

DOI: 10.3880/j.issn.1004-6933.2015.06.021

附生硅藻作为指示生物的研究进展

黎佛林¹, 蔡德所²

(1. 南昌工学院建筑工程学院, 江西 南昌 330108; 2. 三峡大学水利与环境学院, 湖北 宜昌 340033)

摘要:通过筛选斯普林格、爱思唯尔和中国知网中关于硅藻良好指示特性的研究结论,按照指示变量的特征可归纳为水体环境变量、硅藻指数、生态毒理学、古环境古气候、土地利用和生态水文要素6个类目。大量研究结果证实,基于附生硅藻的种类分布和个体特征,使得硅藻具有上述变量的良好指示效应,特别在指示水体环境和古环境方面。

关键词:附生硅藻;指示性;水体水质;评价指数;综述

中图分类号:TV211.1⁺4 文献标志码:A 文章编号:1004-6933(2015)06-0128-07

Research progress of epiphytic diatoms as indicator organism

LI Folin¹, CAI Desuo²

(1. College of Civil Engineering, Nanchang Institute of Science and Technology, Nanchang 330108, China;
2. College of Hydraulic and Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

Abstract: Study of epiphytic diatoms as bio-indicators spanned a century. By screening the research findings on the good indication of diatoms in Springer, Elsevier, and China National Knowledge Infrastructure, it can be grouped into aquatic environment variables, diatom index, ecotoxicology, paleo-environmental & paleo-climate, land use and eco-hydrological in accordance with the characteristics of the variables. Numerous studies certified that diatoms community and individual species have a good indication, based on species distribution and individual characteristics, especially in indicating the water environment and the ancient environment.

Key words: epiphytic diatoms; indicative; water quality; rivers and lakes; review

硅藻是水生生态系统中物种最丰富的生物之一,栖息的生境十分广泛。硅藻对于水体中有机污染物、无机营养物、重金属和酸碱度等环境因子的变化能做出迅速反应。Whitton在研究生物监测时指出,作为指示生物需要满足3个基本要求^[1]:①这个生物群在研究区域广泛存在,它有一个特定的栖息地,容易取样,且物种的丰度不受生命循环周期的影响。②能对外界环境变化做出响应,同时物种或群落结构能揭示外界环境不同的特性。③物种容易鉴定和量化,不需要消耗太多的时间和劳动力,最好是人员经过培训能完成分析,而不需要过多的生物学知识。相对于大型无脊椎动物和鱼类,硅藻为单细

胞植物,生命周期较短,能及时反映水环境变化,且广泛分布于各种水生环境中,因此是指示生物的首选^[2]。硅藻样品采样方便,成本较低,玻片样本在1000倍油镜下容易辨别且能长期保存,吸引世界各地的学者对其展开研究。针对我国水环境与生态保护存在的突出问题,以及由流域梯级水利工程阻断流动的活水引起的一系列生态问题、饮水安全问题、河流重金属污染^[3,4]、古环境等热点难点问题,从硅藻的相关研究中都可以寻找到一些答案。

1 附生硅藻的指示生物研究

人类活动对水生硅藻影响的相关研究已有100

基金项目:国家自然科学基金(40971280);广西水利厅科技项目(201317,201422)

作者简介:黎佛林(1987—),男,讲师,硕士,主要从事水质生物监测和大坝安全监测研究。E-mail:china-diatoms@qq.com

通信作者:蔡德所,教授。E-mail:caidesuo@vip.163.com

多年的历史,前期主要集中于硅藻指示水质的可行性和可靠性方面;到20世纪90年代末,底栖硅藻在欧洲和美国就成为推荐的水质监测生物,同时一系列的硅藻指数也在这一时期相继发展和完善。

1.1 硅藻属种指示水环境

硅藻属种及其组合特征被众多学者用于指示水生环境腐殖程度、有机污染、无机营养负荷、富营养化、pH、含盐度等水环境变量^[5-13]。Kalyoncu等^[5]实验调查出 *Nitzschia palea*, *Craticula accomoda*, *Gomphonema parvulum*, *Navicula atomus*, *N. cryptocephala* 是土耳其最耐有机污染的常见属种。Gomà等^[6]认为 *Eolimna minima*, *Gomphoneis minuta*, *Navicula gregaria* 和 *Nitzschia inconspicua* 是加泰罗尼亚(西班牙东北地方)地区的耐污指示种。在水资源丰富的尼泊尔,河流湖泊受人类活动干扰逐渐增多,结果显示硅藻群落结构与栖息地间的关系紧密,即不同栖息地差异较大。该地区硅藻类群与我国西南地区相似,最常见的属有 *Achnanthes*, *Fragilaria*, *Gomphonema*, *Navicula* 和 *Nitzschia*, 河流中最常见的种有 *Achnanthidium minutissimum*, *Eolimna minima*, *Nitzschia palea*。在钠离子质量浓度高的采样点, *Gomphonema lagenula*, *Nitzschia cf. incognita*, *Gomphonema augur* 和 *Navicula cf. minima* 丰度最大,在钠离子质量浓度低的地方 *A. minutissimum* 种丰度最大;该研究还证实 *Nitzschia palea*, *N. amphibia* 为指示高浓度硫酸根离子的水体^[7]。荷兰的 van Dam等^[8]早在1994年就揭示硅藻能非常有效地指示pH、盐度、有机氮、氧饱和度、腐殖度和富营养化程度。Sudhakar等^[9]在污水排放区研究硅藻属种指示特性时发现,总溶解固体和悬浮固体对 *Nitzschia obtusa*, *N. palea*, *N. hungarica*, *N. thermalis*, *N. acicularis* 和 *Gomphonema parvulum* 生长影响很大,因为以 *Nitzschia* 为代表的耐污种新陈代谢需要大量的无机和有机溶解物。Delacruz等^[10]利用附生硅藻评价澳大利亚东南部点源无机污染,认为是一个很有

效的方法。Chien^[11]从分子生物学的角度,剖析了硅藻体内离子含量的差异,在所分析种类中, *Cymbella Meneghiniana* 含钙最多,浮游硅藻 *Navicula atomus* 的含镍量最高, *Cymbella Turgid* 含铜量最多, *Fragilaria capucina* 有最高的汞。Dickman等^[12]发现硅藻还可以指示河流中悬浮固体的水平,运动型硅藻与附生硅藻的比例与悬浮固体含量相关性好,且悬浮固体含量高的采样点其运动型硅藻质量分数高。 *Eunotia*, *Pinnularia*, *Frustulia* 和 *Brachysira* 是新西兰比较常见的藻属,在全球广泛分布,这些属种在波兰和日本等地都指示酸性贫营养水体^[13]。在加拿大, *Cyclotella stelligera* 和 *Tabellaria flocculosa* 对酸碱度不敏感,但在其他地区是嗜酸性硅藻^[14]。表1归纳了各地常见的4类硅藻指示种(由于文中硅藻属种在国内很多没有中文译名,故本文统一用外文表示)。

1.2 硅藻指数

硅藻指数是众多硅藻属种指示意义的综合体,一般通过长期采集测试样点的硅藻种群和理化参数后按一定的数学模型计算得到,建立硅藻指数需要大型的数据库来确保指数评价的准确度^[15]。在20世纪末,多数硅藻指数已建立(表2),按照指示意义可分为4类:①指示腐殖度,如SLA;②指示水体营养水平,如TDI, EPI-D, RTI, SHE;③指示水体污染,如SPI, BDI, GDI, CEE;④有机污染,富营养,矿化作用的综合指数,如EPI-D。

硅藻评价指数中,最常用的数学模型为基于Zelinka & Marvan经典方程:

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

式中: *I* 为 Index 函数; *a_j* 为样品中物种的丰度; *v_j* 为物种 *j* 的指示值; *s_j* 为物种 *j* 的污染敏感度。

IBD, IPS, TDI, GDI, RTI, SHE等指数均基于

表1 各地常见的4类硅藻指示种

无营养指示意义	耐污种	清洁种	喜中等营养水体
<i>Achanthoceras</i> , <i>Asterionella</i> , <i>Aulacosira</i> , <i>Chaetoceras</i> , <i>Cyclostephanos</i> , <i>Cyclotella</i> , <i>Fragilaria crotonensis</i> , <i>Skeletonema</i> , <i>Stephanodiscus</i> , <i>Thalassiosira</i>	<i>Nitzschia</i> , <i>Gomphonema parvulum</i> , <i>G. minuta</i> , <i>G. pseudoaugur</i> , <i>Achnanthes clevei</i> Czarneci, <i>Amphora montana</i> Krasske, <i>A. veneta</i> Kützing, <i>Cymbella affinis</i> Kützing, <i>C. cistula</i> , <i>Cyclostephanos dubius</i> , <i>Fallacia pygmaea</i> , <i>Luticola goeppertiana</i> , <i>Navicula salinarum</i>	<i>Achnanthes bioreti</i> Germain, <i>A. dauyi</i> Foged var. <i>dauyi</i> , <i>A. subatomoides</i> , <i>Cymbella helvetica</i> , <i>C. mesiana</i> , <i>C. microcephala</i> , <i>C. silesiaca</i> , <i>Cyclotella stelligera</i> , <i>Diatoma mesodon</i> , <i>Eunotia exigua</i> , <i>E. exigua</i> , <i>Frustulia rhomboids</i> , <i>Fragilaria virescens</i> Ralfs, <i>Gomphonema parvulum</i> var. <i>exilissimum</i> , <i>Navicula decussis</i> , <i>N. pseudolanceolata</i> , <i>N. viridula</i> var. <i>germainii</i> , <i>Pinnularia subcapitata</i> , <i>Surirella linearis</i> , <i>Tabellaria flocculosa</i>	<i>Caloneis bacillum</i> , <i>Cymatopleura elliptica</i> , <i>Cyclotella meduanae</i> , <i>Fragilaria biceps</i> , <i>Gyrosigma attenuatum</i> , <i>Nitzschia heufleriana</i> , <i>N. levidensis</i> , <i>N. angustata</i> , <i>Navicula placentula</i> , <i>N. tripunctata</i> , <i>Thalassiosira bramaputrae</i>

注:表中所属属有例外,如 *Aulacosira* 属中的 *Aulacosira granulata* 是耐污种。

表2 世界各国主要的硅藻指数概况

硅藻指数	区域或国家	指示种个数	发明者
硅藻营养化指数(TDI)	英国	92个属和种	Kelly & Whitton, 1995
硅藻属指数(GDI)	欧洲	所有的淡水硅藻属	Rumeau & Coste, 1988
特定污染敏感指数(IPS)	法国	已知的淡水硅藻种	Cemagref, 1982
硅藻生物指数(IBD)	法国	209个硅藻常见种	Lenoir & Coste, 1996
硅藻富营养污染指数(EPI-D)	意大利	指示富营养, 有机质和盐浓度, 个数未知	Dell' Uomo, 1996
洛特营养化指数(RTI)	澳大利亚	650个硅藻常见种	Rott et al., 1998
谢和高营养化指数(SHE)	德国	386个硅藻种	Schiefele & Kohmann, 1993
欧盟硅藻指数(CEE)	法国	208个硅藻常见种	Descy & Coste, 1991
硅藻群集污染指数(DAIPo)	日本	226个硅藻种	Watanabe et al., 1986

注: EPI-D 指数未能查到其包含硅藻的种类个数。

	组1	组2	组3	组4	组5	组6	组7	组8
亚组9	10	9	8	7	6	5	4	3
亚组10	9	8	7	6	5	4	3	2
亚组11	8	7	6	5	4	3	2	1
亚组12	7	6	5	4	3	2	1	0

图1 双重网格法计算 CEE 硅藻指数

Zelinka & Marvan 经典方程。CEE 指数的计算采用双重网格法, 见图 1。即将进入指数的硅藻种类分为 8 个组和 4 个亚组。8 个组包括拥有较低指示值的种类, 通过耐污程度的递增依次排列于 8 个组; 4 个亚组包括指示值较高的种类, 也通过耐污程度的递增依次排列于 4 个亚组, 最后指数数值为组与亚组交叉网格的数值。数值范围从 0(污染) ~ 10(洁净)。

上述指数被广泛地用于邻近区域或其他地区和国家, 如 SPI, TDI 和 GDI 在波兰监测水质的效果很好, EPI-D 用于意大利全境河流水质监测。即使在气候条件不同的地区, 很多指数依然可以取得较好的评价结果。如 TDI 和 GDI 适宜在非洲东部的水质监测, TDI 用于评价马来西亚河流水质, GDI、SPI、BDI 和 EPI-D 评价南非水质取得成功等, 这些国家的地理概况与指数发源地存在很大差别, 这说明硅藻指数通用性强。在我国, 邓培雁等^[16]研究发现 IBD 和 IDG 最适合用于东江河流水质生物监测与评价。李国忱等^[17]对 10 个生物指数进行适用性筛选, 得到比较适合辽河上游的评价指数。

大量研究表明, 建立适合自己的指数更为可靠。在加拿大的魁北克河, Lavoie 等^[18]建立了魁北克硅藻指数 IDEC, 并比较了欧洲和美国的硅藻指数在魁北克河流的评价结果后指出, 要获得可靠的结果, 尤其在极端条件下, 所使用的硅藻指数需要适应测试

的生态区, 而 IDEC 就是在该生态区建立起来的。Wu^[19]建立和测试了硅藻属指数 GI, 并成功用于指示台湾的河流水质。Tang 等^[20]在香溪河利用多指标得到一个综合指数, 并与欧洲硅藻指数对比分析, 结论是该指数更适于指示香溪河水质。

1.3 生态毒理学中的指示性研究

硅藻的毒理学应用研究常通过在室内或室外使用人工基质如载玻片培养硅藻样品, 在无重金属或农药污染的样点培养一定时间后移到污染的实验区^[21-23], 观察硅藻原生生物膜的变化。有的研究者将在相对隔绝的野外试验结果和实验室的结果作比较分析^[24]。研究证实, 硅藻生物膜的重金属或农药残余物积累量总是与其在水中的浓度和在水中停留的时间呈正比^[25]。随着河流重金属污染的日益加剧, 加强重金属对硅藻的污染生态学、污染进化生态学和保护生态学研究将具有重要意义^[26]。

1.3.1 指示重金属污染

水体中重金属浓度增加时, 实验观测的生物数量、叶绿素 a、生物体的细胞密度会降低^[24, 27-28]。重金属污染的水体, 硅藻的种群结构会发生改变, 而一些重金属耐污种的相对丰度会增加。如 *Nitzschia palea*, *Eolimna minima*, *Gomphonema parvulum*, *Achnantheidium minutissimum*, *Pinnularia spp.*, *Eunotia spp.* 等是这类水体的优势种。此外重金属会影响硅藻生物膜结构, 这在油镜下很容易观察到。Falasco 等^[29]描述了常见的淡水硅藻在属水平上的畸形变化情况, 且对畸形形式进行了分类, 分类情况见表 3。

表3 已知的硅藻畸形变化分类情况

类别	畸形形式
1	壳面轮廓变形
2	线纹形式、肋缝和隔膜的改变
3	硅藻形状、大小、纵向弯曲和中心区发生变化
4	中间缝(壳缝)变化
5	硅藻细胞群呈现不正常的排列形式
6	以上几种的混合型

1.3.2 指示农药污染

在欧洲和北美, 残余农药已经严重污染了包括农业区和城区的地表水和地下水^[30]。最近法国和美国的监测数据显示, 有一半测量点的农药浓度超过了水生物正常生活的基准。很多地区的河流在短时间脉冲过程中有相对集中的高浓度农药, 其质量浓度超过 10 μg/L, 在暴雨之后或洪水期间甚至达到 700 μg/L 的阈值, 存在巨大的环境风险。欧洲的水框架协议要求到 2015 年, 恢复大部分受污染的水源并达到“良好的生态状态”, 因此探索利用硅藻来评价农药污染对水生物系统的毒害程度很有必要。硅藻被普遍认为是水体中农药污染很好的指示器, 尤

其是杀虫剂^[31],硅藻指示农药污染主要基于以下3点^[32]:①有毒物质会致使细胞发生畸形;②农药亦能影响细胞的新陈代谢从而影响硅藻的生长;③农药污染还能影响硅藻种群结构。在法国西南地区, Morin 等^[33]进行了大规模的实地调查,以探究农药流入河流对底栖硅藻群落的影响。分析指出硅藻分布主要受流入的农药影响,其次还受有机污染的影响,其中小个体的曲壳藻目在农药污染区中丰度较大。Rimet 等^[31]认为运动型硅藻、薄型硅藻和带粘膜小孔型硅藻可指示杀虫剂污染。

1.4 应用硅藻重建古变量

1.4.1 应用硅藻重建古环境、古气候

利用硅藻重建古环境、古气候是硅藻作为良好指示生物的重要应用。硅藻具有硅质的壳,很容易成为化石保存下来,这些化石真实地记录了它们生存时期的气候环境。而一些转换模型,如偏最小二乘法加权回归(WA-PLS)、平均加权回归(WA)、最大似然估计法(ML)、现代模拟技术(MAT)和对应分析回归模型(CAR)等能有效地重建变量^[34-36]。因此,借助这些转换模型,硅藻种类及硅藻组合能较好地反映当时的气候环境变化。

支崇远等^[37]从现代表层沉积硅藻生态规律出发,对分布在该区域的90个表层沉积样品和8个钻井样品进行研究,揭示了东海南部(福建段)晚更新世以来海平面演化的过程。Ginn 等^[35]通过采集美国东北部494个湖泊的样本,用最大似然估计法建立了该地区的硅藻-pH变量模型。由该模型重建了pH等变量值,并与实测记录值比较后验证了模型的准确性。北美五大湖之一的安大略湖存在富营养化问题,Reavie 等^[36]构建一个基于硅藻-总磷转换函数来推测湖泊过去的总磷浓度,实现湖水历史环境变量的重建。在西伯利亚东西部的Kotokel湖泊中, Fedotov 等^[38]采集6.2 m长的硅藻、摇蚊和花粉沉积化石岩芯,利用3种指示生物研究该地区近1.22万年的气候变化。结果显示,硅藻和摇蚊对气候变化比花粉敏感,共分4个时期(D→C→B→A),D阶段气候温和,夏季气温适中;C阶段前期气候逐渐变冷变湿,后期气温仍冷,但变得更干燥;B阶段气候在冷暖间频繁交替变化;A阶段气温冷,而颗粒直链藻被认为是指示气候暖和的标志。在加拿大北边的3个高原湖泊,硅藻对该地区20世纪气候环境变化的响应被评估,结果证实硅藻对区域气候变化敏感^[39]。

1.4.2 应用硅藻指示土地利用

硅藻群落受人类活动和自然因素的共同影响,而自然因素中的地理因素是解释硅藻群落变量的一

个重要因子。农业区、森林、工业区或城区、矿区等不同土地利用区域的硅藻群落是集结了地理因素和人类活动共同影响的结果。在采矿区,采矿作业导致河流酸化,而酸化污染通过变量分析方法可评估其对硅藻群落产生的影响^[40],一些区域专门建立了硅藻指数评估采矿排水对当地环境的影响^[41]。农业区的土地使用会改变水化学环境和生物栖息地状况,在灌溉高峰期容易引起盐碱化,从而使河流硅藻群落发生改变。Pan 等^[42]在研究特定的栖息地生态系统时,发现硅藻与栖息地联系紧密,可用于指示栖息地变化。在瑞典南部的一个小湖泊,Håkansson 等^[43]利用硅藻和花粉重建了该地区过去6000年的土地利用类型。从前6000~前2700年为森林环绕的轻微富营养湖泊;前2700年左右,湖中突然出现*Cyclostephanos dubius*和一些附生及附砂硅藻,产生这种变化的解释与湖区出现森林砍伐的历史记录是一致的;前1300~前1100年,土地类型由草地变为耕地,使得*C. dubius*物种减少而*Stephanodiscus*增多;附生和附砂硅藻的增加,说明耕地也在不断增多,最终湖泊变浅变小。

1.5 指示水文要素

硅藻在生态水文学中主要用于指示水位和洪水。如Kathleen 等^[44]在安大略湖选取3个横断面,其中有2个水深达30 m的断面,间隔1 m取样;另一个较浅断面,取样间隔相同,范围为1~18 m。所有横断面的硅藻群落差别被判别:①近岸区的硅藻大部分为附生生活型(life-forms)和部分运动型;②中等水深主要是运动型和一些适于在低光环境下的底栖种,如*Staurosirella pinnata*;③底部深水区以浮游硅藻为主。Johan 等^[45]调查洪水区和非洪水区池塘的附植型硅藻,得到各自的物种丰度和物种结构。然后由相似百分比等方法得到强大的指示洪水类群(*strong good indicator taxa*)。最后选择一个封闭的排水池塘,利用指示洪水类群的相对丰度重塑了该地区过去180年发生的洪水事件,该结果与当地的洪水历史记录及附近独立的池塘古洪水记录是一致的。蔡德所等^[46]研究了喀斯特地区水深梯度下的硅藻分布特征,分析了硅藻种属对水深变化的响应。黎佛林等^[47]研究了广西柳江表层沉积硅藻在不同水动力条件下的群落结构,阐述了硅藻与水深、流速和流量等水文变量间的关系。附生植物型硅藻还可用于指示河流中的流量、水温及水动力变化。

2 结 语

硅藻良好的指示意义、耐保存的硅质壳、简便的物种鉴定等优势使得国外众多机构和个人对其展开

了研究。国内相关的研究工作也在不断加强,从简单的形态描述和分类转变到以单细胞、硅藻种群和分类群等不同尺度的指示意义,这是硅藻研究的轨迹。虽然一些属种的指示意义具有普遍性,如 *Nitzschia* 指示中等到严重污染的水体, *Gomphonema parvulum* 指示严重污染的水体;但如 *Cyclotella stelligera* 和 *Tabellaria flocculosa* 在加拿大的碱性环境中是常见的,但在欧洲是嗜酸性硅藻^[14]。因此将国外硅藻的指示特征直接用于我国是存在争议的,即使是国内得到的硅藻指示特征,因南北地理差异较大,也不尽合理。以流域为基本单位建立硅藻的指示属种数据库,并在此基础上建立流域内的硅藻指数才比较合适。另外硅藻分类学比较混乱,因为世界各地的分类信息没有及时沟通,在不同的分类体系出现很多同种不同名的现象。而有的分类与命名不一致,以舟形藻属为例, *Krammer & Lange-Bertalot* 体系只有 *Navicula*, 美国等地则细分为 *Sellaphora*, *Luticola*, *Craticula*, *Gelssleria*, *Navicula* 等,因此国内需要建立统一的分类在线信息库。采样点的选择、采样基质以及硅藻鉴定中的模糊性和技术方法是硅藻指示不确定性的来源,这些问题都需进一步深入研究。

参考文献:

[1] PADISAK J. Use of algae for water quality monitoring in portugal [C] // WHITTON B A, ROTT E, FRIEDRICH G. Use of algae for monitoring rivers. Innsbruck: Universität in Innsbruck, Institut für Botanik, 1991.

[2] CARLISLE D M, HAWKINS C P, MEADOR M R, et al. Biological assessments of Appalachian streams based on predictive models for fish, macroinvertebrate, and diatom assemblages [J]. Journal of North American Benthological Society, 2008, 27: 16-37.

[3] 王艳捷, 宋乾武, 陈洪伟, 等. 东江下游水环境重金属污染特征及现状评价 [J]. 水资源保护, 2012, 28 (5): 34-37, 47. (WANG Yanjie, SONG Qianwu, CHEN Hongwei, et al. Assessment of heavy metal pollution downstream of Dongjiang River [J]. Water resources protection, 2012, 28 (5): 34-37, 47. (in Chinese))

[4] 崔伟中, 刘晨. 松花江和沱江等重大水污染事件的反思 [J]. 水资源保护, 2006, 22 (1): 1-4. (CUI Weizhong, LIU Chen. Considerations on severe sudden accidents of water contamination in Songhuajiang River and Tuojiang River [J]. Water resources protection, 2006, 22 (1): 1-4. (in Chinese))

[5] KALYONCU H, CICEK N, AKKÖZ C, et al. Comparative performance of diatom indices in aquatic pollution assessment [J]. African Journal of Agricultural Research,

2009, 4 (10): 1032-1040.

[6] GOMÀ J F, CAMBRA R J. Diatom communities and water quality assessment in mountain rivers of the upper segre basin (La Cerdanya, Oriental Pyrenees) [J]. Hydrobiologia, 2005, 551: 209-225.

[7] SIMKHADA B. Diatoms as indicators of environmental change in lakes and ponds of the lowlands, middle hills and high himalaya of nepal [D]. Kathmandu: University of Bielefeld Faculty, 2006.

[8] van DAM H, MERTENS A. Long-term changes of diatoms and chemistry in headwater streams polluted by atmospheric deposition of sulphur and nitrogen compounds [J]. Freshw Biol, 1995, 34: 579-600.

[9] SUDHAKAR G, JYOTHI B, VENKATESWARLU V. Role of diatoms as indicators of pollution gradients [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 1994, 33: 85-99.

[10] DELACRUZ J, PRITCHARD T, GORDON G, et al. The use of periphytic diatoms as a means of assessing impacts of point source inorganic nutrient pollution in south-eastern Australia [J]. Freshwater Biology, 2006, 50 (5): 951-972.

[11] CHIEN T. Some aspects of water quality in a polluted lowland river in relation to the intracellular chemical levels in planktonic and epilithic diatoms [J]. Water Research, 2004, 38 (7): 1779-1790.

[12] DICKMAN M, PEART M, YIM W S. Benthic diatoms as indicators of stream sediment concentration in Hong Kong [J]. International Review of Hydrobiology, 2005, 90 (4): 412-421.

[13] CATHY K, BARRY J F B, WIM V. Benthic diatom communities in subalpine pools in New Zealand: relationships to environmental variables [J]. Hydrobiologia, 2006, 561: 95-110.

[14] FINDLAY D L, SHEARER J A. Relationships between sedimentary diatom assemblages and lakewater pH values in the Experimental Lakes Area [J]. Journal of Paleolimnology, 1992, 7: 145-156.

[15] GOSSELAINE V, HAMILTON P B. A revisions to a key-based computerized counting program for free-living, attached, and benthic algae [J]. Hydrobiologia, 2000, 438: 139-142.

[16] 邓培雁, 雷远达, 刘威, 等. 七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估 [J]. 生态学报, 2012, 32 (16): 5014-5024. (DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin [J]. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32 (16): 5014-5024. (in Chinese))

[17] 李国忱, 汪星, 刘录三, 等. 基于硅藻完整性指数的辽河上游水质生物学评价 [J]. 环境科学研究, 2012, 25

- (8): 852-858. (LI Guochen, WANG Xing, LIU Lusan, et al. Bioassessment of water quality based on diatom index of biotic integrity in the upstream of Liaohe River [J]. Research of Environmental Sciences, 2012, 25 (8): 852-858. (in Chinese))
- [18] LAVOIE I, HAMILTON P B, WANG Y K, et al. A comparison of stream bioassessment in Quebec (Canada) using six European and North American diatom-based indices [J]. Nova Hedwigia, 2009, 35: 37-56.
- [19] 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.
- [20] TANG T, CAI Q H, LIU J K. Using epilithic diatom communities to assess ecological condition of Xiangxi River system [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2006, 112: 347-361.
- [21] IVORRA N, HETTELAAR J, TUBBING G M J, et al. Translocation of microbenthic algal assemblages used for in situ analysis of metal pollution in rivers [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 1999, 37: 19-28.
- [22] IVORRA N, BREMER S, GUASCH S, et al. Differences in the sensitivity of benthic Macroalgae to Zn and Cd regarding biofilm development and exposure history [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2000, 19: 1332-1339.
- [23] Feurtet-Mazel A, GOLD A C, COSTE M, et al. Study of periphytic diatoms communities exposed to metallic contamination through complementary field and laboratory experiments [J]. Journal de Physique Iv, 2003, 107: 467-470.
- [24] IRVING E C, BAIRD D J, CULP J M. Cadmium toxicity and uptake by mats of the freshwater diatom: navicula pelliculosa (Br, b) hilse [J]. Archives of Environmental Contamination and Toxicology, 2009, 57: 524-530.
- [25] MORIN S, DUONG T T, DABRIN A, et al. Long-term survey of heavy-metal pollution, biofilm contamination and diatom community structure in the Riou Mort watershed, South-West France [J]. Environmental Pollution, 2008, 151: 532-542.
- [26] 丁腾达, 倪婉敏, 张建英. 硅藻重金属污染生态学研究进展 [J]. 应用生态学报, 2012, 23 (3): 857-866. (DING Tengda, NI Wanmin, ZHANG Jianying. Research advances in heavy metals pollution ecology of diatom [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23 (3): 857-866. (in Chinese))
- [27] MORIN S, VIVAS-NOGUES M, DUONG T T, et al. Dynamics of benthic diatom colonization in a cadmium/zinc-polluted river (Riou-Mort, France) [J]. Fundamental and Applied Limnology, 2007, 168: 179-187.
- [28] de la PENA S, BARREIRO R. Biomonitoring acidic drainage impact in a complex setting using periphyton [J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2009, 150: 351-363.
- [29] FALASCO E, BONA F, GINEPRO M, et al. Morphological abnormalities of diatom silica walls in relation to heavy metal contamination and artificial growth conditions [J]. Water SA, 2009, 35 (5): 595-606.
- [30] GILLIOM R J. Pesticides in U. S. streams and groundwater [J]. Environ Sci Technol, 2007, 41 (10): 3407-3413.
- [31] RIMET F, BOUCHEZ A. Use of diatom life-forms and ecological guilds to assess pesticide contamination in rivers: lotic mesocosm approaches [J]. Ecological Indicators, 2011, 11: 489-499.
- [32] DEBENEST T, SILVESTRE J, COSTE M, et al. Effects of pesticides on freshwater diatoms [J]. Reviews of Environmental Contamination and Toxicology, 2010, 203: 87-98.
- [33] MORIN A S, BOTTINA M, MAZZELLA N, et al. Linking diatom community structure to pesticide input as evaluated through a spatial contamination potential (Phytopixal): a case study in the Neste River system (South-West France) [J]. Aquatic Toxicology, 2009, 94: 28-39.
- [34] ter BRAAK C J F, JUGGINS S. Weighted averaging partial least squares regression (WA-PLS): an improved method for reconstructing environmental variables from species assemblages [J]. Hydrobiologia, 1993, 269/270: 485-502.
- [35] GINN B K, CUMMING B F, SMOL J P. Diatom-based environmental inferences and model comparisons from 494 northeastern north American lakes [J]. Journal of Phycol, 2007, 43: 647-661.
- [36] REAVIE E, SMOL J. Diatom-environmental relationships in 64 alkaline southeastern Ontario (Canada) lakes: a diatom-based model for water [J]. Journal of Paleolimnology, 2001, 25: 25-42.
- [37] 支崇远, 王开发, 王洪根, 等. 运用数理统计方法研究东海南部陆缘晚第四纪硅藻与环境的关系 [J]. 海洋地质与第四纪地质, 2003, 23 (3): 65-72. (ZHI Chongyuan, WANG Kaifa, WANG Honggen, et al. Relationship between diatom assemblage and paleoenvironment of late quaternary in the south continental margin of the east china sea on the basis of multiple statistical methods [J]. Marine Geology & Quaternary Geology, 2003, 23 (3): 65-72. (in Chinese))
- [38] FEDOTOV A P, VOROBYEVA S S, VERSHININ K E, et al. Climate changes in East Siberia (Russia) in the holocene based on diatom, chironomid and pollen records from the sediments of Lake Kotokel [J]. J Paleolimnol, 2012, 47: 617-630.
- [39] KARST-RIDDOCH T L, PISARIC M F J, SMOL J P. Diatom responses to 20th century climate-related

- environmental changes in high-elevation mountain lakes of the northern Canadian Cordillera[J]. *Journal of Paleolimnology*,2005,33: 265-282.
- [40] VERB R G, VIS M L. Comparison of benthic diatom assemblages from streams draining abandoned and reclaimed coal mines and nonimpacted sites[J]. *Journal of the North American Benthological Society*,2000,19: 274-288.
- [41] HAMSHER S E, VERB R G, VIS M L. Analysis of acid mine drainage impacted streams using a periphyton index [J]. *Journal of Freshwater Ecology*,2004,19: 313-324.
- [42] PAN Y D, HILL B H, HUSBY P H, et al. Relationships between environmental variables and benthic diatomassemblages in California central valley streams (USA)[J]. *Hydrobiologia*,2006,561: 119-130.
- [43] HÅKANSSON H, REGNÉLL J. Diatom succession related to land use during the last 6000 years: a study of a small eutrophic lake in southern Sweden [J]. *Journal of Paleolimnology*,1993,8: 49-69.
- [44] KATHLEEN R, MELANIE V, BRIAN F C. Diatom habitats, species diversity and water-depth inference models across surface-sediment transects in Worth Lake, northwest Ontario, Canada [J]. *J Paleolimnol*,2010,44: 1009-1024.
- [45] JOHAN A W, NATALIE B, ROLAND I H, et al. Epiphytic diatoms as flood indicators [J]. *J Paleolimnol*,2010,44: 25-42.
- [46] 蔡德所,黎佛林,文宏展. 广西金鸡滩库区水深梯度下的硅藻生态特征研究[J]. *三峡大学学报:自然科学版*,2014,36(2): 1-5. (CAI Desuo, LI Folin, WEN Hongzhan. Ecological characteristics of diatoms under water depth gradients in Jinjitan Reservoir Area [J] *J of China Three Gorges University: Natural Sciences*,2014,36(2):1-5. (in Chinese))
- [47] 黎佛林,蔡德所,文宏展,等. 不同水动力条件下的河流硅藻群落分布机理研究[J]. *水资源与水工程学报*,2014,25(1): 205-209. (LI Folin, CAI Desuo, WEN Hongzhan, et al. Study on distribution mechanism of riverine diatoms community in different hydrodynamic conditions [J]. *Journal of Water Resources & Water Engineering*,2014,25(1):205-209. (in Chinese))

(收稿日期:2014-06-28 编辑:方宇彤)

(上接第97页)

- [13] 谢平,陈晓宏,王兆礼,等. 东江流域实际蒸发量与蒸发皿蒸发量的对比分析[J]. *地理学报*,2009,64(3): 270-277. (XIE Ping, CHEN Xiaohong, WANG Zhaoli, et al. Comparison of actual evapotranspiration and pan evaporation [J]. *Acta Geographica Sinica*,2009,64(3): 270-277. (in Chinese))
- [14] 沈焕庭,茅志昌,朱建荣. 长江河口盐水入侵[M]. 北京:海洋出版社,2003.
- [15] 闻平. 珠江三角洲咸潮入侵机理研究[D]. 广州:中山大学,2006.
- [16] 许小峰,王守荣,任国玉,等. 气候变化应对战略研究[M]. 北京:气象出版社,2006:24-27.
- [17] 秦大河. 气候变化:区域应对与防灾减灾[M]. 北京:科学出版社,2009:1-46.
- [18] 秦大河,罗勇,陈振林,等. 气候变化科学的最新进展: IPCC第四次评估综合报告解析[J]. *气候变化研究进展*,2007,3(6): 311-314. (QIN Dahe, LUO Yong, CHEN Zhenlin, et al. Latest advances in climate change sciences: interpretation of the synthesis report of the IPCC fourth assessment report [J]. *Advances in Climate Change Research*,2007,3(6):311-314. (in Chinese))
- [19] 陈志恺. 全球变暖对水资源的影响[J]. *中国水利*,2007(8):1-3. (CHEN Zhikai. The impact of globe warming to water resources [J]. *China Water Resources*,2007(8): 1-3. (in Chinese))
- [20] 王素萍,段海霞,冯建英. 2009/2010年冬季全国干旱状况及其影响与成因[J]. *干旱气象*,2010,28(1): 107-112. (WANG Suping, DUAN Haixia, FENG Jianying. The whole Chinese drought and its impact and causes during 2009—2010 winter [J]. *Journal of Arid Meteorology*,2010,28(1):107-112. (in Chinese))
- [21] 孔兰,陈晓宏,闻平,等. 2009/2010年枯水期珠江口磨刀门水道强咸潮分析[J]. *自然资源学报*,2011,26(11): 1858-1865. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, WEN Ping, et al. Analysis on severe saltwater intrusion of the Pearl River Estuary in dry season during 2009—2010 [J]. *Journal of Natural Resources*,2011,26(11):1858-1865. (in Chinese))
- [22] 孔兰,陈晓宏,杜建,等. 基于数学模型的海平面上升对咸潮上溯的影响[J]. *自然资源学报*,2010,25(7): 1097-1104. (KONG Lan, CHEN Xiaohong, DU Jian, et al. Impact of sea-level rise on saltwater intrusion based on mathematical model [J]. *Journal of Natural Resources*,2010,25(7):1097-1103. (in Chinese))

(收稿日期:2015-06-02 编辑:徐娟)

