

基于因子分析法的再生水水质 及其变动情况研究

汪 妮,白庆芹,张建龙,赵 杰

(西安理工大学 西北水资源与环境生态教育部重点实验室,陕西 西安 710048)

【摘 要】 【目的】针对再生水的应用特性,建立合理的、客观的水质评价模型,为再生水水质及其年内变动情况分析提供参考。【方法】以现行再生水水质标准(SL 368—2006)为参考,选取适当的污染物分析指标,采用因子分析法建立再生水水质评价模型,以西安市北石桥污水净化中心再生水出水为研究对象,以 2009 年 1—12 月的再生水监测数据为样本,利用建立的水质评价模型对其进行评价与分析。【结果】利用建立的再生水水质评价模型对 2009 年的水质资料进行分析,结果表明,北石桥污水净化中心再生水水质状况良好,1—12 月再生水水质综合得分均低于依据再生水水质标准所选定的第 13 个特殊样本水质(1.325)。其中,1 月水质较好,综合得分为 -0.889 ,8—10 月水质较差,得分为 $0.419\sim 0.573$,这与夏季进水温差导致生物处理系统出水水质变化有关。【结论】建立的基于因子分析法的再生水水质评价模型,在损失较少信息前提下,以少数的主因子取代原有的多维变量,简化了数据结构,且评价结果客观合理,可用于再生水的水质评价。

【关键词】 再生水;因子分析法;主因子;水质综合评价

【中图分类号】 X824

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2011)07-0217-06

Evaluation and research on reclaimed water quality and its fluctuation by factor analysis

WANG Ni, BAI Qing-qin, ZHANG Jian-long, ZHAO Jie

(Key Laboratory of Northwest Water Resources and Environment Ecology of MOE,
Xi'an University of Technology, Xi'an, Shaanxi 710048, China)

Abstract: 【Objective】 Many evaluation methods in common use are analyzed to observe their advantages and disadvantages. The research aims to establish a reasonable and impersonal evaluation model based on the application characteristics of reclaimed water so as to analyze the water quality and fluctuation in a research year. 【Method】 Several indexes are chosen from reclaimed water quality standard(SL 368—2006) to constitute evaluation model by factor analysis. Reclaimed water monitoring data from January to December of Beishiqiao wastewater treatment center in 2009 are used in the model to analyze the water quality. 【Result】 The research shows that the quality scores from January to December are all better than the one of the 13th special sample(1.325), which means high quality of the wastewater from Beishiqiao wastewater treatment center. In that, the best waste water quality is in January whose score is -0.889 while the lower quality is from August to October with scores from 0.419 to 0.573 . That is relevant to the small change in bio-treatment system caused by the higher water temperature of wastewater. 【Conclusion】 The established model based on factor analysis uses several main factors instead of original multi-dimensional, which means

* [收稿日期] 2010-11-30

[基金项目] 中国水利水电科学研究院开放研究基金项目(IWHRO2009015);陕西省教育厅科学技术研究计划项目(09JK657);国家自然科学基金项目(51079120)

[作者简介] 汪 妮(1974—),女,陕西西安人,副教授,博士,主要从事水文学及水资源研究。E-mail: wangni@xaut.edu.cn

simpler data structure and easier analysis. It also has the characteristic on the objectivity of evaluation results. Therefore, the model built in the paper can be used to evaluate the water quality of reclaimed water.

Key words: reclaimed water; factor analysis; main factor; integrated water quality evaluation

再生水是指污水经适当处理后,达到一定的水质指标,能满足某种使用要求,可以进行有益使用的水^[1]。再生水是水资源有效利用的一种形式,目前在缺水城市中推广利用比较迅速,为缓解日益紧张的城市水资源短缺问题开辟了新的途径^[2]。作为城市第二水源,再生水具有水量相对稳定可靠、处理技术成熟、投资和运行费用低等优点,但作为其水源的城市污水因本身来源复杂、水质随季节和地域变动明显^[3],相同的工艺过程下也会使再生水的出水水质产生波动,进而对不同产业类型及生态环境产生相应的影响。根据水质的不同,再生水可用于生活杂用、景观水体、工业低质用水、农业灌溉、地下水回灌等^[4-6]。再生水水质状况是由各种污染指标变量组成的复杂系统,各指标之间具有不同程度的相关性,每一指标都只从某一方面反映了水质质量,并且针对不同的用途又有着不同的标准和要求。因此,合理、客观地评价再生水的水质及其变动性,是城市污水回收利用及推广的关键。再生水的供水指标相对宽松,不如饮用水水质标准严格,某些时候再生水某一项水质指标有可能稍有超标,但其他指标可能要远远优于供水指标,这时就需要对再生水水质进行综合评价,以便使其得到合理利用。

现有水质分析的相关研究主要集中于常规水源(地表水和地下水),采用的方法包括传统方法和现代方法 2 种类型。在传统方法方面,朱叶华等^[7]采用综合水质指数法,对长江干流沙市江段 3 个断面的水质状况进行了分析评价,并根据单项指数的结果找出了沙市江段对水质影响最大的污染因子;廖杰等^[8]以概率统计法为基础,采用距离法计算了贝叶斯后验概率,以此分析评价了研究河流的水质状况。在现代方法方面,万金保等^[9]建立了地表水环境质量模糊综合评价模型,并对江西省的乐安河进行了水质评价,确定了该河流的主要污染物;侯保灯等^[10]以黑龙江扎龙国家级自然保护区湿地为研究对象,构建了基于改进熵权的灰色关联模型,计算了各样本的灰色关联度并对水质进行了综合评价;吴晓红等^[11]探讨了基于可拓学的水质评价方法,并对唐山东郊污水处理厂的再生水水质进行了评价。在实际的运用过程中,这些方法虽各具优点,但也存在着评价指标筛选的主观性和信息丢失等若干问题。

如综合污染指数法涉及到了评价因子权重的匹配问题,模糊综合评判法也要给定各水质参数的权重集,但效用函数和指标权重的给定却因人而异,不仅造成了评价模式难以通用,而且增加了应用的困难和人为臆断因素对结论的影响,致使评价结果具有很强的主观性。一个合理的、能客观反映水质及其变动情况的评价模型,对再生水资源的合理有效利用及水资源战略的制定是极为重要的。

随着多元统计方法的普及和应用,以主因子分析为基础的因子分析法广泛地应用于多因子系统的综合评价中。因子分析法充分地考虑了各评价指标之间的信息重叠,在最大限度地保留原有信息的基础上对高维变量进行了综合降维,且客观地确定各个指标的权重,避免了主观随意性,目前已在社会学、教育学、医学、工程评价等方面得到广泛应用^[12-13]。本研究将因子分析法引入再生水水质分析,以期对再生水的推广利用和开发及水资源规划提供科学依据。

1 基于因子分析法研究再生水水质的原理和步骤

因子分析法是从研究相关矩阵内部的依赖关系出发,将一些关系错综复杂的变量归结为少数几个相互独立的综合因子的一种多变量统计分析方法^[14-15],它与前述的方法有着不同的原理和特性。其基本思想是根据相关性进行变量分组,使得同组内的变量之间相关性较强,不同组的变量相关性较弱,每组变量组成一个公共因子,将原来多个彼此相关的变量转化为几个公共因子。在不损失或很少损失原有信息的基础上,以这些因子的线性函数来描述被评价的样本矩阵。

利用因子分析法对污水处理厂再生水出水的水质进行综合分析,假定已知 n 个再生水样本,各样本均有 m 个选定的水质监测指标 $D_j (j=1, 2, \dots, m)$, 因子分析的基本原理即提取公因子变量以简化评价体系,利用旋转使得因子更具有可解释性,计算样本的总得分^[16-17],从而实现再生水水质的定量化评价。具体的方法原理及步骤如下。

1) 原始样本矩阵的建立。

设再生水水质观测样本矩阵为 $\mathbf{X}$, 则:

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix}x_{11}&x_{12}&\cdots&x_{1m}\\x_{21}&x_{22}&\cdots&x_{2m}\\\vdots&\vdots&&\vdots\\x_{n1}&x_{n2}&\cdots&x_{nm}\end{bmatrix}。(1)$$

其中, n 为再生水样本数, m 为监测样本的污染物指标数, $x_{ij}(i=1,2,\cdots,n;j=1,2,\cdots,m)$ 为再生水水质污染指标的因子取值。

2)原始数据的标准化处理。由于各指标数据量纲不一致,数量间的差异很大,需要将不同度量的指标转化为同度量的指标,从而使各指标具有可比性。

本研究使用标准差对原始数据项进行标准正态分布处理,即对同一变量减去其均值再除以标准差。标准化后的矩阵记为 $\mathbf{X}'$,相应地将元素 x_{ij} 转化为,

$$x'_{ij}=(x_{ij}-\bar{x}_j)/S_j。(2)$$

式中: $\bar{x}_j=\sum_{i=1}^n x_{ij}/n$; S_j 为样本的标准差, $S_j=\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_{ij}-\bar{x}_j)^2/(n-1)}$ 。

3)相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 及其特征值和特征矩阵的构建。在标准化数据矩阵 $\mathbf{X}'$ 的基础上,计算原始指标相关系数矩阵 $\mathbf{R}$,其特征值记为 $\lambda_j(j=1,2,\cdots,m)$,且有 $\lambda_1>\lambda_2>\cdots\lambda_m\geq 0$,对应的特征向量为 $u_{ij}(i=1,2,\cdots,n,,j=1,2,\cdots,m)$,记为 U 。

设新变量 $\mathbf{Z}$,使 $\mathbf{X}'=\mathbf{U}'\mathbf{Z}$,则 $\mathbf{Z}$ 称为样本的公共因子矩阵, $Z_j(j=1,2,\cdots,m)$ 为样本的公共因子。

为了对样本的原始因子信息进行简化,常在 m 个公共因子中选取能最大限度保留原有信息的几个主因子,代替原始因子以便进行综合降维计算。若公共因子 Z_j 的方差贡献率 $e_j=\lambda_j/\sum_{j=1}^m \lambda_j\times 100\%$,并以 $\sum_{j=1}^m e_j$ 表示累计方差贡献率,通常选取 $\sum_{j=1}^m e_j$ 大于或等于 80% 的 p 个主成分作为主因子($p<m$),使主因子既保留原来指标 $D_1,D_2,\cdots,D_m$ 的信息,又起到降维的目的,即:

$$\mathbf{X}'=\mathbf{U}_{m\times p}\mathbf{Z}_{p\times n}+\boldsymbol{\epsilon}。(3)$$

式中: $\boldsymbol{\epsilon}$ 为主因子以外的残余部分,在计算中可被忽略。

4)因子荷载矩阵的建立。对特征向量 u_{ij} 进行规格化处理,记作 a_{ij} ,使 $a_{ij}=u_{ij}/\sqrt{\lambda_j}$,则初始因子荷载矩阵记为 $\mathbf{A}=(a_{ij})$,即第 i 个指标在第 j 个主因子上的负荷,或称为权,反映出第 i 个指标在第 j 个主因子上的相对重要性。则因子模型式(3)可变为:

$$\mathbf{X}'=\mathbf{a}_{m\times p}\mathbf{Z}_{p\times n}+\boldsymbol{\epsilon}。(4)$$

上述过程仅找出了原始变量的主因子,但每个

主因子的意义并不清楚,不便于对因子的含义进行解释,而且各因子对原始变量的代表性不突出,故未达到结构简单的准则。

为了使上述各主因子对变量的代表性更为突出,可通过方差极大正交旋转使新的因子载荷值的总方差最大、系数尽可能地接近于 0 或 1,从而加强各主因子对原始变量的代表性,并可以清楚地解释公共因子的含义。

5)因子得分及样本的综合评价。按照公共因子矩阵公式,可将公共因子反过来表示为变量的线性组合,采用最小二乘法估计公共因子 Z_j 的值,即有公共因子矩阵:

$$\mathbf{Z}=\mathbf{A}'\mathbf{R}^{-1}\mathbf{X}'。(5)$$

式中: $\mathbf{A}'$ 为初始因子荷载矩阵 $\mathbf{A}$ 的转置矩阵, $\mathbf{R}^{-1}$ 为相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 的逆阵。各因子的方差贡献率除以所有累计贡献率之和即得各因子的权重 W_j ,则各样本的综合得分 $Z_n=\sum_{j=1}^p Z_jW_j$ 。样本的综合得分越高,表明样本的水质越差,故可根据因子得分对各再生水样本进行水质评价,并对评价结果进行进一步排序。

2 实例应用

陕西西安北石桥污水净化中心再生水处理项目是国家再生水利用的试点工程,于 2004-02 开始供水,现已建成污水处理能力达 5 万 m^3/d 的再生水处理系统 1 套,远期污水处理能力为 10 万 m^3/d 。该厂自投入运行以来,经过多年的运行,水质、水量已趋于稳定^[18]。现以该中心 2009 年的再生水 1—12 月水质监测资料为评价的样本,分别给其编号为 1~12,综合现行的再生水水质标准,从中选取 12 个常规水质监测指标,即色度(D_1)、总硬度(D_2)、浊度(D_3)、化学需氧量($\text{COD}_{\text{cr}},D_4$)、生化需氧量(BOD_5,D_5)、悬浮物(D_6)、溶解性总固体(D_7)、氨氮($\text{NH}_3\text{-N},D_8$)、总磷(D_9)、铁(D_{10})、锰(D_{11})和 Cl^- (D_{12})作为分析计算的依据,各水质样本的指标监测值见表 1。由于这些指标是从不同侧面来衡量再生水水质的,各指标间难免会存在相关关系,且指标数量太多,表现的水质规律不太容易发现。故本研究采用因子分析法建模以达到降维分析的目的。为了对各待评样本水质优劣程度进行准确划分,现选取再生水水质标准(SL 368—2006)中工业、城市、农业和景观用水对各指标要求最严格的标准,作为第 13 个特殊水质样本参与评价,并以各样本得分与标准值的差距作为水质分析的依据。

以上述 1~13 个再生水水质为样本,以色度、总硬度等 12 个水质观测指标为变量(表 1),建立样本矩阵 $\mathbf{X}$,则有:

$$\mathbf{X}=\begin{bmatrix}13.25 & 192 & \cdots & 112.63 \\ 15.25 & 212 & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ 30.00 & 450 & \cdots & 250.00\end{bmatrix}。$$

表 1 陕西西安北石桥污水净化中心再生水水质分析的结果

样本 Sample	色度 Chroma D_1	总硬度/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Hardness D_2	浊度 Turbidity D_3	化学 需氧量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) CODcr D_4	生化 需氧量/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) BOD ₅ D_5	悬浮物/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) SS D_6	溶解性 总固体/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Total dissolved solids D_7	氨氮/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) NH ₃ -N D_8	总磷/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) TP D_9	铁/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Fe D_{10}	锰/ ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) Mn D_{11}	Cl ⁻ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$) D_{12}
1	13.25	192	1.08	15.47	6.50	1.95	615.0	2.64	0.45	0.14	0.06	112.63
2	15.25	212	1.76	28.25	7.45	1.30	677.5	5.49	0.53	0.19	0.06	0
3	20.00	236	2.02	23.96	4.00	1.60	792.0	6.58	0.46	0.17	0.08	0
4	18.25	235	1.06	26.05	2.50	2.20	882.5	5.65	0.48	0.07	0.08	121.83
5	17.80	232	1.41	38.60	3.52	2.60	752.0	4.21	0.42	0.06	0.06	115.00
6	21.00	230	1.80	36.80	3.58	3.35	707.5	4.10	0.52	0.17	0.11	109.50
7	24.90	217	1.09	27.35	4.75	8.10	680.0	2.43	0.24	0.15	0.05	100.75
8	21.00	250	0.76	33.00	3.75	5.50	787.5	8.41	0.42	0	0.04	100.05
9	22.50	229	0.78	32.50	4.25	2.30	692.5	6.79	0.68	0.07	0.06	105.00
10	20.50	243	0.81	22.95	3.75	2.60	777.5	7.48	0.76	0.07	0.06	101.15
11	16.60	232	0.84	33.14	3.20	2.84	770.0	8.92	0.45	0.06	0.05	102.44
12	19.00	227	1.25	34.00	5.20	2.16	610.0	2.08	0.66	0.05	0.06	93.60
13												
标准值 Standard	30.00	450	5.00	30.00	6.00	5.00	1 000.0	5.00	0.50	0.30	0.10	250.00

表 2 陕西西安北石桥污水净化中心再生水水质指标间的相关系数

指标 Index	D_1	D_2	D_3	D_4	D_5	D_6	D_7	D_8	D_9	D_{10}	D_{11}	D_{12}
D_1	1.000											
D_2	0.762	1.000										
D_3	0.611	0.889	1.000									
D_4	0.244	0.137	0.052	1.000								
D_5	-0.062	0.142	0.385	-0.347	1.000							
D_6	0.656	0.303	0.150	0.148	-0.068	1.000						
D_7	0.565	0.799	0.627	0.062	-0.291	0.189	1.000					
D_8	-0.005	0.100	-0.163	0.094	-0.429	-0.136	0.430	1.000				
D_9	-0.049	0.042	-0.067	0.003	0.018	-0.581	-0.071	0.217	1.000			
D_{10}	0.424	0.576	0.841	-0.232	0.568	0.119	0.329	-0.313	-0.172	1.000		
D_{11}	0.366	0.482	0.663	0.085	-0.029	-0.136	0.431	-0.213	0.124	0.660	1.000	
D_{12}	0.594	0.737	0.526	0.152	-0.069	0.419	0.543	-0.130	-0.013	0.238	0.329	1.000

表 3 相关系数矩阵的特征值及因子的方差贡献率

因子 No. of factors	特征值 Eigenvalue	方差贡献率/% Variance contribution	累计方差贡献率/% Accumulative contribution rate
1	4.651 7	38.764 1	38.764 1
2	2.251 4	18.761 8	57.525 9
3	1.770 6	14.755 1	72.281 0
4	1.062 4	8.853 0	81.134 0

按步骤 2)对原始矩阵 $\mathbf{X}$ 进行标准化,并依据步骤 3)计算,可得其相关系数(表 2)及相关系数矩阵 $\mathbf{R}$ 的特征值、方差贡献率以及样本的公共因子。由于前 4 个公共因子特征值均大于 1,且累积方差贡献率超过 50%,故选择这 4 个因子作为主因子(表 3)。

采用方差极大正交旋转,对原初始荷载因子进行旋转,可得到不同水质评价指标旋转因子荷载(表 4),以各主因子相应方差贡献率在总主因子累积方差贡献率中的比值,作为样本综合得分中各主因子的权重,计算可得各样本的综合得分(表 5)。

表 4 陕西西安北石桥污水净化中心评价指标的旋转因子荷载

指标 Index	因子 Factor			
	1	2	3	4
D_1	0.764 0	0.049 3	-0.370 6	0.243 3
D_2	0.950 9	0.139 9	-0.089 7	-0.010 1
D_3	0.931 1	-0.189 5	0.013 1	-0.197 6
D_4	0.120 1	-0.059 2	0.000 9	0.847 9
D_5	0.121 8	-0.567 7	0.026 7	-0.638 1
D_6	0.247 7	-0.024 1	-0.907 2	0.182 4
D_7	0.771 4	0.560 7	-0.070 9	-0.001 6
D_8	-0.019 2	0.915 7	0.153 8	0.011 8
D_9	0.036 0	0.116 3	0.800 7	0.127 6
D_{10}	0.716 8	-0.394 0	-0.011 2	-0.476 8
D_{11}	0.713 4	-0.259 2	0.368 8	0.079 1
D_{12}	0.696 4	0.016 7	-0.238 3	0.270 3

表 5 陕西西安北石桥污水净化中心旋转主因子及样本的综合得分

Table 5 Values of the rotated main factors and samples of Beishiqiao wastewater treatment center in Xi'an, Shaanxi Province					
样本 Sample	$Z(i,1)$ Factor 1	$Z(i,2)$ Factor 2	$Z(i,3)$ Factor 3	$Z(i,4)$ Factor 4	Z_n Sample value
1	-0.893 4	-1.047 0	-0.093 8	-1.859 0	-0.889 0
2	-1.008 8	-0.563 0	0.487 3	-1.428 2	-0.679 0
3	-1.187 9	1.067 2	-0.446 6	-0.617 2	-0.469 0
4	-0.578 7	1.225 0	-0.288 8	0.509 7	0.010 0
5	-0.279 7	-0.328 8	-0.295 3	1.392 8	-0.111 0
6	-0.467 3	-0.766 5	-0.056 1	1.725 7	-0.222 0
7	0.563 6	-1.171 0	-2.514 1	-0.202 3	-0.481 0
8	0.595 2	1.030 7	-0.726 0	0.257 0	0.419 0
9	0.358 5	-0.039 8	1.293 2	0.462 5	0.448 0
10	0.318 6	0.949 1	1.435 7	-0.546 7	0.573 0
11	-0.348 6	1.301 3	-0.231 6	0.387 8	0.135 0
12	0.080 2	-1.790 2	1.315 6	0.724 6	-0.057 0
13	2.848 1	0.133 0	0.120 5	-0.806 6	1.325 0

在表 4 中,因子荷载表示指标与因子间的相关关系,某一因子相应于指标 D_i 的荷载值在 4 个主因子中最大,即表明该主因子能够代表指标 D_i 。由此可知,主因子 1 主要代表色度、总硬度、浊度、溶解性总固体等物理性指标和铁、锰、氯化物等无机污染物;主因子 2 代表 $\text{NH}_3\text{-N}$;主因子 3 代表悬浮物和总磷,主因子 4 代表 BOD_5 和 COD_{Cr} 2 种重要的有机物。在本次分析样本中,主因子 1 的方差贡献率为 38.764 1%,远远大于其他主成分因子,所以再生水水质主要是由第 1 主成分即物理性指标和无机类指标控制,其次受控于水体中氨氮污染物的浓度,而 BOD_5 等有机污染指标对北石桥污水净化中心水质的影响最小。

由表 5 可知,2009 年全年北石桥污水净化中心

再生水出水水质均较优,达到了标准水质的要求,能满足工业、城市、农业和景观用水对再生水水质的要求。但再生水水质随着季节变化具有一定的变动性,以 8—10 月水质较差,该变动可能与夏季进水温差别导致生物处理系统出水水质变化有关。

3 结 论

再生水利用是城市节水的重要途径,也是城市水资源利用中有别于常规水的“第二水源”,其水质状况取决于多项污染物指标及指标之间的相关关系,是一个复杂的系统。简单地利用现行的再生水回用标准,对单个污染指标进行分析从而判别再生水的水质存在着一定的不合理性。本研究基于因子分析法建立的再生水水质分析模型,在损失很少信

息的前提下,将本例中影响水质的 12 个指标转化为 4 个综合性因子,从而更容易抓住主要因素,客观地揭示监测变量与水质之间的关系及其规律性,使问题得以简化,提高了分析效率。

本研究以西安北石桥污水净化中心各月平均水质指标为样本进行实例计算,并与现行再生水回用标准构成的特殊样本的计算结果进行对比,以样本综合得分作为依据,可定量地、快速地对再生水水质进行综合评价,并易于对再生水的水质波动情况进行分析,从而使再生水企业可以根据运行管理现状,针对区域内潜在用户特点,对出水水质做出小幅调整以适应市场需求,为再生水资源的开发、利用和系统优化提供客观的参考依据。

本研究建立的再生水水质模型不仅可作为再生水水质综合分析的工具,对同类型的其他再生水企业出水,以及再生水企业内部不同工艺过程出水水质分析具有一定的参考意义,而且为再生水价值、价格的合理确定以及促进再生水资源的进一步推广利用提供了参考依据。

[参考文献]

- [1] 肖 锦. 城市污水处理及回用技术 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002: 13-17.
Xiao J. Wastewater treatment and reclaiming technology [M]. Beijing: Chemistry Industry Publishing Company, 2002: 13-17. (in Chinese)
- [2] 徐有生, 丁朝模. 污水资源化是改善环境解决淡水资源短缺的重要途径 [J]. 中国工程科学, 2005, 7(增刊 1): 112-116.
Xu Y S, Ding C M. Sewage recycling: an essential solution to the problem of freshwater shortage [J]. Engineering Science, 2005, 7(S1): 112-116. (in Chinese)
- [3] 张卫平, 董学林, 刘洪禄. 再生水水质变化规律及灌溉安全性评价研究 [J]. 现代商贸工业, 2009, 21(21): 273-275.
Zhang W P, Dong X L, Liu H L. Research on reclaimed water quality change and on the irrigation security evaluation [J]. Modern Business Trade Industry, 2009, 21(21): 273-275. (in Chinese)
- [4] 郭 瑾, 王淑莹. 国内外再生水补给水源的实际应用与进展 [J]. 中国给水排水, 2007, 23(6): 10-14.
Guo J, Wang S Y. Practical application and development of surface and underground water sources recharged with reclaimed water [J]. China Water & Wastewater, 2007, 23(6): 10-14. (in Chinese)
- [5] Zeng S Y, Chen J N, Fu P. Strategic Zoning for urban wastewater reuse in China [J]. Water Resource Manage, 2008, 22: 1297-1309.
- [6] Niemczynowicz J. Urban hydrology and water management—present and future challenges [J]. Urban Water, 1999, 1: 1-14.
- [7] 朱叶华, 曾 涛, 杨 军, 等. 综合水质指数法对长沙市江段

- 的水质评价 [J]. 南水北调与水利科技, 2010, 8(5): 122-124.
Zhu Y H, Zeng T, Yang J, et al. Water quality assessment in Shashi of the Yangtze River by comprehensive water quality index [J]. South to North Water Transfers and Water Science & Technology, 2010, 8(5): 122-124. (in Chinese)
- [8] 廖 杰, 王文圣, 丁 晶. 贝叶斯公式在河流水质综合评价中的应用 [J]. 四川师范大学学报: 自然科学版, 2007, 30(4): 519-522.
Liao J, Wang W S, Ding J. Comprehensive assessment of water quality on main rivers in Sichuan by Bayes method [J]. Journal of Sichuan Normal University: Natural Science Edition, 2007, 30(4): 519-522. (in Chinese)
- [9] 万金保, 侯得印. 水质模糊综合评价模型的建立与应用 [J]. 中国给水排水, 2006, 22(20): 101-104.
Wan J B, Hou D Y. Development and application of fuzzy comprehensive evaluation model of water quality [J]. China Water & Wastewater, 2006, 22(20): 101-104. (in Chinese)
- [10] 侯保灯, 李佳蕾, 潘 妮, 等. 基于改进熵权的灰色关联模型在湿地水质综合评价中的应用 [J]. 安全与环境学报, 2008, 8(6): 81-83.
Hou B D, Li J L, Pan N, et al. Application of grey relevancy model based on ameliorated entropy for comprehensive evaluation of wetland environment quality [J]. Journal of Safety and Environment, 2008, 8(6): 81-83. (in Chinese)
- [11] 吴晓红, 王勇华. 可拓学在污水处理厂再生水水质评价中的应用研究 [J]. 安徽农业科学, 2010, 38(15): 8159-8161, 8166.
Wu X H, Wang Y H. Study on the application of extension theory in the quality assessment of reclaimed water from wastewater facility [J]. Journal of Anhui Agri-Sci, 2010, 38(15): 8159-8161, 8166. (in Chinese)
- [12] 张 萌, 曹令秋. 基于因子分析综合评价方法的区域城乡经济发展水平监测的实证研究 [J]. 经济地理, 2010, 30(9): 1440-1443, 1472.
Zhang M, Cao L Q. Research on urban and rural economy development level integrated evaluation based on factor analysis method [J]. Economic Geography, 2010, 30(9): 1440-1443, 1472. (in Chinese)
- [13] 杨彩霞, 孙广恭, 郝凤娟, 等. 因子分析法在医院医疗质量评价中的应用 [J]. 山东大学学报: 医学版, 2010, 48(7): 126-128, 136.
Yang C X, Sun G G, Hao F J, et al. Medical quality evaluation and its application based on factor analysis [J]. Journal of Shandong University: Health Science, 2010, 48(7): 126-128, 136. (in Chinese)
- [14] 王 龚, 汤瑞凉, 郎 燕. 因子分析法的应用研究: 在资源与环境可持续发展综合评价中的应用 [J]. 资源开发与市场, 2004, 20(6): 414-415.
Wang G, Tang R L, Lang Y. Research and application on resource and environment sustainable development evaluation based on factor analysis [J]. Resource Development & Market, 2004, 20(6): 414-415. (in Chinese)