

基于 GIS 的济南小清河流域生态敏感性分析与评价

周雨露¹, 杨永峰², 袁伟影¹, 高俊琴^{1*}

(1. 北京林业大学 自然保护区学院, 北京 100083; 2. 国家林业局 调查规划设计院, 北京 100714)

摘要:以济南小清河流域为研究区域,通过选择有代表性的生态影响因子,采用 GIS 技术和层次分析法对小清河流域进行生态敏感性分析,为小清河流域生态环境保护和开发利用提供依据。结果表明,济南小清河流域生态敏感性在空间分布上呈显著差异,敏感区主要分布在小清河上游、干流、玉清湖水库及其周边、白云湖以及南部山区,面积约 487.0 km²,占流域面积的 18.1%;轻度敏感区主要分布在敏感区外围,面积约 1 173.7 km²,占流域面积的 43.7%;不敏感区主要分布在平原区,距离水体一定范围以外的区域,面积约 1 025.4 km²,占流域面积的 38.2%。济南小清河流域总体生态敏感性一般,以轻度敏感性和不敏感性为主。

关键词:济南;小清河流域;生态敏感性;GIS;保护与利用

中图分类号:S718.5 **文献标志码:**A **文章编号:**1001-7461(2016)03-0050-07

Analysis and Evaluation on Ecological Sensitivity of Xiaoqinghe River Basin in Jinan Based on GIS

ZHOU Yu-lu¹, YANG Yong-feng², YUAN Wei-ying¹, GAO Jun-qin^{1*}

(1. School of Nature Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China;

2. Survey Scheme Designing Institute, State Forestry Bureau, Beijing 100714, China)

Abstract: In this paper, the Xiaoqinghe River Basin in Jinan, Shandong Province was chosen as the main study area to investigate the ecological sensitivity of the region, and to provide the basis for the ecological environment protection and reasonable utilization. Based on essential characteristic analysis, including ecological environment and resource utilization, taking typical ecological factors with the combination of geographical information system (GIS) and analytical hierarchy process (AHP), the eco-environmental sensitivity of the basin was analyzed. The spatial distribution to ecological sensitivity of the basin was significantly different. The sensitive zone, with an area of 487.0 km², accounting for 18.1% of the total, was mainly distributed in mainstream and upstream of Xiaoqinghe River, Baiyun Lake, the southern mountainous areas. Lower sensitivity zone, with an area of 1 173.7 km², 43.7% of the total, was mainly distributed in the areas nearby the sensitive zone. Non-sensitive zone, with an area of 1 025.4 km², 38.2% of the total, was mainly distributed in the plain areas. It was concluded that the eco-sensitivity of Xiaoqinghe River Basin was moderate, ranged between sensitivity and insensitivity.

Key words: Jinan; Xiaoqinghe River Basin; eco-environmental sensitivity; GIS; protection and utilization

生态敏感性是指生态系统对于人类日常的活动干扰和自然环境发生变化的敏感程度,反映出该区域发生生态环境问题的类型、难易程度和概率大

小^[1]。因此,生态敏感性分析与评价针对不同的生态环境区域,分析其生态环境的稳定性,对如何确定生态环境重点保护区、生态缓冲区、控制开发区和适

度开发区具有重要的理论意义,是区域生态规划建设的重要基础。

生态敏感性的研究对象不同,所采用的评价方法和标准有差异^[2]。目前,针对单一生态因子敏感性的研究较多,国内包括土壤对酸沉降的敏感性分析^[3];土壤侵蚀^[4]、土壤盐渍化^[5]、土地沙漠化^[6]等的敏感性分析;国外有关于陆生生态系统对温度的敏感性^[7]、气候变化的敏感性^[8]、土地利用变化的敏感性^[9]等的分析。景观生态敏感性研究一般采用生态因子评价法或层次分析法,结合 RS 和 GIS 技术手段,对景区生态环境敏感性进行分析评价^[10-12]。在国家或省级等大尺度的生态敏感性综合评价方面,可在生态环境因子分析的基础上,辨析较为重要的因子,通过建立生态敏感性模型进而识别出生态环境敏感区域^[13-15]。此外,在进行生态敏感性分析时,生态因子的选择较为关键,不同区域关键生态因子不同,一般可从高程、坡度、植被、土壤、地质、水文等方面进行选择^[16]。这些相关研究提高了人们对区域生态环境敏感性的认识和理解,但对流域尺度的生态环境敏感性研究还较少^[17]。

本研究以济南小清河流域为研究区域,选择有代表性的生态因子构建生态敏感性评价指标体系,基于 GIS 空间分析功能和层次分析法构建流域生态敏感性评价模型,通过单因子分析和多因子综合分析,对小清河流域生态敏感性进行等级划分和评价,为流域内生态环境保护与土地开发利用提供依据,为小清河流域湿地保护和合理利用提供参考。

1 研究区概况

小清河位于山东省济南市及其周边(116°50′—118°45′E、36°15′—37°20′N),全长约 237 km,控制流域面积 10 336 km²,约占全省总面积的 1/15^[18]。流域内地形复杂,地势南高北低,自西南向东北倾斜,由南至北依次为山区丘陵、平原、洼地,其中主要地貌类型为山丘,面积为 3 659 km²,占总面积的 35.4%。在小清河主干河道南部支流较多,主要为山丘区,基本属雨源型山溪河流,高程一般在 100~500 m;北岸支流较少,主要为平原洼地,均属平原型坡水河道,高程一般在 25~50 m;东、西部为山前冲积平原。流域属于温带大陆性季风气候,全年降水的 70%集中于 6—9 月^[19]。本次研究区域主要集中在小清河流域济南段,研究面积约 2 686.1 km²。

2 研究方法

2.1 数据的获取与处理

2.1.1 数据来源

小清河流域 DEM 数据和 ETM

遥感影像来源于国际科学数据平台,空间分辨率为 30 m,其中 ETM 遥感影像时间为 2013 年 8 月;土地利用现状图来源于济南市国土局(比例尺 1:50 000);水系和水质数据来源于济南市环境保护局环境质量简报;植被分布和鸟类数据来源于野外调查数据。

2.1.2 数据处理 将 ETM 遥感影像和 DEM 数据进行校正,投影转换、拼接、裁切等过程,生成可以用于分析的校正数据。将土地利用现状图在 ArcGIS 软件中利用 ETM 遥感影像进行纠正,并通过图上标志性地物点进行验证,匹配之后进行数字化,建立相应空间数据库,在 GIS 中进行空间分析。将土地利用现状图中的水系图层提取出来,与收集到的水系数据进行比对,并将水质数据作为属性数据输入数据库。

2.1.3 GIS 空间分析 采用 GIS 缓冲区分析水体的敏感性。缓冲区分析功能可以对点、线、面等空间对象,建立一定宽度范围区域。采用 GIS 加权叠加法对生态因子综合分析。GIS 叠加分析是将两层或多层因素进行叠加,形成新的目标,包含每个叠置层的属性,可以用于数据进行新的空间划分。统计分析主要是对空间的数据按照不同的算法进行统计、分类和综合评价,提取出所需要的数据。对敏感性单因子分析和综合评价中使用了统计分析方法进行分类,并对各敏感性区域面积进行了统计。

2.2 生态因子选取与分级

依据研究区的生态环境现状,本着科学性、代表性、系统性、可操作性及定量与定性相结合的原则,结合《生态功能区划技术暂行规程》(2003)的生态敏感性评价方法使用指标,兼顾数据收集、处理和计算,和考虑地质灾害、地质、地貌等基础资料的获取性,从实地考察调研收集到的资料中筛选出对该区域生态环境影响较大的关键性因素,包括高程、坡度、坡向、植被覆盖度、水体、水质、生物多样性和景观资源作为小清河流域生态敏感性评价因子。且在已有研究成果的基础上,依据小清河流域范围内各生态系统影响因素的重要性,根据专家咨询意见,将单因子的敏感程度分为 5 个等级,分别赋值为 9,7,5,3,1,即:数值为 9 的为极敏感区域,数值为 7 的为高度敏感区域,数值为 5 的为中度敏感区域,数值为 3 的为轻度敏感区域,数值为 1 的为不敏感区域。各生态因子的敏感度等级及其分级标准见表 1。

2.3 评价指标权重的确定

在对生态敏感性进行综合评价时需要考虑不同生态因子的影响程度,即确定各指标的权重^[20]。确

定权重的方法有很多,如经验权数法、主成分分析法、逐步回归法等。

确定权重。专家咨询法选择了该领域的知名专家和管理者,共发放问卷 10 份;用层次分析法确定指标权重结果如表 2。

本研究采用常用的层次分析法和专家咨询法来

表 1 生态因子及其类别与等级体系

Table 1 The rating system of ecological factors and category

生态因子		分级标准	等级值	敏感性分级
高程/m	海拔极高	> 400	9	极敏感
	海拔高	300~400	7	高度敏感
	海拔较高	200~300	5	中度敏感
	海拔较低	100~200	3	轻度敏感
	海拔低	<100	1	不敏感
坡度/(°)	坡度>25		9	极敏感
	15<坡度<25		7	高度敏感
	8<坡度<15		5	中度敏感
	5<坡度<8		3	轻度敏感
	坡度<5		1	不敏感
坡向	北		7	高度敏感
	东西		5	中度敏感
	南		3	轻度敏感
植被覆盖度	植被盖度<0.2		9	极敏感
	0.2≤植被盖度<0.4		7	高度敏感
	0.4≤植被盖度<0.6		5	中度敏感
	0.6≤植被盖度<0.8		3	轻度敏感
	植被盖度≥0.8		1	不敏感
水体	湖泊及河流		9	极敏感
	湖泊 0~100 m 缓冲带	河流 0~50 m 缓冲带	7	高度敏感
	湖泊 100~300 m 缓冲带	河流 50~100 m 缓冲带	5	中度敏感
	湖泊 300~1 000 m 缓冲带	河流 100~150 m 缓冲带	3	轻度敏感
水质	饮用水源、五类水及以下		9	极敏感
	四类水		7	高度敏感
	三类水及以上		5	中度敏感
植物多样性	植物物种数,生物多样性指数	保护物种敏感性指数		
	<50,<0.5	>4	7	高度敏感
	50~100,0.5~0.7	2~3	5	中度敏感
	>100,>0.7	<2	3	轻度敏感
动物多样性	鸟类物种数	保护物种敏感性指数		
	<10	>4	7	高度敏感
	10~20	2~3	5	中度敏感
	>20	<2	3	轻度敏感
生态系统多样性	水库		9	极敏感
	天然林、人工林		7	高度敏感
	湖泊、湿地		5	中度敏感
	草地、耕地		3	轻度敏感
	建设用地		1	不敏感
景观资源	一级景观资源分布区		9	极敏感
	二级景观资源分布区		7	高度敏感
	三级景观资源分布区		5	中度敏感
	四级景观资源分布区		3	轻度敏感

3 结果与分析

3.1 单因子生态敏感性分析

3.1.1 地形地貌

3.1.1.1 高程 小清河流域高程敏感性由南向北降低。南部山地丘陵区海拔较高,为极敏感至中敏感区,主要是水源涵养林;轻度敏感区主要分布在中

部的山前冲积平原地带;不敏感区主要分布在北部的洪泛平原地带(图 1a)。

3.1.1.2 坡度 小清河流域范围内多平原,兼有丘陵、山地等地貌景观,其坡度敏感性分布类似于高程敏感性。南部山地坡度较大,山势陡峭,为极敏感到中敏感区;中部和北部地势地平,为轻敏感到不敏感区(图 1b)。

3.1.1.3 坡向 坡向不同, 太阳辐射强度和光照时间长短也不相同, 对不同区域的温度和土壤水分有显著影响。阳坡接受的太阳辐射较多, 土壤水分蒸发速度较快, 其生态敏感性也就越高; 反之, 阴坡更有利于蓄水, 生态敏感性相对较低^[21]。研究区整体上以中敏感为主, 南部山区高敏感、中敏感和低敏感区都有分布(图 1c)。

3.1.2 植被覆盖度 植被覆盖度因子分析(图 2)表明, 极敏感区主要分布在研究区西部, 并在整个区域有零散分布; 高敏感区和中敏感区在研究区中普遍分布; 轻度敏感区和不敏感区主要分布在研究区的中部。

表 2 权重分析

Table 2 Weight analysis

因子	地形地貌	水资源	生境条件	植被覆盖度	景观资源	权重
高程	0.121					0.031
坡度						0.060
坡向						0.031
水体		0.228				0.114
水质						0.114
保护物种			0.407			0.102
物种数量						0.204
生态系统						0.102
植被覆盖度				0.121		0.121
景观资源					0.121	0.121
合计	0.121	0.228	0.407	0.121	0.121	1.000

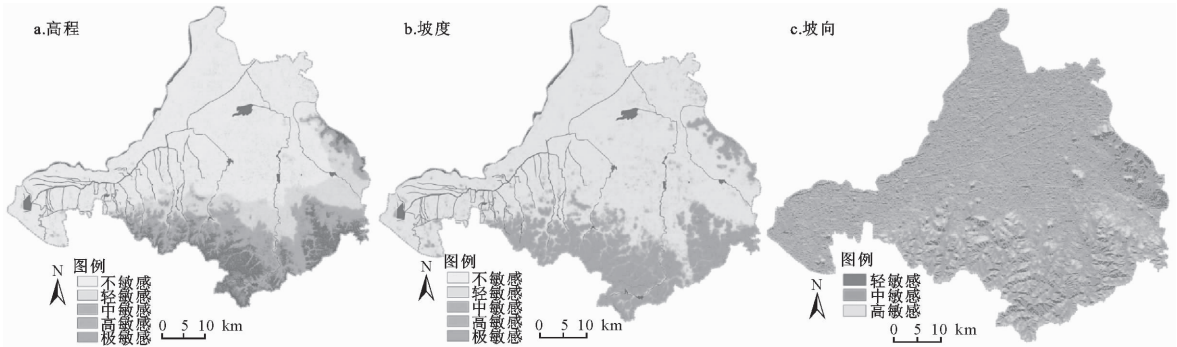


图 1 基于地形地貌因子的生态敏感性评价

Fig. 1 Result of ecological sensitivity based on topography factor

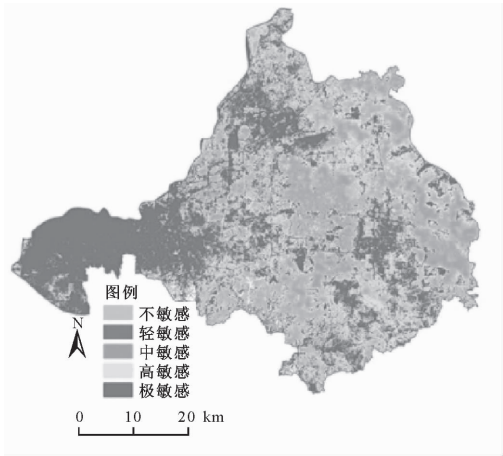


图 2 基于植被覆盖度因子的生态敏感性评价

Fig. 2 Result of ecological sensitivity evaluation based on vegetation coverage factor

3.1.3 水资源

3.1.3.1 水体 以湖泊和河流距离作为评价因子, 分别以 100、300 m 和 1 000 m 与 50、100 m 和 150 m 来划分水体缓冲因子, 得出距主要水体距离远近的 4 个缓冲区。极敏感区域主要是白云湖湿地和玉清湖水库及济西湿地, 是重要的水体保护区。高敏感区主要是小清河干流和支流; 中敏感区和不敏感区主要是小清河干流和支流外围以及玉清湖水库外

围和白云湖外围(图 3a)。

3.1.3.2 水质 研究区以五类水及以下的水质状况为主, 极敏感区域几乎沿整个小清河水系分布, 高度敏感区主要分布于研究区西北部, 中度敏感区主要是白云湖湿地和巨野河支流的部分流域(图 3b)。

3.1.4 生物多样性

3.1.4.1 植物 从植物物种数量和保护植物物种多样性两方面来对研究区内植物因子进行敏感性分析。物种数量高度敏感区在小清河干流的上、中、下 3 段均有分布; 中敏感区在干流中部有极少分布; 轻敏感区分布于河流中部。保护物种高度敏感区分布于河流下段, 包括玉清湖水库、济西湿地区域; 中敏感度区分布于河流上段, 包括白云湖湿地; 而轻敏感度区域分布于河流中段, 处于北湖湿地、华山湿地、清荷湿地区域(图 4a 和图 4b)。

3.1.4.2 动物 动物多样性主要考虑了鸟类。结合实地调研资料和图 4c, 济西湿地和白云湖湿地鸟类种类和数量较多, 生物多样性指数较高; 华山湿地水域目前主要是鱼塘, 且多处于干枯状态, 水鸟种类较少, 但周边环境复杂, 乔木灌木和草丛茂密, 林鸟较多。市区内小清河河面较窄, 两岸均进行了人工硬化处理, 植物种类较少, 植被结构单一, 加之人为干扰较大, 主要为伴人鸟类如喜鹊(*Pica pica*)、麻

雀(*Passer montanus*)、白头鹎(*Pycnonotus sinensis*)等,未有水鸟出现;遥墙清荷湿地目前处于干涸状态,池塘内荷花(*Nelumbo nucifera*)尚未种植,没有水域,也缺少植被,除了周边林网和正在假植的树苗外未有任何植被,在园区内几乎见不到鸟类。

3.1.4.3 生态系统多样性 根据生态系统因子分类标准得出生态系统生态敏感性评价图(图 4d)。敏感

性程度分为 5 个等级:以水库为主的极敏感区域主要是玉清湖水库;以天然林和人工林的高度敏感区域在研究区零星分布;以湖泊和湿地为主的中度敏感区域主要是白云湖湿地;以草地和耕地为主的轻度敏感区域几乎遍布整个研究区;以建设用地为主的不敏感区域主要集中在流域西部。整个研究区以轻度敏感区域和不敏感区域为主,敏感性程度较低。

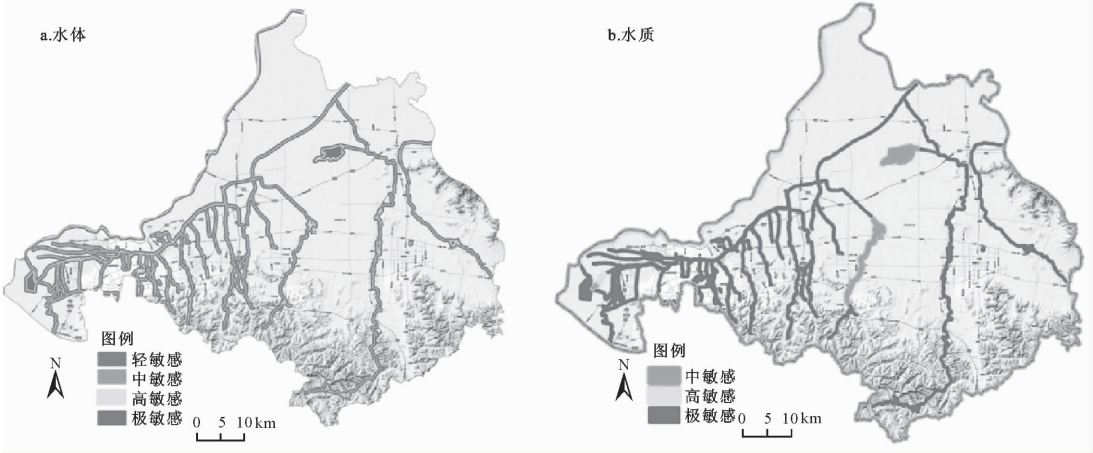


图 3 基于水资源因子的生态敏感性评价

Fig. 3 Result of ecological sensitivity evaluation based on water resource factor

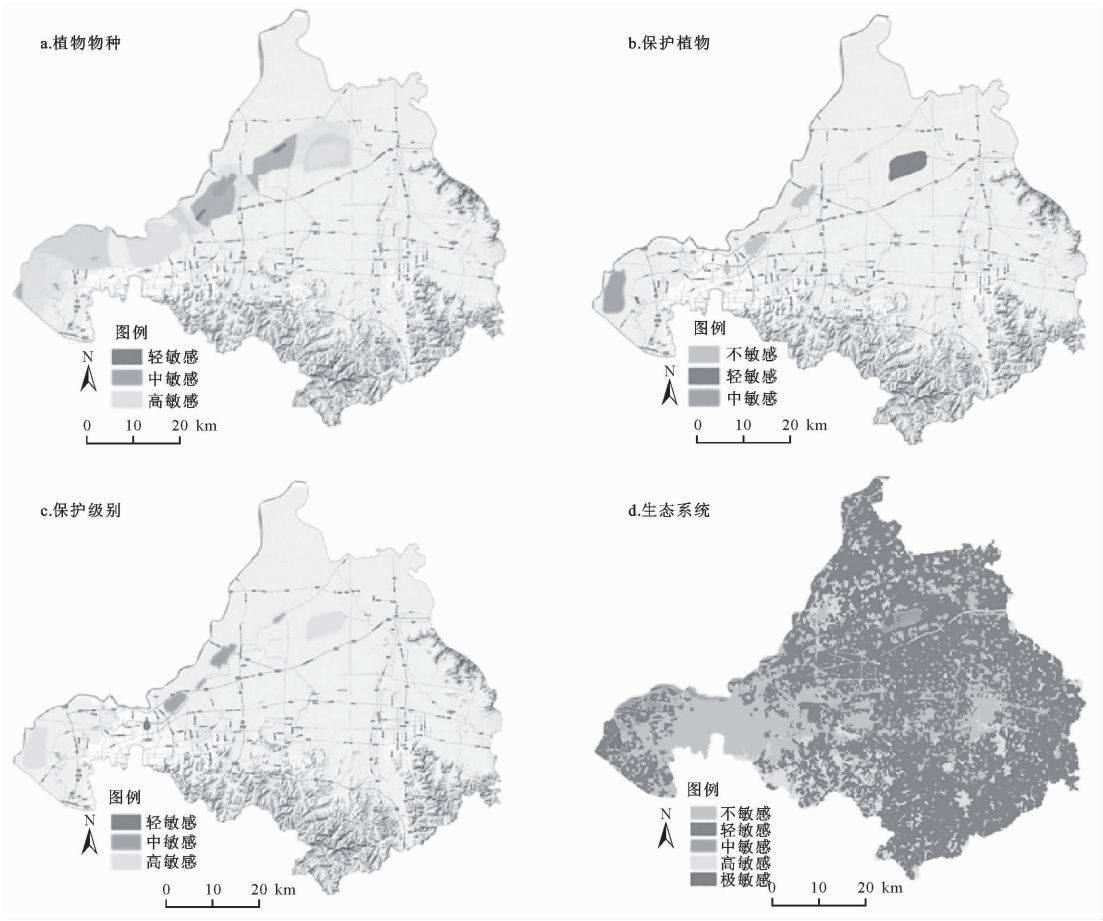


图 4 基于生物多样性因子的生态敏感性评价

Fig. 4 Result of ecological sensitivity evaluation based on biodiversity factor

3.1.5 景观资源 小清河流域的景观资源较为分散,极敏感区域主要分布于流域西部,包括大明湖公园、趵突泉公园和千佛山等景区;高度敏感区主要分布于南部区域,包括朱家裕民俗旅游区、济南植物园等;中度敏感区主要是白云湖湿地和济西湿地公园;轻度敏感区主要分布在小清河干流的中部地段,包括遥墙清荷湿地等(图 5)。

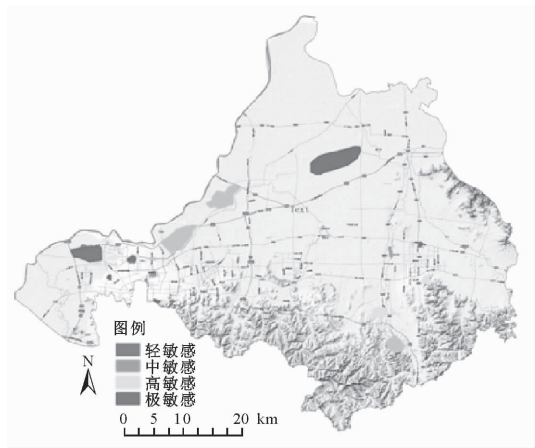


图 5 基于景观资源的生态敏感性评价结果

Fig. 5 Result of ecological sensitivity evaluation based on resources factor

3.2 生态敏感性综合分析

3.2.1 生态敏感性分级 通过生态敏感性单因子指数与指标权重(表 3)的加权求和,结合 ArcGIS 的空间分析模块(spatial analyst)进行加权叠加分析,计算得出小清河流域生态敏感性综合指数,即:

$$Si=[DEM]\times 0.031+[坡度]\times 0.06+[坡向]\times 0.031+[水体]\times 0.114+[水质]\times 0.114+[保护物种]\times 0.102+[物种数量]\times 0.204+[生态系统多样性]\times 0.102+[植被覆盖度]\times 0.121+[景观资源]\times 0.121$$

小清河流域生态敏感性综合指数值在 1.29~5.65 之间(图 6)。参照生态敏感性评价标准对生态敏感性图进行重新分类(reclassify),将生态敏感性综合指数分为 3 级,即:不敏感、轻度敏感和敏感。

3.2.2 生态敏感性分析评价 统计分析可知,小清河流域内生态敏感、轻度敏感和不敏感区面积分别占总面积的 18.1%、43.7%和 38.2%,小清河流域内生态敏感性一般,以轻度敏感性和不敏感为主。

从小清河流域生态敏感性分布(图 6)可以看出:1)敏感区,主要分布在小清河上游、小清河干流、玉清湖水库及其周边、白云湖以及南部山区,面积约 487.0 km²,占流域面积的 18.1%。此区域景观资源丰富,包含 5 大湿地以及水库,其环境易受干扰,且受到破坏后很难短时间恢复。2)轻度敏感区,主

要分布在敏感区的外围,如南部山区、小清河干流及支流周边和白云湖周边,面积约 1 173.7 km²,占流域面积的 43.7%。3)不敏感区,主要分布在平原区,距离水体一定范围以外的区域,面积约 1 025.4 km²,占流域面积的 38.2%。

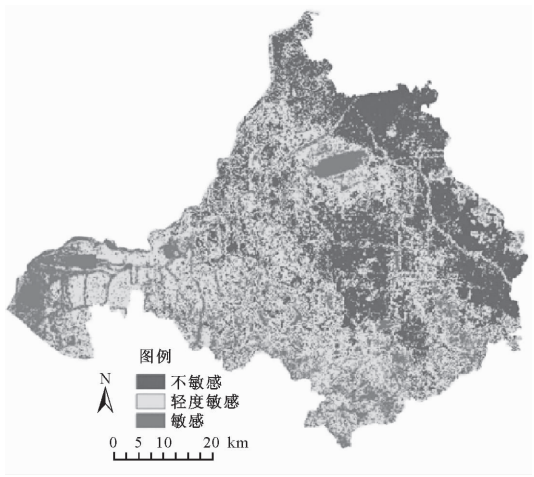


图 6 生态敏感性综合评价

Fig. 6 Comprehensive evaluation of ecological sensitivity

4 结论与讨论

在选择有代表性的生态因子基础上,针对济南小清河流域,构建了生态敏感性评价指标体系,基于 GIS 技术进行了单因子分析;结合层次分析法和专家评价法,建立了生态敏感性综合评价模型,并对小清河流域生态敏感性区域进行了识别和评价。济南小清河流域生态敏感、轻度敏感和不敏感区面积分别占总面积的 18.1%、43.7%和 38.2%,生态敏感性一般,以轻度敏感和不敏感性为主。研究结果为小清河流域生态环境保护与土地开发利用提供依据,也为小清河流域湿地保护和合理利用提供参考。

小清河流域水质污染较为严重,迫切需要改善水质,提升湿地生态系统服务功能,以促进小清河水质的好转,保障居民饮用水安全。生态敏感区需要给予高度重视并加强保护措施。区内动植物物种丰富,应该尽量避免开发性建设活动,加强生态保护,并且在山林地区保护水源涵养林,大力营造人造林。沿河建立生态景观带,丰富河道生物多样性,充分发挥植物群落的生态效益。严格控制污染源,提高水质状况,调整水资源利用结构,保证生态系统的完整性及稳定性。严格土地的使用和管理,基本不允许做过多建设开发,否则生态平衡很难恢复^[22-23]。生态轻度敏感区区内要注重自然资源的保护,恢复水生植被,促进生态系统良性循环。区内人为干扰较少,生态系统较稳定,但生态系统受损后恢复较难,可以适度进行开发建设活动,但要控制开发强度,不

能有破坏自然景观视觉效应的建设活动。同时,还应大力发展生态经济,重视区域内湿地公园生态旅游开发,实现经济发展与生态保护的良性互动^[24]。生态不敏感区域地势平坦,海拔较低,抗干扰能力强,景观资源稀少,受干扰后恢复能力较强,因此在严格控制外源性输入的同时,可作为适宜开发区,进行一定强度的开发建设,是城市开发利用的适宜地,但必须严格控制“三废”污染,不破坏生态的自我平衡能力,必须禁止与风景游览无关的建设行为,在建设过程中走“保护为主,开发为辅”的可持续发展道路^[25]。

随着国家对生态环境保护的重视,作为基础核心内容的生态敏感性分析评价将日益引起重视。然而,对于不同区域的自然环境,其生态环境问题也不相同,所以在进行生态敏感性评价时,受到数据获取水平和生态因子选取等因素的影响,评价结果存在一定的主观性和侧重性。因此,要更加深入全面的了解流域的生态环境问题,详细划分不同的生态敏感区域,必须针对流域生态环境问题的特殊性,建立科学、合理符合具体特定流域的生态敏感性评价方法体系,制定不同敏感区的保护规划措施,以便更好的解决当前研究区所面临的生态环境问题。

参考文献:

[1] 欧阳志云,王效科,苗鸿. 中国生态环境敏感性及其区域差异规律研究[J]. 生态学报,2000,20(1):9-12.
OUYANG Z Y,WANG X K,MIAO H. China's eco-environmental sensitivity and its spatial heterogeneity [J]. Acta Ecologica Sinica,2000,20(1):9-12. (in Chinese)

[2] 康秀亮,刘艳红. 生态系统敏感性评价方法研究[J]. 安徽农业科学,2007,35(33):10560-10571.

[3] 高太忠,李晓玉,付胜霞. 河北平原土壤酸化敏感性研究[J]. 唐山学院学报,2014,27(6):24-27.
GAO T Z, LI X Y,FU S X. A research on sensitivity of soil acidification in Hebei Plain [J]. Journal of Tangshan College, 2014,27(6):24-27. (in Chinese)

[4] 鄢新余,陈志强,黄锦祥,等. 南方红壤侵蚀区典型小流域土壤侵蚀敏感性研究[J]. 水土保持通报,2014,34(2):7-10.
YAN X Y,CHEN Z Q,HUANG J X, *et al.* Sensitivity of soil erosion in typical small watershed in eroded red soil region in south China [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2014,34(2):7-10. (in Chinese)

[5] 买买提·沙吾提,塔西甫拉提·特依拜,丁建丽,等. 基于 GIS 的干旱区土壤盐渍化敏感性评价—以渭干河-库车河三角洲绿洲为例[J]. 资源科学,2012,34(2):353-358.
MAMAT · SAWUT,TASHPOLAT · TIYIP,DING J L, *et al.* A GIS-based assessment on sensitivity of soil salinization in arid areas;a case study of the Ugan-Kuqa River Delta [J]. Resources Science, 2012,34(2):353-358. (in Chinese)

[6] 王跃辉,张林波,郭杨,等. 中国六省土地沙漠化敏感性时空格

局与趋势分析[J]. 水土保持研究,2014,21(5):132-138.
WANG Y H,ZHANG L B,GUO Y, *et al.* Analysis of spatio-temporal pattern and tendency of land desertification sensitivity in six provinces of China [J]. Research of Soil and Water Conservation,2014,21(5):132-138. (in Chinese)

[7] SONG B,NIU S,LUO R, *et al.* Divergent apparent temperature sensitivity of terrestrial ecosystem respiration[J]. Journal of Plant Ecology,2014,7(5):419-428.

[8] HOPE G. The sensitivity of the high mountain ecosystems of New Guinea to climatic change and anthropogenic impact[J]. Arctic,Antarctic and Alpine Research,2014,46(4):,777-786.

[9] HERNÁNDEZ J L,HWANG S,ESCOBEDO F, *et al.* Land use change in central Florida and sensitivity analysis based on agriculture to urban extreme conversion[J]. Weather,Climate, and Society,2012,4(3):200-211.

[10] 王凯,田国行,崔莉. RS 和 GIS 支持下的铜山风景区生态敏感性分析[J]. 西北林学院学报,2009,24(5):200-203.
WANG K,TIAN G H,CUI L. Ecological sensitivity analysis in Tongshan Scenic Spot based on RS and GIS [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24 (5): 200-203. (in Chinese)

[11] 冉圣宏,宋晓龙,李晓文,等. 衡水湖国家自然保护区生态敏感性分析[J]. 地域研究与开发,2009,28(4):129-133.

[12] 胡磊,胡希军,李杨璐,等. 基于 GIS 的福建大蚶山天云洞旅游区景观生态敏感性评价分析[J]. 广东农业科学,2013,40(7):157-159.

[13] 李咏红,李岱青,陈雅琳,等. 四川省成都市生态环境敏感性评价[J]. 水土保持通报,2015,35(1):236-241.
LI Y H,LI D Q,CHEN Y L, *et al.* Evaluation on eco-environment sensitivity of Chengdu City,Sichuan Province [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2015,35(1):236-241. (in Chinese)

[14] 朱志玲,吴咏梅,张敏. 基于 GIS 的宁夏生态环境敏感性综合评价[J]. 水土保持研究,2012,19(4):101-105.
ZHU Z L,WU Y M,ZHANG M. Comprehensive evaluation on eco-environment sensibility of Ningxia Hui Autonomous Region based on GIS [J]. Research of Soil and Water Conservation,2012,19(4):101-105. (in Chinese)

[15] 凡非得,王克林,宣勇,等. 西南喀斯特区域生态环境敏感性评价及空间分布[J]. 长江流域资源与环境,2011,20(11):1394-1399.
FAN F D,WANG K L,XUAN Y, *et al.* Eco-environmental sensitivity and its spatial distribution in Karst regions,south-west China [J]. Resources and Environmental in the Yangtze Basin, 2011,20(11):1394-1399. (in Chinese)

[16] 徐晓伟. 镜泊湖风景名胜生态敏感性分析及可持续发展研究[D]. 哈尔滨:东北农业大学,2012.

[17] 刘春霞,李月臣,杨华,等. 三峡库区重庆段生态与环境敏感性综合评价[J]. 地理学报,2011,66(5):631-642.
LIU C X,LI Y C,YANG H, *et al.* RS ang GIS-based assessment for eco-environmental sensitivity of the Three Gorges Reservoir Area of Chongqing [J]. Acta Geographica Sinica, 2011,66(5):631-642. (in Chinese)

[18] 孙新收. 山东省小清河流域管理对策研究[D]. 济南:山东大学,2009.

Mountain in China [J]. Journal of Beijing Forestry University, 2005, 27(2): 1-5. (in Chinese)

[28] 郑坚,陈秋夏,金川,等. 不同 TTC 法测定枫香等阔叶树容器苗根系活力探讨[J]. 浙江农业科学, 2008(1): 39-42.

[29] 邓明全,朱长进,赵丽华. 油橄榄根系与土壤物理因子关系的研究[J]. 林业科学研究, 1988(4): 376-381.

[30] 刘瑛,王芳,高甲荣. 晋西黄土高原虎榛子根系分布特征[J]. 西北林学院学报, 2009, 24(1): 31-34.

LIU Y, WANG F, GAO J Y. Root distribution characters of *Ostryopsis davidiana* on different sites in the Loess Plateau of western Shanxi[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2009, 24(1): 31-34. (in Chinese)

[31] FERNANDEZ J E, MORENO F, CABRERA F, *et al.* Drip irrigation, soil characteristics and the root distribution and root activity of olive trees[J]. Plant and Soil, 1991, 133(2): 239-251.

[32] 赵梦炯,吴广平,姜成英,等. 不同保水措施对陇南旱地油橄榄园土壤含水量、新梢生长量及根系的影响[J]. 林业实用技术, 2003(10): 16-18.

[33] RAKONCZAY Z, SEILER J R, SAMUELSON I J. A method for the in situ measurement of fine root gas exchange of forest trees[J]. Environmental and Experimental Botany, 1997, 37(2/3): 107-113.

(上接第 56 页)

[19] 张丽静. 小清河水环境质量评价及容量研究[D]. 济南: 山东大学, 2007.

[20] 林涓涓,潘文斌. 基于 GIS 的流域生态敏感性评价及其区划方法研究[J]. 安全与环境工程, 2005, 12(2): 23-26.

[21] 王耀建,王轶浩,路遥. 基于 GIS 的生态敏感性分析研究—以深圳梧桐山风景区为例[J]. 亚热带水土保持, 2013, 25(4): 36-40.

WANG Y J, WANG Y H, LU Y. Study on the ecological sensitivity analysis based on GIS-case study in the Wutong Mountains Scenic Area of Shenzhen City [J]. Subtropical Soil and Water Conservation, 2013, 25(4): 36-40. (in Chinese)

[22] 尹海伟,徐建刚,陈昌勇,等. 基于 GIS 的吴江东部地区生态敏感性分析[J]. 地理科学, 2006, 26(1): 64-69.

YIN H W, XU J G, CHEN C Y, *et al.* GIS-based ecological sensitivity analysis in the east of Wujiang City [J]. Scientia Geographica Sinica, 2006, 26(1): 64-69. (in Chinese)

[23] 雷波,焦峰,王志杰,等. 延河流域生态环境脆弱性评价及其特征分析[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(3): 161-167.

LEI B, JIAO F, WANG Z J, *et al.* Eco-environment vulnerability evaluation and characteristics analysis in Yanhe River Watershed [J]. Journal of Northwest Forestry University. 2013, 28(3): 161-167. (in Chinese)

[24] 刘耀龙,王军,许世远,等. 黄河靖南峡—黑山峡河段的生态敏感性[J]. 应用生态学报, 2009, 20(1): 113-120.

LIU Y L, WANG J, XU S Y, *et al.* Ecological sensitivity of Jingnanxia-Heishanxia reach of Yellow River [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2009, 20(1): 113-120. (in Chinese)

[25] 申世广,范晨璟,王浩,等. 基于土地适宜性评价的黑虎山风景区保护与利用[J]. 西北林学院学报, 2013, 28(2): 202-206.

SHEN S G, FAN C J, WANG H, *et al.* Protection and development of the scenic spots in Heihushan based on land ecological suitability evaluation [J]. Journal of Northwest Forestry University, 2013, 28(2): 202-206. (in Chinese)