

DOI: 10.3969/j.issn.1004-6933.2011.04.001

辽河流域水质现状评价及其污染源解析

马溪平¹, 吕晓飞^{1,2}, 张利红^{1,2}, 徐成斌¹, 张 博¹

(1. 辽宁大学环境学院, 辽宁 沈阳 110036; 2. 辽宁省环境科学研究院, 辽宁 沈阳 110031)

摘要 根据辽河流域水系特征选取 COD、BOD₅、NH₃-N 等 6 个典型水质指标, 以综合水质标识指数评价法对辽河流域主要干流水质进行评价。以此为基础, 结合多元统计分析方法对辽河流域主要干流水体中主要污染物进行源解析。结果表明, 辽河流域中、下游水体中度污染比较严重, 辽河流域水体有 3 种典型污染物, 对整个辽河流域污染的贡献率分别为 56.85%、18.23% 和 17.51%。

关键词 辽河流域; 水质评价; 源解析; 多元统计分析

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2011)04-0001-04

Assessment of water quality and source apportionment of pollution in Liao River Basin

MA Xi-ping¹, LV Xiao-fei^{1,2}, ZHANG Li-hong^{1,2}, XU Cheng-bin¹, ZHANG Bo¹

(1. College of Environmental Science, Liaoning University, Shenyang 110036, China; 2. Liaoning Academy of Environmental Sciences, Shenyang 110031, China)

Abstract: Based on the water system characteristics of the Liao River Basin, six typical water quality indexes, including COD, BOD₅, NH₃-N, were selected. The water quality of the main river in the Liao River Basin was assessed using the integrated water quality index evaluation method. The source apportionment of main pollutants in the main river of the Liao River Basin was conducted using the multivariate statistical analysis method. The results show that the water pollution in the middle and lower reaches of the Liao River Basin is more serious. In the Liao River Basin, there are three kinds of typical water pollutants, whose contribution rates were 56.85%, 18.23% and 17.51%, respectively.

Key words: Liao River Basin; water quality assessment; source apportionment; multivariate statistical analysis

水质评价及污染源解析的目的是科学、全面、准确的评价水环境质量, 并为水环境管理提供准确可靠的信息。目前, 国内外针对水质评价的方法很多^[1], 主要有内罗梅水质指数法, 罗斯水质指数法, 综合水质标识指数法^[2]等。综合水质标识指数法是其中应用范围最广, 较为成熟的一种。污染源解析的方法也有很多^[3], 多元统计分析法亦是其中应用较为成熟的一种。

辽河流域辽宁省境内水污染严重, 近年来综合污染指数一直居全国七大流域前列。污染排放主要集中在河流城市段^[4], 辽河流域水体沿途接纳了沈

阳、鞍山、抚顺、辽阳、铁岭、盘锦和营口等城市的工业废水和生活污水后, 河流水质污染严重, 水环境受到破坏。

尽管近些年来针对辽河流域水质评价的研究很多^[5-6], 但同时应用综合水质标识指数法和多元统计分析法的却不多, 或者只是单一使用以上方法中的一种对辽河流域内的某部分水系进行相关研究^[7-8], 没有将两种方法结合应用于整个辽河流域的先例。笔者依据辽河流域水系特点, 选取 COD、BOD₅、NH₃-N 等 6 个典型水质指标, 将辽河流域水质评价与污染源解析相结合, 以综合水质标识指数评价法为主, 辅

基金项目: 国家“十一五”科技重大专项水体污染控制与治理项目(2008ZX07208-001)

作者简介: 马溪平(1957—)女, 辽宁本溪人, 教授, 主要从事环境工程微生物方面研究。E-mail: xipingma@163.com

通讯作者: 张利红, 副教授。E-mail: lihongzhang132@163.com

以判别分析法,以辽河流域主要干流水质评价为基础,结合多元统计分析方法对辽河流域主要干流水体中主要污染物及其来源进行探索性分析,以达到对污染物‘追根溯源’的目的。

1 数据收集与研究方法

1.1 数据来源

数据来自 2006—2008 年辽宁省环境质量报告书,其采样及测试均符合国家水质监测标准。根据辽河流域水系特点,选用辽河流域河流主要干流省控断面共计 26 个点位作为分析点位(图 1),每个点位选用 6 个指标作为水质分析参数,包括 COD, BOD₅, NH₃-N, COD_{Mn}, 挥发酚, 石油类, 共计 468 个数据。为了便于分析,选取 2006—2008 年 6 个水质参数 3 年平均值的算术平均数作为主要分析数据。



图 1 辽河流域主要干流 26 个省控断面示意图

1.2 研究方法

1.2.1 综合水质标识指数评价方法

综合水质标识指数法是以单因子水质标识指数为基础,对河流水质进行综合分析评价的方法^[12]。综合水质标识指数由整数位和 3 位或 4 位小数组成,其计算公式表示为^[9]:

$$I_{wq} = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot X_4 \quad (1)$$

$$X_1 \cdot X_2 = \frac{1}{m} \sum_{i=1}^m P'_i \quad (2)$$

式中: X_1 为河流总体的综合水质类别; X_2 为综合水质在 X_1 类水质变化区间内所处位置; X_3 为参与综合水质评价的水质指标中,劣于水环境功能区目标的单项指标个数; X_4 为综合水质类别与水体功能区类别的比较结果,视综合水质的污染程度, X_4 为 1 位或 2 位有效数字; P'_i 为第 i 个水质因子的单因子水质指数。

通过综合水质标识指数 I_{wq} 的整数位和小数点后第 1 位,即 $X_1 \cdot X_2$,可以判定综合水质级别。综合水质级别判断依据如下^[9]:

I 类: $1.0 \leq X_1 \cdot X_2 \leq 2.0$; II 类: $2.0 < X_1 \cdot X_2 \leq$

3.0; III 类: $3.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 4.0$; IV 类: $4.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 5.0$; V 类: $5.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 6.0$; 劣 V 类但不黑臭: $6.0 < X_1 \cdot X_2 \leq 7.0$ 。

1.2.2 判别分析法

判别分析是根据观察或测量到的若干变量值判断研究对象如何分类的方法^[10]。基本思想是在已知观测对象的分类和特征变量值的前提下,从中筛选出能提供较多信息的变量,并建立判别函数,目标是使得判别函数在对观测量进行判别其所属类别时的错判率最小。

1.2.3 多元统计方法

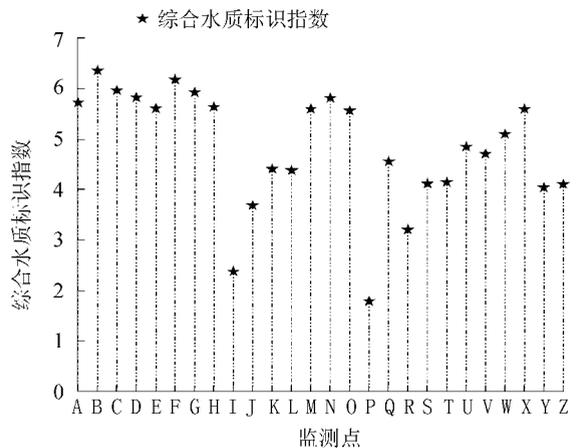
多元统计方法的基本思路是利用观测信息中物质间的相互关系来产生源成分谱或产生暗示重要排放源类型的因子^[11],包括主成分分析(PCA)及因子分析法(FA)。只要监测的污染源满足解析条件^[12-13],二者都可以用于污染物的来源解析^[14-16],结果的取得主要取决于被分析因子的特征值、方差累计贡献(cumulative percent variance)和 Exner 方程^[17]。要求解析结果中包含的因子数量较多,被分析因子的特征值大于 1,方差累计贡献率接近于 100%。一般只要选取方差累计贡献率大于 85% 左右的因子组合就可以。本文主要应用因子分析法(FA)进行分析,分析工具为 Excel 2003, Origin 8.0 及 SPSS 13.0。

2 结果与讨论

2.1 辽河流域水质现状分析

2.1.1 辽河流域水质达标率分析

经过相关公式计算各点位综合水质标识指数



注:A—福德店;B—三合屯;C—珠尔山;D—马虎山;E—红庙子;F—盘锦兴安;G—曙光大桥;H—赵圈河;I—阿及堡;J—戈布桥;K—七间房;L—东陵大桥;M—砂山;N—七台子;O—于家房;P—老官砬子;Q—兴安;R—参窝坝下;S—下王家;T—下口子;U—唐马寨;V—刘家台;W—小姐庙;X—三岔河;Y—黑英台;Z—辽河公园

图 2 辽河流域主要干流 26 个监测点位综合水质标识指数

(图 2),根据综合水质级别判断依据,可以得到 26 个点位的水质情况如下:Ⅰ类水质点位 1 个,占整个监测点位的 3.84%;Ⅱ类水质点位 1 个,占整个监测点位的 3.84%;Ⅲ类水质点位 2 个,占整个监测点位的 7.69%;Ⅳ类水质有 9 个,占整个监测点位的 34.62%;Ⅴ类水质有 11 个,占整个监测点位的 42.31%;劣Ⅴ类但不黑臭的有 2 个,占整个监测点位的 7.69%。结合各点位水功能区目标,达标点位有 20 个,整个监测点位的的水质达标率为 73.92%,说明整个辽河流域水质基本达到功能区水质要求。

2.1.2 辽河流域水质定性分析

对照水体功能区类别,对水体清洁或污染程度进行的评价称为水质定性评价,可以分为 5 级:优、良、轻度污染、中度污染、重度污染^[18]。根据辽河流域水系特点和水功能区目标及综合水质标识指数可以按以下标准对 26 个点位进一步分级:优良 $1.0 \leq X_1, X_2 \leq 3.0$;轻度污染 $3.0 < X_1, X_2 \leq 4.0$;中度污染 $4.0 < X_1, X_2 \leq 6.0$;重度污染 $X_1, X_2 > 7.0$ 。

根据 26 个点位的综合水质标识指数,可将各点位进一步分为以下 4 组:水质优良组有 2 个点位,占整个监测点位的 7.69%;轻度污染组有 2 个点位,占整个监测点位的 7.69%;中度污染组有 20 个点位,占整个监测点位的 73.92%;重度污染的点位有 2 个,占整个监测点位的 7.69%。将上述分组结果通过 SPSS 判别分析进行检验(表 1,表 2),由表 1 可知,第 1 个判别函数的显著概率为 $0.007 < 0.05$,有统计学意义,其他两个判别函数的显著概率均大于 0.05,没有意义。由表 2 可知此次判别分析 1,2,3,4 组(即优良组,轻度污染组,中度污染组,重度污染组)的判别正确率分别为 100%,100%,80%,100%。平均判别正确率为 95%,正确率很高,说明按以上标准分组可信。通过以上分析可知,26 个点位水质大部分为中度污染,占整个监测点位的 73.92%。说明辽河流域尤其是下游水体中度污染比较严重,需要有关部门加强管理。

表 1 判别分析 Wilk'lambda 值

检验项	Wilks'Lambda 值	卡方检验值	自由度	概率
1~3	0.151	35.972	18	0.007
2~3	0.624	8.946	10	0.537
3	0.09	1.811	4	0.77

2.2 辽河流域水质典型污染物源解析

2.2.1 数据的正态分布特征检验

在统计分析理论中,对数据分布有一定的要求^[19],所以先应用 SPSS 软件中的探索性分析验证数据的正态分布有效性。结果如表 3 所示,根据探索性检验要求,显著概率大于 0.05 的指标数据符合

表 2 分类结果

分类	组别	预测组				总计
		1	2	3	4	
原始组	1	2	0	0	0	2
	2	0	2	0	0	2
	3	0	0	16	4	20
	4	0	0	0	2	2
预测组判断正确率/%	1	100	0	0	0	100
	2	0	100	0	0	100
	3	0	0	80	20	100
	4	0	0	0	100	100

注:总判别正确率为 95%。

表 3 正态分布检验

水质指标	Kolmogorov-Smirnov 法			Shapiro-Wilk 法		
	描述性统计量	自由度	概率	描述性统计量	自由度	概率
COD	0.198	10	0.2	0.901	10	0.223
BOD ₅	0.128	10	0.2	0.949	10	0.652
NH ₃ -N	0.266	10	0.16	0.831	10	0.054
COD _{Mn}	0.184	10	0.2	0.935	10	0.503
石油类	0.172	10	0.2	0.933	10	0.482
挥发酚	0.208	10	0.2	0.920	10	0.355

正态分布特征,可以看到,参与分析的 26 个点位的理化指标的显著概率均大于 0.05,可以认为此次参与分析的数据整体符合正态分布的要求。

2.2.2 典型污染物的因子分析

a. Kaiser-Meyer-Olkin 和 Bartlett's Sphericity 检验。为了验证因子分析的适用性,首先要对数据进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)和 Bartlett's Sphericity 检验。一般认为 KMO 值大于 0.7(KMO 值在 0~1 之间变化)的适合因子分析,小于 0.5 的不适合因子分析,介于二者之间的,比较适合。Bartlett's Sphericity 检验用于检验相关性矩阵是否为单位矩阵,如果是单位矩阵,则不适合因子分析。

通过检验可知,在显著概率小于 0.05,数据的 KMO 检验值为 0.575, Bartlett's Sphericity 检验值为 136.496,表明数据适合因子分析。

b. 因子分析的总方差解释及主因子命名。根据因子分析提取主成分的要求,被分析因子的特征值必须大于 1,方差累计贡献接近于 100%,从分析结果(表 4)中可以提取 3 个主成分。主成分 1 解释了总方差的 56.85%,其中 COD, BOD₅, COD_{Mn} 占有较高的因子载荷,分别为 94.3%,94%,92.8%。结合表 4,可以将主成分 1 命名为耗氧有机物污染物。主成分 2 解释了总方差的 18.25%,其中 NH₃-N 占有较高的因子载荷,为 89.8%,可将主成分 2 命名为富营养化因子污染。主成分 3 解释了总方差的 17.51%,挥发酚因子载荷较高,为 82.5%,结合表 5,可以将主成分 3 命名为有毒有机污染物。

表4 因子载荷与总方差解释

参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3
COD	0.943	-0.138	-0.234
BOD ₅	0.940	-0.138	-0.210
COD _{Mn}	0.928	-0.125	-0.196
石油类	0.751	0.448	0.268
挥发酚	-0.051	0.186	0.825
NH ₃ -N	0.459	0.898	-0.401
特征值	3.411	1.095	1.051
总方差/%	56.851	18.246	17.514
累计方差/%	56.851	75.097	92.612

表5 旋转因子载荷矩阵

参数	主成分 1	主成分 2	主成分 3
COD	0.971	0.141	-0.021
BOD ₅	0.959	0.160	-0.031
NH ₃ -N	0.941	0.172	-0.025
COD _{Mn}	0.790	0.946	-0.154
石油类	0.507	0.659	0.312
挥发酚	-0.054	-0.033	0.982

注:分析方法为主成分分析法,旋转方法为方差最大正交旋转法。

综合上述分析可得出,辽河流域典型污染物有3种,分别为耗氧有机物污染物、化肥农药污染物和有毒有机污染物。以上三种为辽河流域主要污染物质。

c. 水体污染物来源分析及控制措施。辽河流域辽河段的 BOD₅、COD 的单因子水质标识指数值相比其他指标数值较大,可认为第 1 主成分为此区间的主导污染物。主要由于该区间多为大中城市,城镇人口众多,工业区规模较大,造纸行业和畜牧业占有较大比例,其排放的废水中含有大量的耗氧有机物质,加之工业和生活需水量大,水处理负荷也较大。所以,解决此区间水体污染问题,应在保证供求关系的前提下减少污染行业数目,提高污水处理能力,节约用水等方面入手。辽河流域浑河段和大辽河段的 NH₃-N 的单因子水质标识指数值相比其他指标数值较大,可认为第 2 主成分为此区间的主导污染物。主要由于该区间工业区中造纸、石化和冶金行业占有较大比例,生产过程中向附近水体中排放大量的含 NH₃-N 污染物质所造成的。解决方法应从控制污染物排入手,加强对相关行业的排放监测。辽河流域太子河段挥发酚的单因子水质标识指数值相比其他指标数值较大,可认为第 3 主成分为此区间的主导污染物。主要由于该区间的本溪钢铁厂、北台钢铁厂在生产过程中向附近水体排放了大量含酚超标的废水所致。

综上所述,主成分 1、2、3 分别来自于城市生活污水和工业废水中的耗氧有机物污染,造纸厂、石油化工厂、冶金厂排放的生产废水污染以及来自炼钢厂的生产废水污染。相关部门在生产和监测过程中应加强控制与管理。

3 结论

a. 辽河流域干流水质整体达标率较高,达标率为 73.92%,但大多数河流尤其是中下游水体中度污染比较严重,仍需要有关部门加强管理。

b. 辽河流域水体有 3 种典型污染物,对整个辽河流域污染的贡献率分别为 56.85%、18.23% 和 17.51%,为辽河流域水体主要污染物。

c. 辽河流域水体 3 种典型污染物的来源分别为来自于城市生活污水和工业废水中的耗氧有机物污染,造纸厂、石油化工厂、冶金厂排放的生产废水污染所形成的富营养化因子污染物和炼钢厂的生产废水所形成的有毒有机污染物,其作用的河段分别为辽河流域辽河段、浑河段和大辽河段,以及辽河流域太子河段,应根据每段区间特点采用相应措施实现污染物控制。

参考文献:

- [1] 刘春燕. 深圳市河流水质评价指标筛选方案探讨[J]. 干旱环境监测, 2010, 24(1): 48-50.
- [2] 梁德华, 蒋火华. 河流水质综合评价方法的统一和改进[J]. 中国环境监测, 2002, 18(2): 63-66.
- [3] 郭炜峰, 戴树桂. 水环境多环芳烃源解析进展研究[J]. 环境治理技术与设备, 2005, 10(10): 8-12.
- [4] 郭芬, 张远. 辽河流域水生态与水环境因子时空变化特征研究[D]. 北京: 中国环境科学研究院, 2009: 1-86.
- [5] 辛江. 试用概率方法进行大辽河水质评价[J]. 东北水利水电, 2001, 19(8): 44-46.
- [6] 刘连芳, 魏砾宏, 李爱民, 等. 神经网络模型在辽河水质评价中的应用[J]. 城市环境与城市生态, 2003, 16(6): 251-253.
- [7] 鲁斐, 李磊. 主成分分析法在辽河水质评价中的应用[J]. 水利科技与经济, 2006, 12(10): 660-662.
- [8] ZHANG Yuan, GUO Fen, WANG Xi-qin. Water quality assessment and source identification of Daliao river basin using multivariate statistical methods[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 152(1/2/3/4): 105-121.
- [9] 徐祖信. 我国河流综合水质标识指数评价方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(4): 482-488.
- [10] 张红兵, 贾来喜, 李璐. SPSS 宝典[M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.
- [11] 苏丹, 唐大元, 刘兰岚, 等. 水环境污染源解析研究[J]. 生态环境学报, 2009, 18(2): 749-755.
- [12] PHILIP A B, ERIK R C. Source apportionment of sediment PAHs in Lake Calumet, Chicago: application of factor analysis with nonnegative constraints[J]. Environmental Science and Technology, 2004, 38(1): 97-103.

(下转第 73 页)

m³;累计引水 14 闸次,引水时间 79.45 h,引水量 2 147.2 万 m³。

两次调水期间,长江口南支水质基本达到Ⅱ类水质标准,为调水改善崇明岛内河水质提供了优质的引水水源,17 个水质监测断面的水质指标基本达到Ⅱ类水质标准。但不同区域河道水质改善效果不尽相同:引水口门河道和南横引河较接近长江口南支,水动力条件改善效果最为明显,而水质改善最为明显的为竖向河道,这主要是由于引水口门河道、南横引河已经在常态化的调水中获得较稳定的水质;北横引河位于排水末端,水质改善效果相对差一点。

3 结 语

通过两次崇明岛河网调水试验,获得了原型实况调度的水文、水质同步监测第一手资料,掌握了群闸调度时各监测控制断面流量、水位以及岛内河道水质改善情况。两次调水试验为下一阶段建立崇明岛河网水动力水质模型、优化崇明岛调水方案提供了基础资料,也为开展崇明岛河道环境综合治理提供了参考依据。

a. 调水试验表明,开展水资源调度可以改善内河水质。但由于岛内尚分布有数量众多的横向小河道,两次调水试验均没有明显改善小河道的水动力条件和水质。建议加大对小河道的综合整治力度,以达到全面改善岛内河道水环境的目标。

b. 由于常年失修,部分竖向河道坍塌、淤积严重,建议加大崇明岛骨干河道的整治力度,提升骨干河道的过水能力,进一步改善水动力条件,以保障区域防洪除涝安全和改善河网水质。

c. 长江口水体含沙量较高,引水时泥沙也同步引入内河,加剧内河的淤积,从而影响河道的蓄排能力,建议下一阶段开展泥沙处理方式的专题研究。

d. 崇明岛现状污水处理能力较低,大部分污染源不经处理直排入河,建议根据崇明生态岛建设的要求,加大截污治污力度,加强研究,因地制宜地采取一些生态治理措施,对水体中的污染物进行吸收、降解和转化,增强水体自净能力。

参考文献:

- [1] 刘光文. 水文分析与计算[M]. 北京:水利电力出版社, 1989.
- [2] 茅志昌. 21 世纪初长江入海流量变化及其对长江口水质、生态环境的影响[J]. 海洋科学, 2001, 25(4): 32-34.
- [3] 朱慧峰, 阮仁良. 长江口水源地的开发利用态势及保护对策[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 91-93.
- [4] 李伯昌, 施慧燕. 长江口河段水环境现状分析[J]. 水资源保护, 2005, 21(1): 39-44.
- [5] 余国安, 王兆印, 谢小平. 长江口水质空间分布现状评价[J]. 人民长江, 2007, 38(1): 81-83.

(收稿日期 2010-10-30 编辑 徐 娟)

(上接第 4 页)

- [13] PICHAYA R, ERIK R C. Determination of PCB sources by a principal component method with nonnegative constraints[J]. Environmental Science and Technology, 1997, 31(9): 2686-2691.
- [14] BAKAC M, KUMRU M N. Factor analysis applied to distribution of elements in western Turkey[J]. Applied Radiation and Isotopes, 2001, 55(5): 721-729.
- [15] PEKEY H, KARAKAS D, BAKOGLU M. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses[J]. Marine Pollution Bulletin, 2004, 48(9/10): 809-818.

(上接第 18 页)

- [3] 王景雷, 吴景社, 孙景生, 等. 支持向量机在地下水位预报中的应用研究[J]. 水利学报, 2003(5): 122-127.
- [4] 王睿. 关于支持向量机参数选择方法分析[J]. 重庆师范大学学报: 自然科学版, 2007, 24(2): 36-38.
- [5] 陈前平, 徐斌. 基于粒子群算法的支持向量机参数优化方法的研究[J]. 中国水运: 理论版, 2006, 6(1): 97-99.
- [6] 雷英杰. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 陕西: 西安电子科技大学出版社, 2005: 78-90.
- [7] 周兆永, 汪西莉, 曹艳龙. 基于 GA 优选参数的 SVM 水质

- [16] SINGH K P, MALIK A, SINHA S. Water quality assessment and apportionment of pollution source of Gomti river (India) using multivariate statistical techniques: a case study[J]. Analytica Chimica Acta, 2005, 538(1/2): 355-374.
- [17] 郭芬, 张远. 水环境中 PAHs 源解析研究方法比较[J]. 环境监测管理与技术, 2008, 20(5): 11-16.
- [18] 夏青, 陈艳卿, 刘宪兵. 水质基准与水质标准[M]. 北京: 中国标准出版社, 2004.
- [19] 苏金明. 统计软件 SPSS12.0 for Windows 应用及开发指南[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

(收稿日期 2010-06-13 编辑 高渭文)

评价方法研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(4): 190-193.

- [8] WANG W, XU Z, LU W. Determination of the spread parameter in the Gaussian kernel for classification and regression[J]. Neurocomputing, 2003, 55(6): 643-663.
- [9] 于青, 赵辉. 基于 GA 的支持向量机参数优化研究[J]. 计算机工程与应用, 2008, 44(15): 139-131.
- [10] 郑书彦, 李占斌, 李喜安. 地下水位动态预测的人工神经网络方法[J]. 西北水资源与水工程, 2002, 13(2): 14-16.

(收稿日期 2011-01-19 编辑 徐 娟)