

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2012.04.010

# 西南岩溶区典型地下河流域地下水脆弱性评价

王万金 陈登齐

(贵州地质工程勘察院, 贵州 贵阳 550008)

**摘要** :以贵州省四方洞地下河为例,将影响该区地下水脆弱性的 6 个主要因素,即出露地层、地下水埋深、石漠化程度、植被覆盖率、土层厚度、岩层产状,作为评价该区地下水脆弱性的指标,对这 6 个指标实际值进行量化,用层次分析法确定各指标的权重值,建立各评价指标实际值及其权重值与地下水脆弱性的函数关系式,以量化单个点(小区域)的地下水脆弱性,最后用 Arcview3.2 的空间叠加分析功能,完成对四方洞地下河流域地下水脆弱性的评价。

**关键词** :四方洞地下河;地下水脆弱性;评价指标;层次分析法;Arcview3.2;空间叠加分析

中图分类号 :P641.8 文献标识码 :A 文章编号 :1004-6933(2012)04-0045-05

## Evaluation of frangibility of groundwater in a typical subterranean river basin in karst area of Southwest China

WANG Wan-jin, CHEN Deng-qi

(Geo-Engineering Investigation Institute of Guizhou Province, Guiyang 550008, China)

**Abstract** : A case study was conducted in the Sifangdong subterranean river, a typical subterranean river in Guizhou Province, to analyze six major factors that influence the frangibility of groundwater in this area, including the emergence stratum, bury of groundwater, stony desertification degree, vegetation fractional cover, soil thickness, and attitude of rock formation. To evaluate the frangibility of groundwater, the actual values of the six indicators were quantified first, and then the weighted values of all the indicators were determined using the analytic hierarchy process method and the frangibility of groundwater in certain areas was quantified by establishing the functional relationship between the actual and weighted values of the indicators and the frangibility of groundwater. The evaluation of the frangibility of groundwater in the Sifangdong subterranean river was conducted through spatial overlay analysis using Arcview 3.2 software.

**Key words** : Sifangdong subterranean river; frangibility of groundwater; evaluation indicator; analytic hierarchy process; Arcview 3.2; spatial overlay analysis

地下水脆弱性是指由于自然条件变化或人类活动影响,地下水遭受破坏的趋向和可能性<sup>[1-4]</sup>。对地下水环境的脆弱性进行评价,可以帮助制定地下水管理战略和方针,以最大限度地保护地下水资源。

笔者选取西南岩溶区典型的地下河流域——贵州省安龙县四方洞地下河流域进行地下水脆弱性评价。

### 1 评价指标体系的构建

四方洞地下河位于贵州省黔西南州安龙县境内,是一个岩溶地下水系统<sup>[5]</sup>,流域面积 1 290 km<sup>2</sup>,而碳酸盐岩出露面积占整个流域面积的 80.13%。岩溶地下水系统是一个独特的水循环系统,具有循环系统变异敏感度高、抗干扰能力弱、稳定性差等一系列脆弱性特征<sup>[1,6-7]</sup>。造成地下水境脆弱的原因

很多,为了能够对地下水脆弱性进行客观的评价,必须建立统一的评价指标体系,并对不同脆弱区的脆弱程度进行量化。对流域内地下水环境现状进行调查分析,并综合了相关专家及相关专业人员的意见,得出在影响岩溶石山地区地下水脆弱性的诸多因素中,出露地层、地下水埋深、石漠化程度、植被覆盖率、土层厚度、岩层产状是其中主要的影响因素,将这6项主要影响因素作为地下水脆弱性评价指标,构建地下水脆弱性评价指标体系。

a. 出露地层。出露地层通常也是该区地下水的主要含水层,作为地下水资源的载体,它本身具有的特性,如岩溶化程度、孔隙度、渗透率、导水率或有效渗透系数等,很大程度上决定了其抵抗水污染的能力。评价区的出露地层由老至新分别为:二叠系茅口组( $P_{2m}$ )、龙潭组( $P_{3l}$ )、长兴组( $P_{3c}$ )、三叠系夜郎组( $T_{1y}$ )、永宁镇组( $T_{1yn}$ )、罗楼组( $T_{2l}$ )、关岭组( $T_{2g}$ )、杨柳井组( $T_{2y}$ )、歪头组( $T_{2l}$ )、竹竿坡组( $T_{3z}$ )、赖石科组( $T_{3ls}$ )、把南组( $T_{3b}$ )、火把冲组( $T_{3h}$ )、二桥组( $T_{3e}$ )。

b. 地下水埋深。地下水埋深决定了污染物到达含水层之前传输媒介材料的深度,以及污染物与周围介质接触的时间。通常,地下水埋深越大,污染物到达含水层所需的时间越长,则污染物稀释的机会就越多。

c. 石漠化程度。石漠化导致了土地涵养水源的能力下降,人畜饮水困难,可利用耕地面积减少,土壤肥力下降,农业生产力低下,并加快了地下水系统的循环速度。石漠化严重的地区地下水系统脆弱性较高。

d. 植被覆盖率。植被覆盖程度对地下水资源的影响主要体现在大气降水及地表水的下渗速度、地下水汇流速度、含水层保水效率等<sup>[8]</sup>。植物还具有一定的污水净化功能,因此植被覆盖率高的地区含水层的脆弱性等级低。

e. 土层厚度。土壤类型和土层厚度不同,其自然降解污染物组分及污染物入渗的能力也不同,土层越厚,持水量越大,雨后滞蓄在土层及裂隙中的水以蒸发形式返回大气,因此土层越厚,含水层的脆弱性就越低。

f. 岩层产状。岩层产状为含水层固有特性,对

大气降水及地表水的下渗速度、地下水的汇流速度、含水层的保水效率都有较大影响。岩层倾角平缓的地区含水层的脆弱性等级相对较高。

## 2 评价因子实际值的量化

目前尚无统一的地下水脆弱性分级标准,没有普遍认可的地下水脆弱性评价依据。为达到定量评价地下水脆弱性的目的,就需对地下河系统各项地下水脆弱性评价指标进行量化。根据调查人员在野外的调查情况,综合相关专家及技术人员的意见,分别对各个评价指标进行评分。为计算方便,评价因子的分值取 $[1, 5]$ 之间的整数。对四方洞地下河系统地下水脆弱性各评价指标的赋值见表1。

## 3 评价指标权重的赋值

由于各评价指标体系因子在指标体系中的作用不同,对地下水脆弱性的影响程度也不相同,为了区分它们对评价系统影响的差异<sup>[9-10]</sup>,需要确定各个评价指标因子的权重。研究采用层次分析法(简称AHP)<sup>[11]</sup>来确定四方洞地下河系统地下水脆弱评价指标的权重。

a. 建立判断矩阵。根据层次分析法的比例标度及含义,综合相关专家及专业技术人员意见,对单个评价指标进行评分,建立判断矩阵A。

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 5 & 6 & 7 \\ 1/3 & 1 & 1 & 2 & 2 & 2 \\ 1/4 & 1 & 1 & 1 & 2 & 2 \\ 1/5 & 1/2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1/6 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1 & 2 \\ 1/7 & 1/2 & 1/2 & 1 & 1/2 & 1 \end{bmatrix}$$

b. 计算评价指标因子的权重(利用求和法)。

将判断矩阵A按列求和,并作归一化处理,求得矩阵B:

$$B = \begin{bmatrix} 0.48 & 0.46 & 0.50 & 0.45 & 0.48 & 0.47 \\ 0.16 & 0.15 & 0.13 & 0.18 & 0.16 & 0.13 \\ 0.12 & 0.15 & 0.13 & 0.09 & 0.16 & 0.13 \\ 0.10 & 0.08 & 0.13 & 0.09 & 0.08 & 0.07 \\ 0.08 & 0.08 & 0.06 & 0.09 & 0.08 & 0.13 \\ 0.07 & 0.08 & 0.06 & 0.09 & 0.04 & 0.07 \end{bmatrix}$$

将矩阵B按行求和得矩阵V,  $V =$

表1 对四方洞地下河系统地下水脆弱性评价指标的赋值

分值范围	出露地层	地下水埋深/m	石漠化程度	植被覆盖率/%	土层厚度/m	岩层产状( $^{\circ}$ )
1	$P_{3l}, T_{3ls}, T_{3h}, T_{3e}, T_{3b}$	—	无石漠化	> 50	> 3	—
2	$T_{1y}$	> 100	—	40~50	2~3	< 10
3	$T_{1yn}$	50~100	轻度石漠化	30~40	1~2	10~25
4	$T_{2g}, T_{2l}, T_{3z}, P_{3c}$	20~50	中度石漠化	20~30	0~1	—
5	$T_{2y}, P_{2m}$	< 20	重度石漠化	< 20	无土层	> 25

$[2.84 \ 0.91 \ 0.78 \ 0.54 \ 0.52 \ 0.41]^T$ ,再将矩阵  $V$  进行归一化处理得矩阵  $W$ ,  $W = [0.47 \ 0.15 \ 0.13 \ 0.10 \ 0.09 \ 0.07]^T$ 。矩阵  $W$  即为各评价指标因子权重:出露地层为 0.47,地下水埋深为 0.15,石漠化程度为 0.13,植被覆盖率为 0.10,土层厚度为 0.09,岩层产状为 0.07。

c. 进行一致性检验。

矩阵  $A \times W = [2.89 \ 0.93 \ 0.80 \ 0.55 \ 0.53 \ 0.41]^T$

计算判断矩阵最大特征根值  $\lambda_{\max}$  :

$$\lambda_{\max} = \frac{1}{7} \left( \frac{2.89}{0.47} + \frac{0.93}{0.15} + \frac{0.80}{0.13} + \frac{0.55}{0.10} + \frac{0.53}{0.09} + \frac{0.41}{0.07} \right) = 6.102$$

计算一致性指标  $CI$  :

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1} = \frac{6.102 - 6}{5} = 0.020$$

查找相应的平均随机一致性指标  $RI$ ,可查表得出  $n = 6$  时,  $RI = 1.24$ 。

计算一致性比例  $CR$  :

$$CR = \frac{CI}{RI} = 0.016$$

$CR < 0.1$ ,故判断矩阵  $A$  一致性好,得出的各评价指标因子权重值是较为合理的,可以运用于实际生产中。

## 4 地下水脆弱度计算公式

对四方洞地下河系统进行地下水脆弱性评价,可视为利用数学模型对一个面域做某项评价。要解决面域的评价问题,可先把面域分解为无数个点,再对这无数个点按一定的标准作出相应的评价,最后整合各个点的评价结果,得出整个面域的评价结果。

针对具体的一个点(小区域),上述 6 项评价指标在实际中均有相应的值与之对应。根据表 1 查出其单项指标对应分值,将其与各评价指标因子权重值相乘,再相加,得出一个点(小区域)脆弱性总分值<sup>[12]</sup>。其数学计算公式为

$$F = \sum_{i=1}^6 f_i k_i \quad (1)$$

式中: $F$  为一个点(小区域)脆弱性评价总分值; $f_i$  为单个评价指标的分值; $k_i$  为对应  $f_i$  的权重值。

得出单个点(小区域)的总分值后,结合各评价指标因子权重值,对  $F$  值采用加权平均法,将评价区地下水划分为低脆弱、较低脆弱、中等脆弱、较高脆弱、高脆弱 5 个等级。脆弱性评价总分值  $F$  与脆弱等级的对应关系是:低脆弱,  $F < 1.5$ ; 较低脆弱,  $1.5 < F < 2.5$ ; 中等脆弱,  $2.5 < F < 3.5$ ; 较高脆弱,  $3.5 < F < 4.5$ ; 高脆弱,  $F > 4.5$ 。

## 5 地下水脆弱度评价过程

目前地理信息系统(GIS)已具有了空间叠加分析的能力。本次评价采用简单易操作的 Arcview3.2 软件,对各评价指标进行空间叠加分析,以图示的方法得出最终的评价结果。

具体过程简述如下:

a. 用 Arcview3.2 分别制作同比例尺的各评价指标实际值分布图(图 1)。

b. 在 Arcview3.2 中输入分析函数(公式 1)进行各指标的叠加分析,得出四方洞流域地下水脆弱性评价图(图 2)。

经分析,四方洞地下河系统地下水高脆弱区面积约  $100.85 \text{ km}^2$ ,占流域面积的 7.8%,主要分布于兴仁县、李关、屯脚、普坪一带,该区出露地层主要为三叠系中统杨柳井组( $T_{2y}$ )、三叠系中统关岭组( $T_{2g}$ ),石漠化严重,植被覆盖率低,地下水较高脆弱区面积约  $587.3 \text{ km}^2$ ,占流域面积的 45.5%,主要分布于安龙县、钱相、笃山及交乐、海子一带,该区出露地层主要为三叠系下统永宁镇组( $T_{1yn}$ )、三叠系中统关岭组( $T_{2g}$ ),主要为中度石漠化分布区,植被覆盖率较低,脆弱性较低及低的区域主要为植被覆盖较好、土层厚度大的洒雨地区及碎屑岩分布区域。

## 6 污染现状与脆弱性分区对比分析

2011 年 1 月,在四方洞地下河流域内取地表水样 6 组、地下水样 12 组,并整合当地水环境监测部门资料,综合分析四方洞流域地表水和地下水的水质现状,再结合上述地下水脆弱性分区,四方洞流域地下水、地表水污染现状与地下水脆弱性分区对照图作出(图 3)。

由图 3 可以看出,四方洞地下河流域内主要污染源(煤矿、金矿)多分布于地下水脆弱性较低或低的区域,这些区域的地下水未受明显污染,但地表水体污染严重。受污染的地表水流经地下水脆弱度等级较高的中下游地区,通过裂隙、落水洞、地下河入口等进入高脆弱区的地下水系统<sup>[13-14]</sup>,对流域北部、中部地区的地下水造成严重的污染。经水质化验表明,兴仁县至李关乡一带 3 个水文钻孔的水质为 III 类水质,2 个岩溶泉的水质为 IV 类水,四方洞出口的水质为 IV 类水;四方洞地下河北边支管道的水已受污染。相反,在没有矿山开采活动的流域南面,虽然地下水脆弱性较高,但该区域内的地下水及地表水并未受明显污染。由此可以看出地下水脆弱性反映了自然界和人类活动对地下水的影响程度。

在西南岩溶石山地区,有很多地下河流域在水

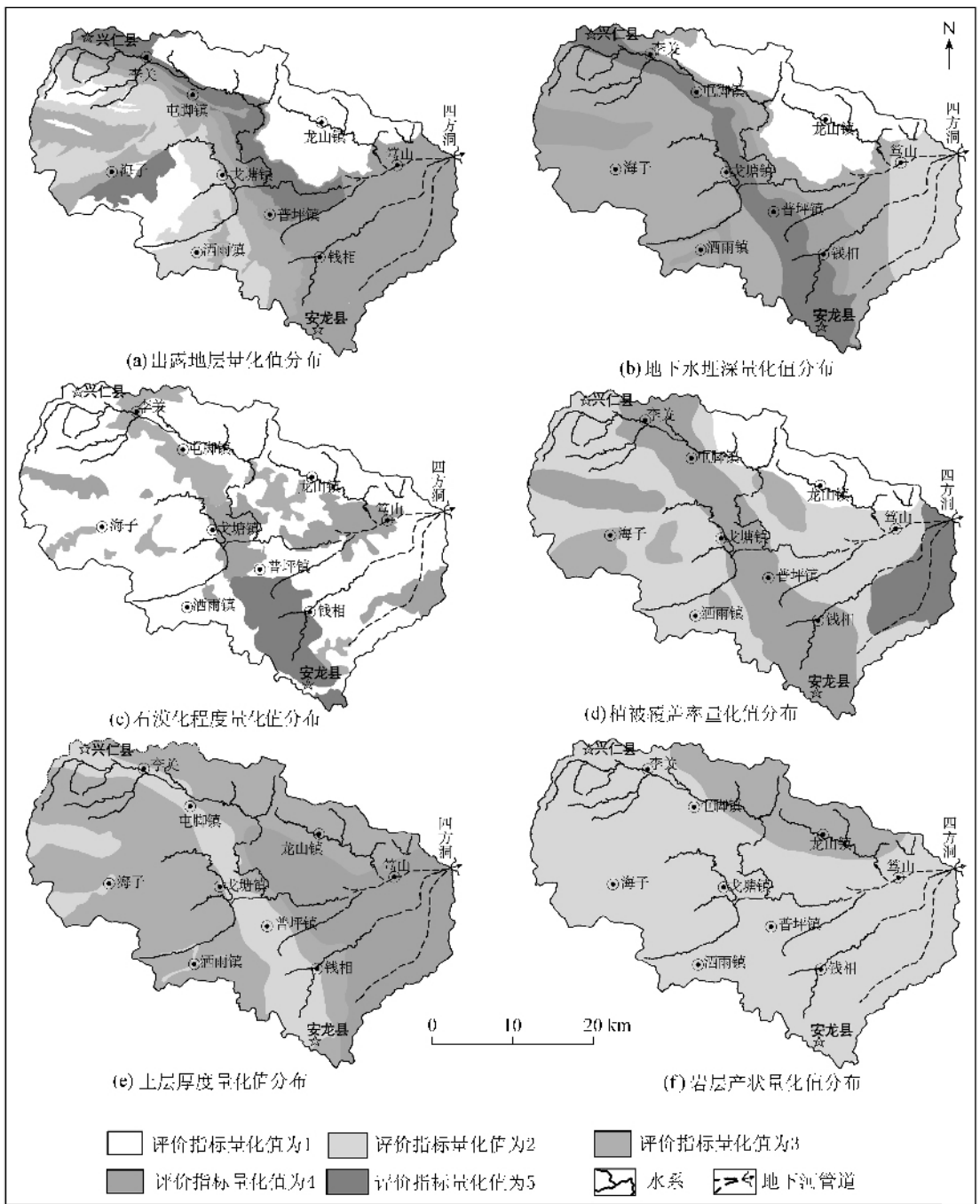


图1 各脆弱性评价指标量化值分布

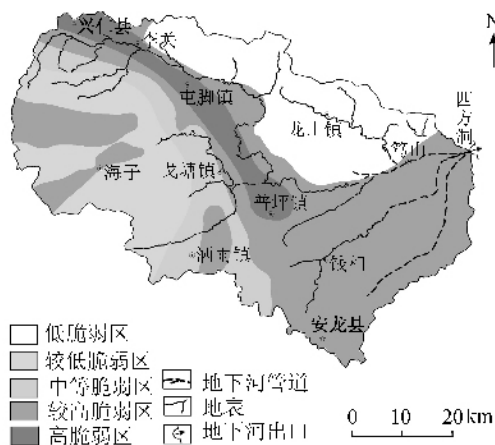


图2 四方洞流域地下水脆弱性分区

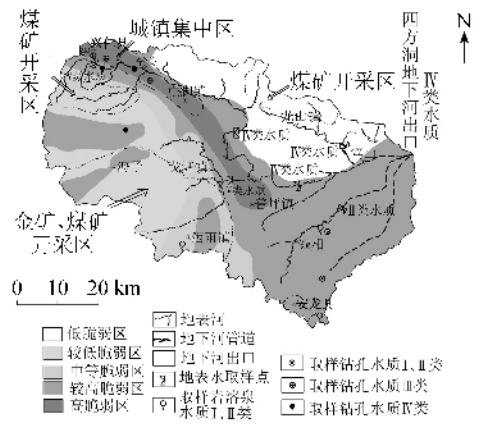


图3 四方洞流域地下水、地表水污染现状与地下水脆弱性分区对比

文地质条件、矿产资源分布及城镇布局方面与四方洞地下河类似。建议在类似地下河流域内进行矿产资源开发及城镇建设的同时,应加强对生产、生活废水排放的控制和处理,尽可能保护地表水环境,从而降低地下水环境被污染的程度。

参考文献:

[1] 章程. 贵州普定后寨地下河流域地下水脆弱性评价与土地利用空间变化的关系[D]. 北京: 中国地质科学院, 2003.

[2] 孙才志, 林山杉. 地下水脆弱性概念的发展过程与评价现状及研究前景[J]. 吉林地质, 2000, 19(1): 429-434.

[3] 姜桂华. 地下水脆弱性研究进展[J]. 世界地质, 2002(1): 33-38.

[4] 彭稳, 裴建国. 岩溶含水层脆弱性评价方法探讨[J]. 水资源保护, 2010, 26(6): 9-11.

[5] 袁道先. 中国岩溶学[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[6] 刘建刚, 唐扬, 陈丽. 石灰岩吸附痕量钼的试验研究[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2010, 38(3): 300-304.

[7] 闫志为, 张志卫, 王佳佳. 硫酸水对方解石和白云石矿物的溶蚀作用[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 79-80.

[8] 李强. 典型表层岩溶水化学对暴雨响应特征研究: 以广西马山弄拉兰电堂泉为例[J]. 水资源保护, 2008, 24(2): 14-16.

[9] 苟鹏飞, 蒋忠勇, 林涛, 等. 典型岩溶地下河入、出口处强降雨过程中水动态变化[J]. 水资源保护, 2011, 27(1): 6-8.

[10] 郭芳, 姜光辉, 袁道先. 南方岩溶区地下河主要离子浓度变化趋势分析[J]. 水资源保护, 2008, 24(1): 16-19.

[11] 孙宏才, 田平, 王莲芬. 网络层次分析法与决策科学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2010.

[12] 王恩, 束龙仓, 刘丽红, 等. 基于改进支持向量回归的岩溶天窗水位预测模型[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2011, 39(1): 19-21.

[13] 殷昌平, 孙庭芳. 地下水水资源勘查与评价[M]. 北京: 地质出版社, 1993.

[14] 邓振平, 周小红, 邹胜章, 等. 在线监测仪在岩溶地下水示踪试验中的应用: 广西临桂县罗锦地下水示踪试验[J]. 水资源保护, 2009, 25(2): 75-77.

(收稿日期: 2011-07-28 编辑: 彭桃英)

(上接第44页)沉水植物到沉水植物的覆盖率为60%左右,沉水植物的品种有金鱼藻(占60%)、伊乐藻(占30%)、轮叶黑藻(4%~5%)及少量的苦草(*Vallisneria natans*)、狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum*) (移栽时带入的水草)。水体的螺蛳经繁殖,生物量为引入时的2倍,褶纹冠蚌的生物量增加不显著。水体中鲢鳙鱼的成活率几乎为100%,规格已增加到400~500g/尾,加州鲈鱼规格达250g/尾,花鲮鱼是底层鱼类,平时无法观察到,而观赏草金的数量达上千尾,规格大小不等。因此,水生态修复后的水体高等动植物已形成了较稳定的生物链结构,维持了水生态系统的平衡。

2.3 景观效果评价

综上所述,景观池塘的水体经6个月的生物治理与生态修复后,池塘景观发生了明显改观,水体透明度增加,各种游鱼穿梭于水草之间。环城北路景观池塘曾是昆山市民传统的放生池塘,随着水质变好,放生、垂钓等现象再度兴起。

3 结论

水体生物治理与生态修复技术在昆山市环城北路景观池塘应用后,重新建成一个良好、稳定的水体生态系统,生物多样性增加,水质各项指标达国家地

表水Ⅲ类水标准,水体透明度达1.2m左右,池塘景观效果显著改善。水体生物治理与生态修复技术具有无需清淤、能耗低、工程造价低特点,适合应用于没有或仅有少量污水排入的河道、公园、城市景观池塘等水体中。

参考文献:

[1] 李艳霞, 王颖, 张进伟, 等. 城市河道水体生态修复技术的探讨[J]. 水利科技与经济, 2006, 11(11): 762-766.

[2] 郑天柱, 周建仁, 王超. 污染河道的生态修复机理研究[J]. 环境科学, 2002, 23(S1): 115-117.

[3] 徐德琳, 邓自发, 欧阳琰, 等. 河道生态修复的前沿领域[J]. 中国城市林业, 2008, 6(5): 25-27.

[4] 曹建廷, 周智伟, 张婷. 河道生态修复工程的组成与生态修复的指导原则[J]. 水利规划与设计, 2005(2): 48-52.

[5] 卜全民, 李凤英. 污染河道生态修复技术研究[J]. 安徽农业科学, 2008, 36(36): 16084-16086.

[6] 万金保, 侯得印. 利用生物-生态修复技术治理城市污染河道[J]. 江西科学, 2006, 24(1): 77-79.

[7] 王春英, 张丰如. 小浮萍去除氮磷影响因素研究[J]. 嘉应学院学报, 2010, 28(5): 58-61.

[8] 王志勇. 渤海湾海河口水质污染状况的生物多样性指数法评价[J]. 交通环保, 1996, 17(6): 14-16.

(收稿日期: 2011-08-16 编辑: 徐娟)