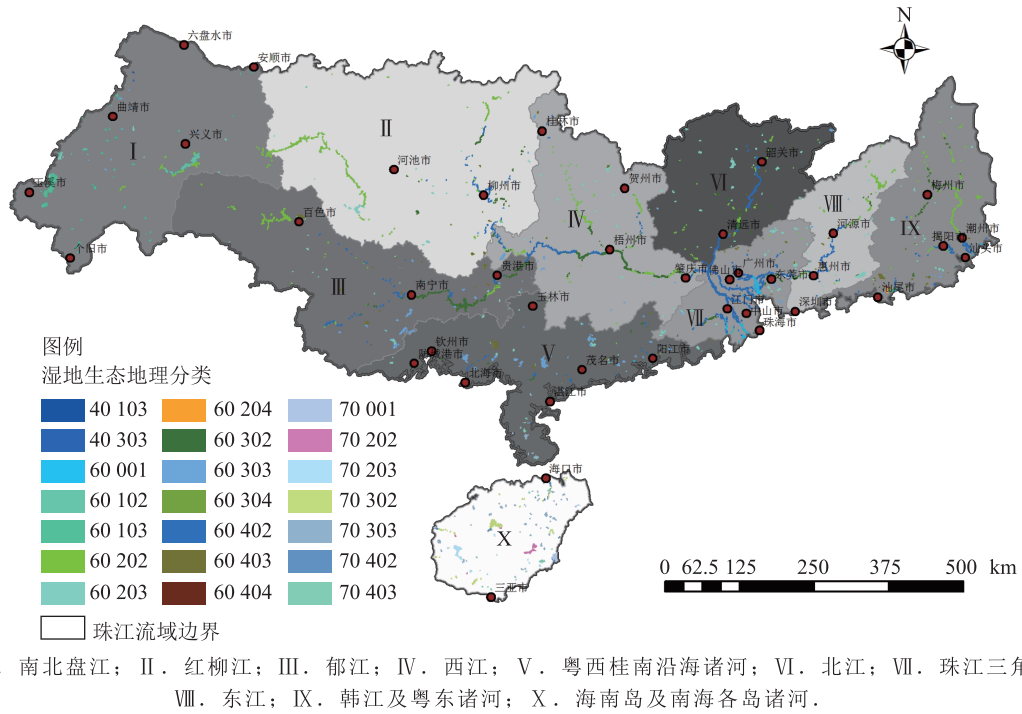


图 3 珠江流域湿地生态地理分类

2)确定保护物种. 对于湿地生态系统来说, 鱼类和水鸟是比较恰当的保护物种. 但由于生物多样性的复杂性及现有资料数据的限制, 很难获得所有生

物信息, 本文只收集到了鸟类数据, 没有鱼类数据, 所以对于保护物种的确定, 结合专家意见将在珠江流域分布的水鸟作为指示保护物种(图 4).

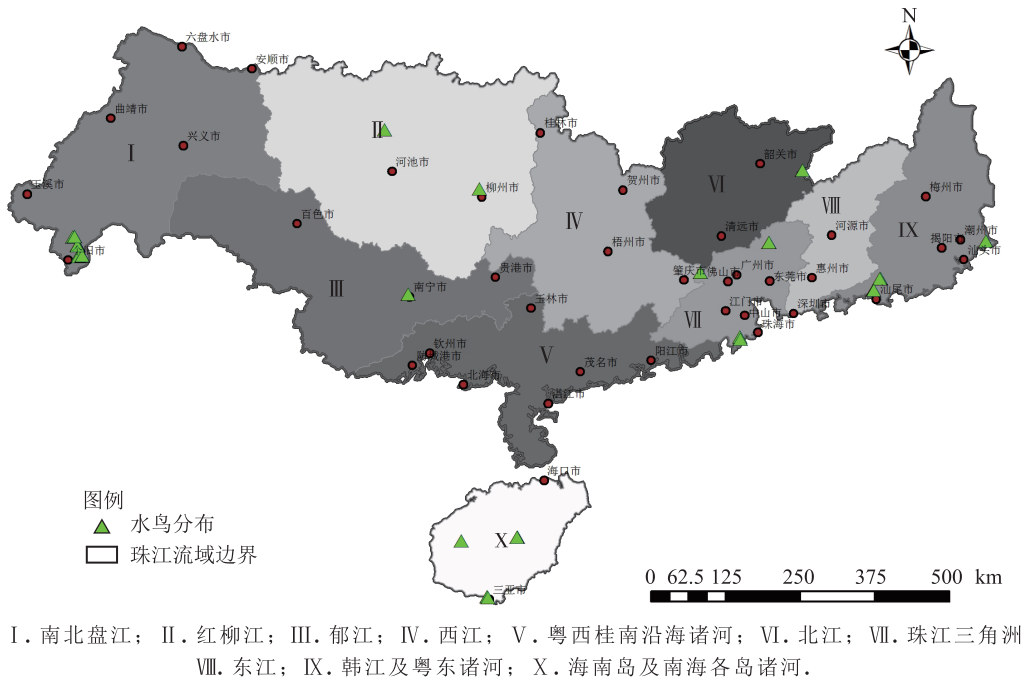


图 4 珠江流域鸟类分布

3)确定保护目标. 生物多样性保护不仅表现在物种的多样性, 更加体现在对于生态系统的多样性的保护上. 而生物多样性的保护目标可以根据生态学知识和一些相对范围进行设定, 例如采用物种-面积曲线以及最小种群存活率等, 或者参照 IUCN 通

常选择的 10% 作为保护区面积比例. 由于国际上陆生生态系统研究中一般设置 10%~30% 的保护目标. 因此, 根据相关研究^[31-32], 在此选择物种分布总面积的 30%.

4)BLM 参数设定. 根据不同 BLM 值设定后得出

的一系列情景,绘制不同情景对应的边界长度和保护代价,选出的规划单元边界长度随着保护代价的增加而增加.刚开始,当保护代价值变化不大时,选出的规划单元边界长度变化稳定;但是随着保护代价逐渐增大时,边界长度越来越大,而拐点处的值就是研究所需的相对合理的BLM值,本文中的拐点BLM为0.00002.

5)保护代价分析与评估.由于直接度量珠江流域内保护代价是不可能的,所以用人为干扰作为间接指标来代替.本文使用了能反映人类干扰的社会经济空间数据来计算每个集水区的保护代价指数.考虑到研究区的实际情况以及数据的可获得性,选取公路、铁路、城镇、农村居民点和水坝作为计算保护代价的间接因子(表2).其中保护区是作为保护代价指数的补充,用来对由于人为干扰因子得出的保护代价进行调整的.基于保护区覆盖面积比所作调增能减少保护代价,增加相对生态完整性指数,这是因为受到保护的区域有利于景观和生态过程的维持.最后再将基于公路、铁路、水坝、农村居民点和城镇分布等影响因子得出的保护代价指数用保护区覆盖面积来调整,得到最终保护代价指数分布,公式如下:

$$C = \sum_{j=1}^n \left(\frac{V_i - V_{i,\min}}{V_{i,\max} - V_{i,\min}} W_i \right), \quad (1)$$

$$C' = C(1 - 0.5R), \quad (2)$$

式中 V_i 为每个集水区内因子 i 的度量值, W_i 为因子 i 的权重, j 为每个集水区内因子的个数, C 为每个集水区调整前的代价值, C' 为每个集水区经过保护区调整后的代价值, R 为每个集水区内被保护区覆盖的面积比.

表 2 各影响因子度量与权重

因子	度量(每个集水区)	权重系数
公路	公路长度/河流长度	1
铁路	铁路长度/河流长度	1
城镇	农村居民点个数/集水区面积	5
农村居民点	城镇面积/集水区面积	5
大坝	大坝个数/集水区面积	20
保护区	保护区面积/集水区面积	

3 结果与分析

3.1 珠江流域湿地保护现状评估及格局优化结果

依据广泛使用的自然湿地类型,珠江流域现状湿地可分为滨海湿地、河流湿地、湖泊湿地、沼泽湿

地等 4 种类型.基于遥感分析,珠江流域湿地总面积约 6 653.93 km²,其中,各类型湿地面积分别为 441.57、4 001.61、2 183.69、27.07 km²(表 3,图 5).现状保护体系各类型湿地保护比例普遍较低,尤其分布最广的河流湿地保护比例仅为 0.12%;优化后的河流湿地保护空缺面积为 856.38 km²,保护比例提升至 21.4%.此外,纳入现状保护范围的滨海湿地及湖泊湿地也相对最少,约占 0.69%和 0.98%;而经过优化提升后的保护比例分别为 22.14%与 25.26%.总体来看,经过系统保护规划后的优化保护格局(保护比例为 22.65%)可大幅扭转珠江流域的湿地保护比例总体严重偏低(受保护面积仅占其总面积的 0.47%左右)的严峻形势.

表 3 珠江流域湿地优先保护格局体系所保护的湿地与现状保护体系对比

湿地类型	湿地面积/km ²	现有保护体系保护面积/km ²	优先保护空缺保护面积/km ²	现有保护体系保护比例/%	优先保护格局保护比例/%
滨海湿地	441.57	3.04	97.78	0.69	22.14
河流湿地	4 001.61	5.00	856.38	0.12	21.40
湖泊湿地	2 183.69	21.48	551.59	0.98	25.26
沼泽湿地	27.07	1.55	1.55	5.73	5.73
总计	6 653.93	31.07	1 507.30	0.47	22.65

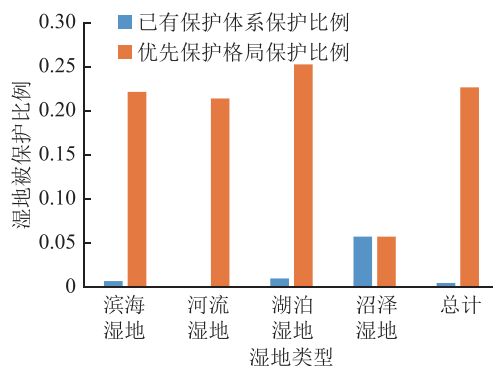


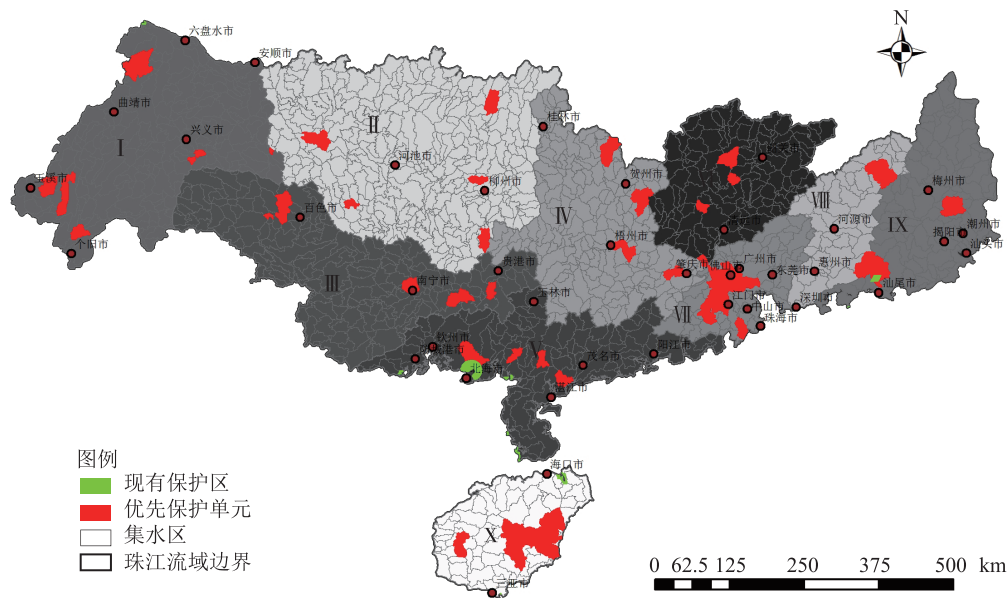
图 5 珠江流域湿地优先保护格局体系所保护的湿地与现状保护体系对比

3.2 珠江各子流域湿地保护现状及其格局优化对比

为更明晰地对珠江流域湿地保护格局进行分析,研究基于珠江流域二级子流域单元,通过将现有国家级湿地保护区分布情况与优化保护格局分布结果进行对比,评估确定湿地保护空缺(图 6,图 7).由结果可知:南北盘江流域现状湿地保护严重不足,湿地保护空缺主要集中分布于玉溪市中西部、个旧市南部以及曲靖市北侧,主要保护的湿地类型为河流、湖泊湿地;红柳江流域湿地保护空缺主要集中河池市与安顺市交界处,且主要保护了该处大面积河流

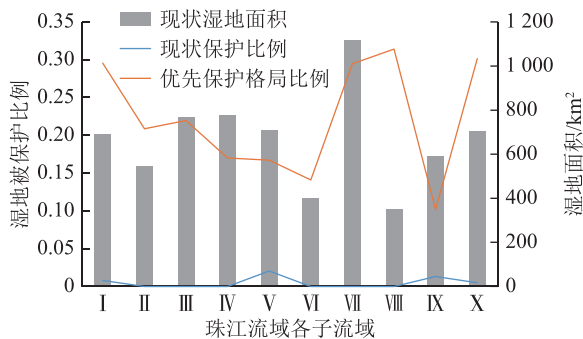
湿地,此外河池市南部也分布保护空缺;郁江流域主要的保护空缺位于百色市以及南宁市,且保护了该区域的河流及湖泊湿地;西江流域的主要保护空缺之一集中在贺州市北侧与桂林市交接处以及贺州市东侧,且保护了此处大面积的河流湿地群,此外亦有一部分保护空缺分布于肇庆市,作为该处河流、湖泊湿地的未来规划保护地;粤西桂南沿海诸河区主要湿地保护空缺分布于北海市临海区域及湛江市,并围绕现有自然保护区范围进行一定程度拓展,重点保护该区域的滨海湿地及河流湖泊湿地;北江流域主要保护空缺主要分布在清远市西侧及与韶关市

交接处;珠江三角洲保护空缺面积分布较广,主要位于佛山市、江门市以及珠海市滨海区域;东江流域保护空缺分布于河源市东北部区域以及惠州市与汕尾市相邻区域,保护了大面积的河流、湖泊湿地;韩江及粤东诸河区主要保护空缺分布于汕尾市西侧与惠州市交界处,且在原有广东海丰湿地自然保护区的基础上进行拓展,另一处则分布在梅州市东侧;海南岛及南海各岛诸河区主要保护空缺分布在东方市东侧,且将保护大面积的湖泊湿地,另一处面积较大的保护空缺则跨琼中黎族苗族自治县、琼海市、万宁市 3 县市。



I. 南北盘江; II. 红柳江; III. 郁江; IV. 西江; V. 粤西桂南沿海诸河; VI. 北江; VII. 珠江三角洲; VIII. 东江; IX. 韩江及粤东诸河; X. 海南岛及南海各岛诸河。

图 6 珠江流域湿地保护优化格局



I. 南北盘江; II. 红柳江; III. 郁江; IV. 西江; V. 粤西桂南沿海诸河; VI. 北江; VII. 珠江三角洲; VIII. 东江; IX. 韩江及粤东诸河; X. 海南岛及南海各岛诸河。

图 7 珠江二级子流域湿地现有/保护空缺比例及总湿地面积

4 结论与讨论

珠江流域地跨 8 大省级行政单位及港澳地区,

囊括了粤港澳大湾区及海南自由贸易港两大中国未来经济最为活跃的绝对区域。因此,从子流域尺度对湿地保护体系进行构建,对未来该区域生态环境保护体系的形成将产生重大的支撑作用。

总体来说,在珠江流域这样一个人口众多、且经济高度活跃繁荣的地区,其湿地保护体系极其缺失,因此亟需结合现状情况与分析结果,因地制宜的构建合理的保护格局。

1) 珠江流域上游。珠江发源于云南省曲靖市乌蒙山余脉的马雄山东麓,虽该区域的人为干扰程度较低,但山区与高原湿地决定了其生态环境极其脆弱,尤其云贵高原山区大面积湖泊、河流湿地还面临保护缺失状态。因此建议在该区域新建针对高原与山区的湿地自然保护区,完善湿地保护体系。

2) 珠江流域中下游。粤港澳大湾区的支撑地带,由于该区域经济社会与上游相比呈现更为快速的发

展,大面积湿地已不同程度地遭到人为活动的干扰与破坏,应对以两广为主的大型湿地空缺建立大型自然保护区,强化重要生态储备资源的保护与修复.此外,在该区域还应主要围绕重要湿地,升级原有湿地保护级别,新建或扩大原有湿地保护边界,提升保护管理水平.

3)珠江三角洲.粤港澳大湾区建设的核心地区,同时也是典型滨海湿地主要分布区域,经济发展要求与生态资源保护需求高度重叠.除面向湿地空缺建立各级自然保护区,在现有保护体系的基础上扩建保护区范围,强化保护区管理水平.积极开展针对性的滨海湿地修复项目缓解围填海活动,同时对于位于广东省、港澳地区等经济人口发达区域的湿地空缺,应结合休闲游憩、科普宣教活动建立不同类型的湿地公园或湿地小区,推进人与自然和谐发展.

4)海南岛及南海各岛诸河.作为国家未来重点打造的国际自然贸易港,拥有丰富优良的生态环境资源,因此对区域内生态环境资源,尤其是湿地资源的保护和合理利用就显得至关重要.该区域湿地保护空缺主要位于海南岛东侧与西侧部分地区,因此应根据各区域保护强度与发展程度不同,建立以不同类型的自然保护区、自然公园构成的以保护湿地为主的自然保护地体系,并合理引入科学研究、生态旅游、自然教育与研学等低强度、低影响的相关活动,实现资源保护与自由贸易港可持续发展目标相统一.

5 研究展望

5.1 研究意义 本研究首次基于系统保护规划思想理论,运用系统规划软件,对珠江流域的湿地生态保护体系进行优化设计.相对于国内相关研究而言,考虑因素更加综合化,方法手段更加客观化,研究结果更加定量化,既有利于对最终规划结果进行分析评价,又有利于结果的应用,给保护策略的制定提供了直观的参照依据.根据本研究结果,建议在生物多样性保护空缺地区新建和扩建自然保护区,特别是建立国家级自然保护区或升级省级保护区为国家级保护区,提高保护效率;同时也在保护区、优先区之间建立连接和缓冲带,或生态廊道保护区,形成区域保护区网络,以有效保护生物多样性资源.

5.2 研究不足

1)生物多样性保护目标与生态服务功能的耦合研究.本文主要以流域尺度的湿地生物多样性保护及湿地生境类型为目标进行分析研究,而对于湿地其具有重要价值的生态系统服务功能却未有涉及;所

以未来研究将设计基于其特有且重要的生态系统服务功能的湿地保护预案体系,与基于物种多样性保护的预案体系综合,构建流域尺度高效的湿地系统保护网络体系.

2)流域湿地纵向-横向-垂向连接性的保护.流域湿地与陆域生态系统不同,存在显著的纵向(上下游)、横向(河道与集水区)和垂向(地表水与地下水)的水文连接性.以往陆域生态系统保护规划往往忽视湿地生态系统的三维连接性,因此亟需建立一套适用于流域湿地系统,考虑其三维连接效应的保护规划.本研究在一定程度上对横向-纵向连接性进行系统考虑,但如何定量表征三维连接性强弱,尤其是垂向连接性的度量则有待进行深入的研究.

6 参考文献

- [1] LINKE S, NORRIS R H, PRESSEY R L. Irreplaceability of river network: towards catchment-based conservation planning[J]. *Journal of Applied Ecology*, 2008, 45(5): 1486
- [2] LINKE S, PRESSEY R L, BAILEY R C, et al. Management options for river conservation planning: condition and conservation re-visited[J]. *Freshwater Biology*, 2007, 52(5): 918
- [3] NEL J L, ROUX D J, ABELL R, et al. Progress and challenges in freshwater conservation planning[J]. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 2008, 19(4): 474
- [4] KLEIN C, WILSON K, WATTS M, et al. Incorporating ecological and evolutionary processes into continental-scale conservation planning[J]. *Ecological Applications*, 2009, 19(1): 206
- [5] HERMOSO V, LINKE J, PRENDA J, et al. Addressing longitudinal connectivity in freshwater systematic conservation planning[J]. *Freshwater Biology*, 2015, 56(1): 57
- [6] 姜海萍,朱远生,陈春梅.珠江流域水生态保护与修复探讨[J]. *人民珠江*, 2013, 34(增刊1): 21
- [7] 李婧贤,王钧,杜依杭,等.快速城市化背景下珠江三角洲滨海湿地变化特征[J]. *湿地科学*, 2019, 17(3): 267
- [8] 童娟.珠江流域概况及水文特性分析[J]. *水利科技与经济*, 2007(1): 31
- [9] 朱远生,陈春梅,欧阳昊,等.珠江流域水资源保护形势与任务[J]. *人民珠江*, 2011, 32(6): 56
- [10] 钱树芹,张心凤,林凤标,等.浅谈珠江流域水生态现状及保护与修复措施[C]. *中国水利学会2013学术年会*. 广州: 2013
- [11] 郭盛才.广东湿地类型及其分布特征研究[J]. *广东林业科技*, 2011, 27(1): 85
- [12] BALMFORD A. Conservation planning in the real world;

- South Africa shows the way[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2003, 18(9): 435
- [13] COWLING R M, PRESSEY R L, ROUGET M, et al. A conservation plan for a global biodiversity hotspot—the Cape Floristic Region, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2003, 112(2): 191
- [14] CARWARDINE J, ROCHESTER W A, RICHARDSON K S, et al. Conservation planning with irreplaceability: does the method matter?[J]. *Biodiversity Conservation*, 2007, 16(1): 245
- [15] KERLEY G I H, PRESSEY R L, COWLING R M, et al. Options for the conservation of large and medium-sized mammals in the Cape Floristic Region hotspot, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2003, 112(2): 169
- [16] KNIGHT A T, COWLING R M, ROUGET M, et al. Knowing but not doing: selecting priority conservation areas and the research-implementation gap[J]. *Conservation Biology*, 2008, 22(3): 610
- [17] MARGULES C R, PRESSEY R L. Systematic conservation planning[J]. *Nature*, 2000, 405(6783): 243
- [18] MARGULES C R, SARKAR S. Systematic conservation planning[M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007
- [19] POLASKY S. Why conservation planning needs socioeconomic data[J]. *PNAS*, 2008, 105(18): 6505
- [20] PRESSEY R L, CABEZA M, WATTS M E, et al. Conservation planning in a changing world[J]. *Trends in Ecology and Evolution*, 2007, 22(11): 583
- [21] PRESSEY R L, COWLING R M, ROUGET M. Formulating conservation targets for biodiversity pattern and process in the Cape Floristic Region, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2003, 112(1): 99
- [22] RODRIGUES A S L, ANDELMAN S J, BAKARR M I, et al. Effectiveness of the global protected area network in representing species diversity[J]. *Nature*, 2004, 428(6983): 640
- [23] ROUGET M, RICHARDSON D M, COWLING R M. The current configuration of protected areas in the Cape Floristic Region, South Africa[J]. *Biological Conservation*, 2003, 112(1): 129
- [24] SILLS J. Global and local conservation priorities[J]. *Science*, 2007, 318(5855): 1377
- [25] WILSON K A, MCBRIDE M F, BODE M, et al. Prioritizing global conservation efforts[J]. *Nature*, 2006, 440(7082): 337
- [26] JARED G U, JOYCE F, LEAH R G. Incorporating biodiversity conservation and recreational wildlife values into smart growth land use planning[J]. *Landscape and Urban Planning*, 2011, 100(1/2): 136
- [27] RUPPERT V, PASCAL P, CÉLINE S, et al. Exploring spatial patterns of vulnerability for diverse biodiversity descriptors in regional conservation planning[J]. *Journal of Environmental Management*, 2012, 95(1): 9
- [28] HEIKE C, MARCUS S, INGA S, et al. Predicting the distribution of forest habitat types using indicator species to facilitate systematic conservation planning[J]. *Ecological Indicators*, 2014, 37(A): 131
- [29] ANDRÉS L N, VERÓNICA A, JESÚS A, et al. Conservation planning for freshwater ecosystems in Mexico[J]. *Biological Conservation*, 2015, 191: 357
- [30] 梁晨, 李晓文, 崔保山, 等. 中国滨海湿地优先保护格局构建[J]. *湿地科学*, 2015, 13(6): 660
- [31] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于系统保护规划的黄河流域湿地优先保护格局[J]. *应用生态学报*, 2018, 29(9): 3024
- [32] 郭云, 梁晨, 李晓文. 基于水鸟保护的长江流域湿地优先保护格局模拟[J]. *生态学报*, 2018, 38(6): 1984

Systematic conservation planning of freshwater wetlands in Pearl River Basin

LIANG Chen^{1,2)} MU Yonglin²⁾ ZHI Liehui²⁾ LIANG Fangyuan²⁾
LI Xiaowen^{2)†} BAI Junhong²⁾ LI Peng³⁾

(1) Beijing Tsinghua Tongheng Urban Planning&Design Institute, 100085, Beijing, China;

2) School of Environment, Beijing Normal University, 100875, Beijing, China;

3) Wuhan Municipal Bureau of Parks, 430015, Wuhan, Hubei, China)

Abstract Wetland distribution data were used to conduct comprehensive evaluation of wetland protection status in the Pearl River Basin, an important socio-economic development area. Aiming at protection of wetland biodiversity, theories and methods of systematic protection planning were used to consider comprehensively socioeconomic factors such as GDP and population density. Spatial optimization model Marxan was used to construct

priority pattern of wetland protection in the Pearl River Basin. A total of 87 protection units covering a total area of 27 681.79 km² were established, a protection network was formed, each sub-basin was evaluated to determine wetland protection vacancies. The Pearl River Basin protection system was found to be seriously lacking and needs to be reconstructed urgently. Wetland protection vacancies in the upper reaches were found to be mainly concentrated in areas where plateaus, mountain lakes and river wetlands were widely distributed. In the middle and lower reaches of the Pearl River, large-scale nature reserves for large-scale wetland vacancies need to be established to strengthen protection and restoration of important ecological reserve resources. The Pearl River Delta region has been subject to strong human disturbance and experienced prosperous economic activities, construction of wetland parks or wetland communities in the protection space of the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area should be an urgent focus, to launch targeted coastal wetland restoration projects to ease reclamation. Wetland protection vacancies in Hainan and the rivers of the South China Sea islands are mainly located in parts of the east and west of Hainan Island. Different types of nature reserves and natural parks should be established depending on protection intensity and development levels in the region. These data could be applied to the adjustment of the Pearl River Basin wetland protection system, for overall protection, rational development and utilization of the Pearl River wetland from a macro level. Our work will be useful for key economic developments such as the Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area.

Keywords wetlands in the Pearl River Basin; systematic protection planning; Guangdong-Hong Kong-Macao Greater Bay Area; conservation gaps; protection priority pattern