

DOI:CNKI:61-1390/S.20111216.1123.020

网络出版时间:2011-12-16 11:23

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/61.1390.S.20111216.1123.020.html>

渭河杨凌段水质动态监测及质量模糊评价

王 斌, 张 海, 杨 峰, 段曼莉

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

【摘 要】 【目的】对渭河杨凌段水质进行监测和评价,为渭河水资源的合理利用及水污染防治提供理论依据。**【方法】**分别于 2010 年 1,3,5,7,9 和 11 月份采集渭河杨凌段的水样,对其 7 个污染指标(化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、挥发酚和石油类物质含量)进行分析测定,并采用模糊综合-平均加权模型对水质进行综合评价。**【结果】**在检测的 7 个指标中,只有 COD_{Cr}、BOD₅、COD_{Mn} 和挥发酚含量总体符合《地表水环境质量标准》中Ⅲ类水质标准,NH₄⁺-N、TP 和石油类物质含量 3 个指标均超出Ⅲ类水质标准;冬季、春季水体污染物较夏季和秋季严重;NH₄⁺-N 和 TP 污染具有季节性,而石油类物质污染在全年都较严重,超过国家允许排放标准(0.05 mg/L)。**【结论】**渭河杨凌段水质污染治理的重点应放在难降解有机污染物的去除,及对污水进行有效脱氮除磷。

【关键词】 渭河;杨凌;水质动态监测;模糊评价

【中图分类号】 X824;X832

【文献标识码】 A

【文章编号】 1671-9387(2012)01-0135-06

Dynamic monitoring and fuzzy comprehensive evaluation of water quality of Wei River in Yangling

WANG Bin, ZHANG Hai, YANG Feng, DUAN Man-li

(College of Resource and Environment, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: 【Objective】 Monitoring and assessment of Wei River water quality were carried out to provide theoretical basis for reasonable use of water source and pollution preservation. **【Method】** Water samples were collected bimonthly at Wei River in Yangling area in 2010, and water qualities including chemical oxygen demand (COD_{Cr}, COD_{Mn}), biological oxygen demand (BOD₅), ammonium, volatile phenol and oil compounds were determined. Meanwhile, the fuzzy comprehensive evaluation and weighted average method was used to assess the current status of surface water quality in this area. **【Result】** Among the 7 water quality indicators, COD_{Cr}, BOD₅, COD_{Mn} and volatile phenol levels conformed to class Ⅲ water standard of environmental quality standard for surface water, while ammonium, total phosphorus and oil compounds exceeded the class Ⅲ water standard. Water quality in winter and spring (samples of November, January and March) was worse than that in summer and autumn (Samples of July and September). Pollution of ammonium and total phosphorus was seasonal variation; however, pollution of oil compounds was the most important pollution factor along the whole year, with an excess of national standard of 0.05 mg/L. **【Conclusion】** In conclusion, pollution treatment in this area should be concentrated on the elimination of persistent organic pollutants and the removal of nitrogen and phosphorus in waste water.

* [收稿日期] 2011-04-15

[基金项目] 国家科技支撑计划项目(2008BADA4B09)

[作者简介] 王 斌(1986—),男,陕西富平人,在读硕士,主要从事环境监测研究。E-mail:westlife219@163.com

[通信作者] 张 海(1960—),男,陕西高陵人,教授,硕士生导师,主要从事黄土高原治理及植被恢复研究。

E-mail:yanglingzhanghai6@163.com

Key words: Wei River; Yangling; dynamic monitoring; fuzzy comprehensive evaluation

水资源短缺和水体污染是全球面临的主要问题之一。渭河是陕西省的第一大河流,黄河最大的一级支流,是其流域内农业、工业和生活饮用水的主要来源。而随着经济的发展,越来越多的农业、工业以及生活污水未经处理直接排放到环境中,其中一些污染物质进入渭河水体,引起渭河水体水质恶化,对区域人体健康和生态环境安全产生了影响。据报道,2005 年渭河流域废污水排放量为 7.01 亿 m³,渭河干流及主要支流重要河段劣 V 类水质河长占到总河长的 67.4%,水环境的恶化加剧了水资源短缺^[1]。因此,渭河流域的水体污染已引起各界的共同关注,对渭河流域地表水进行监测和评价,是合理、安全利用渭河地表水资源的前提。

目前,有关水体水质的评价方法比较多,常见的有单因子污染指数、内梅罗污染指数及综合水质标准指数^[2]、模糊综合评价^[3-5]、灰色关联分析^[6-8]和人工神经网络^[9-11]等方法,不同模型采用的数学计算方法不同,因而侧重方面各异。应用模糊数学得到的模糊综合评价结果相对其他方法更具客观性,更能反映水体污染的真实水平,因而近年来被广泛地应用到水质评价中^[3-5]。目前,关于该法在渭河水质评价中的应用还未见报道,为此本试验以渭河杨凌段作为研究对象,系统监测了 2010 年 6 个月份渭河的水质状况,并采用模糊综合-平均加权模型^[12],对各月份水质分别进行评价,分析水体主要污染物的季节性变化规律,以期合理、安全利用渭河水资源及渭河流域水污染防治提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 样品的采集与分析

水样采自陕西渭河杨凌段,共设置上游和下游 2 个采样断面,采样时间为 2010 年 1,3,5,7,9 和 11 等 6 个月份,其中 12—5 月份为陕西杨凌地区的冬季和春季,6—11 月份为夏季和秋季;样品的采集、运输、保存和分析均按照标准 GB 17378—1998 的要求进行。

根据杨凌地区水污染特征,选择化学需氧量(COD_{Cr})、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{Mn})、氨氮(NH₄⁺-N)、总磷(TP)、挥发酚和石油类物质含量作为水质评价因子^[13],其中 COD_{Cr}采用重铬酸盐法^[14]测定,BOD₅采用稀释与接种法^[15]测定,COD_{Mn}采用酸性氧化法^[16]测定,NH₄⁺-N 采用

纳氏试剂分光光度法^[17]测定,TP 采用钼酸铵分光光度法^[18]测定,挥发酚采用 4-氨基安替比林分光光度法^[19]测定,石油类物质含量采用红外光度法^[20]测定。

1.2 水质的综合评价

依据《地表水环境质量标准》GB ZB1—1999^[21],应用模糊综合评价方法对渭河水质质量状况进行评价。选用常用的分段线性函数计算单因子的隶属度^[22-23],具体计算公式如下:

$$y_{ij} = \begin{cases} (s_{ij+1} - x) / (s_{ij+1} - s_{ij}), & s_{ij} \leq x < s_{ij+1}; \\ (x - s_{ij}) / (s_{ij} - s_{ij-1}), & s_{ij-1} < x \leq s_{ij}; \\ 0, & x \leq s_{ij-1} \text{ 或 } x \geq s_{ij+1}. \end{cases} \quad (1)$$

式中: y_{ij} 为单因子隶属度; x 为水质评价因子实测值; s 为地表水环境质量标准值; i 为水质评价因子; j 为水质标准等级, $j=1,2,3,4,5$,当 j 为 1 或 5 时, s_{ij-1} 和 s_{ij+1} 分别以 x 替代。

由 y_{ij} 可得到 i 行 j 列的模糊系数矩阵 $\mathbf{R}$ 。各评价因子的权重系数 A_i 由以下公式确定^[24]:

$$\bar{S}_i = \sum_{j=1}^5 S_{ij} / 5, \quad (2)$$

$$W_i = X_j / \bar{S}_i, \quad (3)$$

$$A_i = W_i / \sum W_i. \quad (4)$$

式中: $\bar{S}_i$ 为评价因子标准值的平均值, W_i 为评价因子标准指数。

利用加权平均 $M(\cdot, \oplus)$ 将权重系数模糊子集 A 和模糊系数矩阵 $\mathbf{R}$ 进行复合运算,得到模糊综合评价结果向量 B 。为定量比较不同月份水质质量,将水质标准等级 j ($j=1,2,3,4,5$) 作为各等级的秩。然后用 B 中对应隶属度将各等级的秩加权求和,得到各月份水质质量的相对位置 (B^*), B^* 值越大表示水质越差。 B^* 具体计算公式为:

$$B^* = \sum (b_j \times j) / \sum b_j. \quad (5)$$

式中: b_j 为水体隶属于 j 等级的隶属度。

1.3 数据处理

数据处理用 SPSS 13.0 统计软件进行。

2 结果与分析

2.1 渭河杨凌段水质评价因子的月变化特征及其权重系数

由图 1 可知,COD_{Cr}除在 3 月和 11 月超过Ⅲ类水质标准临界值(20 mg/L,渭河杨凌段 COD_{Cr}适用地表水质Ⅲ类标准)外,其他月份水质均符合《地表

水环境质量标准》^[21];BOD₅ 和 COD_{Mn} 全年均达到《地表水环境质量标准》要求(BOD₅ 和 COD_{Mn} 分别为 4 mg/L 和 6 mg/L)。NH₄⁺-N 含量除 7 月和 9 月低于Ⅲ类水质标准临界值 1 mg/L 外,其他月份均超标。TP 含量仅 1 月份超标,其他月份在 0.1 mg/L 左右,均未超标。石油类物质含量全年均超标(0.05 mg/L)。挥发酚含量在各个月份均较低,

符合《地表水环境质量标准》要求(0.005 mg/L)。表 1 显示,7 种水质指标中,NH₄⁺-N、TP 和石油类物质是造成水体污染的主要因子。不同季节主要污染物质的类型各异,其中春季和秋季以 NH₄⁺-N、石油类物质污染为主,而冬季则以 TP 污染为主;COD_{cr}对水质的影响在各个季节无明显差异;相对而言,挥发酚含量对水质影响较小,可以忽略不计。

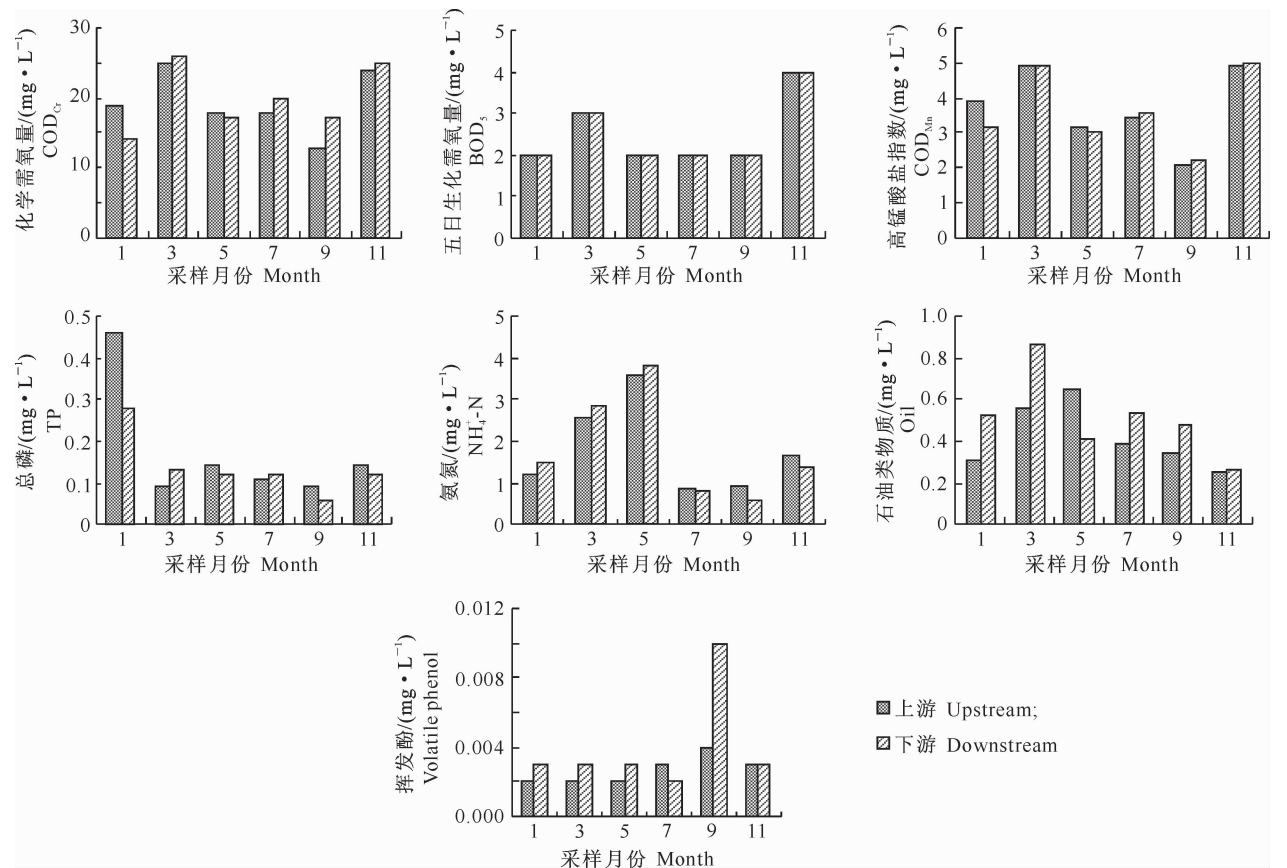


图 1 2010 年渭河杨凌段各水质评价因子的月变化

Fig.1 Monthly variation of monitoring items of Wei River in Yangling in 2010

表 1 渭河杨凌段各水质评价指标的权重系数

		水质评价指标 Water quality assessment index						
采样地点 Sampling location	采样月份 Sampling month	化学 需氧量 COD _{Cr}	五日生化 需氧量 BOD ₅	高锰酸盐 指数 COD _{Mn}	氨氮 NH ₄ ⁺ -N	总磷 TP	挥发酚 Volatile phenol	石油类物质 Oil
上游 Upstream	1	0.13	0.08	0.08	0.18	0.36	0.01	0.15
	3	0.15	0.11	0.09	0.35	0.06	0.01	0.24
	5	0.09	0.06	0.05	0.44	0.09	0.01	0.25
	7	0.17	0.12	0.10	0.18	0.12	0.03	0.27
	9	0.14	0.13	0.07	0.23	0.11	0.04	0.27
	11	0.17	0.17	0.11	0.27	0.12	0.02	0.13
下游 Downstream	1	0.10	0.09	0.07	0.24	0.23	0.02	0.26
	3	0.12	0.09	0.08	0.32	0.07	0.01	0.30
	5	0.20	0.14	0.11	0.01	0.16	0.03	0.34
	7	0.17	0.10	0.10	0.16	0.12	0.02	0.33
	9	0.17	0.12	0.07	0.13	0.07	0.10	0.34
	11	0.19	0.18	0.12	0.24	0.11	0.02	0.14

2.2 渭河杨凌段水质的模糊综合评价结果

表 2 为渭河杨凌段不同月份水质对Ⅰ~Ⅴ类水的隶属度。由表 2 可知,渭河杨凌段上游水质在 1—5 月份偏向低于Ⅲ类水的标准,7—11 月份则偏向Ⅲ类或Ⅲ类以上水质标准;下游水质除 5 月份优于Ⅲ类水标准外,其他月份与上游水质类似。 B^* 值的大小在一定程度上反应了水质受污染状况,且 B^* 值越大,水质越差。由表 2 可知,夏季、秋季上游和下游水质要优于冬季、春季。整体上,1—5 月份上游和下游水质基本逐渐变差,5 月以后上游和下

游水质得到改善,而 11 月以后水质又逐渐恶化。这是因为渭河杨凌段水体污染物主要来自生活污水和地表径流。冬季和春季水温偏低,水体自净能力差;加上降水量少,地表径流对污染物的稀释作用不明显,此时尽管水体中的溶解氧含量较高,但氨氮的硝化作用微弱,氨氮在水体中累积,故水质较差。而夏季和秋季降水较多,地表径流量大,对污染物的稀释作用明显,水质得到改善。随着冬季的到来,微生物生长变慢,故氨氮和总磷含量比夏季明显升高,水质又变差。

表 2 2010 年渭河杨凌段水质模糊综合评价的结果

Table 2 Results of fuzzy comprehensive evaluation of Wei River in Yangling in 2010		不同水质等级的隶属度 Membership of water quality					B^*
采样地点 Sampling location	采样月份 Sampling month	Ⅰ	Ⅱ	Ⅲ	Ⅳ	Ⅴ	
上游 Upstream	1	0.00	0.20	0.28	0.15	0.36	3.68
	3	0.00	0.12	0.22	0.28	0.37	3.91
	5	0.02	0.20	0.09	0.17	0.51	3.96
	7	0.03	0.45	0.31	0.20	0.00	2.69
	9	0.22	0.30	0.30	0.17	0.00	2.42
	11	0.00	0.15	0.37	0.40	0.09	3.43
下游 Downstream	1	0.12	0.14	0.07	0.65	0.01	3.29
	3	0.00	0.10	0.20	0.15	0.54	4.14
	5	0.07	0.47	0.19	0.27	0.00	2.66
	7	0.02	0.35	0.30	0.30	0.03	2.97
	9	0.10	0.37	0.10	0.43	0.00	2.86
	11	0.00	0.10	0.41	0.49	0.00	3.39

综合以上分析可以看出,渭河杨凌段水体常年受石油类物质污染严重,其难以被微生物降解利用。此外在冬季和春季, NH_4^+-N 和 TP 含量偏高,这与微生物活动较弱有关。而表征有机污染物总体情况的 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 COD_{Mn} 等指标整体上在各月份都达标,表明今后污染治理的重点应放在难降解有机污染物的去除,以及对污水进行有效的脱氮除磷。

3 结 论

1)在监测的 7 个水质指标中,渭河杨凌段只有 COD_{Cr} 、 BOD_5 、 COD_{Mn} 和挥发酚含量总体上达标,其余 3 个指标均未达标,影响水质的污染物主要为 NH_4^+-N 、TP 和石油类物质。

2)冬季和春季水体污染较夏季和秋季严重。 NH_4^+-N 和 TP 污染具有季节性,而石油类物质污染在各个季节都较严重。

[参考文献]

[1] 李晓春,郭 亮.陕西省渭河流域水资源管理现状与对策 [J]. 陕西水利,2010(6):18-20.
Li X C,Guo L. Management status and strategy of water resource in Wei river basin,Shaanxi Province [J]. Shaanxi Water

Resources,2010(6):18-20. (in Chinese)
[2] 安乐生,赵全升,刘贯群,等.代表性水质评价方法的比较研究 [J]. 中国环境监测,2010,26(5):47-51.
An L S,Zhao Q S,Liu G Q,et al. Comparative study on representative water quality assessment methods [J]. Environmental Monitoring in China,2010,26(5):47-51. (in Chinese)
[3] 邹志红,孙靖南,任广平.模糊评价因子的熵权法赋权及其在水质评价中的应用 [J]. 环境科学学报,2005,25(4):552-556.
Zou Z H,Sun J N,Ren G P. Study and application on the entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25(4):552-556. (in Chinese)
[4] 邹志红,云 逸,王惠文.两阶段模糊法在海河水系水质评价中的应用 [J]. 环境科学学报,2008,28(4):799-803.
Zou Z H,Yun Y,Wang H W. Application of two-stage fuzzy set theory to water quality evaluation in the Haihe River system [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2008,28(4):799-803. (in Chinese)
[5] 田景环,邱 林,柴福鑫.模糊识别在水质综合评价中的应用 [J]. 环境科学学报,2005,25(7):950-953.
Tian J H,Qiu L,Chai F X. Application of fuzzy recognition in comprehensive evaluation of water quality [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2005,25(7):950-953. (in Chinese)
[6] 秦昌波,郑炳辉,秦延文,等.渤海湾天津段海岸带水环境质量

- 灰色关联度评价[J]. 环境科学研究, 2006, 19(6): 94-99.
- Qin C B, Zheng B H, Qin Y W, et al. Gray correlation assessment of water environment quality for Tianjin coastal zone in Bohai Bay [J]. Research of Environmental Sciences, 2006, 19(6): 94-99. (in Chinese)
- [7] 佟长福, 史海滨, 李和平, 等. 基于灰色关联分析的鄂尔多斯市水资源承载力评价[J]. 节水灌溉, 2009, 11(6): 43-45.
- Tong C F, Shi H B, Li H P, et al. Evaluation of water resource carrying capacity of Erdos City based on grey relational analysis [J]. Water Saving Irrigation, 2009, 11(6): 43-45. (in Chinese)
- [8] 于洪涛, 吴泽宁. 灰色关联分析在南水北调中线澧河水质评价中的应用[J]. 节水灌溉, 2010, 10(3): 39-41.
- Yu H T, Wu Z N. Application of grey relation analysis method in water quality evaluation of Li River for South to North Water Diversion Project [J]. Water Saving Irrigation, 2010, 10(3): 39-41. (in Chinese)
- [9] 刘国东, 黄川友, 丁 晶. 水质综合评价的人工神经网络模型[J]. 中国环境科学, 1998, 18(6): 514-517.
- Liu G D, Huang C Y, Ding J. The models of artificial neural networks for comprehensive assessment of water quality [J]. China Environmental Science, 1998, 18(6): 514-517. (in Chinese)
- [10] 莫明浩, 杨 洁, 宋月君, 等. 人工神经网络在湖北洪湖水质综合评价中的应用[J]. 安徽农业科学, 2010, 38(25): 13931-13933.
- Mo M H, Yang J, Song Y J, et al. Application of artificial neural network to comprehensive assessment of water quality of Honghu Lake in Hubei province [J]. Journal of Anhui Agriculture Sciences, 2010, 38(25): 13931-13933. (in Chinese)
- [11] 李 雪, 刘长发, 朱学慧, 等. 基于BP人工神经网络的海水水质综合评价[J]. 海洋通报, 2010, 29(2): 225-230.
- Li X, Liu C F, Zhu X H, et al. Integrated assessment of sea water quality based on bp artificial neural network [J]. Marine Science Bulletin, 2010, 29(2): 225-230. (in Chinese)
- [12] 卢 芳, 高振会, 贾永刚, 等. 锦州某油田海域水质现状的模糊综合评价[J]. 环境工程, 2010, 28(增刊): 285-290.
- Lu F, Gao Z H, Jia Y G, et al. Assessment of seawater quality around an oilfield of Jinzhou by fuzzy comprehensive evaluation method [J]. Environmental Engineering, 2010, 28(S1): 285-290. (in Chinese)
- [13] 国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法[M]. 4 版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- Editorial committee of 《Monitoring and Analysis Methods of Water and Waste Water》of State Environmental Protection Administration. Monitoring and analysis methods of water and waste water [M]. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. (in Chinese)
- [14] 国家环境保护总局. GB/T 11914—1989 水质化学需氧量的测定: 重铬酸盐法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB/T 11914—1989 Water quality: Determination of the chemical oxygen demand for dichromate method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989. (in Chinese)
- [15] 国家环境保护总局. HJ 505—2009 水质五日生化需氧量的测定: 稀释与接种法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB/T 11914—1989 Water quality: Determination of biochemical oxygen demand after 5 days (BOD₅) for dilution and seeding method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [16] 国家环境保护总局. GB/T 11892—1989 水质高锰酸盐指数的测定[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB/T 11892—1989 Water quality: Determination of permanganate index [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [17] 国家环境保护总局. HJ 505—2009 水质氨氮的测定: 纳氏试剂分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 505—2009 Water quality: Determination of ammonia nitrogen-nessler's reagent spectrophotometry [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [18] 国家环境保护总局. GB/T 11893—1989 水质总磷的测定: 钼酸铵分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB/T 11893—1989 Water quality: Determination of total phosphorus-Ammonium molybdate spectrophotometric method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [19] 国家环境保护总局. HJ 503—2009 水质挥发酚的测定: 4-氨基安替比林分光光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. HJ 503—2009 Water quality: Determination of volatile phenolic compounds-4-aap spectrophotometric method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [20] 国家环境保护总局. GB/T 16488—1996 水质石油类和动植物油的测定: 红外光度法[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB/T 16488—1996 Water quality: Determination of petroleum oil, animal and vegetable oils-Infrared photometric method [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 2009. (in Chinese)
- [21] 国家环境保护总局. GB ZB1—1999 地表水环境质量标准[S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2009.
- Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China. GB ZB1—1999 Environmental quality standard for surface water [S]. Beijing: China Environmental Science

Press,2009. (in Chinese)

[22] 潘 俊,高维春,臧海洋.基于模糊综合评价法在溪泉湖地表水中的水质评价 [J]. 环境科学与技术,2010,33(12):551-553.
Pan J,Gao W C,Zang H Y. Based on the fuzzy comprehensive appraisal in evaluation of surface water quality for Xiquan Lake [J]. Environmental Acience & Technology, 2010, 33 (12):551-553. (in Chinese)

[23] 张丽丽,尹峻邈,侯召成. 基于模糊隶属度的白洋淀生态干旱评价函数研究 [J]. 河海大学学报:自然科学版,2010,38(3):252-257.
Zhang L L,Yin J X,Hou Z C. Ecological drought evaluation function of Baiyangdian based on fuzzy membership degree [J]. Journal of Hohai University: Natural Sciences Edition, 2010,38(3):252-257. (in Chinese)

[24] 丁桑岚. 环境评价概论 [M]. 北京:化学工业出版社,2001.
Ding S L. An introduction to environmental assessment [M]. Beijing:Chemical Industry Press,2001. (in Chinese)

(上接第 134 页)

[19] 金 明. 一维稳态河流水质的随机微分方程模型 [J]. 水利学报,1991,2(2):19-26.
Jin M. A randon differentiol equation for onedimentional steady river water quality modeling [J]. Journal of Hydraulic Engineering,1991,2(2):19-26. (in Chinese)

[20] 付国伟,程声道. 水污染控制系统规划 [M]. 北京:清华大学出版社,1985.
Fu G W,Chen S D. Water pollution control system planning [M]. Beijing: Tsinghua University Publishing House, 1985. (in Chinese)

[21] 董增川. 水资源系统分析 [M]. 南京:河海大学出版社,2008.
Dong Z C. Analysis of water resources system [M]. Nanjing: Hohai University Publishing House,2008. (in Chinese)

[22] 白玉川,顾元琰,邢焕政. 水流泥沙水质数学模型理论及应用 [M]. 天津:天津大学出版社,2005.
Bai Y C,Gu Y Y,Xing H Z. Flow and sediment mathematical model of water quality theory and application [M]. Tianjin: Tianjin University Publishing House,2005. (in Chinese)

[23] 郝芳华,李春晖,赵彦伟. 流域水质模型与模拟 [M]. 北京:北京师范大学出版社,2008.
Hao F H,Li C H,Zhao Y W. River water quality model and simulation [M]. Beijing:Beijing Normal University Publishing House,2008. (in Chinese)