

# 硅藻指数在水环境监测与评价中的应用

刘俊琢,张成君

(兰州大学资源环境学院,甘肃 兰州 730000)

**摘要:**介绍了硅藻种类组成对水环境状态的指示作用及硅藻指数法的基本原理,通过比较、分析发现:硅藻属指数适用于综合评价亚热带、热带地区的水体污染程度;硅藻模型相似性指数适用于评价气候稳定地区的水污染状况;生物硅藻指数适用范围广,稳定性最好;湖泊富营养化硅藻指数、营养指数、富营养化硅藻指数均为可靠的水体富营养化评价指数。指出目前硅藻的分类与鉴定体系不够完善,还应开展研究消除季节变化对硅藻指数方法稳定性的影响。

**关键词:**硅藻指数;生物监测;水质评价

**中图分类号:** X824; X835

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1006-2009(2009)05-0012-05

## The Application of Diatom Indices in Aquatic Environment Biomonitoring and Water Quality Assessment

LIU Jun-zhuo, ZHANG Cheng-jun

(School of Resource and Environmental Science, Lanzhou University, Lanzhou, Gansu 730000, China)

**Abstract:** The indicative function of water quality by diatom community and basic principle of diatoms index method were described. By comparison and analysis it was found the variety of diatom assemblage in quantity by mathematical methods was applied to evaluate the water pollution in the tropics and subtropics areas. Similarity index of diatom model was suitable to evaluate water pollution in the areas with stable climate. Biological diatom index had wide applicable scope and best stability. Lake eutrophication diatom index, index of nutrition, eutrophication diatom index were reliable methods for water eutrophication evaluation. At present classification and identification system of diatoms were not perfect and still manage to eliminate seasonal change on the stability of diatoms index method.

**Key words:** Diatom indices; Biomonitoring; Water quality assessment

水环境化学监测结果随时间会发生起伏变化,其主要原因是部分化合物发生分解、沉积等反应,以及降雨、蒸发等引起污染物浓度变化<sup>[1]</sup>。这一系列复杂变化给采用化学方法监测水体质量带来了困难,而且每个化学指标所反映的仅仅是采样这一时间点的情况<sup>[2-4]</sup>,因而常规的化学监测手段难以从整体水平对水质进行客观监测和评价<sup>[4]</sup>。水环境监测的主要目的是评价水体健康状况及水生生态系统供养生物的能力<sup>[5]</sup>,需要发展快速、高效的生物监测技术,实现由污染监测向生态监测的转型<sup>[6]</sup>。

硅藻为单细胞藻类群落,对水体温度、pH值、电导率、营养盐浓度等变化极敏感<sup>[7]</sup>,在判别水体

污染程度、评价水体富营养状态等方面具有广泛的应用价值<sup>[8]</sup>,在欧洲、美洲、亚洲、非洲均有相关报道<sup>[2-3,9-12]</sup>。目前,硅藻群落组合特征在指示和监测湖泊营养演化方面的重要性已被古湖沼学研究结果所证实<sup>[13]</sup>,2000年欧盟水框架指导委员会将硅藻推荐为水环境整治决策中确定营养水平的生物指标<sup>[12,14]</sup>,法国以硅藻生物指数为标准方法监测水体质量<sup>[12]</sup>,而国内的相关报道较少<sup>[15-16]</sup>。文章介绍了将硅藻应用于水环境监测与评价的基本原理,阐述了有代表性的硅藻指数法的计算过程、

收稿日期:2009-02-16;修订日期:2009-07-09

作者简介:刘俊琢(1985—),男,河北清河人,在读研究生,主要研究方向为水环境生物监测。

适用条件等, 以期为国内开展相关研究及完善水环境监测体系提供依据。

## 1 硅藻种类组成对水体环境的指示作用

硅藻是一种光自养型藻类, 为天然水体的重要成分, 可以存活在绝大多数水环境生态条件下<sup>[18, 17]</sup>, 具有种类多、分布广的特点, 且对水环境条件变化极其敏感, 现已查明有相当多的硅藻种只能生存在狭小的水环境条件(温度、酸碱度、营养盐、金属离子浓度等)下<sup>[7]</sup>。因此, 可以通过研究环境因子对硅藻群落的影响机制, 建立硅藻组成与水环境状态之间的对应关系, 最终用硅藻组成变化来指示环境因子的改变情况, 进而判断水质好坏。

### 1.1 硅藻种类组成对水环境状态的指示作用

污染物对硅藻的影响可发生在各个生物组建水平, 如亚细胞和细胞结构、形态、生化和生理、种群数量、群落结构和功能等方面<sup>[18]</sup>。水环境化学状态的变化会使一些种类的增长受到限制, 甚至消亡; 一些种类的生长增殖得以加速, 成为优势种<sup>[1]</sup>。因此, 某一种类的消失或增殖都对应着环境条件某一方面的变化。

沟链藻 (*Aulacoseira alpigea*)、梅尼小环藻 (*Cyclotella meneghiniana*)、极小异极藻 (*Gomphonema parvulum*)、微型舟形藻 (*Navicula subiniscula*)、普通菱形藻 (*Nitzschia communis*)、小型冠盘藻 (*Stephanodiscus parvus*) 等硅藻种类喜好生活在营养物质丰富的水体中, 指示富营养化状态; 微小曲壳藻 (*Achnanthes minutissima*)、圆瘤棒杆藻 (*Rhopalodia gibba*)、结膜窗纹藻 (*Epithemia adnata*)、念珠等片藻 (*Diatoma moniliformis*) 等则生活在总磷浓度低的水体中, 指示贫营养状态<sup>[4, 7, 13]</sup>。箱形桥弯藻 (*Cymbella amphicephala*)、尖针杆藻 (*Synedra acus* Kutz.) 等对污染敏感, 为清洁带指示种; 亚平滑曲壳藻 (*Achnanthes sublaevis*)、冬季等片藻 (*Diatoma hianale*) 为中污带指示种; 微小异极藻 (*Gomphonema parvulum*)、谷皮菱形藻 (*Nitzschia palea*) 为多污带指示种; 广缘小环藻 (*Cyclotella bodanica* Eul.) 则是酸化水体常见的硅藻种<sup>[14]</sup>。

### 1.2 硅藻指数法的基本原理

水环境条件变化对硅藻群落组成有明显影响, 可通过观测其组成变化来指示水体环境状态的变化。硅藻指数法 1979 年由 Descy<sup>[9]</sup> 提出, 目前所使用的硅藻指数大多建立在 Zelinka 等提出的以下

方程<sup>[5]</sup>基础上:

$$\text{index} = \frac{\sum_{j=1}^n a_j s_j v_j}{\sum_{j=1}^n a_j v_j}$$

式中,  $a_j$  为样品中物种  $j$  的丰度;  $v_j$  为指示值;  $s_j$  为物种  $j$  的污染敏感度。

硅藻指数法一般包括指示种、指示种丰度、指示种污染敏感度、指示种污染指示值等。因此, 在建立硅藻指数之前, 应先明确硅藻群落组成与环境变量之间的联系, 需采集硅藻样品及水样, 进行水化学指标分析, 再对硅藻作处理、鉴定及丰度计算, 得出不同种属对污染物响应的生态最佳值和忍耐值, 寻找指示性物种及其污染指示值与污染敏感度, 最后选用数学模型, 建立硅藻群落组合与水环境状态之间的联系。

## 2 水环境监测与评价中的硅藻指数方法

近 30 年来, 大量以硅藻为指示生物的指数方法相继被提出并不断改进, 如特殊污染敏感指数 (SPDI)、水生环境腐殖度指数 (SI)、生物硅藻指数 (BDI)、硅藻模型相似性指数 (DMA)、硅藻属指数 (GI)、硅藻组合有机污染指数 (DAI)、富营养化硅藻指数 (TDI)、湖泊富营养化硅藻指数 (TDL) 等, 广泛应用于水体质量评价及水体富营养化程度判定<sup>[2, 5, 10-11, 13, 19-23]</sup>。总体而言, 这些指数方法分为两类, 一类为综合评价水体清洁状态的指数, 另一类为评价水体富营养化程度的指数。

### 2.1 硅藻属指数 (a generic index of diatom assemblage, GI)

GI 需鉴定曲壳藻属 (*Achnanthes*)、卵形藻属 (*Cocconeis*)、小环藻属 (*Cyclotella*)、桥弯藻属 (*Cymbella*)、直链藻属 (*Melosira*)、菱形藻属 (*Nitzschia*) 6 个优势属, 并计算出各自的丰度值, GI 值即前三者与后三者的丰度比。前三者喜欢生活在清洁水体中, 而后三者偏向于生活在受污染的水中。因此, 指数值越高说明水体受污染程度越轻, 反之水体污染越严重<sup>[10-11]</sup>。

GI 只适用于亚热带、热带地区河流水质综合评价, 有明显的地域限制。GI 只需将硅藻鉴定到属这一级别, 具有简单、便捷的优点, 且与 DAI、SI、TDI 等其他硅藻水质指数之间存在着显著相关性, 数据可信度较高。

### 2.2 硅藻模型相似性指数 (diatom model affinity,

DMA)

DMA 通过模拟自然状态下的硅藻群落组成, 计算现实水体的硅藻群落组成与模拟群落之间的相似程度来评价水体质量, 其计算公式为<sup>[21]</sup>:

$$\text{相似百分比} = \frac{n}{i=1} \min(m, r)$$

式中,  $m$  为模拟群落中种  $i$  的百分比;  $r$  为现实群落中同一种的百分比;  $n$  为硅藻种数目。相似百分比越高, 表明水体所受污染越轻, 反之水体污染越严重。

DMA 没有地域限制, 但只适用于气候条件稳定的地区, 主要用于监测点源排放的营养物和有机污染物, 指数中建立的模拟硅藻群落只适用于特定地区。在使用 DMA 之前, 需要调查清楚整个地区未受人类活动干扰时水体中存活的硅藻种类和丰度, 难度较大, 为该方法的主要不足。相比其他生物指数, DMA 适用于多变量分析, 以及在不同等级尺度评价人类活动对水环境的干扰程度。

### 2.3 生物硅藻指数 (Biological Diatom Index, BDI)

Coste 等<sup>[12]</sup>提出的 BDI 依赖于 838 种污染敏感度不同的关键种, 通过计算各种类的丰度及在 7 级水质梯度中出现的概率, 推导指数值, 评价水体质量。计算过程如下<sup>[12]</sup>:

$$BDI = 1 \times F_{(1)} + 2 \times F_{(2)} + 3 \times F_{(3)} + 4 \times F_{(4)} + 5 \times F_{(5)} + 6 \times F_{(6)} + 7 \times F_{(7)}$$

式中,  $F_{(i)}$  为给定种  $x$  在  $i$  级水质中出现的概率, 可由下式计算:

$$F_{(i)} = \frac{\sum_{x=1}^n A_x P_{x(i)} V_x}{\sum_{x=1}^n A_x V_x}$$

式中,  $A_x$  为种  $x$  的丰度;  $P_{x(i)}$  为  $i$  级水体中种  $x$  存在的概率;  $V_x$  为种  $x$  的生态幅大小;  $n$  为丰度 > 0.75% 的属种数量。

$P_{x(i)}$  可由下式计算:

$$P_{\text{class}(i)} = \frac{N_{(i)} \times A_{(i)}}{N_{\text{sites}} \times S_{om}}$$

$$S_{om} = \frac{\sum_{i=1}^n N_{(i)} \times A_{(i)}}{N_{\text{sites}}}$$

式中,  $P_{\text{class}(i)}$  为  $i$  级水质环境中各种存在的概率;  $N_{(i)}$  为  $i$  级水质中各种出现的数量;  $A_{(i)}$  为各种的堆积丰度;  $N_{\text{sites}(i)}$  为  $i$  级水质中采样点的数目。

BDI 涉及的硅藻种类丰富, 包括不同 pH 值、盐度及热带地区水体中生存的硅藻种类和一些常

见种类的异常形态<sup>[12]</sup>, 因而适用范围广, 涵盖温带、热带地区, 可用于酸化严重、盐度高的水体, 且对营养物质及有机污染物变化有明显指示作用<sup>[17]</sup>。另外, BDI 还包含 14 种水质参数<sup>[22]</sup>, 为目前最稳定的指数之一, 已被法国当作标准方法定期监测水体质量<sup>[12]</sup>。BDI 指数需将硅藻鉴定到种, 工作繁琐, 难度大, 对操作人员素质要求高。

### 2.4 湖泊富营养化硅藻指数 (Trophic Diatom Index for Lakes, TDI)

TDI 是一种基于浮游硅藻呈现出来的对总磷浓度生态最佳值和忍耐值特征的指数方法, 主要通过计算水体生态位值来评价湖泊富营养化程度。计算公式如下<sup>[13]</sup>:

$$TDI = \frac{a_k S_k V_k}{a_k S_k}$$

式中,  $a_k$  为种  $k$  的丰度;  $S_k$  为种  $k$  的敏感度;  $V_k$  为种  $k$  的营养指数。TDI 值在 0~5 之间变化, 值越高, 说明水体生态状况越好, 富营养化程度越轻。TDI 值分级及营养化程度见表 1。

表 1 TDI 值分级及营养化程度<sup>[13]</sup>

TDI 值	生态学状态
4~5	好
3~4	较好
2~3	中等
1~2	可忍受
0~1	差

TDI 只适用于海拔低、水浅、盐度及营养物本底值高的湖泊, 不适用于淡水湖泊, 目前仅在较小范围内应用, 方法可靠性还有待于在更大范围内验证。

### 2.5 营养指数 (diatom index or trophic index, DI)

DI 为一种通过权重来评价水体富营养化程度的指数, 计算公式如下<sup>[19]</sup>:

$$DI = \frac{\sum_{i=1}^n N_i G_i T_i}{\sum_{i=1}^n N_i G_i}$$

式中,  $N_i$  为种  $i$  的丰度;  $G_i$  为种  $i$  的权重;  $T_i$  为种  $i$  的营养状态;  $n$  为硅藻种总数。DI 值在 1~5 之间变化, 与湖泊营养程度的对应关系见表 2。

DI 主要用于小型湖泊的短期监测, 可得到水体营养状态空间的高分辨率变化情况, 与大型水生



表 2 D 值与湖泊营养程度的对应关系<sup>[19]</sup>

D 值	湖泊营养程度
1.00 ~ 1.99	寡营养
2.00 ~ 2.49	寡 - 中营养
2.50 ~ 3.49	中营养
3.50 ~ 3.99	中 - 富营养
4.00 ~ 5.00	富营养

植物指数法得到的结果有较好的相关性<sup>[19]</sup>,但不适用于水体的长期监测。

## 2.6 富营养化硅藻指数 (trophic diatom index, TD I)

TD I 通过统计硅藻种对富营养化的敏感程度来评价水体富营养状态,计算公式如下<sup>[24-25]</sup>:

$$TD I = (WMS \times 25) - 25$$

WMS (a weighted mean sensitivity, 加权平均敏感度) 计算公式如下:

$$WMS = \frac{\sum_{j=1}^n a_j v_j i_j}{\sum_{j=1}^n a_j v_j}$$

式中,  $a_j$  为样品中种  $j$  的丰度;  $v_j$  为种  $j$  的指示值, 在 1~3 之间变化, 3 表示种  $j$  对富营养化敏感, 1 表示种  $j$  对富营养化不敏感;  $i_j$  为种  $j$  的污染敏感度, 在 1~5 之间变化, 1 表示种  $j$  适合生活在寡营养状态, 5 表示种  $j$  喜欢在富营养状态下生存。TD I 值在 1~100 之间变化, 对应营养物浓度由低到高的变化。

TD I 主要用来评价淡水环境的富营养程度<sup>[23]</sup>, 适用于温带与热带地区, 但涉及的硅藻种类不够全面, 需要不断补充新种类。

## 3 结语

自从 1979 年 Descy 将硅藻指数法引入水质评价以来, 各国学者已经提出了数十种硅藻指数法, 用于监测水体质量及评价富营养化程度, 为完善水环境监测与水质评价指标体系提供了一种科学、可靠的方法。硅藻指数法作为水环境生物监测的一种新方法, 具有广阔的应用前景, 但目前尚存在以下问题:

(1) 硅藻的分类与鉴定体系不够完善。硅藻种类繁多, 分布广泛, 估计世界上共有 1 000 万种<sup>[2]</sup>, 但目前鉴定的只有 11 000 余种, 而且不断有硅藻种类消失及新变种出现。因此, 目前提出的大部分硅藻指数涉及的硅藻种类都不够全面, 人们对

现有指数的修正和补充也说明了这一点。

(2) 季节变化威胁硅藻指数方法的稳定性。季节更替带来水体温度、流速、水深等方面的变化, 尤其在温带地区, 变化极其明显。这些因素对硅藻的生长、增殖及分布有着不容忽视的影响, 增加了硅藻指数法的不稳定性, 给长期、连续监测带来了诸多不便, 如何消除这种不稳定性还有待于进一步研究。

## [参考文献]

- [1] TAYLOR J C, VAN-VUUREN M S J, PIETERSE A J H. The application and testing of diatom-based indices in the Vaal and Wilge Rivers, South Africa [J]. *Water SA*, 2007, 33 (1): 51 - 60.
- [2] BATE G, SMALES P, ADAMS J. A water quality index for use with diatoms in the assessment of rivers [J]. *Water SA*, 2004, 30 (4): 493 - 498.
- [3] TAYLOR J C, PRYGIEL J, VOSLOO A, et al. Can diatom-based pollution indices be used for biomonitoring in South Africa: A case study of the Crocodile West and Marico water management area [J]. *Hydrobiologia*, 2007 (592): 455 - 464.
- [4] 董旭辉, 羊向东, 王荣. 长江中下游地区湖泊富营养化的硅藻指示性属种 [J]. *中国环境科学*, 2006, 26 (5): 570 - 574.
- [5] HARDING W R, ARCHBALD C G M, TAYLOR J C. The relevance of diatoms for water quality assessment in South Africa: A position paper [J]. *Water SA*, 2005, 31 (1): 41 - 46.
- [6] 张宁红. 太湖流域生态安全监测体系的构建 [J]. *环境监测管理与技术*, 2008, 20 (3): 1 - 5.
- [7] BRENT J B, COCQUYT C, CATHER NEM. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical streams [J]. *Hydrobiologia*, 2006 (573): 75 - 87.
- [8] POTAPOVA M G, CHARLES D F. Benthic diatoms in USA rivers: distributions along spatial and environmental gradients [J]. *Journal of Biogeography*, 2002 (29): 167 - 187.
- [9] DESCY J P. A new approach to water quality estimation using diatoms [J]. *Nova Hedwigia*, 1979 (64): 305 - 323.
- [10] WU J T. A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan [J]. *Hydrobiologia*, 1999 (397): 79 - 87.
- [11] WU J T, KOW L T. Applicability of a generic index for diatom assemblages to monitor pollution in the tropical River Tsanwun, Taiwan [J]. *Journal of Applied Phycology*, 2002 (14): 63 - 69.
- [12] COSTE M, BOUTRY S, ROSEBERY J T, et al. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI - 2006) [J]. *Ecological Indicators*, 2009 (9): 621 - 650.
- [13] KOVACS C S, BUCZKO K, HAJNAL E. Epiphytic, littoral diatoms as bioindicators of shallow lake trophic status: Trophic Diatom Index for Lakes (TD L) developed in Hungary [J]. *Hydro-*

- biologia, 2007 (589): 141 - 154.
- [14] 丁蕾, 支崇远. 环境对硅藻的影响及硅藻对环境的监测 [J]. 贵州师范大学学报 (自然科学版), 2006, 24 (3): 13 - 16.
- [15] 齐雨藻, 黄伟建, 骆育敏, 等. 用硅藻群集指数 (Daplo) 和河流污染指数 (RPId) 评价珠江广州河段的水质状况 [J]. 热带亚热带植物学报, 1998, 6 (4): 329 - 335.
- [16] 辛晓云, 杨文杰, 张红, 等. 内蒙古岱海水质的硅藻生物指数评价 [J]. 山西大学学报 (自然科学版), 2000, 23 (3): 263 - 266.
- [17] FED M J, ALMEDA S F P, CRAVEIRO S C, et al A comparison between biotic indices and predictive models in stream water quality assessment based on benthic diatom communities [J]. Ecological Indicators, 2009 (9): 497 - 507.
- [18] 吕亚红, 顾泳洁. 苏州河沉积物中的硅藻及其污染指示作用 [J]. 上海环境科学, 2002, 21 (10): 633 - 637.
- [19] SEELE J, MA YR M, STAAB F, et al Combination of two indication systems in pre-alpine lakes-diatom index and macrophyte index [J]. Ecological Modeling, 2000 (130): 145 - 149.
- [20] PRYGIEL J, CARPENTIER P, ALMEDA S, et al Determination of the biological diatom index (BDNF T 90 - 354): results of an intercomparison exercise [J]. Journal of Applied Phycology, 2002 (14): 27 - 39.
- [21] PASSY S I, BODE R W. Diatom model anity (DMA), a new index for water quality assessment [J]. Hydrobiologia, 2004 (524): 241 - 251.
- [22] TAYLOR J C, HARD NG W R, ARCH BALD C G M, et al Diatoms as indicators of water quality in the Jukskei-Crocodile river system in 1956 and 1957, a re-analysis of diatom count data generated by BJ Chloňky [J]. Water SA, 2005, 31 (2): 237 - 246.
- [23] ATAZADEH I, SHAR IF M, KELLY M G Evaluation of the Trophic Diatom Index for assessing water quality in River Gharasou, western Iran [J]. Hydrobiologia, 2007 (589): 165 - 173.
- [24] KELLY M G, WHITTON B A. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers [J]. Journal of Applied Phycology, 1995 (7): 433 - 444.
- [25] KELLY M G, CAZAUBON A, COR NG E, et al Recommendations for the routine sampling of diatoms for water quality assessments in Europe [J]. Journal of Applied Phycology, 1998 (10): 215 - 224.

本栏目责任编辑 姚朝英

## (上接第 11 页)

- [7] FR ICKE M, ZELLER M, CULLEN W, et al Dimethylthioarsinic anhydride: A standard for arsenic speciation [J]. Analytica Chimica Acta, 2007 (583): 78 - 83.
- [8] SUZUKI K T, MANDAL B K, OGRA Y. Speciation of arsenic in body fluids [J]. Talanta, 2002 (58): 111 - 119.
- [9] 赵秋香, 李海萍, 赵文海, 等. 土壤中毒性元素 As 的形态分析及其测定 [J]. 分析试验室, 2007, 26 (2): 56 - 59.
- [10] GARCIA-MANYES S, JIMENEZ G, PADRO A, et al Arsenic speciation in contaminated soils [J]. Talanta, 2002 (58): 97 - 109.
- [11] WAHLEN R. Fast and accurate determination of arsenobetaine in fish tissues using accelerated solvent extraction and HPLC-ICP-MS determination [J]. Journal of Chromatographic Science, 2004 (42): 217 - 222.
- [12] B HYMER C, CARUSO J A. Evaluation of HPLC systems for the separation and quantification of arsenic compounds from apple extracts [J]. Journal of Liquid Chromatography & Related Technologies, 2002 (25): 639 - 653.
- [13] 李银生, 曾振灵, 陈杖榴, 等. 洛克沙肿污染胁迫下蚯蚓体内砷的富集和释放 [J]. 同济大学学报, 2008, 36 (2): 212 - 217.
- [14] 刘世民, 刘岩, 王长祥. 氢化发生原子吸收法测定海产品中的微量砷 [J]. 分析检测, 2005, 26 (2): 189 - 190.
- [15] 曾泽, 蒋维旗, 谢琰. 微波溶解 - 氢化物发生原子荧光光谱法测定氟石中的砷和汞 [J]. 检验检疫科学, 2008, 18 (6): 32 - 34.
- [16] 许建华, 田锋, 杜青, 等. 微波消解 - 原子荧光法测定土壤中汞、砷、硒 [J]. 环境监测管理与技术, 2007, 19 (4): 34 - 35.
- [17] KOHLMAYER U, KUBALLA J, JANTZEN E. Simultaneous separation of 17 inorganic and organic arsenic compounds in marine biota by means of high-performance liquid chromatography/inductively coupled plasma mass spectrometry [J]. Rapid Communications in Mass Spectrometry, 2002, 16 (10): 965 - 974.
- [18] 滕曼, 梁立娜, 蔡亚岐, 等. 离子色谱 - 氢化物发生原子荧光光谱联用技术在砷形态分析中的应用 [J]. 分析试验室, 2007, 26 (1): 22 - 26.
- [19] SMITH P G, KOCH I, REMER K J. An investigation of arsenic compounds in fur and feathers using X-ray absorption spectroscopy speciation and imaging [J]. Science of the Total Environment, 2008 (390): 198 - 204.
- [20] 袁爱萍, 贺大鹏, 龙玉珊, 等. 氢化物发生 - 原子荧光光谱法同时测定滑石中砷和汞 [J]. 岩矿测试, 2008, 27 (5): 389 - 391.
- [21] 沈志群. 双道原子荧光同时测定海水中痕量砷和汞 [J]. 环境监测管理与技术, 2005, 17 (6): 30 - 31.
- [22] 朱宇芳, 张宗祥. 电热板加热消解 - 氢化物原子荧光法测定鱼虾中的总砷 [J]. 福建分析测试, 2009, 18 (1): 74 - 76.
- [23] 马名扬, 张丽佳, 张朝阳, 等. 微波辅助提取 - 氢化物发生原子荧光光谱法测定土壤中无机砷 [J]. 岩矿测试, 2007, 26 (5): 372 - 376.
- [24] 杨红丽, 王锴, 朱四喜, 等. 联用技术在砷形态分析中的应用进展 [J]. 浙江海洋学院学报 (自然科学版), 2007, 26 (1): 65 - 73.