

广东鉴江水系底栖硅藻多样性与时空分布特征

邱礼城¹, 韦桂峰^{1*}, 李湘姣², 史栾生², 林叔忠², 韩博平¹

(1. 暨南大学生态学系, 热带亚热带水生生态工程教育部工程研究中心, 广州 510632; 2. 广东省水文局, 广州 510150)

摘要: 为了解广东省鉴江水系底栖硅藻多样性和时空分布特征, 对全流域进行了底栖硅藻采样调查。结果表明, 从 19 个采样点 4 次采样中共检出底栖硅藻 10 科 52 属 242 种, 其中舟形藻属(*Navicula*)、菱形藻属(*Nitzschia*)和异极藻属(*Gomphonema*)是优势类群, 出现频次和相对丰度较高。硅藻多样性指数(丰富度、真香农多样性指数和真辛普森多样性指数)随河流等级呈现一定的空间分布特征, 但它们季节变化不明显。底栖硅藻群落相异性在上游和下游河段较高, 从一级到三级河流递减, 四级河流又增加。底栖硅藻群落结构空间变化明显, 季节变化显著。群落丰富度的稀疏曲线表明, 热带河流底栖硅藻群落以 400 个体计数, 不能完全反映底栖硅藻多样性。这些为鉴江水系河流健康监测和水生态保护奠定了基础。

关键词: 底栖硅藻; 多样性; 时空分布; 相异性; 河流等级

doi: 10.11926/j.issn.1005-3395.2016.02.011

Species Diversity and Temporal-spatial Distribution of Benthic Diatoms in Jianjiang River, Guangdong Province

QIU Li-cheng¹, WEI Gui-feng^{1*}, LI Xiang-jiao², SHI Luan-sheng², LIN Shu-zhong², HAN Bo-ping¹

(1. Department of Ecology, Jinan University, Engineering Research Center of Tropical and Subtropical Aquatic Ecological Engineering Ministry of Education, Guangzhou 510632, China; 2. Hydrological Bureau of Guangdong Province, Guangzhou 510150, China)

Abstract: To understand species diversity and distribution of benthic diatoms in typical tropical rivers, the benthic diatoms were investigated seasonally in Jianjiang River, Guangdong Province. The results showed that there were 242 benthic diatoms, belonging to 52 genera and 10 families were detected from 19 sites and 4 times sampling. *Navicula*, *Nitzschia* and *Gomphonema* were the main dominant genera with high frequency and relative abundance. Three diatom diversity indexes of benthic diatom, such as richness, true Shannon-Wiener diversity index, and true Simpson diversity index, showed certain spatial distribution with increasing of river class, but there was no significance in season. Community dissimilarity of benthic diatoms decreased from class 1 to class 3 but increased in class 4. Structure of benthic diatoms showed clear temporal and spatial patterns by Two-Way PERMANOVA analysis. Rarefaction curve indicated that counting with 400 individuals for each sample would underestimate richness and diversity of benthic diatoms in the tropical river. These would establish the foundation for river health monitoring and water ecological conservation of Jianjiang River system.

Key words: Benthic diatoms; Diversity; Temporal-spatial distribution; Dissimilarity; River class

底栖硅藻的生活史相对较短, 能对环境做出迅速的反应, 现存生物群落是对当前环境直接和客观

的体现; 底栖硅藻群落在空间上是紧凑的, 在一小块底质上就能采集到有代表性的群落^[1]。同时, 底

收稿日期: 2015-07-13 接受日期: 2015-09-27

基金项目: 水利部河湖健康评估广东省试点项目和广东省水利科技创新项目(2014-01)资助

This work was supported by the Pilot Project in Guangdong Province for Health Assessment of River and Lake in Ministry of Water Resources, and the Science and Technology Innovation Project for Water Conservancy in Guangdong Province (Grant No. 2014-01).

作者简介: 邱礼城(1990~), 男, 硕士研究生, 主要进行河流生态监测的研究。E-mail: 690701364@qq.com

* 通信作者 Corresponding author. E-mail: tweigf@jnu.edu.cn

栖硅藻种类繁多,不同种类对环境压力的耐受性不尽相同,被认为能有效指示环境的变化^[2-3]。底栖硅藻已被广泛用于河流健康评估和生物监测^[4-5],但在我国,由于起步晚,对不同地区可用于硅藻生物监测的种类名录还不全,很多地区及管理部门还难以开展监测工作,迫切需要在典型水系开展基础调查,编制底栖硅藻名录,积累面向水质和生态健康评估的基础资料。

水体中底栖硅藻多样性主要受生境状况(物理因素和化学因素等)和区域因素(空间、地理分布等)的影响,生境条件或状况在很大程度上决定底栖硅藻在局部环境中的分布和丰度^[6]。空间环境因素的异质性也是影响硅藻多样性的重要因素。河流网状结构使得下游河段易受到上游来水的影响,为种类多样性的“汇”^[7]。河流等级是一组无量纲数据,从水文的角度的角度提供了河流流域的组成信息,不同等级的河段上人为干扰(人类活动、土地利用和植被等)不同^[8],反映了水系环境因素的异质性。受水流方向约束,河流等级变化也反映了河流之间的连通性。Liu等对我国东江水系的研究表明,由上游至下游的生物传播是影响硅藻群落多样性与结构的重要因素^[9]。

华南地区地处热带北缘,是热带向亚热带的过渡区,底栖硅藻的种类多样性丰富。刘静等^[10]报道,华南地区东江水系底栖硅藻种类丰富,香农多样性指数为2.51~5.56,比我国其他地区高,如温带的辽河(1.6~2.66)^[11]。华南地区经济发展快速,人类活动强烈,生物多样性受到不同程度的威胁^[12]。

本文以我国典型热带河流——广东省鉴江水系为对象,调查不同等级河流的底栖硅藻群落,分析种类多样性的分布,比较同一等级河流底栖硅藻群落的相异性,为基于硅藻的生物监测工作提供硅藻名录,为鉴江水系健康监测方案制定和水生态保护与目标管理提供依据。

1 材料和方法

1.1 河流概况

鉴江是广东省西南部的一条独流入海河流,为

粤西沿海最大的河流,发源于广东省信宜市虎豹坑,由北向南流经信宜、高州、化州、电白、茂名市区及湛江吴川等地,注入南海。河长232 km,流域面积为9464 km²(其中广西境内面积745 km²),主要的支流有罗江、袂花江和小东江等。流域年降雨量为1500~2600 mm,年均1885 mm,由西南向东北递增,4~9月为汛期,占全年降雨的80%以上。

在底栖硅藻采样的同期,广东水文局在鉴江水系设置了14个采样点(覆盖鉴江干流及平定水、罗江、袂花江和小东江等支流),逐月采样并测定理化指标。结果表明,从上游到下游,总磷、高锰酸盐指数、五日生化需氧量、氯化物和硝酸盐氮呈上升趋势,其中小东江的各理化指标均较高。

1.2 采样点设置和采样时间

于2012年12月和2013年3、8及11月对鉴江底栖硅藻进行4次采样,共设置19个采样点(表1,图1),采集了75个样品(2012年12月未采集高田垌),采样点位置使用GPS定位。按照河流等级划分标准将鉴江水系分为一级到四级河流共4个等级^[13],分别设置采样点4、9、2和4个。

1.3 样品采集和处理

底栖硅藻样品的采集参考刘静等^[10]的方法。采样时尽可能选择相似基质(如石头),用牙刷刷取基质上方的底栖硅藻,并将样品装入带刻度的100 mL小白瓶中,按4%的比例加入福尔马林现场固定。带回实验室后,取一定量底栖硅藻样品用浓硝酸(66%~68%)在130℃下氧化处理1 h,加水反复清洗至中性后用封片胶(Naphrax, 折射率为1.703)封片做成永久玻片。

使用最终放大1000×的具有相差(DIC)功能的光学显微镜在油镜下进行鉴定并统计硅壳数量,每个玻片硅藻计数400个^[14]。硅藻鉴定参考《珠江水系东江流域底栖硅藻图集》和美国Patrick环境研究中心提供的图片^[15]。

1.4 数据处理

多样性 与香农多样性指数(Shannon-Wiener diversity index, H')相比,真香农多样性指数(True Shannon-Wiener diversity index, H_T)在保留了多样性

表1 鉴江水系采样点信息

采样点 Site	经度 Longitude (E)	纬度 Latitude (N)	等级 Class	环境状况 Environment state
池垌 Chidong	110°56.756'	22°25.976'	1	村镇, 菜市场排污
潭头 Tangtou	110°52.073'	22°09.826'	2	砂质, 牧垦
红荔桥 Hongli Bridge	110°49.740'	21°54.836'	2	生活污染, 水葫芦
荷花 Hehua	110°42.201'	22°15.585'	1	生活垃圾, 砖厂
宝圩 Baoxu	110°40.200'	22°09.935'	2	生活污染
高田垌 Gaotiangong	110°33.625'	21°58.126'	2	大桥下, 挖沙
沙垌 Shadong	110°26.235'	22°10.854'	2	挖沙、牧垦
平定水 Pingding River	110°25.181'	22°01.412'	2	生活污染、建筑施工
塘坑 Tankeng	110°29.127'	21°58.612'	2	砂质
合江 Hejiang	110°34.093'	21°54.050'	3	挖沙、牧垦
林尘 Linchen	110°33.857'	21°50.253'	3	坝下、生活污水
罗江 Loujiang	110°36.622'	21°39.626'	4	铁路, 生活污染
南安 Nanan	110°39.660'	21°31.403'	4	轮渡、挖沙
霞洞 Xiadong	111°06.964'	21°43.063'	1	挖沙, 养猪场
袂花江 Meihua River	110°55.078'	21°35.009'	1	相对清洁、水产养殖
官渡桥 Guandu Bridge	110°54.334'	21°40.632'	2	受上游水量调度影响
石碧 Shibi	110°49.252'	21°33.771'	2	轮渡, 牧垦
水口渡 Shuikoudu	110°45.508'	21°25.351'	4	人工堤岸
吴阳 Wuyang	110°40.321'	21°23.254'	4	坝下、入海口

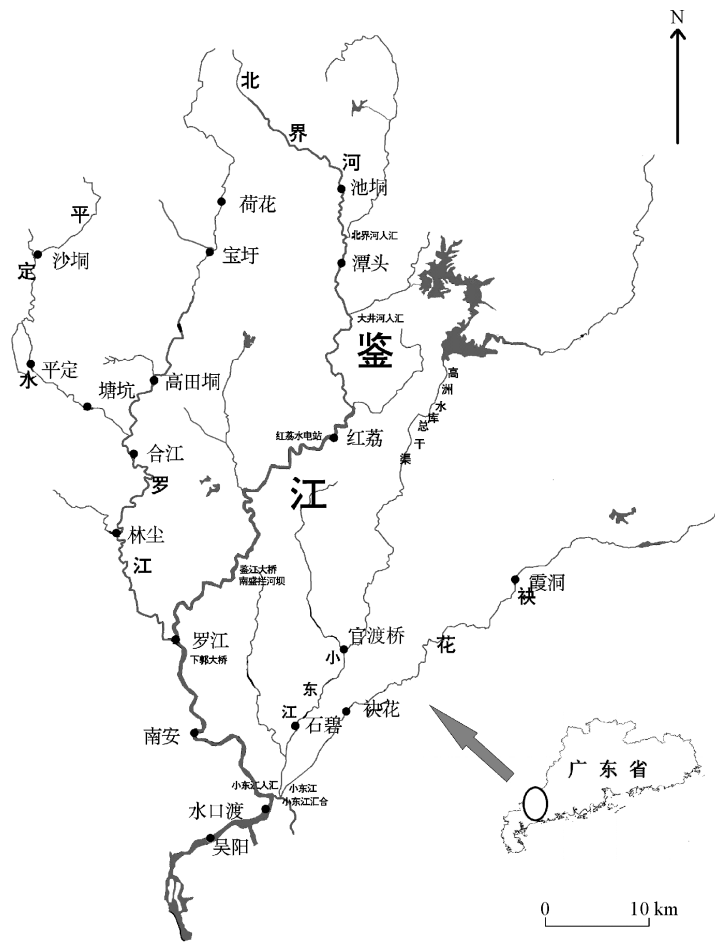


图1 鉴江水系采样点分布

Fig. 1 Distribution of sampling sites in Jianjiang River, Guangdong Province

信息的同时,也保留了总种类数信息^[16]。真香农多样性指数值为香农多样性指数的指数值,公式为:

$$H = -\sum_{i=1}^S (n_i / N) \log_2 (n_i / N), H_T = 2^H$$

与辛普森指数(Simpson diversity index, D_{Simp})相比,真辛普森多样性指数(True Simpson diversity index, D_{TSimp})更具有可比性,其值为辛普森指数的倒数^[16],公式为:

$$D = \sum_{i=1}^S P_i^2, \text{ 其中 } P_i = n_i(n_i - 1) / N(N - 1),$$

$$D_{\text{Simp}} = 1 - D; D_{\text{TSimp}} = 1 / D$$

式中, S 为硅藻总种数, N 为底栖硅藻总个体数, n_i 为样品中第 i 种的个体数。

稀疏曲线 是对群落多样性的一种定量化描述,提供了生物种类累积随样品计数量增加的变化情况。种类丰富度是群落生态学的基础信息^[17],由于通常无法对样本中所有个体进行调查,样本的种类丰富度只是估计,估计值的可靠性依赖于样本的大小与代表性。稀疏曲线可以判断计数量是否充分,能否有效反映生物种类在样本中的存在情况,提供了不同样本量下的群落特点^[18]。对每个底栖硅藻样品数据,利用R vegan程序包中的specaccum函数对底栖硅藻群落进行稀疏分析,产生生物种类稀疏曲线,得到样品底栖硅藻计数量与丰富度的对应关系。

群落相异性 同一等级河段不同采样点的底栖硅藻群落相异度反映了群落的变化程度,采用Bray-Curtis距离来计算,其值越高群落的变化程度越大, β 多样性越高。计算公式为:

$$BC_{jk} = \sum_{i=1}^M |n_{ij} - n_{ik}| / \sum_{i=1}^M (n_{ij} + n_{ik})$$

其中, M 为鉴江水系的硅藻总种数; n_{ij} 为第 j 个采样点第 i 种的个体数; n_{ik} 为第 k 采样点第 i 种的个体数。

利用基于Bray-Curtis距离的多元方差分析(PERMANOVA)来分析底栖硅藻群落的季节变化和空间变化^[19]。多元方差分析将反应变量的变异分解成组间变异和组内变异,比较组间协方差矩阵与组内协方差矩阵。

多样性指数和群落相异性的计算、稀疏曲线和多元方差分析,均在R platform V 3.1.1中完成,涉

及的程序包有vegan、fpc和MASS; 方差分析在SPSS 13.0中完成; 作图在R platform V 3.1.1和Origin 8中完成。

2 结果和分析

2.1 底栖硅藻的种类组成与相对丰度

从4次采样的75个样品中共检出底栖硅藻10科52属242种。2012年12月采样的底栖硅藻平均有40种,最少的为24种(林尘),最高的为65种(宝圩); 2013年3月采样的平均有35种,最低的为24种(罗江),最高的为64种(南安); 2013年8月采样的平均有38种,最低的为21种(池垌),最高的为60种(合江); 2013年11月采样的平均有34种,最低的为15种(水口渡),最高为47种(潭头)。

2013年3月和11月采样的底栖硅藻总种数略低于2012年12月和2013年8月; 属数变化不明显, 2013年8月(49属)略高于其他3次采样; 总科数除2013年3月检出10科外, 其他3次采样均为9科(图2)。

从表2可见, 舟形藻属(*Navicula*)、菱形藻属(*Nitzschia*)、异极藻属(*Gomphonema*)和麦尔藻属(*Mayamaea*)的时空分布最广, 且常以优势属存在。微小舟形藻(*Navicula minima*)、谷皮菱形藻(*Nitzschia palea*)、原子麦尔藻(*Mayamaea atomus*)、频繁平丝藻(*Planothidium frequentissimum*)、微小异极藻(*Gomphonema parvulum*)和越桔泥生藻(*Luticola goeppertiana*)是常见且相对丰度较高的种类。偶见种有头状蹄形藻(*Hippodonta capitata*)、丝状等带藻(*Diademes confervacea*)、链状曲丝藻(*Achnanthes catenatum*)、窄双菱藻(*Surirella angusta*)和匈牙利雷曼尼卡藻(*Lemnicula hungarica*)等(图3)。

越桔泥生藻: 细胞长10~65 μm , 宽6~15 μm ; 壳面披针形, 两端钝圆形; 具一个较大的眼点, 10 μm 内有线性纹18~24条。谷皮菱形藻: 细胞长15~70 μm , 宽3.5~5.5 μm ; 壳缝位于龙骨中, 壳面线纹密度高, 光镜下不可见, 10 μm 内有线性纹28~40条。短喙舟形藻(*Navicula rostellata*): 细胞长34~50 μm , 宽8~10 μm ; 壳面线性披针形到椭圆披针形, 两端较窄, 明显延长呈喙状或亚喙状; 中央区大, 圆形到矩形; 10 μm 内有线性纹11~15条。微小异极藻: 细胞沿顶轴

对称, 沿横轴不对称; 长10~36 μm , 宽4~8 μm ; 中央区具眼点, 位于线纹末端; 线纹在中间平行或略呈辐射状, 两端呈明显辐射状, 10 μm 内7~20条。短小曲丝藻(*Achnantheidium exiguum*): 细胞长5~17 μm , 宽4.5~6 μm ; 壳缝面中央区具带状结构, 在一侧略宽, 壳缝直; 无壳缝面中央区较小, 横向矩形; 中间10 μm 内24~34条, 两端达40~45条。头状蹄形藻: 长12~28 μm , 宽5~8.5 μm ; 壳面椭圆披针形, 两端呈头状到亚头状; 中央区小, 壳缝直; 线纹双

列由纵向延长的点孔组成, 10 μm 内8~11条。黄埔水生藻: 细胞个体大, 壳面像两个三角形重叠在一起形成的六角形, 三角形各边长50~90 μm 。匈牙利雷曼尼卡藻: 细胞长6~45 μm , 宽4~8 μm ; 壳缝面中央区具加厚的十字结构, 延伸至壳面边缘, 无壳缝面中央十字结构减少或没有, 线纹几乎平行, 10 μm 内有线纹16~23条。窄双菱藻: 长15.5~60 μm , 宽6.5~12 μm ; 小个体呈椭圆形, 大个体壳面两侧直且平行; 线纹位于肋纹之间, 10 μm 内有线纹23~28条。

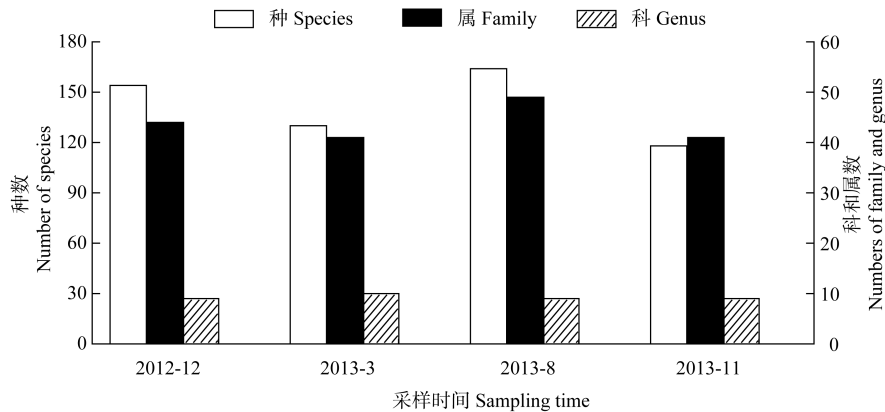


图2 底栖硅藻的科、属和种分布

Fig. 2 Number of family, genus and species of benthic diatom

表2 鉴江水系底栖硅藻常见种及其频次

种类 Species	采样时间 Sampling time			
	2012.12	2013.3	2013.8	2013.11
原子麦尔藻 <i>Mayamaea atomus</i> (Kützing) Lange-Bertalot	18	19	18	18
微小舟形藻 <i>Navicula minima</i> Grunow	14	19	19	19
谷皮菱形藻 <i>Nitzschia palea</i> (Kützing) Smith	17	18	19	18
微小异极藻 <i>Gomphonema parvulum</i> (Kützing) Kützing	18	16	17	17
短喙舟形藻 <i>Navicula rostellata</i> Kützing	16	17	16	17
频繁平丝藻 <i>Planothidium frequentissimum</i> (Lange-Bertalot) Lange-Bertalot	17	18	15	16
瞳孔鞍形藻 <i>Sellaphora pupula</i> (Kützing) Mereschkowsky	15	14	18	15
近小头羽纹藻 <i>Pinnularia subcapitata</i> Gregory	14	14	18	16
合缝舟形藻 <i>Navicula notha</i> Wallace	15	14	14	17
小舟形藻 <i>Navicula subminuscule</i> Manguin	15	16	16	14
越桔泥生藻 <i>Luticola goeppertiana</i> (Bleisch) Mann	15	17	12	15
粗糙菱形藻 <i>Nitzschia paleacea</i> Grunow	14	18	16	7
隐细舟形藻 <i>Navicula cryptotenella</i> Kützing	15	14	12	14
隐生菱形藻 <i>Nitzschia inconspicua</i> Grunow	13	13	15	15
肘状针杆藻 <i>Synedra ulna</i> (Nitzsch) Ehrenberg	11	12	13	14
小内丝藻 <i>Encyonema minutum</i> (Hilse) Mann	12	14	10	11
类胆舟形藻 <i>Navicula parabilis</i> Hohn et Hellerman	16	15	8	9
边缘异极藻 <i>Gomphonema affine</i> Kützing	13	11	11	10
短小曲丝藻 <i>Achnantheidium exiguum</i> (Grunow) Czarnecki	10	13	12	10
山地海双眉藻 <i>Halamphora montana</i> (Krasske) Levkov	9	12	14	10
对称舟形藻 <i>Navicula symmetrica</i> Patrick	12	8	9	16
壶形异极藻 <i>Gomphonema lagenula</i> Kützing	10	16	9	7
安东尼舟形藻 <i>Navicula antonii</i> Lange-Bertalot	11	9	8	16
克拉斯特微肋藻 <i>Microcostatus krasskei</i> (Hustedt) Johansen et Sray	6	9	14	9

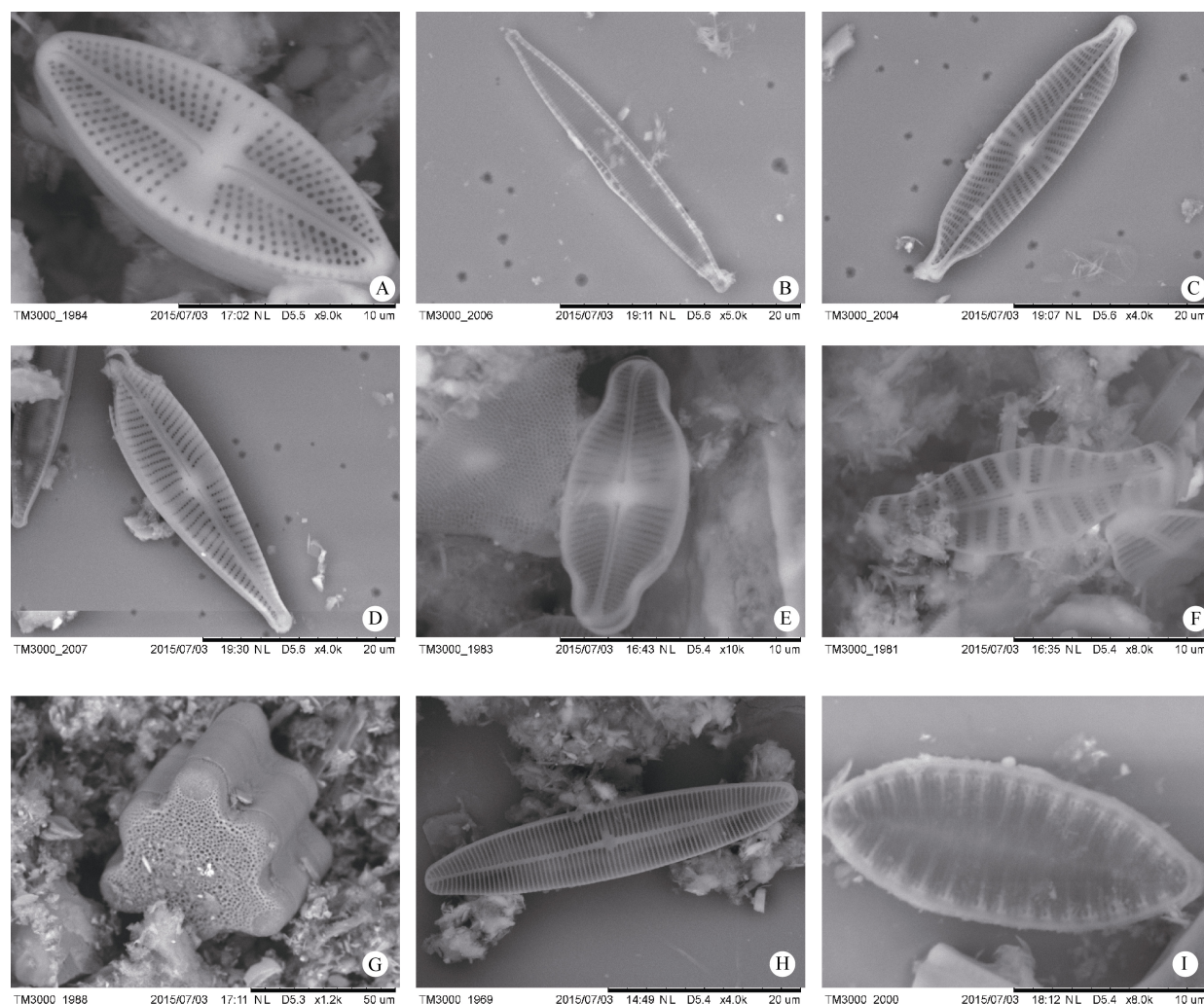


图3 底栖硅藻。A: 越桔泥生藻; B: 谷皮菱形藻; C: 短喙舟形藻; D: 微小异极藻; E: 短小曲丝藻; F: 头状蹄形藻; G: 黄埔水生藻; H: 匈牙利雷曼尼卡藻; I: 窄双菱藻。

Fig. 3 Benthic diatom in Jianjiang River. A: *Luticola goeppertiana*; B: *Nitzschia palea*; C: *Navicula rostellata*; D: *Gomphonema parvulum*; E: *Achnanthidium exiguum*; F: *Hippodonta capitata*; G: *Hydrosera whampoensis*; H: *Lemnicula hungarica*; I: *Surirella angusta*.

2.2 底栖硅藻多样性

4次采样底栖硅藻的种类丰富度、真香农多样性指数和真辛普森多样性指数均随河流等级的升高呈先上升后下降的变化趋势(图4)。

2012年12月底栖硅藻的种类丰富度从一级河流到二级河流升高,随后下降,四级河流的较高;2013年8月的从一级河流到三级河流逐级上升,四级河流的略有下降;2013年3月和11月各级河流的种类丰富度差异不大(图4: A)。底栖硅藻的真香农多样性指数和真辛普森多样性指数的变化特征相似。2012年12月底栖硅藻的真香农多样性指数和真辛普森多样性指数在二级河流达到最大,随后下降,

但四级河流又有所上升;2013年3月一至三级河流的真香农多样性指数和真辛普森多样性指数基本一致,略高于四级河流;2013年8月和11月的真香农多样性指数和真辛普森多样性指数从一至三级河流上升,四级河流下降(图4: B, C)。方差分析表明,丰富度、真香农多样性指数和真辛普森多样性指数季节变化均不显著(表3)。

2.3 底栖硅藻群落的相异性

底栖硅藻群落的相异性随河流等级的升高呈递减趋势,但四级河段有所回升(除2012年12月外)。底栖硅藻群落相异性以2013年11月的四级河流最

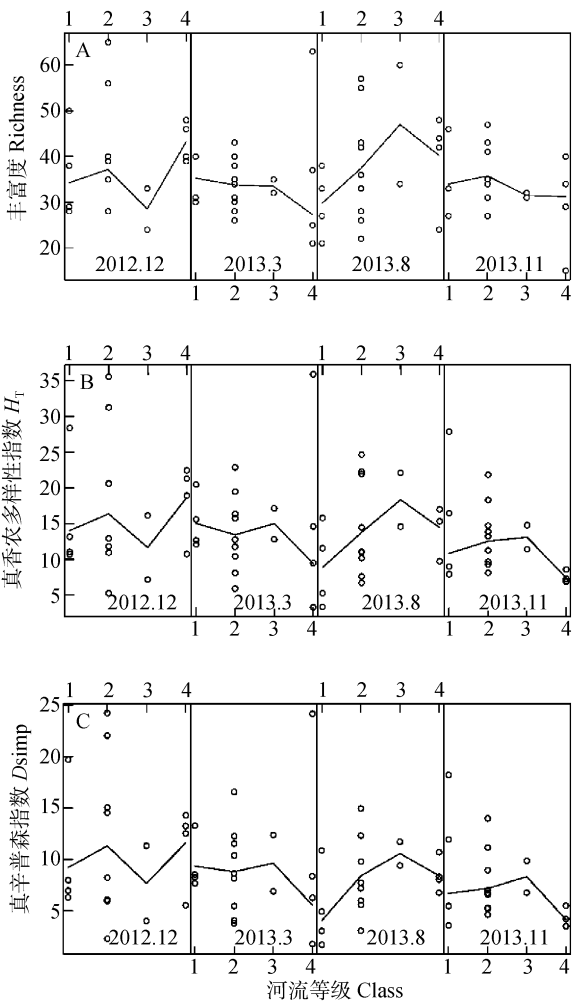


图4 底栖硅藻种类多样性的分布。A: 丰富度; B: 真香农多样性指数; C: 真辛普森多样性指数。
Fig. 4 Diversity distribution of benthic diatom. A: Richness; B: H_T ; C: D_{Simp} .

高, 为 0.61, 同期的三级河流最低, 为 0.42 (图 5)。
多元方差分析结果表明, 鉴江水系底栖硅藻群落的空间变化显著, 季节变化极显著(表4)。越桔泥生藻、微小舟形藻、谷皮菱形藻、原子麦尔藻、频繁平丝藻

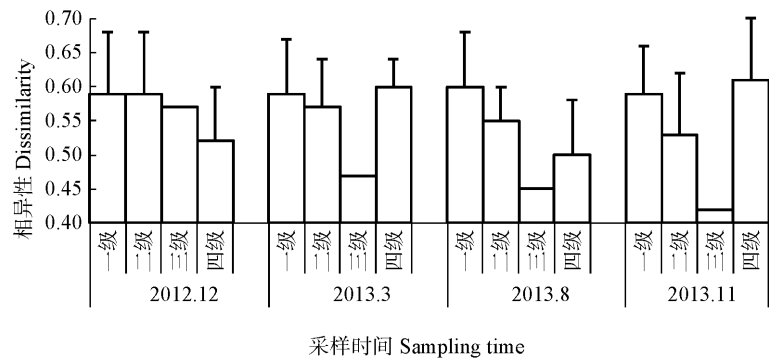


图5 不同等级河流的底栖硅藻群落相异性
Fig. 5 Dissimilarity of benthic diatom communities in different river classes

表3 底栖硅藻多样性指数方差分析

Table 3 ANOVA for diversities of benthic diatoms in Jianjiang River				
	df_1	df_2	F	P
丰富度 Richness	3	71	1.318	0.275
真香农多样性指数 H_T	3	71	1.539	0.212
真辛普森多样性指数 D_{TSimp}	3	71	1.946	0.130

df_1 : 采样时间的自由度; df_2 : 误差的自由度。
 df_1 : Degree freedom for sampling time; df_2 : Degree freedom for error.

和山地海双眉藻等9种底栖硅藻对群落时空变化贡献较高。每个组别中, 前5种底栖硅藻的贡献度为0.340~0.391 (表5)。

2.4 稀疏曲线

从稀疏曲线(图6)来看, 2012年12月和2013年8月所有样品的种数随个体数增加而增加的速度仍较快; 2013年3月除南安样品的种数随个体数增加而增加的速度较快, 其他的均趋于渐近线; 2013年11月除水口渡的趋于渐近线外, 其他样品的种数增加速度均较快。

同一次样品的稀疏曲线存在较为明显的分组, 且同一分组内种类增加速度并不一致; 同一采样时间, 物种多样性较高的采样点, 其种数随个体数增加而增加的速度较快。2012年12月宝圩和吴阳等5个采样点的种数随个体数增加而增加的速度要比石碧和林尘拦河坝等的快; 2013年8月种数随个体数增加而增加的速度随采样点丰富度呈较明显的4个分区, 按照增加的速度依次为合江水文站、吴阳、石碧和沙垌(分别为4个分区的代表位点); 2013年3月和2013年11月虽然丰富度都集中在25~40, 但2013年11月各采样点的种数随个体数增加而增加

表4 底栖硅藻群落结构二因素多元方差分析

Table 4 Two-Way PERMANOVA for benthic diatoms structure						
	自由度 df	均方 Mean square	伪 F 值 Pseudo-F	R^2	P	
河流等级 Class	3	0.346	1.406	0.055	0.045*	
采样时间 Time	3	0.456	1.853	0.072	0.001**	
河流等级×采样时间 Class×Time	9	0.234	0.949	0.110	0.634	
残差 Residual	59	0.246		0.763		
总计 Total	74			1.000		

表5 对群落相异性贡献较高的底栖硅藻种类

对比组别 Group		种类/贡献率 Species/contribution					总和 Total
12 月:3 月 Dec.:Mar.	sp117/0.103	sp144/0.093	sp181/0.052	sp126/0.049	sp208/0.044		0.341
12 月: 8 月 Dec.:Aug.	sp144/0.135	sp181/0.077	sp126/0.060	sp182/0.049	sp155/0.043		0.363
12 月: 11 月 Dec.:Nov.	sp144/0.097	sp117/0.073	sp181/0.064	sp88/0.055	sp208/0.051		0.340
3 月:8 月 Mar.:Aug.	sp144/0.105	sp117/0.100	sp181/0.071	sp126/0.062	sp107/0.053		0.391
3 月:11 月 Mar.:Nov.	sp117/0.115	sp144/0.075	sp208/0.057	sp181/0.056	sp88/0.053		0.357
8 月:11 月 Aug.:Nov.	sp144/0.113	sp181/0.078	sp117/0.065	sp126/0.056	sp88/0.054		0.366
一级 : 二级 First:Second	sp144/0.123	sp181/0.078	sp117/0.073	sp126/0.052	sp107/0.038		0.364
一级 : 三级 First:Third	sp144/0.123	sp117/0.078	sp208/0.062	sp181/0.061	sp126/0.049		0.374
一级 : 四级 First:Fourth	sp144/0.106	sp117/0.092	sp88/0.066	sp126/0.064	sp181/0.059		0.387
二级 : 三级 Second:Third	sp144/0.100	sp117/0.073	sp208/0.071	sp181/0.062	sp126/0.047		0.353
二级 : 四级 Second:Fourth	sp117/0.090	sp144/0.081	sp88/0.069	sp181/0.060	sp107/0.057		0.357
三级 : 四级 Third:Fourth	sp117/0.092	sp144/0.082	sp88/0.077	sp208/0.072	sp126/0.061		0.385

sp88: 微小异极藻; sp107: 山地海双眉藻; sp117: 越桔泥生藻; sp126: 原子麦尔藻; sp144: 微小舟形藻; sp155: 小舟形藻; sp181: 谷皮菱形藻; sp182: 粗糙菱形藻; sp208: 频繁平丝藻。

sp88: *Gomphonema parvulum*; sp107: *Halamphora montana*; sp117: *Luticola goeppertiana*; sp126: *Mayamaea atomus*; sp144: *Navicula minima*; sp155: *Navicula subminuscula*; sp181: *Nitzschia palea*; sp182: *Nitzschia paleacea*; sp208: *Planothidium frequentissimum*。

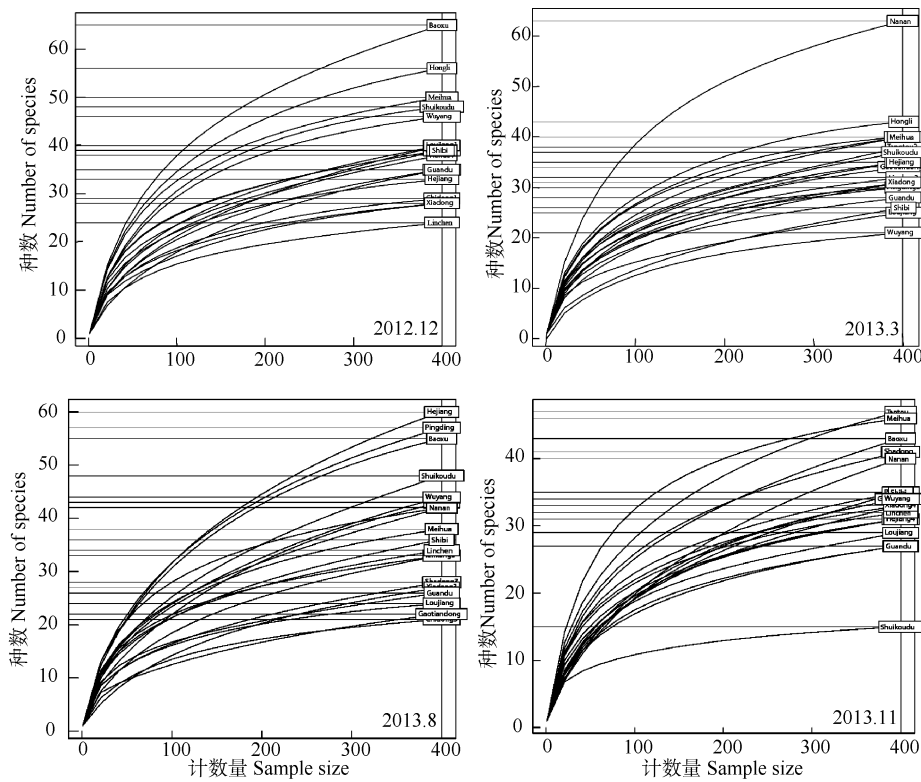


图6 4次采样各采样点稀疏曲线

Fig. 6 Rarefaction curves of benthic diatoms in different sites at four sampling times

的速度明显快于2013年3月。

此外,稀疏曲线中会出现一些偏高或偏低的离群点,如2012年12月的宝圩和红荔桥、2013年3月的南安和2013年11月的水口渡等。

3 讨论

3.1 底栖硅藻的种类组成

鉴江水系中舟形藻属、菱形藻属和异极藻属是最重要的优势类群,这与刘静等^[10]和何琦等^[20]对华南地区的东江及其支流增江的研究结果相似。鉴江水系地处热带北缘,充沛的降雨和强烈的人类活动使河流底栖硅藻受到较强程度的干扰,这使得耐干扰的舟形藻属和异极藻属及耐污的菱形藻属容易生存且占据优势。曲丝藻属(*Achnanthes*)多生活在营养盐低、污染较小的水体^[3],刘静等^[10]和何琦等^[20]报道在河床斜率高、流速快、营养盐水平低的河流源头地区曲丝藻属分布较广。本研究中,上游采样点如池垌和荷花等,均能检出曲丝藻属,主要是短小曲丝藻(*A. exiguum*)和溪生曲丝藻(*A. rivulare*),但相对丰度不高。这可能是选取的上游采样点距源头山区较远有关,已受到较强人类活动影响,如荷花采样点即位于荷花镇附近。

鉴江水系偶见种有头状蹄形藻、丝状等带藻、黄埔水生藻和匈牙利雷曼尼卡藻等。一些在东江水系常见的种类^[15],如链状曲丝藻和窄双菱藻在本研究中检出频次较低,这可能是采样不足或未采集到特定区域(如上游山区)引起的。

3.2 底栖硅藻多样性的空间分布和季节变化

对鉴江水系不同等级河流的底栖硅藻进行4次采样,其种类丰富度、真香农多样性指数和真辛普森多样性指数均呈现先上升后下降的趋势,这种分布趋势与河流连续体概念所支持的理论分布是一致的。河流连续体理论认为河流从源头到下游物理环境及对应的生物群落组成是纵向梯度变化的,将河流的概念化为环境梯度变化及生物群落相适应的整体^[21]。受“中度干扰假说”的影响^[22],生物种数在上游和下游河段较低,在中游较高。对底栖藻类而言,营养盐浓度低,会限制藻类的生长;营养盐浓度高,则会抑制藻类的生长,容易产生毒害作用^[23]。在河流这个连续体中,上游河段营养盐浓度较低,导致能够生存的生物种类较少;下游河段物理因素的

干扰程度较高,导致适应的生物种类较少;而位于连续体中间的部分,其营养盐浓度和干扰强度适中,生物种类的多样性达到最高^[21]。

本研究的底栖硅藻种类多样性的季节变化不明显。鉴江水系地处热带北缘,季节性变化不明显,但存在明显的丰水期和枯水期。但该河流上水库的蓄放水调节作用及梯级大坝的拦截缓冲作用可能减弱降雨季节变化对河流径流量的影响。同时,剧烈的人类活动(如耕种等)也可能减弱河流区域环境的时间异质性。然而,各等级河流采样点分别为4、9、2和4个,这种采样点的不均匀性也对结果造成影响。

3.3 底栖硅藻群落的相异性

鉴江水系河流等级内不同采样点的底栖硅藻群落相异性,上游与下游河段的相异性较高。河流底栖硅藻群落通常被认为是主要由采样点的生境状况(即环境因子)控制^[24],而Mann等认为有相当比例的硅藻实际上是一些地方独有的,或者至少存在区域性分布特征^[25];同时,当不同支流之间的连通性较弱时,也会导致相异性较高^[10],这可能是导致一级河流底栖硅藻群落相异性较高的原因。随着河流等级的增加,河流受人类活动的影响增强,导致生境同质化;等级高的河流连通性较好,这可能使得底栖硅藻群落相异性降低。四级河流的水口渡和吴阳处于河流入海口附近,咸淡水交汇使得他们的生境与罗江和南安相差较大,这可能是导致四级河流底栖硅藻群落相异性较高的原因。

多元方差分析(PERMANOVA)结果表明,鉴江水系底栖硅藻群落结构空间变化显著($P=0.045$),季节变化极显著($P=0.001$)。对底栖硅藻群落相异贡献较高的种类主要由常见种组成,表明常见种相对丰度的差异性底栖硅藻群落结构时空分布存在显著差异的主要原因。

3.4 计数量对种类丰富度观测的影响

当稀疏曲线趋于渐近线时,说明底栖硅藻种数随样品计数量增加而增加的趋势不明显,而种数增加速度仍较快,表明样品计数量不充分。4次采样中,底栖硅藻种类数随样品计数量增加而增加的速度大小排序依次为:2013年8月、2013年11月、2012年12月和2013年3月。这表明,在底栖硅藻样品以400个体计数的情况下,2013年8、11月和2012年12月

3次采样不能很完整反映样品中所含有的底栖硅藻丰富度,而2013年3月样品的计数量相对比较充分。

底栖硅藻样品的通常计数量为400~600,当计数量太少时,很多种类不能被观察到;计数太多,会增加工作量,种数增加已不明显^[10]。现通常采用400左右的样品计数量^[26-29]。然而,生物种类多样性纬度梯度分布格局认为地球上生物的分布是不均匀的,从热带到寒带,随着纬度的升高,生物多样性呈逐渐减小的趋势^[30]。热带地区生物种类多样性高,使得能有效反映样品中底栖硅藻生物种类丰富度所需的计数量将更大,这可能是本文样品计数量不足的原因。

稀疏曲线体现的分组情况也表明,丰富度较高的采样点,底栖硅藻种数随个体数增加而增加的速度较快,因此需要更大的计数量才能抽样充分。通过稀疏曲线,能比较丰富度相近情况下采样点的多样性。如2013年11月袂花江和潭头两个采样点的丰富度相近,但潭头底栖硅藻种数增加的速度明显快于袂花江,据此可判断潭头的底栖硅藻多样性要高于袂花江。离群的采样点可能是受到剧烈的环境干扰影响,如污水排放、底质破坏种群重建等,使得多样性较高或较低。综上所述,在种类多样性较高的热带河流,需要增加计数以便更准确地获得多样性的信息,具体的计数量还有待进一步研究。

参考文献

- [1] STEVENSON R J, BOTHWELL M L, LOWE R L. Algal Ecology: Freshwater Benthic Ecosystem [M]. San Diego: Academic Press, 1996: 705-739.
- [2] BELLINGER B J, COCQUYT C, O'REILLY C M. Benthic diatoms as indicators of eutrophication in tropical Streams [J]. Hydrobiologia, 2006, 573(1): 75-87. doi: 10.1007/s10750-006-0262-5.
- [3] van DAM H, MERTENS A, SINKELDAM J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands [J]. Netherland J Aquat Ecol, 1994, 28(1): 117-133. doi: 10.1007/BF02334251.
- [4] ECTOR L, HLÚBIKOVÁ D, HOFFMANN L. Preface: Use of algae for monitoring rivers [J]. Hydrobiologia, 2012, 695(1): 1-5. doi: 10.1007/s10750-012-1204-z.
- [5] WHITTON B A. Changing approaches to monitoring during the period of the 'Use of Algae for Monitoring Rivers' symposia [J]. Hydrobiologia, 2012, 695(1): 7-16. doi: 10.1007/s10750-012-1121-1.
- [6] SOININEN J. Environmental and spatial control of freshwater diatoms: A review [J]. Diatom Res, 2007, 22(2): 473-490. doi: 10.1080/0269249X.2007.9705724.
- [7] GILLER P S, MALMQVIST B. The Biology of Streams and Rivers [M]. Oxford: Oxford University Press, 2006: 193-211.
- [8] LEIRA M, SABATER S. Diatom assemblages distribution in Catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors [J]. Water Res, 2005, 39(1): 73-82. doi: 10.1016/j.watres.2004.08.034.
- [9] LIU J, SOININEN J, HAN B P, et al. Effects of connectivity, dispersal directionality and functional traits on the metacommunity structure of river benthic diatoms [J]. J Biogeogr, 2013, 40(12): 2238-2248. doi: 10.1111/jbi.12160.
- [10] LIU J, LIN Q Q, DENG P Y, et al. Benthic Diatom Community and Biomonitoring in Dong River [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2014: 16-39.
- 刘静, 林秋奇, 邓培雁, 等. 东江水系底栖硅藻群落与生物监测 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2014: 16-39.
- [11] LI G C, WANG X, LIU L S, et al. Bioassessment of water quality based on diatom index of biotic integrity in the upstream of Liaoh River [J]. Res Environ Sci, 2012, 25(8): 852-858.
- 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.
- [12] LUO S M. Ecological thinking on the construction of 'Green Guangdong' [J]. Guangdong Econ, 2005(10): 22-25. doi: 10.3969/j.issn.1005-0759.2005.10.005.
- 骆世明. 关于构建“绿色广东”的生态学思考 [J]. 广东经济, 2005(10): 22-25. doi: 10.3969/j.issn.1005-0759.2005.10.005.
- [13] STRAHLER A N. Quantitative analysis of watershed geomorphology [J]. Eos Transact AGU, 1957, 38(6): 913-920. doi: 10.1029/TR038i006p00913.
- [14] CHEN X, LIU J, HE Q, et al. Seasonal variations of periphytic diatom community in artificial substrata in Huizhou section of the Dongjiang River, Guangdong Province, southern China [J]. J Lake Sci, 2012, 24(5): 723-731. doi: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.05.013.
- 陈向, 刘静, 何琦, 等. 东江惠州河段人工基质附着硅藻群落的季节性动态 [J]. 湖泊科学, 2012, 24(5): 723-731. doi: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.05.013.
- [15] LIU J, WEI G F, HU R, et al. Benthic Diatom Atlas of Dongjiang River Watershed in Pearl River System [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013: 1-108.
- 刘静, 韦桂峰, 胡韧, 等. 珠江水系东江流域底栖硅藻图集 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2013: 1-108.
- [16] JOST L. Partitioning diversity into independent alpha and beta components [J]. Ecology, 2007, 88(10): 2427-2439. doi: 10.1890/06-1736.1.
- [17] MAGURRAN A E, MCGILL B J. Biological Diversity: Frontiers in Measurement and Assessment [M]. Oxford: Oxford University Press, 2011: 39-54.

- [18] LI Q. Species accumulation curves and its application [J]. *Chin J Appl Entomol*, 2012, 48(6): 1882–1888.
李巧. 物种累积曲线及其应用 [J]. *应用昆虫学报*, 2012, 48(6): 1882–1888.
- [19] ANDERSON M J. A new method for non-parametric multivariate analysis of variance [J]. *Aust Ecol*, 2001, 26(1): 32–46. doi: 10.1111/j.1442-9993.2001.01070.pp.x.
- [20] HE Q, WEI G F, LIU J, et al. Species diversity and spatial distribution of benthic diatom in Zeng River, Guangdong Province, southern China [J]. *J Trop Subtrop Bot*, 2011, 19(3): 245–253. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.009.
何琦, 韦桂峰, 刘静, 等. 增江底栖硅藻种类多样性及分布特征 [J]. *热带亚热带植物学报*, 2011, 19(3): 245–253. doi: 10.3969/j.issn.1005-3395.2011.03.009.
- [21] VANNOTE R L, MINSHALL G W, CUMMINS K W, et al. The river continuum concept [J]. *Can J Fish Aquat Sci*, 1980, 37(1): 130–137. doi: 10.1139/f80-017.
- [22] CONNELL J H. Diversity in tropical rain forests and coral reefs [J]. *Science*, 1978, 199(4335): 1302–1310. doi: 10.1126/science.199.4335.1302.
- [23] BEARDALL J, YOUNG E, ROBERTS S. Approaches for determining phytoplankton nutrient limitation [J]. *Aquat Sci*, 2001, 63(1): 44–69. doi: 10.1007/PL00001344.
- [24] LELAND H V, BROWN L R, MUELLER D K. Distribution of algae in the San Joaquin River, California, in relation to nutrient supply, salinity and other environmental factors [J]. *Freshwat Biol*, 2001, 46(9): 1139–1167. doi: 10.1046/j.1365-2427.2001.00740.x.
- [25] MANN D G, DROOP S J M. Biodiversity, biogeography and conservation of diatoms [J]. *Hydrobiologia*, 1996, 336(1/2/3): 19–32. doi: 10.1007/BF00010816.
- [26] SHINNEMAN A L C, EDLUND M B, ALMENDINGER J E, et al. Diatoms as indicators of water quality in western Mongolian Lakes: A 54-site calibration set [J]. *J Paleolimnol*, 2009, 42(3): 373–389. doi: 10.1007/s10933-008-9282-7.
- [27] KITNER M, POULÍCKOVÁ A. Littoral diatoms as indicators for the eutrophication of shallow lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2003, 506(1/2/3): 519–524. doi: 10.1023/B:HYDR.0000008567.99066.92.
- [28] GUO Y. Research quantitatively on relationship between benthic diatoms and water environmental factors in middle and upper of Wujiang River [D]. Guiyang: Guizhou Normal University, 2008: 20–22.
郭云. 乌江中上游底栖硅藻与水环境因子关系定量研究 [D]. 贵阳: 贵州师范大学, 2008: 20–22.
- [29] LI Z Q, YUAN G, HAO X W, et al. Diatom-based biomonitoring method of water quality in Baisha River, a tributary of Jinhua River, Zhejiang Province [J]. *J Lake Sci*, 2012, 24(3): 436–442. doi: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.03.016.
李钟群, 袁刚, 郝晓伟, 等. 浙江金华江支流白沙溪水质硅藻生物监测方法 [J]. *湖泊科学*, 2012, 24(3): 436–442. doi: 10.3969/j.issn.1003-5427.2012.03.016.
- [30] PIMM S L, BROWN J H. Domains of diversity [J]. *Science*, 2004, 304(5672): 831–833. doi: 10.1126/science.1095332.