

东阳江流域生态系统健康评价

吴涛¹, 解雪峰¹, 蒋国俊¹, 于海燕², 马勇²

(1. 浙江师范大学 地理与环境科学学院, 浙江 金华 321004; 2. 浙江省环境监测中心, 浙江 杭州 310015)

摘要: [目的] 通过对东阳江流域生态系统健康进行评价, 旨在为该区生态补偿体制的制订提供参考。[方法] 参考环保部《流域生态系统健康评价技术指南》, 建立水域生境结构、水生生物、水域生态压力、陆域生态格局、陆域生态功能和陆域生态压力共 6 大类 17 项评价指标, 对东阳江流域 29 个评价单元进行生态系统健康评估。[结果] (1) 东阳江流域生态健康等级处于一般及以上水平, 其中优秀、良好和一般的评价单元分别占 6%, 60% 和 34%。(2) 水域生态系统健康的主要限制因子是水质质量指数; 陆域生态系统主要限制因子为森林覆盖率、建设用地比例、重要生境保持率及水源涵养功能指数等。(3) 山地丘陵地区流域生态系统健康等级高, 平原与盆地地区健康等级低; 上游健康等级高, 中下游人口密集地区健康评价等级偏低。[结论] 东阳江流域生态系统健康等级差异的根本原因是人类活动类型及强度的地区差异, 而干流水质质量较差, 建设用地比例高, 点、面污染源排放量大是其主要的生态环境问题。

关键词: 生态系统; 健康评价; 东阳江流域

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2015)02-0326-06

中图分类号: X171, X82

Ecosystem Health Assessment of Dongyang River Basin

WU Tao¹, XIE Xuefeng¹, JIANG Guojun¹, YU Haiyan², MA Yong²

(1. College of Geography and Environmental Science, Zhejiang Normal University, Jinhua, Zhejiang 321004, China; 2. Environmental Monitoring Center of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310012, China)

Abstract: [Objective] Taking Dongyang River basin as the research area, to carry out watershed ecosystem health assessment, in order to provide conferences for decision-makings of ecological comensation system in this region. [Methods] According to technical guidelines of watershed ecosystem health assessment issued by Ministry of Environmental Protection, we set 6 evaluation categories, 17 indexes to assess the ecosystem health of 29 units in Dongyang River basin. The evaluation categories included water habitat structure, aquatic organisms, water ecological pressure, land ecological pattern, land ecological function and land ecological pressure. [Results] The project had completed the ecosystem health assessment of 29 units in Dongyang River basin. The evaluation results showed that: The ecosystem health of Dongyang River basin can be classified as excellent, good and general, accounting for 6%, 60% and 34% of the total area, respectively. The main limiting factor of aquatic ecosystems was water quality index, while land ecological limiting factors were mainly the forest coverage rate, the proportion of construction land, important habitat retention and water conservation functions. Ecosystem health was at a higher level in hilly area, and found at a lower level in plains and basins; and meanwhile, the upper stream ecosystem health level was higher, while densely-populated middle and lower reaches were at lower level. [Conclusion] It was the types and intensity of human activities that led to the regional difference of ecosystem health in Dongyang River basin. The most serious ecological environment problems in the basin listed: the poor water quality in the main stream, highly occupied proportion of construction land, point and surface sources of pollution.

Keywords: ecosystem; health assessment; Dongyang River basin

生态系统健康是指一个生态系统所具有的稳定性
性和可持续性,即在时间上具有维持其组织结构、自

我调节和对威胁的恢复能力^[1]。生态系统健康可以
通过生态系统活力、组织结构和恢复力三个特征来定

收稿日期:2014-08-18

修回日期:2014-09-19

资助项目:浙江省科技厅公益性项目“浙江省基岩淤泥质海湾围垦潜力评价技术研究”(2013C33029);浙江省新苗人才计划项目(2013R404053;2014R404058);浙江省教育厅资助项目(Y201226102)

第一作者:吴涛(1979—),男(苗族),湖南省吉首市人,博士,讲师,主要研究方向为环境生态与健康评价。E-mail:twu@zjnu.cn。

通信作者:蒋国俊(1962—),男(汉族),江苏省溧阳市人,博士,教授,主要从事环境生态与河口海岸动力方面的研究。E-mail:jgj@zjnu.cn。

义^[2]。流域作为独特的地理单元,在调节径流、涵养水源、净化水质和维持区域生态平衡等方面起着重要作用^[3]。流域生态系统健康是指流域生态系统处于良好的平衡状态,保持物理、化学及生物完整性,能为人类提供不同生态产品或服务功能,并对自然和人为干扰具有一定的自我调节和恢复能力^[4]。20 世纪 80 年代以来,国外相关部门和学者针对流域生态系统健康展开了大量研究,主要有生物完整性指数评价(index of biological integrity, IBI)^[5-6],无脊椎动物群落指数评价(invertebrate community index, ICI)^[7-8],溪流状况指数评价(stream condition index, SCI)^[9],栖息地完整性指数评价(index of habitat integrity, IHI)^[10],快速生物评价(rapid bio-assessment protocols, RBP)^[11],景观格局指数生态健康评价(landscape pattern index)^[12-13],压力—状态—响应模型(press—state—response, PSR)^[14-15]和模糊数学模型评价^[16]等。国内王备新^[17]、马陶武^[18]、李春晖^[19]等学者将生物评价指标法应用到流域生态健康评估;吴炳方^[20]、蒋卫国^[21]等将 RS 和 GIS 方法引入流域生态系统健康评价。但是,当前有关流域生态系统健康的研究仍处于起步阶段,流域生态健康评价的基本框架不统一,指标体系还有待进一步完善^[4]。本研究以中华人民共和国环境保护部印发的《流域生态健康评估技术指南(试行)》^[22]为指导,构建评价模型及指标体系,以浙江省东阳江流域为研究对象,开展流域生态系统健康评价,旨在为浙江省生态红线、生态补偿体制的制定及“五水共治”的开展提供信息决策支持。

1 研究区概况

东阳江发源于磐安县大盘山龙葱坞尖与岩坞尖之间的谷地,流经东阳、义乌两市,终于金华市金东区,河长 165.5 km,流域面积 3 378.5 km²,属钱塘江水系,为钱塘江南源二级支流金华江的干流。流域内以丘陵地形为主,约占 60% 以上,该区属亚热带季风气候,四季分明,年均温 17.2 °C,年均降水量 1 419.9 mm,植被以亚热带常绿阔叶林为主。该流域地处金华东部城镇发展与农业生态功能区,主要生态环境问题为化肥农药施用量大,农业面源污染严重;工业企业多,工业污染总量大;生活污染源(城镇与农村)排放量大。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

本次评估数据集分为数字影像数据集、监测数据

集及统计数据集。数字影像数据集包括:ETM⁺(空间分辨率 30 m×30 m),SPOT-5(空间分辨率 10 m×10 m),DEM(空间分辨率 30 m×30 m),土地利用数据库,土壤类型矢量数据库;监测数据集包括:水质断面监测数据,降水量数据,河流径流量数据,点源和面源污染物排放数据。统计数据集包括:2012 年东阳市、义乌市统计年鉴,东阳江流域调查问卷,东阳、义乌市农药、化肥普查数据,东阳、义乌市水利工程普查数据等。

2.2 研究方法

2.2.1 评价单元 流域评估单元以流域范围内的最小自然单元(集水区域)为基础,根据流域自然条件一致性和相似性特征进行最小自然单元的合并。同时,综合考虑流域自然地理单元、行政区划管理单元与流域环境管理单元的空间叠置关系及其组合的一致性。以自然地理单元为主,结合行政管理单元,并参考《重点流域水污染防治规划(2011—2015)》中控制单元的划分,评估单元大小基本与乡镇区划保持一致。一般来说,最小评估单元大小和行政区划比较一致,在边界上可能有所出入,但是在对社会经济数据统计时,按照评价单元的核心行政单元进行数据统计。

2.2.2 评价指标体系 参考环保部《流域生态健康评估技术指南(试行)》筛选评估指标共计 6 类 17 项(表 1)。其中,针对东阳江流域生活及农业污染物排放量过大,导致河流富营养化的现状,在考虑水生生物评价指标时,将对河流酸化和富营养化敏感的大型底栖动物和底栖硅藻作为评估生物,将大型底栖动物多样性综合指数和底栖硅藻综合指数作为评估指标之一。

水域生态健康评估指标主要包括生境结构、水生生物和生态压力三类,共 8 项指标;陆域生态健康评估指标主要包括生态格局、生态功能和生态压力三类,共 9 项指标。评价指标的权重决定各评价指标对流域生态系统健康的贡献状况,直接影响到评价精度,通过环保部《流域生态健康评估指南》和专家咨询法(Delphi),同时参考指标的重要性对各项指标进行权重分配(表 1)。

2.2.3 指标标准化处理 由于各项评价指标类型众多,单位各异,很难对它们的实测值进行直接对比,因此根据各指标对流域生态健康的影响的大小及相关关系,对评价指标赋予标准化分值,分值在 0~1 之间。同时参考环保部《流域健康评估指南》^[22]将评价指标的实测值进行 5 级划分(表 2)。

表 1 流域生态健康评估指标(权重)体系^[22]

评估对象	指标类型	评估指标	指标权重	指标解释
	生境结构 (0.4)	水质状况指数 C_1	0.4	流域Ⅲ类及以上等级水质监测断面数占流域全部监测断面数的比例
		枯水期径流量占同期年均径流量比例 C_2	0.3	反映流域(调洪)补枯的功能,衡量河流生态需水量的满足程度
		河道连通性 C_3	0.3	反映自然河道受人类活动(水电站、大坝等水利工程修建)的干扰情况
水域 (0.4)	水生生物 (0.3)	大型底栖动物多样性综合指数 C_4	0.4	反映河流污染状况,流域生态环境健康状况
		底栖硅藻综合指数 C_5	0.4	反映河流污染状况,流域生态环境健康状况
		特有性或指示性物种保持率 C_6	0.2	反映河流特有性、指示性物种以及珍稀濒危物种的保护状况
	生态压力 (0.3)	水资源开发利用强度 C_7	0.5	反映流域水资源的开发利用程度
		水生生境干扰指数 C_8	0.5	反映水域生境遭到人为挖砂、航运、旅游等活动破坏的影响状况
	生态格局 (0.3)	森林覆盖率 C_9	0.2	单位面积内森林的垂直投影面积所占百分比
		景观破碎度 C_{10}	0.2	反映陆域自然生态系统的完整性状况和景观格局条件
		重要生境保持率 C_{11}	0.6	河流湖库的岸带湿地面积及类型
陆域 (0.6)	生态功能 (0.3)	水源涵养功能指数 C_{12}	0.4	反映了生态系统拦蓄降水或调节河川径流量的能力
		土壤保持功能指数 C_{13}	0.3	反映流域土壤侵蚀程度
		受保护地区面积占国土面积比例 C_{14}	0.3	反映流域生态系统服务功能
	生态压力 (0.4)	建设用地比例 C_{15}	0.4	反映陆域的人为景观空间组成及格局状况
		点源污染负荷排放指数 C_{16}	0.3	反映生活和工业生产过程中排放的污染负荷对流域生态系统的压力
		面源污染负荷排放指数 C_{17}	0.3	反映农业生产和畜禽养殖过程中排放的污染负荷对流域生态系统的压力

注: C_1 = Ⅲ类及以上水质断面数占流域全部断面数的比例; C_2 = 枯水期径流量占枯水期同期年均径流量的比例; C_3 = 每 100 km 河道的闸坝个数; C_4 = 大型底栖动物分类单元数、大型底栖动物 EPT 科级分类单元比、大型底栖动物 BMWP 指数和大型底栖动物 Berger—Parker 优势度指数的算术平均和; C_5 = (标准化的 TDI 指数 + 标准化的运动型硅藻比例 + 标准化的 PTI 指数)/3; C_6 = 水域特有物种遭受人为活动破坏的影响,通过问卷赋值; C_7 = 区域工农、生活、环境等用水量占评估区域的水资源总量比值; C_8 = 水域生境遭到人为挖砂、航运、旅游等活动破坏的影响,通过问卷赋值; C_9 = 单位面积内森林的垂直投影面积所占比例; C_{10} = 森林、草地等自然植被的斑块数除以陆域的面积; C_{11} = (生态系统类型分值 × 该类型面积)/重要生境评估总面积 × 100%; C_{12} = (植被覆盖度分值 × 0.4 + 植被类型分值 × 0.4 + 不透水面积分值 × 0.2) × 100%; C_{13} = 中度及以上程度土壤侵蚀面积占陆域比例; C_{14} = 受保护区域面积占研究区内陆域总面积比例; C_{15} = 建设用地面积占流域陆域面积比例; C_{16} = 点源污染负荷排放指数 = (0.5 × 点源 COD 排放量)/点源 COD 目标排放量 + (0.5 × 点源氨氮排放量)/点源氨氮目标排放量; C_{17} = 面源污染负荷排放指数 = (0.5 × 面源 COD 排放量)/面源 COD 目标排放量 + (0.5 × 面源氨氮排放量)/面源氨氮目标排放量。

表 2 评价指标因子标准化分值及等级标准^[22]

评价指标(权重)	标准化分值(等级)					
	>80 优秀	60~80 良好	40~60 一般	20~40 较差	<20 极差	
水质状况指数	≥80	60~80	40~60	20~40	<20	
枯水期径流量占年均径流量比例	≥1.3	1.1~1.3	0.9~1.1	0.7~0.9	<0.7	
水生生境干扰指数	无	极少	部分可见	常见	严重	
河道连通性	<3	3~8	8~10	10~20	≥20	
大型底栖动物多样性综合指数	≥0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2	
底栖硅藻综合指数	≥0.8	0.6~0.8	0.4~0.6	0.2~0.4	<0.2	
水资源开发利用强度	<20	20~35	35~45	45~60	≥60	
水生生境 干扰指数	挖砂(0.4)	无	极少	部分可见	常见	严重
	航运交通或涉水旅游(0.4)	无	极少	部分可见	常见	严重
	外来物种入侵率(0.2)	大量减少	稍有减少	无变化	稍有增加	大量增加
森林覆盖率/%	山区	75	65~75	55~65	45~55	45
	丘陵区	45	35~45	25~35	15~25	15
	平原区	18	15~18	12~15	8~12	8
	高寒区/草原区	90	85~90	80~85	75~80	75
景观破碎度	<20	20~40	40~60	60~80	≥80	
重要生境保持率	≥80	60~80	40~60	20~40	<20	
水源涵养功能指数	植被覆盖度(0.4)	80~100	60~80	40~60	20~40	0~20
	植被类型(0.4)	湿地	森林、灌木	草地	耕地	其他
	不透水面积(0.2)	0~3	3~5	5~10	10~20	≥20
土壤保持功能指数	<10	10~20	20~30	30~40	≥40	
受保护国土面积比例/%	≥25	20~25	15~20	10~15	<10	
建设用地比例/%	<10	10~20	20~30	30~40	≥40	
点源污染负荷排放指数	0.5	0.5~0.9	0.9~1.1	1.1~1.5	≥1.5	
面源污染负荷排放指数	0.5	0.5~0.9	0.9~1.1	1.1~1.5	≥1.5	

2.2.4 评价模型 流域健康度(watershed health index, WHI)作为衡量一个地区生态系统健康程度的模型能够根据各评价指标数据,判断出地区生态系统健康状况,其值在 0~100 之间^[23]。

(1) 各对象层的 WHI 计算模型为:

$$WHI_i = \sum_i^n L_i \cdot W_i \quad (1)$$

式中: WHI_i ——各对象层的生态健康度; L_i ——各评价指标的标准化值; W_i ——各评价指标的权重。

(2) 流域的 WHI 计算模型为:

$$WHI = \sum_i^2 EHI_i \cdot L_i \quad (2)$$

式中: WHI ——流域生态安全度; EHI_i ——各对象层的生态安全度; L_i ——对象层的权重。

3 结果与分析

按照流域生态系统健康评价的高低,参考环保部《流域健康评估指南》,将流域生态系统健康分为优秀(80~100)、良好(60~80)、一般(40~60)、较差(20~40)和差(0~20)5 个等级,并通过 GIS 空间分析模块制成空间分布专题地图。

3.1 水域生态健康评价

通过对水生生物结构、水生生物和水域生态压力各项指标值计算分析可知,流域水域生态健康状况处于一般及以上水平,其中优秀的评价单元面积约占总评价单元的 22%,良好的评价单元面积约占总评价单元的 42%,一般评价单元约占总评价单元的 36% (图 1)。由图 1 可知,东阳江流域水域健康评价的主要限制因子为水质和水生生物,尤以市区及人类工、农业生产活动剧烈地区体现的最为明显,该区域的生活污染物和工、农业污染物的排放导致水质变差,影响了水生动物种群结构。调查发现水质为Ⅲ类以下的地区,其水生生物的评价指数一般都为较差和差。在人类活动较少的上游地区,污染物排放较少,水质一般为Ⅲ类及以上,水生生物综合评价指数较高,水域生态健康综合评价为优秀,其中以东阳江镇评价单元为代表。在人类活动较多的地区,水质质量下降,导致水生生物指标偏低,水域生态健康状况良好,如横店镇等评价单元。流经城区的干流,由于大量的生活污水和工业废水的排放,导致水质状况极差,主要是Ⅳ类和Ⅴ类水质,其水生生物种群受到严重影响,或者消失。以吴宁街道等评价单元为代表。

3.2 陆域生态健康综合评价

东阳江流域陆域生态系统健康状况总体情况稍差,无优秀评价单元,良好面积占 67%,一般面积占 31%,较差面积占 2%。在空间分布特征上,山区优于盆地,乡镇优于市区,东阳市优于义乌市(图 2)。

由于点、面源污染负荷指标的计算依靠污染物减排资料,而污染物减排资料的最小统计单元为县市,导致两个指标在乡镇级的评价中无可比性,因此不将其作为限制因子进行探讨。健康等级为优秀的单元中,如东阳江镇,各项因子得分都较高,特别是森林覆盖率、建设用地、重要生境保持率及水源涵养指数,均高于其他评价单元。健康等级为良好评价单元中,主要限制因子是重要生境保持率和水源涵养指数,如歌山镇等评价单元。在健康等级一般的评价单元中,建设用地比例过高、森林覆盖率及水源涵养指数较低成为其主要限制因子。

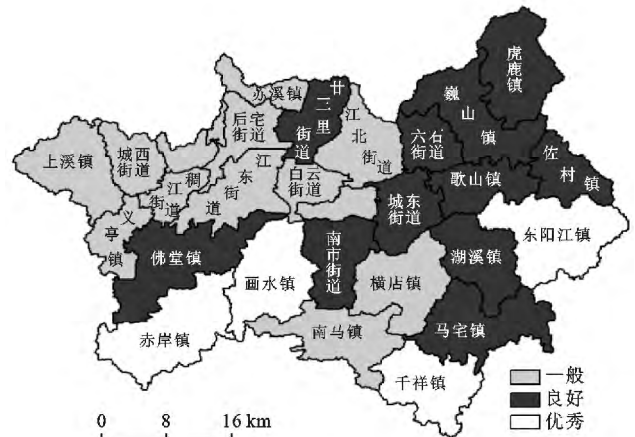


图 1 东阳江水域生态健康评价结果

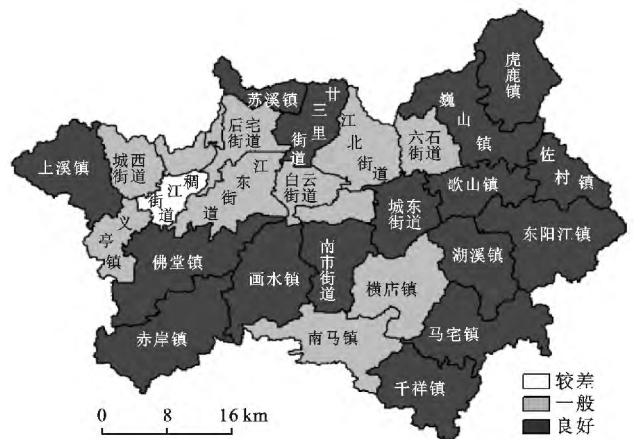


图 2 东阳江陆域生态健康评价结果

3.3 东阳江流域生态健康状况综合评价

东阳江流域生态系统健康综合评价显示(图 3),优秀的评价单元仅占 6%(东阳江镇),良好面积占 60%,一般面积占 34%。流域生态系统健康分布呈现出由上游向中下游逐级变差的趋势,在东阳市范围内从优秀逐级过渡到良好与一般,在义乌市境内从良好过渡到一般;南江流域上游横店和南马地区水域生态系统破坏严重,其评价等级为一般,低于周边各评价

单元。从流域整体分析,东阳江流域生态系统健康等级差异的根本原因在与人类活动干扰的影响。形成了山地丘陵地区健康等级高,平原与盆地地区健康等级低;上游健康等级高,中下游人口密集地区健康评价等级偏低的现状。随着城镇化发展的进一步加快,该地区的建设用地比例将可能进一步扩大,而在工、农业产值进一步增加的压力下,减排负荷指数的压力巨大,短期内东阳江流域水质指标不可能得到根本改善。而随着开发强度向上游发展的趋势,上游较健康的地区的水质和生物种群将面临更大的环境压力。

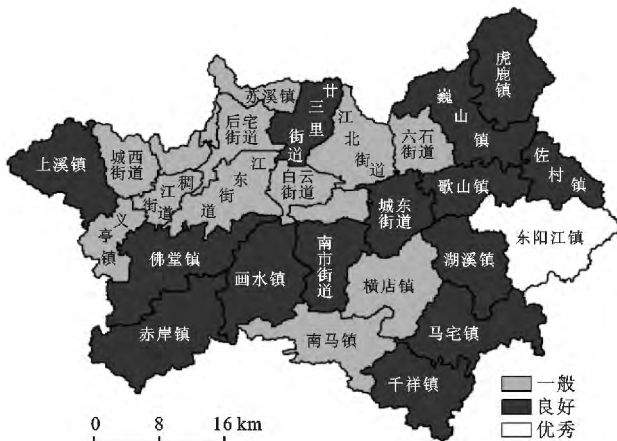


图 3 东阳江流域生态系统健康评价结果

3.4 东阳江流域生态环境问题分析

3.4.1 干流水质质量较差 东阳江流域干流直接穿过东阳市和义乌市的主要城区和乡镇,而该区均为人口密大和工业活动密集区域,每天产生的生产和生活污水量巨大。其次,虽然东阳江流域降水量较多,但是,由于各支流上游林立的大小水库截断了水系仅有的径流量,河道生态基流难以保障,致使东阳江、义乌江在枯水期基本无生态来水,在枯水期排入这些河流的污水量就是其全部的径流量。在此情况下,即使河流沿线的各排污单位全部做到达标排放,所排放的污水中污染物浓度也远高于地表水环境质量要求。

3.4.2 建设用地比例高,水源涵养能力弱 建设用地直接关系到流域的生态功能和生态压力。从 2000—2010 年土地覆被类型的转移矩阵分析发现,交通、居住地及工、矿用地面积共增加了 8 748 hm²,建设用地的速度扩张给森林、草丛、农田及水域生态系统都构成了巨大的生态压力,迫使各种生境面积降低,同时对生境的切割,加大了生境破碎化的程度,降低了生态系统的稳定性。土地硬化,改变了该区域的水、热条件,降低了洪峰汇流时间,易产生洪涝及生态灾害。

3.4.3 点、面污染源排放量大 东阳江流域水质差的主要原因在于污染物排放量大。东阳江流域 2012 年点源 COD 排放总量 2.46×10^4 t,氨氮排放总量 3 802.17 t,面源 COD 排放总量 4 009.52 t,氨氮排放总量 582.06 t,且工业废水排放量及 COD 都呈上升趋势。东阳江流域污染源以点源为主,东阳市范围内,污染物主要来自于城镇生活源和农村生活源,医药制造业、纺织业、化学原料及化学制品制造业和通信设备制造业是其重点污染行业。义乌市范围内主要来自于城镇生活源,纺织业和造纸及纸制品业是其重点污染行业。随着人口的增长和工业产值的大幅提升,东阳江流域污染负荷排放指标将面临严峻的挑战。

4 结论

(1) 东阳江流域水域生态健康状况处于一般及以上水平,其中优秀的评价单元约占总面积的 14%,良好的评价单元约占总面积的 38%,一般的评价单元约占总面积的 48%。一般来说,水域健康状况山区优于平原,农村优于城市,其主要限制因子为水质状况指数。

(2) 东阳江流域陆域生态系统健康状况总体情况表现为山区优于盆地,乡镇优于市区,东阳市优于义乌市。陆域生态限制因子主要是森林覆盖率、建设用地比例、重要生境保持率及水源涵养功能等。

(3) 东阳江流域生态系统健康等级差异的根本原因在于人类活动干扰的影响。形成了山地丘陵地区健康等级高,平原与盆地地区健康等级低;上游健康等级高,中下游人口密集地区健康评价等级偏低。

[参 考 文 献]

- [1] Rapport D J. What constitute ecosystem health? [J]. Perspectives in Biology and Medicine, 1989,33(1):120-132.
- [2] Rapport D J, Costanza R, McMichael A J. Assessing Ecosystem Health[J]. Trends in Ecology & Evolution, 1998,13(10):397.
- [3] 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,2008:106-132.
- [4] 王文杰,张哲,王维,等. 流域生态健康评价框架及其评价方法体系研究(1)[J]. 环境工程技术学报,2012,2(4):271-277.
- [5] Karr J R. Biological integrity: A long-neglected aspect of water resource management[J]. Ecological Applications, 1991,1(1):66-84.
- [6] Karr J R. Assessment of biotic integrity using fish communities[J]. Fisheries, 1981,6(6):21-27.

- [7] Deshon J E. Development and Application of the Invertebrate Community Index(ICI)[M]//Davis W S, Simon T P, eds. Biological Assessment and Criteria: Tools for Water Resource Planning and Decision Making. Boca Raton, FL: Lewis Publishers, 1995:217-243.
- [8] Ohio E P A. The Use of Biocriteria in the Ohio EPA Surface Water Monitoring and Assessment Program Columbus[R]. Columbia: Ohio Environmental Protection Agency, Ecological Assessment Section, Division of Water Quality Planning and Assessments, 1990.
- [9] Ladson A R, White L J, Doolan J A, et al. Development and testing of an index of stream condition for waterway management in Australia[J]. Fresh Water Biology, 1999,41(2):453-468.
- [10] Kleynhans C J. A qualitative procedure for the assessment of the habitat integrity status of the Luvuvhu River (Limpopo system, South Africa) [J]. Journal of Aquatic Ecosystem Health, 1996,5(1):41-54.
- [11] Plafkin J L, Barbour M T, Porter K D, et al. Rapid Bioassessment Protocols for Use in Streams and Rivers: Benthic Macroinvertebrates and Fish[M]//Washington DC: US Environmental Protection Agency, 1989.
- [12] 陈文波,肖笃宁,李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究[J]. 应用生态学报,2002,13(1):121-125.
- [13] 杨帆,赵冬至,马小峰,等. RS 和 GIS 技术在湿地景观生态研究中的应用进展[J]. 遥感技术与应用,2007,22(3):471-478.
- [14] 张松,郭怀成,盛虎,等. 河流流域生态安全综合评估方法[J]. 环境科学研究,2012,25(7):826-832.
- [15] Campbell K R, Bartell S M. Ecological Models and Ecological Risk Assessment[M] // Newman M C, eds. Risk Assessment: Logic and Measurement. Michigan: Ann Arbor Press, 1998:69-100.
- [16] 崔保山,杨志峰. 湿地学[M]. 北京:北京师范大学出版社,2006:3-15.
- [17] 王备新,杨莲芳. 用河流生物指数评价秦淮河上游水质的研究[J]. 生态学报,2003,23(10):2082-2091.
- [18] 马陶武,黄清辉,王海,等. 太湖水质评价中底栖动物综合生物指数的筛选及生物基准的确立[J]. 生态学报,2008,8(3):1192-1200.
- [19] 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.
- [20] 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.
- [21] 蒋卫国,李京,李加洪,等. 辽河三角洲湿地生态系统健康评价[J]. 生态学报,2005,25(3):408-414.
- [22] 中国环境科学研究院. 流域生态健康评估技术指南[R]. 北京:中国环境科学研究院,2013.
- [23] 解雪峰,吴涛,肖翠,等. 基于 PSR 模型的东阳江流域生态安全评价[J]. 资源科学,2014,36(8):1702-1711.

(上接第 325 页)

本研究通过对研究区不同等级石漠化区域进行实地调查,选取尚有相对丰富物种生长的无明显石漠化、潜在石漠化和轻度石漠化 3 类小区域做了详细群落结构调查和物种分析。结果表明,清香木、火棘、野花椒、葛藤等都是该地区抗逆性强的乡土物种,且均为各层优势种,具有极为重要的生态价值和经济价值。结合当地实际情况,用这些优势植物并结合引进物种山葡萄来进行石漠化山地乔灌草藤搭配的人工植被修复的物种配置,以逐渐恢复石漠化地区的生态服务功能,重建良性生态系统。

[参 考 文 献]

- [1] 陈志辉,徐旌,张卓亚. 文山州石漠化状况及成因分析[J]. 林业调查规划,2008,33(1):70-73.
- [2] 童立强,丁富海. 西南岩溶石山地区石漠化遥感调查研究[C]//中国地质调查局. 中国岩溶地下水与石漠化研究论文集. 广西南宁:广西科技出版社,2003:36-45.
- [3] 蔡运龙. 中国西南喀斯特区的生态重建与农林牧发展:研究现状与趋势[J]. 资源科学,1999,21(5):37-41.
- [4] Yuan Daoxian. Rocky desertification in the subtropical karst of south China[J]. Zeitschrift für Geomorphologie, 1997,12(2):108.
- [5] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展,1997,19(5):41-43.
- [6] 周德全,王世,张殿. 关于喀斯特石漠化研究问题的探讨[J]. 矿物岩石地球化学通报,2003,22(2):127-132.
- [7] 胡扬. 砚山林业发展刍议[J]. 内蒙古林业调查设计,2008,31(3):122-124.
- [8] 宋维峰. 我国石漠化现状及其防治综述[J]. 中国水土保持科学,2007,5(5):102-106.
- [9] 盛连喜,冯江,王妮. 环境生态学导论[M]. 北京:高等教育出版社,2009:116-117.
- [10] 赵敏慧,杨礼攀,杨中宝,等. 抚仙湖流域磷矿开采废弃地恢复云南松群落的物种配置研究[J]. 林业实用技术 2010,98(2):3-6.