DOI: 10.5846/stxb201402180281
曲艺, 李佳珊, 王继丰, 崔福星, 孙工棋, 栾晓峰, 倪红伟.基于系统保护规划的三江平原湿地保护网络体系优化.生态学报,2015,35(19): - .
Qu Y, Li J S, Wang J F, Cui F X, Sun G Q, Luan X F, Ni H W.SCP (Systematic Conservation Planning) Optimization for a Wetland Conservation Network System on Sanjiang Plain, China.Acta Ecologica Sinica,2015,35(19): - .

基于系统保护规划的三江平原湿地保护网络体系优化

曲 艺[1], 李佳珊[2], 王继丰[1], 崔福星[1], 孙工棋[3], 栾晓峰[3], 倪红伟[1,*]
1 黑龙江省科学院自然与生态研究所 湿地与生态保育国家地方联合工程实验室 黑龙江省湿地与恢复生态学重点实验室, 哈尔滨 150040
2 黑龙江省林业设计研究院, 哈尔滨 150040
3 北京林业大学自然保护区学院, 北京 100083

摘要:综合三江平原湿地不同层次、不同维度的生物多样性特征,在系统保护规划方法(Systematic Conservation Planning, SCP)框架下,以集水区为规划单元,计算研究区域不可替代性指数,确定高保护价值网络体系,通过保护空缺分析对现有保护网络进行优化,并评估优化体系的有效性。结果表明:三江平原湿地高保护价值区域的分布呈现沿河流分布的特点;现有保护区中湖泊和目标物种的保护状态比较好;保护网络体系优化后,沼泽湿地在保护网络中的比重由 22.88%重增加到 50%以上;河流湿地由 16.20%增加到 33.92%;地下水资源在现有保护网络中的比重非常低,仅为 2.01%,优化后保护网络中保护比重增加到 12.05%,因此在今后的保护区规划中,应该重视对地下水资源的保护和管理。另外本研究结合生态脆弱性对高保护价值的空缺设计三个情景方案,并根据生态威胁的种类和强度提出各优先保护方案的保护建议,为保护管理决策提供依据。

关键词:三江平原湿地; 系统保护规划; 不可替代性; 脆弱性; C-Plan

SCP (Systematic Conservation Planning) Optimization for a Wetland Conservation Network System on Sanjiang Plain, China

QU Yi[1], LI Jiashan[2], WANG Jifeng[1], CUI Fuxing[1], SUN Gongqi[3], LUAN Xiaofeng[3], NI Hongwei[1,*]
1 *National and Local Joint Laboratory of Wetland and Ecological Conservation, Key Laboratory of Wetland and Restoration Ecology, Heilongjiang Academy of sciences, Institute of Natural Resources, Harbin* 150040, *China*
2 *Heilongjiang Academy of Forestry Design, Harbin* 150040, *China*
3 *College of Nature Reserve, Beijing Forestry University, Beijing* 100083, *China*

Abstract: This study optimized an existing conservation network system using SCP and gap analysis while evaluating the effectiveness of the new system. The process of establishing high-value conservation networks took into account biodiversity features of different levels and dimensions in the Sanjiang Plain. The process also accounted for the irreplaceability of catchments, since these planning units fall under the framework of SCP. In the horizontal dimension, we had two conservation level objectives, one for the ecosystem level and one for the species level. Eight types of marsh wetland systems, all lake ecosystems, and high conservation value river wetland systems were selected as ecosystem level conservation surrogates. Thirteen endangered birds and four endangered mammals were selected as species level conservation surrogates. In the vertical dimension, we chose 3 effective underground water distribution areas. Ecosystem conservation targets were set based on ecological function value, rarity and threat trends. Species conservation targets were set based on level of endangerment, scope for survival, and population growth/decline trends. Protection targets were set for water

基金项目:国家自然科学基金(C030801); 黑龙江省基础青年基金项目(JC03-09)
收稿日期:2014-02-18; **网络出版日期**:2014-12-04
* 通讯作者 Corresponding author.E-mail: nihongwei2000@163.com

resources according to their runoff modulus and recharge modulus. SCP utilizes the key concept of irreplaceability, which is a measure, varying from zero to one, indicating the importance of an area (planning unit) for the achievement of regional conservation targets. A map of irreplaceability values is therefore a base map of conservation planning. Finally, we combined irreplaceability values with vulnerability factors (factors threatening the ecology of the region) to design different planning options.

Results were as follows:

1. High conservation value areas accounted for about 16% of the whole region and were generally distributed along river and lake ecosystems. Specifically, at headwater intersections, such as the intersection of the Heilongjiang and Wusulijiang, the junction of the Tongjiang and Fuyuan, the marsh wetlands between Fujin and Baoqing, the waterfront in Hulin, and the middle part of Luobei, the northeast Hegang, northeast of Yilan, and the south Muling.

2. Lake ecosystems and target species were well-protected in existing conservation areas. They accounted for 83.90% and 81.25% of the whole conservation network respectively. After the prioritization, these percentages increased only slightly to 86.65% and 100%.

3. Marsh, riverine and wetland ecosystem protection by the existing conservation network was less effective. Prioritization would afford an increase in marsh wetlands (from 22.88% to more than 50%), riverine wetlands (from 16.20% to 33.92%), and underground water resources (from just 2.01% to 12.05%).

4. Vulnerability analysis showed high vulnerability areas on the Sanjiang Plain were mainly distributed in Jiamusi, south of Hegang, north of Shuangyashan and Jixi, the middle of Huanan and Luobei, and the intersection of the Fujin and Suibin.

The work detailed above indicates that future conservation planning must continue to preserve well-protected ecosystems and species and emphasizes the need for protection and management of marsh, riverine and wetland ecosystems, especially underground water resources. Quantification of resource irreplaceability and vulnerability were evaluated as a supplement to this future conservation planning. The authors combined irreplaceability and vulnerability indexes to propose three scenarios (the ecological value prioritized scenario, the rescue prioritized scenario and the economic avoidance prioritized scenario), and provide recommendations for decision-makers under each scenario in terms of ecological threats.

This irreplaceability-based biodiversity conservation planning method integrates protected objects, conservation targets and contributions into one framework and expresses the information in a quantified form. Quantifications enables conservation planning and prioritizing work to be more scientific and better visualized, providing a feasible and effective framework for natural reserve network establishment and prioritization.

Key Words: Wetlands in Sanjiang Plain; Systematic conservation planning; Irreplaceability; Vulnerability; C-Plan

中国自 1956 年至今,自然保护区的数量和面积飞速增长,但大多数保护区是在“抢救式”意识下建设[1],并未全面有效地覆盖生物多样性丰富的地区,导致保护资源的浪费,且随着经济高速发展,自然保护区与商业、社会占地的矛盾也日益显现[1-2]。因此,运用更加全面、系统化的方法确立保护区网络体系成为当今生物多样性保护规划的热点,也是今后的研究趋势和重点。有效的保护网络体系应该能够以有限的资源最大限度地保护某一尺度区域内的生物多样性特征[3-4],弥补当前保护区网络的空缺,优化现有的保护网络体系[5-6],并且能够根据区域脆弱性特征确定优先保护次序[7-8]。系统保护规划(SCP)即是综合目标物种、生态系统、生态过程多层次和多尺度的生物多样性特征,通过设定量化保护目标进行生物多样性保护规划的方法,该方法不仅强调保护网络体系的优化,更加重视保护行动的实施和保护价值的维持[9]。国际上系统保护规划已经得越来越多的应用,并取得成效[10-11]。近年来,中国生物多样性保护规划开始重视 SCP 理念,并在一些地区进行了尝试[12-14]。

湿地提供了重要的生态系统服务功能,是生物多样性的摇篮,也是许多生物物种的重要栖息地[15]。三江平原湿地是我国最大的淡水沼泽集中分布区,经过几十年的开垦,湿地面积大面积消失衰退,导致生态环境恶化,亟待保护[16]。淡水湿地生态系统虽然保有丰富的生物多样性资源,但得到的关注却远少于陆地/海洋生态系统,尤其是河流和地下水连接性在陆地生物多样性保护中未得到应有的重视[17,18]。生物圈中各类生态系统既存异,又有同,系统保护规划在陆地生物多样性中的广泛应用,预示着该方法在湿地生物多样性保护中的重要应用价值和深度发展趋势。目前,一些学者开始深入研究适宜湿地保护的系统保护规划方式,研究重点主要涉及河流湿地分类、湿地生态功能、湿地退化脆弱性模型及湿地生态系统多维性等方面的研究[13,19-21],这些方面的深入研究刚刚起步,国内相关研究甚少,今后必将成为湿地生态系统保护规划的研究热点。

本研究立足于我国现阶段湿地保护战略的迫切需求,选取具有高度典型性、丰富生物多样性、巨大生态系统服务价值,同时又具有高度商品粮经济发展价值的三江平原淡水沼泽湿地为研究对象,在系统保护规划框架下,运用遥感(RS)、地理信息系统(GIS)技术和 C-Plan 保护规划软件,对研究区域湿地生态系统保护网络体系优化分析。本研究契合国家湿地资源环境保护与区域可持续性发展的战略需求,对湿地资源的保护具有重要意义,同时对农业经济发展决策和保护行动实施具有重要的指导作用,其研究成果也将进一步丰富系统保护规划的理论方法和实践经验。

1　研究方法

1.1　研究区域概况

三江平原湿地是由黑龙江、乌苏里江和松花江汇流、冲积而成的低平沃土,是中国最大的淡水沼泽集中分布区。地理坐标为北纬 43°49′55″—48°27′40″,东经 129°11′20″—135°05′26″。三江平原位于中国东北角,西起小兴安岭东南端,东至乌苏里江,北自黑龙江畔,南抵兴凯湖,总面积 10.89 万 km^2。区内水资源丰富,总量 187.64 亿 m^3。属温带湿润半湿润季风气候,年平均气温为 1.6—3.9 ℃,气温年差较大;雨量充沛,年降雨量 500—700 mm,集中在夏、秋两季;冻结期长达 7—8 个月,冻土层深度 220 cm 左右。主要地貌类型为Ⅰ级阶地和河漫滩,地势低平,各种类型低洼地广泛发育,湿地集中连片,分布范围广。三江平原湿地现已建成 6 个国家级湿地自然保护区,其中 3 个被列为国际重要湿地名录[21],被誉为“三江平原野生生物特有基因库”。

区内共有县市 23 个,总人口 862.5 万人,人口密度约 79 人/km^2。三江平原经过几十年的开发,现已成为国家重要的商品粮基地和粮食战略后备基地。过度开荒使三江平原天然湿地面积急速减少,由原来自然生态为主的环境系统转变为半自然生态为主的环境系统,导致空气湿度减少,降水量减少,气温增高,许多野生动物被迫迁徙他乡,生物多样性与生态服务功能正逐渐衰退。

1.2　数据收集与处理

三江平原目标物种濒危程度、栖息地特性、分布范围等信息主要来自《中国濒危动物红皮书》[22]、《中国物种红色名录》[23]及文献资料;90 m 分辨率数字高程模型(DEM)为国际农业研究咨询顾问集团(CGIAR)空间信息协会(CSI)处理后的全球无缝 CGIAR-CSI SRTM 数据;1∶25 万行政区划道路、居民点、地形数据等基础地理信息数据来源于国家基础地理信息中心;TM 遥感影像(2009)来源于国际科学数据服务平台;湿地分布数据(2000)来源于中国湿地科学数据库;1∶100 万中国植被图(2001)来自中国科学院中国植被图编辑委员会;土地利用图由 TM 遥感影像解译获得;地下水资源数据由黑龙江省地下水资源分布图数字化获得。将以上数据利用 GIS 技术建立空间数据地理信息系统数据库。利用 DEM 数据在 ArcToolbox 的 Hydrology 模块中进行河网提取,河网矢量化后通过 Watershed 模块形成集水区栅格图层,将栅格集水区专为面状矢量图层,最终形成 2502 个集水区作为研究区域的规划单元;根据河流等级、水文状况、流经的地理单元所处的植被类型、海拔等指标对河流进行评估[19];根据 2009 年 TM 影像对湿地分布数据(2000)、植被图(2001)进行修正;最终确定生态系统类保护对象为高保护价值的河流湿地和湖泊湿地,及 8 种沼泽湿地;鉴于生物多样性的复杂性,很难收集所有目标物种的信息,本研究综合文献资料和专家意见,选取湿地珍稀濒危鸟类 12 种,兽类 4 种;综

合地下水资源分布、径流模数、补给模数选取 3 个有效地下水分布区;根据研究区域的实际情况和数据可获得性,本研究选取农业占地、公路、铁路、城镇、居民点、水坝等社会经济因素评估生态脆弱性指数。

1.3 研究方法与技术

系统保护规划方法,以不可替代性为中心概念,表达一个规划单元在实现整体保护目标中的重要性。本研究选取三江平原湿地有代表性的生境及生态系统和物种作为保护对象(conservation features),根据每个保护对象的濒危程度、栖息地特性等设定量化保护目标(targets),以集水区为研究区域的规划单元(planning units),利用 C-Plan 保护规划软件提供的空间模型,计算整个区域各个单元的不可替代性指数(irreplaceability),从而确定高不可替代性区域作为保护网络,并与现有保护区网络对比,进行保护空缺分析(gap analysis),同时根据农业发展潜力、公路、铁路、城镇、居民点、水坝等社会经济因素评估生态脆弱性(vulnerability),结合脆弱性对高保护价值的空缺设计三个情景方案:以保护价值优先的保护方案,以抢救优先的保护方案,及以经济避让优先的保护方案,为决策者提供依据。

1.3.1 保护对象选取与保护目标设定

本研究在生态系统层次,选取 8 种沼泽湿地生态系统类型,全部湖泊湿地生态系统,并根据河流流经的地理单元高程、植被类型及水文状况确定高保护价值地理单元作为河流生态系统保护对象;目标物种层次选取 13 种国家Ⅰ级保护鸟类及被列为 IUCN 红色名录中的珍稀濒危鸟类,4 种濒危兽类作为补充;垂直维度上选择 3 个有效地下水分布区。

保护目标的设定对结果影响很大,本文通过对几组保护目标设定得出的结果进行对比分析,并与三江平原湿地实际情况比较,确定生态系统、目标物种、地下水资源的保护目标如下:

生态系统类型保护目标的确定:河流高保护价值单元已经根据赋分法确定,因此目标保护分布面积的 80%;湖泊生态系统在三江平原具有非常高的生态功能价值,且目前收到严重的威胁干扰,确定其保护目标为 70%;沼泽生态系统由于人类近几十年来的开发,面积迅速减少,所有类型沼泽面积仅占三江平原总面积的 7%左右,并且面临继续减少的威胁,出于对三江平原生态环境科学持续发展的考虑,确定其保护目标为现有面积的 80%。

目标物种保护目标的确定:主要依据为濒危等级、生存范围、数量增减趋势。评价标准:A.濒危等级:属于国家Ⅰ级保护物种赋予 2 分,Ⅱ级 1 分;B.生存范围:较大 2 分,较小 1 分;C.数量增减趋势:减少和平稳 2 分,增加 1 分。最后求积,规定:若 ABC = 8,则保护总面积的 60%;若 ABC = 4,则保护 40%;若 ABC = 2 或 1,则保护 20%。另外所有分布面积超过 10000 km^2的物种,都按 10000 km^2计算保护百分比;分布面积小于 100 km^2的物种则全部保护。

有效地下水分布区按地下水资源径流模数、补给模数设定保护目标,较高的为现有面积的 30%;一般的为 20%;较低的为 10%。

1.3.2 河流保护价值评估

由于河流在大尺度地理分布中以线状分布,尤其是在以沼泽湿地和湿地鸟类为主要保护对象的三江平原,选择具有生物多样性代表性的河流流经地理单元作为保护对象,比将河流本身作为保护对象更具有实际保护意义[19]。本研究根据研究资料和专家建议以植被类型、土壤类型和海拔等级叠加后的斑块作为评估单元,根据赋分法对其进行评估,确定高保护价值的河流流经地理单元。评价标准:Ⅰ级河流 5 分,Ⅱ级 3 分;植被类型按照生态功能价值赋分,沼泽、湖泊、草原、灌丛、森林、农田依次为 5、5、4、3、3、1;海拔以地貌类型为依据分为 3 类,<200 m、200—500 m,>500 m,依次赋分 5、3、1;土壤类型按照适宜不同生态系统类型发展程度赋分,沼泽土、白浆土、草甸土、暗棕壤、棕钙土、水稻土、黑土依次为 5、4、4、3、2、1、1;水文状况则按照主要河流的流域面积、长度赋分,黑龙江、松花江、乌苏里江、穆棱河、挠力河、倭肯河、其他河流依次为 5、4、3、3、2、2、1。最后计算每个地理单元平均值,确定值高的地理单元为高保护价值河流分布区。

1.3.3 不可替代性指数计算

不可替代性在生物多样性保护规划中,是将具有重要生态功能的生态系统、对生物多样性有重要贡献的

物种以及生态过程作为生物多样性保护的主要保护对象,根据保护对象的空间分布计算每个规划单元在实现这些保护对象的保护目标过程中的重要性,即特定规划单元实现保护目标的可能性。不可替代性指数(*Irreplaceability*, *IRR*)是 0—1 之间的连续值,值越高,代表所在规划单元的保护价值越高,能够替代该单元完成保护目标的其他规划单元数量越少,较稀少的生物多样性特征所在的规划单元的不可替代性往往要高于一般生物多样性特征[24]。根据选取的保护对象及其量化保护目标,按照 C-Plan 数据格式制作规划单元位点表、规划单元×保护对象矩阵和保护对象属性表。将以上基础表格输入表格编辑器生成 C-Plan 数据库,计算不可替代性指数分布,与 ArcGIS 连接后可以直观地表达出高保护价值区域的分布。

1.3.4　脆弱性指数计算

脆弱性一般用于风险评估,在保护规划领域被 Pressey 等学者定义为现有或潜在威胁过程导致生物多样性丧失的可能性[25]。根据三江平原的生态环境特征及文献资料,本研究将农业占地、公路、铁路、城镇、居民点、水坝等确定为研究区域的生态威胁因素。各个因子之间的权重根据层次分析法(Analytic Hierarchy Process, AHP)确定。生态威胁过程由威胁源向外辐射,其外沿缓冲区形成威胁源影响域,不同等级的威胁源对生物多样性的影响范围也不同。本研究根据不同的威胁源确定其影响范围,并以如下公式计算每个规划单元的脆弱性指数:

$$VI_i = \sum W_{ij} P_{ij}$$

VI_i为第 i 个规划单元的脆弱性指数(*Vulnerability Index*),W_{ij}为在第 i 个规划单元中第 j 个生态威胁指标的权重,P_{ij}为在第 i 个规划单元中第 j 个生态威胁指标所占的面积百分比。

1.3.5　保护空缺分析与优先保护方案

利用 C-Plan 保护规划软件计算不可替代性,根据不可替代性值的大小,分为五个等级,进而得到不同优先等级的热点地区图。通过与现有保护区分布图对比,确定现有保护网络的保护空缺。最后结合每个规划单元的脆弱性指数(*VI*),针对高保护价值的空缺设计三个情景方案:以保护价值优先的保护方案,以抢救优先的保护方案,及以经济避让优先的保护方案,为决策者提供依据。保护价值优先的方案不考虑脆弱性,以高保护价值区域建立优先保护网络;抢救优先的保护方案以脆弱性高的高保护价值区域建立优先保护网络;经济避让优先的保护方案则将人类经济活动强度高的地区剔除,即以脆弱性低而保护价值高的区域建立优先保护网络。并在此基础上对不同保护方案提出进一步的保护行动建议。

2　研究结果

2.1　不可替代性指数分析

三江平原湿地不可替代性指数的分布规律如图 1 所示,该指数是连续值,被分为五个等级(表 1):$0 \leqslant IRR \leqslant 0.2$,$0.2 < IRR \leqslant 0.4$,$0.4 < IRR \leqslant 0.6$,$0.6 < IRR \leqslant 0.8$,$0.8 < IRR \leqslant 1$,分别代表低保护价值、较低保护价值、一般保护价值、较高保护价值和高保护价值。高保护价值区域($IRR > 0.8$)面积约为 1.74 万 km^2,占三江平原湿地总面积的 16.02%;较高保护价值区域($0.6 < IRR \leqslant 0.8$)面积 0.63 万 km^2,是三江平原总面积的 5.77%;一般保护价值以下区域($0 < IRR \leqslant 0.6$)总面积约为 8.50 万 km^2,占区域总面积的 78.21%。

表 1　三江平原不可替代性等级

Table 1　Irreplaceability classification of Sanjiang Plain

不可替代性 Irreplaceability	保护价值 Conservation value	面积/km^2	百分比/%
$0.8 < IRR \leqslant 1$	高保护价值 High value	17400.37	16.02
$0.6 < IRR \leqslant 0.8$	较高保护价值 Relatively high value	6273.20	5.77
$0.4 < IRR \leqslant 0.6$	一般保护价值 Moderate value	8391.59	7.73
$0.2 < IRR \leqslant 0.4$	较低保护价值 Relatively low value	12519.47	11.53
$0 < IRR \leqslant 0.2$	低保护价值 Low value	64043.63	58.95

总体上,高保护价值区域的分布呈现沿河流分布的特点,尤其是在河流源头交汇处,有大面积的高不可替代性规划单元集中分布。高保护价值区域主要分布在:抚远县黑龙江、乌苏里江源头交汇处;同江市与抚远县交界处及同江市河流沿岸;富锦市与宝清县交界处的沼泽分布区;虎林县乌苏里江沿岸;密山市穆棱河沿岸及兴凯湖沼泽分布区;萝北县中部;鹤岗市西北部;依兰县西北部;穆棱市南部。

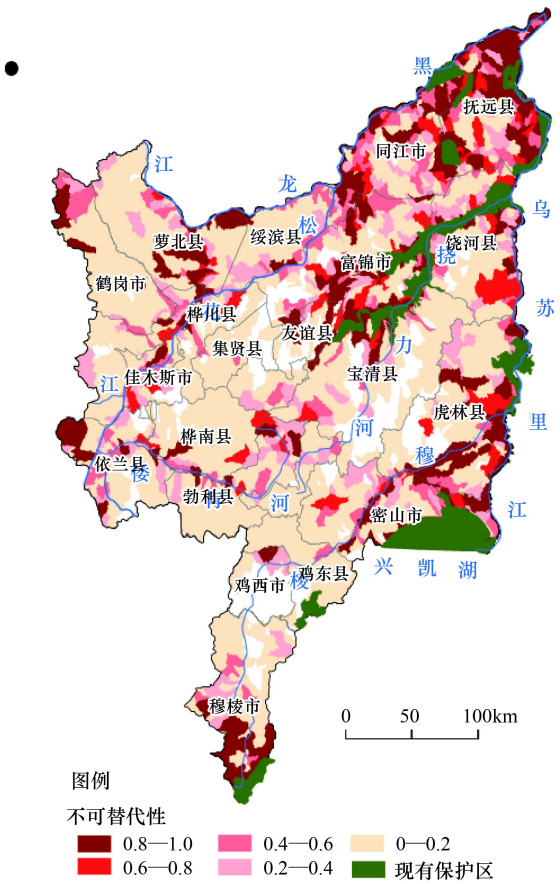

图 1 三江平原不可替代性指数分布

Fig.1 Irreplaceability distribution of Sanjiang Plain

2.2 优化保护网络体系评估

本研究将现有保护区以外的保护价值高,且分布集中的集水区规划单元选取为保护空缺,并对现有保护区和优化后的保护区网络中涵盖的河流湿地生态系统、湖泊湿地生态系统、沼泽湿地生态系统、地下水资源和目标物种所占的比重进行了对比分析。

通过表 2 可以看出,现有保护区网络体系中,湖泊湿地和目标物种在保护网络中所占的比重分别为 83.90%和 81.25%,说明现有保护区中湖泊和目标物种的保护状态比较好,优化后其保护比重能够达到 86.65%和 100%,增长幅度不大。

沼泽湿地总体上在现有保护网络中的比重为 22.88%,在优化后保护网络中比重增加到 50%以上;其中浅洼地芦苇潜育沼泽、深洼地毛果苔草潜育沼泽、浅洼地甜茅潜育沼泽、浅洼地苔草—小叶章潜育沼泽保护状况比较好,均达到 30%左右,而其他类型的沼泽类型保护比重非常小,未来的湿地保护管理中,应将关注重点转向这些沼泽湿地类型,尤其是深洼地漂筏苔草—泥炭沼泽、乌拉苔草苔草—小叶章潜育沼泽及毛果乌拉苔草泥炭沼泽,受保护比例仅在 5%左右,通过对保护网络体系的优化,各类沼泽类型中,有 6 类沼泽湿地的保护比例达到 50%以上,其他两类也提高到 30%左右,乌拉苔草苔草—小叶章潜育沼泽经过优化后可以达到82.28%。目前,三江平原沼泽湿地面积为 0.98 km^2,仅占三江平原总面积的 8.20%,即使经过优化后受保护的沼泽湿地也只占三江平原总面积的 5%左右,因此对于三江平原沼泽湿地不仅急需保护,还应该采取有效的措施进行管理和恢复,本研究选取集水区作为规划单元,在一定程度上为湿地的恢复创造了条件。

河流湿地在现有保护网络中的比重为 16.20%,优化后保护网络中保护比重增加为 33.92%;地下水资源在现有保护网络中的比重非常低,仅为 2.01%,优化后保护网络中保护比重增加到 12.05%,因此在今后的保护区规划中,应该重视对地下水资源的保护和管理。

2.3 优先保护方案

通过脆弱性分析,三江平原生态威胁较高的区域在行政区划上主要分布在佳木斯市,鹤岗市南部,双鸭山市北部,鸡西市北部,桦南县中部,萝北县中部,富锦市与绥滨县交界处;在自然分布上主要沿松花江、穆棱河、倭肯河两岸分布。

结合脆弱性与不可替代性,将高保护价值的空缺设计为三个情景方案(图 2):以保护价值优先的保护方案,以抢救优先的保护方案,及以经济避让优先的保护方案。

表 2　三江平原湿地现有/优化保护网络中保护对象所占比重

Table 2　Percentage of protected features reserved in existing/optimizing conservation network in Sanjiang Plain

保护对象 Protected features	现有面积/物种种数 Existing area/ Species number	%	优化面积/物种种数 Optimizing area/ Species number	%
浅洼地苔草小叶章潜育沼泽 *Sedge—Calamagrositisangustifolia*gley swamp of shallow swale	26.84	5.09	285.33	54.06
浅洼地乌拉苔草—小叶章潜育沼泽 *Carex_meyeriana—Calamagrositisangustifolia*gley swamp of shallow swale	3.19	11.23	23.38	82.28
深洼地漂筏苔草泥炭沼泽 *Carex pseudo-curaica* peat swamp of deep swale	0.44	0.05	316.71	35.03
深洼地毛果苔草—乌拉苔草泥炭沼泽 *Carexlasiocarpa—Carex_meyeriana*peat swamp of deep swale	5.68	0.74	192.50	25.01
浅洼地毛果苔草潜育沼泽 *Carexlasiocarpa*gley swamp of shallow swale	15.95	10.54	87.24	57.64
浅洼地芦苇潜育沼泽 *Phragmitesaustralis*gley swamp of shallow swale	799.78	34.27	1565.70	67.10
浅洼地甜茅潜育沼泽 Mannagrassgley swamp of shallow swale	377.08	29.69	699.10	55.05
深洼地毛果苔草潜育沼泽 *Carexlasiocarpa*gley swamp of deep swale	496.50	31.90	853.98	54.86
河流湿地 Riverine wetlands	1667.57	16.20	3491.64	33.92
湖泊湿地 Lake wetlands	1236.13	83.90	1276.69	86.65
地下水资源 Underwater resource	691.29	2.01	4496.21	12.05
目标物种数量 Number of target species	13	81.25	16	100

保护价值优先的保护方案:该方案不考虑人类干扰,以所有高保护价值区域建立优先保护网络,即上文所述的优化网络,该网络涵盖所有保护对象且保护效率较高。深洼地漂筏苔草泥炭沼泽、潜洼地苔草小叶樟浅育沼泽、乌拉苔草小叶樟浅育沼泽等 7 类沼泽湿地,丹顶鹤、白枕鹤、紫貂等 14 种物种,各等级地下水资源均达保护目标的 80%以上。该方案的保护措施主要以新建、扩建保护区为主,位于保护区内的居民点可以考虑适当迁出。

抢救优先的保护方案:该方案以脆弱性高的高保护价值区域建立优先保护网络,主要目的是抢救受潜在威胁的高保护价值区域,包含的保护对象主要有深洼地毛果乌拉泥炭沼泽等 4 类沼泽湿地,丹顶鹤、白枕鹤等 9 种湿地鸟类栖息地及梅花鹿栖息地,穆棱河沿岸高保护价值河流流经地理单元,以及补给模数和径流模数最高的地下水资源;生态威胁主要是附近铁路可能产生的噪声干扰、粉尘污染等,尤其是穆棱河与河岸并行的铁路沿线,对附近的生态环境产生很大的影响,另外该方案高保护价值区两侧土地利用类型均为农田,具有很高的被转化为农业用地的潜在威胁,急需针对可能的潜在生态威胁采取相应的保护管理措施,如在铁路两侧建防护林以隔离噪声和粉尘,建立完善的规章制度控制农田扩张等。

经济避让优先的保护方案:该方案将人类经济活动强度高的地区剔除,以脆弱性低而保护价值高的区域建立优先保护网络,环境保护与经济发展可同步进行。方案几乎涵盖了所有保护对象,但保护效率一般,保护比例较高的包括深洼地漂筏苔草泥炭沼泽、潜洼地苔草小叶章潜育沼泽等 4 类沼泽湿地,白枕鹤、白头鹤等 8 种湿地鸟类及东北虎、原麝、梅花鹿、紫貂 4 种兽类栖息地,松花江、穆棱河与三江平原边界交界处的高保护价值河流流经地理单元,各等级补给模数和径流模数的地下水资源均有分布;该方案高保护价值区主要分布在三江平原的边缘地区,距离城镇、基础设施分布密集的地区较远,主要生态威胁是低等级公路影响和较低的农业占地威胁,对濒危物种影响不大,通过建立保护区控制进一步的基础设施与农业扩张即可。

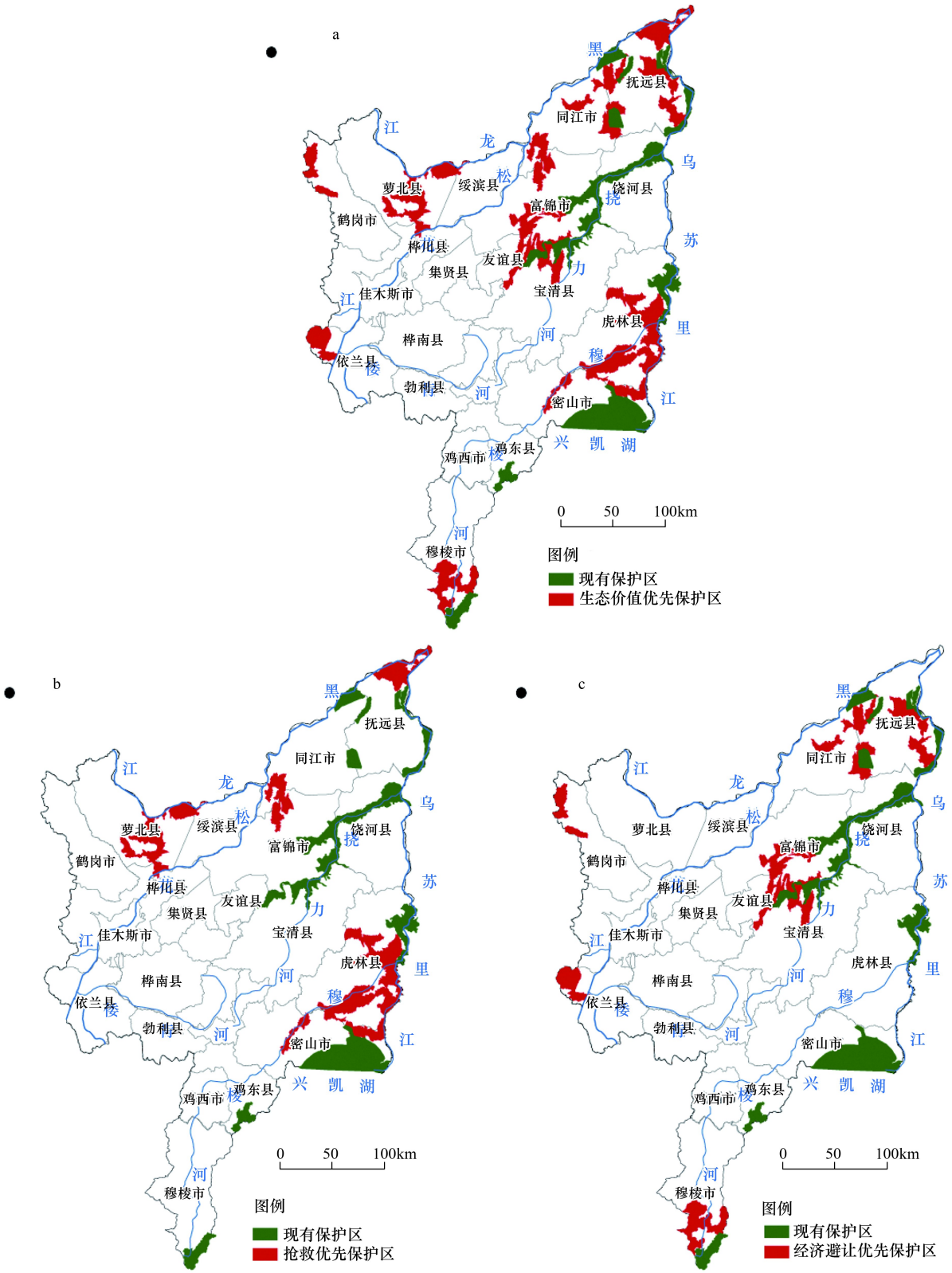

图 2 结合脆弱性的三种保护方案

Fig.2 Three conservation scenarios combined with vulnerability

a. 生态价值优先的保护方案；b. 抢救优先的保护方案；c. 经济避让优先的保护方案

2.4　结论

经研究发现,三江平原湿地高保护价值区域的分布呈现沿河流分布的特点,现有保护区中湖泊和目标物种的保护状况较好;保护网络体系优化后,沼泽湿地在保护网络中的比重由 22.88%增加到 50%以上;河流湿地由 16.20%增加到 33.92%;地下水资源在现有保护网络中的比重非常低,仅为 2.01%,优化后保护网络中保护比重增加到 12.05%,说明三江平原的保护规划对沼泽湿地和地下水资源的重视程度还有待提高。另外,对于生态脆弱性较高的保护空缺,应针对其生态威胁尽快制定具体保护管理措施,防止各种威胁因子对生物多样性造成不良影响。

基于不可替代性的生物多样性保护规划方法针对湿地特征,将保护对象——保护目标——保护贡献整合在同一系统,并以量化形式表达,使保护网络的确定和优化更加科学、直观,为今后湿地自然保护区网络的建立和优化提供了可行的方法和流程参考。

3　讨论

本研究综合三江平原湿地不同层次、不同维度的生物多样性特征,在系统保护规划方法(SCP)框架下,以集水区为规划单元,计算研究区域不可替代性指数,以高不可替代性区域建立新的保护网络,作为原保护网络的优化保护网络体系,评估优化后体系的有效性,结合脆弱性与不可替代性,将高不可替代性的空缺设计为三个情景方案:以保护价值优先的保护方案,以抢救优先的保护方案,及以经济避让优先的保护方案,并针对各方案提出保护管理措施。

以往基于系统保护规划的研究多将研究区域各类生态系统综合考虑,很少有对湿地生态系统的专门性研究,本文针对三江平原湿地生态系统独有的特征考虑保护对象到选择,使得该系统保护规划在生物多样性研究中进一步深化,研究结果也更科学、更有针对性。

不可替代性分析与以往多种指标反映一个地区的生物多样性热点地区的方法不同,它是以一个综合的指标反映保护规划单元在完成整体保护目标中的重要性。不可替代性指数主要受其研究区域的生物多样性特征及其保护目标驱动,对于不同的区域,所选的保护对象应该具有典型性和代表性,能够反映当地的生物多样性特点。本研究针对三江平原湿地的特点,所选取的保护指标主要以湿地生态系统和湿地鸟类居多,因而湿地分布区的不可替代性指数相对较高,森林、灌丛、草原等其他生态系统类型并不突出。由此可见,基于不可替代性的生物多样性保护具有很高的灵活性,尤其对于具有多维度和连接方向性的湿地生态系统类型,应针对其特征进行更深入的分析,专门针对淡水湿地生态系统的系统保护规划开始逐渐成为生物多样性保护规划的热点研究趋势[18,26,27]。

目前,对于淡水湿地的保护研究中,河流的保护受到的关注很少,通常只有对陆地生物多样性保护非常重要时,才被包含在陆地生态系统评估中[18]。本研究在湿地生态系统保护中,着重考虑了河流等级、水文状况、所处海拔、周围植被、地形等条件,并且考虑了垂直维度的地下水资源状况,而对河流上下游集水区、河滨洪泛平原的退化等与连接性相关的主要过程[26]并未涉及。在未来的保护规划研究中,应完善湿地保护的连接性问题,重视湿地横向连接性、纵向连接性、垂向连接性,即其 3D 连接性[13],同时结合物种分布,建立更有效的基于 3D 连接性的湿地优先网络体系。

湿地生态系统优先保护网络体系的优化不仅与生物多样性丰富程度密切相关,还与湿地生态系统所提供的生态系统服务价值、气候变化趋势、建设保护区的成本等有紧密的联系[13,28]。在未来的生物多样性保护规划研究中,应将生态系统服务价值和建立保护区的成本(土地购置成本、机会成本等)纳入系统保护规划,分别构建与生物多样性保护相结合的优先保护体系,为决策者提供不同条件下的保护方案,为保护行动提供参考。

生态脆弱性与生物多样性保护规划的结合是生物保护具有重要意义。本研究由于资料限制,只选取农业占地、公路、居民点等社会经济因子作为脆弱性评估的主要因素。实际上全面的生态脆弱性评估应该涉及自

然(气候、水资源、森林覆盖率等)、社会(人口密度、人均耕地等)、经济(人均 GDP、人均收入等)、污染状况(碳负荷、氮负荷等)以及累计环境影响[29-31],另外还应该考虑潜在的放牧、采伐、农业扩张、城镇化、外来物种入侵等威胁过程的影响范围及其强度,不同影响因素会产生不同的结果[7,32]。在今后的保护规划研究中,应根据研究区域的特点,尽量全面的选取生态脆弱性指标,建立合理有效的生态脆弱性评估体系。

综合本文研究结果,提出建议:1、结合实际情况根据不可替代性和生态脆弱性对三江平原湿地保护网络优化体系进行适当调整以增加保护区的保护效率。2、保护区网络优化方案应根据实际情况和决策需求确定,分期调整。抢救优先的保护方案,生态脆弱性较高,应及时建立保护区,并针对生态威胁进行严格的管理,制定完善的管理策略,避免农业占地、基础设施及城镇化扩张引起的生物多样性丧失;保护价值优先的保护方案,未考虑人类影响,该方案的保护措施主要以新建、扩建保护区为主,位于保护区内的居民点可以考虑适当迁出,可以根据资源、资金情况延缓建立保护区的时限,但必须制定相应的措施控制生态威胁的进一步发展;经济避让优先的保护方案,保护网络分布在三江平原边界地区,人烟稀少,生态环境保持在原始状态,这些保护空缺应给予长期监测,尽量维持其现有的生物多样性水平。

致谢:感谢中国科学院长春地理研究所提供的数据支持,以及洪河自然保护区工作人员的指导与帮助。

参考文献(References):

[1] 蒋志刚. 论中国自然保护区的面积上限. 生态学报, 2005, 25(5): 1205-1212.

[2] Pressey R L, Johnson I R, Wilson P D. Shades of irreplaceability: towards a measure of the contribution of sites to a reservation goal. Biodiversity and Conservation, 1994, 3(3): 242-262.

[3] Pimm S L, Ayres M, Balmford A, Branch G, Brandon K, Brooks T, Bustamante R, Costanza R, Cowling R, Curran L M, Dobson A, Farber S, da Fonseca G A B, Gascon C, Kitching R, McNeely J, Lovejoy T, Mittermeier R A, Myers N, Patz J A, Raffle B, Rapport D, Raven P, Roberts C, Rodríguez J P, Rylands A B, Tucker C, Safina C, Samper C, Stiassny M L J, Supriatna J, Wall D H, Wilcove D. Can we defy nature's end? Science, 2001, 293(5538): 2207-2208.

[4] Wilson K A, McBride M F, Bode M, Possingham H P. Prioritizing global conservation efforts. Nature, 2006, 440(7082): 337-340.

[5] Powell G V N, Barborak J, RodríguezS M. Assessing representativeness of protected natural areas in Costa Rica for conserving biodiversity: A preliminary gap analysis.Biological Conservation, 2000, 93(1): 35-41.

[6] Oldfield T E E, Smith R J, Harrop S R, Leader-Williams N. A gap analysis of terrestrial protected areas in England and its implications for conservation policy. Biological Conservation, 2004, 120(3): 303-309.

[7] Wilson K, Pressey R L, Newton A, Burgman M, Possingham H, Weston C. Measuring and incorporating vulnerability into conservation planning. Environmental Management, 2005, 35(5): 527-543.

[8] Visconti P, Pressey R L, Bode M, Segan D B. Habitat vulnerability in conservation planning-when it matters and how much. Conservation Letters, 2010, 3(6): 404-444.

[9] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning. Nature, 2000, 405(6783): 243-253.

[10] Kukkala A S, Moilanen A. Core concepts of spatial prioritisation in systematic conservation planning. Biological Reviews, 2013, 88(2): 443-464.

[11] Cowling RM, Pressey RL. Introduction to systematic conservation planning in the Cape Floristic Region. Biological Conservation, 2003, 112(1/2): 1-13.

[12] Zhang L, Xu W X, Ouyang Z Y, Zhu C Q. Determination of priority nature conservation areas and human disturbances in the Yangtze River Basin, China. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(4): 326 -336.

[13] 宋晓龙, 李晓文, 张明祥, 杨殿林, 张黎娜, 张贵龙. 黄淮海地区跨流域湿地生态系统保护网络体系优化. 应用生态学报, 2012, 23(2): 475-482.

[14] 曲艺, 王秀磊, 栾晓峰, 李迪强. 基于不可替代性的三江源地区自然保护区评估及空缺分析. 林业科学, 2012, 48(6): 24-32.

[15] Gutzwiller K J, Flather C H.Wetland features and landscape context predict the risk of wetland habitat loss. Ecological Applications, 2011, 21(3): 968-982.

[16] 姜琦刚, 崔瀚文, 李远华. 东北三江平原湿地动态变化研究. 吉林大学学报: 地球科学版, 2009, 39(6): 1127-1133.

[17] Ward J V, Tockner K, Arscott D B, Claret C. Riverine landscape diversity. Freshwater Biology, 2002, 47(4):517-539.

[18] Nel J L, Roux D J, Maree G, Kleynhans C J, Moolman J, Reyes B, Rouget M, Cowling R M. Rivers in peril inside and outside protected areas: a

systematic approach to conservation assessment of river ecosystems. Diversity and Distributions, 2007, 13(3):341-352.

[19] Higgins J V, Bryer M T, KhouryM L, FitzhughT W. A freshwater classification approach for biodiversity conservation planning. Conservation Biology, 2005, 19(2): 432-445.

[20] Hermoso V, Linke S, Prenda J, Possingham HP. Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh water. Freshwater Biology, 2011, 56(1): 57-70.

[21] 陈晓彬, 王英, 赵新宇. 浅析三江平原生态环境的现状及治理措施. 科技信息, 2007, (20): 530-530.

[22] 汪松. 中国濒危动物红皮书. 北京: 科学出版社, 1998.

[23] 汪松, 解焱. 中国物种红色名录. 北京: 高等教育出版社, 2009.

[24] Carwardine J, Rochester W A, Richardson K S, Williams K J, Pressey R L, Possingham H P. Conservation planning with irreplaceability: does the method matter? Biodiversity and Conservation, 2007, 16(1): 245-258.

[25] Pressey R L, Ferrier S, Hager T C, Woods C A, Tully S L, Weinman K M. How well protected are the forests of north-eastern New South Wales? Analyses of forest environments in relation to formal protection measures, land tenure and vulnerability to clearing. Forest Ecology and Management, 1996, 85(1): 311-333.

[26] Linke S, Pressey R L, BaileyR C, Norris R H. Management options for river conservation planning: condition and conservation re-visited. Freshwater Biology, 2007, 52(5): 918-938.

[27] Moilanen A, Leathwick J, Elith J. A method for spatial freshwater conservation prioritization. Freshwater Biology, 2008, 53(3): 577-592.

[28] Popescu V D, Rozylowicz L, Cogălniceanu D, Niculae I M, Cucu A L. Moving into protected areas? Setting conservation priorities for Romanian reptiles and amphibians at risk from climate change. PLoS ONE, 2013, 8(11): e79330.

[29] 李辉, 张利华, 吴君峰, 张鹏. 基于 GIS 的鄱阳湖流域生态脆弱性评价. 华中师范大学学报: 自然科学版, 2011, 45(1): 145-149.

[30] Falko T B, Bram V. Mechanisms for the inclusion of cumulative impacts in conservation decision-making are sensitive to vulnerability and irreplaceability in a stochastically simulated landscape. Journal for Nature Conservation, 2014, 22(1): 265-271.

[31] 田亚平, 常昊. 中国生态脆弱性研究进展的文献计量分析. 地理学报, 2012, 67(11): 1515-1525.

[32] Mohammad R S, William G. Integrating vulnerability into estuarine conservation planning: does the data treatment method matter? Estuaries and Coasts, 2013, 36(4): 866-880.