

九龙江流域生态健康评价及管理对策

陈晨^{1,2}, 王文杰¹, 王维¹, 张哲¹

(1. 中国环境科学研究院 环境信息科学研究所, 北京 100012; 2. 湖南科技大学 建筑与城乡规划学院, 湖南 湘潭 411201)

摘要:以九龙江流域生态系统的陆域、岸边带和水域3个子系统为评价对象,结合九龙江流域自然社会经济特征和存在问题,分析流域内不同生态系统的结构、功能和生态胁迫特征,从生态系统的物理、化学和生物完整性出发,建立九龙江流域生态系统健康评价指标体系.利用RS和GIS技术,以小流域作为评价单元,开展流域生态健康状况评价.评价结果表明:九龙江流域生态健康总体状况一般,陆域生态健康状况优于岸边带和水域子系统;从空间分布上看,北溪上游健康状况好于西溪及北溪中下游地区.基于主要影响流域生态健康状况的限制因素,探讨九龙江流域管理对策,提出“水域生境修复、岸边带综合整治、陆域污染削减”的建议.

关键词:流域生态系统健康;评价;管理对策;九龙江

中图分类号:X821

文献标识码:A

文章编号:1672-9102(2013)03-0121-08

流域是指被分水岭包围的相对完整,有较明显、稳定的自然边界,具有独特的自然地理条件和生态特征的集水区域^[1].同时,流域以丰富的水资源维系着人类的生存、支撑着社会经济的发展,具有独特的经济发展结构和文化特色,是一个典型的社会-经济-自然复合生态系统^[2-3].然而,流域也是资源供求、人与自然、发展与水环境保护之间的矛盾冲突集中体,伴随着人口增加以及城市化的推进,人类活动驱动下各类生态系统格局和土地利用的转变以及对水资源的不合理开发,对流域生态系统服务功能产生深刻的影响^[4-6].在流域尺度上开展生态系统健康评价和生态系统管理的相关工作,作为今后研究的重点领域,对于流域生态环境保护与流域社会经济可持续发展具有重要的指导作用^[7].

九龙江流域是龙岩、漳州、厦门等城市的重要饮用水源地,九龙江流域具有重要的水源涵养与生物多样性和水土保持功能.近年来,由于城镇化和产业化进程加速带来一系列资源和环境问题,严重威胁九龙江流域的生态系统健康状况^[8].本文综合考虑

流域生态系统完整性,以小流域为评价单元,以陆域、岸边带和水域划分为基本框架,构建适合于九龙江流域的生态系统健康评价指标体系.以RS和GIS为技术手段,进行综合评价,揭示九龙江流域生态健康状况的空间分布规律.识别影响流域生态健康的驱动因子,并提出针对性管理对策,以期为九龙江流域生态环境保护和治理提供科学依据.

1 研究区概况与数据来源

1.1 研究区概况

九龙江流域位于福建西南部(116°46'~118°02'E,24°11'~25°52'N),流域面积14 773.36 km².九龙江是福建省的第二大河流,全长1 923 km,由北溪、西溪和南溪3大干流汇合而成,流经漳州、龙岩、厦门、泉州、三明等5个城市的19个县(县级市、区)(图1).其中龙岩、漳州、厦门3个地区是海峡西岸的核心经济区域,在福建省经济发展中占有极其重要的地位.流域内蕴藏了丰富的水资源,关系

收稿日期:2012-08-29

基金项目:国家环境保护公益性行业科研专项(201009021)

通信作者:王文杰(1970-),男,湖南湘潭人,研究员,主要从事区域生态评价与规划、环境遥感应用研究. E-mail: wangwj@ craes. org. cn

到龙岩、漳州、厦门等地区超过数百万人口的生活生产用水安全。

九龙江流域地势总体呈西北高、东南低的趋势,海拔在 $-10 \sim 1\,810\text{ m}$ 之间,地貌特征表现为从北部的中低山地逐次过渡到南部的丘陵、台地,下游为

漳州平原。流域属南亚热带海洋性季风气候,多年平均气温 $19.9 \sim 21.1\text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右,多年平均降水量 $1\,400 \sim 1\,800\text{ mm}$ 。境内森林覆盖度高,植被类型繁多,湿地资源丰富,具有重要的水源涵养、水土保持和生物多样性保护等生态服务功能。

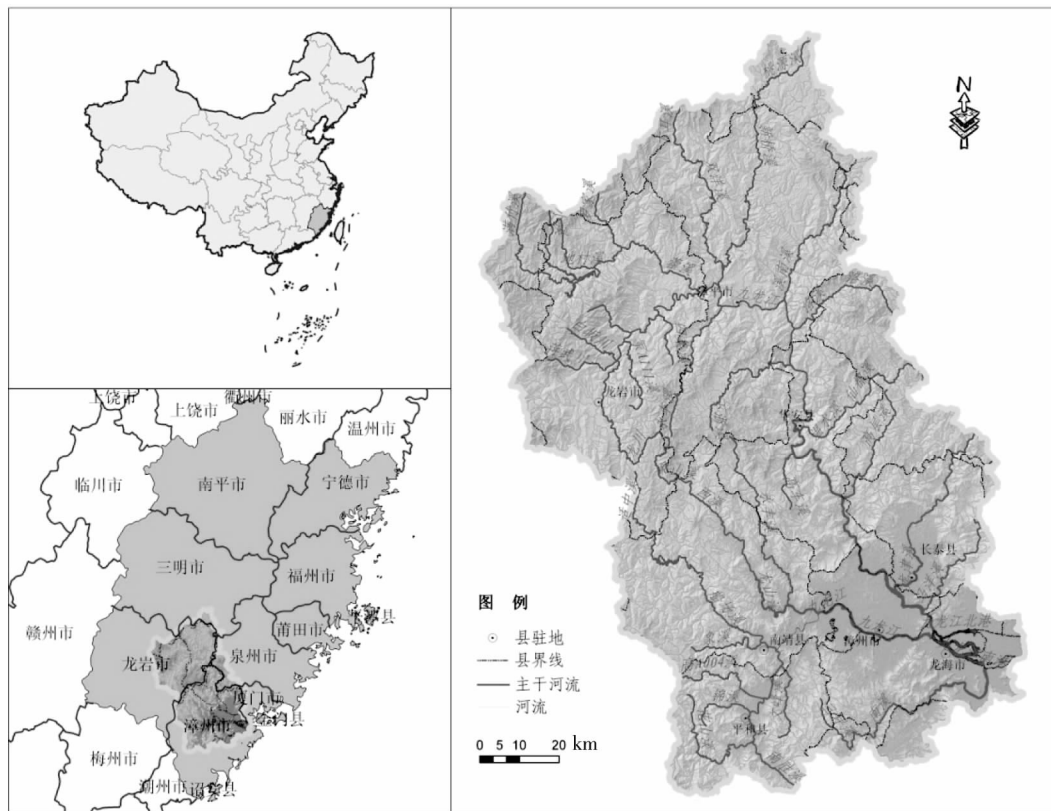


图 1 研究区的地理位置示意图

Fig. 1 Study region

1.2 数据来源

本文采用的数据包括:1) 遥感影像数据:1995 年和 2009 年 2 期 Landsat5 TM 遥感影像;2) 环境专题数据:1995 年和 2009 年比例尺为 $1:25\text{ 万}$ 土地利用类型数据; $1:25\text{ 万}$ 土壤侵蚀数据;3) 基础地理数据: $1:25\text{ 万}$ 河网水系数据; $1:25\text{ 万}$ 数字高程模型 (DEM) 数据; $1:100\text{ 万}$ 县级区划数据;4) 统计数据:2009 年九龙江流域断面水质监测数据和水文监测数据。

2 研究方法

2.1 评价单元与评价对象

2.1.1 评价单元的选择

流域生态健康评价单元的大小直接关系到流域生态健康评价的框架设计和指标体系,评价单元较大时难以充分体现流域生态健康的空间差异性,不

利于流域生态系统的分区优先保护和管理^[9]。小流域是一个独立的自然地貌单元,是具有水文功能的连续体,具有从上游至下游的生态完整性,便于分析水资源的“源—汇”关系,并且能够充分展示流域生态健康的空间差异,对于生态系统保护与恢复的区域生态评价具有重要意义^[10]。因此采用小流域为评价单元。

根据九龙江流域生态特征,结合河流水系矢量数据,基于 ARCGIS 平台 DEM 地表水文分析模块进行流域的自动提取。在此基础上,采用目视判读对生成的上百个小流域的范围边界进行归并与人工修改。最终九龙江流域共划分为 62 个小流域作为评价单元(图 2)。

2.1.2 评价对象的划分

依据流域生态学理论,流域是以河网水系作为廊道,将陆域、岸边带和水域相连接而构成的一个开

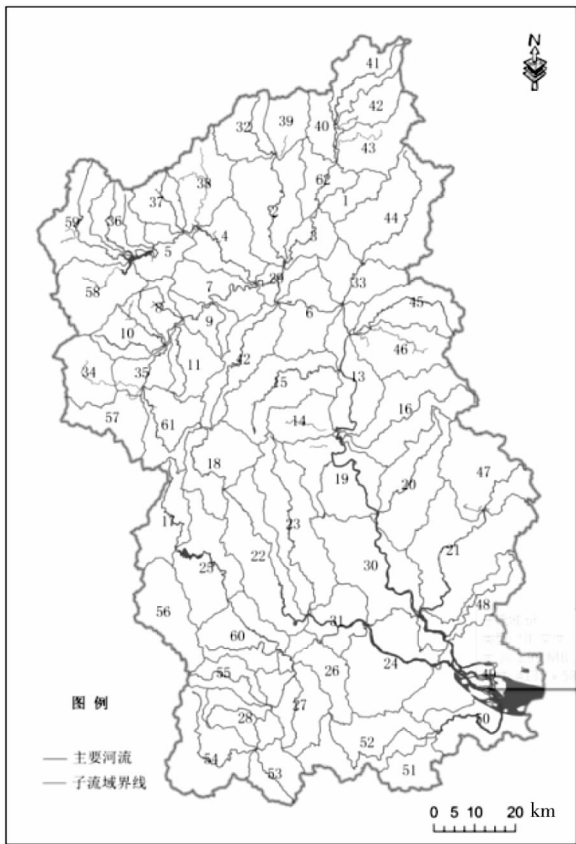


图2 九龙江流域子流域空间分布

Fig.2 Sub - watershed spatial distribution of Jiulong river basin

放的复合生态系统^[11-13]. 流域生态健康评价不仅需要对流域内的河网、湖泊、岸边带自然结构、陆域植被、农田和城镇等健康状况进行考虑,还要分析这些因素对整个流域健康的综合影响. 本文以维系流域生态系统完整性以及生态服务功能为主线,结合九龙江流域的空间组分格局,根据水文过程和生态功能空间构成的差异性,将流域划分水域、岸边带和陆域3部分作为评价对象开展流域生态健康评价工作. 借助遥感与GIS技术,通过综合分析评价对象的生态结构、功能和胁迫状况,揭示流域生态系统健康状态的空间差异性,诊断影响流域生态系统健康的驱动因子,从而确定重点保护和优先治理的区域,为九龙江流域生态环境保护和治理提出管理对策建议.

评价对象的划分以岸边带的范围为界,从而划定水域和陆域的范围. 由于河流廊道具有很大的异质性,岸边带的宽度随着河流的规模、位置、当地的物理构造等变化而不同. 河流常年平均水位和最高洪水位等水文数据较难获取. 因此,本文根据九龙江流域的自然地理和生态系统特征,以数字高程模型

(DEM)数据与1:25万河网水系数据为基础,结合遥感解译的水域现状分布数据,由河流常年平均水位向陆域做500m缓冲区,以常年平均水位至缓冲区外边界作为岸边带的空间范围. 以岸边带为界,确定陆域和水域范围.

2.2 指标体系

根据评价对象生态结构特征、主导生态功能空间异质性和生态胁迫3方面,结合九龙江流域生态环境自身特征以及存在的主要问题,分别选取水域、岸边带和陆域指标体系.

九龙江流域密集的水利工程建设破坏了河流自然过程的完整性,导致流域内水生态退化严重、生态功能下降、水生生物生境遭到破坏;同时来自陆源污染物的大量排放,导致流域水环境恶化. 因此水域评价指标中,利用反映水域化学组成的水环境质量数据作为水域健康评价的重要指标;另外选取自然河道连通性评价河流水生生境状况;由于水域生物完整性指标需要长期的实地监测,数据获取比较困难,参考研究区已有研究成果^[14]对水域生物完整性状况进行定性分析. 水资源开发利用率反映人类影响胁迫.

岸边带地表植被沿顺向河流的连续性决定其能量传输的稳定性,滩涂垦殖、农业开垦、水产养殖等人为活动造成岸边带植被破坏和天然湿地缩减,严重影响岸边带结构和功能的稳定性^[15]. 岸边带评价指标中,选取岸边带自然植被覆盖度及连续性反映岸边带生态系统结构稳定性;岸边带土地利用类型及景观破碎度、天然湿地面积比例反映岸边带生态系统功能完整性.

陆域矿山开采、陡坡耕种及大面积速生林引种等人为活动导致土壤侵蚀强度增加^[16]. 超载力畜禽养殖、工业结构性污染物排放、农业面源和城镇生活源是造成流域水环境质量下降的陆源污染物,监测结果显示COD和氨氮是主要污染因子^[17-18]. 陆域从生态系统结构、功能和生态胁迫3方面进行评价. 指标选用陆域自然植被组分比例及自然植被破碎度来反映生态系统结构的完整性;自然植被覆盖度、天然湿地面积比例和土壤侵蚀强度来表征生态系统功能的稳定性;考虑社会经济和污染胁迫状况,选取农田及建设用地面积比例表示土地利用强度,单位面积COD和氨氮排放量为污染负荷指数和人口密度以反映人类活动对陆域生态胁迫.

根据不同指标对流域生态健康的影响程度差异,本文利用层次分析法结合专家打分对指标重要性进行分析,从而确定指标权重(表1).

表1 流域生态系统健康评价指标体系

Tab.1 The index system of ecosystem health assessment in the Jiulong river basin

目标层	子系统	要素层及权重	指标层及权重
流域生态系统健康	A ₁ 水域 (0.45)	B ₁ 水生生境(0.3)	C ₁ 水质达标率(0.6)
			C ₂ 自然河道连通性(0.4)
		B ₂ 生物完整性(0.3)	C ₃ 特有性或指示性物种保持率(0.4)
			C ₄ 底栖生物完整性指数(0.3)
			C ₅ 鱼类完整性指数(0.3)
			C ₆ 水资源利用强度(1.0)
	A ₂ 岸边带 (0.15)	B ₄ 生态结构(0.4)	C ₇ 自然植被覆盖度(0.5)
			C ₈ 自然植被连通性(0.5)
		B ₅ 生态功能(0.4)	C ₉ 岸边带污染阻隔功能指数(0.5)
			C ₁₀ 岸边带洪水调蓄功能指数(0.5)
		B ₆ 生态胁迫(0.2)	C ₁₁ 岸边带人为干扰指数(0.6)
			C ₁₂ 岸边带退化指数(0.4)
	A ₃ 陆域 (0.4)	B ₇ 生态格局(0.3)	C ₁₃ 陆域自然植被组分比例(0.5)
			C ₁₄ 陆域自然植被破碎度(0.5)
		B ₈ 生态功能(0.3)	C ₁₅ 陆域水源涵养功能指数(0.4)
			C ₁₆ 陆域洪水调蓄功能指数(0.3)
			C ₁₇ 陆域水土保持功能指数(0.3)
			C ₁₈ 人口密度(0.3)
B ₉ 生态胁迫(0.4)	C ₁₉ 农田及建设用地比例(0.3)		
	C ₂₀ 污染负荷指数(0.4)		

2.3 评价指标的标准化处理

由于指标体系中的各项评价指标因度量单位而异,评价指标优劣往往是一个笼统或模糊的概念,很难对它们的实际数值进行直接比较分析.因此采用极差标注法,对各指标进行量纲统一,取值设定在[0,10].

正相关的指标标准化值 = $10 \times (x_i - x_{\min}) / (x_{\max} - x_{\min})$

负相关的指标标准化值 = $10 \times (x_{\max} - x_i) / (x_{\max} - x_{\min})$

其中: x_i 为第*i*个评价指标, x_{\max} 为第*i*个指标的最大值, x_{\min} 为第*i*个指标的最小值.

2.4 综合评价模型

本文选用层次性清晰的多指标综合指数评价模

型,通过水域、岸边带和陆域3个子系统健康指数按权重求和,得到流域生态健康综合指数HWI.

综合指数HWI计算公式:

$$HWI = W_W \sum_{i=1}^n w_i x_i + W_R \sum_{i=1}^n w_i x_i + W_L \sum_{i=1}^n w_i x_i.$$

其中: W_W, W_R, W_L 分别表示水域、岸边带、陆域子系统健康指标权重; w_i 表示各子系统第*i*项二级指标权重; x_i 表示各子系统第*i*项二级指标健康分值.

2.5 评估分级标准

根据评价综合指数分值大小,从高到低排序,以反映流域生态系统健康状况从优到劣的变化,最终将九龙江流域生态健康评估等级分为优秀、良好、一般、较差、差5级(表2).

表2 流域生态健康评价等级标准

Tab.2 Evaluation criteria rank of healthy watershed

健康状况	综合指数	描述
优秀	8 ~ 10	陆域污染物排放较低、岸边带对污染物阻滞能力强、河流水质达到功能区标准,流域整体生态系统结构稳定、功能完善.
良好	6 ~ 8	陆域污染物排放适度、岸边带对污染物阻滞能力较强、河流水质基本达到功能区标准,流域整体生态系统结构基本稳定、功能基本完善.
一般	4 ~ 6	流域污染物排放与自我消减基本持平,流域整体生态系统结构、功能未受显著影响.
较差	2 ~ 4	陆域污染物排放较高、岸边带对污染物阻滞能力较低、河流水质不能达到功能区标准,流域整体生态系统结构较不稳定、功能较不完善.
差	0 ~ 2	陆域污染物排放极高、岸边带对污染物阻滞能力极差、河流水质严重超标,流域整体生态系统结构极不稳定、功能极不完善.

3 流域生态健康评价结果与驱动力分析

3.1 水域生态系统健康评价结果

水域生态健康指数为 5.09, 健康状况一般(图 3). 西溪支流龙山溪、永丰溪、万安溪支流和龙津溪支流水电站分布密集, 严重影响水生生境的物理结构完整性, 水生生物生境受到破坏, 生物多样性下降. 同时, 众多梯级水电站使得原有河道变为库区, 水流速度减小, 削弱了降解污染物的能力. 雁石溪支流、西溪龙山溪支流、永丰溪支流以及南溪, 由于龙岩市新罗区、南靖县东部、漳州市龙文区和芗城区以及龙海市南部等地区超承载力畜禽养殖引发水环境污染, 部分河段出现劣 V 类水质. 此外, 农业化肥、农药施用等加剧了非点源污染, 与工业、生活污染排放协同影响, 导致九龙江流域中下游水质状况较差, 严重威胁居民饮用水安全.

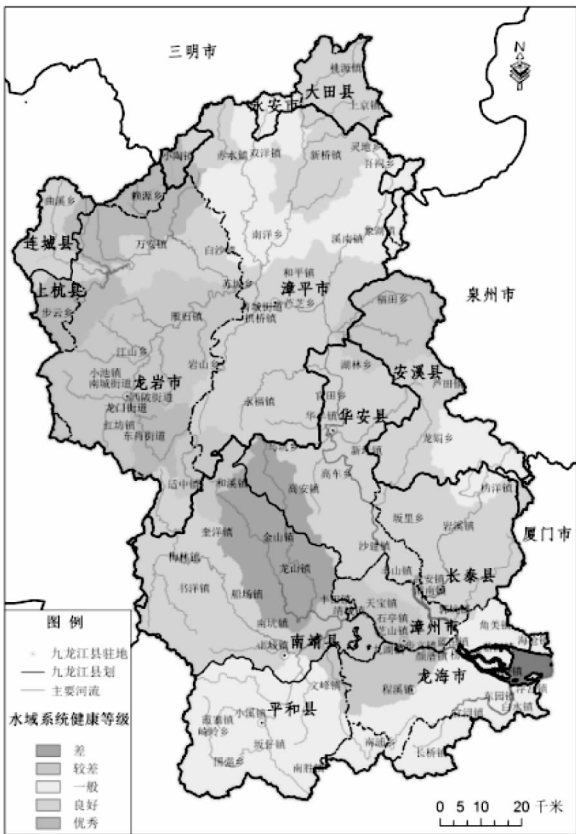


图 3 水域生态系统健康评价结果

Fig. 3 Result of aquatic ecosystem health assessment

3.2 岸边带生态系统健康评价结果

岸边带生态健康指数为 5.05, 健康状况一般(图 4). 北溪上游各支流源头区域健康状况较好, 龙岩市、漳平和九龙江口 3 个人口密集区以及长泰和

平和县部分地区健康状况较差. 岸边带是陆域径流进入水域的最后一道屏障, 由于九龙江流域岸边带城市化以及农田面积比例高, 农业面源污染以及滩涂垦殖、围海筑堤和海港建设等高强度人为干扰导致岸边带自然植被破碎度较高, 滨海天然湿地面积萎缩, 生物多样性减少, 阻滞污染物、净化降解能力衰退, 对水域生态系统健康的保护功能降低.

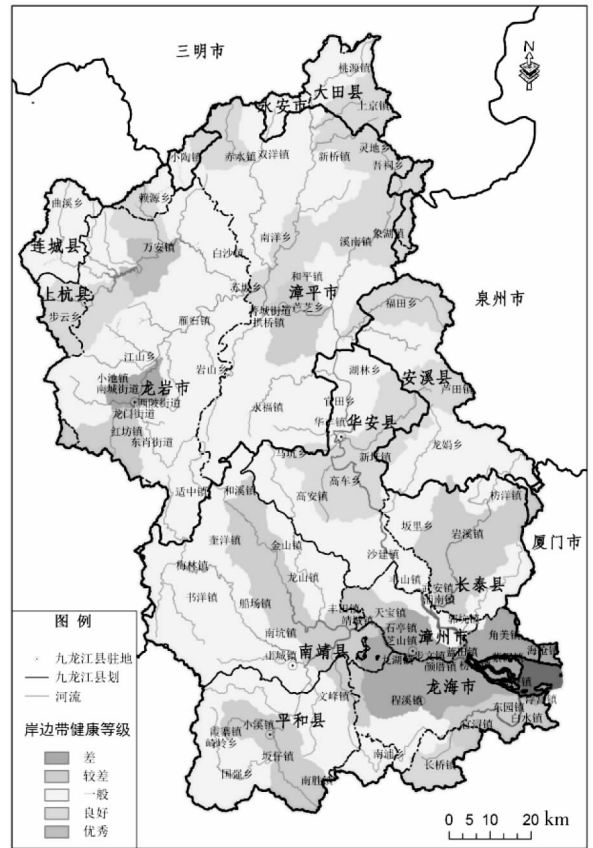


图 4 岸边带生态系统健康评价结果

Fig. 4 Result of riparian ecosystem health assessment

3.3 陆域生态系统健康评价结果

陆域生态系统健康指数为 6.79, 健康状况良好(图 5). 北溪上游生态系统类型以森林为主, 植被覆盖度高, 自然生态系统结构和组分格局完整, 发挥着重要的水源涵养和生物多样性保护功能, 健康状况较好尤其是万安溪支流流经的小流域健康状况最好. 龙岩市、西溪干流以及北溪中下游地区健康状况较差. 城镇迅猛扩张带来的点源污染, 畜禽养殖业与农业化肥农药施用造成的面源污染, 矿山开采、陡坡耕种与大面积速生林种植是威胁陆域健康的主要因素.

3.4 九龙江流域生态健康综合评价结果

九龙江流域生态健康综合指数为 5.76, 健康状况一般. 健康状况优秀的区域面积占流域总面积的 3.36%; 健康状况良好占 50.33%; 健康状况一般占 38.53%; 健康状况较差占 7.79%.

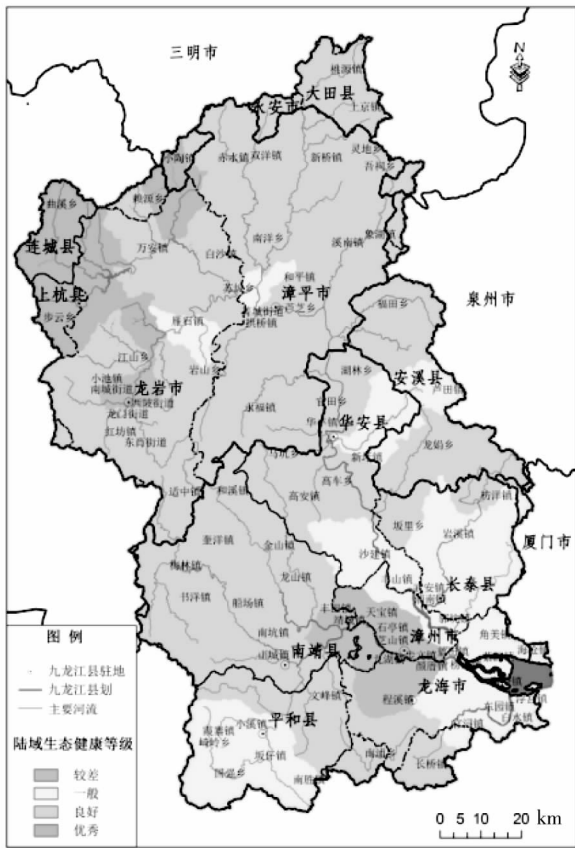


图5 陆域生态系统健康评价结果

Fig.5 Result of terrestrial ecosystem health assessment

九龙江流域生态系统健康状况空间差异性表现为北溪上游健康状况较好,健康状况以优秀为主的区域位于万安溪西部的玳瑁山区,即北溪的源区;北溪的雁石溪支流、西溪流经的南靖县东部、漳州市芗城区和龙文区等区域健康状况最差;南溪健康状况一般(图6、表3)。

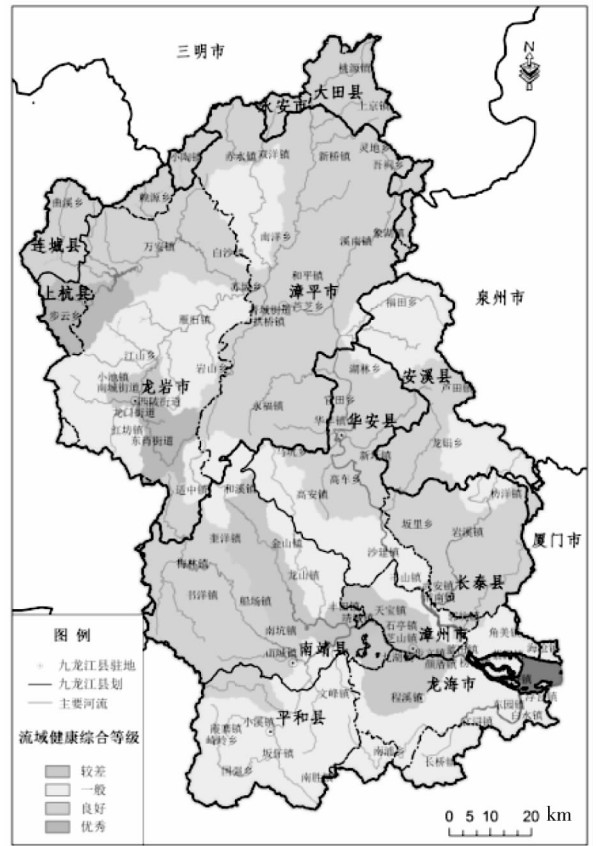


图6 九龙江流域生态系统健康评价结果空间分布图

Fig.6 Result of ecosystem health assessment

表3 九龙江流域生态系统健康评价结果

Tab.3 Results of ecosystem health assessment in the Jiulong river basin

健康等级	面积/km ²	所占比例/%	主要河流水系	所涉及主要乡镇
优秀	495.69	3.36	万安溪西部、适中溪	上杭县步云乡、新罗区江山乡、曹溪街道和适中镇
良好	7 435.16	50.33	万安溪支流、新桥溪、新安溪、溪南溪、船场溪、温水溪	其他乡镇
一般	5 692.27	38.53	双洋溪、洛溪、北溪下游、永丰溪、花山溪、龙津溪、南溪、龙门溪、苏溪、小溪、龙山溪、	龙岩市、平和及龙海市大部分;漳平市南洋乡、安溪县福田乡、龙涓乡;华安县马坑乡、沙建镇等地
较差	1 150.25	7.79	西溪下游	龙岩市西陂街道;南靖县和溪、金山、龙山和靖城镇;漳州市芗城区和龙文区;龙海市西北部乡镇

4 九龙江流域保护和管理对策

本文以维持九龙江流域生态系统健康为目标,根据九龙江流域存在的主要问题以及流域社会经济

影响九龙江流域生态健康状况的主要原因:一是密集的水利水电工程改变河流水文条件,严重影响河流生态系统的连通性,水体自净能力降低;二是经济快速发展及城镇迅猛扩张带来的污水排放和畜禽养殖污染严重,人口聚集区河段水环境质量明显下降;三是大面积的桉树种植负面影响明显,造成生境质量下降,水源涵养和水土保持功能降低。

状况和发展规划,在评价结果的基础上,从流域生态系统健康的角度^[19]研究流域内各子系统存在的不健康的症状和胁迫因子,提出通过“水域生境修复、岸边带综合整治、陆域污染削减”来实现流域生态

系统保护和管理. 具体体现在以下几点:

1) 完善流域水利资源开发的综合规划, 优化流域水电开发布局, 处理好生活、生产和生态用水的关系. 强化对流域违规水电开发的监管与整治, 针对流域水利水电工程密集, 水生生境破碎的现状, 以西溪、北溪部分河段和龙津溪支流为重点, 规范水利水电工程发展, 优化水电开发布局, 拆除违规及不合格的闸坝, 最大限度恢复流域水生生境, 确保河道的生态基流以及连通性.

2) 根据流域水环境功能、水环境容量以及水域生态健康状况, 加强水环境质量较差的雁石溪支流、北溪干流和西溪支流的水环境污染治理. 以人口密集的龙岩、漳州、龙海和厦门等主要城市为重点, 加强城市污水和垃圾处理, 提升城镇污水处理和垃圾无害化处理能力. 对饮用水源保护区内部及周边的工业、农业污染源进行清理和整治, 加快城镇污水处理设施更新、改造、扩建及配套管网工程等建设, 保障当地居民的饮用水源安全和流域生态健康.

3) 加强九龙江流域源头重点生态功能区保护, 划定流域不同区域的主导生态服务功能以及生态保护目标. 逐步减少桉树等人工林种植, 完善自然生态系统结构及组分. 加大以西溪支流沿岸和华安、长泰、南靖以及平和县为重点水土流失治理力度, 开展沿溪、沿江两岸退耕还林工程, 维持水源涵养与水土保持功能. 以九龙江河口为重点进行湿地生态修复, 强化湿地生物多样性保护与监管力度, 提升岸边带的洪水调蓄与生物多样性保护能力.

4) 以九龙江流域北溪干、支流沿岸农村为重点, 优先在饮用水源地等敏感区域开展农村环境综合治理. 以畜禽养殖业密集的雁石溪支流、西溪以及北溪中下游和九龙江口地区的污染治理为重点, 控制龙岩、漳州、龙海市和长泰县畜禽养殖规模, 强化现有畜禽养殖场废物有效处理和综合利用; 开展农村环境连片整治, 建立目标责任制, 削减陆源污染物排放总量.

5) 完善九龙江流域生态补偿机制, 健全上、下游联动生态环境保护协调机制, 建立流域环境保护和生态建设补偿基金以及相应的流域生态系统保护奖惩考核机制; 向当地群众宣传保护健康流域生态系统健康的重要性, 增强群众保护健康流域的意识.

5 结论

1) 本文所提出的评价方法以及评价指标体系的构建具有较完备的理论基础和操作体系. 根据流域生态系统的特点, 依据生态系统健康、流域生态学理论基础, 以维护流域生态系统完整性和维系流域生态服务功能为主线, 分别从流域生态系统的结构、

功能和生态胁迫方面构建适合于九龙江流域的生态系统评价指标体系, 并探讨了九龙江流域生态系统的健康状况的空间分布差异规律及其驱动因素, 为流域生态系统的保护与可持续利用提供一定的科学依据.

2) 评价结果显示九龙江流域生态系统健康综合指数为 5.76, 健康状况一般. 陆域生态健康良好, 岸边带与水域生态健康一般, 但相比之下岸边带的健康状况偏差, 上游健康状况好于下游, 北溪的源区健康状况最好, 北溪的雁石溪支流、西溪流经的南靖县东部、漳州市芗城区和龙文区等区域健康状况最差. 密集的水利水电工程、畜禽养殖、桉树等经济作物种植、化肥农药施用等人类活动是胁迫九龙江流域生态健康的主要原因.

3) 根据九龙江流域生态健康评价结果, 提出具体的保护与管理对策: 优化流域水电开发布局与监管, 最大限度恢复流域水生生境, 确保河道连通性; 加强农村环境综合整治与畜禽养殖污染整治, 深化流域水环境污染治理和饮用水源保护; 推进流域自然生态系统修复, 逐步减少桉树等人工林, 开展以西溪支流沿岸和九龙江口地区为重点的退耕还林工程, 以及以九龙江河口为重点的湿地生态修复; 完善生态补偿机制与监管能力建设.

参考文献:

- [1] Bohn B A, Kershner J L. Establishing aquatic restoration priorities using a watershed approach [J]. *Journal of Environmental Management*, 2002, 64(4): 355-363.
- [2] 罗跃初, 周忠轩, 孙轶, 等. 流域生态系统健康评价方法[J]. *生态学报*, 2003, 23(8): 1606-1614.
Luo Y C, Zhou Z X, Sun Y, et al. Assessment methods of watershed ecosystem health [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2003, 23(8): 1606-1614.
- [3] 李春晖, 崔嵬, 庞爱萍, 等. 流域生态健康评价理论与方法研究进展[J]. *地理科学进展*, 2008, 27(1): 9-17.
Li C H, Cui W, Pang A P, et al. Progress on theories and methods of watershed eco-health assessment [J]. *Progress in Geography*, 2008, 27(1): 9-17.
- [4] 于贵瑞. 人类活动与生态系统变化的前沿科学问题[M]. 北京: 高等教育出版社, 2009.
Yu G R. Scientific frontier on human activities and ecosystem changes [M]. Beijing: Higher Education Press, 2009.
- [5] Timothy O R, Ashley G H. Watershed land use and aquatic ecosystem response: Ecohydrologic approach to conservation policy [J]. *Journal of Hydrology*, 2009 (364): 182-199.
- [6] Bongghi H, Karin E L, Myrna H H, et al. An integrated monitoring/modeling framework for assessing human-nature interactions in urbanizing watersheds: Wappinger and Onondaga Creek watersheds, New York, USA [J]. *Environmental Modelling & Software*, 2012(32): 1-15.

- [7] 刘永,郭怀成. 湖泊-流域生态系统管理研究[M]. 北京:科学出版社,2008.
Liu Y, Guo H C. Lake - watershed ecosystem management: theory and application[M]. Beijing: Science Press,2008.
- [8] 林长生,张芸. 九龙江流域环境监测与可持续发展[M]. 北京:科学出版社,2009.
Lin C S, Zhang Y. Jiulong river watershed environmental monitoring and sustainable development[M]. Beijing: Science Press,2009.
- [9] 吴炳方,罗治敏. 基于遥感信息的流域生态系统健康评价-以大宁河流域为例[J]. 长江流域资源与环境,2007,16(1):102-106.
Wu B F, Luo Z M. Ecosystem health assessment of Daminghe river basin in the three gorges reservoir based on remote sensing[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2007,16(1):102-106.
- [10] 邓红兵,王庆礼,蔡庆华. 流域生态学-新学科、新思想、新途径[J]. 应用生态学报,1998,9(4):443-449.
Deng H B, Wang Q L, Cai Q H. Watershed ecology - new discipline, new idea and new approach[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 1998,9(4):443-449.
- [11] 吴刚,蔡庆华. 流域生态学研究内容的整体表述[J]. 生态学报,1998,18(6):575-581.
Wu G, Cai Q H. Expression as a whole of research content of the watershed[J]. Acta Ecologica Sinica,1998,18(6):575-581.
- [12] 陈求稳,欧阳至云. 流域生态学及模型系统[J]. 生态学报,2005,25(5):1184-1190.
Chen Q W, Ouyang Z Y. Watershed ecology and modeling system[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005,25(5):1184-1190.
- [13] Smith M P, Schiff R, Olivero A, et al. The active river area: a conservation framework for protecting rivers and streams [R]. Boston: The Nature Conservancy,2008.
- [14] 刘佳. 九龙江河口生态系统健康评价研究[D]. 厦门:厦门大学,2008.
Liu J. Ecosystem health assessment of Jiulong river estuary[D]. Xiamen :Xiamen University,2008.
- [15] 刘捷,陈明茹,刘正华,等. 人类活动压力对福建省九龙江口-流域生态系统影响的概念模型[J]. 海洋环境科学,2011,30(3):355-360.
Liu J, Chen M R, Liu Z H, et al. Conceptual model of impacts of anthropogenic pressure on ecosystem in Jiulongjiang estuary of Fujian [J]. Marine Environmental Science,2011,30(3):355-360.
- [16] 蔡晓东. 浅议九龙江流域水土保持生态自我修复[J]. 水土保持研究,2006,13(3):169-170.
Cai X D. Discussion on the ecological self-rehabilitation of soil and water conservation in Jiulong river watershed[J]. Research of Soil and Water Conservation,2006,13(3):169-170.
- [17] 陈能汪,王龙剑,林晖,等. 九龙江流域经济发展与河流水质时空关联分析[J]. 生态与农村环境学报,2012,28(1):19-25.
Chen N W, Wang L J, Lin H, et al. A spatio-temporal correlation analysis of water quality and economic growth in the Jiulong river basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012,28(1):19-25.
- [18] 洪华生,黄金良,曹文志. 九龙江流域农业非点源污染控制与机理研究[M]. 北京:科学出版社,2008.
Hong H S, Huang J L, Cao W Z. Mechanism and control of agricultural non-point source pollution in the Jiulong river watershed[M]. Beijing: Science Press,2008.
- [19] Xie Y. Valuation of ecosystem services in the gaywood valley, norfolk [J]. Journal of Natural Science of Hunan Normal University,2011,34(1):86-94.

Assessment of ecosystem health in Jiulong river basin and measures for management

CHEN Chen^{1,2}, WANG Wen-jie¹, WANG Wei¹, ZHANG Zhe¹

(1. Institute of Environmental Information, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China;

2. School of Architecture and Urban Planning, Hunan University of Science and Technology, Xiangtan 411201, China)

Abstract: Jiulong river basin ecosystem was divided into terrestrial, riparian and aquatic ecosystems as the evaluation objects, combined with the natural conditions, socio-economic characteristics and ecological problems, the characteristics of different ecosystems structure were analyzed, function and ecological stress, the index system of watershed eco-health assessment of Jiulong river basin were constructed from the viewpoint of ecosystem's physical, chemical, and biological integrity. Using RS and GIS technologies, the sub-watershed was studied as evaluation unit, a holistic systems approach was taken to assess the health condition of watershed ecosystem. The research indicated that comprehensive index for ecological health condition of Jiulong river basin is in a fair level. The terrestrial eco-health condition is better than eco-health condition of riparian ecosystem and aquatic ecosystem. In view of spatial distribution, the upstream source area in Beixi river is in the highest level of health condition, which is better than the middle and lower reaches of Beixi river and Xixi river. Based on the primary intimidation factors of ecosystem health impairment of Jiulong river basin, the management countermeasures are put forward, which of water habitat restoration, riparian comprehensive improvement and terrestrial pollution reduction.

Key words: watershed ecosystem health; assessment; management measures; Jiulong river