

改进物元分析模型在北之江流域水质评价中的应用

孙学颖, 唐德善, 张新娇

(河海大学 水利水电学院, 南京 210098)

摘要: 根据物元分析原理将单一的决策问题拓展为多维的物元结构, 并对传统物元模型中的中点与区间距的计算上进行了改进, 采用熵权法确定指标的权重, 构建出流域水质评价的改进物元模型。利用广西北之江流域 2011 年水质数据, 选取 5 个典型断面和 8 个水质评价指标, 采用改进物元模型进行计算, 综合评价结果为, 北之江流域上游属Ⅰ类水, 中下游属Ⅱ类水。该评价结果与来宾市水功能区划分情况基本一致, 说明改进物元模型可用于水质的综合评价。

关键词: 北之江流域; 水质评价; 评价模型; 改进物元; 熵权; 关联度

中图分类号: X824 **文献标识码:** A **文章编号:** 1672-1683(2014)03-0055-04

Application of Improved Matter-Element Model in Water Quality Assessment of Beizhijiang Drainage Basin

SUN Xue ying, TANG De shan, ZHANG Xin jiao

(College of Water Conservancy and Hydropower, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: In this study, the matter element analysis theory was used to expand the single policy decision problem into a multi-dimensional matter element structure, and the calculation of the distance of point and interval in the traditional matter element model was improved. The entropy method was used to determine the weight of each index, and an improved multi-dimensional matter element model of water quality assessment was developed. The improved matter element model was used to evaluate the water quality in the Beizhijiang Drainage Basin of Guangxi. The water quality data in 2011 were collected, and five typical sections and eight water quality assessment indexes were selected. The results showed that class Ⅰ water is in the upstream of Beizhijiang Drainage Basin, whereas class Ⅱ water in the midstream and downstream. The results were in accordance with water function zonation in Laibin city, indicating that the improved matter element method is reliable for quality assessment.

Key words: Beizhijiang Drainage Basin; water quality evaluation; evaluation model; improved matter element model; entropy; correlation

科学合理的水质评价结果不仅可以为流域水资源的开发和治理提供科学依据, 同时对于改善流域生态环境、保障流域可持续发展也具有重要参考价值。目前水质评价的方法有很多, 常见的有灰色聚类法^[1-2]、模糊综合评判法^[3]、BP神经网络^[4-5]和因子分析法^[6-7]等, 这些方法本身各有优缺点。本文拟应用物元分析法进行水质评价。物元分析法由蔡文^[8]于 1983 首次提出, 它是针对不相容问题, 通过建立事物对指标性能参数的质量评定模型, 直接求出关联度, 进而对事物等级进行评判。该方法应用于流域水质评价中, 能够避免在水质指标值界于相邻级别时的级别判断困难的问题。但在传统物元分析模型中, $\rho(x_i, X_0)$ 表示点与区间的距跟点与区间的侧距, 没有考虑到因区间长度改变而引起的点与区

间距的影响, 故本文通过修改区间的方法^[9-10], 改进物元分析模型, 并且以定量的数值形式表示评定结果, 以便完整客观地反映水质情况。至于权重的确定, 则采用的是熵权法, 避免主观因素带来的偏差。

1 改进物元模型理论

1.1 改进物元模型

物元分析法^[11]使用“事物、特征、量值”这三个要素组成有序三元组, 来描述事物的基本元(物元), 并分析这些物元及其变化规律。基于熵权的改进物元法的北之江流域水质评价模型如下。

(1) 建立物元矩阵。

收稿日期: 2013-12-18 修回日期: 2014-01-10 网络出版时间: 2014-05-08

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13476/j.cnki.nsbdtqk.2014.03.012.html>

作者简介: 孙学颖(1990-), 女, 内蒙古通辽人, 硕士研究生, 主要从事水利水电系统规划与工程经济研究。E-mail: hhsunxueying@163.com

通讯作者: 唐德善(1955-), 男, 江苏泰州人, 教授, 博士生导师, 从事水利水电系统规划与工程经济研究。E-mail: tds808@163.com

$$R_0 = \begin{pmatrix} R_1 \\ R_2 \\ \vdots \\ R_n \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} P_0 & C_1 & X_1 \\ & C_2 & X_2 \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_n \end{pmatrix} \quad (1)$$

式中: P_0 为评价的待评单元; C_i 为待评单元的第 i 项特征(评价指标); X_i 为关于 C 的量值, 即对待评单元第 i 项特征进行分析的原始数据。

(2) 确定经典域和节域物元。

经典域物元公式为:

$$R_j(N_j, C, X_j) = \begin{pmatrix} N_j & C_1 & X_{j1} \\ & C_2 & X_{j2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{jn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_j & C_1 & [a_{j1}, b_{j1}] \\ & C_2 & [a_{j2}, b_{j2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{jn}, b_{jn}] \end{pmatrix} \quad (2)$$

式中: N_j ($j = 1, 2, \dots, m$) 为标准事物所划分的 j 个评审状况等级; 区间 $X_{ji} = [a_{ji}, b_{ji}]$ 为 N_j 关于 C_i 所规定的量值范围, 即各评审状况等级关于对应评价指标所取的数据范围。

节域物元公式:

$$R_p(N_p, C, X_p) = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & X_{p1} \\ & C_2 & X_{p2} \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & X_{pn} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} N_p & C_1 & [a_{p1}, b_{p1}] \\ & C_2 & [a_{p2}, b_{p2}] \\ & \vdots & \vdots \\ & C_n & [a_{pn}, b_{pn}] \end{pmatrix} \quad (3)$$

式中: N_p 为评价等级的全体(标准事物 N_j 加上可转化为标准事物组成了节域对象); 区间 $X_{pi} = [a_{pi}, b_{pi}]$ 为 N_p 关于 C_p ($i = 1, 2, \dots, n$) 所取的量值范围。

(3) 关联函数及关联度的计算。

关联函数表示当物元的量值取为实轴上一点时, 物元符合所要求的取值范围的程度。有界实区间 $X_0 = [a, b]$ 的模为: $|X_0| = |b - a|$ 。式中 $\rho(x_i, X_0)$ 表示点与区间的距跟点与区间的侧距, 传统物元分析模型中均采用相同的计算公式, 没有考虑到因区间长度改变而引起的点与区间距的影响, 本文通过修改区间的方法^[9-10]将点与区间的侧距转化为点与区间的距, 并引入修正系数 r , 计算方法为:

$$\rho(x_i, X_{ji}) = \begin{cases} \left[\left| a_{j\bar{y}} - \frac{x_i + e_0}{2} \right| - \frac{e_0 - x_i}{2} \right] r & x_i \leq a_{j\bar{y}} \\ |x_i - e_0| - \frac{b_{j\bar{y}} - a_{j\bar{y}}}{2} & x_i \in [a_{j\bar{y}}, b_{j\bar{y}}] \\ \left[\left| b_{j\bar{y}} - \frac{x_i + e_0}{2} \right| - \frac{x_i - e_0}{2} \right] r & x_i \geq b_{j\bar{y}} \end{cases} \quad (4)$$

式中: e_0 为区间中点, r 为修正系数, 且

$$e_0 = \frac{a_{j\bar{y}} + b_{j\bar{y}}}{2}, r = \frac{b_{j\bar{y}} - a_{j\bar{y}}}{e_0 - x_{j\bar{y}}} \quad (5)$$

则关联函数 $K_j(x_i)$ 的计算公式为:

$$K_j(x_i) = \begin{cases} \frac{-\rho(x_i, X_{j\bar{y}})}{|X_{j\bar{y}}|} & x_i \in X_{j\bar{y}} \\ \frac{\rho(x_i, X_{ji})}{\rho(x_i, X_{pi}) - \rho(x_i, X_{j\bar{y}})} & x_i \notin X_{j\bar{y}} \end{cases} \quad (6)$$

(4) 确定待评估单元对于各等级 j 的综合关联度。

$$K_j(P_0) = \sum_{i=1}^n \omega_i K_j(x_i) \quad (7)$$

式中: ω_i 为第 i 项特征的权重; $K_i(P_0)$ 为待评价单元 P_0 属于第 j 级的综合关联度。

(5) 评价标准。

当 $K_j(P_0) \geq 1$, 说明被评价的对象超出标准对象上限,

其值越大, 说明开发潜力越大; 当 $0 \leq K_j(P_0) \leq 1$, 说明被评价对象符合标准对象隶属程度的要求, 其值越大, 越接近标准要求上限; 当 $-1 \leq K_j(P_0) \leq 0$, 说明被评价对象不符合标准对象要求, 但具有转化为标准对象的条件, 其值越大, 越容易转化; 当 $K_j(P_0) \leq -1$, 说明被评价对象既不符合标准对象要求, 也不具备转化为标准对象的条件^[12]。

1.2 熵权法确定权重

熵权法是一种在没有专家权重的情况下, 根据被评价对象的评价指标构成的特征值矩阵来确定指标权重的方法。在具体使用过程中, 熵权法根据各指标的变异程度, 利用信息熵计算出各指标的熵权, 再通过熵权对各指标的权重进行修正, 从而得出较为客观的指标权重。相对主观赋值法, 熵权法的精度较高、客观性更强, 能够更好地解释所得到的结果。采用熵权法获得各指标权重值^[12]的步骤如下。

(1) 构建 n 个事物 m 个评价指标的判断矩阵 $X = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

(2) 将判断矩阵归一化处理, 得到归一化判断矩阵 $R = (r_{ij})_{m \times n}$ 。

$$\text{效益型 } r_{ij} = \frac{X_{j\bar{y}} - \inf(X_{ij})}{\sup(X_{ij}) - \inf(X_{ij})} \quad (7)$$

$$\text{成本型 } r_{ij} = \frac{\sup(X_{j\bar{y}}) - X_{ij}}{\sup(X_{ij}) - \inf(X_{ij})} \quad (8)$$

式中: $\sup(X_{ij})$ 、 $\inf(X_{j\bar{y}})$ 分别表示同一指标下不同方案的指标值 $X_{j\bar{y}}$ 中的最大值和最小值。

(3) 在 n 个评级方案中, m 个评价指标, 可定义熵为:

$$H_i = - \frac{\sum_{j=1}^m f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$f_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{j=1}^m (1 + r_{ij})} \quad i = 1, 2, \dots, m; j = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

(4) 计算熵权, 公式为:

$$X_i = \frac{1 - H_i}{\sum_{j=1}^m (1 - H_j)} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (11)$$

式中: H_i 表示第 i 个评价指标在不同评价方案中的权重; H_j 表示第 j 个评价方案的权重。

2 实例分析

2.1 实例基本情况

北之江流域处于湘桂赣褶皱带的接界处, 属亚热带季风气候区, 气候温暖湿润, 四季分明, 夏长冬短, 雨量充沛, 季风环流影响明显。流域面积 1 403 km²。北之江昔称北三江, 又称清水河, 为红水河左岸 1 级支流, 发源于柳州市柳江县西部。干流长 109 km, 多年平均流量 28.9 m³/s^[13]。

北之江流域沿岸种植着大量的水稻和甘蔗, 为确保收入以及提高产量, 农民大量使用农药化肥, 降雨或灌溉后, 过剩的农药成分直接排入河道, 加之村镇发展落后, 公共设施不健全, 生活污水未经处理直接排入北之江干、支流。同时, 流域中下游大部分属岩溶溶蚀丘陵、山地, 拥有丰富的大理石、石灰石以及矿产资源, 北之江沿河两岸建有大量非法私有矿产加工厂, 工厂废水不经任何处理直接排入河道, 污染水体, 流域水环境破坏严重。

2.2 水质监测断面选取

为了从宏观上了解北之江水系的环境质量状况,根据北之江的地理分布、地质、地貌等情况,结合区域内污染源分布状况,考虑监测结果的代表性和实际采样的可行性、方便性,在北之江河段布设5个断面(图1):1号安东乡国辉村;2号七洞乡板力村;3号良塘乡大英村;4号桥巩乡下料村;5号来宾华侨农场四队断面(北之江),位于北之江与红水河汇合口上游1 km。

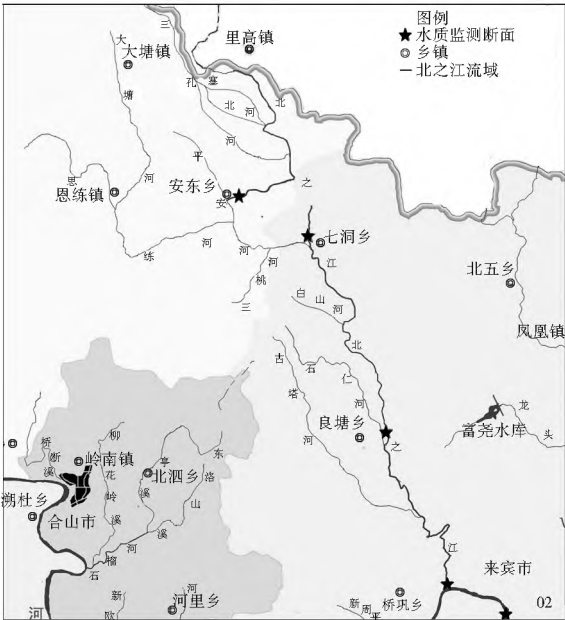


图1 北之江流域水质评价断面选取

Fig. 1 Selected sections of water quality assessment in Beizhijiang Drainage Basin

2.3 评价标准

根据来宾市水功能区划,安东乡国辉村为北之江源头水保护区,执行《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》的Ⅰ类水质标准(表1);其余河段(七洞乡板力村-来宾华侨农场四队河段)为农村的饮用水源区以及农业灌溉区,执行《地表水环境质量标准(GB 3838-2002)》的Ⅲ类水质标准(表1)。

北之江流域污染主要来自农业面源污染、生活污水污染、固体废弃物污染(主要是生活垃圾和锰矿弃渣)、洗矿和石材加工污水污染。因此地表水水质分析时选择了8项指标作为评价因子:溶解氧、氨氮、高锰酸钾指数、化学需氧量、五日生化需氧量、粪大肠菌群、锰、铅。评价因素的集合即评价对象指标 $U = \{ \text{溶解氧、氨氮、高锰酸钾指数、化学需氧量、五日生化需氧量、粪大肠菌群、锰、铅} \}$, 评价集为5个水质级别, $S = (\tilde{N}, \tilde{0}, \hat{0}, \hat{\hat{0}}, \bar{0})$ 。

2.4 水样点综合评价

每个监测断面监测3次,取平均值,评价因子实测值见表2。

取北之江流域安东乡国辉村断面为例,通过熵权计算,获得该断面水质评价指标的权重为: $X = (0.135, 0.115, 0.136, 0.134, 0.131, 0.116, 0.106, 0.127)$ 。根据改进物元法的公式(4)、公式(5),得出水质评价等级的关联度,见表3。

表1 地表水环境质量标准

Table 1 Surface water quality evaluation criteria

	mg/L				
评价级别	\tilde{N}	$\tilde{0}$	$\hat{0}$	$\hat{\hat{0}}$	$\bar{0}$
溶解氧	7.5	6.0	5.0	3.0	2.0
氨氮	0.15	0.5	1.0	1.5	2.0
高锰酸钾指数	2.0	4.0	6.0	10	15
化学需氧量	15	15	20	30	40
五日生化需氧量	3.0	3.0	4.0	6.0	10
粪大肠菌群	200	2 000	10 000	20 000	40 000
锰	0.1	0.1	0.2	0.2	0.3
铅	0.01	0.01	0.05	0.05	0.10

表2 评价因子实测值(2011年6月)

Table 2 Measured values of evaluation indexes in June 2011

	mg/L				
评价因子	安东乡	七洞乡	良塘乡	桥巩乡	来宾华侨农场
溶解氧	6.4	6.7	6.8	6.9	7.0
氨氮	1.196	1.48	1.176	1.268	1.044
高锰酸钾指数	2.2	2.4	2.4	2.5	2.6
化学需氧量	7.0	7.0	5.0	6.0	6.0
五日生化需氧量	0.7	1.5	1.7	1.7	1.7
粪大肠菌群	16 000	16 000	12 000	8 400	7 900
锰	0.2	0.42	0.31	0.30	0.32
铅	0.001	0.001	0.001	0.001	0.001

表3 待评定单元对各等级的关联度

Table 3 Associate degree of unit to be assessed

级别	\tilde{N}	$\tilde{0}$	$\hat{0}$	$\hat{\hat{0}}$	$\bar{0}$
C_1	-0.185	0.313	-0.083	-0.241	-0.436
C_2	-0.568	-0.468	-0.204	0.400	-0.274
C_3	-0.120	0.105	-0.450	-0.633	-0.780
C_4	0.470	0.470	-0.533	-0.650	-0.767
C_5	0.241	0.241	-0.767	-0.825	-0.883
C_6	-0.497	-0.467	-0.273	0.400	0.200
C_7	-0.502	-0.502	-0.009	-0.009	0.000
C_8	0.111	0.111	-0.9	-0.9	-0.980

根据物元公式(6),计算的水质评价综合关联度见表4。

表4 待评估单元对于各等级的综合关联度

Table 4 Comprehensive associate degree of unit to be assessed

等级	$K_{\tilde{N}}(P_0)$	$K_{\tilde{0}}(P_0)$	$K_{\hat{0}}(P_0)$	$K_{\hat{\hat{0}}}(P_0)$	$K_{\bar{0}}(P_0)$
关联度值	-0.109	0.004	-0.415	-0.337	-0.516

由于 $K_j = \max\{K_j(P)\} = K_{\tilde{0}}(P_0) = 0.004$, 根据物元分析法评价标准,北之江流域安东乡国辉村断面水质属于 $\tilde{0}$ 类水。同理计算得知,七洞乡板力村断面水为 $\hat{0}$ 类水;良塘乡大英村断面水为 $\hat{\hat{0}}$ 类水;桥巩乡下料村断面水为 $\hat{\hat{0}}$ 类水;来宾华侨农场四队断面(北之江与红水河汇合口上游1 km处断面)水为 $\bar{0}$ 类水。该评价结果与来宾市水功能区规划基本一致。

北之江流域上游 $\tilde{0}$ 类水主要表现为氨氮、高锰酸钾指数、粪大肠菌群超标,原因是北之江流域上游沿岸种植着大量的水稻和甘蔗,农民大量使用农药化肥,降雨或灌溉后,过

剩的农药成分直接排入河道,带来农药及化肥等残留物的污染;加之流域上游村镇发展相对落后,公共设施不健全,生活污水未经处理直接排入北之江干、支流,使水体受污染。流域中下游Ⅰ类水主要表现为溶解氧、氨氮以及锰含量超标,原因是流域中下游拥有丰富的矿产资源,现有大量的非法私有矿产加工厂就建设在北之江沿河两岸,工厂的废水不经任何处理直接排入河道,导致工业污染相对严重。

2.5 治理建议

(1) 北之江流域上游农业灌溉导致的水环境污染,应控制农药及化肥的使用,采取综合防治的方法,如联合或交替施用化学、物理、生物、农业和其他有效方法,选育和推广抗病虫害的优良品种,使用微生物农药,以菌治虫,以虫治虫以及推广冬季灭虫、诱杀、辐射处理等办法,以减少农药及化肥的使用量;对于生活污水导致的污染,应合理规划城镇排污系统,完善城镇管网铺设,在集镇区拟改扩建氧化塘污水处理系统,将生活污水经过三格化粪池处理后,通过管网分别收集送至氧化塘,经氧化处理达标后就近排入水体或农田。

(2) 北之江流域中下游水环境污染是由矿产资源开采加工过程中产生的废水导致的,这种废水是由水和各种杂质组成的一种成分复杂的液体,其主要特点是悬浮物含量高,直接排放对北之江水环境影响较大。建议采用絮凝沉淀处理法,即加入絮凝剂进行絮凝反应,再经沉淀后以达到去除污染物并实现处理后水的循环利用或达标排放的目的。这一工艺简单、成本较低、效果显著。

3 结语

本文改进物元分析模型的创新点在于点与区间距的计算上,避免了原模型因点超出区间范围造成的影响。采用熵权法确定权重相对比较客观,避免了水环境不确定因素的影响以及由专家打分法等主观赋权法带来的人为偏差,并且考虑了多个样本间的联系,可削弱异常值的影响,使评价结果更准确、合理。

参考文献(References):

- [1] 王洪梅,卢文喜,辛光,等.灰色聚类法在地表水水质评价中的应用[J].节水灌溉,2007,(5):20-22.(WANG Hong mei, LU Wen xi, XIN Guang, et al. Application of Grey Clustering Method for Surface Water Quality Evaluation[J]. Water Saving Irrigation, 2007, (5): 20-22. (in Chinese))
- [2] 李勇,刘德深,陈晓波.灰色聚类法在地表水水质评价中的问题探讨[J].科技信息,2009,(11):2F-23.(LI Yong, LIU De shen, CHEN Xiao bo. Explore the Issue of Grey Clustering Method to Surface Water Quality Evaluation[J]. Science and Technology Information, 2009, (11): 2F-23. (in Chinese))
- [3] 高振凯,耿新新,海玮,等.基于模糊综合评判的吴淞区地下水水质评价[J].人民黄河,2013,35(8):53-55,59.(GAO Zhen kai, GENG Xin xin, HAI Wei, et al. Ground Water Quality Evaluation Based on Fuzzy Synthesis in the Wulong Irrigation on Area[J]. Yellow River, 2013, 35(8): 53-55, 59. (in Chinese))
- [4] 杜富芝,傅瓦利,杜小红,等.基于BP神经网络的三峡库区小流域水质评价[J].节水灌溉,2009,(1):8-10,14.(DU Fu zhi, FU Wa li, DU Xiao hong, et al. Water Quality Evaluation of Small Basin in Three Gorges Reservoir Based on BP Neural Networks [J]. Water Saving Irrigation, 2009, (1): 8-10, 14. (in Chinese))
- [5] 陈志英.BP神经网络在水质评价中的应用[J].中国农村水利水电,2001,(9):27-29.(CHEN Zhi ying. BP Neural Network in Water Quality Assessment[J]. China Rural Water and Hydropower, 2001, (9): 27-29. (in Chinese))
- [6] 申明金,曹洪斌.因子分析法在水质评价中的应用[J].环境科学与管理,2013,38(1):192-194.(SHEN Ming jin, CAO Hong bin. Application of Factor Analysis in Water Quality Evaluation [J]. Environmental Science and Management, 2013, 38(1): 192-194. (in Chinese))
- [7] 杨威,卢文喜,李平,等.因子分析法在伊通河水质评价中的应用[J].水土保持研究,2007,14(1):113-114.(YANG Wei, LU Wen xi, LI Ping, et al. Application of Factor Analysis Method to the Water Quality Evaluation of Yitong River[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2007, 14(1): 113-114. (in Chinese))
- [8] 蔡文.物元模型及应用[M].北京:科学技术文献出版社,1994:25-28.(CAI Wen. Matter Element Model and Application[M]. Beijing: Science Press, 1994: 25-28. (in Chinese))
- [9] 何格,唐德善.基于改进物元可拓模型的水资源配置方案评价[J].水电能源科学,2012,30(12):24-26,138.(HE Ge, TANG De shan. Water Resources Allocation Schemes Evaluation Based on Improved Matter element Model[J]. Water Resources and Power, 2012, 30(12): 24-26, 138. (in Chinese))
- [10] 胡宝清,张轩,卢兆明.可拓评价方法的改进及其应用研究[J].武汉大学学报(工学版),2003,36(5):79-84.(HU Bao qing, ZHANG Xuan, LU Zhao ming. Research on Assessment of Building Fire Safety by Improved Extension Assessment Method [J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2003, 36(5): 79-84. (in Chinese))
- [11] 方国华,黄显锋.多目标决策理论、方法及其应用[M].北京:科学出版社,2011.(FANG Guo hua, HUANG Xian feng. Multiobjective Decision Theory and Its Application[M]. Beijing: Science Press, 2011. (in Chinese))
- [12] 陈南祥,汤泽.基于物元可拓法对郑州市地表水水质评价[J].水利与建筑工程学报,2013,11(2):42-45.(CHEN Nan xiang, TANG Ze. Quality Evaluation for Surface Water in Zhengzhou Based on Matter-element Extension Method[J]. Journal of Water Resources and Architectural Engineering, 2013, 11(2): 42-45. (in Chinese))
- [13] 唐德善,唐彦,魏宇航,等.北之江流域生态环境保护总体规划[R].来宾市人民政府,2013.(TANG De shan, TANG Yan, WEI Yu hang, et al. Ecological and Environmental Protection Master Plan in Bei zhijiang Drainage Basin[R]. People's Government of Laibin, 2013. (in Chinese))