

第31卷 第2期
2012年4月

海洋环境科学
MARINE ENVIRONMENTAL SCIENCE

Vol. 31, No. 2
April 2012

【海洋环境管理】

水污染控制管理方案优化研究 ——以胶州湾东北部为例

王翠¹ 吴俊文² 张学庆³ 王金坑¹ 孙琪¹

(1. 国家海洋局第三海洋研究所 福建 厦门 361005; 2. 厦门大学 近海海洋环境科学国家重点实验室 福建 厦门 361005;
3. 中国海洋大学 环境科学与工程学院 山东 青岛 266100)

摘要: 以水质目标和管理费用为约束条件,建立了水污染控制管理方案优化模型,并将其成功应用于胶州湾东北部的水污染控制管理,提出了有利于胶州湾东北部经济和水环境可持续发展的优化管理方案。实例研究表明,该优化模型可应用于水污染控制管理中,可为海岸带地区制定水污染控制方案提供科学依据。

关键词: 水污染控制; 管理方案; 优化模型; 胶州湾东北部

中图分类号: X3 文献标识码: A 文章编号: 1007-6336(2012)02-0277-05

Study of the water pollution control management program ——A case study of the northeast of Jiaozhou Bay

WANG Cui¹, WU Jun-wen², ZHANG Xue-qing³, WANG Jin-keng¹, SUN Qi¹

(1. Third Institute of Oceanography, SOA, Xiamen 361005, China; 2. State key laboratory of Marine Environmental Science, Xiamen University, Xiamen 361005, China; 3. School of Environmental Science & Engineer, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: The water management optimization model is developed by introducing the water quality model and overhead expenses as constraint condition. The model has been used to plan the water management of the northeast of Jiaozhou Bay. And the optional management plan, benefit to the sustainable developments of the local economics and the water environment, has been worked out, which the water quality has been attain the quality standard and cost is the minimum. The calculation example shows that the optimizing model is very effective and can be applied generally to water pollution control planning, which can provide scientific basis for the water control management scheme in coastal zone.

Key words: water pollution control; management program; optimization model; the northeast of Jiaozhou Bay

海湾是海岸带社会发展的重要组成部分,为人类提供了多样化的服务功能。然而,随着流域内社会经济的快速发展,入海污染物的种类和数量剧增,导致海湾水质恶化,环境污染问题日益突出,富营养化程度加重,已经成为阻碍我国沿海地区社会经济可持续发展的关键性因素。为保障我国的水环境安全,改善海湾的水环境和生态系统状况,实现环境保护和经济协调发展,需对海湾水质污染进行管理控制,提出合理可行的水污染综合管理方案。

关于水污染控制管理的研究起始于上世纪六十年代^[1]。近年来,随着计算机技术和系统工程基础学科研究的不断深入和扩展,各种优化理论如人工神经网络(ANN)、遗传算法(GA)、线性规划等在水污染控制领域的应用,为水污染控制管理的发展开拓了广阔的前景^[2-8]。这些优化方法已趋于成熟,多应用于河流、湖泊等水域的水环境污染优化管理,但在水动力特征复杂的海湾地区研究应用较少。实际水环境管理优化问题受到

收稿日期:2011-03-02, 修订日期:2011-06-129

基金项目:国家海洋局第三海洋研究所基本科研业务费专项资金资助项目(海三科 2011017); 国家海洋局海洋公益性行业科研专项经费项目(200805065)

作者简介:王翠(1982-),女,山东潍坊人,助理研究员,主要从事海洋环境管理与规划研究, E-mail: cui516@163.com

通讯作者:孙琪(1976-),女,高级工程师。E-mail: sunqi7@tom.com

各种各样的约束,优化目标越来越向着科学化、大型化、复杂化迈进^[9]。如何应用优化方法解决近岸海域的水环境污染控制管理方案,已经成为目前海洋环境工作者研究的一个重要方向。

本文通过借鉴国内外水污染综合管理优化研究成果,建立了以水质目标和资金为约束条件的水污染控制管理方案优化模型,并将其成功应用于胶州湾东北部的的水污染控制管理。通过对胶州湾东北部不同水环境污染控制管理方案的优化评价,最终提出了满足水质目标的合理经济化污染控制方案,对防止胶州湾东北部生态环境进一步恶化,改善胶州湾的海洋环境质量,促进胶州湾海岸带地区水污染控制管理提供参考依据。

1 水污染控制管理优化模型

在流域范围内实施水污染综合管理,资金问题是制约管理策略实施的最大障碍,因此在满足污染物削减效果和功能区达标的情况下,如何优化管理方案成为综合管理策略实施中的关键问题。针对上述问题,本研究建立了水污染综合管理方案优化模型,通过模型求解得到管理策略的最优方案。主要步骤为:(1)根据子流域的污染负荷情况确定管理工程方案的类型;(2)对各子流域的工程方案费用进行核算;(3)确定模型目标和约束条件,主要选用方案总投资最小作为优化模型的目标函数,选择环境容量和水质达标作为约束条件;(4)模型求解与分析。

基于最小投资的方案优化模型基本结构如下:

$$\text{目标函数: } \min F(M) = \sum_{i=1}^n M_i \quad (1)$$

$$\text{水质约束: } \sum_{i=1}^n Q_i \leq Q_{\max} \quad (2)$$

$$\sum_{i=1}^N a_{ij} Q_i \leq C_j - C_b \quad j=1 \cdots L \quad (3)$$

$$\text{技术约束: } Q_i \geq (1 - k_i) Q_{0i} \quad i=1 \cdots N \quad (4)$$

式中: M_i ——第 i 个子区域管理方案的总投资;

$\min F(M)$ ——管理方案总投资控制目标函数,元;

Q_i ——第 i 个流域的污染物允许排放量 μ/a ;

N ——流域的数目;

Q_{\max} ——区域的最大环境容量 μ/a ;

a_{ij} ——第 i 个源对第 j 控制点的污染物浓度贡献;

C_b ——所选取控制点的环境背景值 $\mu\text{g/L}$;

Q_{0i} ——第 i 源的最大可能排放量 μ/a ;

k_i ——第 i 个源相对基准年污染物排放总量的最大削减率, %;

L ——水质控制点的数目。

在水质约束方程中,考虑了海域环境背景浓度对水质浓度的贡献。在技术约束考虑了成本的可能性以及经济发展的需要,可避免在某些区域内出现过大的削减量而超过了区域社会经济的承受能力。

2 实例研究

2.1 研究区域

胶州湾位于山东半岛南岸,是一个典型的半封闭型海湾,水域面积约 352.94 km^2 ^[10],平均水深约 7 m。已有研究表明东北部海域是胶州湾富营养化最严重的区域^[11-12]。墨水河、娄山河和李村河带来的大量工业废水和生活污水,加上水产养殖活动自身产生的影响,致使该海域生态环境质量日益恶化。因此,本文以胶州湾东北部海域为例,进行水污染控制管理方案优化研究,为该海域海洋环境污染控制和生态环境的可持续发展提供基础支撑。

资金问题是制约近岸海域水污染管理策略实施的最大障碍,方案优化的目的是得出一个水污染控制管理方案,使得方案实施后胶州湾水质达到功能区目标的要求,并且符合技术的可行性和费用的经济性。通过胶州湾水交换特征分析可知,胶州湾东北部水交换迟缓,污染物很容易在此处累积^[13-14]。根据胶州湾的现状监测资料^[15]和环境容量^[16]的计算结果,可知胶州湾东北部的无机氮和活性磷酸盐污染比较严重,均超过该海域的环境容量值。入海径流携带的陆源污染物一直被认为是造成胶州湾东北部海域富营养化最主要的原因^[17]。因此需要针对污染物直接输入这部分水体的子流域(墨水河、娄山河、李村河)制定污染控制方案,得到管理方案的最优分布。

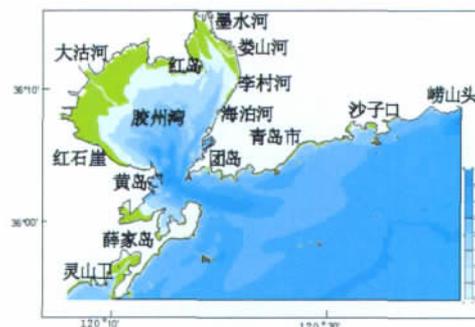


图1 胶州湾地形

Fig. 1 Topography of Jiaozhou Bay

2.2 胶州湾东北部水环境管理方案

对流域入海污染物进行削减是目前海湾富营养化防治和生态修复的前提。污染物削减方案应从多方面着手,单独考虑采用某一种技术是不适宜的,只有全面考虑海岸带区域的特殊性,有针对性的将多种技术结合运用,才有可能达到较好的管理效果^[18]。

胶州湾东北部主要为点源污染,结合当前点源污染物处理的技术方法,设计了3个管理方案。

2.2.1 建设污水处理厂

建设污水处理厂是当前点源污染治理最常用的方案,将污(废)水经过一级、二级或深度处理达标后排放,从而降低其对环境的污染程度。目前胶州湾东北部的污水处理厂主要以一级处理为主,正在扩建或新建二级污水处理设施,故设计方案为建设二级污水处理厂。

2.2.2 中水回用

从20世纪70年代开始,发达国家就大力开展中水回

用技术。中水回用不仅减少了由于远距离引水而产生的巨额工程投资和自来水处理设备的投资,还可以减少污水排放量,进而减少控制水体污染的环保费用。随着经济的快速发展,污水量会大幅度增加,本方案设计将排入海的污水量减半用于中水回用。

2.2.3 深海排放

墨水河口附近海域水深较浅,水交换比较迟缓,因此考虑将墨水河流域处理后的污水进行深海排放。利用 ARCGIS 8.1 在地图上提取水深,确定排放口位置的水深。

海底铺设管道长度利用 ARCGIS 在地图上直接测量获取。

2.3 水环境管理费用分析

2.3.1 污水处理厂费用

城市污水处理厂的费用函数参考文献^[19-20]中的相应函数计算,由于该费用函数以 1989 年为基准年建立,考虑到青岛市经济现状和物价上涨的因素,对其进行修正折算得到 2007 年的费用函数,见表 1(设物价上涨指数为 0.12^[21])。

表 1 城市污水处理厂的费用函数

Tab. 1 The cost function of wastewater treatment plant

费用	污水处理厂	费用函数	修正的费用函数
基建	1 级	$C_1 = 0.133 \times Q_1^{0.83}$	$C_1 = 0.133 \times Q_1^{0.83} \times (1 + 0.12)^{(2007 - 1989)}$
	2 级	$C_2 = 1.233 \times Q_1^{0.72}$	$C_2 = 1.233 \times Q_1^{0.72} \times (1 + 0.12)^{(2007 - 1989)}$
运行	1 级	$CR_1 = 0.15 \times Q$	$CR_1 = 0.15 \times Q \times (1 + 0.12)^{(2007 - 1989)}$
	2 级	$CR_2 = 0.20 \times Q$	$CR_2 = 0.20 \times Q \times (1 + 0.12)^{(2007 - 1989)}$

式中: C——建设费用,10⁴元; Q₁——日处理污水量, m³/d; CR——年运行费,10⁴元/a; Q——年处理污水量,10⁴ m³/a。

2.3.2 中水回用费用

中水处理系统投资可借鉴城市污水处理厂的费用函数,当原水为二级出水时,费用函数为^[22]

$$C = 153.70 \times Q^{0.83} \quad (5)$$

修正的费用函数^[21]为

$$C = 153.70 \times Q^{0.83} \times (1 + 0.12)^{(2007 - 1989)} \quad (6)$$

根据文献^[23],中水运行成本与处理规模成反比,中水

处理规模控制在 150 m³/d 以上,可以将污水的运行单位成本降到 0.75 元/t 以下^[24]。

2.3.3 深海排放管道建设费用

参照相关规范定额^[25],岸边排污口至污水处理厂陆域管线一般费用为 1 000 元/m,排海管线投资费用为 15 000 元/m,以此估算管线费用。通过这些费用函数,对各个方案进行基建费用和运行费用的估算,见表 2。

表 2 管理设计方案的费用估算/10⁴元

Tab. 2 The cost estimating of management design scheme

方案编号	流域	污水处理量 10 ⁴ t · a ⁻¹	中水回用量 10 ⁴ t · a ⁻¹	城市污水处理费用		中水回用费用		管网 费用	总费用
				基建	运行	基建	运行		
二级污水处理厂	李村河	5 595.80	-	51 344.91	6860.89	-	-	-	58 205.80
	娄山河	4 776.30	-	45 812.37	5 856.12	-	-	-	51 668.50
	墨水河	6 852.40	-	59 407.79	8 401.58	-	-	-	67 809.37
中水回用	李村河	5 595.80	3 193.90	51 344.91	6 860.89	1 338.95	4 196.85	-	63 741.61
	娄山河	4 776.30	2 726.20	45 812.37	5 856.12	1 174.05	3 582.23	-	56 424.78
	墨水河	6 852.40	3 911.20	59 407.79	8 401.58	1 584.13	5 139.30	-	74 532.79
深海排放	墨水河	6 852.40	-	59 407.79	8 401.58	-	-	6 780	74 589.37

2.4 优化结果

根据上面的分析,假设每个流域只能采用一种方案进行处理,利用建立的优化模型,使用水质目标和管理费用作为约束条件进行求解。由于无机氮是胶州湾东北部最主要的污染物,故选择无机氮进行削减,二级污水处理厂氨氮的处理效率按照 65% 计算,方案优化结果见表 3。由表 3 可知,在李村河和娄山河流域建立二级污水处理

厂,在墨水河流域建立二级污水处理厂并将其中水进行回用,方可满足胶州湾东北部的功能区划要求,且所需费用最低为 18 4407.1 万元。

优化后胶州湾的无机氮和活性磷酸盐浓度见图 2 和图 3(仅考虑胶州湾东部流域的影响)。由图可知,实行优化方案后,胶州湾东北部的无机氮和活性磷酸盐浓度将大大降低,水质情况明显好转,均满足功能区划水质的要求。

表 3 胶州湾东北部水环境管理方案优化结果

Tab. 3 The optimization result of the management design scheme in the northeastern Jiaozhou Bay

流域	污水处理量/	氨氮现状排放量/	氨氮要求排放量/	氨氮需要去除量/	处理方案	处理费用 (万元 · a ⁻¹)
	t · a ⁻¹					
李村河	5 595.8	1 253.47	732.01	521.46	二级处理厂	58 205.80
娄山河	4 776.3	1 421.27	589.17	832.10	二级处理厂	51 668.50
墨水河	6 852.4	1 480.96	210.16	1 270.79	中水回用	74 532.79

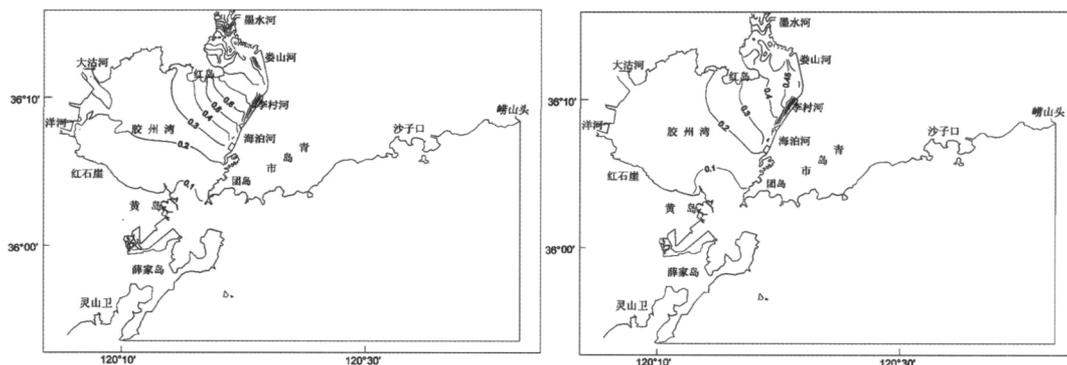


图2 方案优化前后,胶州湾无机氮浓度分布/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Fig.2 Computed distribution of inorganic nitrogen in Jiaozhou Bay before and after optimization scheme

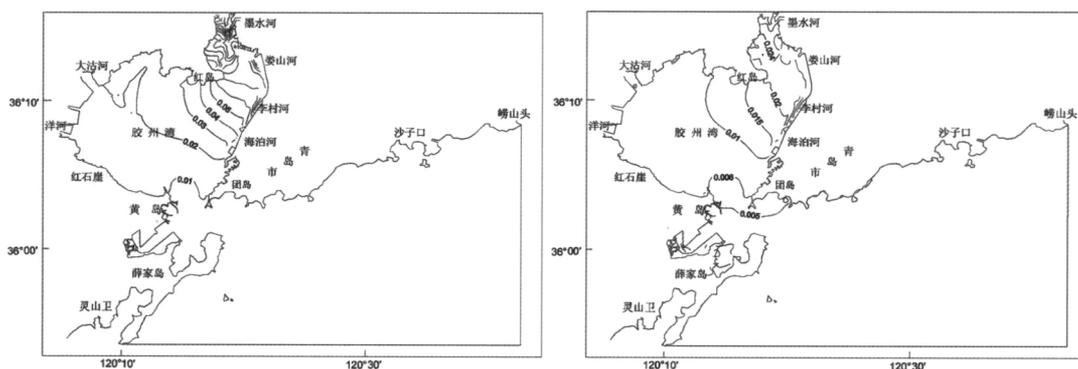


图3 方案优化前后,胶州湾的活性磷酸盐浓度分布/ $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$

Fig.3 Computed distribution of reactive phosphate in Jiaozhou Bay before and after optimization scheme

3 结论与建议

(1) 通过胶州湾东北部管理方案优化模型计算可知:在胶州湾东北部的李村河和莱山河流域建立二级污水处理厂,墨水河流域建立二级污水处理厂并将其中水进行回用,方可满足胶州湾东北部的功能区划要求,且所需费用最低为184 407.1万元。实行优化方案后,胶州湾东北部的无机氮和活性磷酸盐浓度将大大降低,水质情况明显好转,均满足功能区划水质的要求。

(2) 本文尝试建立以水质目标和资金为约束目标的水污染控制管理方案优化模型,并将其成功应用于胶州湾东北部海域,获得了满足水质目标且经济合理的优化方案。研究结果可为环胶州湾地区制定河流水污染控制方案提供技术支持,对其他海域的水污染控制管理优化研究提供参考价值。

参考文献:

[1] 傅国伟,程声通.水污染控制系统规划[M].北京:清华大学出版社,1985.
 [2] CAMPOLO M. Forecasting river flow rate during low-flow period using neural network [J]. Water Resource Research, 1999, 35 (11): 3547-3552.
 [3] NEELAKANTAN TR, PUNDARANTHAN NV. Neural network-

based simulation-optimization model for reservoir operation [J].

Journal of Water Resources Planning and Management 2000, 126 (2): 57-64.

[4] 秦肖生,曾光明.遗传算法在水环境灰色非线性规划中的应用[J].水科学进展,2002,13(1):31-36.

[5] 曾光明,王薇.改进GA法在水污染控制系统多目标规划中的应用[J].湖南大学学报,2004,31(3):19-34.

[6] V. CHANDRAMOULI, H. RAMAN. Multireservoir modeling with dynamic programming and neural networks [J]. Journal of Water Resources Planning and Management 2001, 127(2): 89-98.

[7] 王有乐.区域水污染控制多目标组合规划模型研究[J].环境科学学报,2002,22(1):107-110.

[8] 沈万斌,董德明,宿华,等.嫩江齐齐哈尔市江段水环境优化管理方案[J].吉林大学学报:地球科学版,2003,33(4):519-523.

[9] 杨晓华,陆桂华,陈晓燕,等.最大熵DFP算法及其在水环境优化问题中的应用[J].系统工程理论与实践,2008,9,138-144.

[10] 吴永森,辛海英,吴隆业,等.2006年胶州湾现有水域面积与岸线的卫星调查与历史演变分析[J].海岸工程,2008,27(3):15-22.

[11] 姚云,沈志良.胶州湾东北部营养盐的季节和多年变化[J].水科学进展,2007,18(3):379-384.

[12] 钱国栋,汉红燕,刘静,等.近30年胶州湾海水中主要化学

- 污染物时空变化特征[J]. 海洋科学 2009, 39(4): 781-786.
- [13] 赵亮,魏皓,赵建中. 胶州湾水交换的数值研究[J]. 海洋与湖沼, 2002, 33(1): 23-29.
- [14] WANG C, ZHANG XQ, SUN YL. Numerical simulation of water exchange characteristics of the Jiaozhou Bay based on a three-dimensional lagrangian model [J]. China Ocean Engineering, 2009, 23(2): 277-290.
- [15] 青岛市海洋环保规划编制组. 青岛市海洋环境保护规划研究成果汇编[R]. 青岛:中国海洋大学 2008.
- [16] 张学庆,孙英兰. 胶州湾入海污染物总量控制研究[J]. 海洋环境科学 2007, 26(4): 347-359.
- [17] 赵增霞,王芳,刘群,等. 胶州湾东北部养殖海区环境质量状况及分析[J]. 海洋科学 2010, 34(3): 6-11.
- [18] 刘永,郭怀成,周丰,等. 基于流域分析方法的湖泊水污染综合防治研究[J]. 环境科学学报 2006, 26(2): 337-344.
- [19] 王圃,龙腾锐. 长江、嘉陵江重庆城区段水污染控制方案费用估算[J]. 重庆环境科学, 1997, 6(3): 16-19.
- [20] 高仲臣. 城市基础设施工程投资估算指标排水工程[M]. 北京:中国建筑工业出版社, 1999: 88-91.
- [21] 孙英兰,王丽霞,史峰岩. 洋浦经济开发区污水排海总量控制[J]. 青岛海洋大学学报 2000, 30(3): 383-389.
- [22] 徐森,李梅,黄廷林. 中水处理技术费用的数学模型[J]. 工业用水与废水 2002, 33(3): 8-9.
- [23] 李军. 中水回用技术应用于高校园区建设的可行性研究[J]. 温州大学学报 2004, 17(2): 36-39.
- [24] 邬扬善,屈燕. 北京市中水设施的成本效益分析[J]. 给水排水, 1996, 22(4): 31-34.
- [25] 梁鲁沂,俞国平,徐衍忠. 给水管道单位成本计算公式的推导[J]. 工业用水与废水 2003, 34(5): 51-53.

(上接第 256 页)

表 4 样品中 As 和 Hg 的分析结果

Tab. 4 Analysis results of As and Hg in samples

样品	加入量		本法测定值		GB/T5009 原子荧光光度法	
	As	Hg	As	Hg	As	Hg
底泥 / 10^{-6}	5.0	0.50	4.6	0.47	4.2	0.45
海水 / $\mu\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$	10.0	1.00	9.5	0.94	9.3	0.91
紫菜 / 10^{-6}	5.0	0.50	4.9	0.49	4.7	0.44
鳗鱼 / 10^{-6}	5.0	0.50	4.5	0.46	4.6	0.47

(2) 在最佳实验操作条件下,砷和汞检出限分别达到 $0.0283 \mu\text{g}/\text{L}^{-1}$ 、 $0.0174 \mu\text{g}/\text{L}^{-1}$ 。底泥中砷和汞的加标回收率分别为 89.7% ~ 112.6% 和 91.7% ~ 110.8%, 相对标准偏差分别为 2.7% ~ 5.3% 和 2.2% ~ 4.3%; 海水中砷和汞的加标回收率分别为 90.2% ~ 101.8% 和 90.0% ~ 108.8%, 相对标准偏差分别为 3.1% ~ 5.6% 和 2.1% ~ 4.5%; 水产品中砷和汞的加标回收率分别为 89.6% ~ 102.0% 和 89.2.0% ~ 108.0%, 相对标准偏差分别为 2.6% ~ 4.9% 和 1.7% ~ 4.4%。

(3) 本法具有基体干扰少、灵敏度高、精密度和准确度均可满足重金属残留定量分析的优点,操作简单易行、快速、对环境造成的污染少、对操作人员的健康危害小,具有现实的应用价值,值得应用和推广。

参考文献:

- [1] GB 17378. 5-2007, 海洋监测规范: 第 5 部分—沉积物分析[S].

- [2] 李永华,王丽珍,王五一. HG-ICP-AES 法测定多金属矿区人发中的汞和砷[J]. 光谱学与光谱分析, 2007, 27(4): 789-791.
- [3] 刘碧君,吴丰昌,邓秋静. 锡矿山矿区和贵阳市人发中锑和汞的污染特征[J]. 环境科学 2009, 30(3): 907-912.
- [4] 程祥圣,秦晓光,刘富平. 悬浮液进样氢化物发生原子荧光法测定海洋沉积物样品中痕量砷[J]. 海洋学报, 2005, 27(1): 159-162.
- [5] 马新东,马永安,贺广凯,等. 微波消解—原子荧光法测定海洋沉积物中 As 的研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(5): 479-480, 487.
- [6] 王立军,栗俊,张玉凤,等. 应用 ICP-MS 直接测定近岸高盐排污口水样中重金属方法研究[J]. 海洋环境科学, 2007, 26(2): 172-174.
- [7] 杨颖,程祥圣,秦晓光,等. 氢化物原子荧光法同时测定海洋沉积物中的痕量 As 和 Hg[J]. 海洋环境科学, 2006, 25(4): 74-77.