

综合权重的可变模糊识别模型在水质动态评价中的应用

汪天祥, 许士国, 胡素端

(大连理工大学 水利学院, 辽宁 大连 116024)

摘要: 水质评价不仅要描述水体状态, 还需要体现水体水质的变化过程。针对水质评价的模糊性、不确定性、时序性的特点, 将可变模糊识别模型应用于水质动态评价, 其中权重采用层次分析法和熵权法耦合确定, 使其融合了原始水质数据信息与科研人员对科学问题的认识。在运用蒙特卡罗法分析指标不确定性对水质评价结果影响的基础上, 运用所建模型进行逐月水质动态评价。以碧流河水库为例进行水质评价的结果表明, 其水质在Ⅱ到Ⅲ类之间, 各月间无显著变化; 8月、9月的水质稍差, 主要污染指标是总氮。

关键词: 可变模糊识别模型; 综合权重; 水质动态; 不确定性; 水质评价

中图分类号: X824 **文献标志码:** A **文章编号:** 1672-1683(2015)06-1075-05

Application of variable fuzzy pattern recognition model with synthetic weight in the assessment of water quality dynamics

WANG Tianxiang, XU Shiguang, HU Suiduan

(School of Civil and Hydraulic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116024, China)

Abstract: Water quality evaluation includes the description of water state and variation process of water quality. Due to the characteristics of water quality, such as fuzziness, uncertainty, and randomness, the variable pattern recognition model was applied to evaluate water quality dynamics. The weight was determined using the coupling analytic hierarchy process and entropy method, so the original water quality data and scientific research can be combined together. The Monte Carlo method was used to analyze the effects of index uncertainty on water quality evaluation, and the model was used to conduct monthly evaluation of water quality dynamics in the Biliu reservoir. The results showed that water quality in the Biliu reservoir is between level II and III, there are no significant changes between each month but water quality in August and September are worse, and the main pollution index is total nitrogen.

Key words: variable fuzzy pattern recognition model; synthetic weight; water quality dynamics; uncertainty; water quality assessment

水质变化不仅受到诸多物理、化学、生物等指标的影响, 还受到外部环境例如季节转化^[1]、突降暴雨等因素的干扰^[2], 同时样品采集与检测过程还使得水质指标具有不确定性^[3]。因此, 水质评价问题具有客观性、模糊性、随机性、时序性等特点。目前常用的评价方法有综合指数法、模糊评价法、集对分析法、物元可拓法、灰色理论法等^[4-9]。但过去的水质评价多是针对水质的静态评价, 较少考虑水质的时序变化性, 也常忽视样品采集与分析过程中带来的随机性。针对这些问题, 本文探索了可变模糊识别模型在水质动态评价中的应用, 并分析了指标不确定性对评价结果的影响。将其应用到碧流河水库水质动态评价, 以期为该水库和相似水库水质管理提供技术支持。

1 基于综合权重的可变模糊识别评价模型

1.1 可变模糊识别模型理论

陈守煜教授提出了利用数的相对连续概念来表示模糊现象、事物、概念的相对隶属度, 建立以动态变化的相对隶属度概念为基础的工程模糊集理论, 并进一步创建了可变模糊集理论^[10]。该理论通过计算样本的相对隶属度分析样本的隶属程度, 其计算过程与理念是连续的模糊的, 这与水质评价的特性相吻合。此外该模型根据所选的的准则参数不同即组合变换线性、非线性、海明距离、欧式距离, 可变化四种模型, 避免了传统模型的单一性, 结果更加稳定^[11-12]。由于水质评价本质上是一种级别归属的识别, 因此本文选用可变

收稿日期: 2015-03-01 修回日期: 2015-06-00 网络出版时间: 2015-11-30
网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/13.1334.TV.20151130.2100.030.html>
基金项目: 国家自然科学基金项目(51327004; 51279022; 51209030)
作者简介: 汪天祥(1987-)男, 江西乐平人, 博士, 主要从事水环境污染监测与治理方面研究。E-mail: tianxiang@mail.dlut.edu.cn
通讯作者: 许士国(1958-)男, 山东临沂人, 教授, 博士生导师, 主要从事水环境系统分析方面研究。E-mail: sngxu@dlut.edu.cn

模糊识别模型进行评价。

1.2 水质动态评价建模

1.2.1 确定指标体系

水质评价涉及到多个水质指标,本文在科学性、系统性、可行性、实用性等指标构建的原则上,利用层次分析法构建层次分明的指标系统。

1.2.2 计算指标综合权重

不同的水质指标在水质评价中的重要性是有所区别的。主观权重可以较好地体现研究人员对研究问题的认识,客观权重则可以充分地利用原始数据的信息^[13-15]。本文结合两者的优点,分别利用层次分析法确定主观权重,利用熵权法确定客观权重,最后利用加乘计算确定指标综合权重。将层次分析法确定的主观权重 w_1 ,与熵权法确定的客观权重 w_2 ,加乘运算归一化后即可确定综合权重 w 。

$$w(i) = \frac{w_1(i) \times w_2(i)}{\sum_{i=1}^n (w_1(i) \times w_2(i))} \quad (1)$$

1.2.3 可变模糊识别模型评价

首先,将水质指标进行规格化处理,消除指标特征值与标准值的量纲,针对递增型和递减型指标分别采用不同的规格化公式。

$$r_{ij} = \begin{cases} 0 & x_{ij} \geq y_{ic} \text{ (逆指标) 或 } x_{ij} \leq y_{ic} \text{ (正指标)} \\ \frac{x_{ij} - y_{ic}}{y_{ia} - y_{ic}} & y_{ia} < x_{ij} < y_{ic} \text{ (逆指标) 或 } y_{ia} > x_{ij} > y_{ic} \text{ (正指标)} \\ 1 & x_{ij} \leq y_{ia} \text{ (逆指标) 或 } x_{ij} \geq y_{ia} \text{ (正指标)} \end{cases} \quad (2)$$

$$s_{ih} = \begin{cases} 0 & y_{ih} = y_{ic} \text{ (正指标或逆指标)} \\ \frac{y_{ih} - y_{ic}}{y_{ia} - y_{ic}} & y_{ia} < y_{ih} < y_{ic} \text{ (正指标) 或 } y_{ia} > y_{ih} > y_{ic} \text{ (逆指标)} \\ 1 & y_{ih} = y_{ia} \text{ (正指标或逆指标)} \end{cases} \quad (3)$$

式中: r_{ij} 为水质样本 j 指标 i 特征值对评价级别的相对隶属度,即指标相对隶属度; x_{ij} 是第 j 个样本的第 i 个指标特征值; y_{ia} 、 y_{ih} 、 y_{ic} 为指标 i 的 1 级、 h 级、 c 级标准特征值(各级特征值参照水质标准 GB 3838-220 的标准值); s_{ih} 为级别 h 指标 i 标准特征值 y_{ih} 的规格化结果;正指标是指总氮、总磷等指标特征值越大,水质越差的指标;逆指标是指溶解氧等指标特征值越大,水质越好的指标。

其次,将指标权重和规格化的指标与标准代入公式(4),通过变换模型参数($a=1$ 或 2 ; $p=1$ 或 2)计算四种模型下评价样本对各级的隶属度 u_{hj} 。

$$u_{hj} = \begin{cases} 0 & h < a_j \text{ 或 } h > b_j \\ \frac{1}{\sum_{k=a_j}^{b_j} \left\{ \sum_{i=1}^n [w_{ij}(r_{ij} - s_{ih})]^p \right\}^{\frac{a}{p}}} & a_j \leq h \leq b_j \\ 1 & h = a_j = b_j \end{cases} \quad (4)$$

式中: u_{hj} 是样本 j 对级别 h 的隶属度; h 是水质标准级别($h=1, 2, \dots, c$),即样本综合相对隶属度; a_j 、 b_j 分别为水质样本 j 的下限值和上限值; w_{ij} 为水质样本 j 指标 i 的权重。为统一比较,各指标的权重在同一组评价样本中取值一致,即 $w_{ij} = w_i$ (由 1.2.2 节计算获得); a 为优化准则参数, $a=1$ 为最小一乘方准则, $a=2$ 为最小二乘方准则; p 为距离参数, $p=1$

表示海明距离, $p=2$ 表示欧式距离。通过变换模型参数 a 、 p 可以模拟指标与标准间的不同关系。最后,将计算出样本级别综合相对隶属度 u_{hj} ,代入级别特征值公式(5)计算出样本的水质级别,为了使得评价结果更稳定,以四个模型的均值作为评价结果。

$$H = \sum_{h=1}^c u_{hj} h \quad (5)$$

式中: h 为水质级别($h=1, 2, \dots, c$); H 为样本的水质级别特征值。

1.3 蒙特卡罗法分析指标不确定性

蒙特卡罗法是一类人工产生和利用随机数,通过对有关的随机变量或随机过程的随机抽样,来求解数学、物理和工程技术问题近似解的数值方法。王栋等利用最大熵原理确定了水环境评价指标最小偏差的先验概率分布为正态分布。各水质指标的监测值实际上可以看作均值,由于不知道评价指标实际的随机观测误差,所以假定其方差,这并不影响问题的实质。为简化计算,本文仅对方差均一的情况进行分析,并假定方差分别为 1、5、10,运用蒙特卡罗随机模拟出水质样本,利用基于综合权重的可变模糊识别模型进行评价,分析指标不确定性对水质评价结果的影响。

2 实例研究

碧流河水库是大连市重要的水源地,本文依据碧流河水库管理局水质监测资料对 2009 年碧流河水库 4 月到 10 月的水质进行动态评价,分析水质状态与变化规律。

2.1 评价指标、标准与水质数据

以地表水环境质量标准(GB 3838-2002)为评价依据,根据当前主要的水体污染类型,构建指标体系,将水质评价指标体系作为最高层简称为 A 层,富营养指标(B1)、重金属指标(B2)、微生物指标(B3)、综合指标(B4)、其他指标(B5)作为准则层,总磷(X1)、氨氮(X2)、总氮(X3)、汞(X4)、大肠杆菌(X5)、溶解氧(X6)、生化需氧量(X7)、高锰酸钾指数(X8)、氟化物(X9)作为指标层。指标体系与水质数据见表 1,其中大肠杆菌的单位为个/L,其他指标的单位均为 mg/L。

构建的指标体系包含富营养、重金属、微生物、综合污染指标等,覆盖面广,基本上能代表水体水质状态。

2.2 评价结果

分别利用层次分析法(满足一致性检验)和熵权法计算主观权重和客观权重,然后加乘运算得出指标综合权重。构建准则层 B 的判断矩阵,进行权重计算,判断矩阵参考文献[2-3,6]确定,结果见表 2。

然后对指标层构建判断矩阵计算获得指标权重。B2、B3、B5 中只有一个指标,该层权重即为指标权重,文献[2-3,6]认为 B4 溶解氧(X6)、生化需氧量(X7)、高锰酸钾指数(X8)对水体的影响一致,3 个指标均分 B4 层的权重, B1 层包含的 3 个指标再依据层次分析法构建权重确定,该层结果见表 3。

如前文所述,根据计算的准则层权重及其相应的指标层便可获得各指标的权重,该权重体现了科研人员对水质问题的理解,并进一步利用熵权法计算客观权重,计算步骤参考文献[8]。将两种权重代入式(1),便可获得指标的综合权重,结果见表 4。

表1 指标体系与水质监测数据

Tab. 1 Index system and water quality monitoring data

指标体系	A									
	B1			B2		B3		B4		B5
	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9	
4月水质均值	0.019	0.193	1.850	0.000 000	0.000	12.683	1.742	1.971	0.149	
5月水质均值	0.008	0.210	2.201	0.000 003	0.000	11.396	1.421	1.625	0.161	
6月水质均值	0.008	0.263	3.325	0.000 000	0.000	9.246	1.783	1.646	0.161	
7月水质均值	0.005	0.125	2.370	0.000 000	11.667	9.004	1.700	1.900	0.190	
8月水质均值	0.005	0.178	2.544	0.000 000	10.000	6.442	1.129	2.050	0.183	
9月水质均值	0.001	0.144	2.291	0.000 018	19.167	6.488	1.113	2.021	0.181	
10月水质均值	0.012	0.106	1.743	0.000 015	11.667	7.925	1.100	2.308	0.164	

表2 准则层判断矩阵与权重

Tab. 2 Judgment matrix and weight of criterion layer

准则层	B1	B2	B3	B4	B5	准则层权重
B1	1.00	5.00	6.00	1.00	5.00	0.388
B2	0.20	1.00	2.00	0.20	1.00	0.086
B3	0.17	0.50	1.00	0.17	0.50	0.053
B4	1.00	5.00	6.00	1.00	5.00	0.387
B5	0.20	1.00	2.00	0.20	1.00	0.086

一致性指数 $CR=0.0094 < 0.1$

表3 B1 指标层判断矩阵与权重

Tab. 3 Judgment matrix and weight of B1 index layer

指标	X1	X2	X3	目标层权重	指标权重
X1	1	2	1	0.4	0.155
X2	0.5	1	0.5	0.2	0.078
X3	1	2	1	0.4	0.155

一致性指数 $CR=0 < 0.1$

表4 各指标权重

Tab. 4 Weight of each index

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
层次分析法	0.155	0.078	0.155	0.086	0.053	0.129	0.129	0.129	0.086
熵权法	0.081	0.091	0.08	0.129	0.114	0.128	0.17	0.095	0.112
综合权重	0.115	0.065	0.113	0.101	0.055	0.151	0.200	0.112	0.088

利用式(2)和式(3)计算水质样本和标准的规格化数据 消除量纲和逆指标影响,规格化结果见表5。

表5 水质样本和标准规格化结果

Tab. 5 Normalization results of water quality samples and standards

指标	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8	X9
4月水质均值	0.95	0.98	0.08	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
5月水质均值	1.00	0.97	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
6月水质均值	1.00	0.94	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
7月水质均值	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
8月水质均值	1.00	0.98	0.00	1.00	1.00	0.81	1.00	1.00	1.00
9月水质均值	1.00	1.00	0.00	1.00	1.00	0.82	1.00	1.00	1.00
10月水质均值	0.99	1.00	0.14	1.00	1.00	1.00	1.00	0.98	1.00
\tilde{n} 类	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
\hat{o} 类	0.92	0.81	0.83	1.00	0.95	0.73	1.00	0.85	1.00
\acute{o} 类	0.79	0.54	0.56	0.95	0.75	0.55	0.86	0.69	1.00
\hat{o} 类	0.53	0.27	0.28	0.00	0.50	0.18	0.57	0.38	0.00
\tilde{o} 类	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

举例说明如何确定样本的级别限制 $[a_j, b_j]$ ，以第一个样本(4月水质均值)为例，从表 3 容易知道 X1 规格化的指标值(0.95)隶属于 \tilde{N} 类(1)到 $\tilde{0}$ 类(0.92)，那么 X1 的限制区间为 1~ 2，类似的分别比较 X2 到 X9，可得出该样本各指标的最好水质级别为 \tilde{N} 类，最差水质级别为 $\tilde{0}$ 类(X3)，因此该水质样本的级别区间 $a_j = 1, b_j = 5$ 。

表 6 评价结果

Tab. 6 Evaluation results

方法	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
基于综合权重的可变模糊法	2.091	2.105	2.113	2.096	2.228	2.219	2.052
综合指数法	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类	$\tilde{0}$ 类

从表 1 和表 5 可以看出，碧流河水库水质除总氮外，总体较好。另外，8 月、9 月的溶解氧含量要低于其他月份，但从表 6 看出碧流河水库各月水质级别差异并不大，符合实际的水质状态，验证了其评价结果的合理性。

相较于综合指数法只能单一的识别水质级别，综合权重的可变模糊识别模型还反映了水质的动态变化，容易看出 8 月、9 月的水质级别为 2.228 和 2.219 稍差于其他月份，和这两个月的溶解氧相对较低的实际情况相符。进一步分析发现该方法指标权重不仅包含了原始数据信息还体现了研究人员的主观认识。在确定评价权重后，进一步进行样本级别识别时将各个指标处理成连续的指标相对隶属度，利用公式(4)进行样本级别识别，包含了从 \tilde{N} 到 $\tilde{0}$ 级的连续隶属度信息。例如，10 月水质均值中的 X1 指标的相对隶属度为 0.99，容易发现该隶属度与各个级别差异为：0.99-1, 0.99-0.92, 0.99-0.79, 0.99-0.53, 0.99-0，包含了 5 个级别的隶属

将综合权重 w_i (表 2)、规格化水质样本 r_j (表 3)、规格化水质标准 s_j (表 3)、各样本的级别区间 a_j, b_j 代入公式(4)计算综合相对隶属度，再代入公式(5)便可以计算水质级别特征值，由于模型参数 α, p 可以变换，相应的同一组样本可以获得 4 个结果，在水质评价中一般取平均值作为最后评价结果(表 6)，使得结果更加稳定^[5]。

信息，能够从指标隶属上体现指标动态变化，而传统的模糊综合评价仅仅是计算相邻级别的隶属，同样的样本，它只计算了 0.99-1, 0.99-0.92 两个级别信息，认为对其他级别的隶属都为 0，缺失了大量的原始数据信息。此外，采用级别特征值作为最后的评价结果，包含了评价样本对所有水质级别的综合相对隶属度，而不仅仅是最大隶属度。而且模型参数 α, p 可变，能够将模型变换为 4 种类型，提高了评价结果的稳定性。综上所述，综合权重的可比模糊识别模型不仅能合理的确定水质级别还能反映出水质的动态变化差异。

2.3 指标不确定性对水质评价结果的影响

采用蒙特卡罗法随机模拟出的 4 月至 10 月水质均值如表 1，方差分布假定为(1, 5, 10)的 1000x7 组服从正态分布的数据，运用基于综合权重的可变模糊模型对其进行评价，分析随机观测误差对评价结果的影响。评价结果见表 7。

表 7 蒙特卡罗模拟样本的评价结果

Tab. 7 Evaluation results of samples simulated by Monte Carlo method

方差分布假定	4 月	5 月	6 月	7 月	8 月	9 月	10 月
方差为 1	2.215	2.223	2.461	2.083	2.475	2.375	2.038
方差为 5	2.672	2.395	2.416	2.395	2.262	2.286	2.581
方差为 10	2.537	2.688	2.544	2.455	2.925	2.682	2.631

分析表 7 发现，随机误差对评价结果有较大影响，且这种影响随着差异的增大而更加显著，王栋等^[3]在研究随机观测误差对水质评价影响中也证实了这一观点。以 8 月份为例，几乎改变了水质评价结果。

3 结论

综合权重的可变模糊识别模型在确定指标权重时包含了原始数据和科研人员对问题的认识，并通过计算指标隶属度来计算样本综合隶属度，包含了连续的指标隶属信息，以级别特征值作为水质样本级别包含了样本对所有水质级别的隶属信息，能够合理动态的评价水质状态，并通过变换模型参数 α, p ，以四个模型的均值作为最后结果，提高了评价结果的稳定性。

实例研究表明碧流河水库水质较好在 $\tilde{0}$ 到 $\tilde{0}$ 类之间，且各月间差异较小，8 月、9 月水质稍差，与其溶解氧低于其他月份的情况相符，验证了方法的合理性与可靠性。

蒙特卡罗法模拟的水质算例评价结果表明指标不确定性对水质评价有较大影响。建议在今后水质监测中加强动

态检测和质量控制，降低指标不确定性带来的影响，从而掌握动态的综合水质变化，为高效的水质管理提供支撑。

参考文献(References):

[1] 蒋艳, 彭期冬, 骆辉煌, 等. 淮河流域水质污染时空变异特征分析[J]. 水利学报, 2011, 11(42): 1283-1288. (JIANG Yan, PENG Qrdong, LUO Huihuang et al. Analysis of spatial temporal variation of water quality in huaihe river basin[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2011, 42(11): 1283-1288. (in Chinese))

[2] 王长娥. 贵州省红枫湖 百花湖和阿哈水库污染源的现状调查分析与评价[D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2009. (WANG Chang-e. Investigation, analysis and evaluation of Hong Feng Lake, Bai Hua Lake and Aha Reservoir about pollution source present condition in Guizhou province [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2009. (in Chinese))

[3] 王栋, 朱元胜. 随机观测误差对水环境评价的影响[J]. 水利学报, 2003, 34(10): 1-5. (WANG Dong, ZHU Yuan-sheng. Influence of stochastic observation error on water environment eval

- uation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2003, 34(10): 15. (in Chinese))
- [4] 王文强. 综合指数法在地下水水质评价中的应用[J]. 水利科技与经济, 2008(14): 54-55. (WANG Wen qiang. Application of aggregative index number method in groundwater quality evaluation[J]. Water conservancy science and technology and economy, 2008(14): 54-55. (in Chinese))
- [5] 陈守煜, 赵瑛琪. 模糊模式识别理论模型与水质评价[J]. 水利学报, 1991(6): 35-40. (CHEN Shou yu, ZHAO Ying qi. variable fuzzy sets mode and water quality evaluation[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1991(6): 35-40. (in Chinese))
- [6] 燕敏飞, 彭勇, 王国利. 基于熵权重的可变模糊理论在大连市地下水水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2012, 10(3): 58-61. (YAN Min fei, PENG Yong, WANG Guo li. Application of variable fuzzy sets model based on entropy weight in groundwater quality assessment of dalian[J]. South to North water Transfers and Water Science & Technology, 2012, 10(3): 58-61. (in Chinese))
- [7] 孟宪萌, 胡和平. 基于熵权的集对分析模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2009, 40(3): 257-262. (MENG Xian meng, HU He ping. Application of set pair analysis model based on entropy weight to comprehensive evaluation of water quality[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2009, 40(3): 257-262. (in Chinese))
- [8] 张先起, 梁川. 基于熵权的模糊物元模型在水质综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2005, 36(9): 1057-1061. (ZHANG Xian qi, LIANG Chuan. Application of fuzzy matter element model based on coefficients of entropy in comprehensive evaluation of water quality [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2005, 36(9): 1057-1061. (in Chinese))
- [9] 崔祥琨, 杨小芳. 灰色关联评价在矿区地下水水质分析中的应用[J]. 地下水, 2009, 141(31): 13-14, 43. (CUI Xiang Kun, YANG Xiao fang. Application of evaluation of gray correlation to analysis of the groundwater quality in the mining area[J]. Ground water, 2009, 141(31): 13-14, 43. (in Chinese))
- [10] 陈守煜. 可变模糊集理论与模型及其应用[M]. 大连: 大连理工大学出版社, 2009. (CHEN Shou yu. Theory and model of variable fuzzy sets and its application[M]. DaLian: DaLian university of thchnology press, 2009. (in Chinese))
- [11] 吕素冰, 许士国, 陈守煜. 水资源效益综合评价的可变模糊决策理论及应用[J]. 大连理工大学学报, 2011, 51(2): 269-273. (LU Su bing, XU Shi guo, CHEN Shou yu. Theory and application of variable fuzzy decision making in comprehensive benefit evaluation of water resources[J]. Journal of dalian university of technology, 2011, 51(2): 269-273. (in Chinese))
- [12] 谢志高, 习树峰, 葛萌. 可变模糊模型在水库水质评价中的应用[J]. 南水北调与水利科技, 2014, 12(2): 50-53. (XIE Zhi gao, XI Shu feng, GE Meng. Application of variable fuzzy model in evaluation of reservoir water quality[J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2014, 12(2): 50-53. (in Chinese))
- [13] 刘扬, 杨玉楠, 王勇. 层次分析法在我国小城镇分散型生活污水处理技术综合评价中的应用[J]. 水利学报, 2008, 39(9): 1146-1150. (LIU Yang, YANG Yu nan, WANG Yong. Application of analytic hierarchy process in comprehensive evaluation of decentralized domestic waste water treatment in small town[J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2008, 39(9): 1146-1150. (in Chinese))
- [14] 周林飞, 许士国, 孙万光. 基于压力-状态-响应模型的扎龙湿地健康水循环评价研究[J]. 水科学进展, 2008, 19(2): 206-213. (ZHOU Lin fei, XU Shi guo, SUN Wang guang. Healthy water circulation assessment of Zhalong wetland based on PSR model[J]. Advance in Water Science, 2008, 19(2): 206-213. (in Chinese))
- [15] 孟庆生. 信息论[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1989. (MENG Qing Sheng. Theory of information[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1989. (in Chinese))

(上接第 1074 页)

- [13] 薛瑞, 赵丽娜. 白石水库水质污染状况与防治对策[J]. 辽宁城乡环境科技, 2004, 24(3): 3-5. (XUE Rui, ZHAO Li na. The pollution of Baishi reservoir water quality and prevention countermeasures[J]. Liaoning Urban and Rural Environmental Science & Technology, 2004, 24(3): 3-5. (in Chinese))
- [14] 李文赞, 李叙勇, 王晓学. 20年来密云水库主要入库氮变化趋势和影响因素[J]. 环境科学学报, 2013, 33(11): 3047-3052. (LI Wen zan, LI Xu yong, WANG Xi xue. Trends and major influencing factors of the Total nitrogen concentration in the main rivers flowing into the Miyun reservoir in recent 20 years[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2013(11): 3047-3052. (in Chinese))
- [15] 李福明, 李宁, 傅金祥, 等. 白石水库水质现状与评价分析[J]. 沈阳建筑工程学院学报: 自然科学版, 2004, 20(2): 139-142. (LI Fu ming, LI Ning, FU Jin xiang et al. Baishi reservoir water quality present situation and evaluation analysis[J]. Journal of Shenyang Architectural and Civil Engineering Institute: natural science edition, 2004, 20(2): 139-142. (in Chinese))