DOI:10.11918/j.issn.0367-6234.201804119

基于数据融合技术的松花江流域水生态功能分区

张许诺[1],赵 英[1,2],郭 亮[1,2]

(1.哈尔滨工业大学 环境学院,哈尔滨 150090; 2.城市水资源与水环境国家重点实验室(哈尔滨工业大学),哈尔滨 150090)

摘 要: 水生态功能的合理分区充分体现了“分级、分类、分区、分期”的水环境管理思想,是开展水环境和水生态系统管理工作的重要基础.本文在综合调查分析松花江流域自然环境特征、水生态因子和社会经济活动影响的基础上,结合松花江流域水生态功能三级分区结果,以ArcGIS软件为平台,运用数据融合技术,对松花江流域的生境维持、水源涵养、生物多样性维持、农业生产维持和城市支撑维持五种水生态服务功能进行重要性等级评价,根据评价结果将松花江流域分为65个水生态功能四级分区.与以往方法相比,本研究运用了数据融合技术,评价因子在考虑自然生态因素的基础上,兼顾社会经济因素对功能区重要性等级的影响,并将多源数据融合,综合考察其对分区结果的协同影响作用,因此,评价过程更加直观,评价结果更加合理和有效.针对分区结果的分析,给出松花江流域水生态系统管理的合理建议.分区结果有助于识别水生态系统的特征与功能状况,为河流健康评价奠定基础,同时,为松花江流域实施水生态系统的科学管理提供了重要依据.

关键词: 数据融合;松花江流域;水生态功能;四级分区;ArcGIS

中图分类号: X171;X321 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2019)08-0080-08

Aquatic ecological functional zoning of Songhua River Basin based on data fusion technology

ZHANG Xunuo[1], ZHAO Ying[1,2], GUO Liang[1,2]

(1. School of Environment, Harbin Institute of Technology, Harbin 150090, China;
2. State Key Laboratory of Urban Water Resource and Environment (Harbin Institute of Technology), Harbin 150090, China)

Abstract: The rational zoning of aquatic ecological function fully reflects the water environment management idea of “grading, classification, zoning, and staging,” which is an important basis for the management of aquatic environment and water ecosystem. In this paper, the characteristics of natural environment, water ecological factors, and socio-economic activities of the Songhua River basin are analyzed by data fusion technology on ArcGIS software. Based on the three levels of aquatic ecological function in Songhua River Basin, the ecological function importance level of five kinds of aquatic ecological function was evaluated, including habitat maintenance, water conservation, biodiversity maintenance, agricultural production maintenance, and urban support. According to the evaluation results, the Songhua River Basin was divided into 65 water ecological functions of level 4 zoning. Compared with previous methods, this study utilized the data fusion technology, which considered the natural ecology and the impact of social economic factors on the function importance level. The process of the evaluation is more intuitive, and the results are more reasonable and effective. Based on the analysis of the zoning results, this paper provides some reasonable suggestions for the management of the aquatic environment of Songhua River Basin. The results can help identify the characteristics and functional status of the water ecosystem, lay a foundation for the river health evaluation, and provide an important basis for the scientific management of the aquatic ecosystem in the Songhua River Basin.

Keywords: data fusion; Songhua River Basin; aquatic ecological function; level 4 zoning; ArcGIS

生态区是生态环境划分的区域单元,其划分的基础是对生态系统的客观认识和对自然规律和人类活动之间相互关系的充分研究[1].早在20世纪70年代末,美国环保署已提出要关注水生态系统结构与功能的保护[2].Omernik[3]于1987年首次提出美国三级生态分区方案,随后其他一些国家也相继建立了基于本地特征的水生态区划方案.生态功能区划分则是生态区划分研究的延伸,是根据生态环境敏感性、生态环境特征以及生态服务功能在不同地域的相似性和差异性,将地理空间划分为不同生态功能区的研究过程[4].

目前,国内进行流域水生态功能一、二级分区已经完成.三级分区许多学者做了大量研究工作[5-9],

收稿日期: 2018-04-17
基金项目: 国家自然科学基金面上项目(71671050)
作者简介: 张许诺(1993—),女,硕士研究生
通信作者: 赵 英,zhaoying@hit.edu.com;
郭 亮,guoliang0617@hit.edu.cn

基本确定了基于水生态服务功能的指标体系，四级分区工作还在探索当中. 本文尝试在三级分区的基础上，对不同水生态功能的重要性进行更深入的评价，实现松花江流域水生态功能四级分区，为制定水生态保护方案提供科学依据.

随着环境监测等技术的发展，产生了越来越多的环境数据，环境数据是环境实体自身状态及其发展变化规律，以及实体之间相互作用的最真实反映，因此，获取环境数据的价值，挖掘环境要素之间的关联性，可以帮助更好地管理环境要素，实现保护环境的目的. 数据融合是大数据技术的一个重要分支，可看作是将不同来源、不同媒质、不同模式、不同时间、不同表示的信息有机结合，最后得到对研究对象更精确的描述[10]. 在环境管理中，如果能实现多源数据的融合，将会得到更全面合理的环境评价结果，从而因地制宜地制定各地区环境管理方案. 目前，有学者[11]将数据融合技术用于生态环境领域，但数据融合在环境领域的研究仍然较少，因此，本文将数据融合技术用于水生态功能重要性等级评价和分区，进一步促进大数据技术在环境领域的应用及发展.

1　松花江流域概况

松花江流域是中国七大流域之一，地跨黑龙江、内蒙古、吉林等省. 松花江流域水系发达，由嫩江、第二松花江、松花江干流及其支流构成. 目前中国环科院已完成松花江流域水生态功能三级分区，如图 1 所示. 一级分区依据地势因素划分，二级分区考虑了主导子流域以及土地利用类型. 三级分区以主题识别功能为依据，将松花江流域水生态功能划分为 5 种类型（表 1），共 38 个水生态功能区. 三级分区选取的指标较为单一，因此，本文希望通过建立更全面合理的指标，对各种功能区进行重要性等级评价并完成四级分区.

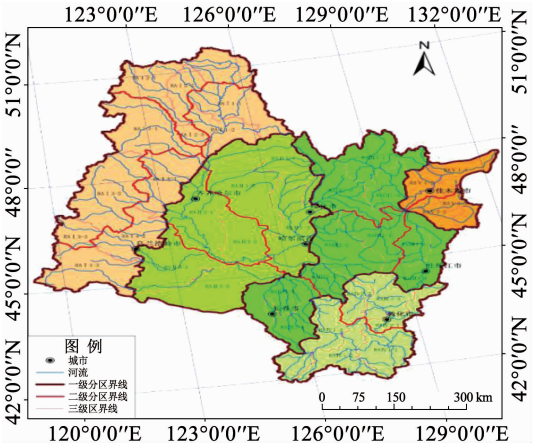


图 1　松花江流域水生态功能三级分区

Fig. 1　Level 3 aquatic ecological function zoning in Songhua River Basin

表 1　水生态功能类型

Tab. 1　Types of aquatic ecological function

功能类别	三级分区判别标准	含义	生态管理意义
生境维持功能	河网密度 > 0.2	为水生生物生长、觅食、繁殖以及其他重要环节提供场所的功能	通过保护生境间接地保护水生生物
水源涵养功能	源头区 河网密度 > 0.2 林地面积比例 > 60%	保障人类饮用、农业、工业、交通和生活用水供给的能力	维持和提高流域产水能力
生物多样性维持功能	国家级自然保护区核心区	维持较丰富生物种类、珍稀物种以及重要群落的功能	保护关键物种和群落
农业生产维持功能	农田面积比例 > 50% 城镇面积比例 < 13%	维持农作物生产的功能	保证粮食产量
城市支撑功能	城镇面积比例 > 13%	维持人类生产生活、支撑社会经济发展的功能	保障社会经济可持续发展

2　数据来源与数据融合方法

2.1　数据来源

本研究所用数据类型多样，包括水质数据、水生生物监测基本情况、自然保护区名录等结构化和半结构化数据，以及植被类型、土地利用类型、土壤类型、单位面积 GDP 和人口密度分布等栅格类型的非结构化数据，其中栅格数据均下载于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）.

2.2　数据融合方法

全面合理的指标体系是有效综合评价的基础. 因此，在建立重要性等级评价指标体系时将尽量多的因素考虑在内，以期得到更合理准确的评价结果. 丰富的评价指标意味着数据处理量的增加和数据形式的多样性. 本文以 ArcGIS 软件为平台，采用了数据融合技术，将多源数据有机地融合，帮助理解环境

实体的自身特征以及实体间的相互关系，从而得到更加准确合理的四级分区结果. 研究中需处理的数据包括矢量数据(点、线、面)和栅格数据.

在进行生境维持和生物多样性维持功能评价时要对点数据进行处理，首先要将所有指标性质体现在一个属性表中，用字段计算器计算出综合评价结果，即数据融合过程. 然后采用泰森多边形分析法或插值分析法对整个流域进行分析. 泰森多边形的特点是多边形内的任何位置离该多边形样点的距离最近，且每个多边形内含且仅包含一个样点，因此，可以用离散点的性质来描述泰森多边形区域的性质. 插值分析是根据有限的样本点数据来预测栅格数据中其他单元的值，反距离权重法和自然邻域法是常用的两种插值分析法.

水源涵养、农业生产维持和城市支撑维持功能的评价则需要对栅格数据进行分析，此时需要运用栅格计算器、镶嵌等处理方法. 例如，图 2 为黏土、砂土和粉砂的百分比分布图，将 3 种类型土壤分别赋分，利用栅格镶嵌功能将三类土壤的得分按照计算公式镶嵌在一起，实现 3 个图层的数据融合，得到了松花江流域以土壤类型为指标的等级评分图(图 3). 水生态功能四级分区将通过以上数据融合方法完成.

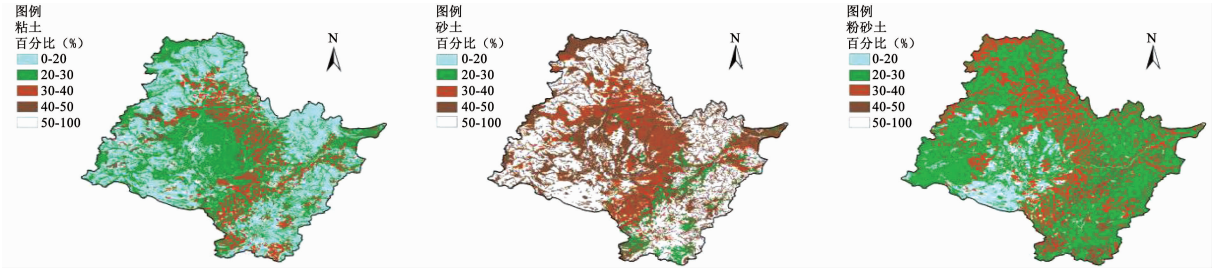


图 2　松花江流域黏土、砂土、粉砂土百分比分布

Fig. 2　Percentage distribution of clay, sand, and silty soil in Songhua River Basin

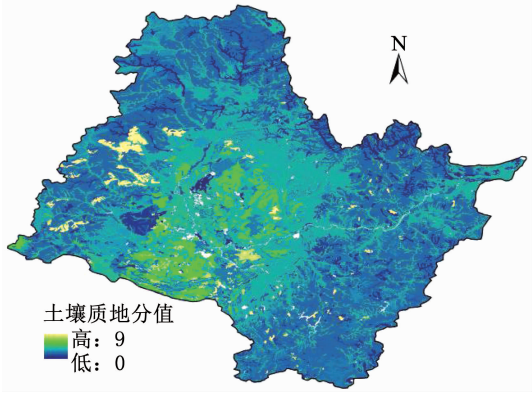


图 3　松花江流域土壤类型得分分布

Fig. 3　Score distribution of soil type in Songhua River Basin

3　松花江流域水生态功能四级分区

3.1　分区原则与方法

正确与合理的理论和方法是指导水生态区划工作科学进行的前提. 为了客观反映区域的分异规律，进而达到区划目标，参考《生态功能区划暂行规程》[12]以及《全国生态功能区划》[13]，在进行水生态功能区划时遵循可持续发展原则、发生学原则、区域相关原则、相似性原则、区域共轭性原则、主导功能原则、协调原则、分级区划原则等基本原则.

水生态功能分区有两种方法："自上而下"和"自下而上"."自上而下"区划方法注重对宏观格局的把握，而"自下而上"区划方法遵循了区域共轭型原则，以最低级区划单元完整性为基础，通过相似单元的合并得到分区结果[14]. 本研究将两种方法相结合，在水生态功能三级分区的基础上，先对 5 种功能进行重要性等级评价，根据评价结果从宏观上对区域划分，再结合行政区划形成最合理的分区边界.

3.2　指标选取

三级分区的评判标准以自然环境要素为基础，从宏观上实现了松花江流域主导水生态功能的划分. 但实际上影响水生态功能的因素有很多，为了更加深入地了解各水生态功能的重要程度并完成功能区的进一步划分，将水生态因素和社会经济因素综合考虑在内，针对每种水生态功能，选择对其产生影响的因子作为评价指标. 通过查阅相关资料[12-13,15-16]，建立了表 2 中的四级评价指标体系. 以此为基础进行多源异构数据融合，将 5 种功能分为极重要、重要、较重要和一般重要 4 个等级，最终根据评价结果完成四级分区.

3.3　基于多源数据融合的水生态功能四级分区

3.3.1　水生态功能重要性等级评价

1)生境维持功能区. 首先在松花江流域选取均匀分布的 20 个监测点，如图 4 所示，利用 ArcGIS 形成以监测点为中心的泰森多边形，则每个监测点可代表一个区域.

本研究收集了松花江流域 2012—2014 年的月监测数据，采用基于组合赋权的模糊综合评价法对

水质进行综合评价. 按照中国环境监测总站下发的《松花江流域水生生物试点监测方案》的相关要求，黑、吉、蒙三省的监测站进行了水生生物群落监测，并对生境情况进行了调查，从以上监测站的总结报告中可以得到生境得分和水生生物得分情况. 根据国家环境监测总站提出的《河流水生态环境质量评价技术指南(试行)》[17]，为水质、生境和水生生物指标分别赋予 0.2，0.4，0.4 的权重，利用综合指数法进行水生态环境质量综合评估. 在 ArcGIS 中将 3 个指标的分值链接到一个属性表中，利用字段计算器得到表 3 中的结果，从而实现多指标综合评价，图 6(a)为生境维持功能重要性等级评价结果.

表 2　水生态功能四级分区评价指标体系

Tab. 2　Evaluation index system of level 4 aquatic ecological function zoning

功能类别	四级评价指标	评价依据
生境维持功能	水化学指标	水质污染状况
	水生生物指标	水生生物密度及丰富度
	生境指标	生境栖息地特征进行评价
水源涵养功能	植被水源涵养量	反映了森林系统水源涵养能力
	土壤质地	反映了土壤持水能力
	地形起伏度	影响产汇流过程的重要指标
生物多样性维持功能	自然保护区	反映物种保护的重要性
农业生产维持功能	农田生产潜力	反映农作物生产能力
城市支撑功能	人口密度	对人类生活的支撑能力
	单位面积 GDP	对社会经济发展的支撑



图 4　松花江流域监测断面分布

Fig. 4　Monitoring section distribution in Songhua River Basin

2)水源涵养功能区. 水源涵养功能指数利用《生态功能区划技术暂行规程》[12]中的计算方法，即

$$S_j = \sqrt[3]{\prod_{i=1}^{3} C_i}\ .$$

式中：S_j为空间中单元 j 水源涵养功能指数，C_i为因素 i 的功能等级值(i 值分别为土壤质地、地形起伏度、植被水源涵养量)，各指标的分类赋值标准见表 4.

松花江流域水源涵养功能区的植被大致分为寒温带和温带山地针叶林、温带针叶落叶阔叶混交林、温带落叶阔叶林、温带草原草甸以及非林地 4 种类型. 通过文献调研[18-20]得知，植被水源涵养量从大到小排序为：针叶林 > 针阔叶混交林 > 阔叶林 > 草原草甸 > 非林地. 流域土壤质地以黏土、砂土和粉砂土的百分占比表示，水源涵养能力黏土 > 砂土 > 粉砂土. 将 3 种指标分别赋值，利用栅格计算器将 3 种栅格数据按照上述计算方法进行融合，得到水源涵养功能区的评价结果如图 6(b).

表 3　监测断面生境综合评价结果

Tab. 3　Results of the comprehensive evaluation of the monitoring section habitat

序号	断面	水质	生境	水生生物	综合评分	综合评价	等级评价
1	博霍头	3.986	3	3.500	3.594	良好	重要
2	拉哈	3.260	3	3.335	3.238	良好	重要
3	浏园	3.743	3	3.165	3.363	良好	重要
4	江桥	3.285	3	3.250	3.214	良好	重要
5	成吉思汗	3.545	3	3.250	3.318	良好	重要
6	靠山南楼	1.221	2	3.735	2.382	轻度污染	较重要
7	松花江村	3.252	3	2.835	3.035	良好	重要
8	新立城	3.952	2	3.335	3.315	良好	重要
9	松林	3.750	4	2.700	3.380	良好	重要
10	肇源	2.802	4	3.250	3.221	良好	重要
11	朱顺屯	3.106	3	3.335	3.176	良好	重要
12	阿什河口内	1.269	1	3.000	1.908	重度污染	一般重要
13	大顶子山	2.931	2	3.125	2.823	轻度污染	较重要
14	摆渡	2.878	3	3.250	3.051	良好	重要
15	牡丹江口下	3.552	3	3.000	3.221	良好	重要
16	佳木斯上	2.930	4	3.460	3.356	良好	重要
17	佳木斯下	2.770	4	3.490	3.304	良好	重要
18	江南屯	2.744	4	3.735	3.392	良好	重要
19	同江	3.128	3	3.125	3.101	良好	重要
20	柴河	3.376	3	3.250	3.251	良好	重要

表 4 水源涵养功能重要性评价分级标准

Tab. 4 Standards for the importance of water conservation function

重要等级	土壤质地	地形起伏度	植被水源涵养量	分级赋值 C	分级标准 S
极重要	黏土	<20	强	9	>8
重要	砂土	20 ~ 100	较强	7	6 ~ 8
较重要	粉砂土	100 ~ 300	中	5	4 ~ 6
一般重要		>300	弱	3	<4

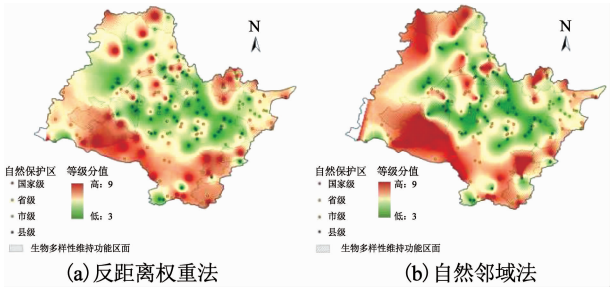
3)生物多样性维持功能区. 松花江流域自然保护区数目众多,其中包括国家级自然保护区 33 个,省级 64 个,市级 24 个,县级 55 个. 首先将自然保护区坐标添加在地图上,并根据保护区级别赋分(表 5). 然后基于自然保护区的分值进行插值分析,得到如图 5 的结果,两种插值方法结果基本相同,可以此为依据进行生物多样性功能区的划分(图 6(c)).

4)农业生产维持功能区. 农业生产维持功能区以农田生产潜力为评价指标. 农田生产潜力是对粮食产量的估算,利用自然间断点分类法将其分为 4 个重要性等级,结果如图 6(d)所示,松花江流域东部地区以及中部偏北地区的农田生产潜力相对较高.

表 5 生物多样性维持功能重要性评价分级标准

Tab. 5 Importance rating criteria for biological diversity maintenance function

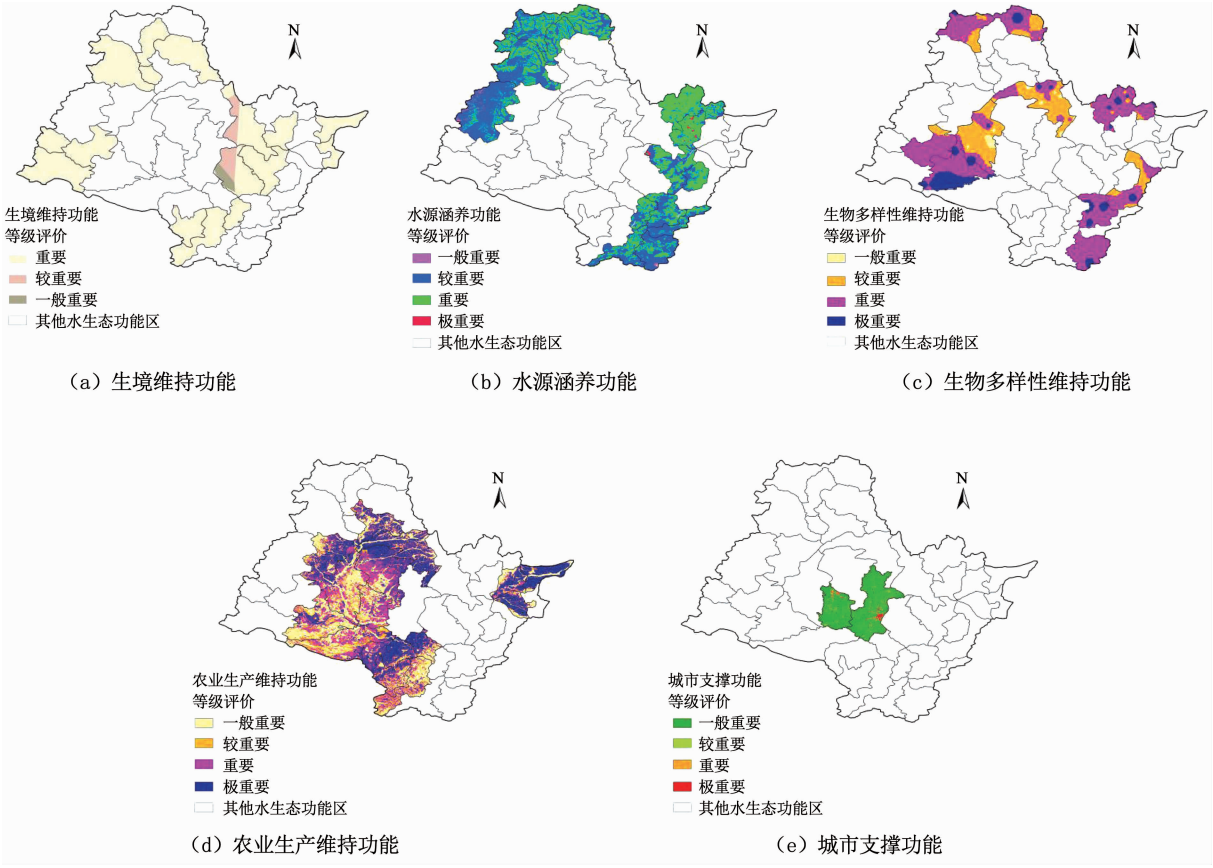
主要等级	级别	赋值	主要等级	级别	赋值
极重要	国家级	9	较重要	市级	5
重要	省级	7	一般重要	县级	3



(a)反距离权重法 (b)自然邻域法

图 5 松花江流域生物多样性功能等级分布

Fig. 5 Level distribution of Songhua River Basin biodiversity



(a) 生境维持功能 (b) 水源涵养功能 (c) 生物多样性维持功能

(d) 农业生产维持功能 (e) 城市支撑功能

图 6 松花江流域 5 种水生态功能重要性等级评价结果

Fig. 6 Assessment results of five aquatic ecosystem importance grades in Songhua River Basin

5)城市支撑功能区. 城市支撑功能区的分析首先将人口密度和单位面积 GDP 值分别用自然间断点法进行分类,然后将两种栅格数据进行镶嵌操作,实现二者的融合,得到图 6(e)所示的等级分布

结果.

3.3.2　水生态功能四级分区结果

在进行水生态功能四级区划时，依次分析每个三级功能区，当该区域只以一种水生态功能为主导，则只考虑该功能的重要性等级评价结果；若以两种功能为主导，应综合考虑二者的评价结果. 具体步骤如下：

1）将重要性等级评价结果（图 6）和松花江流域行政区划图层（图 7）重叠，通过调整透明度实现多图层同时显示；

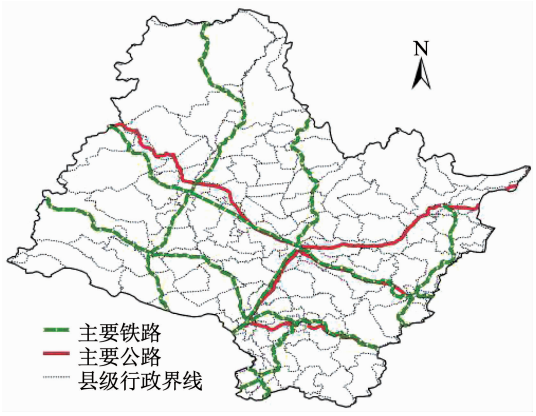


图 7　松花江流域行政边界及主要铁路、公路

Fig. 7　Administrative boundary, main railway, and highway of Songhua River Basin

2）分析该区域主导水生态功能的重要性评价结果，按照极重要、重要、较重要和一般重要 4 个评价等级进行宏观区划；

3）形成四级分区边界. 应注意尽量以行政边界或公路、铁路等为边界，以便于管理.

经过以上数据融合分析，将松花江流域划分成 65 个水生态功能四级分区，如图 8 所示. 以现有的水生态功能三级分区名 + 第四级所属分区名进行命名. RA 代表松花江流域；左起第 3 位为一级分区编号；第 4 位为二级分区编号；第 5 位为三级分区编号；第 6 位为四级分区编号. 命名结果以松花江干流下游地区为例，如表 6 所示.



图 8　松花江流域水生态功能四级分区

Fig. 8　Level 4 aquatic ecological function zoning map in Songhua River Basin

表 6　松花江干流下游地区水生态功能四级分区编码与命名

Tab. 6　Code and name of the level 4 aquatic ecological function zoning in the downstream area of Songhua River main stream

四级分区	分区名称	特征
RA Ⅴ1-1-1	三江平原农业类型农业生产维持极重要和生境维持重要功能区	区域地处萝北县、绥滨县、集贤县和桦川县，冷水鱼保护区，农业面积较大，粮食产量高，生境状态良好
RA Ⅴ1-2-1	三江平原农业类型农业生产维持极重要功能区	区域地处佳木斯市辖区、鹤岗市辖区和汤原县，农业面积大于 50%，部分地区河网密度较高
RA Ⅴ2-1-1	倭肯河丘陵平原农业类型生境维持重要功能区	区域地处双鸭山市辖区和勃利县，冷水鱼保护区，农田面积较小，河网密度较高，生境状态良好
RA Ⅴ2-2-1	倭肯河丘陵平原农业类型农业生产维持极重要功能区	区域地处依兰县、桦南县、勃利县，农业面积大于 50%，河网密度不高

3.4　结果分析与建议

通过生境综合评价分析（表 3）可知，松花江流域大部分生境状态处于良好，而位于松花江干流的阿什河口内、大顶子山断面以及第二松花江入口的靠山南楼断面则处于不同程度的污染状态，因此，如图 6（a）所示，生境维持功能区在松花江干流部分地区为较重要和一般重要. 松花江干流周围的城市较多，应加大对污染较大工厂的整治力度，加强污水处理能力.

如图 6（b）所示，水源涵养功能区分布在松花江流域的西北部和东南部. 松花江中下游地区植被以针叶林和落叶阔叶林为主，水源涵养功能相对重要. 嫩江支流绰尔河附近植被以草原草甸为主，水源涵养功能较弱. 保护水源涵养区首先要增加对原始森林的保护，其次实施退耕还林措施，合理增加人工林，同时重视水源地保护.

图 6（c）是生物多样性功能区重要性等级评价结果. 松花江流域自然保护区分布较密集，以保护内

陆湿地、森林生态和野生动物居多,是重要的生物多样性维持地区.在增加对现有自然保护区的管理力度的同时,还应控制污染源以保持良好的生境状况,改善湿地生态系统.

如图6(d)所示,农业生产功能区位于松花江流域中部,主要农作物为玉米、大豆、水稻、马铃薯和小麦,是中国主要的粮食产地.维持较高的农业生产,应合理规划调整农业的种植结构以优质和节水的方向发展现代化生态农业.

如图6(e)所示,城市支撑功能区位于松花江流域中部地区.松花江流域人口分布相对较少,城市支撑功能区以哈尔滨为中心.为加快经济增长,应合理规划产业布局,充分发挥农业的优势,但也要注意加强污水排放的监督和管理,实现可持续发展.

本文的四级分区是对研究区域内现有数据分析的实际体现,其具有一定的时效性.随着自然条件的变化以及人类活动的影响,评价指标的数据会发生缓慢变化.例如,人口迁移和城市发展会改变人口密度和单位面积GDP分布,生活污水和工业废水的处理程度会使水理化指标发生变化.指标的变化必然会影响评价结果,因此,应加强数据收集能力,定期更新数据,并用本文提供的方法对水生态功能进行重要性等级评价,合理调整分区,从而满足水生态建设总体需求.

4 结 论

1)本文运用数据融合技术进行水生态功能重要性等级评价,综合分析了生态环境因素和社会经济因素,将每种水生态功能分为了4个重要性等级,为四级分区奠定基础.数据融合技术能更好地实现应用多源数据对研究对象的综合评价,ArcGIS软件的应用使研究过程更加简便可行.

2)根据水生态功能重要性等级评价结果,将松花江流域划分为65个水生态功能四级分区,分区结果符合实际,为制定水生态保护方案提供了科学依据.但本文讨论的四级分区是在现有数据基础上分析得到的,随着人类活动干扰或自然变化的影响,应定期合理调整分区,从而满足水生态建设总体需求.

3)通过重要性等级评价结果可知,松花江流域大部分生境状态良好,而松花江干流的一些断面处于不同程度的污染状态,应加强污染源管理.松花江干流周边水源涵养功能区相对重要,保护水源涵养功能应加强对林地和水源地保护.流域农业生产功能区面积较大,应充分发挥农业优势.流域自然保护区众多,是重要的生物多样性维持地区.松花江流域的人口密度相对较少,哈尔滨等大城市为松花江流域社会经济发展贡献较大.

参考文献

[1]马溪平, 周世嘉, 张远, 等. 流域水生态功能分区方法与指标体系探讨[J]. 环境科学与管理, 2010, 35(12): 59
MA X P, ZHOU S J, ZHANG Y, et al. Discuss of method and index system for aquatic ecological function regionalization at watershed scale[J]. Environmental Science and Management, 2010, 35(12): 59. DOI:10.3969/j.issn.1673-1212.2010.12.014

[2]KARR J R, DUDLEY D R. Ecological perspective on water quality goals[J]. Environmental Management, 1981, 5(1): 55. DOI:10.1007/BF01866609

[3]OMERNIK J M. Ecoregions of the conterminous United States[J]. Annals of the Association of American Geographers, 1987, 77(1): 118. DOI:10.1111/j.1467-8306.1987.tb00149.x

[4]孟伟, 张远, 张楠, 等. 流域水生态功能区概念、特点与实施策略[J]. 环境科学研究, 2013, 26(5): 465
MENG W, ZHANG Y, ZHANG N, et al. Concept, characteristics and implementation strategies of watershed water ecological function zone[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, 26(5): 465

[5]魏保义, 张文静, 张晶, 等. 水生态分区方法在城市规划中的应用——以北京市为例[J]. 水利水电技术, 2015, 46(4): 39
WEI B Y, ZHANG W J, ZHANG J, et al. Application ofaquatic ecoregion approach to urban planning-case of Beijing[J]. Water Resources and Hydropower Technology, 2015, 46(4): 39. DOI:10.3969/j.issn.1000-0860.2015.04.009

[6]WANG S Y, CHENG D S, MAO Z P, et al. An aquatic ecoregion delineation approach based on GIS and spatial environmental data in Heihe River Basin, Northwestern China [J]. Quaternary International, 2015, 380/381:272. DOI:10.1016/j.quaint.2014.12.015

[7]YANG S Y, TAO T, CAI Q H, et al. Aquatic eco-regionalization of Erhai Lake Basin, Yunnan Province of Southwest China[J]. Chinese Journal of Ecology, 2012, 31(7): 1798

[8]王金龙, 李法云, 吕纯剑, 等. 辽宁北部典型流域水生态功能三级分区与水生态服务功能评价[J]. 气象与环境学报, 2014(4): 105
WANG J L, LI F Y, LV C J, et al. The third level aquatic ecological function regionalization and ecological function assessment in typical watersheds of northern Liaoning province[J]. Journal of Meteorology and Environment, 2014(4): 105. DOI:10.3969/j.issn.1673-503X.2014.04.015

[9]张欣, 徐宗学, 殷旭旺, 等. 济南市水生态功能区划研究[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 2016, 52(3): 303
ZHANG X, XU Z X, YIN X W, et al. Aquatic ecosystem function zoning in Jinan[J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 2016, 52(3): 303. DOI:10.16360/j.cnki.jbnuns.2016.03.009

[10]邱新忠, 朱俊. 天地图省市数据融合若干关键技术研究及应用——以"天地图·浙江"为例[J]. 测绘与空间地理信息, 2018(1): 179
QIU X Z, ZHU J. Research and application ofsome key technologies in data fusion between map world provincial and cities: Take "Map World of Zhejiang" as an example[J]. Geomatics and Spatial Information Technology, 2018, 41(1): 179

[11]马占东, 高航, 杨俊, 等. 基于多源数据融合的南四湖湿地生态系统服务功能价值评估[J]. 资源科学, 2014, 36(4): 840

MA Z D, GAO H, YANG J, et al. Evaluation of Nansihu Lake wetland ecosystem services based on multi-sources data fusion[J]. Resources Science, 2014, 36(4): 840

[12]赵俊杰. 国家环保总局发布《生态功能区划暂行规程》[J]. 中国经贸导刊, 2002(19): 41
ZHAO J J. Interim Regulations on Ecological Function Zoning issued by the state environmental protection administration[J]. China Economic and Trade Herald, 2002(19): 41

[13]生态. 全国生态功能区划[Z]. 北京：环境保护部，中国科学院, 2009

[14]王海花，叶亚平，晁丽君，等. 江苏省流域水生态功能分区[J]. 重庆理工大学学报, 2015(5): 130
WANG H H, YE Y P, CHAO L J, et al. Delineation of aquatic ecological function regionalization in Jiangsu Province[J]. Journal of Chongqing University of Technology, 2015(5): 130. DOI:10.3969/j. issn. 1674 - 8425(z). 2015. 05. 023

[15]左世文. 城镇化进程中沈抚连接带水生态变化与四级水生态功能分区研究[D]. 沈阳：辽宁大学, 2016
ZUO S W. The research on the change of water ecological in the area in connection with Shenyang and Fushun and study on the forth level aquatic eco-functional zoning in the process of urbanization[D]. Shenyang: Liaoning University, 2016

[16]蒲欢欢. 渭河流域水生态评价与区划研究[D]. 郑州：郑州大学, 2015
PU H H. Study on evaluation and regionalization of aquatic ecosystems in the Weihe River Basin[D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2015

[17]秦延文. 流域水环境质量评价技术研究(水体污染控制与治理科技重大专项十)[M]. 北京：科学出版社, 2014
QIN Y W. Research on evaluation technology of water environment quality in river basin (the tenth major special project of water pollution control and treatment science and technology)[M]. Beijing: Science Press, 2014

[18]龚诗涵，肖洋，郑华，等. 中国生态系统水源涵养空间特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2017, 37(7): 2455
GONG S H, XIAO Y, ZHENG H, et al. Spatial patterns of ecosystem water conservation in China and its impact factors analysis[J]. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(7): 2455. DOI:10.5846/stxb201512012406

[19]鲁绍伟，毛富玲，靳芳，等. 中国森林生态系统水源涵养功能[J]. 水土保持研究, 2005, 12(4): 223
LU S W, MAO F L, JIN F, et al. The water resource conservation of forest ecosystem in China[J]. Soil and Water Conservation Research, 2005, 12(4): 223. DOI: 10. 3969/j. issn. 1005 - 3409. 2005. 04. 064

[20]李红振. 大兴安岭东部地区过伐针阔叶混交林森林多功能评价[D]. 哈尔滨：东北林业大学, 2014
LI H Z. Multi-function evaluationfor over-cutting coniferous and broad-leaf forests in eastern part of Daxing'an mountain[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2014

（编辑　刘　彤）