

王倩, 支崇远, 康福星. 2009 黔桂喀斯特区域河流水体离子对底栖硅藻群落的影响 [J]. 环境科学学报, 29(7): 1517– 1526
Wang Q, Zhi C Y, Kang F X. 2009 Effect of major ions on the communities of benthic diatoms in Karst rivers from the Zhujiang Watershed [J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 29(7): 1517– 1526

黔桂喀斯特区域河流水体离子对底栖硅藻群落的影响

王倩, 支崇远*, 康福星

贵州师范大学生命科学学院 / 贵州省山地环境信息系统与生态环境保护重点实验室, 贵阳 550001

收稿日期: 2008-09-21 修回日期: 2009-01-07 录用日期: 2009-05-04

摘要: 为了建立喀斯特地区河流底栖硅藻对水环境变化的响应模型, 定量研究了中国西南喀斯特地区黔桂珠江水系典型岩溶水体中的离子、电导率与底栖硅藻群落分布的关系. 研究发现, 电导率的范围为 $20 \sim 2070 \mu S \cdot cm^{-1}$, 并且 Ca^{2+} 与 $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ 是岩溶水体的主要优势离子. 对离子、电导率与硅藻群落结构进行主成分分析 (PCA)、对应分析 (CA)、加权平均分析 (WA) 和相关性分析, 结果表明, 水体离子 ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Cl^- 、 Ca^{2+} 、 Na^+ 、 Mg^{2+} 、 K^+) 与电导率环境变量都能用于解释底栖硅藻的群落分布特征; 而 Ca^{2+} 、 $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ 和 Na^+ 浓度是影响物种组成的显著因素. 通过研究确定了以上 8 种水体离子和电导率的相应指示种值 (最适值 Optima), 以及这些离子环境下的硅藻分布特征. 该结果为中国西南喀斯特地区硅藻种群生态学、个体生态学以及水质评价的研究提供了理论依据.

关键词: 喀斯特; 黔桂珠江水系; 底栖硅藻; 水体离子; 电导率

文章编号: 0253-2468(2009)07-1517-10 中图分类号: X171 文献标识码: A

Effect of major ions on the communities of benthic diatoms in Karst rivers from the Zhujiang Watershed

WANG Q ian, ZHI Chongyuan*, KANG Fuxing

Life Science Department, Guizhou Normal University, Guiyang 550001

Key Laboratory for Information System of Mountainous Areas and Protection of Ecological Environment of Guizhou Province, Guiyang 550001

Received 21 September 2008 received in revised form 7 January 2009 accepted 4 May 2009

Abstract In order to establish a water quality response model for the Karst region of China using benthic diatoms, the relationships between major ions, conductivity and the distribution of benthic diatom communities from the Zhujiang Watershed with in a Karst region of southwest China were quantitatively studied. The conductivity ranged from $20 \mu S \cdot cm^{-1}$ to $2070 \mu S \cdot cm^{-1}$, and Ca^{2+} , $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ were the dominant ions in calcific water columns. Principal component analysis (PCA), correspondence analysis (CA), weighted averaging (WA) and correlation between ions, conductivity and communities of benthic diatoms showed that the content of major ions ($HCO_3^- + CO_3^{2-}$, SO_4^{2-} , NO_3^- , Cl^- , Ca^{2+} , Na^+ , Mg^{2+} , K^+) and conductivity together explained a statistically significant amount of the variation in the composition of the benthic diatom community. Ca^{2+} , $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ and Na^+ were the most significant factors affecting changes of diatom composition. The corresponding indicator values (optima) for conductivity, major ions and the distribution of diatom communities influenced by all eight ions were ascertained. These species optima could be applied in research on diatom ecology and autecology, and could be regarded as criteria for evaluating the water quality of the Karst region of Southwest China.

Keywords Karst; QianGuiZhujiang watershed; benthic diatoms; major ions; conductivity

1 引言 (Introduction)

硅藻对环境变化极其敏感. 在极其微弱的环境条件改变下, 硅藻群落结构、优势种组成、个体特征都会对这一变化作出相应的反应 (Sullivan, 1999).

建立这种应答关系, 无疑能够利用硅藻群落结构的变化来监测水体环境. 因此, 这也是近年来国内外学者研究的环境热点问题之一. 已有的研究结果表明, 电导率、 CO_3^{2-} (HCO_3^-) 和 Ca^{2+} 能够强烈影响硅藻的群落结构 (Wilson *et al*, 1994; Gasse *et al*,

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 30560011); 2007 年度贵州师范大学研究生课题
Supported by the National Natural Science Foundation of China (No. 30560011) and the Fund for Postgraduate in Guizhou Normal University
作者简介: 王倩 (1984—), 女, E-mail wangqian015@126.com; * 通讯作者 (责任作者), E-mail zhichy@163.com
Biography: WANG Q ian (1984—), female, E-mail wangqian015@126.com; * **Corresponding author** E-mail zhichy@163.com

1995). 且在对污染物与硅藻关系的研究中发现, 一定浓度范围内 N、P 污染物的量与硅藻种群数量呈正相关关系 (Chetelat *et al.*, 1999; Winter *et al.*, 2000), 尤其是有毒重金属之类的污染物能够引起硅藻个体结构的变异或者硅藻群落中优势种的变化和演替. 是否能够确立这些变异和演替规律与污染物之间的量化关系, 是确立硅藻预测环境变化成功与否的最为重要的环节. 然而, 由于不同地区具有不同的环境特点, 这一环境地域特点决定了不同地区的同一藻种对于同一环境因子变化的应答机制不完全相同. 中国西南喀斯特地区具有完全不同于其它地域的水文、地质特点, 尤其是贵州和广西地区是世界上亚热带喀斯特发育较典型的地区之一; 强烈的喀斯特溶蚀作用和人类活动使水体环境状况具有有别于其它地区的特性. 这就决定了不能把已有的国外硅藻监测环境的方案照搬到针对喀斯特地区的环境监测上来.

此外, 喀斯特地区地下岩隙中暗河广泛发育, 地表生态极其脆弱; 水系的发育特征导致不同区域水系通过岩隙扩渗, 暗河流动而连接. 因而, 来自生活和工业的废水一旦纳入喀斯特水系中, 其污染物会随着地下岩隙水的流动而扩散至整个地区. 喀斯特地区脆弱的生态环境很容易被这些污染物破坏, 进而危害到人类自身的发展. 因此, 利用硅藻对环境的敏感性, 建立这一地区生态预警机制也非常必要. 本研究针对喀斯特地区的硅藻群落组成与水体离子之间的关系进行了研究, 旨在为中国西南喀斯特地区硅藻监测环境模型的建立提供参考.

2 材料和方法 (Materials and methods)

2.1 研究区域

本研究范围位于贵州、广西两省境内的河流 (经度: $24^{\circ}76'0'' \sim 25^{\circ}78'9''$; 纬度: $109^{\circ}42'0'' \sim 109^{\circ}60'6''$). 这些河流统属于黔桂珠江水系, 其支流包括: 龙江、金城江、融江、洛清江和漓江 5 条河流. 采集样点 28 个, 分布如图 1 所示. 其中龙江、金城江和洛清江流经广西省城区, 直接接收城市污水. 龙江是珠江水系的第二大河流, 发源于贵州省三都县月亮山西南侧, 流经贵州的荔波县, 进入广西的南丹、金城江、宜州. 龙江是金城江区域内工业、农业和生活饮用水的主要水源, 同时又是金城江的工业废水和生活污水的主要纳污河道.

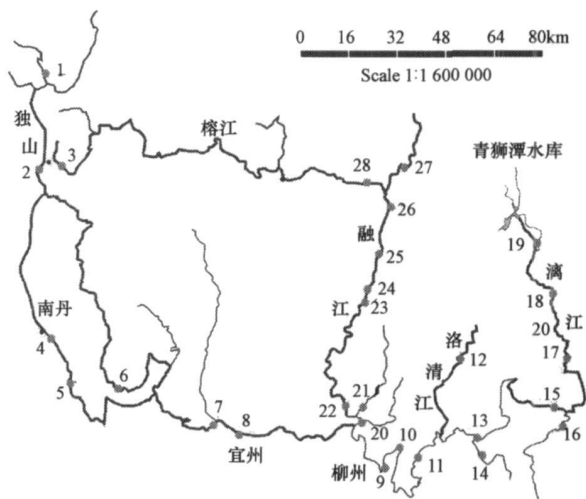


图 1 黔桂珠江水系采样点分布

Fig. 1 The distribution of sampling locations in the Qian Gui Zhu Jiang watershed

2.2 硅藻样本采集与制片

采集一定面积的表面较光滑的鹅卵石, 用硬毛牙刷或小刀刮取一定面积石块上的硅藻, 加入适量的 $12 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ 的盐酸. 常温下搅拌后静置 24 h 除去钙质和泥沙后, 再用浓度为 98% 的浓硫酸除去样品中的有机质和杀死其它的藻类, 静置. 将上述混合液在 $3000 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 下离心 25 min, 移去上清液. 从制得的硅藻样中提取 $100 \sim 1000 \mu\text{L}$ 的样本放到 $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的盖玻片上, 使用 ZCY 胶将样本制成硅藻永久制片, 干燥.

2.3 鉴定与统计

用 ECLIPSE 50i 尼康生物相差光学显微镜在 $1000 \times$ 下鉴定并统计硅藻的壳面数量. 硅藻的种属鉴定参照 Patrick & Reimer (1966)、Krammer & Lange-Bertalot (1986, 1988, 1991a, 1991b)、Kobayasi (2006) 的分类图谱. 对于难以鉴定的微型硅藻借助 FEI XL30 的环境电子扫描电镜 (ESEM) 和 Potapova & Hamilton (2007) 的鉴定方法进行种属鉴定.

多数样本硅藻壳体统计多在 600 个以上, 只有 4 个样点硅藻壳体数量统计在 $300 \sim 600$ 个的范围内. 采样点共鉴定出 516 个硅藻种及变种.

2.4 水体离子的测定分析

水样和硅藻样本同时采集. 水体离子含量的测定参照国家标准测定方法 (张世森, 2001), Ca^{2+} 、 Na^{+} 、 Mg^{2+} 、 K^{+} 的测定使用火焰原子吸收法 (AA Analyst 400 PerkinElmer[®]); (HCO_3^{-} + CO_3^{2-})、 SO_4^{2-} 、 NO_3^{-} 、 Cl^{-} 使用 WL-15A 型微离子处理机进行

测定, 电导率 (COND) 使用便携式电导率计 (DDB, 杭州电子分析仪器公司) 进行现场测定.

2.5 数据分析

28个样点共鉴定出 516个硅藻种. 由于硅藻中包含许多稀有属种, 故选择那些至少在 2个水体中出现、至少在 1个样本中相对丰度超过 5% 以上的属种参与数据数理统计分析. 使用 C2程序中的多元统计分析方法 (Multivariate statistical analysis) 及 SPSS14.0 中的因子分析 (Factor Analysis) 和相关关系 (Correlation) 分析硅藻群落与环境因子之间的相关关系 (Juggins 2003). 为减少分析误差, 环境指标数据进行 $(\lg(x+1))$ 对数转换. 主成分分析 (PCA) 和对应分析 (CA) 可将原始数据的多维度减少到几个可解释的主成分因子 (羊向东等, 2001). 前 2 个特征值之间的比值高于 0.5 表明, 环境变量对硅藻群落组成具有显著的影响, 且能用于建立转换函数模型 (Winter et al., 2000). 因此, 影响硅藻群落的主要环境变量可由以下的方法提取: ①使用 PCA 和 CA 分析方法分析硅藻和环境因子之间的相关关系; ②根据所得到的主成分分析图, 由环境因子之间的箭头长度、箭头倾斜度和相关关系, 找出影响硅藻群落分布的主要环境变量; ③结合因子分析与环境变量间的相关性筛选出影响硅藻分布的显著因子.

加权平均回归分析方法 (WA) 用于计算出硅藻物种最适值和耐受值以及建立和检验硅藻与主要环境变量的参考模型. 在 WA 分析中, 物种相对丰度进行平方根 (Square root) 转换, 减少优势种的作用. 函数误差估计是通过 100 次循环的 bootstrapping 计算 (Birks 1995). 物种最适值加权平均估计值计算方法 (ter Braak et al., 1995) 见式 (1):

$$u_k = \frac{\sum_{i=1}^n y_{ik} x_i}{\sum_{i=1}^n y_{ik}} \quad (1)$$

式中, x_i 是样本 i 中的环境变量值; y_{ik} 是样本 i 中物种 k 的相对丰度, n 是数据资料中的总样本数. 而耐受值或者加权标准偏差 (t_k) 由式 (2) 计算:

$$t_k = \frac{\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n y_{ik} (x_i - u_k)^2}{\sum_{i=1}^n y_{ik}}}}{\quad} \quad (2)$$

3 结果 (Results)

3.1 水体离子和电导率

在黔桂珠江水系中电导率的范围为 20~2070

$\mu S\ cm^{-1}$, 平均值为 $272.66\ \mu S\ cm^{-1}$. 这反映了水系中河流经历了由极度贫瘠的电解液到盐水河流的变化 (刘丛强等, 2007). 水体离子组成与平均含量如图 2 所示, 阴离子含量以 $(CO_3^{2-} + HCO_3^-)$ 为主, 为 47%~67% 之间; 其次为 SO_4^{2-} 含量, 为 35.2%~53.7%; 并且还含有相对最少量的 Cl^- 和 NO_3^- . 而阳离子含量的比例大小关系依次为: $Ca^{2+} > Mg^{2+} > (Na^+ + K^+)$. 以上的阴阳离子之间的组合关系表明, 离子主要是来自于喀斯特地区 $CaCO_3$ 、 $MgCO_3$ 、 $CaSO_4$ 和 $MgSO_4$ 的风化和淋溶.

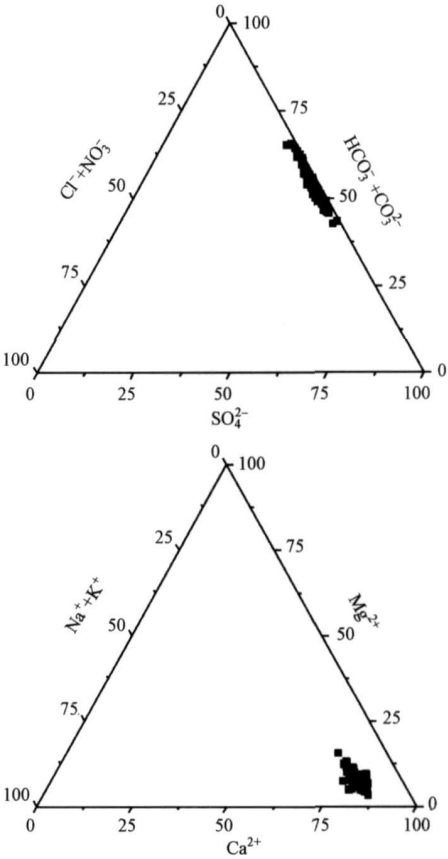


图 2 水体中主要离子组成

Fig. 2 The major ion composition in water columns

3.2 水体离子与底栖硅藻间的相关关系

通过 PCA 和 Factor analysis 分析方法, 确定 8 个离子单独用于硅藻数据解释的方差值和显著性. 被挑选的变量将用于最终的 PCA 分析. 对水体离子的因子分析中, Ca^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 、 $(HCO_3^- + CO_3^{2-})$ 和 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 所解释的方差占总方差的 80.5%, 即这几个因子解释原始 8 个变量的 80.5% 的变异 (仅丢失 19.5% 的信息).

在图 3 的 PCA 分析中, 前 4 个轴的显著性都很

大 ($p < 0.05$), 且其特征值分别为 0.43、0.19、0.17 和 0.13。这显示了前 2 个轴解释了硅藻数据信息的最大变量值; 而第 1 轴与第 2 轴间的特征值差异 ($\lambda_1/\lambda_2 = 2.26 > 0.5$) 表明, 第 1 轴解释了最多的环境变量变异值。PCA 的第 1 轴反映的是与 Ca^{2+} 、 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 、 Na^+ 、 Cl^- 显著相关的离子梯度, 而第 2 轴强调的是由 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 、 Mg^{2+} 引起的离子梯度。 Ca^{2+} 与 Na^+ 间的相关系数最大 (0.724), 且 Ca^{2+} 与 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 显著相关 (Pearson 相关系数为 0.643) (表 2), 因此, Ca^{2+} 、 Na^+ 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 解释了 76.97% 的硅藻-环境关系信息; 其中 K^+ 、 Mg^{2+} 、 SO_4^{2-} 、 NO_3^- 等尽管有较大的方差值, 但不显著, 反映这些变量明显依赖于其他变量, 不能独立的用于硅藻数据的解释 (ter Braak *et al.*, 1998)。由此选择这 3 个环境指标 (Ca^{2+} 、 Na^+ 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$) 再次进行 PCA 分析, 前 2 个轴的特征值分别为 0.63 和 0.27, 属种数据的累积方差为 14.05%, 解释了 80.55% 的硅藻-环境信息。硅藻属种与所选的水体离子相关性非常明显, Ca^{2+} 、 Na^+ 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 离子间的 Pearson 相关系数分别为 0.874、0.833 和 0.818, 反映了这些环境变量在

解释硅藻数据中的重要性。这与整个水系受流域内大面积出露的碳酸盐岩的影响, 水中主要阴、阳离子以 $\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ 和 Ca^{2+} 为主, 碳酸盐“溶解-沉淀”平衡作为基本调节因素控制着水体中主要水化学和地球化学过程 (刘丛强等, 2007) 有关。

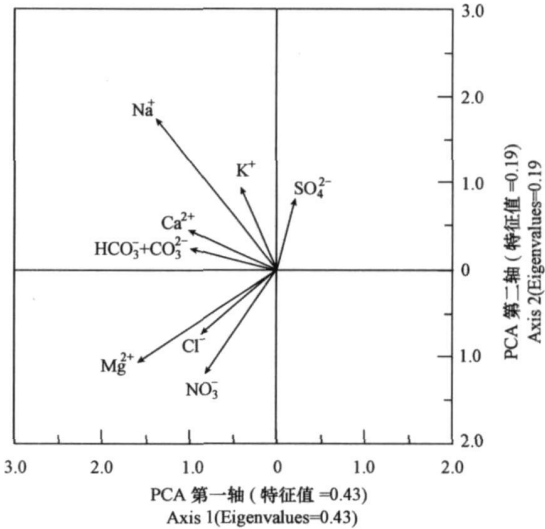


图 3 水体离子的主成分分析
Fig. 3 PCA analysis of the major ions

表 2 电导率和水体离子的相关性分析

Table 2 The correlation between conductivity and major ions								
参数	K^+	Mg^{2+}	Na^+	Ca^{2+}	Cl^-	NO_3^-	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	SO_4^{2-}
K^+	1							
Mg^{2+}	0.216	1						
Na^+	0.658(**)	0.199	1					
Ca^{2+}	0.533(**)	0.257	0.724(**)	1				
Cl^-	0.314	0.624(**)	0.301	0.325	1			
NO_3^-	0.030	0.108	0.059	0.333	0.459(*)	1		
$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$	0.558(**)	0.360	0.594(**)	0.643(**)	0.309	0.013	1	
SO_4^{2-}	0.259	-0.552(*)	0.289	0.352	-0.334	0.016	0.222	1

注: ** Correlation is significant at the 0.01 level (2-tailed). * Correlation is significant at the 0.05 level (2-tailed).

3.3 底栖硅藻群落的最适值区间

通过加权平均回归分析方法 (WA) 确立了硅藻物种在水体环境中对离子与电导率的最适值区间 (在至少 500 个硅藻壳中出现), 具体见附表 1。结果表明, 水体离子组成及含量的变化, 反映在硅藻群落组合的差异性上 (Yang *et al.*, 2003; Potapova *et al.*, 2003), 如在含钙多和含钙少的河流中硅藻的群落存在着很大的差异; 且特殊离子的浓度会影响硅藻的生长 (Kopczyńska *et al.*, 1979; Santos *et al.*, 2002)。由于水中电导率反映水体总离子的

浓度及组成 (Negrel & Lachassagne, 2000), 因此, 电导率也是影响硅藻分布的重要因子之一。

4 讨论 (Discussion)

4.1 电导率与底栖硅藻群落分布的关系

依据底栖硅藻群落的最适电导率区间的确立, 被 Husted 划分为喜盐或中度嗜盐类的硅藻种在本研究中具有相对较高的电导率最适值 (Hustedt, 1957)。本研究中, 每个样点相对丰度至少为 5% 的硅藻种的电导率最适值的范围为 74.86~330.13

$\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$.在与 Ca^{2+} 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 关系密切的大多数硅藻却有高度 (*Navicula menisculus* var *grunavii*, *Achnanthes linearis* var *jackii*, *A. minutissima* var *inconspicua*, *Cocconeis neodinuata*, *Amphora Montana*) 至适度的 (*Achnanthidium minutissimum* var *gracillina*, *Achnanthes inpea*, *A. amoena*, *A. ingratifomis*, *Navicula leptostriata*, *N. aquaedurae*, *Achnantheipsis dubia*, *Cyclotella ocellata*) 电导率最适值.同时也发现了能适应最小的电导率值 ($< 100 \mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$) 的一部分硅藻群落: *Encyonema reichardtii*, *Cymbella hustedtii*, *Achnanthes biasoletiana* aff var *thienemannii*, *Gamphonema entolejum*.

4.2 水体离子与底栖硅藻群落分布的关系

在本研究中, Ca^{2+} 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 的浓度梯度在水体离子中是最显著的.嗜碱性硅藻属种 (*Gamphonema*, *Cymbella*, *Achnanthes* 等) 具有较高的 Ca^{2+} 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 最适值.这与文献报道的在欧洲西南部的石灰质泉水中是以 *Cymbella*, *Denticula tenuis* 和 *Achnanthes minutissima* 为优势种相似 (Sabater & Roca 1992).在喀斯特区河流中随着 Ca^{2+} 含量的变化,硅藻出现了适钙种 (*Navicula clementis* var *grunavii*, *N. pseudoventralis*, *Achnanthes linearis* var *jackii*, *A. minutissima* var *inconspicua*, *Cocconeis neodinuata*, *Amphora montana* 等) 以及适应于低含钙水体的 (*Achnanthidium macrocephalum*, *Navicula viridula* var *gemainii*, *Cymbella hustedtii*, *Gamphonema entolejum*, *Nitzschia angustiforaminata*) 硅藻群落 (表 3). 由于适钙种 *Achnanthes linearis* var *jackii* 和 *Navicula menisculus* var *grunavii* 同样具有相对较高的 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$, 且二价阳离子 (Ca^{2+} 和 Mg^{2+}) 的浓度与溶解性 HCO_3^- 是密切相关, 因此很难确定是单独的 Ca^{2+} 或是 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 造成硅藻群落的分布差异.因而, 何种离子影响硅藻生长是不能明确的.

硅藻物种组成的 Cl^- 最适浓度值范围为 $0.45 \sim 1.69 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 在研究样点中能适应较高电导率环境生长的硅藻群落对 Cl^- 和 Na^+ 的最适值达到最高. *Gamphonema parvulum* var *parvulum* f. *saprophilum*, *Achnanthidium exile*, *Encyonema minutum*, *Gamphonema gracile* 具有相对较高的 Cl^- 和 Na^+ 最适值, 这与以 Cl^- 和 Na^+ 为优势离子的沿海淡水水体是相一致的. 由于 Cl^- 能抑制参与光合作用的碳酸酐酶的活性, 因此, Cl^- 对淡水硅藻是有毒的

(Dionisio-Sese & Miyachi 1992). 本研究结果表明, Cl^- 对硅藻群落组成的影响是不同于总离子强度的影响也能够间接证明这一结论.

Mg^{2+} 与水体其它离子共同作用于硅藻群落分布. Mg^{2+} 最适值相对较高的硅藻群落 (*Navicula menisculus* var *grunavii*, *N. absoluta*, *N. aquaedurae*, *Achnanthes linearis* var *jackii*, *A. amoena*, *A. holsatica*, *A. inpea*, *Achnanthidium exile*, *Amphora montana*, *Nitzschia agnita*) 大部分位于电导率最适值较高的范围内.

研究显示, 具有最高的 SO_4^{2-} 最适值的硅藻种具有较高的电导率最适值 (*Achnanthes minutissima* var *inconspicua*, *A. lanceolata* subsp., *A. curtissima*, *Achnantheipsis dubia*, *Navicula pseudoventralis*, *Cocconeis neodinuata*). 在河池境内的采煤区内, 具有最高 SO_4^{2-} 最适值的硅藻群落有 *Navicula pseudoventralis*, *N. parsura*, *N. cryptocephala*, *Achnanthes minutissima* var *inconspicua*, *A. curtissima*, *A. minutissima* var *affinis*, *Gamphonema minutum* (Agardh), *Agardhi minutum*, *G. parvulum* Ktzing var *parvulum* f. *parvulum*, *Amphora montana*, *Cocconeis neodinuata*, *Diadema contenta*. Potapova & Charles (2003) 认为, 水体电导率增加与 Na_2SO_4 的污染密切相关. 大部分具有电导率最高值的硅藻种对应的 Na^+ 、 SO_4^{2-} 和电导率的最适值也较高. *Achnanthes minutissima* var *inconspicua*, *Navicula pseudoventralis*, *Fragilaria capucina* var *mesolepta* sensu lato 对 SO_4^{2-} 的最适值在所有硅藻种中达到最高, 为 $415.87 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$, 暗示这些硅藻可以作为煤和硫化物矿物严重污染水体的指示性硅藻. 因此, 在本研究中不同硅藻群落组成差异响应不同环境变化的机制研究, 为建立喀斯特区离子和电导率转换函数模型从而定量推断电导率和离子的浓度提供参考依据, 并运用硅藻群落组成与分布差异作为喀斯特区黔桂珠江水系水质监测的指示物种具有重要的意义.

5 结论 (Conclusions)

在西南喀斯特地区黔桂珠江水系, Ca^{2+} 、 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 和 Na^+ 是影响硅藻群落分布差异的主要水体离子, 其中 Ca^{2+} 和 $(\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-})$ 的作用尤其显著, 这与喀斯特地区石灰岩强烈侵蚀作用有关.

硅藻群落组成随着 Ca^{2+} 含量的增加, 具有适钙

的(如 *Navicula menisculus* var *grunowii* *Achnanthes linearis* var. *jackii*) 和低钙含量水体生长(如 *Achnanthes minutissima* var *macrocephala*, *Navicula viridula* var *gemina*)的硅藻群落。且呈现钙的最高最适值的硅藻种也具有高的($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)最适值,这对于确定单体离子对硅藻分布的影响带来难度。

对 Cl^- 和 Na^+ 有最高最适值的硅藻群落具有最高的电导率最适值,而相对于 SO_4^{2-} 最适值高的物种也能适应电导率高的环境。在广西河池采煤区, SO_4^{2-} 的最适值最高的物种(*Fragilaria capucina* var *mesolepta sensu lato* 等)及最低最适值的物种(*Gomphonema gracile*, *Navicula parvula*)能适应不同 SO_4^{2-} 含量的水体生长,可以作为煤和硫化物污染的生物指标。

电导率反映了水体中各种离子的总浓度和总含量,与水体离子具有密切的相关关系,共同影响硅藻群落的分布。在 Ca^{2+} 和($\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$)最适值最高的水体中的大多数硅藻有高度(*Navicula menisculus* var *grunowii*, *Achnanthes linearis* var *jackii*, *A. minutissima* var *inconspicua*, *Coconeis neodinutata*, *Amphora Montana*)至适度的(*Achnanthes ilimum minutissimum* var *gracillima*, *Achnanthes impexa*, *A. amoena*, *A. ingratiformis*, *Navicula leptostriata*, *N. aquaedurae*, *Achnantheiopsis dubia*, *Cyclotella ocellata*)电导率最适值。随着电导率的递增,硅藻群落也由嫌盐类(*Encyonema reichardtii*, *Cymbella hustedtii*等)向中度嗜盐至喜盐类物种(*Navicula menisculus* var *grunowii*等)过渡。

责任作者简介: 支崇远 (1956—), 男, 教授。主要从事硅藻生态学及环境污染控制的研究。E-mail: zhichy@163.com.

参考文献 (References):

- Birks H J B 1995. Quantitative palaeoenvironmental reconstructions. In: Maddy D, Brew J J. Statistical Modelling of Quaternary Science Data [M]. Quaternary Research Association, London: Cambridge University Press. 161—254
- Chetelat J, Pick F R, Morin A, et al. 1999. Periphyton biomass and community composition in rivers of different nutrient status [J]. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences. 56: 560—569
- Dionisio-Sese M L, Miyachi S. 1992. The effect of sodium chloride on carbonic anhydrase activity in marine microalgae [J]. Journal of Phycology. 28: 619—624
- Gasse F, Juggins S, Ben Khelifa L. 1995. Diatom-based transfer

- functions for inferring past hydrochemical characteristics of African lakes [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology. 117: 31—54
- Hustedt E. 1957. Die Diatomeenflora des Fluss-systems der Weser in Gebiet der Hansestadt Bremen [J]. Abhandlungen des Naturwissenschaftlichen Vereins zu Bremen. 34: 181—440
- Juggins S. 2003. C2 Version 1.5 Software for ecological and palaeoecological data analysis and visualization [M]. Newcastle upon Tyne UK: Newcastle University. 73
- Kobayashi H, Idei M, Mayama S, et al. 2006. H. Kobayashi's Atlas of Japanese diatoms based on electron microscopy [M]. Tokyo: Uchida Rokakuho Publishing Co., Ltd. 531
- Kopcevska E E. 1979. Chloride effect on the growth of *Cyclotella meneghiniana* Kütz and *Melosira granulata* (Ehr.) Ralfs [J]. Polskie Archiwum Hydrobiologii. 26: 587—594
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1986. Bacillariophyceae Teil 1. Naviculaceae. Band 2/1. Süßwasserflora von Mitteleuropa (begleitet von A. Pascher) [M]. Stuttgart: Gustav Fischer. 876
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1988. Bacillariophyceae Teil 2. Epithemiaeae, Bacillariaeae, Surirellaceae. Band 2/2. Süßwasserflora von Mitteleuropa (begleitet von A. Pascher) [M]. Stuttgart: Gustav Fischer. 611
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1991a. Bacillariophyceae Teil 3. Centrales, Fragilariaceae, Eunotiaceae. Band 2/3. Süßwasserflora von Mitteleuropa (begleitet von A. Pascher) [M]. Stuttgart: Gustav Fischer. 576
- Krammer K, Lange-Bertalot H. 1991b. Bacillariophyceae Teil 4. Achnanthesaceae, Kritische Ergänzungen zu Navicula (Lineolatae) und Gomphonema. Gesamt-literaturverzeichnis Teil 1—4. Band 2/4. Süßwasserflora von Mitteleuropa (begleitet von A. Pascher) [M]. Stuttgart: Gustav Fischer. 536
- 刘丛强, 胡健, 洪冰, 等. 2007. 生物地球化学过程与地表物质循环 [M]. 北京: 科学出版社. 146—148
- Liu C Q, Hu J, Hong B, et al. 2007. The chemical process of biological geology and the cycle of the earth's substances [M]. Beijing: Science Press. 146—148 (in Chinese)
- Negrel P, Lachassagne P. 2000. Geochemistry of the Maroni river during the low water stage: implications for water-rock interaction and groundwater characteristics [J]. Journal of Hydrology. 237: 212—233
- Patrick R, Reimer C W. 1966. The diatoms of the United States (vol. 1. *Fragilariaceae*, *Eunotiaceae*, *Achnanthesaceae*, *Naviculaceae*) [M]. Philadelphia: Monographs of the Academy of Natural Sciences of Philadelphia. 688
- Potapova M, Charles D F. 2003. Distribution of benthic diatoms in U.S. rivers in relation to conductivity and ionic composition [J]. Freshwater Biology. 48: 1311—1328
- Potapova M, Hamblin P B. 2007. Morphological and ecological variation within the *Achnanthes ilimum minutissimum* (Bacillariophyceae) species complex [J]. Journal of Phycology. 43: 561—575
- Sabater S, Roca J R. 1992. Ecological and biogeographical aspects of diatom distribution in Pyrenean springs [J]. British Phycological

Journal 27: 203—213

Saros J E, Fritz S C. 2002. Resource competition among saline-lake diatoms under varying N/P ratio, salinity and anion composition [J]. *Freshwater Biology*, 47: 87—95

Sullivan M J. 1999. Applied diatom studies in estuaries and shallow coastal environments. In: Stoermer E F and Smol J P, *The Diatoms: Applications for the Environmental and Earth Sciences* [M]. London: Cambridge University Press: 334—351

ter Braak C J F, Looman C W N. 1995. Regression. In: Jongman R H G, ter Braak C J F, van Tongeren O F R, *Data Analysis in Community and Landscape Ecology* [M]. Cambridge: Cambridge University Press: 29—77

ter Braak C J F, Šmilauer P. 1998. *Canoco Reference Manual and User's Guide to Canoco for Windows* [M]. Wageningen: Centre for Biometry Wageningen, 113—180

Wilson S E, Cumming B F, Smol J P. 1994. Diatom-salinity relationships in 111 lakes from the Interior Plateau of British Columbia, Canada: the development of diatom-based models for paleosalinity and paleoclimatic reconstructions [J]. *Journal of Paleolimnology* 12: 197—221

Winter J G, Duthie H C. 2000. Epilithic diatoms as indicators of stream total N and total P concentration [J]. *Journal of the North American Benthological Society* 19: 32—49

Yang X D, Christian K, Roland S, *et al*. 2003. Diatom-based conductivity and water-level inference models from eastern Tibetan (Qinghai-Xizang) Plateau lakes [J]. *Journal of Paleolimnology*, 30: 1—19

羊向东, 王苏民, 夏威夷, 等. 2001. 典型对应分析在青藏高原现代湖泊硅藻与环境研究中的应用 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 31: 274—279

Yang X D, Wang S M, Xia W L, *et al*. 2001. The use of CCA in the research of diatom and environment in modern lake of Qing Zang Plateau [J]. *Science in China (Series D)*, 31: 274—279 (in Chinese)

张世森. 2001. 环境监测技术 [M]. 北京: 高等教育出版社, 208—204

Zhang S S. 2001. *Monitoring technology for environment* [M]. Beijing: Higher Education Press: 204—208 (in Chinese)

附表 1 水体离子梯度下 107 个硅藻种的最适值 (最适值是 $\log_{10}$ 离子浓度转换的加权平均计算值)

Addenda 1 The optima of 107 diatom taxa along different gradients of major ions (The optima were calculated from WA values of $\log_{10}$ -transformed ion concentrations)

物种名称 Species Name	COND/ ($\mu S\ cm^{-1}$)	Ca^{2+} / ($mg\ L^{-1}$)	$HCO_3^- +$ CO_3^{2-} / ($mg\ L^{-1}$)	Na^+ / ($mg\ L^{-1}$)	K^+ / ($mg\ L^{-1}$)	Mg^{2+} / ($mg\ L^{-1}$)	Cl^- / ($mg\ L^{-1}$)	NO_3^- / ($mg\ L^{-1}$)	SO_4^{2-} / ($mg\ L^{-1}$)
<i>Hamoeocladia paka</i> (K tzing) Kuntze	217.78	57.88	274.42	4.13	9.00	4.37	0.82	1.29	337.84
<i>Cymbella tumidula</i> Grunow	189.55	50.29	280.84	3.37	8.55	6.08	1.04	0.74	315.23
<i>Nitzschia fonticola</i> (Grunow) Grunow in VanHurek	185.21	49.12	207.93	3.47	7.13	3.47	0.82	1.00	353.81
<i>Achnanthes minutissima</i> var.	228.09	60.66	315.23	3.07	9.23	5.03	1.04	1.63	370.54
<i>Nitzschia dissipata</i> var <i>media</i> (Hantzsch) Grunow	228.09	63.57	268.15	2.80	7.13	4.50	0.91	1.14	345.74
<i>Navicula viridula</i> var <i>rostellata</i> (K tzing) Cleve	161.18	47.98	287.40	2.55	8.33	3.27	0.55	0.82	370.54
<i>Encyonema silesiacum</i> (Beckish in Rabenhorst) Mann in Round, Crawford & Mann	143.54	46.86	268.15	2.72	8.55	5.46	0.91	1.00	322.59
<i>Cymbella turgidula</i> Grunow in Cleve & M ^L ller Cleve	116.49	41.66	268.15	2.09	8.12	4.37	1.00	0.86	337.84
<i>Nitzschia archibaldi</i> Lange-Bertalot	127.82	44.71	207.93	2.63	8.12	2.63	0.48	0.78	370.54
<i>Encyonema parvulum</i> (A. Cleve) Mann in Round, Crawford & M	157.49	52.70	268.15	2.89	7.71	5.76	0.86	1.40	337.84
<i>Navicula subrotundata</i> Hustedt	180.97	55.23	330.13	2.09	6.59	4.50	1.00	1.95	370.54
<i>Delicatula delicatula</i> (K tzing) K. Krammer	189.55	55.23	268.15	3.17	8.33	4.62	0.66	1.14	345.74
<i>Navicula aquaedune</i> Lange-Bertalot	244.47	60.66	370.54	2.09	8.12	7.13	1.19	1.75	362.08
<i>Nitzschia amphibia</i> Hustedt	127.82	47.98	287.40	2.98	9.00	5.17	1.19	1.34	337.84
<i>Navicula trivialis</i> Lange-Bertalot var <i>trivialis</i>	185.21	57.88	262.03	2.72	8.55	3.57	0.62	0.86	379.19
<i>Fragilaria capucina</i> var <i>mesolepta</i> sensu lato	180.97	55.23	280.84	2.16	8.55	2.16	0.70	1.14	415.87
<i>Navicula menisculus</i> var <i>grunovii</i> Lange-Bertalot	330.13	80.28	337.84	3.37	9.23	7.13	1.19	2.09	345.74
<i>Hamoeocladia frustulum</i> (K tzing) Kuntze	228.09	59.26	256.04	4.50	9.23	3.79	1.24	2.16	362.08
<i>Cymbella affinis</i> K tzing	157.49	50.29	308.03	2.47	8.77	6.24	1.09	1.14	322.59
<i>Navicula pseudoventralis</i> Hustedt	250.19	71.44	308.03	2.72	8.77	4.89	0.95	1.95	415.87
<i>Nitzschia agnita</i> Hustedt	244.47	65.07	308.03	2.89	8.55	6.08	0.91	1.24	315.23
<i>Navicula aff. goeppertiana</i> oder <i>aff. obligata</i>	146.91	43.67	238.88	2.31	8.12	3.07	0.51	1.14	406.38
<i>Navicula cryptocephala</i> K tzing	207.93	56.54	294.12	3.17	8.77	4.62	0.91	1.40	370.54

续附表 1									
物种名称 Species Name	COND/ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Ca^{2+} / (mg L^{-1})	$\text{HCO}_3^- +$ CO_3^{2-} / (mg L^{-1})	Na^+ / (mg L^{-1})	K^+ / (mg L^{-1})	Mg^{2+} / (mg L^{-1})	Cl^- / (mg L^{-1})	NO_3^- / (mg L^{-1})	SO_4^{2-} / (mg L^{-1})
<i>Navicula submuralis</i> Hustedt	198.53	50.29	274.42	2.55	6.94	3.37	1.09	1.88	370.54
<i>Gomphonana minutum</i> (C. Agardh) C. Agardh	217.78	57.88	294.12	2.39	8.77	2.98	1.09	2.09	345.74
<i>Cymbella ventricosa</i> var. <i>laevis</i> (<i>laevis</i>) (Naegeli in Kützinger) Mayer	137.04	46.86	322.59	2.80	8.77	6.59	1.14	1.09	294.12
<i>Achnanthes naldae</i> A. Cleve	207.93	53.95	280.84	2.39	8.77	3.68	0.95	1.40	362.08
<i>Achnantheidum exile</i> (Kützinger) Round & Bukhtiyarova	212.80	55.23	362.08	3.79	8.77	7.32	1.29	1.40	315.23
<i>Cymbella cistula</i> (Hemprich in Hemprich & Ehrenberg) Kirchner	103.71	40.69	212.80	2.16	8.33	4.37	0.70	0.62	337.84
<i>Achnanthes inpeyiformis</i> Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Krammer	189.55	51.48	228.09	2.31	8.55	3.79	0.78	0.48	388.05
<i>Gomphonana parvulum</i> (Kützinger) Van Heurck	133.90	46.86	262.03	2.47	7.51	5.17	1.09	1.24	337.84
<i>Amphora montana</i> Kraske	193.98	50.29	322.59	3.17	7.51	4.50	0.66	0.91	345.74
<i>Eolimna subminuscule</i> (Manguin) G. Moser H. Lange-Bertalot & D. Metzger in	157.49	47.98	244.47	2.55	6.08	3.68	1.04	1.82	337.84
<i>Navicula cryptotenella</i> Lange-Bertalot in Krammer & Lange-Bertalot	161.18	49.12	268.15	2.09	7.91	4.75	0.86	1.29	353.81
<i>Nitzschia paleacea</i> Grunow	217.78	56.54	250.19	2.63	6.59	5.31	0.95	1.29	315.23
<i>Coconeis neolimnata</i> Krammer	268.15	66.61	337.84	2.89	9.00	3.79	1.57	2.80	379.19
<i>Navicula malina</i> Hustedt	185.21	51.48	330.13	2.09	7.71	5.03	0.95	1.51	353.81
<i>Achnanthes holstiaca</i> Hustedt	222.87	63.57	322.59	2.63	9.00	8.12	1.40	2.16	315.23
<i>Diadema contenta</i> (Grunow ex Van Heurck) Mann in Round, Crawford & Mann	212.80	53.95	280.84	2.80	8.77	4.62	0.86	1.69	379.19
<i>Achnanthes ingratiiformis</i> Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Krammer	228.09	49.12	388.05	1.82	9.00	5.46	1.24	1.82	379.19
<i>Nitzschia amphibia</i> Grunow in Amphibia	180.97	50.29	268.15	2.89	7.91	4.01	1.09	1.82	362.08
<i>Achnanthes curtissina</i> Carter	274.42	63.57	315.23	3.17	9.00	4.62	1.09	2.09	397.11
<i>Planothidium robustus</i> H. Lange-Bertalot	207.93	53.95	345.74	2.02	8.77	4.62	1.19	1.95	362.08
<i>Gomphonana species aus venezuela</i>	140.25	45.77	353.81	1.57	9.00	5.17	1.14	1.19	397.11
<i>Sellaphora seminulum</i> (Grunow) Mann	193.98	51.48	337.84	2.16	7.13	4.37	0.86	1.45	353.81
<i>Coconeis placentalis</i> f. <i>lineata</i> (Ehrenberg) Hustedt	189.55	50.29	287.40	2.63	7.91	4.50	1.19	1.95	362.08
<i>Navicula trivialis</i> var. <i>oligotraphenta</i> Lange-Bertalot & G. Hofmann in Krammer & Lange-Bertalot	161.18	44.71	189.55	2.31	8.33	4.50	0.74	0.86	353.81
<i>Navicula lundii</i> Reichardt	172.78	46.86	287.40	2.02	7.32	2.89	1.00	1.63	345.74
<i>Gomphonana pseudoaugur</i> Lange-Bertalot	172.78	44.71	301.00	1.95	8.55	3.07	0.70	1.19	379.19
<i>Hanoecolus inconspicuus</i> (Grunow) Kuntze	172.78	45.77	262.03	2.63	7.71	3.27	0.86	1.57	370.54
<i>Achnanthes laevis</i> Oestrup var. <i>laevis</i>	212.80	51.48	315.23	2.02	9.00	4.37	0.95	2.24	330.13
<i>Gomphonana rhombica</i> oder aff. <i>rhombica</i> Fricke	130.83	47.98	322.59	2.39	8.77	6.08	1.24	1.29	322.59
<i>Achnanthes bisoletiana</i> aff. var. <i>thienemannii</i> Hustedt	203.17	51.48	353.81	1.69	8.77	4.37	1.19	1.34	397.11
<i>Achnanthes lanceolata</i> ssp. <i>frequentissima</i> Lange-Bertalot	203.17	50.29	330.13	2.31	8.12	4.62	1.14	1.75	362.08
<i>Achnanthes lanceolata</i> subsp. <i>polynophila</i> Skabichevskii	233.42	57.88	345.74	1.75	8.55	3.90	1.09	1.69	406.38
<i>Gomphonana minutum</i> (Agardh) Agardh f. <i>minutum</i>	207.93	52.70	193.98	4.62	9.23	3.27	1.19	2.63	397.11
<i>Gomphonana angustum</i> Agardh	193.98	53.95	315.23	2.63	9.00	4.13	1.14	1.69	370.54

续附表 1									
物种名称 Species Name	COND/ ($\mu\text{S cm}^{-1}$)	Ca^{2+} / (mg L^{-1})	$\text{HCO}_3^- + \text{CO}_3^{2-}$ / (mg L^{-1})	Na^+ / (mg L^{-1})	K^+ / (mg L^{-1})	Mg^{2+} / (mg L^{-1})	Cl^- / (mg L^{-1})	NO_3^- / (mg L^{-1})	SO_4^{2-} / (mg L^{-1})
<i>Gomphonema parvulum</i> K tzing var <i>parvulum</i> f <i>parvulum</i>	203.17	55.23	268.15	3.37	6.94	4.37	1.00	1.63	379.19
<i>Gomphonema entolegium</i> Oestrup	74.86	37.90	287.40	1.95	8.55	3.27	0.55	1.00	388.05
<i>Gomphonema species cf pumilum</i>	153.88	46.86	217.78	2.02	8.33	3.68	0.66	1.75	370.54
<i>Cyclotella operculata</i> var <i>ocellata</i> (Pantocsek) Cleve-Euler	233.42	51.48	370.54	2.39	8.55	6.41	0.78	1.00	337.84
<i>Achnanthes bisolettiana</i> var <i>subatomus</i> Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Krammer	189.55	56.54	315.23	2.24	8.33	5.03	0.95	1.45	379.19
<i>Achnanthes amoena</i> Hustedt	256.04	60.66	388.05	1.95	8.55	6.59	0.82	1.29	379.19
<i>Achnantheidium minutissimum</i> var <i>gracillina</i> (Meister) Bukhtiyarova	244.47	60.66	406.38	1.82	8.77	5.76	1.19	2.47	370.54
<i>Navicula absoluta</i> Hustedt	262.03	62.10	345.74	2.31	7.32	7.13	1.09	1.51	337.84
<i>Achnantheopsis dubia</i> (Grunow) Lange-Bertalot	233.42	57.88	370.54	2.09	7.13	5.17	0.91	2.89	397.11
<i>Stauroneis goeppertiana</i> Bleisch ex Rabenhorst	157.49	42.65	315.23	2.16	8.33	4.25	0.55	0.74	406.38
<i>Achnanthes minutissima</i> var <i>inconspicua</i> Oestrup	315.23	65.07	322.59	3.79	9.72	5.03	1.14	1.63	415.87
<i>Amphora montana</i> Kraske	262.03	65.07	322.59	1.88	8.12	6.24	0.82	2.39	388.05
<i>Navicula vitalunda</i> Hustedt	127.82	46.86	287.40	2.39	8.77	8.12	1.29	1.34	262.03
<i>Achnanthes acares</i> Hohn & Hellemann (ohne Diagnose)	198.53	51.48	308.03	1.95	7.71	5.61	0.95	1.45	353.81
<i>Gomphonis clevei</i> (Fricke) Gil	140.25	46.86	294.12	1.82	8.77	3.27	1.04	1.75	397.11
<i>Gomphonema parvulum</i> var <i>parvulum</i> f <i>saprophilum</i> Lange-Bertalot & Reichardt	137.04	49.12	262.03	4.50	9.47	4.75	1.69	2.72	330.13
<i>Achnantheidium bisolettianum</i> (Grunow) in Cleve & Grunow H. Lange-Bertalot	203.17	55.23	322.59	2.98	8.55	5.76	1.14	1.69	345.74
<i>Pinularia cincta</i> Ehrenberg	172.78	56.54	330.13	2.72	9.23	5.61	1.63	2.63	337.84
<i>Achnanthes petersenii</i> Hustedt	130.83	44.71	315.23	2.55	7.13	3.79	0.78	1.45	362.08
<i>Encyonema minutum</i> (Hillebrand) in Rabenhorst Mann in Round Crawford & Mann	161.18	50.29	330.13	3.27	8.77	8.55	1.24	1.63	287.40
<i>Achnantheidium macrocephalum</i> (Hustedt) Round & Bukhtiyarova	116.49	39.74	233.42	2.24	8.33	4.37	0.70	1.04	337.84
<i>Achnanthes minutissima</i> var <i>affinis</i> (Grunow) Lange-Bertalot	193.98	49.12	193.98	3.27	8.77	4.13	0.74	1.34	388.05
<i>Achnantheidium minutissimum</i> (K tzing) Czarniecki var <i>minutissimum</i>	150.36	47.98	308.03	2.89	9.00	7.32	1.40	1.45	301.00
<i>Achnanthes linearis</i> var <i>jackii</i> (Rabenhorst) Grunow in Van Hurek	322.59	71.44	353.81	4.37	9.72	7.13	1.24	1.40	370.54
<i>Navicula parsura</i> Hustedt	217.78	50.29	233.42	2.89	7.91	4.25	1.04	0.62	397.11
<i>Navicula halophila</i> (Grunow) Cleve	185.21	45.77	337.84	2.39	7.32	4.37	0.82	1.34	345.74
<i>Navicula parablis</i> Hohn & Hellemann	164.96	46.86	301.00	2.98	9.00	5.46	1.29	1.88	233.42
<i>Coconeis placentula</i> var <i>placentula</i>	198.53	52.70	315.23	1.95	8.55	3.57	0.95	2.09	388.05
<i>Coconeis placentula</i> var <i>egyptia</i> (Ehrenberg) Grunow	153.88	50.29	301.00	2.02	8.33	4.75	1.14	1.82	362.08
<i>Achnanthes pusilla</i> (Grunow) De Toni	164.96	50.29	301.00	1.95	7.71	4.89	0.91	1.40	362.08
<i>Coconeis neohumensis</i> Krammer	185.21	52.70	337.84	1.88	8.77	3.79	1.09	1.88	406.38
<i>Achnanthes inpexa</i> Lange-Bertalot in Lange-Bertalot & Krammer	222.87	53.95	397.11	2.55	8.55	6.59	1.09	2.02	308.03
<i>Encyonema brehmii</i> (Hustedt) Mann in Round Crawford & Mann	198.53	59.26	345.74	2.47	9.00	8.12	1.45	1.69	308.03
<i>Caloneis bacillum</i> (Grunow) Cleve	161.18	50.29	244.47	2.16	8.77	5.17	0.91	1.04	362.08

续附表 1									
物种名称 Species Name	COND/ (μS cm ⁻¹)	Ca ²⁺ / (mg L ⁻¹)	HCO ₃ ⁻ + CO ₃ ²⁻ / (mg L ⁻¹)	Na ⁺ / (mg L ⁻¹)	K ⁺ / (mg L ⁻¹)	Mg ²⁺ / (mg L ⁻¹)	Cl ⁻ / (mg L ⁻¹)	NO ₃ ⁻ / (mg L ⁻¹)	SO ₄ ²⁻ / (mg L ⁻¹)
<i>Navicula leptostriata</i> Jørgensen	172.78	42.65	388.05	2.80	8.12	5.17	0.51	0.58	301.00
<i>Nitzschia angustifolminata</i> Lange-Bertalot	133.90	37.90	238.88	2.47	4.62	2.98	0.66	1.04	337.84
<i>Neidium apinum</i> Hustedt	143.54	41.66	238.88	2.02	8.33	3.79	0.62	1.24	406.38
<i>Navicula viridula</i> var <i>gemainii</i> (Wallace) Lange-Bertalot	116.49	37.90	301.00	2.47	5.61	3.17	0.45	1.04	287.40
<i>Adnanthes linearis</i> sensu auct. nonnulli (excl. Lectotypus)	101.33	42.65	315.23	2.16	6.24	3.79	0.58	0.91	397.11
<i>Adnanthidium kryophilum</i> (Boye-Petersen) Bukhtiyarova	157.49	50.29	287.40	1.88	5.76	5.92	1.19	1.34	388.05
<i>Cymbella leptoceros</i> (Ehrenberg) Kützting	111.20	42.65	274.42	2.09	9.00	7.51	1.24	1.34	287.40
<i>Homoeocladia tabellaria</i> (Grunow) Kuntze	150.36	44.71	308.03	1.95	8.55	4.50	0.66	1.34	362.08
<i>Cymbella tumidula</i> var. <i>lanceolata</i> Krammer in Krammer & Lange-Bertalot	193.98	46.86	322.59	2.98	8.33	6.08	0.70	0.55	315.23
<i>Nitzschia vallicostata</i> Lange-Bertalot & Simonsen	212.80	49.12	315.23	2.16	5.31	5.46	0.86	0.82	353.81
<i>Gomphonema punctatum</i> (Grunow) Reichardt & Lange-Bertalot	153.88	49.12	244.47	1.82	8.12	4.75	0.82	1.51	379.19
<i>Cymbella aequalis</i> var. <i>subaequalis</i> (Grunow) in Van Heurck & Mayer	185.21	57.88	280.84	2.24	8.77	8.55	1.19	1.34	294.12
<i>Gomphonema gracile</i> Ehrenberg	137.04	45.77	274.42	3.07	8.77	7.51	1.24	1.95	244.47
<i>Adnanthes bisolettiana</i> aff. var. <i>thienemannii</i> Hustedt	86.10	41.66	301.00	2.16	8.55	6.24	0.86	1.29	308.03
<i>Cymbella hustedtii</i> Kraske	82.18	37.90	294.12	2.31	9.23	8.33	1.63	1.51	256.04
<i>Encyonema reichardtii</i> (Krammer) Mann in Rund, Crawford & Mann	96.72	47.98	322.59	1.82	9.00	6.76	1.29	1.00	337.84