

控制单元水环境受损综合诊断方法研究

柴淼瑞^{1,2}, 雷坤¹, 乔飞¹, 富国¹, 肖静¹, 王旭东²

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 西安建筑科技大学 环境与市政工程学院, 西安 710552)

摘要: 控制单元水环境受损诊断是控制单元水质目标管理的基础工作。为全面、客观地评价控制单元水环境问题, 提出了分类分级综合指标评价法, 对控制单元的水质、物理生境、生物生态受损程度进行综合评估。首先, 根据水环境受损类型将评价指标划分为化学、物理、生物三类; 其次, 采用专家打分法确定系统指标权重, 利用多级递进百分制量化指标分值; 最后, 利用综合得分评价控制单元水体受损类型和受损程度, 受损程度可依据综合得分划分为几乎未受损、轻度受损、中度受损、中重度受损、重度受损五个等级。以大辽河控制单元为例, 对控制单元水环境受损状况进行诊断分析, 结果表明该河段受损类型属物理损害和生物损害, 且水体耗氧类污染较重, 综合受损程度为轻度受损。

关键词: 控制单元; 水环境受损诊断; 分类分级综合指标评价法; 大辽河

中图分类号: X501 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)02-0257-06

Comprehensive diagnosis method of water environment damage of control unit

CHAI Miaorui^{1,2}, LEI Kun¹, QIAO Fei¹, FU Guo¹, XIAO Jing¹, WANG Xudong²

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Xi'an University

of Architecture and Technology, School of Environmental and Municipal Engineering, Xi'an 710552, China)

Abstract: The water environmental damage diagnosis of control unit is the basis of the water quality target management of control unit. In order to evaluate the water environment of control unit comprehensively, the classification and grading comprehensive index evaluation method was proposed to evaluate the water quality, physical habitat, and ecological damage of control unit. First, the water environment damage types were divided into chemical damage, physical damage, and biological damage. Second, the expert scoring method was used to determine the index weight, and the multistage progressive centesimal system was used to quantify the comprehensive score index. Finally, based on the comprehensive score, the damage type and damage degree of control unit were evaluated, and the damage degree can be divided into no damage, slight damage, moderate damage, moderately severe damaged, and severely damaged. The method was applied to evaluate the water environment damage in the control unit in the Daliao River, which suggested that the damage types are physical and biological damages, the oxygen consumption pollution is heavy, and the comprehensive damage degree is slight.

Key words: control unit; water environmental damage diagnosis; classification and grading comprehensive index system; Daliao River

控制单元是流域水质目标管理的基本单位, 是将复杂的流域按照一定的原则划分为既独立又联系的单元, 便于对不同类型水体进行分类管理^[1-3]。控制单元水环境受损诊断是利用水环境诊断方法, 对控制单元水环境问题的受损类型、受损程度进行分析和评价, 明确水环境存在的主要问题。目前我国水环境问题诊断多从水质^[4-5]、污染源^[6-7]、物理水文

条件^[8-9]、生态完整性^[10]等方面单独评价, 评价结果往往存在片面性, 常出现对同一条河流环境评价结果不一致或水质级别与功能使用不相符的现象^[11-12]。美国环境与水资源研究所环境水利技术委员会提出: 环境水力研究应着重将物理因素(水动力学、泥沙输移和地形条件)、化学因素(保守与非保守物质的传输、反应动力学和水质)和生物因素(生态

收稿日期: 2014-05-12 修回日期: 2014-11-10 网络出版时间: 2014-03-18

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20150318.1412.004.html>

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2012ZX07503-002; 2013ZX0750F-005)

作者简介: 柴淼瑞(1987-), 女, 陕西府谷人, 主要从事流域水环境、水生态问题研究。E-mail: chaimiaorui@sina.com

通讯作者: 乔飞(1977-), 男, 陕西合阳人, 高级工程师, 博士, 主要从事流域水环境管理方面的研究。E-mail: qiaofei@craes.org.cn

学) 作为一个系统来进行研究。

因此, 水环境问题诊断应综合水体的水质化学状况、物理生境状况、生物生态状况, 分别确立相应的评价指标和指标权重, 得出多指标评价结果后经权重计算进入上一层级, 自下而上分层计算得分, 最终得分以“高分为优、低分为劣”原则分为五个评价等级, 以此对水环境受损情况进行综合分析和诊断。多指标综合评价能够更加客观、全面地反映控制单元水环境的问题所在, 从而增强决策制定的针对性。

1 控制单元水环境受损诊断内容分析及体系构建

从控制单元水环境的化学性质、物理性质、生物性质完整性角度考虑, 将控制单元水环境问题诊断内容划分为 3 类指标: 化学指标、物理指标、生物指标。

1.1 化学指标

化学指标是指根据水体化学性质制定的多项水质监测指标。控制单元水环境受损状况化学评价指标分为 7 大类(表 1), 其中耗氧类、营养盐类、重金属类、有机有毒类、酸碱度类为评价指标, 无机有毒类和细菌类为参考指标。

表 1 控制单元水环境受损诊断化学评价指标

Tab. 1 The chemical evaluation indexes for the water environment damage diagnosis of control unite

项目	指标
耗氧类	DO、COD、BOD、NH ₃ -N
营养盐类	TN(仅水库)、TP
重金属类	Hg、Pb、Cu、Zn、As、Cd、Cr
有机有毒类	挥发酚、石油
酸碱度类	pH
无机有毒类	氰化物、氟化物
细菌类	细菌

1.2 物理指标

物理指标是表征水体物理生境状况的因子, 并非水体污染本身, 如河流形状、流态、泥沙含量、河流自然栖息地等^[16]。河流物理因子变化导致的影响往往具有间接性和潜伏性, 如水量的减少使栖息地面积减少、水生生物生存空间缩小, 缓慢的水流抑制了污染物的稀释、输移、转化, 水体的滞留增加湖泊富营养化形成的风险; 水体泥沙可能造成底泥淤积、悬移物质扩散减缓, 水中携带污染物的泥沙有时发生污染物二次释放, 形成水底面源污染, 且含沙量的增大会导致水体复氧条件降低、耗氧有机物降解减慢, 易造成泥沙堆积影响河流生态环境。泥沙含量的变化也会影响部分生物的生存环境, 导致物种种类和数量受到损害。

因此, 水量和含沙量是影响水体环境的重要物理因素。考虑指标数据的可获得性, 选取对河道影响较大、且较好量化的河流稳态设计流量和含沙量作为评价指标。

1.3 生物指标

在美国、英国和澳大利亚等国家, 水生生物评价被作为水环境管理的重要依据^[17]。有研究提出^[18], 当不同污染因子共同作用于生物和人的机体时, 可能产生相加、相乘、拮抗等作用, 使生命受害程度加重或减轻。相对于理化指标, 生

物学指标更能反映不同尺度及各类环境压力的综合效应。

水生物在水体中的丰富度、多样性、均匀度、耐污性及敏感类群的比例都可以反映水质的优劣及变化情况, 其中物种丰富度指数和多样性指数因计算简便而被广泛应用。浮游植物的生长繁殖易受到水体无机环境的影响, 其丰富度直接反映水体生产力水平; 浮游动物则具备在水体中种类分布广、个体生活周期短、具有急性毒性、反应快等特点, 被认为是较理想的水生态评价指标^[19]; 底栖大型无脊椎动物生存地域性强、活动性小、对外界胁迫响应比较敏感, 适宜耐污性研究^[19-21], 适合作为生物评价指标。

综上, 选取浮游生物和底栖生物的生物多样性指数作为评价指标。

1.4 指标体系

控制单元水环境受损诊断评价指标体系从上到下按层级分为目标层、影响因素层、指标层, 目标层为水环境受损诊断综合得分, 影响因素层包括化学类、物理类、生物类三方面, 指标层为所涉评价因子。具体层次结构与权重见表 2。

表 2 控制单元水环境受损诊断指标体系

Tab. 2 The water environment damage diagnosis index system of control unit

目标层	影响因素层		指标层	
	因素	权重(W_i)	指标	权重(W_{ii})
水环境 诊断 综合 指数	化学类	W_1	耗氧类	W_{11}
			营养盐类	W_{12}
			重金属类	W_{13}
			有机有毒类	W_{14}
			酸碱度类	W_{15}
	物理类	W_2	河流稳态设计流量	W_{21}
			含沙量	W_{22}
			浮游植物	W_{31}
	生物类	W_3	浮游动物	W_{32}
			底栖生物	W_{33}

2 控制单元水环境受损诊断指标计算方法

2.1 化学类

对于化学类指标, 计算综合污染指数, 污染指数大于 1 时水体为受损水体, 小于 1 时为未受损水体。计算方法可参考环境影响评价技术方法的污染指数计算, 分别按一般水质因子(随浓度增加而水质变差的水质因子)和特殊水质因子(溶解氧和 pH)进行计算。

化学类 5 类评价指标共 100 分, 每类总分赋值为 20 分, 其得分计算公式如下:

$$y = \begin{cases} 20 & 0 < x \leq 0.5 \\ -13.333x + 26.667 & 0.5 < x \leq 2 \\ 0 & 2 < x \end{cases} \quad (1)$$

式中: x 为分类综合污染指数; y 为各指标得分。

则化学类指标综合得分为

$$P_{化} = \sum_{i=1}^n y_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (2)$$

式中: $P_{化}$ 为化学类综合得分; y_i 为化学类各单项得分。

2.2 物理类

物理类指标主要计算河流稳态设计流量和含沙量 2 项。

(1) 河流稳态设计流量计算及评价。

根据控制单元对应水文站历史数据,从生物对环境适应的稳定性考虑,将断面近十年和前十年河流稳态设计流量指标进行对比。每项指标赋予一定分值,共 100 分,通过前后十年各项指标的比值,得到近十年分值。具体计算公式如下:

$$P_{\text{流}} = \sum_{i=1}^n \frac{Q_i}{Q_0} P_i \quad (i=1, 2, \dots, n), (\frac{Q_i}{Q_0} = \xi) \quad (3)$$

其中,

$$\xi = \begin{cases} \xi & \frac{Q_i}{Q_0} < 1 \\ 1, & \frac{Q_i}{Q_0} \geq 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: $P_{\text{流}}$ 为物理类得分; Q_0 为背景平均流量值; Q_i 为评价期平均流量值; P_i 为单项总分赋值。

河流稳态设计流量指标^[22]具体见表 3。

(2) 含沙量计算及评价。

从生境的稳定性考虑,含沙量-流量趋势线产生变化即

表 3 控制单元河流稳态设计流量及评价分值

Tab. 3 The stable design flow and evaluation score of control unit

河流稳态设计流量			单项分值	合计总分
设计流量名称	代码	意义		
调和平均流量 Bx Qhy	30B3	生物安全传统污染物设计稀释流量	20	100
	4B3	生物安全毒性物质设计稀释流量	15	
极端算术平均流量 Hx Qay	30Q5	人类健康-非致癌物质设计稀释流量	15	
几何平均流量 Bx Qgy	30G5	细菌类稀释流量	10	
多年日流量调和平均 Qh	长期	人类健康-致癌物质设计稀释流量	15	
多年日流量算术平均 Qa(ADF)	长期	水资源量指标	10	
最小生态流量 QeT ennant 法(10% Qa)	30	生态安全最小流量	15	

代表环境受到了影响。可根据前十年平均数据与近十年平均数据的变化进行计算,得出现状得分。评价指标可采用输沙率或其他表征泥沙-流量关系的指标。设其总分为 100 分,则得分计算公式如下:

$$P_{\text{沙单}} = \begin{cases} \xi \times 100 & \xi \leq 1 \\ 0 & \xi > 1 \end{cases} \quad (\xi = 1 - \frac{|c_{sa} - c_{sb}|}{c_{sa}}) \quad (5)$$

式中: c_{sa} 为前十年评价指标值; c_{sb} 为近十年评价指标值。

$$P_{\text{沙总}} = \bar{P} \quad (6)$$

式中: \bar{P} 为丰、平、枯三个时期的平均值

物理类综合得分为

$$P_{\text{物}} = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (7)$$

式中: $P_{\text{物}}$ 为物理类综合得分; w_i 为单项评价指标权重; P_i 为单项评价指标得分。

2.3 生物类

对于生物类指标,分别针对浮游植物、浮游动物、底栖生物计算生物丰富度指数、均匀度指数和生物指数。可根据实际情况,采用 Margalef 丰富度指数^[23]、Shannon Wiener 多样性指数^[12]、Pielou 均匀性指数^[24],生物指数^[25]等方法进行计算评价,计算方法见表 4。

表 4 控制单元水环境受损诊断生物评价计算方法

Tab. 4 The biological evaluation method of water environment damage diagnosis of control unit

名称	计算公式	备注
Margalef 丰富度指数	$D = (S - 1) / \ln N$	D 为丰富度指数,反映环境中物种数目的多少; S 为群落中的总物种数; N 为观察到的总物种数
Shannon Wiener 多样性指数	$H' = - \sum_{i=1} P_i \log P_i$	P_i 为采样点第 i 种生物个体数占该生物总数的比率, $P_i = n_i / N$, \log 的底数可以取 2、e、10
Pielou 均匀度指数	$J = H' / H_{\max}, H_{\max} = \log_2 S$	H' 为 Shannon Wiener 多样性指数; S 为群落中的总物种数。
生物指数	$BI = \sum_{i=1} n_i a_i / N$	S 为总物种数, N 为所有种的个体总数, n_i 为第 i 科的个体数; a_i 为第 i 科的耐污值

常用生物多样性指数分级标准^[26]及得分计算方法见表

过 100 分按满分计算。

5. 式中 H' 为生物多样性指数, y 为生物类评价得分,得分超

生物类综合得分为

表 5 生物多样性指数分级标准及得分计算方法

Tab. 5 The classification and scoring method of the biodiversity index

多样性指数 H'			丰富度指数 D			均匀度指数 J		
H' 值	分级	得分或计算公式	D 值	分级	得分或计算公式	J 值	分级	得分或计算公式
> 3.0	清洁	100	> 3.5	清洁	100	1	清洁	100
2.0~ 3.0	轻污染	$y = 30H'$	2.5~ 3.5	轻污染	$y = 25.8D$	0 < J < 1	轻污染	$y = 100J$
1.0~ 2.0	中污染	$(0 < H' < 3.0)$	2.0~ 2.5	中污染	$(1 < D < 3.5)$		至重污染	$(0 < J < 1)$
0~ 1.0	重污染		1.0~ 2.0	重污染			之间	
0	严重污染	0	< 1.0	严重污染	0	0	严重污染	0

$$P_{生} = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (8)$$

式中: $P_{生}$ 为生物类综合得分; w_i 为单项评价指标权重; P_i 为单项评价指标得分。

2.4 综合评价

控制单元水环境受损诊断综合评价得分是各指标层及影响因素层加权得到综合评价分数, 满分共 100 分。具体计算公式如下:

$$P_{综} = \sum_{i=1}^n w_i P_i \quad (i=1, 2, \dots, n) \quad (9)$$

式中: $P_{综}$ 为综合评价得分; w_i 为各类评价指标权重; P_i 为各类评价指标得分。

根据受损得分划分受损程度, 即: 1~20 分为重度受损, 20~40 分为中重度受损, 40~60 分为中度受损, 60~80 分为轻度受损, 80~100 分为几乎未受损。

3 实例应用

本文以大辽河干流三岔河断面为例, 进行水环境受损综合诊断和分析, 采用的数据系列长度为 1990 年-2009 年。

3.1 大辽河控制单元基本概况

大辽河属于辽河水系, 水资源量约为 78.45 亿 m^3 , 全段为感潮河段, 大潮可上溯至三岔河以上, 上游流域水系主要由浑河、太子河和大辽河河段(从三岔河至入海口)以及沿程汇入的蒲河、苏子河、北沙河、汤河、海城河、细河等大小支流组成(图 1)。

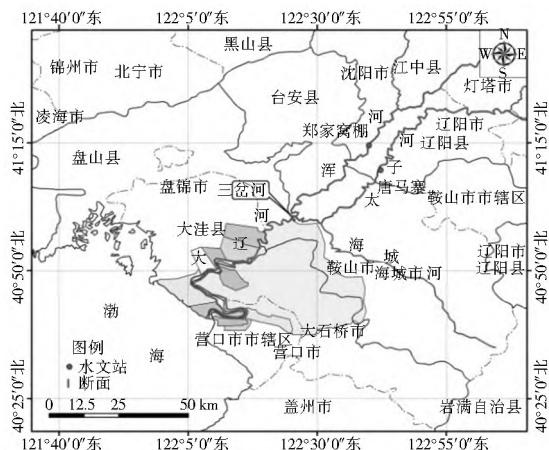


图 1 大辽河水系

Fig. 1 The drainage map of Daliao River

3.2 大辽河控制单元水环境受损诊断

3.2.1 化学指标计算

根据 2008 年水质监测资料计算, 大辽河各污染物分类综合污染指数为: 耗氧类综合指数 1.93(氨氮污染指数、高锰酸盐指数污染指数、化学需氧量污染指数三项平均值); 营养盐类 0.5(总磷污染指数); 重金属类 0.05(总砷污染指数、总汞污染指数、总镉污染指数、总铅污染指数、总铜污染指数五项平均值); 有机有毒类 0.49(挥发酚污染指数、石油类污染指数两项均值); 酸碱度类 0.5(pH 污染指数)。

图 2 显示 2003 年-2008 年, 耗氧类污染指数最高, 呈逐年下降趋势, 但仍处于超标状态, 营养盐类和有机有毒类污染指数也呈下降趋势, 2006 年以后污染指数小于 1, 酸碱度和重金属指数近年基本呈稳定状态。根据式(2)计算得出

$$P_{化} = \sum_{i=1}^n y_i = y_{耗} + y_{营} + y_{重} + y_{有} + y_{酸} = 80.93$$

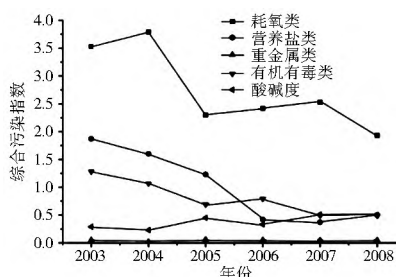


图 2 三岔河 2003 年-2008 年各污染物分类综合污染指数变化

Fig. 2 Variations of comprehensive pollution indexes of each pollutant in the Sancha River from 2003 to 2008

3.2.2 物理指标计算

(1) 稳态设计流量指标计算。

将大辽河上游那家窝棚水文站和唐马寨水文站两个水文站 1990 年-1999 年稳态设计流量指标作为背景值, 对前后十年各项指标的比值进行近十年稳态设计流量的受损情况分析, 结果见表 6。近十年合计得分为 77.44。

(2) 含沙量指标计算。

由于大辽河上游由浑河和太子河汇合而成, 汇合后无实测含沙量, 故采用合计输沙率反映大辽河的输沙情况。通过对 1990 年-1999 年、2000 年-2009 年两个阶段丰、平、枯期流量和含沙量变化情况进行分析, 发现 2000 年-2009 年枯水期和平水期平均输沙率较 1990 年-1999 年分别增加了

表 6 大辽河流稳态设计流量评价得分

Tab. 6 The stable design flow evaluation scores in the Daliao River

河流稳态设计流量	调和平均流量 BxQhy			几何平均流量 BxQgy	多年日流量调和平均 Qh	多年日流量几何平均 Ql	最小生态流量 QeTennant 法(10% Qa)
	30B3	4B3	4B2	30G5	长期	长期	30.00
单项分值	20	10	15	10	20	10	15
1990 年-1999 年(背景)	19.79	11.21	12.29	20.12	55.79	75.69	5.58
2000 年-2009 年	15.50	4.71	8.01	17.57	48.67	64.59	4.87
近十年/前十年(\bar{x})	0.78	0.42	0.65	0.87	0.87	0.85	0.87
近十年得分	15.66	4.21	9.77	8.73	17.45	8.53	13.09

57.3% 和 9.7%, 而丰水期则减少了约 18.2%。这可能与河流上游水工闸坝在丰水期蓄水、枯水期和平水期泄水有关。

根据式(5)、式(6), 分别计算丰水期、平水期、枯水期输沙率变化指数的平均值, 最终得到含沙量指标得分为 71.56 分。

(3) 物理类综合得分。 = 75.09

本文赋予设计流量指标和含沙量指标权重分别为 0.6 和 0.4。根据式(7) 计算得出

$$P_{物} = 0.6 \times P_{流} + 0.4 \times P_{沙} = 0.6 \times 77.44 + 0.4 \times 71.56$$

3.2.3 生物指标计算

2009 年 5 月和 9 月在三岔河至大辽河入海口布设 16 个调查点进行监测, 利用调查数据计算生物评价指标, 结果见表 7。

表 7 大辽河生物类指标计算

Tab. 7 The calculation of biological indexes in the Daliao River

项目	5 月			9 月		
	多样性指数	均匀性指数	丰富度指数	多样性指数	均匀性指数	丰富度指数
浮游植物	2.5~ 3.9	0.7~ 0.9	1.90~ 3.52			
浮游动物	0.5~ 2.57	0.346~ 0.921	0.53~ 1.856	1~ 2.3	0.33~ 0.91	0.43~ 1.72
底栖生物	0.19~ 1.33	0.12~ 0.92		0.811~ 1.995	0.305~ 1	

赋予浮游植物、浮游动物、底栖生物的权重分别为: 0.2、0.4、0.4。根据式(8) 计算得出

$$P_{生} = \sum_{i=1}^n w_i P_i = 0.2 \times P_{浮植} + 0.4 \times P_{浮动} + 0.4 \times P_{底} = 49.81$$

3.2.4 综合计算

根据公式(9) 计算, 得到大辽河水环境受损情况的综合得分, 结果见表 8。

表 8 大辽河水环境受损诊断计算结果

Tab. 8 The water environment damage diagnosis results in the Daliao River

目标层		影响因素层			指标层					
目标得分	受损程度	因素	权重(W_i)	因素得分	受损程度	指标	权重(W_{ii})	对应指数	指标得分	
环境 受损 诊断 综合 指数	64.20	轻度受损	化学类	0.3	80.93	几乎未受损	耗氧类		1.93	0.93
							营养盐类		0.5	20
							重金属类		0.05	20
							有机有毒类		0.49	20
							酸碱度类		0.5	20
			物理类	0.2	75.09	轻度受损	河流稳态设计流量	0.6		79.23
							含沙量	0.4		71
生物类	0.5	49.81	中度受损	浮游植物	0.2	2.5~ 3.9	96.88			
				浮游动物	0.4	0.5~ 2.57	52.88			
				底栖生物	0.4	0.19~ 1.33	23.21			

3.3 控制单元水环境受损诊断分析

从大辽河控制单元三岔口断面水环境受损指标状况得出, 水环境受损类型主要为物理受损和生物受损, 化学受损处于轻度、非营养盐类受损。

化学受损主要损害因子为氨氮, 而重金属类、有机有毒类及酸碱度类则属于正常状态。氨氮等耗氧类化学受损导致河流和河口区发生低氧现象, 继而影响到河口生态平衡。

大辽河稳态设计流量相较前十年均有所下降, 河流稀释容量有所降低, 对水环境有一定的影响, 这可能与近年来上游流域用水量较大、入海径流量减少有很大关系。输沙率在丰水期减少, 在枯水期和平水期有所增加, 由于泥沙会发生沉降、再悬浮过程, 并与营养盐之间存在吸附、解析作用, 枯水期泥沙输送量增大会增加河床与水体、泥沙与水体之间的物质交换, 导致枯水期水质变差。

生物受损比较严重, 浮游动物和底栖动物的各项指数均较低。各个站位春季(5 月份) 浮游植物群落多样性指数与丰富度指数变化趋势基本相同, 河口区指数较高。浮游动物群落两个季节各站点多样性指数均无明显变化趋势, 底栖生物各指数变化也不明显。浮游生物多样性指数显示大辽河处于中度受损状态; 底栖生物多样性指数显示河段处于中度、重度受损状态。总体来看, 大辽河生态健康状况较差, 大量

敏感物种消失。引起物种消失的主要原因可能是耗氧类物质污染或者非污染损害造成的生物生境受损所致。

4 结论

控制单元水环境受损诊断秉承“分类、分级”评价的理念, 遵循“化学完整性、物理完整性、生物完整性”水环境管理思想, 从化学、物理、生物三方面对控制单元水环境受损情况进行分析诊断。

在评价过程中, 首先将水环境问题进行分类, 然后对每类受损类型选取特征评价因子, 最后选用一定的计量方法确定每类受损因子的受损得分。评价过程采用多级递进百分制结合权重法对指标进行计算, 并将指标计算结果分为 5 个受损等级, 不同的指标得分代表相应受损等级, 从而对水环境受损情况形成一个较为全面的诊断结果。

以大辽河控制单元为例, 进行水环境受损诊断, 结果表明大辽河化学基本未受损, 物理轻度受损, 生物中度受损, 这一结果基本反映了大辽河的实际情况。

参考文献(References):

[1] 王东, 王雅竹, 谢阳村, 等. 面向流域水环境管理的控制单元划分技术与应用[J]. 应用基础与工程科学学报, 2012, 20(z1): 30-37. (WANG Dong, WANG Ya zhu, XIE Yang cun, et al. M et h

- ology and its application of control unit division served for watershed environment management [J]. *Journal of Basic Science and Engineering*, 2012, 20(21): 30-37. (in Chinese)
- [2] 雷坤, 孟伟, 乔飞, 等. 控制单元水质目标管理技术及应用案例研究[J]. *中国工程科学*, 2013 (3): 62-69. (LEI Kun, MENG Wei, QIAO Fei, et al. Study and application of the technology on water quality target management for control unit[J]. *Engineering Science*, 2013 (3): 62-69. (in Chinese))
- [3] 孟伟, 张楠, 张远, 等. 流域水质目标管理技术研究(Ⅱ)—控制单元的总量控制技术[J]. *环境科学研究*, 2007 (4): 1-8. (MENG Wei, ZHANG Nan, ZHANG Yuan, et al. The study on technique of basin water quality target management I: Pollutant total amount control technique in control unit[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2007 (4): 1-8. (in Chinese))
- [4] 代堂刚, 宋昭义. 横江流域水环境质量综合评价方法探讨[J]. *水资源保护*, 2010, 26(6): 66-69. (DAI Tang gang, SONG Zhao yi. Discussion on comprehensive evaluation method for basin water environment quality: A case study of Hengjiang River Basin[J]. *Water Resources Protection*, 2010, 26(6): 66-69. (in Chinese))
- [5] 张涛, 张宁红, 司蔚. 河流水质评价方法研究以太湖流域为例[J]. *三峡环境与生态*, 2010, 32(3): 5-7. (ZHANG Tao, ZHANG Ning hong, SI Wei Study on appraisal method for water quality of rivers A case study on Tai Lake Basin[J]. *Environment and Ecology in the Three Gorges*, 2010, 32(3): 5-7. (in Chinese))
- [6] Zhang Yuan, Guo Fu, Meng Wei, et al. Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods [J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2009, 152(1-4): 105-121.
- [7] 尹维翰, 齐衍萍, 樊晓杰. 渤海生态环境状况及污染源结构诊断[J]. *科技创新与应用*, 2012 (29): 113. (YI Wei han, QI Heng ping, FAN Xiao jie. Technology innovation and application[J]. *Technology Innovation and Application*, 2012 (29): 113. (in Chinese))
- [8] 严登华, 何岩, 王浩, 等. 生态水文过程对水环境影响研究述评[J]. *水科学进展*, 2005, 16(5): 747-752. (YAN Deng-hua, HE yan., WANG hao, et al. Review of effect of the ecohydrological process on water environment[J]. *Advances in Water Science*, 2005, 16(5): 747-752. (in Chinese))
- [9] 赵旭, 裕振, 刘丽萍. 湿地保护区水环境影响评价方法及其应用[J]. *勘察科学技术*, 2008 (1): 30-32, 61. (ZHAO Xu, YU Zhen, LIU Li ping. Evaluation method of water environment in wetland reserve and its application [J]. *Site Investigation Science and Technology*, 2008(1): 30-32, 61. (in Chinese.))
- [10] 吕晋. 武汉市浅水湖泊生态系统结构及其分类研究[D]. 华中科技大学, 2005. (LV Jin. Research on the shallow lake ecosystem structure and classification of Wuhan City[D]. Huazhong university of science and technology, 2005. (in Chinese))
- [11] 蒋兴华, 梁德华. 综合污染指数评价与水质类别判定的关系[J]. *中国环境监测*, 1999, 15(6): 46-48. (JIANG Huo hua, LIANG De hua. The relationship between comprehensive pollution index assessment and water quality type distinguishing. [J]. *Environmental Monitoring in China*, 1999, 15(6): 46-48. (in Chinese))
- [12] 张景平, 黄小平, 江志坚, 等. 珠江口海域污染的水质综合污染指数和生物多样性指数评价[J]. *热带海洋学报*, 2010, 29(1): 69-76. (ZHANG Jing ping, HUANG Xiao ping, JIANG Zhi jian, et al. Assessment of the Pearl River Estuary pollution by water comprehensive pollution index and biodiversity index[J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2010, 29 (1): 69-76. (in Chinese))
- [13] 廖岳华, 樊娟, 陈世雄, 等. 我国地表水环境质量评价存在的问题与建议[J]. *安全与环境工程*, 2010, 17(3): 55-58, 63. (LIAO Yue hua, FAN Juan, CHEN Shi xiong, et al. Consideration on problems and suggestions of surface water environmental quality assessment in China[J]. *Safety and Environmental Engineering*, 2010, 17(3): 55-58, 63. (in Chinese))
- [14] 孙剑辉, 柴艳, 王国良, 等. 黄河泥沙对水质的影响研究进展[J]. *泥沙研究*, 2010, (1): 72-80. (SUN Jian hui, CHAI Yan, WANG Guo liang, et al. Review on effects of sediment on the water quality of the Yellow River[J]. *Journal of Sediment Research*, 2010, (1): 72-80. (in Chinese))
- [15] Gergel S E, Turner M G, Miller J R, et al. Landscape indicators of human impacts to riverine systems[J]. *Aquatic Sciences*, 2002, 64(2): 118-128.
- [16] Maddock I. The importance of physical habitat assessment for evaluating river health[J]. *Freshwater Biology*, 1999, 41(2): 373-391.
- [17] 吴东浩, 王备新, 张咏, 等. 底栖动物生物指数水质评价进展及在中国的应用前景[J]. *南京农业大学学报*, 2011, 34(2): 129-134. (WU Dong hao, WANG Bei xin, ZHANG Yong, et al. Advances in the use of biotic index for water quality bioassessment with benthic macroinvertebrate and its perspective in China[J]. *Journal of Nanjing Agricultural University*, 2011, 34(2): 129-134. (in Chinese))
- [18] 毛元宝. 水质监测评价中化学方法和生物方法的运用与比较[J]. *广东水利水电*, 2007 (4): 49-52. (MAO Yuan bao. Using and comparing between the chemical method and biological method of water quality monitoring and evaluation[J]. *Guangdong Water Resources and Hydropower*, 2007 (4): 49-52. (in Chinese))
- [19] 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, 28(3): 1192-1200. (MA Tao Wu, HUANG Qing Hui, WANG Hai, et al. The selection of benthic macroinvertebrate based multimetrics and preliminary establishment of biocriteria for the bioassessment of the water quality of Taihu Lake[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(3): 1192-1200. (in Chinese))
- [20] Elliott M. The analysis of macrobenthic community data[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 1994, 28(2): 62-64.
- [21] 张跃平. 江苏大型底栖无脊椎动物耐污值、BI 指数及水质生物评价研究[D]. 南京农业大学, 2006. (ZHANG Yu ping. A study on tolerance value of benthic macroinvertebrates and biotic index in Jiangsu province[D]. Nanjing Agricultural University, 2006. (in Chinese))
- [22] 桑蓉, 富国, 雷坤, 等. 水环境容量计算中设计流量的选择与应用[J]. *人民长江*, 2013 (5): 69-73. (SANG Rong, FU Guo, LEI Kun, et al. Selection and application of design flow in calculation of water environmental capacity [J]. *Yangtze River*, 2013 (5): 69-73. (in Chinese))

(下转第 342 页)

中还需要逐步揭示这些影响因素,为降排水方案的合理设计提供参考。

参考文献(References):

- [1] 韩永席,张建强,陈杰.南水北调穿漳工程基坑降排水[J].水力发电,2011,37(7):73-75.(HAN Yongxi,ZHANG Jianqiang,CHEN Jie.Foundation pit drainage in the construction of Zhanghe River crossing project of South to North Water Diversion Project[J].Water Power,2011,37(7):73-75.(in Chinese))
- [2] 刘国彬,王卫东.基坑工程手册[K].中国建筑工业出版社,2009.(LIU Guobin,WANG Weidong.Excavation Engineering Handbook[K].China Building Industry Press,2009.(in Chinese))
- [3] 薛禹群,谢春红,吴吉春.水文地质数值法存在的问题及其对策[J].地球科学进展,1996,11(5):472-474.(XUE Yurqun,XIE Chunhong,WU Jichun.Problems in hydrogeological numerical methods and its countermeasures[J].Advance in Earth Sciences,1996,11(5):472-474.(in Chinese))
- [4] JIANG Q H,DENG S S,ZHOU C B,et al.Modeling unconfined seepage flow using three dimensional numerical manifold method[J].Journal of Hydrodynamics,Ser B,2010,22(4):554-561.
- [5] LUO Z J,ZHANG Y Y,WU Y X.Finite element numerical simulation of three dimensional seepage control for deep foundation pit dewatering[J].Journal of Hydrodynamics,Ser B,2008,20(5):596-602.
- [6] WANG G H,YANG Y Y,ZHANG H,et al.Failure characteristics and its influencing factors of talus derived rock mass during open pit mining[J].Transactions of Nonferrous Metals Society of China,2013,23(2):462-471.
- [7] ZHOU N,VERMEER P A,LOU R,et al.Numerical simulation of deep foundation pit dewatering and optimization of controlling land subsidence[J].Engineering Geology,2010,114(3-4):251-260.
- [8] 杨春山,何娜,张雅宁.考虑渗流-应力耦合基坑开挖降水数值分析[J].广东工业大学学报,2013,30(4):43-48.(YANG Chunshan,HE Na,ZHANG Yanning.Numerical analysis of seepage stress coupling of deep foundation pit excavation[J].Journal of Guangdong University of Technology,2013,30(4):43-48.(in Chinese))
- [9] CHEN X X,LUO Z J,ZHOU S L.Influences of soil hydraulic and mechanical parameters on land subsidence and ground fissures caused by groundwater exploitation[J].Journal of Hydrodynamics,Ser B,2014,26(1):155-164.
- [10] WANG J,FENG B,GUO T,et al.Using partial penetrating wells and curtains to lower the water level of confined aquifer of gravel[J].Engineering Geology,2013,161:16-25.
- [11] YAO L,FENG S,MAO X,et al.Coupled effects of canal lining and multilayered soil structure on canal seepage and soil water dynamics[J].Journal of Hydrology,2012,430-431:91-102.
- [12] 孟伟,张远,渠晓东,等.河流生态调查技术方法[M].北京:科学出版社,2011:70.(MENG Wei,ZHANG Yuan,QU Xiaodong,et al.River ecological investigation methods[M].Beijing:Science Press,2011:70.(in Chinese))
- [13] 孙军,刘东艳.多样性指数在海洋浮游植物研究中的应用[J].海洋学报(中文版),2004(1):62-75.(SUN Jun,LIU Dongyan.The application of diversity indices in marine phytoplankton studies[J].Acta Oceanologica Sinica,2004(1):62-75.(in Chinese))
- [14] 耿世伟,渠晓东,张远,等.大型底栖动物生物评价指数比较与应用[J].环境科学,2012(7):2281-2287.(GENG Shirwei,QU Xiaodong,ZHANG Yuan,et al.Comparison and application of biological indices of macroinvertebrates in river health assessment[J].Environmental Science,2012(7):2281-2287.(in Chinese))
- [15] 王勇,宗亚杰,陈猛.用生物多样性指数法评价河流污染程度[J].辽宁城乡环境科技,2003(4):22-24.(WANG Yong,ZONG Yajie,CHEN Meng.Evaluation method for the biodiversity index of river pollution[J].Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology,2003(4):22-24.(in Chinese))

(上接第 262 页)