

DOI :10.3969/j.issn.1004-6933.2011.04.007

天津市于桥水库水质变化特点及影响因素分析

陈水蓉¹,吴光红¹,苏睿先²

(1.天津师范大学天津市水环境与水资源重点实验室,天津 300387;2.天津师范大学城市与环境学院,天津 300387)

摘要:采用非参数 Mann-Kendall 检验和 Sen 方法对于桥水库 1986—2005 年的水质参数 pH 值、DO、COD、BOD₅ 和 NH₃-N 的变化趋势和趋势量进行了统计和分析。结果表明:近 20 年来于桥水库水质能够满足其水功能规划Ⅲ类水质标准要求,pH 值、DO、BOD₅ 和 NH₃-N 质量浓度均达到Ⅱ类水质标准,COD 质量浓度也达到Ⅲ类水质标准,水质整体趋于稳定,其中 DO 质量浓度呈显著下降,COD 质量浓度呈显著上升,且 DO 和 COD 质量浓度呈极显著负相关,而 pH 值略有上升,但 NH₃-N 和 BOD₅ 质量浓度无明显变化。在水库周边及上游地区城镇化和工业化不断加快和人口大量增加的情况下,水质无明显恶化,说明多年来所采取的水质综合管理措施取得了一定成效。

关键词: Mann-Kendall 检验; Sen 方法; 水质评价; 趋势分析; 于桥水库; 天津市

中图分类号: X824 文献标识码: A 文章编号: 1004-6933(2011)04-0027-04

Change characteristics of water quality and its impact factor at the Yuqiao Reservoir in Tianjin

CHEN Shui-rong¹, WU Guang-hong¹, SU Rui-xian²

(1. Tianjin Key Laboratory of Water Environment and Resources, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China; 2. College of Urban and Environmental Science, Tianjin Normal University, Tianjin 300387, China)

Abstract: The change trends of water quality parameters, including pH, dissolved oxygen (DO), chemical oxygen demand (COD), biochemical oxygen demand (BOD₅), and ammonia nitrogen (NH₃-N), at the Yuqiao Reservoir in Tianjin, China from 1986 and 2005 were determined with the non-parametric Mann-Kendall test, and the magnitude of the trend was calculated with the non-parametric Sen's method. The results showed that water quality of the Yuqiao Reservoir could meet grade Ⅲ of the Environmental Quality Standards for Surface Water over the last 20 years. The pH value, and the concentrations of DO, BOD₅, and NH₃-N reached grade Ⅱ, but COD concentration reached grade Ⅲ. On the whole, the water quality tended to be stable, but DO concentration declined significantly, and COD concentration increased significantly. There was a significant negative correlation between DO and COD concentrations. The pH values increased slightly, and there was no significant change in BOD₅ and NH₃-N concentrations. With the acceleration of industrialization and urbanization, and the rapid growth of population in the surrounding area of the reservoir and the upper reaches, there was no significant change in water quality, which indicated that integrated management measures of water quality had achieved certain results.

Key words: Mann-Kendall test; Sen's method; water quality assessment; trend analysis; Yuqiao Reservoir; Tianjin City

江河湖泊及海湾的水质变化趋势是各地政府部门和科研人员普遍关心的环境问题之一^[1-2]。水质

监测数据通过趋势统计分析后,可以更容易地被理解,为决策者提供宏观决策依据,还可以更好地了解

基金项目: 天津市自然科学基金(10JCZDJC24500),天津市高等学校科技发展基金(20080514)
作者简介: 陈水蓉(1988—),女,江西吉安人,硕士研究生,研究方向为水资源与水环境保护。E-mail: ziseyunduan88@163.com
通讯作者: 吴光红,副教授。E-mail: wuguanghong@hotmail.com

以往的水质综合管理措施是否取得理想的效果,以及是否需要进一步完善水质保护措施^[3-4]。为了客观准确地把握水质变化的情况,发达国家投入了大量的财力,定期开展水质变化趋势分析,取得了许多有益的成果^[5-6],许多统计方法如季节性的 Mann-Kendall 检验、局部加权平滑散点图方法以及分形预测方法等已被开发和广泛应用于水质管理中^[7-9]。但我国在这方面开展工作起步较晚,在多元统计方法和趋势统计方法的应用上也较少^[10]。

于桥水库位于蓟运河左支流州河出口处,控制流域面积 2060 km²,占流域总面积的 96%,是一个以城市供水为主的水利工程,总库容 15.59 亿 m³。于桥水库有沙河、黎河和淋河 3 条主要支流,多年平均入库水量为 4.2 亿 m³。在 1986—2005 年的 20 年中,80 年代平均径流量较多年平均减少 24.8%,90 年代较多年平均偏多 16.6%,2000—2006 年平均径流量较多年平均减少 74.0%。目前于桥水库作为天津市重要饮用水水源地和引滦入津工程的大型调蓄水库,每年向天津市供水约 9 亿 m³,对于保障天津市经济社会发展起着极其重要的作用^[11-12],其水质变化特点及其富营养化程度将直接影响着天津市工农业和生活用水以及引滦水质的好坏,并成为多方关注的焦点^[13]。笔者采用非参数 Mann-Kendall 检验和非参数 Sen 方法对于桥水库水质数据进行趋势统计分析,以期为其水质综合管理提供科学依据。

1 研究方法与数据选取

1.1 非参数 Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 检验属于非参数检验,通常用于评价水文-气象时间序列的单调趋势的显著性研究^[14]。Mann-Kendall 检验还常用于水质指标序列的趋势分析^[3-6]。该方法的显著优点是可不考虑水质数据大小,只考虑其相对值或数据的排列,检验中随机变量的基本概率分布不居于重要地位,统计量分布几乎不受水质资料的非正态性、季节性变化、出现漏测值或小于检测限值的影响^[15]。Mann-Kendall 检验的原理是将历年水质资料进行比较,如后面的值(时间上)高于前面的值记为“1”,否则记作“-1”。结果为正,则可能为上升趋势;反之,则可能为下降趋势。对于 Mann-Kendall 检验来说,零假设 H_0 为随机变量与时间独立,假定历年水质资料具有相同概率分布,相反的, H_1 为单调递增或递减趋势变化^[7]。

Mann-Kendall 检验统计量 S 定义为:

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(x_j - x_k) \quad (1)$$

其中, x_j 和 x_k 分别为第 j 和第 k 年的值, $j > k$, 则:

$$\text{sgn}(x_j - x_k) = \begin{cases} 1 & x_j > x_k \\ 0 & x_j = x_k \\ -1 & x_j < x_k \end{cases} \quad (2)$$

当水质数据系列个数 $n < 10$ 时, S 的绝对值直接与 Mann 和 Kendall 得出的 S 值理论分布进行比较。如果 $|S| \geq S_{\alpha/2}$, 则拒绝零假设。 S 值为正(负)时表示上升(下降)趋势。当 $n \geq 10$ 时,采用常态近似值检验。但是如果时间序列存在几个相同值的话,可能会导致当数据个数接近 10 时,常态近似值的有效性降低。方差计算公式为:

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} \left[n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5) \right] \quad (3)$$

其中, q 为相同值的组数, t_p 为一组相同值中的数值个数。标准差

$$Z = \begin{cases} \frac{S-1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S > 0 \\ 0 & S = 0 \\ \frac{S+1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} & S < 0 \end{cases} \quad (4)$$

趋势变化的统计显著性水平用 Z 值来进行评价。 Z 值为正(负)时表示上升(下降)趋势。统计量 Z 服从正态分布。在双尾趋势检验中,如果 $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$, 则拒绝零假设, $Z_{1-\alpha/2}$ 由标准正态分布函数计算得到。双尾趋势检验用 4 个不同的显著性水平表示, α 分别为 0.1($n \geq 4$), 0.05($n \geq 5$), 0.01($n \geq 6$), 0.001($n \geq 7$)。

1.2 非参数 Sen 方法

采用非参数 Sen 方法来估计变化趋势的斜率(变化量)^[5,16]。其线性变化趋势可用如下函数表示:

$$f(t) = Qt + B \quad (5)$$

式中: B 为常数 B , 通过 $x_i - Qt_i$ 计算而得, 取其中位数。 Q 为斜率, 其计算公式为:

$$Q_i = \frac{x_j - x_k}{j - k}, \quad j > k \quad (6)$$

当水质序列中有 n 个非漏测值时, 就有 $N = n(n-1)/2$ 斜率估计值 Q_i 。 Sen 方法的斜率估计值就等于这 N 个值的中位数。 Q_i 从小到大排列, 则 Sen 方法的斜率估计值为:

$$Q = \begin{cases} Q_{[(N+1)/2]} & N \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}(Q_{(N/2)} + Q_{[(N+2)/2]}) & N \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (7)$$

在双尾趋势检验中, 当置信水平为 100(1- α)% 时, 斜率估计的置信区间通过基于正态分布的非参数方

法得到。选择的显著性水平 α 为 0.01 和 0.05 ,分别得到两种不同的置信区间 ,首先 C_α 计算如下 :

$$C_\alpha = Z_{1-\alpha/2} \sqrt{\text{VAR}(S)} \tag{8}$$

式中 :VAR(S)由式 (3) 计算得到 , $Z_{1-\alpha/2}$ 从标准正态分布函数获得 , α 为检验显著水平。然后根据已经排好顺序的斜率估计值 Q_i 计算置信区间的下限 $Q_{\min}$ 和上限 $Q_{\max}$,分别为第 M_1 大的值和第 $(M_2 + 1)$ 大的值 ,其中 $M_1 = (N - C_\alpha)/2$, $M_2 = (N + C_\alpha)/2$ 。若 M_1 不是整数 ,则修改下限 ;若 M_2 不是整数 ,则修改上限。可采用同样的方法计算置信水平为 99% 和 95% 时的常数 B 。

1.3 数据选取

选取了于桥水库 1986—2005 年具有代表性的 5 项水质指标 ,即 pH 值、DO、COD_{Mn}、BOD₅ 和 NH₃-N 等的监测数据^[17-18] ,对于桥水库近 20 年来的水质变化趋势进行分析 ,了解该时期以来水质综合管理措施取得的效果 ,以期为进一步的决策管理提供科学依据。数据的统计、分析和拟合采用软件 SPSS10.0 (SPSS Inc.)和 Microsoft Office Excel 2007(Microsoft Inc.)并通过编程来实现。

2 结果与讨论

2.1 水质参数分析与评价

针对 1986—2005 年于桥水库的水质监测数据进行了统计 ,结果见表 1 ,并采用 Kurtosis 和 Skewness 检验相关指标的分布特征 ,其结果分别为 pH、DO、COD 和 BOD₅ 呈正态分布(置信度为 95%) ,NH₃-N 远离正态分布。根据 GB 3838—2002《地表水环境质量标准》^[19] ,发现近 20 年来于桥水库水质参数 pH 值、DO、BOD₅ 和 NH₃-N 质量浓度均达到了Ⅱ类水质标准 ,COD 质量浓度也达到Ⅲ类水质标准 ,能够满足其水功能规划Ⅲ类水质标准要求 ,各指标的中位数和均值基本接近 ,NH₃-N 的变异系数(C_v)最大 ,达到了 47.5% ,BOD₅ 和 COD 次之 ,pH 值的变异系数最小 ,仅为 1.9%。同时将水质参数 pH、 $\rho(\text{DO})$ 、 $\rho(\text{BOD}_5)$ 、 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 和 $\rho(\text{COD})$ 进行非参数 Spearman

表 1 1986—2005 年监测数据统计结果

指标	pH	$\rho(\text{DO})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{CO})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{BOD}_5)$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)	$\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ / ($\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$)
均值	8.49	9.14	3.79	1.86	0.14
中位数	8.48	9.22	3.89	1.71	0.12
变化范围	8.10~8.75	6.95~10.94	2.62~4.88	1.30~2.81	0.07~0.34
Ⅲ类水质标准	6~9	5	6	4	1.0
偏差	0.16	1.15	0.59	0.40	0.07
变异系数	1.9	12.5	15.5	21.6	47.5
偏度	-0.318	-0.415	-0.153	0.776	1.884
峰度	0.689	-0.690	-0.488	0.106	3.842

相关分析 ,发现 $\rho(\text{DO})$ 和 $\rho(\text{COD})$ 呈现负相关($R = -0.643$) ,经双尾检验相关性达到极显著水平($\alpha = 0.003 < 0.01$)。若使用“最小二乘法”对 $\rho(\text{COD})$ 和 $\rho(\text{DO})$ 进行直线拟合建立一元回归方程 , $\rho(\text{COD}) = -0.3057\rho(\text{DO}) + 6.5879$ ($R^2 = 1$)。

2.2 水质变化趋势分析

选用 1986—2005 年间的水质数据(pH、DO、COD、BOD₅ 和 NH₃-N) ,采用非参数 Mann-Kendall 检验对于桥水库水质进行了趋势变化统计分析(表 2) ,并采用非参数 Sen 方法对水质指标变化量进行估算 ,其线性变化趋势见图 1。在 Mann-Kendall 检验中设置了 3 种显著性水平($\alpha < 0.1$ 、 $\alpha < 0.05$ 和 $\alpha < 0.01$) ,非参数 Sen 方法选取了 99% 和 95% 两种置信水平。结果表明 :于桥水库在 1986—2005 年间 ,水质状况总体上较为稳定。pH 值呈现略有上升趋势 , $\rho(\text{DO})$ 呈现显著下降趋势(统计量 $Z = -2.73$, $\alpha < 0.01$) ,而 $\rho(\text{COD})$ 则呈现显著上升趋势(统计量 $Z = 2.79$, $\alpha < 0.01$) , $\rho(\text{BOD}_5)$ 和 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 则无显著变化。秦保平等^[20] 认为于桥水库水体偏碱性的主要原因是水中较高的氮、磷使藻类大量繁殖 ,在光合作用过程中 ,藻类吸收 CO₂ ,放出 O₂ ,从而影响水中 HCO₃⁻、CO₂ 和 OH⁻ 的平衡 ,进而导致水体中 pH 值升高。

表 2 水质趋势分析结果

方法分类	水平性	pH	DO	COD	BOD ₅	NH ₃ -N
Mann-Kendall	Z 值	2.01	-2.73	2.79	0.53	-1.22
	显著水平①	*	**	**		
	Q	0.011	-0.138	0.064	0.008	-0.003
	Q _{min} 99	-0.005	-0.244	0.009	-0.058	-0.012
	Q _{max} 99	0.027	-0.016	0.114	0.053	0.003
Sen's method	Q _{min} 95	0	-0.213	0.029	-0.032	-0.008
	Q _{max} 95	0.022	-0.059	0.098	0.039	0.002
	B	8.34	10.55	3.18	1.66	0.15
	B _{min} 99	8.55	11.63	3.76	2.6	0.22
	B _{max} 99	8.2	9.34	2.69	1.25	0.1
	B _{min} 95	8.48	11.33	3.5	2.22	0.19
	B _{max} 95	8.23	9.84	2.77	1.39	0.11

注 ① ** 表示极显著水平($\alpha \leq 0.01$) , * 表示显著水平($0.01 < \alpha \leq 0.05$) ,空白表示不显著($\alpha > 0.05$)。

$\rho(\text{DO})$ 呈现显著下降趋势 ,主要是由于于桥水库水体中 $\rho(\text{COD})$ 呈现上升趋势 ,消耗了水体中的溶解氧 ,近 20 年来水库上游及库区周边地区的人口增长和经济发展 ,污染剧增 ,许多研究表明 ,于桥水库水质和营养状态由引滦入津工程通水前期(1988 年以前)的中营养(水质为Ⅱ-Ⅲ类)以及 1990 年后的富营养化(水质为Ⅲ-Ⅳ类)状态 ,已发展到目前的中富营养化(水质为Ⅳ-V 类)状态^[21] ,加之近 10 年降雨量偏少造成水位下降 ,导致 $\rho(\text{DO})$ 下降和 $\rho(\text{COD})$ 上升。朱龙基等^[22] 的分析也发现引滦入津工程水质中 $\rho(\text{COD})$ 较早期没有增加 ,但存在一定的

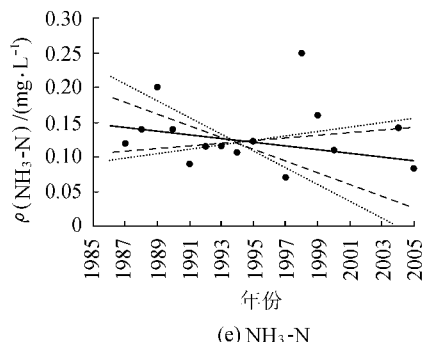
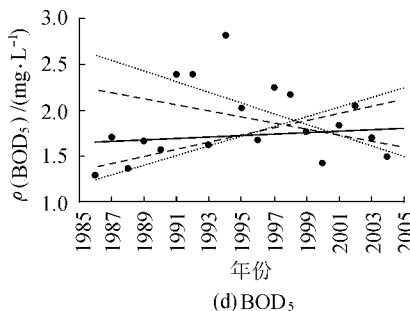
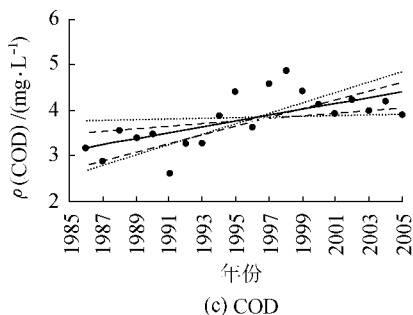
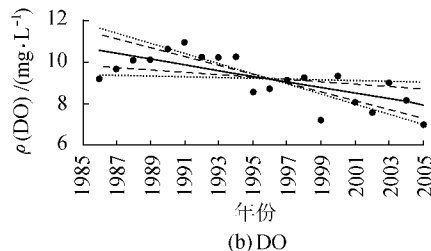
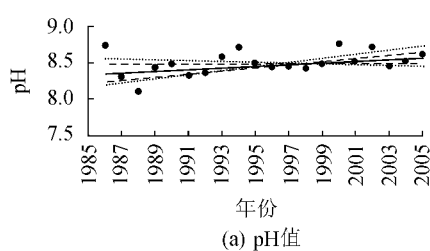


图 1 非参数 Sen 方法趋势分析于桥水库水质结果

增加趋势,下游水质较好,且优于上游的特点。

$\text{NH}_3\text{-N}$ 是水体中的营养素,可导致水体富营养化,对鱼类及水生生物具有毒害作用。于桥水库水质中 $\rho(\text{NH}_3\text{-N})$ 的变化趋势分析结果见图 1(e),与早期相比其略有一定下降,但总体上无明显变化,氨氮主要来源于人与动物的排泄物和雨水径流中农用化肥的流失^[23-24]。对于于桥水库而言还有上游地区化肥工业等的废水排放^[25],趋势分析结果表明,在于桥水库上游及库区周边经济的快速发展背景下,水库水体氨氮污染没有明显加重。于桥水库氨氮的含量与流域内的土地利用格局、硝化与反硝化等因素,以及居民的行为方式、生活方式及环保观念等有关^[11],多年来于桥水库周边地区采取了控制畜禽养殖业污染和城乡生活污水等工程性措施,以及设立水源地保护区等非工程性治理措施,从而降低了氨氮向水库水体迁移的风险。

3 结 论

a. 非参数 Mann-Kendall 检验和 Sen 方法用于水质指标时间序列的分析,可挖掘出水质监测数据中的一些细节信息,为评估湖库的水质综合管理措施的有效性提供依据,也是水质参数变化的动态宏观规律性分析的一个有效工具。

b. 通过非参数 Mann-Kendall 检验发现 $\rho(\text{DO})$ 呈现略有下降趋势,而 $\rho(\text{COD})$ 则呈现略有上升趋势,同时 $\rho(\text{DO})$ 和 $\rho(\text{COD})$ 呈现负相关,这表明于桥水库有机污染加重,造成 $\rho(\text{DO})$ 下降。

c. 在于桥水库库区周边及其上游地区工业化和

城市化不断加快的背景下,近 20 年来于桥水库的水质基本保持稳定, pH 值和 DO、COD、BOD₅ 和 $\text{NH}_3\text{-N}$ 质量浓度均达到了Ⅲ类水质标准,部分指标还达到了Ⅱ类水质要求,满足相关的水质功能规划要求,说明于桥水库及其所在流域的水质综合管理措施取得积极的效果,水质总体稳定。

参考文献:

- [1] 毛新伟,徐枫,徐彬,等.太湖水质及富营养化变化趋势分析[J].水资源保护,2009,25(1):48-51.
- [2] 易诚,陈津端,湛含辉,等.湘江干流衡阳段水质变化[J].水资源保护,2009,25(2):55-58.
- [3] CHANG H J. Spatial analysis of water quality trends in the Han River basin, South Korea[J]. Water Research, 2008, 42(3): 3285-3304.
- [4] WZHLIN K, GRIMVALL A. Uncertainty in water quality data and its implications for trend detection: lessons from Swedish environmental data[J]. Environmental Science & Policy, 2008, 11(2): 115-124.
- [5] BOUZA-DEA ÑO R, TERNERO-RODRÍGUEZ M, FERNÁNDEZ-ESPINOSA A J. Trend study and assessment of surface water quality in the Ebro River (Spain) [J]. Journal of Hydrology, 2008, 36(3/4): 227-239.
- [6] LEE H W, BHANG K J, PARK S S. Effective visualization for the spatiotemporal trend analysis of the water quality in the Nakdong River of Korea[J]. Ecological Informatics, 2010, 5(4): 281-292.
- [7] CHANG H. Spatial and temporal variations of water quality in the Han River and its tributaries, Seoul, Korea, 1993-2000[J]. Water Air and Soil Pollution, 2005, 161(1/2/3/4): 267-284.

(下转第 34 页)

4)而在洪季其盐度约为 1‰(图 5),近年来,随着北支进潮量的减少,含盐度也有所减小,说明北支下段的缩窄工程对抑制盐水的上溯起到了积极的作用。

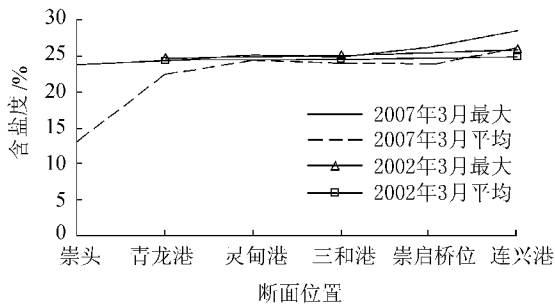


图 4 枯季北支含盐度沿程变化

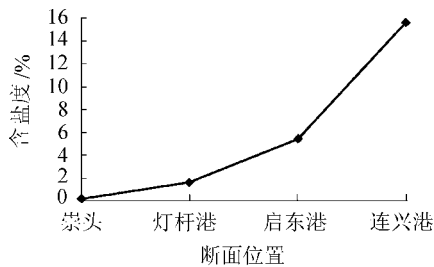


图 5 2008 年 9 月洪季北支含盐度沿程变化

4 结 语

a. 北支河段呈衰萎之势,自然条件下北支分流比仍将维持缓慢减小的趋势。

b. 北支河段受径流影响逐渐减小,主要受潮流作用,随着北支下段围垦缩窄工程的实施,近年来进潮量有所减小,对抑制盐水上溯起到了积极的作用。

c. 北支涨潮含沙量大于落潮,在进口至青龙港附近落潮含沙量明显大于其他位置,为整个河段的易淤段。

d. 为维持北支一定的水深,保障河道一定的航运功能,满足沿江两岸有关县市的引、排水需要,应采用科学的发展观来指导北支的开发治理,必要时可对进口段进行一定的疏浚,适当增加分流比,从而达到综合治理的目标。

参考文献：

[1] 恽才兴.长江河口近期演变基本规律[M].北京:海洋出版社,2004:17-83.
[2] 李伯昌.1984 年以来长江口北支演变分析[J].水利水运工程学报,2006(3):9-17.
[3] 刘载生.长江口北支河段河床演变分析[C]//刘载生.长江口水文泥沙研究成果汇编.武汉:长江水利委员会水文局,1990:57-83.
[4] 曹民雄,高正荣,胡金义.长江口北支水道水沙特性分析[J].人民长江,2003,34(12):34-36.
[5] 余文畴,卢金友.长江河道演变与治理[M].北京:中国水利水电出版社,2005:185-229.

(收稿日期 2010-07-01 编辑 徐 娟)

(上接第 30 页)

[8] BOEDER M,CHANG H. Multi-scale analysis of oxygen demand trends in an urbanizing Oregon watershed, USA [J]. Environmental Management 2008, 87(4):567-581.
[9] 牛志广,陆仁强,王晨婉.天津市近海水质预测方法研究[J].水科学进展,2009,20(2):222-226.
[10] 周丰,郭怀成,黄凯,等.基于多元统计方法的河流水质空间分析[J].水科学进展,2007,18(4):544-551.
[11] 陆海明,尹澄清,王夏晖,等.于桥水库周边农业小流域氮素流失浓度特征[J].环境科学学报,2008,28(2):349-355.
[12] 李俊然,陈利顶,傅伯杰,等.于桥水库流域地表水非点源 N 时空变化特征[J].地理科学,2002,22(2):238-242.
[13] 陈利顶,李俊然.于桥水库流域地表水中水溶性氮季节变化特征[J].中国环境科学,2003,23(2):210-214.
[14] ZHANG X,VINCENT L A,HOGG W D,et al. Temperature and precipitation trends in Canada during the 20th century [J]. Atmospheric Ocean,2000,38(3):395-429.
[15] YENILMEZ F,KESKIN F,AKSOY A. Water quality trend analysis in Lake Eymir,Ankara[J]. Physics and Chemistry of the Earth,Parts A/B/C. doi:10.1016/j.pce.2010.05.005.
[16] HÜLYA B,HAYAL B. Investigation of Temporal Trends in Hydro chemical quality of surface water in western Turkey[J].

Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2008,80(5):469-474.
[17] 辛志伟.区域水环境综合解析和管理对策:GEF 在天津 [M].北京:中国环境科学出版社,2009:311-316.
[18] 天津市环境保护技术开发中心.天津市水生态恢复规划研究总报告[R].天津:天津市环境保护技术开发中心,2007:19-20.
[19] GB3838—2002 地表水环境质量标准[S].
[20] 秦保平,孙韧,王德龙,等.引滦河道中水质偏碱的起因研究[J].环境科学研究,1999,19(5):38-43.
[21] 王新华,纪炳纯,李明德,等.引滦工程上游浮游植物及其水质评价[J].环境科学研究,2004,17(4):18-24.
[22] 朱龙基,范兰池,林超.引滦入津工程水质时空演化规律分析[J].水资源保护,2009,25(2):15-17.
[23] LIU C M,XIA J. Water problems and hydrological research in the Yellow River and the Huai and Hai River basins of China [J]. Hydrological Processes,2004,18(12):2197-2210.
[24] ZHANG Q I,SHI X Z,HUANG B. Surface water quality of factory-based and vegetable-based peri-urban areas in the Yangtze River Delta region,China[J]. Catena,2007,69(1):57-64.
[25] 天津市环境保护科学研究所.于桥水库富营养化及防治研究[R].天津:天津市环境保护科学研究所,1991:94.
(收稿日期 2010-07-06 编辑 高渭文)