

doi: 10.7541/2019.174

金沙江流域鱼类的系统保护规划研究

孙赫英^{1,2} 隋晓云¹ 何德奎¹ 李雪晴^{1,2} 陈毅峰¹

(1. 中国科学院水生生物研究所, 武汉 430072; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 在全面整理和收集金沙江流域214种和亚种鱼类的分布及生物学特征的基础上, 采用系统保护规划的方法, 对流域内的鱼类保护进行了研究。首先, 我们确定了物种分布的范围。对分布较广的种类, 通过物种分布模型, 结合气候、河流景观、土地利用、土壤等环境因子, 预测物种在全流域内分布区; 对其余鱼类则直接使用采样点作为分布区。其次, 采用系统保护规划软件, 规划了流域内保护区网络。在规划过程中, 我们根据鱼类运动能力、分布广度和保护级别, 设定了不同的保护目标, 并对现有保护区的保护情况进行评估。结果表明, 模型的最优解选择了486个单元共47950 km², 占所有规划单元数量的7.7%。而被现有湿地相关保护区保护的规划单元仅包含了127种鱼类, 占流域鱼类总数的59.3%, 且其中109种仍需增加保护面积, 说明现有保护区不足以保护流域内的鱼类; 在现有基础上, 保护区保护的规划单元面积至少需增加55.9%才能达成所设定的保护目标。

关键词: 金沙江流域; 系统保护规划; 物种分布模型; Maxent; Marxan; 鱼类多样性

中图分类号: S759.9

文献标识码: A

文章编号: 1000-3207(2019)增-0110-09

淡水生态系统是世界上最受威胁的生态系统^[1]。由于淡水生态系统的保护需要考虑河流的连通性, 相比陆地生态系统的保护更为困难, 多样性减少程度也更为严重^[2-5]。因此, 亟需建立适合淡水生态系统特点的经济有效的系统保护规划方法^[4]。

传统的保护区规划方法为避免与资源利用发生冲突, 多将保护区域设置在相对偏僻和经济发展价值较低的区域^[6]。为应对多样性减少的危机并解决保护区在设置上的偏向, Margules和Pressey^[7]对系统保护规划的方法进行了总结, 并强调了保护区规划的代表性与持续性。与传统的保护区规划方法相比, 系统保护规划不仅要考虑保护区所在区域的自然和生物特性, 还要考虑保护区的设计方法, 包括保护区大小、连通性、边界长度等变量, 以及建立保护区所需要的经济和社会成本^[7,8]。系统保护规划为管理者提供了可量化、可重复和透明的

决策方法, 在马达加斯加岛、澳大利亚大堡礁和南非开普植物区等实际保护案例中都得到了应用^[9-14]。

金沙江是长江的上游, 鱼类多样性极为丰富。由于特殊的自然条件和河流演化历史, 金沙江的鱼类在长江, 乃至全国都十分独特^[15]。然而由于人类活动的影响, 整个长江流域的生态环境不断恶化^[16]。同时, 金沙江蕴藏着极为丰富的水能资源, 是国家“十三五”规划积极推进的重要水电基地。近年来, 水电建设等人类活动对该流域生态系统的影响逐渐增强, 平衡金沙江流域的保护与发展显得愈发重要。要权衡人类活动的影响与保护, 流域尺度和综合的规划方法必不可少, 而越来越多的生物多样性与生态系统服务数据也让更精细的权衡、分析成为可能^[17]。本文对金沙江流域的鱼类及其分布范围进行了系统的整理; 通过物种分布模型, 结合鱼类运动能力与分布, 开展该流域鱼类的系统保护规

收稿日期: 2018-04-19; 修订日期: 2019-03-17

基金项目: 中国科学院战略性先导科技专项(XDB31040101和XDA2005020403); 第二次青藏高原综合科学考察研究(2019QZKK0501); 中国科学院特色研究所项目(支撑长江经济带可持续发展的生态环境保护战略对策研究)资助 [Supported by the Strategic Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB31040101, XDA2005020403); the Second Comprehensive Scientific Expedition to the Qinghai-Tibet Plateau (2019QZKK0501); the Programme for Feature Institutes of Chinese Academy of Sciences (the Strategic Countermeasures of Ecological and Environmental Protection in Supporting Sustainable Development of the Yangtze Economic Belt)]

作者简介: 孙赫英(1990—), 男, 北京人; 博士研究生; 研究方向为宏观生态学。E-mail: heying_sun@163.com

通信作者: 何德奎(1970—), E-mail: hedekui@ihb.ac.cn

划研究;并与现有保护区进行比较,分析了保护效率,为该流域鱼类的系统保护提供支持。

1 材料与方法

本研究范围为自宜宾以上的所有长江上游干支流,统称为金沙江流域。流域面积为 472434 km^2 。

1.1 规划单元和物种分布数据

我们依据金沙江流域内河流的分级情况和面积大小,采用GRASSGIS软件和SRTM 90 m的DEM数据(<http://srtm.csi.cgiar.org/Index.asp>),将金沙江流域划分成6335个子流域作为规划单元^[18]。子流域面积范围为 $0.1\text{--}586.6 \text{ km}^2$,平均面积为 74.6 km^2 ,符合Hermoso等^[19]2012年提出的规划单元大小适宜的需求。在提取子流域时,得到相应的水网模型,作为物种分布模型预测的范围。

鱼类名录和分布数据由研究团队的调查数据、文献资料和GBIF等网络数据库综合整理得到,每条数据的学名均与Catalog of fishes数据库最新的有效种名进行核对^[20, 21]。最后共得到214种鱼类的2570条分布数据。

1.2 物种分布预测

本研究使用Maxent模型对鱼类物种分布进行建模^[22, 23]。为避免使用的环境变量之间出现较强的相关性,使用R中的usdm包计算vif值(方差膨胀因子),剔除vif值超过10,即共线性较强的环境变量,最后保留19个环境变量,共分为气候、河流景观、土地覆盖和土壤四个大类(表1)^[24]。气候变量来自于WorldClim数据库(<http://www.worldclim.org/>);土地利用变量来自于CCI-LC数据库(<https://www.esa-landcover-cci.org/>);土壤类型变量来自于黑河计划数据管理中心的世界土壤数据库(<http://westdc.westgis.ac.cn>);河流景观变量由DEM数据生成。由于同一物种分布的环境可能非常相似,为防止模型过度拟合,我们采用Varela等^[25]的方法,每个物种环境相似的分布点仅保留一个,再选择分布样点多于5个的物种进行建模。

表1 模型使用的环境变量及选择原因

Tab. 1 Environmental variables used in Maxent and rationales for selection

变量类型 Group	变量名称 Variable name	变量选择原因 Rationale
气候 Climate	平均日温差、等温性、最干旱月降雨、最热季降雨和降雨季度变化	气候影响整个生态系统过程
河流景观 Riverscape	河流形态、坡度及其方差	与水文、栖息地数量等因素直接相关
土地覆盖 Land cover	水域、稀疏植被、常绿阔叶林、落叶阔叶林、农田、针叶林、灌木、荒地、城市和洪泛区的面积	陆地生态系统类型与水生生态系统营养输入相关
土壤类型 Soil type	土壤类型多样性	与植被类型、底质相关

应用Maxent模型进行建模时,选择对每个物种做5次交叉验证,将5次结果进行平均。Test AUC(测试集的曲线下面积)是衡量模型建模有效性的指标。本研究将Test AUC小于0.75的物种视作预测失败,作为分布样点少于5个的物种处理^[26]。之后取敏感性(Sensitivity)和特异性(Specificity)之和最大时的阈值,将物种分布概率转换为分布/不分布(0/1)^[27]。

对于分布样点少于5个的物种,若两分布样点间河道距离不超过200 km,则河道流经的规划单元均视作有该物种分布;若两样点间距超过200 km,则只将分布样点所在规划单元视作有该物种分布。

1.3 系统保护规划

利用Marxan软件可以实现流域尺度上的鱼类系统保护规划^[28, 29]。Hermoso等^[30]2011年将Marxan软件原先对保护区边界的权衡转化为对河流连通性的权衡,公式如下:

$$\sum \text{Units Cost} + SPF \sum \text{Feature Penalty} + CP \sum \text{Connectivity Cost}$$

其中,第一项为保护区保护成本;第二项为保护对象未得到保护的惩罚值,SPF代表保护对象惩罚值在总运算中的权重;第三项表示连通性未实现的惩罚值,CP代表连通性惩罚值的权重。

将Marxan软件和物种分布模型相结合的方法已在许多实际保护的案例中得到使用^[11, 30]。我们使用水网模型提取的6335个子流域作为规划单元。因为规划单元面积增大或人类活动影响加强均会增加将该规划单元设置为保护区的成本,所以将流域面积和人类活动影响数据相乘并标准化到0—100的范围作为规划单元的成本。人类活动影响数据来自Global Human Footprint数据库^[31]。每种鱼的分布数量使用该种在各规划单元中有分布的水系栅格数作为替代。

由于鱼类的濒危程度、在流域内的分布范围和所需的生境大小不同,应设置不同的保护目标。在我国有不同的保护标准,如国家级保护鱼类、濒

危动物红皮书鱼类、省级保护鱼类和IUCN名录,通过比对上述标准,将保护种、特有种和IUCN名录的保护级别进行对应,设定保护目标(表2)。此外,根据鱼类的体型和洄游习性,将具有不同运动能力的鱼类分为洄游或大型鱼类($>50\text{ cm}$)、中型鱼类($20\text{--}50\text{ cm}$)和小型鱼类($<20\text{ cm}$)三类,并考虑在流域内分布的广度对保护目标进行调整,得到根据鱼类自身特性制定的保护目标^[32]。如果鱼类在流域内超过10%的规划单元中分布则视为广布种,其余为非广布种。设置保护目标调整的基数 w ($0 < w < 1$),如某种洄游鱼类并非广布种,则需要保留较大面积栖息地才有可能实现保护,因此将保护目标乘上 $1/w^2$ 进行上调。类似地,如一鱼类为广布的中型鱼类,流域内分布的规划单元较多,应下调相应保护目标,但由于是中型鱼类,仍需要一定面积的栖息地才能保证其生存,因此将其保护目标乘以 w 进行下调。各种鱼类对应的保护目标调整参数见表3。

Marxan软件分析时特别考虑了规划单元之间的空间关系,在河流生态系统中可以转换为河道的连通性。参照Hermoso等^[32]的方法,计算两规划单元间的河道长度 d ,设置仅包含其中一个单元的连通性惩罚值为 $1/d^{1/2}$ 。为提高计算效率,仅考虑规划单元间河道长度小于300 km的连通性。Marxan规

表2 保护级别对应及保护目标

Tab. 2 Conservation status and corresponding conservation targets

保护类别 Conservation status in China	IUCN级别 IUCN status	特有性 Endemicity	保护目标 Conservation targets (%)
国家级			50
红皮书	CR		30
省级	EN	金沙江特 有	20
	VU		10
		长江特有	5
		其他鱼类	1

表3 针对鱼类特性的保护目标调整参数

Tab. 3 Species-specific coefficients for adjusting conservation targets

	大型或洄游鱼类 Large-size or migratory fish	中型鱼类 Medium-size fish	小型鱼类 Small-size fish
广布种 Widespread species	1	w	w^2
非广布种 Other species	$1/w^2$	$1/w$	1

注: w 为依据鱼类特性对保护目标进行调整的基数,本研究中 $w=0.8$

Note: w is the base for species-specific adjustment of conservation targets, $w=0.8$ in this study

划中连通性所占权重由CP值决定。为了在连通性和保护成本之间作出权衡,以1.5为等比,从0.045—100选择了20个CP值做敏感性分析^[30]。

在进行系统保护规划时,分别考虑了将现有湿地保护区全部纳入规划,即锁定(Lock in)现有保护区,以及不考虑现有湿地保护区两种情景。本研究中,保护区主要考虑了各级自然保护区、重要湿地和国家级水产种质资源保护区;保护区矢量图来源于政府公开文件、保护区管理部门网站、文献资料和世界保护区数据库^[33]。

金沙江流域范围较大,为得到更好的优化结果需要设置较高的循环次数,故循环次数设置为三千万次^[29]。除退火算法单次循环次数外,Marxan软件运算的其他参数使用默认值。

2 结果

2.1 金沙江流域鱼类概况

金沙江流域共有鱼类214种(亚种),分属六目,17科,89属。鲤形目(Cypriniformes)鱼类所占比例最高,共173种(占80.8%),其次为鲇形目(Siluriformes)鱼类,共29种(占13.6%)。鲤科(Cyprinidae)鱼类占绝大多数,共110种,占全部鱼类的51.4%;条鳅科(Nemacheilidae)鱼类次之,共40种,占18.7%;鲿科(Bagridae)鱼类14种,占6.5%;爬鳅科(Balitoridae)共13种,占6.1%;花鳅科(Cobitidae)、𬶐科(Sisoridae)和鲇科(Siluridae)等13科共37种,占17.3%。与长江全流域鱼类相比,金沙江流域鱼类中鲤形目占比更高^[34]。

从保护情况来看,金沙江214种鱼类中包含国家I级保护鱼类3种,II级保护鱼类2种,中国濒危动物红皮书所列鱼类15种,省级保护鱼类25种;从鱼类的特有情况来看,本研究包括了金沙江特有鱼类60种,长江特有鱼类122种,中国特有鱼类165种。

2.2 分布模型预测结果

物种分布模型共预测了113种鱼类在流域内的分布,安氏高原鳅(*Triplophysa angeli* Fang, 1941)等14种鱼类的Test AUC值小于0.75,视为预测不成功。预测成功的99种鱼类平均Test AUC值为 0.884 ± 0.053 ,其中4种的预测结果在图1中展示。其余101种鱼类和预测不成功的14种鱼类则通过分布样点划定其分布的规划单元,纳入系统保护规划。

从每种鱼类的两类环境变量贡献率(贡献率百分比Percent contribution和置换重要性Permutation importance)中选取贡献率最高的5个变量,以此统计99个预测成功的模型中各类变量的出现频率。贡献率百分比代表了一个变量对模型预测结果的

贡献度;置换重要性则通过计算去掉一个变量使模型准确性降低的程度,衡量一个变量的重要性。结果显示,两类贡献率中出现频率最高的均为坡度,在99个鱼类分布模型中分别有87和90次为贡献率前五的环境变量,说明地形对金沙江流域鱼类分布有明显影响。从贡献率百分比看,贡献率较高的还有平均气温日较差、最干旱月降雨量、最热季降雨量和土壤类型多样性;从置换重要性来看,贡献率较高的还有最干旱月降雨量、最热季降雨量、河流形态和平均气温日较差。在全部变量中,对鱼类分布影响最小的为稀疏植被的面积,未明显影响鱼类的分布。从贡献率百分比看,贡献率较低的还有荒地、洪泛区、落叶阔叶林的面积以及降雨季度变化;从置换重要性来看,贡献率较低的还有城市、荒地、洪泛区和落叶阔叶林的面积。土地利用数据整体上贡献率较低。

2.3 系统保护规划结果

通过系统保护规划模型,在未锁定现有保护区情况下,CP值为2.60,分别得到模型最优解和各规划单元的被选择频率(图2a、图2b)。模型的最优解选择了486个单元(47950 km^2),占所有规划单元数量的7.7%;在100次运行中,被选择频率较高的规

划单元(超过40%),有473个(48662 km^2),占所有规划单元的数量7.5%。

与模型的规划结果相比,现有与湿地保护相关的各类保护区共涉及851个规划单元(66809 km^2)。我们将规划单元内河道栅格被保护区覆盖多于30%或被覆盖面积超过50%的规划单元视为被保护单元,共计550个(35723 km^2),占所有规划单元的8.7%。被保护的规划单元共包含127种鱼类,占所研究鱼类的59.3%,其列入红皮书的鱼类有9种,占流域内列入红皮书保护鱼类的60%。现有湿地相关保护区和被选择频率较高的规划单元之间存在较大的差异,两者重叠部分面积 3285 km^2 ,仅占湿地相关保护区面积(24968 km^2)的13.2%。

将现有湿地相关保护区锁定在规划结果中,考虑现有保护区设置情况下达成保护目标需978个规划单元(55694 km^2 ,图2c、图2d),比未锁定保护区的最优解所选择的规划单元多一倍。与已被保护的规划单元相比,面积仍需要扩展近55.9%,即增加428个规划单元(19971 km^2),才能在已有保护区的基础上实现设定的保护目标(图3)。

2.4 现有保护区覆盖不足的鱼类

现有保护区覆盖了127种鱼类的分布,仍有窑

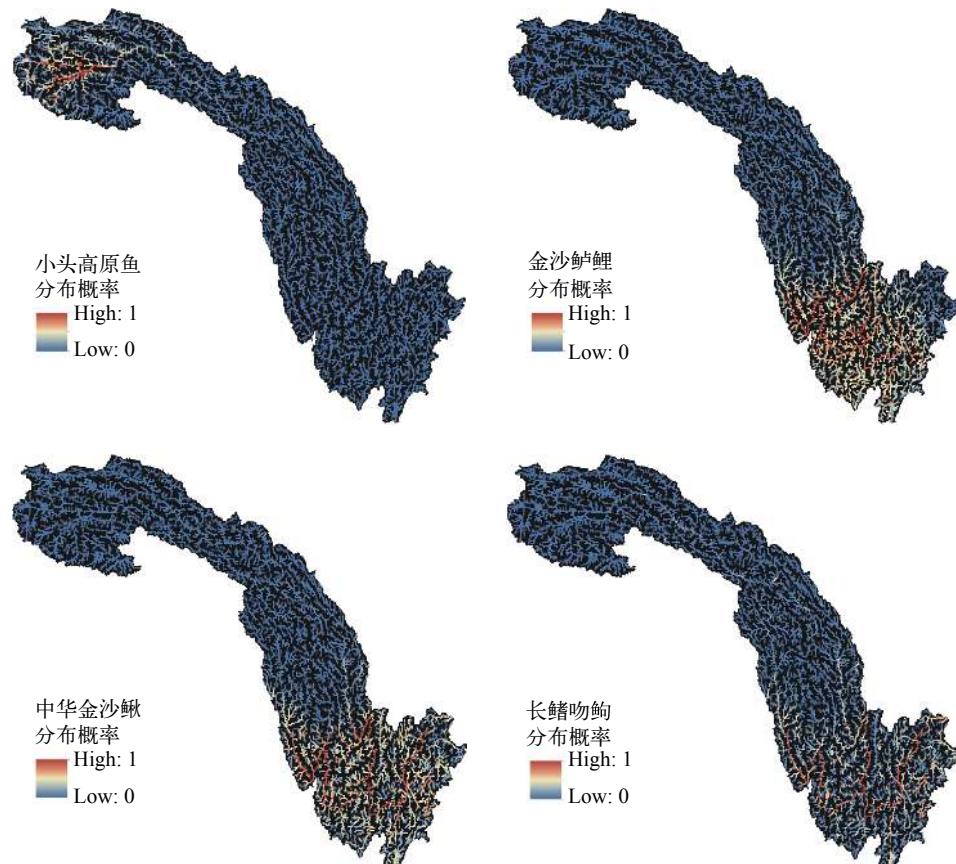


图1 金沙江流域四种鱼类分布预测结果

Fig. 1 Predicted distribution of four fishes in the Jinsha River basin

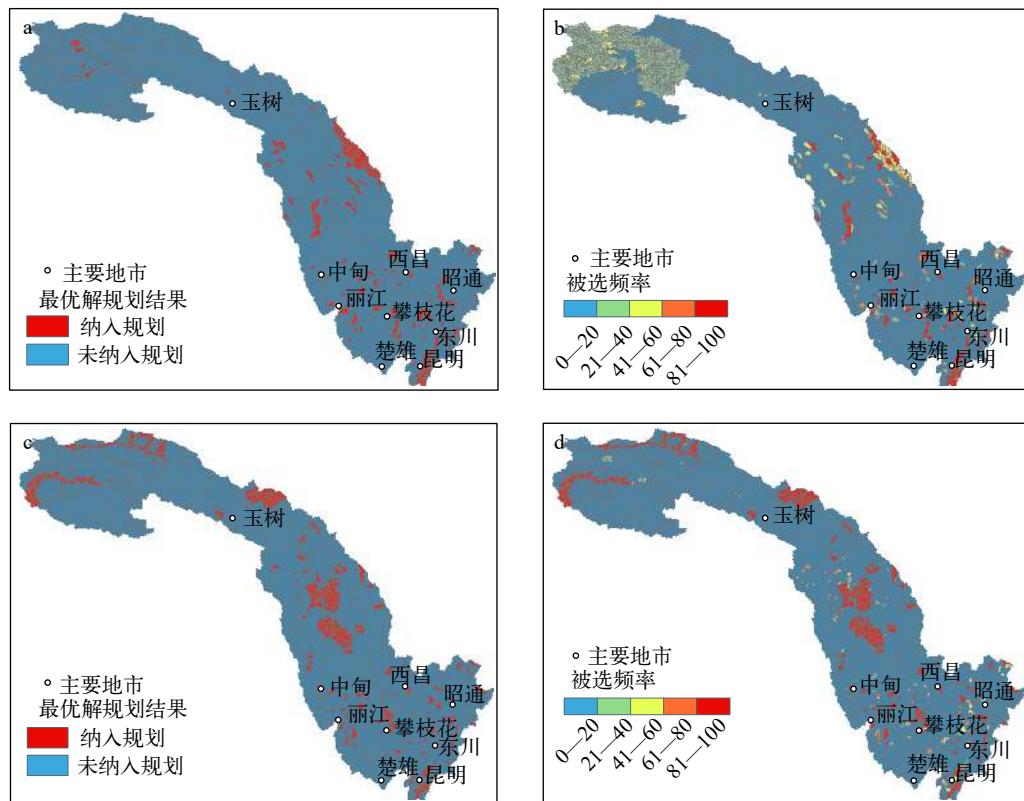


图2 金沙江流域鱼类系统保护规划结果

Fig. 2 Systematic conservation planning results for fishes of the Jinsha River basin

a. 未锁定现有保护区的最优解; b. 未锁定现有保护区的规划单元选择频率; c. 锁定现有保护区的最优解; d. 锁定现有保护区的规划单元选择频率

a. Best solution without locking-in the present conservation area; b. Planning units selection frequency without locking-in the present conservation area; c. Best solution with locking-in the present conservation area; d. Planning units selection frequency with locking-in the present conservation area

滩间吸鳅(*Hemimyzon yaotanensis* Fang, 1931)等87种鱼类未能包含在内,因而需要对现有保护区进行扩展。对扩展区域的统计发现,扩展的428个规划单元中(19971 km^2),有312个(11925 km^2)是为增加现有保护区已覆盖鱼类的栖息地面积而扩展,共涉及109种鱼类,包括胭脂鱼(*Myxocyprinus asiaticus* Bleeker, 1864)和岩原鲤(*Procypris rabaudi* Tchang, 1930)等保护鱼类;其余扩展的规划单元,则可以对之前尚未包含的重口裂腹鱼(*Schizothorax davidi* Sauvage, 1880)和窑滩间吸鳅等鱼类提供保护。与现有保护区相比,新增的规划单元涉及的鱼类种类更多,达到203种,几乎包含了本研究所涉及的全部鱼类。

3 讨论

3.1 金沙江流域鱼类的保护

Heiner等^[35]以长江上游为对象,认为保护生态环境的异质性即可实现对流域内淡水生物的保护,并以此划定了长江上游需要重点关注的保护区

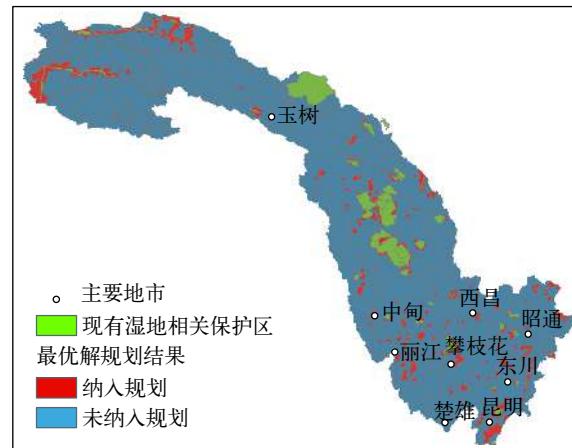


图3 锁定保护区后的最优解与现有湿地相关保护区

Fig. 3 Existing wetlands conservation area and one best solution after lock in these area

域。在金沙江流域,Heiner等^[35]划定的保护区域包括三江源区域、玉树至石鼓的干流江段,以及安宁河、硕曲、水洛河、牛栏江和普渡河等支流。这些区域包含许多鱼类物种丰富的区域,但研究并未

能考虑鱼类本身的特性以及各保护区域受人类影响的程度,且范围较大,难以实现。同样,在张路等^[36]对长江流域两栖爬行动物的保护规划中,选择了金沙江流域的川南山区和三江源地区作为保护的重点区域,规划尺度较大。然而,要提出具体的保护措施,仍需要尺度更加精细的研究。本研究结果表明,现有的湿地相关保护区并不能完全实现所设定的鱼类保护目标,并且与系统保护规划结果重叠度较低,仅占现有保护区面积的13.2%,说明流域内鱼类的保护仍存在比较大的空缺。现有的湿地相关保护区未能覆盖流域内全部鱼类,仍有87种鱼类未得到相应保护,其中包括窑滩间吸鳅等多种保护鱼类。虽然一些鱼类被涵盖在现有保护区中,但其栖息地数量并不能满足设定的保护目标。同时,现有以鱼类为保护对象的保护区数量较少,只有2个明确以鱼类为主要保护对象的自然保护区、5个国家级水产种质资源保护区和4个省级水产种质资源保护区,这与金沙江流域丰富的鱼类多样性和生境异质性及人类活动带来的挑战相比,尚显不足。

Marxan得到的最优解显示,最少只需要选择486个规划单元即可满足设定的鱼类保护目标,但规划单元中现有的湿地相关保护区面积大幅减少。其原因一方面可能是许多现有保护区设定时并未针对鱼类,如察青松多、大山包等涉及湿地的保护区多数是以陆生动物、水禽及湿地生态系统为主要保护对象;另一方面,说明特定的(ad hoc)针对一个区域的设定方式并不能实现较高效的保护,并且常会选择少有开发潜力及高美学价值的区域^[4]。

从保护规划的实施和落地考虑,在保护区已经设定的情况下,应当考虑充分利用现有的保护区。我们的规划结果发现,将金沙江流域内湿地相关的保护区锁定后,需要在现有保护区的基础上增加428个规划单元。相比不考虑现有保护区的情况,实现相同鱼类保护目标需要增加的保护区面积有所下降。

3.2 Marxan参数的设定

Marxan可以帮助研究者在设计复杂保护区网络时考虑多种因素,如不同的保护目标、保护区之间的空间关系和保护区设定的成本等,使得研究者可以在最小化保护成本的情况下,实现最大化的保护目标,甚至可能识别出意料之外的规划方式^[29]。但Marxan软件的主要作用是帮助研究者在设定的条件下作出决定,其本身并不能对生态系统过程等进行模拟。Marxan通过模拟退火算法,实际上解决的是一个最小集合的问题,即确定满足设定条件的

最小集合所包含的元素。同时,软件对参数的变化十分敏感,一个参数的调整可能会给规划结果带来较大的变化。在参数设定方式不能统一的情况下,针对同一区域的保护规划,仍会存在一定差异。

保护目标的设定 保护目标是Marxan软件应用中的一个非常重要的参数,有许多不同的方法来进行设定^[29]。近年来,许多使用Marxan进行规划的研究采用保护一定比例的栖息地为目标,如黄心一等为不同保护紧迫性的物种设置了20%和30%两个目标^[26];Hermoso等^[19]根据鱼类的分布情况设置了最高100%,最低10%的保护目标。本研究亦采取按比例设置保护目标的方法,但又考虑了鱼类珍稀濒危程度的不同,按照特有性、不同保护级别等划定了五个保护目标。此外还针对鱼类的运动能力和分布情况做了分类,以满足不同鱼类对生境大小的需求,提高了保护规划的效率。当然,本研究虽然针对了鱼类的部分特性,在保护目标上进行区别,但仍有很多因素,如鱼类产卵生境的需求等未能纳入,需要进一步完善。

规划成本 进行系统保护规划时必须考虑各个规划单元保护成本的差异。保护成本可以简化为各区域面积,也可以加入人类干扰等因素^[26, 35],在有条件的情况下还可以考虑经济成本^[29]。由于金沙江流域鱼类保护目前面对的主要挑战来自于人类活动的影响,因此本研究将单元面积与人类影响结合作为成本,使保护区域的选择更加有效,而且可行。

连通性惩罚值 栖息地良好的连通性对于鱼类的保护十分重要,尤其是具有洄游特性的一些鱼类。Marxan软件在进行系统保护规划时涵盖了保护区的连通性,避免所选取的保护规划单元过度分散。兴建水电工程等人类活动对鱼类生境的影响主要包括破坏河流的连通性,导致生境破碎化,进而减少种群间的遗传交流,从而使鱼类种群的基因型单一化^[37]。然而,增强规划保护区网络连通性常伴随着规划成本的增加,因而需要权衡连通性和规划成本。本研究通过敏感性分析选择了相应的CP值,但在实际规划设计中仍需针对保护对象的需要进行调整,也需要考虑水电工程造成的连通性影响。同时,由于连通性在不同规划中的权重差异,规划结果可能出现较大变动。

3.3 从理论规划到实际运用

系统保护规划作为一种保护区规划方法,必须能够实际解决对应的保护问题,即规划结果需要有较高的现实可操作性。因此,研究区域规划单元应尽量符合实际规划需要。本研究使用平均面积小

于 100 km^2 的规划单元, 虽然对金沙江流域作为一个整体时具有较高的可操作性, 但在局部区域规划时仍然需要进一步细化。

本研究中的鱼类分布是根据多年调查和文献资料使用模型预测得到的。模型预测经过验证, 可以得到相对可靠的结果。同时, 由于资源限制, 很难实现对较大研究区域细致的调查, 物种分布模型亦是合适的解决方式。但在规划方案实施前, 为确保规划方案可以圆满地实现相应的保护目标, 有针对性地对重点区域进行调查可以增强规划方案的可信度。

金沙江流域内已经建立了一些与湿地生物相关的保护区, 虽然其中多数并非以鱼类为保护对象, 但依然可以对区域内的鱼类起到一定的保护作用。在对鱼类的保护规划中可以充分利用湿地相关的保护区, 以较小的成本实现对鱼类的保护。此外, 区域内还有较多的非湿地自然保护区, 其覆盖面积大, 在保护区网络规划时也应当对这些保护区进行考虑。Lawrence等^[38]对美国国家公园进行了统计, 筛选出50个可以作为美国淡水保护区系统核心成员的国家公园, 认为应当将这些能代表相当生物多样性的保护区涵盖在系统保护规划中。因此, 扩展非湿地保护区的保护功能是增加鱼类保护区网络的首要选择。在本研究规划结果中, 如不考虑现有保护区的规划结果在上游主要选择了石鼓至得荣的干流和藏曲、增曲、定曲等支流, 中游的宁蒗河, 下游的牛栏江、普渡河和横江, 以及滇池、程海、泸沽湖等湖泊和雅鲁江流域的霍曲等。若考虑现有保护区, 则在扩展湿地相关保护区的基础上考虑增加石鼓至得荣的干流及横江、牛街河、牛栏江等支流的保护。系统保护规划方法得到的最优解有多个可选项, 因此可以为决策提供灵活的方案。同时, 由于可选项较多, 系统保护规划的实施还需要与管理部门协作。只有结合当地的实际国情, 才能有效地支持实践中的决策与管理。

2011年制定的中国生物多样性保护战略与行动计划已将生物多样性保护上升到国家战略高度, 而系统保护规划在协调保护与发展的冲突方面具有优势, 在我国有很好的应用前景^[8]。当前长江经济带的发展正需要与生态保护相结合, 本研究针对鱼类特性进行系统保护规划的方法, 可以为上游金沙江流域或其他区域在保护与开发的权衡中提供科学依据。

致谢:

感谢中国科学院水生生物研究所王洪铸研究

员对论文提出宝贵的修改意见。

参考文献:

- [1] Harrison I, Abell R, Darwall W, et al. The freshwater biodiversity crisis [J]. *Science*, 2018, **362**(6421): 1369
- [2] Carpenter S R, Stanley E H, Zanden M J V. State of the world's freshwater ecosystems: physical, chemical, and biological changes [J]. *Annual Review of Environment and Resources*, 2011, **36**(1): 75—99
- [3] Dudgeon D, Arthington A H, Gessner M O, et al. Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges [J]. *Biological Reviews*, 2006, **81**(2): 163—182
- [4] Linke S, Turak E, Nel J. Freshwater conservation planning: the case for systematic approaches [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(1): 6—20
- [5] Dudgeon D. Asian river fishes in the Anthropocene: threats and conservation challenges in an era of rapid environmental change [J]. *Journal of Fish Biology*, 2011, **79**(6): 1487—1524
- [6] Pressey R L, Ferrier S, Hager T C, et al. 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 [J]. *Forest Ecology and Management*, 1996, **85**(1-3): 311—333
- [7] Margules C R, Pressey R L. Systematic conservation planning [J]. *Nature*, 2000, **405**(6783): 243—253
- [8] Zhang L, Ouyang Z Y, Xu W H. Theory, work frame and hot issues of systematic conservation planning [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, **35**(4): 1284—1295 [张路, 欧阳志云, 徐卫华. 系统保护规划的理论、方法及关键问题. 生态学报, 2015, **35**(4): 1284—1295]
- [9] Fiorella K, Cameron A, Sechrest W, et al. Methodological considerations in reserve system selection: A case study of Malagasy lemurs [J]. *Biological Conservation*, 2010, **143**(4): 963—973
- [10] Kremen C, Cameron A, Moilanen A, et al. Aligning conservation priorities across taxa in Madagascar with high-resolution planning tools [J]. *Science*, 2008, **320**(5873): 222—226
- [11] Peacock H, Bender D, Johnson S. Designing protected areas to conserve biodiversity: A case study of the Malagasy Lemurs [J]. *Journal of Ecosystem and Ecography*, 2014, **4**(3): 51
- [12] Fernandes L, Day J, Lewis A, et al. Establishing representative no-take areas in the great barrier reef: large-scale implementation of theory on marine protected areas [J]. *Conservation Biology*, 2005, **19**(6): 1733—1744
- [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**(1-2): 191—216

- [14] Langford W T, Gordon A, Bastin L, et al. Raising the bar for systematic conservation planning [J]. *Trends in Ecology & Evolution*, 2011, **26**(12): 634—640
- [15] Wu J, Wu M S. Fish fauna of Jinsha River [J]. *Sichuan Journal of Zoology*, 1990, **9**(3): 23—26 [吴江, 吴明森. 金沙江的鱼类区系. 四川动物, 1990, **9**(3): 23—26]
- [16] Cao W X. A few issues about fishery resources conservation in the Yangtze Basin [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2008, **17**(2): 163—164 [曹文宣. 有关长江流域鱼类资源保护的几个问题. 长江流域资源与环境, 2008, **17**(2): 163—164]
- [17] Winemiller K O, McIntyre P B, Castello L, et al. Balancing hydropower and biodiversity in the Amazon, Congo, and Mekong [J]. *Science*, 2016, **351**(6269): 128—129
- [18] Team G D. Geographic Resources Analysis Support System (GRASS) Software, Version 7.0. 2016, Open Source Geospatial Foundation
- [19] Hermoso V, Kennard M J, Linke S. Integrating multi-directional connectivity requirements in systematic conservation planning for freshwater systems [J]. *Diversity and Distributions*, 2012, **18**(5): 448—458
- [20] GBIF.org. GBIF Home Page. Accessed in 2017; Available from: <http://gbif.org>
- [21] Eschmeyer W N, Fricke R, Laan R v d. Catalog of Fishes: Genera, Species, References. Accessed on 2017/05/15. 2017; Available from: <http://researcharchive.calacademy.org/research/ichthyology/catalog/fishcatmain.asp>
- [22] Phillips S J, Dudík M, Schapire R E. [Internet] Maxent software for modeling species niches and distributions (Version 3.4.1). Available from url: http://biodiversityinformatics.amnh.org/open_source/maxent/. Accessed on 2017-4-15. 2017
- [23] Radosavljevic A, Anderson R P. Making better Maxent models of species distributions: complexity, overfitting and evaluation [J]. *Journal of Biogeography*, 2014, **41**(4): 629—643
- [24] Naimi B, Hamm N A S, Groen T A, et al. Where is positional uncertainty a problem for species distribution modelling [J]? *Ecography*, 2014, **37**(2): 191—203
- [25] Varela S, Anderson R P, García-Valdés R, et al. Environmental filters reduce the effects of sampling bias and improve predictions of ecological niche models [J]. *Ecography*, 2014, **37**(11): 1084—1091
- [26] Huang X Y, Li F, Chen J K. Reserve network planning for fishes in the middle and lower Yangtze River basin by systematic conservation approaches [J]. *Science China Life Sciences*, 2015, **45**(12): 1244—1257 [黄心一, 李帆, 陈家宽. 基于系统保护规划法的长江中下游鱼类保护区网络规划. 中国科学: 生命科学, 2015, **45**(12): 1244—1257]
- [27] Liu C, White M, Newell G. Selecting thresholds for the prediction of species occurrence with presence-only data [J]. *Journal of Biogeography*, 2013, **40**(4): 778—789
- [28] Ball I R, Possingham H P, Watts M. Marxan and Relatives: Software for Spatial Conservation Prioritisation [A]. In: Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P (Eds.): In Spatial Conservation Prioritisation: Quantitative Methods and Computational Tools [C]. In: Moilanen A, Wilson K A, Possingham H P (Eds.). Oxford, UK: Oxford University Press. 2009, 185—195
- [29] Ardon J A, Possingham H P, Klein C J. Marxan Good Practices Handbook, Version 2. 2010, Victoria, BC, Canada: Pacific Marine Analysis and Research Association
- [30] Hermoso V, Linke S, Prenda J, et al. Addressing longitudinal connectivity in the systematic conservation planning of fresh waters [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(1): 57—70
- [31] Wildlife Conservation Society-WCS, Center for International Earth Science Information Network-CIESIN-Columbia University. Last of the Wild Project, Version 2, 2005 (LWP-2): Global Human Footprint Dataset (Geographic). 2005, NASA Socioeconomic Data and Applications Center (SEDAC): Palisades, NY
- [32] Hermoso V, Cattarino L, Kennard M J, et al. Catchment zoning for freshwater conservation: refining plans to enhance action on the ground [J]. *Journal of Applied Ecology*, 2015, **52**(4): 940—949
- [33] UNEP-WCMC, IUCN. Protected Planet: The World Database on Protected Areas (WDPA). 2016, UNEP-WCMC and IUCN: Cambridge, UK
- [34] Chen Y F, Chen Y Y, He D K. Biodiversity in the Yangtze River-fauna and distribution of fishes [J]. *Journal of Ichthyology*, 2002, **42**(2): 152
- [35] Heiner M, Higgins J, Li X, et al. Identifying freshwater conservation priorities in the Upper Yangtze River Basin [J]. *Freshwater Biology*, 2011, **56**(1): 89—105
- [36] Zhang L, Ouyang Z Y, Xu W H, et al. Biodiversity priority areas analysis for amphibians and reptiles in the Yangtze Basin based on systematic conservation planning idea [J]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, 2010, **19**(9): 1020—1028 [张路, 欧阳志云, 徐卫华, 等. 基于系统保护规划理念的长江流域两栖爬行动物多样性保护优先区评价. 长江流域资源与环境, 2010, **19**(9): 1020—1028]
- [37] Faulks L K, Gilligan D M, Beheregaray L B. The role of anthropogenic vs. natural in-stream structures in determining connectivity and genetic diversity in an endangered freshwater fish, Macquarie perch (*Macquaria australasica*) [J]. *Evolutionary Applications*, 2011, **4**(4): 589—601
- [38] Lawrence D J, Larson E R, Liermann C A R, et al. National parks as protected areas for U.S. freshwater fish diversity [J]. *Conservation Letters*, 2011, **4**(5): 364—371

FISH SYSTEMATIC CONSERVATION PLANNING IN THE JINSHA RIVER BASIN

SUN He-Ying^{1,2}, SUI Xiao-Yun¹, HE De-Kui¹, LI Xue-Qing^{1,2} and CHEN Yi-Feng¹

(1. Institute of Hydrobiology, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430072, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: We compiled the distribution and traits of 214 fish species and subspecies in the Jinsha River basin to investigate systematic and effective conservation planning in the basin. First, we modelled the distribution of widespread species throughout the basin with environmental factors such as climate, riverscape, land-use, and soil type; we used the occurrences as the distribution for other species. We planned the protected area (PA) network with the Marxan software to determine the species-specific conservation targets (grouped by mobility, distribution range, and conservation status) and evaluate the protection status of the current wetlands PAs. The best solution selected 486 planning units (47950 km^2) that was 7.7% of the total planning units. The current wetlands PAs was not enough for fish conservation, which shelters 59.3% of all fishes (127 species) and 109 species require additional conservation area. The planning units' area protected by the wetlands PA need to expand 55.9% to reach our conservation target.

Key words: Jinsha River; Systematic conservation planning; Species distribution modelling; Maxent; Marxan; Fish diversity