

基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价

田野, 李畅游, 赵胜男, 李彦杰, 张璐, 赵水霞

(内蒙古农业大学 水利与土木建筑工程学院, 内蒙古 呼和浩特 010018)

摘要: [目的] 监测黄河内蒙古段5个监测地点, 从上游到下游依次是三盛公、三湖河口、包头磴口、张立文尧、喇嘛湾, 共24个监测断面, 进而了解黄河内蒙古段水质现状。[方法] 选择溶解氧、化学需氧量、氨氮、总磷、总氮5个评价参数, 运用模糊数学综合评价方法进行综合评价。[结果] 黄河内蒙古段水体中DO基本属于Ⅰ类水, 其值在7.2~8.1 mg/L之间; COD总体上介于Ⅲ和Ⅳ类水之间, 其值在17~33 mg/L之间; 氨氮总体上接近Ⅲ类水, 其值在0.5~1.3 mg/L之间; TP总体上介于Ⅱ和Ⅲ类水之间, 其值在0.12~0.28 mg/L之间; TN基本超过Ⅳ类水, 有的甚至超过Ⅴ类水, 其值在1.4~2.7 mg/L之间; 主要污染物为COD和TN。其整体呈现Ⅲ和Ⅳ类水, 其评价值在3.3~4.2 mg/L之间。[结论] 通过评价发现, 黄河内蒙古段水质有逐渐恶化的趋势, 主要原因是外源污染的汇入。

关键词: 黄河; 模糊数学; 水质评价; 影响因素

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2016)05-0162-05

中图分类号: X820.2

文献参数: 田野, 李畅游, 赵胜男, 等. 基于模糊数学的黄河内蒙古段水环境质量评价[J]. 水土保持通报, 2016, 36(5): 162-166. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2016.05.033

Assessment of Water Environmental Quality in Inner Mongolia Section of Yellow River Based on Fuzzy Mathematics

TIAN Ye, LI Changyou, ZHAO Shengnan, LI Yanjie, ZHANG Lu, ZHAO Shuixia

(Water Conservancy and Civil Engineering College, Inner Mongolia Agricultural University, Huhhot, Inner Mongolia 010018, China)

Abstract: [Objective] The sampling data from 24 cross sections of 5 monitoring sites, including Sansheng-gong, Sanhuhekou, Baotoudengkou, Zhangliwenyao, Lama Bay, were used for studying the water quality of Inner Mongolia section of the Yellow River. [Methods] Choosing the dissolved oxygen(DO), chemical oxygen demand(COD), ammonia nitrogen, total phosphorous(TP) and total nitrogen(TN) to evaluate the water quality of the Yellow River by means of comprehensive assessment of fuzzy mathematics. [Results] DO was between 7.2 and 8.1 mg/L, which indicated that the water quality of the Yellow River belong to class I. COD varies between 17 and 33 mg/L, indicating the water quality between the class Ⅲ and Ⅴ. Ammonia nitrogen varies between 0.5 to 1.3 mg/L, water quality was within the class Ⅱ and Ⅲ. TP was between 0.12 to 0.28 mg/L, water quality between the class Ⅱ and Ⅲ. TN was between 1.4 to 2.7 mg/L, and water quality was the class Ⅳ, even occasionally worse than that of the class Ⅴ water quality standard. COD and TN were the main pollutants. The water quality of Yellow River in Inner Mongolia are roughly in the class Ⅲ or Ⅳ, and its vale varies between 3.3 to 4.2 mg/L. [Conclusions] Through the evaluation, it is found that the water quality in the Inner Mongolia section of the Yellow River is gradually deteriorating. The main reason is the import of foreign pollutants.

Keywords: Yellow River; fuzzy mathematics; water quality evaluation; influence factors

收稿日期: 2015-12-21

修回日期: 2016-01-06

资助项目: 国家自然科学基金项目“冻融过程中湖泊污染物多介质迁移转化规律及机制研究”(51339002), “河内蒙古段河冰生消机理与数学模型研究”(51369017), “多因素共同作用下黄河(内蒙古)河道演变特性及规律研究”(51369021)

第一作者: 田野(1988—), 男(汉族), 内蒙古自治区通辽市人, 硕士研究生, 主要研究方向为水环境化学。E-mail: 2713892419@qq.com。

通讯作者: 李畅游(1955—), 男(汉族), 内蒙古呼和浩特市土默特左旗, 大学本科, 教授, 主要从事水环境化学研究。E-mail: nndlichangyou@163.com。

近几年,由于黄河沿岸城乡工业迅速发展,人口增长快,致使黄河水质恶化,水污染严重。而水质的恶化会导致单方水 GDP 下降,人类健康受到威胁以及流域内生态环境遭到破坏,进而制约着流域内经济的持续发展。目前,黄河流域已经实行污染物总排放量控制原则,但偷排乱排现象仍然存在,这也是黄河水质恶化的主要原因。据统计,2013年黄河总取水量 $5.33 \times 10^{10} \text{ m}^3$,其中地表取水量 $4.05 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占总取水量的 75.9%;地下取水量 $1.28 \times 10^{10} \text{ m}^3$,占 24.1%。取水量以内蒙古的 $1.08 \times 10^{10} \text{ m}^3$ 为最多,占黄河总取水量的 20.2%。而全流域污水排放量为 $4.38 \times 10^9 \text{ t}$,其中城镇居民生活污水排放量 13.04 t,第二产业污水排放量 26.16 t,第三产业污水排放量 4.55 t,分别占全流域污水排放量的 28.9%,59.8%,10.4%。根据《黄河水资源公报》,2013年对黄河流域进行全年评价,评价结果显示^[1]:2013年黄河流域年平均符合Ⅰ—Ⅲ类水质标准的河长为 136 060.3 km,占评价总河长 60.6%;符合Ⅳ—Ⅴ类水质标准的河长为 2 826.0 km,占评价总河长 13.2%;劣Ⅴ类水质标准的河长为 5 652.4 km,占评价总河的 26.2%。在黄河内蒙古段,其污水的排入造成的污染也较严重。尤其是包头市这样的重工业城市,90%以上工业废水和生活污水都排入昆都仑河、四道沙河、西河、东河再由 4 条排污沟排入黄河包头段。在鄂尔多斯境内,黄牛营子总排站、呼斯太河、达电排水口、东柳沟 4 条排水口也直接排入黄河^[2]。因此,面对黄河内蒙古段较为严重的水环境污染现状,缓解黄河内蒙古段流域内水质型缺水问题,开展对内蒙境内黄河水污染特征及时空规律的研究,弄清污染特点及规律,查明污染原因是非常必要的。

因此,本文拟监测黄河内蒙古段 5 个地点,从上游到下游分别为三盛公、三湖河口、包头镫口、张立文尧、喇嘛湾,共 24 个断面,利用模糊综合评价方法对黄河内蒙古段水质状况进行评价,以期为清楚认识黄河内蒙古段水质现状提供科学依据。

1 研究区概况及研究方法

1.1 研究区概况

黄河从宁夏石嘴山市进入内蒙古境内,流经乌海市、巴彦淖尔市、鄂尔多斯市和包头市,从呼和浩特市清水河县进入山西省境内,黄河内蒙古段全长 840 km 多。流域面积为 $151\,267 \text{ km}^2$ 属黄河流域上游下段和中游上段^[3],流域内气候干燥,降雨稀少,年均降水量 150~400 mm,且年内分布极不均匀,75%左右

的降水集中在 7—9 月^[4]。每年从 11 月下旬开始流凌,12 月中旬到次年 3 月份为封冻期。黄河流经内蒙古的乌兰布和沙漠、十大孔兑以及库布齐沙漠,当发生暴雨或洪水时,大量泥沙进入黄河,导致河道内泥沙淤积严重,河道地形演变频繁。内蒙古境内黄河水 97% 用于农业灌溉,引黄灌溉面积为 $6.62 \times 10^8 \text{ hm}^2$,该段黄河是自治区河套灌区、鄂尔多斯市南岸灌区、土默特平原引黄灌区赖以生存和发展的源泉^[5]。

1.2 研究方法

1.2.1 取样断面及取样时间 取水样时间为 2015 年 7—9 月。选取 5 个取水地点,前 2 个地点(三盛公、三湖河口)每个地点取 3 个断面,后 3 个地点(包头镫口、张立文尧、喇嘛湾)每个地点取 6 个断面,共 24 个断面。选择溶解氧(DO)、化学需氧量(COD)、氨氮、总磷(TP)、总氮(TN)5 个水质指标为评价参数。每一个取水地点各个监测断面之间的距离一般为 1.5~2 km,监测河段长一般为 40 倍的水面宽度^[6]。断面布设首先要考虑便利性和安全性,选择河岸带比较稳定、河道顺直、水流平缓的地方,尽量与水文断面相结合;同时还要考虑水利工程状况、水文及河道地形、支流的汇入、取水口、退水口、排污口数量以及分布状况^[7]。

1.2.2 监测指标的测定方法 DO 利用奥立龙便携式水质多参数分析仪;COD 利用重铬酸盐法(GB11914-89);TN 利用碱性过硫酸钾消解分光光度法(GB11914-89);TP 利用钼酸铵分光光度法(GB11914-89);氨氮利用絮凝沉淀法(水和废水监测分析方法)。评价标准执行《地表水环境质量标准》(GB3838-2002)。

1.2.3 评价方法 目前模糊数学方法在水环境质量评价应用非常广泛,主要因为水环境中存在大量的不确定因素,其中水质级别、分类标准都是一些模糊的概念^[8]。常用的模糊数学的方法有模糊聚类分析和模糊综合评价^[9-10]。与模糊聚类分析相比,模糊综合评价充分考虑了各个水质参数之间的相关性,更好地了解各个水质参数与相应标准之间的综合相对关系^[11-17]。相对于单因子水质评价,模糊综合评价法是通过建立评价指标级、评价级、隶属函数和权重级实现对各个样本的质量等级进行综合评价,评价结果更加可信。模糊综合评价是基于最大隶属度和加权平均原则,考虑被评价事物的各个影响因子而对其做出的综合评价。

(1) 确定评价指标。针对影响水质的主要指标,根据地表水环境质量标准确定评价指标,设评价指标

集为: $X = (x_1, x_2, \dots, x_i)$, x_i 为第 i 种水质评价指标。

(2) 建立评价集。依据《地表水环境质量标准》(GB3838-2002), 水质可以分为 {I, II, III, IV, V} 5 个评价级。表 1 为地表水环境质量标准。

表 1 地表水环境质量标准(GB3838-2002)

指标	I	II	III	IV	V
化学需氧量(COD)	15.00	15.00	20.00	30.00	40.00
总氮(TN)	0.20	0.50	1.00	1.50	2.00
氨氮(NH ₃ -N)	0.15	0.50	1.00	1.50	2.00
总磷(TP)	0.02	0.10	0.20	0.30	0.40
溶解氧(DO)	7.50	6.00	5.00	3.00	2.00

(3) 建立模糊矩阵。根据水质分级标准和污染程度, 用隶属度来刻画水质的分级界限。先根据各指标的分级标准, 作出 5 个级别的隶属函数。确定各项因子对各类水质级别的隶属函数。按式(1)计算, 对第 I—V 类水, 即 $i=1\sim 5$, 其隶属函数为

$$R_j = \begin{cases} 1 & (c_i \leq s_j) \\ \frac{1}{s_j - s_{j-1}}(c_i - s_{j-1}) & (s_{j-1} < c_i < s_j) \\ \frac{1}{s_{j+1} - s_j}(s_{j+1} - c_i) & (s_j < c_i < s_{j+1}) \\ 0 & (c_i > s_{j+1}) \\ 1 & (c_i \geq s_5) \end{cases} \quad (1)$$

式中: c_i ——第 i 项评价因子浓度的实测值; s_{j-1} , s_j 和 s_{j+1} ——该评价因子第 $j-1$, j 和 $j+1$ 类水质的标准值, 在确定了隶属函数后, 可以得到隶属函数矩阵 R 。

(4) 计算各项因子的权重系数。计算各个评价因子的权系数, 即:

$$\frac{c_i}{s_i} / \sum_{i=1}^n \frac{c_i}{s_i} \quad (2)$$

式中: c_i ——第 i 项评价因子浓度的实测值; s_i ——该评价因子 5 类标准的平均值, 得到权系数矩阵:

$$A = (A_1, A_2, A_3, \dots, A_n) \quad (3)$$

(5) 进行矩阵的符合运算。采用扎德算子(\cdot , \oplus)对矩阵进行符合运算, 得到综合隶属度矩阵。结合实际监测数值分析比较综合隶属对哪一类级别的隶属度最大, 就初步判定为哪一类等级的水体。

(6) 评价等级的确定。再用加权平均原则计算最终的评价等级

$$B^* = \sum_{i=1}^m b_j^k \cdot j / \sum_{i=1}^m b_j^k \quad (4)$$

式中: b_j ——表征监测点位水质级别的数值, k 一般取 2。 $m=5$, $j=1, 2, 3, 3, 5$ 。

2 结果分析

2.1 水质指标的变化特征

DO 是表征水体自净能力及水环境好坏的指标, 其值越大代表水体质量越好。从图 1 中可以看出, 5 个取水地点 DO 基本都属于 I 类水级别, 其中三盛公 3 个断面的 DO 值最高, 平均值为 8.05 mg/L, 而喇嘛湾 DO 值最低, 平均值为 7.3 mg/L。

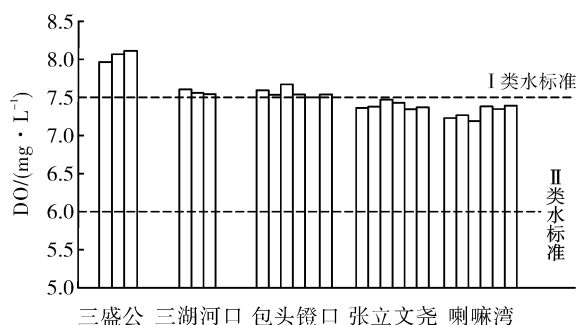


图 1 各监测地点水质 DO 浓度变化

化学需氧量(COD)主要表征水体受到有机污染程度, 其值越高表明水体的水质越差。从图 2 中可以看出, 5 个取水地点总体上介于 III 类水和 IV 类水之间, 其值在 17~33 mg/L 之间; 其中三湖河口一个断面 COD 的值最高, 但整体上包头磴口 COD 值最高, 其均值 28.34 mg/L; 三盛公 COD 值最低, 平均值为 22.31 mg/L。

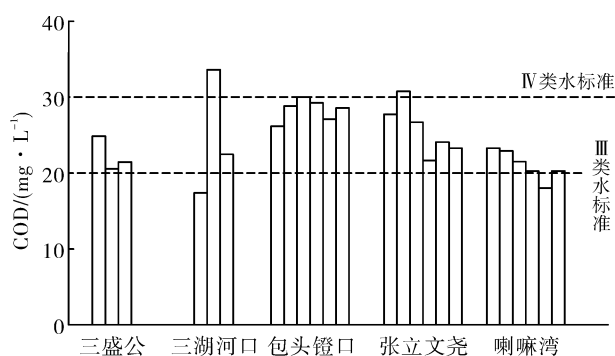


图 2 各监测地点水质 COD 浓度变化

氨氮(NH₃-N)是水体中主要耗氧污染物, 对水生生物有一定的危害, 其值越高表明水质状况越差。从图 3 中可以看出, 5 个取水地点氨氮总体上接近 III 类水, 其值在 0.5~1.3 mg/L 之间; 有个别断面氨氮的值很高, 但整体上包头磴口的氨氮值偏高, 平均值为 0.935 mg/L; 三盛公氨氮值最低, 平均值为 0.660 mg/L。

总磷(TP)是水体中磷元素的总含量, 是水体富

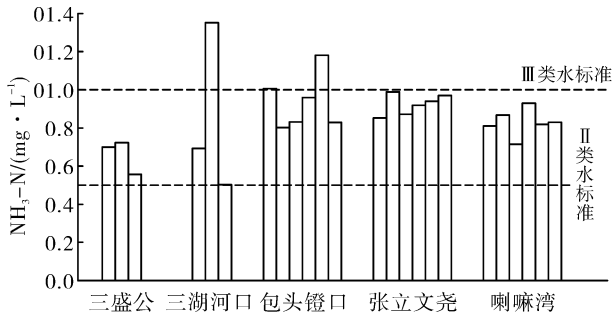


图 3 各监测地点水质 NH₃-N 浓度变化

营养化的指标之一,其值越高表明水体水质越差。从图 4 中可以看出,5 个取水地点 TP 总体上介于 II 和 III 类水之间,其值在 0.12~0.28 mg/L 之间;整体上张立文尧和喇嘛湾的 TP 值偏高,平均值分别为 0.217 和 0.191 mg/L;三盛公 TP 值最低,平均值为 0.137 mg/L。

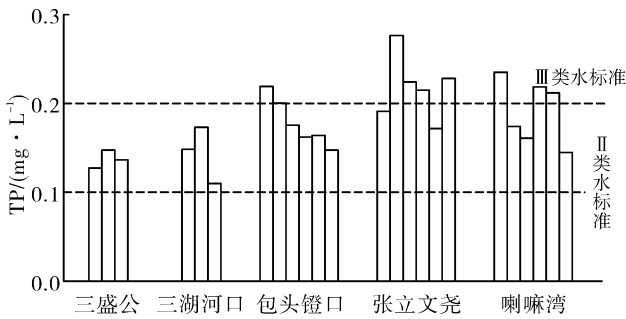


图 4 各监测地点水质 TP 浓度变化

总氮(TN)是水体中的营养素,水体中含量越高

可能会导致水体富营养化。从图 5 中可以看出,5 个取水地点的 TN 都超过 IV 类水,有的甚至超过 V 类水,其值在 1.4~2.7 mg/L 之间;从整体上看,包头磴口 TN 的值偏高,平均值为 2.42 mg/L;三盛公 TN 值最低,平均值为 1.54 mg/L。

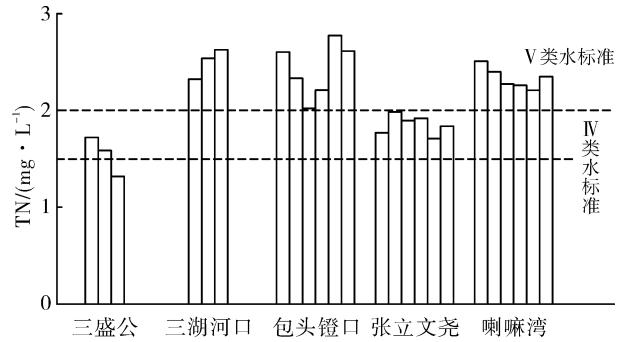


图 5 各监测地点水质 TN 浓度变化

2.2 基于模糊数学模型的水质综合评价分析

根据黄河内蒙古段各个监测点的 DO, COD, 氨氮, TP, TN 水质监测数据,利用模糊评价模型对黄河内蒙古段 5 个取样地点的水质进行综合评价。从图 6 可以看出,三盛公 3 个断面水质级别在 2.8~3.4 之间变动;三湖河口 3 个断面水质级别在 4.0~4.5 之间变动;包头磴口 6 个断面水质级别在 4.0~4.4 之间变动;张立文尧 6 个断面水质级别在 3.2~4.0 之间变动;喇嘛湾 6 个断面水质级别在 3.7~4.1 之间变动。从总体趋势上看三盛公、张立文尧呈 III 类水,三湖河口、包头磴口、喇嘛湾呈 IV 类水。

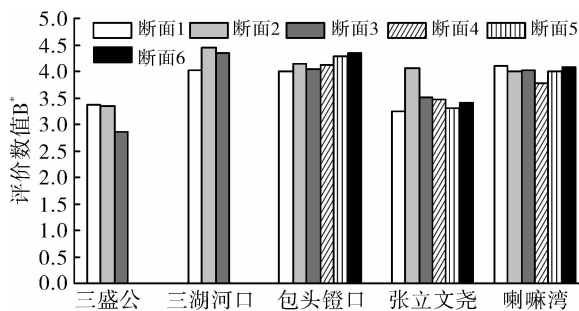
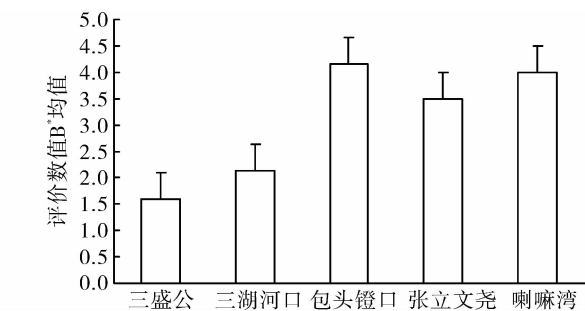


图 6 不同取水位置水质级别变化趋势

2.3 影响因素分析

5 个监测地点中三盛公水质最好。首先,三盛公沿岸附近几乎没有高污染企业,因此该段黄河水 COD 含量比较少;其次,三盛公沿岸附近没有农田退水的排入,因此水中 TP, TN 的含量较低,最后,从石嘴山到三盛公流量逐渐减少,其流量分别为 952 m³/s 和 552 m³/s,水流挟沙能力也就逐渐减少;同时,三



盛公两岸的河岸带比较稳定,河岸冲刷不严重,进而导致三盛公河段水流含沙量比较小,含沙量的减少导致泥沙向水体释放有机质减少。鉴于此,三盛公水质较好。

三湖河口水质比较差,主要因为三湖河口附近有一条乌梁素海退水渠直接排入黄河。据统计,2014 年乌梁素海污染物年入湖量 COD, TP, TN 分别为

36 254, 182, 2 106 t, 导致乌梁素海水质偏差, 其 COD, TP, TN 是超标的。而乌梁素海排水口 TN, COD, TP 年平均浓度分别是 2. 207, 35. 858, 0. 056 mg/L。加之总排干的沿线分布着许多中小型如造纸厂, 番茄厂等高污染企业, 这些企业一旦废污水处理设施停运或者根本没有处理设施, 大量的废污水就会直接排入黄河, 进而导致三湖河口段水中 COD 含量偏高, TN 含量超过地表水Ⅲ类标准 1. 5 倍, 造成三湖河口段水质污染。

包头磴口水质较差, 其主要原因: 包头是重工业城市, 该段黄河沿岸林立着冶金、机械制造、煤化工等企业, 工业废水排放量逐年增大。90% 以上生活污水和工业废水都是通过四道沙河、西河、昆都仑河、东河直接排入黄河包头段^[2], 致使包头段水体中 COD 接近Ⅳ类水, TN 含量超过地表水Ⅲ类标准 1. 4 倍。

张立文尧水质较好, 主要因为该河段沿岸没有农田退水渠, 没有煤电、化工、冶金等高污染企业; 虽然上游包头磴口水质较差, 但包头磴口距张立文尧 80 km 多, 由于水体自净能力作用, 使得张立文尧水质较好。

喇嘛湾水质相对较差, 主要由于喇嘛湾镇以及上游海生不拉村距离黄河 1~2 km, 其生活污水直接排入黄河, 致使该段黄河水中总磷偏高、总氮含量超过地表水Ⅲ类标准 1. 3 倍。而该河段地下水的 TP, TN 偏高也会对该河段的水质有贡献, 其浓度分别为 0. 193 mg/L 和 24. 232 mg/L。喇嘛湾镇由于拥有丰富的矿产资源如铁、铜、铅、锌, 近几年当地政府为经济发展引进许多高污染企业。致使排放的工业废水量逐年增加。

3 结论

(1) 模糊综合评价利用精确的数字(概念模糊的评价对象), 对其能作出比较合理的、科学的定量评价。相比单因子水质评价方法充分考虑了各个评价指标对整体水环境质量的贡献即权重系数, 综合反映了各个评价指标对水环境质量的影响, 对于防治水体污染, 进行水环境保护都有重要意义。

(2) 通过对黄河内蒙古段水质的模糊评价, 可以看出: 黄河内蒙古段水质有恶化趋势, 主要原因为丰水期取水受面源污染影响加大。工业城市附近区域水质较差。其主要污染源主要来自农田退水、工业废水和生活污水。其超标污染物主要有 COD 和 TN。

[参 考 文 献]

- [1] 黄河改革委员会. 黄河水资源公报[R]. 2013.
- [2] 王建. 黄河包头段水污染检测及动态分析[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2009.
- [3] 肖风劲, 欧阳华. 生态系统健康及其评价指标和方法[J]. 自然资源学报, 2002, 17(2): 204-209.
- [4] 杨根生, 拓万全, 戴丰年, 等. 风沙对黄河内蒙古河段河道泥沙淤积的影响[J]. 中国沙漠, 2003, 23(2): 152-159.
- [5] 赵锁志, 王沛东, 孔凡吉, 等. 黄河内蒙古段生态系统健康状况评价[J]. 现代地质, 2008, 22(6): 1023-1024.
- [6] 闫永辉. 大凌河健康评估与问题诊断分析[D]. 郑州: 华北水利水电大学, 2013.
- [7] 李岩. 排污河道的污染特征分析与调控[D]. 天津: 天津大学, 2009.
- [8] 唐启义, 冯光明. DPS 数据处理系统: 试验设计、统计分析 & 数据挖掘[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [9] 吴运敏, 陈求稳, 李静. 模糊综合评价在小流域河道水质时空变化研究中的应用[J]. 环境科学学报, 2011, 31(6): 1199-1200.
- [10] Chang Nibin, Chen H W, Ning S K. Identification of river water quality using the fuzzy synthetic evaluation approach[J]. Journal of environmental management, 2001, 63(3): 293-305.
- [11] Mckone T E, Deshpande A W. Can fuzzy logic bring complex environmental problems into focus? [C] // IEEE International Conference on Granular Computing. IEEE, 2010, 39(2): 11-17.
- [12] Tao Yang, Yang Xinmiao. Fuzzy Comprehensive assessment, fuzzy clustering analysis and its application for urban environment quality evaluation[J]. Transportation Research(Part D): Transport and Environment, 1998, 3(1): 51-57.
- [13] Duque W O, Huguet N F, Domingo J L, et al. Assessing water quality in rivers with fuzzy inference systems: A case study[J]. Environ Intern, 2006, 32(6): 733-742.
- [14] Liou Y T, Lo S L. A fuzzy index model for trophic status evaluation of reservoir waters[J]. Water Research, 2005, 39(7): 1415-1423.
- [15] Dahiya S, Singh B, Gaur S, et al. Analysis of groundwater quality using fuzzy synthetic evaluation [J]. Journal of Hazardous Material, 2007, 147(3): 938-946.
- [16] Silvert W. Fuzzy indices of environmental conditions [J]. Ecological Modeling, 2000, 130(1/3): 111-119.
- [17] 任春涛, 李畅游, 全占军, 等. 基于 GIS 的乌梁素海水体富营养化状况的模糊式识别[J]. 环境科学研究, 2007, 20(3): 68-74.