

# 清河流域分水期污染物总量减排绩效评估

唐玉兰<sup>1</sup>,何亚婷<sup>1</sup>,孙杨<sup>2</sup>,李学峰<sup>2</sup>,盛泽生<sup>1</sup>

(1. 沈阳建筑大学市政与环境工程学院,辽宁 沈阳 110168;

2. 沈阳建筑大学交通与测绘工程学院,辽宁 沈阳 110168)

**摘要** 目的 遏制水环境污染,提升水环境管理水平。方法 构建包含清河流域环境状况、操作状况和管理状况的绩效评估指标体系,运用集对分析法对清河流域2005—2010年丰水期、平水期和枯水期的水污染物总量减排绩效进行评估。结果 丰水期的绩效水平在三个水期中最高,枯水期绩效水平最低,但是丰、平、枯三个水期总体水平变化趋势基本一致,整体呈上升趋势。结论 经过实施一系列污染物减排措施后,清河流域水污染物总量减排绩效水平有了显著的提高,说明政府采取的结构减排和工程减排措施在丰水期、平水期和枯水期均对水污染治理有很大的改善效果。

**关键词** 总量减排;绩效评估;集对分析;分水期

中图分类号 TU992.1;X522

文献标志码 A

**引用格式**:唐玉兰,何亚婷,孙杨,等.清河流域分水期污染物总量减排绩效评估[J].沈阳建筑大学学报(自然科学版),2024,40(6):1137-1143.(TANG Yulan,HE Yating,SUN Yang,et al. Performance evaluation of total water pollutant emissions reduction in Qinghe river during different water periods[J]. Journal of Shenyang jianzhu university (natural science),2024,40(6):1137-1143.)

## Performance Evaluation of Total Water Pollutant Emissions Reduction in Qinghe River during Different Water Periods

TANG Yulan<sup>1</sup>,HE Yating<sup>1</sup>,SUN Yang<sup>2</sup>,LI Xuefeng<sup>2</sup>,SHENG Zesheng<sup>1</sup>

(1. School of Municipal and Environmental Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168;

2. School of Transportation and Gematics Engineering,Shenyang Jianzhu University,Shenyang,China,110168)

**Abstract**:In order to study the implementation performance of the total water pollution reduction measures in the Qinghe River Basin, the performance evaluation of the total water pollutant reduction in this basin's wet season,normal season and dry season was carried out by the set pair analysis (SPA). A performance evaluation index system including the environmental status, operation status and management status of Qinghe River Basin was constructed. According to the

收稿日期:2022-09-01

基金项目:水体污染控制与治理科技重大专项(2018ZX07601-004)

作者简介:唐玉兰(1971—),女,教授,博士,主要从事水体污染治理、土壤污染调查等方面研究。

evaluation results of the three water periods, the performance level in the wet season is the highest, and the performance level in the dry season is the lowest. However, the overall level of the three water periods is basically the same, and the overall trend is on the rise. This shows that after a series of measures such as the three major emission reductions, the control of point source pollution in industry and life has great results, but the control of non-point source pollution such as livestock and poultry breeding is still relatively weak. River managers need to rectify livestock and poultry breeding projects and control livestock and poultry breeding. The discharge of pollutants should also increase the control of ammonia nitrogen pollutant emissions.

**Key words:** total discharge reduction; performance evaluation; set pair analysis (SPA); different water periods

为了遏制水环境污染,我国政府颁布了一系列相关法律法规和标准,同时采取了很多措施,包括实行排污许可制度和排污收费制度、调整产业结构、加大政府对流域水环境治理的资金投入等<sup>[1]</sup>。学者们也提出了一些流域水环境管理评估方法,例如层次分析法、距离综合评价法、多目标灰色决策评价法、人工神经网络评价法、模糊综合评价法和集对分析法等。层次分析法在赋权时主观色彩太强,导致对客观目标的评价不准确。距离综合评价法在实施过程中采用的计算公式对评估结果影响偏大。多目标灰色决策评价法评估结果较准确,但对评估人员要求较高,评估过程也比较繁杂。人工神经网络评价法中,样本性质会影响评价结果,当样本协同性较差时易出现样本均化现象。模糊综合评价法适用性较强,但缺点是无法解决信息重复性问题,而且有时会丢失部分重要的评价信息,从而影响评估结果的区分度<sup>[2-3]</sup>,导致评价精度较低<sup>[4]</sup>。这些方法在运用时均存在着一定的局限性。集对分析法(Set Pair Analysis, SPA)是一种多属性评价和多目标决策的综合评价方法,是我国学者赵克勤于1989年提出的系统分析方法<sup>[5]</sup>。SPA的核心思想是将评价对象和评价等级标准分别定义为两个集合,将其组成一个集对,进行定量刻画与分析,通过建立反映集对间确定与不确定关系的数学表达式,将评价对象间不确定性的辩证认识转换成数学关系的分析<sup>[6]</sup>,

因而可以大大提高信息的利用率,最大限度地避免重复性指标干扰,使得评价结果客观,更加贴近实际情况。

清河流域地处东北地区,气候特征明显,季节性变化显著,流域的水体污染会随着区域的气温、降雨量、径流等变化发生一定的改变,环境影响因素多,涉及范围广,因此,需要用科学合理的综合评价方法才能获得一目了然并具有可比性的评估结果<sup>[7]</sup>。为此,笔者利用集对分析法分丰水期、枯水期和平水期对清河流域水污染物总量减排进行绩效评估,从六个方面着手,分析3个时期清河流域水环境改善情况和总量减排措施实施的绩效情况。

## 1 研究地区概况

清河是辽河的一级支流。流域内降水季节性很强,主要集中在汛期,降水量占全年的70%~75%,汛期径流量占年径流量的70%<sup>[8]</sup>。清河年际变化比较明显,1964年(丰水年)年径流量为2.87亿m<sup>3</sup>,相当于1982年(枯水年)0.0564亿m<sup>3</sup>的50.9倍,相当于2007年(平水年)0.8995亿m<sup>3</sup>的3.2倍<sup>[9]</sup>。

## 2 集对分析评估模型介绍

在SPA法中,通常用同一度、差异度和对立度表示事物的确定性和不确定性,三者之间的关系采用联系度表示<sup>[5,10]</sup>:

$$\mu = a + bi + cj.$$
 (1)

式中: $\mu$  为联系度; $a$  为同一度; $b$  为差异度; $c$  为对立度; $i$  为差异度系数,在 $[-1,1]$ 中取值, $i$ 取 $-1$ 与 $1$ 都是确定性的,随着 $i \rightarrow 0$ ,不确定性明显增加; $j$  为对立度系数,通常情况下取 $-1$ 。

3 绩效管理 水平评估模型建立

3.1 评估指标体系的建立

清河流域是一个受众多因素影响的复杂水域系统。在综合考虑指标体系构建原则<sup>[11]</sup>和数据收集的基础上,建立包含水环境状况指标(EPI)、管理状况指标(MPI)、操作状况指标(OPI)三大类的指标体系,包含六个方面的18个评估指标(C1~C18),如图1所示。

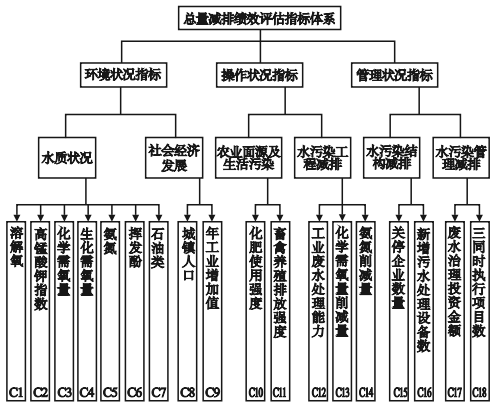


图1 清河流域总量减排绩效的评估指标体系

Fig.1 Evaluation index system of total emission reduction performance in Qinghe River Basin

3.2 数据来源及处理

水质指标数据来源于铁岭市环境保护监测站,其他反映社会、经济、污染物减排状况的相关指标数据通过铁岭市环保局网站、铁岭市环境状况公报、铁岭市统计年鉴和现场调查获得。

由于指标体系中各个指标的量纲不一致,不具有可比性,因此对指标进行无量纲化处理。选用“极差化”无量纲法进行标准化

处理,公式如下:

$$x = \begin{cases} \frac{\chi - m}{M - m}; \\ \frac{M - \chi}{M - m}. \end{cases}$$
 (2)

式中: $m$  为各指标观测值 $\chi$ 的最小值; $M$  为各指标观测值 $\chi$ 的最大值。

3.3 指标权重确定

综合考虑了清河流域丰水期、平水期、枯水期三个水期污染物总量减排绩效评估指标体系数据的搜集状况,最终采用了层次分析法<sup>[12]</sup>和均方差法耦合的组合赋权法<sup>[13]</sup>来确定指标权重。既遵照客观数据,也考虑了人的主观经验,是当前指标权重确定应用最为广泛的一种方法<sup>[14]</sup>。权重结果如表1所示。

表1 分水期的指标权重结果

Table 1 The index weight results of the different water periods						
时段	C1	C2	C3	C4	C5	C6
丰水期	0.082 4	0.051 1	0.063 4	0.044 1	0.063 9	0.041 9
枯水期	0.065 1	0.075 9	0.054 1	0.041 3	0.046 0	0.057 3
平水期	0.048 9	0.054 4	0.080 2	0.042 3	0.085 0	0.034 9
时段	C7	C8	C9	C10	C11	C12
丰水期	0.044 1	0.028 7	0.083 6	0.073 3	0.052 5	0.052 5
枯水期	0.038 5	0.040 1	0.067 8	0.055 6	0.111 9	0.053 4
平水期	0.059 1	0.033 8	0.062 4	0.078 3	0.050 3	0.069 5
时段	C13	C14	C15	C16	C17	C18
丰水期	0.040 6	0.051 1	0.042 1	0.042	0.046 3	0.089 7
枯水期	0.042 1	0.045 3	0.040 7	0.044 9	0.063 0	0.057 0
平水期	0.038 4	0.051 0	0.043 4	0.047 5	0.045 5	0.075 1

3.4 绩效管理 水平评价准则制定

水质指标参照我国地表水质标准,综合考虑清河流域的经济发展水平与总量减排管理水平改善能力,参考国内外文献制定了适合清河流域分水期的水污染物总量减排绩效评估准则。将评估准则分为五个等级,选取不同指标在同一评价标准等级下评价标准区间的端点值构造评价准则,如表2所示。

表2 水污染物总量减排绩效评估等级标准

Table 2 The performance evaluation grade standard of total water pollutant emission reduction

指标	一级	二级	三级	四级	五级
C1	7.5,10	6,7.5	5,6	3,5	0,3
C2	0,2	2,4	4,6	6,10	10,15
C3	0,15	0,15	15,20	20,30	30,40
C4	0,3	0,3	3,4	4,6	6,10
C5	0,0.15	0.15,0.5	0.5,1	1,1.5	1.5,2
C6	0,0.002	0,0.002	0.002,0.005	0.005,0.01	0.01,0.1
C7	0,0.05	0,0.05	0,0.05	0.05,0.5	0.5,1
C8	35,35.5	35.5,36	36,36.5	36.5,37	37,37.5
C9	50,70	35,50	30,35	20,30	10,20
C10	0,70	70,140	140,210	210,280	280,350
C11	0,1 000	1 000, 000	2 000,3 500	3 500,5 000	5 000,6 500
C12	400,550	300,400	250,300	100,250	50,100
C13	600,750	450,600	300,450	100,300	0,100
C14	80,100	60,80	40,60	20,40	0,20
C15	8,10	6,8	4,6	2,4	0,2
C16	12,20	9,12	6,9	3,6	0,3
C17	1 200,1 500	900,1 200	600,900	300,600	0,300
C18	32,50	24,32	16,24	8,16	0,8

4 评估结果与分析

4.1 绩效管理水平评估计算

运用 SPA 对清河流域 2005—2010 年丰水期、平水期、枯水期水污染物总量减排绩效进行综合评估,分析评估结果,查找出绩效水平变化的根本原因。SPA 中有两个集合  $A$  和  $B$ ,集合  $A$  为清河流域原始指标,集合  $B$  为评价等级。将  $B$  集合分为五个等级,记为  $B_i$  ( $i=1,2,\cdots,5$ )。集合  $A$  与  $B_i$  之间的联系度表示为  $\mu(A,B_i)$ ,通过比较  $\mu(A,B_i)$  的大小,最终确定清河流域每年分水期水污染物总量减排绩效管理水平所处的评价等级。以 2005 年清河流域平水期水污染物总量减排绩效管理水平为例,绩效管理水平与一级评价等级  $B_1$  之间联系度  $\mu(A,B_1)$  的计算步骤如下<sup>[15-16]</sup>:

①分析 2005 年各评价指标数据与五个评价等级之间的关系,对 18 个指标进行归类分配,一级(C8)、二级(C16)、三级(无)、四级(C1、C7、C11、C12、C18)和五级(C2、C3、C4、C5、C6、C9、C10、C13、C14、C15、C17)。

②确定水污染物总量减排绩效管理水平与一级评价等级之间联系度的表达式:

$$\mu(A,B_1) = \sum_{i=1}^l \mu_i + \sum_{k=1}^3 t_k(a_k + b_k i + c_k j) + \sum_{j=1}^{15} v_j j = 0.033\ 8 + 0.047\ 5\ i_1 + 0.939\ 1\ j.$$

(3)

式中: $i_1$  为处于评价等级  $B_2$  中的指标反映的 2005 年平水期水污染物总量减排绩效管理水平与一级评价等级之间的差异度; $j$  为指标值处于评价等级  $B_3$ 、 $B_4$ 、 $B_5$  中的指标反映的水污染物总量减排绩效管理水平与一级评价等级之间的对立度。将权重值为 0.047 5

指标反映的差异度记为 $\mu(\chi_1, B_1^1)$ 。该指标在评价等级 $B_2$ 内的标准限值分别为 $S_{(1)}^1 = 9$ 和 $S_{(2)}^1 = 16$ 。则其与评价等级 $B_1$ 间的差异度系数 $i_k$ 可表示为

$$\mu(\chi_1, B_1^1) = a_1 + b_1 i + c_1 j = \frac{S_{(1)}^1 S_{(2)}^1}{(S_{(1)}^1 + S_{(2)}^1) x_1} + \frac{(S_{(2)}^1 - x_1)(x_1 - S_{(1)}^1)}{(S_{(1)}^1 + S_{(2)}^1)} i + \frac{x_1}{(S_{(1)}^1 + S_{(2)}^1)} j = 0.5714 + 0.4286 j. \quad (4)$$

③将式(4)代入式(3)中,得到2005年平水期水污染物总量减排绩效管理水平与 $B_1$ 间的联系度表达式为

$$\mu(A, B_1) = \sum_{i=1}^l \mu_i + \sum_{k=1}^l t_k (a_k + b_k i + c_k j) + \sum_{j=1}^{16} v_j j = 0.0609 + 0.9391 j. \quad (5)$$

经计算得出, $\mu(A, B_5) > \mu(A, B_4) > \mu(A, B_3) > \mu(A, B_2) > \mu(A, B_1)$ ,因此,2005年清河流域平水期水污染物总量减排绩效管理水平评价等级为五级。

依照上述步骤,同理可得2006—2010年清河流域各水期与每个评价等级的联系度,最终评估结果如表3~表5所示。

表3 各年丰水期与各评价等级间的联系度值

Table 3 The connection degree between the wet period of each year and different evaluation grades

年份	一级	二级	三级	四级	五级	结果
2005	-0.590	-0.590	-0.417	0.047	-0.070	四级
2006	-0.823	-0.658	-0.394	0.078	0.228	五级
2007	-0.766	-0.796	-0.735	-0.009	0.419	五级
2008	-0.539	0.098	-0.031	-0.329	-0.586	二级
2009	-0.156	-0.504	-0.498	-0.248	-0.367	一级
2010	-0.158	-0.284	-0.255	-0.282	-0.517	一级

表4 各年平水期与各评价等级间的联系度值

Table 4 The connection degree between the normal water period of each year and different evaluation grades

年份	一级	二级	三级	四级	五级	结果
2005	-0.878	-0.872	-0.713	0.238	0.465	五级
2006	-0.822	-0.641	-0.390	0.196	0.226	五级
2007	-0.861	-0.857	-0.616	0.156	0.399	五级
2008	-0.897	-0.526	-0.160	0.048	0.013	四级
2009	-0.571	-0.546	-0.204	-0.144	-0.279	四级
2010	-0.399	-0.277	-0.181	-0.264	-0.437	三级

表5 各年枯水期与各评价等级间的联系度值

Table 5 The connection degree between the low water period of each year and different evaluation grades

年份	一级	二级	三级	四级	五级	结果
2005	-0.809	-0.846	-0.667	-0.045	0.498	五级
2006	-0.893	-0.776	-0.422	0.002	0.334	五级
2007	-0.791	-0.584	-0.449	-0.170	0.213	五级
2008	-0.889	-0.788	-0.447	0.018	0.256	五级
2009	-0.889	-0.555	0.019	0.010	-0.063	三级
2010	-0.758	-0.233	0.186	-0.074	-0.438	三级

4.2 评估结果分析

4.2.1 丰水期

在丰水期,清河流域2006、2007年的水污染物总量减排绩效管理水平最差,2010年最好。2005—2010年总体呈上升趋势,期间有反复(见图2(a))。2006年和2007年绩效管理水平下滑,尤其2007年,水质状况指标中COD、高锰酸盐指数、BOD、氨氮等四项超过地表水Ⅴ类标准,最高超标3.7倍,最低超标0.3倍。原因是虽然处于“十一五”开端,对废水治理的投资金额相对较大,但是这两年降水量少,而污水排放量没有减少,甚至高于往年,导致清河河道污径比增加。2008年,尽管污水治理的投资金额没有持续增加,减少了很多,但水污染治理工程减排措施相关指标提高,加大了产业结构调整力度,特别是对造纸厂的整治,河道接纳的工业废水量较往年降低很多。水质状况得到了改善,均未出现劣Ⅴ类指标,尤其是COD和氨氮,得到了一定的控制。2010年,水质状况较好,各污染物浓度均未出现超标情况。2010年丰水期降雨量高于往年,因此河道补给水量高于往年,导致排放到水体中的污染物得到稀释,浓度降低,而且一些新建的污水处理厂在6、7月份都投入了使用,废水处理能力也得到了提高,对总体减排绩效的贡献率较大。

4.2.2 枯水期

在枯水期,清河流域水污染物总量减排绩效管理水平从2005至2010年总体呈上升



趋势(见图 2(b))。前几年都一直处于很低水平,2005—2008 年间至少有四项水质指标出现超标,分别为 COD、高锰酸盐指数、BOD 和氨氮,平均超标倍数为 5.9、4、7.8 和 0.5 倍。首先,在枯水期,清河流域降水量少,河道水量变少,有的河段会出现断流情况,河流基本失去了水体自净能力,导致水中污染物积累越来越多;其次,在枯水期一些采用受温度限制的生物法处理废水的能力与丰水期、平水期相比有所下降<sup>[17]</sup>;最后,水污染工程减排相关指标的绩效管理水平也比较低,尤其是废水处理能力较低。权重较大的水质指标状况变差,对绩效管理水平影响极大。2009 年,随着对一些企业废水排放治理力度的加大,以及新增污水处理设备后,水质得到了明显改善,绩效管理水平开始提高。

4.3.3 平水期

在平水期,清河流域 2005 年水污染物总量减排绩效管理水平最差,2010 年最好,呈上升趋势(见图 2(c))。2005—2007 年绩效管理水平一直处于较低水平。首先是权重较大的水质状况指标绩效中,至少有三项水质指标出现超标现象,但是没有枯水期严重;其次是农业面源及生活污染比较严重,因为在平水期,正是作物种植的时期,化肥的施用量较丰水期大,而且施用比较集中,氨氮和 COD 的控制效果很差,对绩效管理水平有很大的影响。直到 2008 年,政府提出了一些政策和管控措施,尽管 2008 年减排资金减少了,农业面源相关指标如化肥使用强度没有得到改善,但是绩效管理水平还是有了很大的提升。2008 年水质指标只有 BOD 出现了轻微超标的现象,COD、氨氮削减量较大,直接降低了水体中 COD 和氨氮的浓度。到 2009 年化肥使用量也得到了一定的控制,未出现水质超标现象,大部分水质指标已优于Ⅲ类水质标准,但是一直处于较低水平的结构减排相关指标还有待进一步加强。

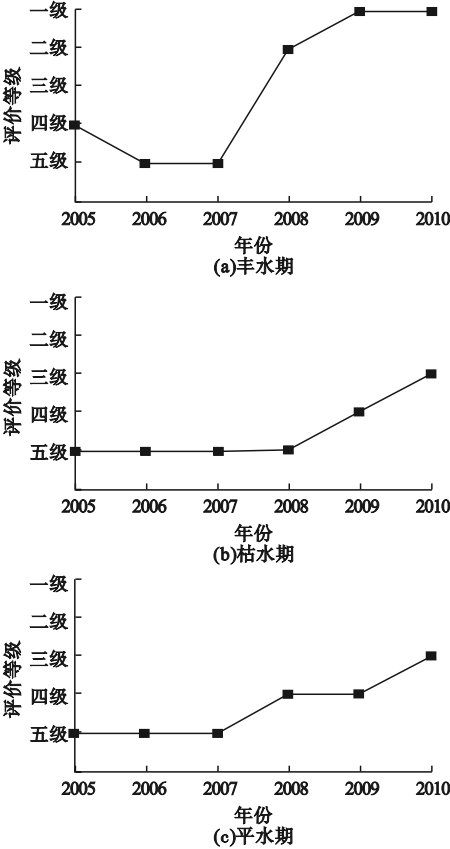


图 2 分水期 SPA 评估结果

Fig. 2 SPA evaluation results in different water periods

5 结 论

(1) 运用 SPA 对清河流域 2005—2010 年丰水期、平水期、枯水期水污染物总量减排绩效进行综合评估,建立了三大类六个方面的 18 个指标,由分析评估结果可知,水质状况指标对绩效管理水平的提高有很大的贡献率,证明了在确定权重时,水质指标的权重较大是科学合理的。

(2) 清河流域丰、平、枯水期的水污染物总量减排绩效管理水平从 2005 至 2010 年总体水平的变化趋势基本一致,均呈上升趋势。2008 年以前绩效管理水平较低,从政府开始实施一系列污染减排措施后,有了显著的提高,说明政府采取的结构减排和工程减排措施对水污染治理有很大的改善效果。

(3)清河流域水污染物总量减排绩效管理在丰水期最高,枯水期最低;枯水期最低的原因可能是流域内水量变少,河流基本失去了水体自净能力以及废水处理受温度的限制导致处理能力与丰水期、平水期相比有所下降。

参考文献

[1] 薛东辉. 基于 ISO 14001 标准的区域环境管理体系规划研究[D]. 厦门:厦门大学,2001.  
(XUE Donghui. Study on regional environmental management system planning based on ISO 14001 standard [D]. Xiamen: Xiamen University,2001. )

[2] 白云鹏,陈永健. 常用水环境质量评价方法分析[J]. 河北水利,2007(6):18-19.  
(BAI Yunpeng,CHEN Yongjian. Analysis of commonly used methods for water environment-al quality assessment [J]. Hebei water resources,2007(6):18-19. )

[3] 李文清. 基于 ISO 14031 的玉清湖水库环境绩效评估研究[D]. 济南:山东大学,2009.  
(LI Wenqing. Environmental performance evaluation of Yuqing lake reservoir study based on the ISO14031 [D]. Ji'nan: Shandong University, 2009. )

[4] 邱林,唐红强,陈海涛,等. 集对分析法在地下水水质评价中的应用[J]. 节水灌溉,2007(1):13-15.  
(QIU Lin,TANG Hongqiang,CHEN Haitao, et al. Application of set pair analysis in groundwater quality evaluation [J]. Water saving irrigation,2007(1):13-15. )

[5] 赵克勤. 集对分析及其初步应用[J]. 大自然探索,1994(1):67-72.  
(ZHAO Keqin. Set pair analysis and its preliminary application [J]. Exploration of nature,1994(1):67-72. )

[6] 邓红霞,李存军,朱兵,等. 基于集对分析法的生态承载能力综合评价方法[J]. 长江科学院院报,2006(6):35-38.  
(DENG Hongxia,LI Cunjun,ZHU Bing,et al. Integrative assessment of eco-carrying capacity based on set pair analysis [J]. Journal of Changjiang river scientific research 2006(6): 35-38. )

[7] 张泽玉. 黄河济南段环境绩效评估研究[D]. 济南:山东大学,2006.  
(ZHANG Zeyu. Study on environmental performance evaluation of Ji'nan section of Yellow River [D]. Ji'nan:Shandong University,2006. )

[8] 周新川,白天竺,郭涛. 清河流域水文特性简析[J]. 地下水,2010,32(6):161-162.  
(ZHOU Xinchuan,BAI Tianzhu, GUO Tao. Hydrological characteristics of the Qinghe river basin [J]. Ground water, 2010, 32 (6): 161-162. )

[9] 孙秉旭,滕海波,宏瑾靓. 清河流域水文特性[J]. 吉林农业,2011(2):158.  
(SUN Bingxu,TENG Haibo,HONG Jinjing. Hydrological characteristics of the Qinghe river basin [J]. Agriculture of Jilin,2011(2):158. )

[10] 陆洲,马涛. 地下水环境质量评价的一种新方法:集对分析法[J]. 环境保护科学,2005(5):57-59.  
(LU Zhou,MA Tao. A new method to assess the environmental quality of underground water-set pair analysis [J]. Environmental protection science,2005(5):57-59. )

[11] 张现国. 中国城市供水绩效指标体系构建及指标权重划分研究[D]. 北京:北京建筑工程学院,2011.  
(ZHANG Xianguo. Research on establishment of performance indicator system and division of indicator weight for urban water supply in China [D]. Beijing: Beijing Institute of Architecture And Engineering,2011. )

[12] PANKRATOVA N D, MALAFEEVA L Y. Formalizing the consistency of experts' judgments in the delphi method [J]. Cybernetics and systems analysis, 2012, 48: 711-721.

[13] SAATY T L. The analytic hierarchy process [M]. New York:McGraw Hill,1980.

[14] 杨彦霞,于新花,杨文慧. 水生态承载力研究方法 & 评价指标权重计算分析[J]. 环境保护与循环经济,2024,44(3):54-59.  
(YANG Yanxia,YU Xinhua,YANG Wenhui. Water ecological carrying capacity research methods and evaluation index weight calculation and analysis [J]. Environmental protection and circular economy,2024,44(3): 54-59. )

[15] 俞国燕,郑时雄,黄平. 复杂工程设计综合评价系统研究[J]. 机械科学与技术,2001(1):4-6.  
(YU Guoyan,ZHENG Shixiong,HUANG Ping. Study on comprehensive evaluation system for complex engineering design [J]. Mechanical science and technology for aerospace engineering,2001(1):4-6. )

[16] 张薇. 清河流域水污染物总量减排绩效评估体系研究[D]. 沈阳:沈阳建筑大学,2012.  
(ZHANG Wei. Performance evaluation system research on water pollutant total emission reduction of Qinghe Watershed [D]. Shenyang: Shenyang Jianzhu University,2012. )

[17] HOLLINGSWORTH R, KOVACS G S. Soil slumps and debris flows: prediction and protection [J]. Environmental & engineering geoscience,1981(1):17-28.

[18] 刘瑞祥,常惠丽,赵富强,等. 漳泽水库主要入库河流氮、磷营养盐特征[J]. 生态学杂志,2010,29(3):479-484.  
(LIU Ruixiang,CHANG Huili,ZHAO Fuqiang,et al. Flux dynamics of nitrogen and phosphorus in major input rivers of Zhangze Reservoir [J]. Journal of ecology,2010,29(3):479-484. )

(责任编辑:王国业 英文审校:刘永军)