

ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

生态学报

Acta Ecologica Sinica



第32卷 第16期 Vol.32 No.16 **2012**

中国生态学会
中国科学院生态环境研究中心
科学出版社

主办
出版



中国科学院科学出版基金资助出版

生态学报

(SHENGTAI XUEBAO)

第 32 卷 第 16 期 2012 年 8 月 (半月刊)

目 次

基于生物多样性保护的兴安落叶松与白桦最佳混交比例——以阿尔山林区为例·····	李 菁, 骆有庆, 石 娟 (4943)
中国能源消费碳排放的时空特征·····	舒娱琴 (4950)
黄土丘陵沟壑区坡面尺度土壤水分空间变异及影响因素·····	姚雪玲, 傅伯杰, 吕一河 (4961)
新疆艾比湖流域土壤有机质的空间分布特征及其影响因素·····	王合玲, 张辉国, 秦 璐, 等 (4969)
雅鲁藏布江山南宽谷风沙化土地土壤养分和粒度特征·····	李海东, 沈渭寿, 邹长新, 等 (4981)
一株溶藻细菌对海洋原甲藻的溶藻效应·····	史荣君, 黄洪辉, 齐占会, 等 (4993)
种形态对黑藻和竹叶眼子菜有机酸含量的影响·····	钟正燕, 王宏镔, 王海娟, 等 (5002)
七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估·····	邓培雁, 雷远达, 刘 威, 等 (5014)
杭州湾滨海湿地不同植被类型沉积物磷形态变化特征·····	梁 威, 邵学新, 吴 明, 等 (5025)
剪形臂尾轮虫形态的时空变化及其与生态因子间的关系·····	葛雅丽, 席貽龙, 马 杰, 等 (5034)
太湖流域河流水质状况对景观背景的响应·····	周 文, 刘茂松, 徐 驰, 等 (5043)
荒漠植物白刺属 4 个物种的生殖分配比较·····	李清河, 辛智鸣, 高婷婷, 等 (5054)
臭氧浓度升高对香樟叶片光合色素及抗过氧化的影响及其氮素响应·····	牛俊峰, 张巍巍, 李 丽, 等 (5062)
不同密度下凤仙花重要形态性状与花朵数的关系·····	田旭平, 常 洁, 李娟娟, 等 (5071)
五种高速公路边坡绿化植物的生理特性及抗旱性综合评价·····	谭雪红, 高艳鹏, 郭小平, 等 (5076)
散孔材与环孔材树种枝干、叶水力学特性的比较研究·····	左力翔, 李俊辉, 李秧秧, 等 (5087)
北京城区行道树国槐叶面尘分布及重金属污染特征·····	戴斯迪, 马克明, 宝 乐 (5095)
南亚热带米老排人工林碳贮量及其分配特征·····	刘 恩, 刘世荣 (5103)
植物生活史型定量划分及其权重配置方法——以四棱豆生活史型划分为例·····	赵则海 (5110)
半干旱区湿地-干草原交错带边界判定及其变化·····	王 晓, 张克斌, 杨晓晖, 等 (5121)
氮肥运筹对晚播冬小麦氮素和干物质积累与转运的影响·····	吴光磊, 郭立月, 崔正勇, 等 (5128)
氮肥形态对冬小麦根际土壤氮素生理群活性及无机氮含量的影响·····	熊淑萍, 车芳芳, 马新明, 等 (5138)
基于数字相机的冬小麦物候和碳交换监测·····	周 磊, 何洪林, 孙晓敏, 等 (5146)
黄土高原半湿润区气候变化对冬小麦生长发育及产量的影响·····	姚玉璧, 王润元, 杨金虎, 等 (5154)
基于土地破坏的矿区生态风险评价: 理论与方法·····	常 青, 邱 瑶, 谢苗苗, 等 (5164)
基于生态位的山地农村居民点适宜度评价·····	秦天天, 齐 伟, 李云强, 等 (5175)
氯虫苯甲酰胺对黑肩绿盲蝽实验种群的影响·····	杨 洪, 王 召, 金道超 (5184)
6 种植物次生物质对斜纹夜蛾解毒酶活性的影响·····	王瑞龙, 孙玉林, 梁笑婷, 等 (5191)
云南元江芒果园桔小实蝇成虫日活动规律及空间分布格局·····	叶文丰, 李 林, 孙来亮, 等 (5199)
重庆市蝴蝶多样性环境健康指示作用和环境监测评价体系构建·····	邓合黎, 马 琦, 李爱民 (5208)
专论与综述	
生态系统服务竞争与协同研究进展·····	李 鹏, 姜鲁光, 封志明, 等 (5219)
中国沿海无柄蔓足类研究进展·····	严 涛, 黎祖福, 胡煜峰, 等 (5230)
冰雪灾害对森林的影响·····	郭淑红, 薛 立 (5242)
不同干扰因素对森林和湿地温室气体通量影响的研究进展·····	杨 平, 全 川 (5254)
采石场废弃地的生态重建研究进展·····	杨振意, 薛 立, 许建新 (5264)
研究简报	
基于地统计学和 CFI 样地的浙江省森林碳空间分布研究·····	张 峰, 杜 群, 葛宏立, 等 (5275)

期刊基本参数: CN 11-2031/Q * 1981 * m * 16 * 344 * zh * P * ¥ 70.00 * 1510 * 36 * 2012-08



封面图说: 秋色藏野驴群——秋天已经降临在海拔 4200 多米的黄河源区, 红色的西伯利亚蓼(生于盐碱荒地或砂质含盐碱土壤)铺满大地, 间有的高原苔草也泛出了金黄, 行走在上面的藏野驴们顾不上欣赏这美丽的秋色, 只是抓紧时间, 在严冬到来之前取食, 添肥增膘以求渡过青藏高原即将到来的漫长冬天。

彩图提供: 陈建伟教授 北京林业大学 E-mail: cites.chenjw@163.com

ACTA ECOLOGICA SINICA Vol. 32, No. 16 August, 2012 (Semimonthly)

CONTENTS

The optimum mixture ratio of larch and birch in terms of biodiversity conservation; a case study in Aershan forest area	LI Jing, LUO Youqing, SHI Juan (4943)
Spatiotemporal characteristics of carbon emissions from energy consumption in China	SHU Yuqin (4950)
Spatial patterns of soil moisture at transect scale in the Loess Plateau of China	YAO Xueling, FU Bojie, LÜ Yihe (4961)
The characteristics of the spatial distribution of soil organic matter and factors influencing it in Ebinur Lake Basin of Xinjiang Autonomous Region, China	WANG Heling, ZHANG Huiguo, QIN Lu, et al (4969)
Soil nutrients content and grain size fraction of aeolian sandy land in the Shannan Wide Valley of the Yarlung Zangbo River, China	LI Haidong, SHEN Weishou, ZOU Changxin, et al (4981)
Algicidal activity against <i>Proocentrum micans</i> by a marine bacterium isolated from a HABs area, South China	SHI Rongjun, HUANG Honghui, QI Zhanhui, et al (4993)
Effects of arsenic speciations on contents of main organic acids in <i>Hydrilla verticillata</i> and <i>Potamogeton malaianus</i>	ZHONG Zhengyan, WANG Hongbin, WANG Haijuan, et al (5002)
Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin	DENG Peiyan, LEI Yuanda, LIU Wei, et al (5014)
Phosphorus fraction in the sediments from different vegetation type in Hangzhou bay coastal wetlands	LIANG Wei, SHAO Xuexin, WU Ming, et al (5025)
Spatio-temporal variation of morphometric characteristics of <i>Brachionus forficula</i> in relation to ecological factors	GE Yali, XI Yilong, MA Jie, et al (5034)
Response of river water quality to background characteristics of landscapes in Taihu Lake basin	ZHOU Wen, LIU Maosong, XU Chi, et al (5043)
Reproductive allocation in four desert species of the genus <i>Nitraria</i> L.	LI Qinghe, XIN Zhiming, GAO Tingting, et al (5054)
Effects of elevated ozone on foliar chlorophyll content and antioxidant capacity in leaves of <i>Cinnamomum camphora</i> under enhanced nitrogen loads	NIU Junfeng, ZHANG Weiwei, LI Li, et al (5062)
Correlation analysis between floret numbers and important traits of <i>Impatiens balsamina</i> under different planting density	TIAN Xuping, CHANG Jie, LI Juanjuan, et al (5071)
Physiological characteristics and comprehensive evaluation of drought resistance in five plants used for roadside ecological restoration	TAN Xuehong, GAO Yanpeng, GUO Xiaoping, et al (5076)
Comparison of hydraulic traits in branches and leaves of diffuse- and ring-porous species	ZUO Lixiang, LI Junhui, LI Yangyang, et al (5087)
Distribution and heavy metal character of foliar dust on roadside tree <i>Sophora japonica</i> of urban area in Beijing	DAI Sidi, MA Keming, BAO Le (5095)
The research of carbon storage and distribution feature of the <i>Mytilaria laosensis</i> plantation in south sub-tropical area	LIU En, LIU Shirong (5103)
The novel methods of quantitative classification of plant life cycle forms and weight collocation; taking classification of life cycle forms of <i>Psophocarpus tetragonolobus</i> as an example	ZHAO Zehai (5110)
Research on boundary definition and changes of wetland-dry grassland ...	WANG Xiao, ZHANG Kebin, YANG Xiaohui, et al (5121)
Differential effects of nitrogen managements on nitrogen, dry matter accumulation and transportation in late-sowing winter wheat	WU Guanglei, GUO Liyue, CUI Zhengyong, et al (5128)
Effects of nitrogen form on the activity of nitrogen bacteria group and inorganic nitrogen in rhizosphere soil of winter wheat	XIONG Shuping, CHE Fangfang, MA Xinming, et al (5138)
Using digital repeat photography to model winter wheat phenology and photosynthetic CO ₂ uptake	ZHOU Lei, HE Honglin, SUN Xiaomin, et al (5146)
Impacts of climate change on growth and yield of winter wheat in the semi-humid region of the Loess Plateau	YAO Yubi, WANG Runyuan, YANG Jinhu, et al (5154)
Theory and method of ecological risk assessment for mining areas based on the land destruction	CHANG Qing, QIU Yao, XIE Miaomiao, et al (5164)
Suitability evaluation of rural residential land based on niche theory in mountainous area	QIN Tiantian, QI Wei, LI Yunqiang, et al (5175)
Effects of chlorantraniliprole on experimental populations of <i>Cyrtorhinus lividipennis</i> (Reuter) (Hemiptera: Miridae)	YANG Hong, WANG Zhao, JIN Daochao (5184)
Effects of six plant secondary metabolites on activities of detoxification enzymes in <i>Spodoptera litura</i>	WANG Ruilong, SUN Yulin, LIANG Xiaoting, et al (5191)
Daily activity and spatial distribution pattern of the oriental fruit fly, <i>Bactrocera dorsalis</i> (Diptera: Tephritidae) in mango orchard, Yuanjiang, Yunnan	YE Wenfeng, LI Lin, SUN Lailiang, et al (5199)
The establishment of the indication on environmental health of butterfly and of the environmental monitoring evaluation system in Chongqing	DENG Heli, MA Qi, LI Aimin (5208)
Review and Monograph	
Research progress on trade-offs and synergies of ecosystem services; an overview	LI Peng, JIANG Luguang, FENG Zhiming, et al (5219)
A review on the balanomorph barnacles in the coastal waters of China	YAN Tao, LI Zufu, HU Yufeng, et al (5230)
Effects of ice-snow damage on forests	GUO Shuhong, XUE Li (5242)
Greenhouse gas flux from forests and wetlands; a review of the effects of disturbance	YANG Ping, TONG Chuan (5254)
Advances in ecology restoration of abandoned quarries	YANG Zhenyi, XUE Li, XU Jianxin (5264)
Scientific Note	
Spatial distribution of forest carbon in Zhejiang Province with geostatistics based on CFI sample plots	ZHANG Feng, DU Qun, GE Hongli, et al (5275)

DOI: 10.5846/stxb201112071867

邓培雁,雷远达,刘威,王旭涛.七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估.生态学报,2012,32(16):5014-5024.

Deng P Y, Lei Y D, Liu W, Wang X T. Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin. Acta Ecologica Sinica, 2012, 32(16): 5014-5024.

七项河流附着硅藻指数在东江的适用性评估

邓培雁^{1,*}, 雷远达¹, 刘 威², 王旭涛²

(1. 华南师范大学化学与环境学院, 广州 510631; 2. 珠江流域水环境监测中心, 广州 510611)

摘要:综合运用因子分析、聚类分析、箱型图分析等统计方法评估了河流附着硅藻生物指数(Biological Diatom Index, IBD)、硅藻营养化指数(Trophic Diatom Index, TDI)、斯雷德切克指数(Sládeček's Index, SLA)、特定污染敏感指数(Specific Polluosensitivity Index, IPS)、硅藻属指数(Generic Diatom Index, IDG)、戴斯指数(Descy Index, DESCY)和欧盟硅藻指数(European Economic Community Index, CEE)在东江流域河流水质评价中的适用性。结果显示:SLA与IPS, CEE显著相关($P < 0.05$), CEE与TDI不相关,其余指标间均极显著相关($P < 0.01$)。SLA与13项水质理化指标均无相关性,TDI与含氯度(Cl)显著负相关,CEE与溶解氧(DO)、电导率(Cond.)、总氮(TN)显著正相关($P < 0.05$),其余指标与氨氮($\text{NH}_4\text{-N}$)、pH不存在线性相关,与五日生化需氧量(BOD_5)、高锰酸盐指数($\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$)、亚硝氮($\text{NO}_2\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3\text{-N}$)、总磷(TP)具极显著相关性($P < 0.01$)。13项水质理化指标中主成分负荷贡献大于50%的八项理化参数DO、 BOD_5 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP和 SiO_2 将试验区水质分为四组。IPS、IBD、IDG和CEE与水质物化分类一致性较好。IPS、IBD、IDG和CEE的逐步判别分析(引入 $P = 0.20$,剔除 $P = 0.25$)显示IPS和CEE都只选出了 $\text{NO}_2\text{-N}$,分类判别的正确率分别为55.6%和48.1%;IBD引入了 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ 和DO3个解释变量,判别正确率74.1%;IDG引入 BOD_5 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 两个变量,分组正确率63.0%。硅藻群落聚类显示,IBD和IDG在水质物化分类的箱型图中呈现出明显合理的趋势。以上研究表明IBD和IDG硅藻指数最适合用于东江河流水质生物监测与评价。

关键词:附着硅藻;东江;水质评价

Exploration of benthic diatom indices to evaluate water quality in rivers in the Dongjiang basin

DENG Peiyan^{1,*}, LEI Yuanda¹, LIU Wei², WANG Xutao²

1 School of Chemistry and Environment, South China Normal University, Guangzhou 510631, China

2 Water Environment Monitoring Center of Pearl River Basin, Guangzhou 510611, China

Abstract: Benthic diatoms are considered one of the most suitable organisms in bioassessment of water quality because of their high sensitivity to water temperature, nutrients, organic pollution and heavy metals. Since the 1970s, a number of indicator indices have been developed and used for the assessment of river quality including the IBD (Biological Diatom Index), TDI (Trophic Diatom Index), SLA (Sládeček's Index), IPS (Specific Pollution Sensitivity Index), IDG (Generic Diatom Index), DESCY (Descy Index) and CEE (European Economic Community Index). However, it is still not clear whether the ecologic signature of diatoms differs between these indicator indices. Moreover, in China, river water quality monitoring is usually limited to physi-chemical variables, which provide a snapshot picture of chemical characteristics at the time of sampling. Assessment of diatoms has the advantage that their observed status is a reflection of water quality conditions over a period of time prior to sampling.

基金项目:国家重大科技专项(2009ZX07211-009);公益性行业科研专项(201001021);水利部“948”引进项目(201007);国家自然科学基金资助项目(30700111)

收稿日期:2011-12-07; 修订日期:2012-05-31

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: dpy213@126.com

The Dongjiang River basin, as one of the main river systems in the Pearl River Basin, provides significant ecosystem services, such as drinking water, electricity supply, transport, irrigation water supply, fishery.

In this study, seven diatom indices (IBD, TDI, SLA, IPS, IDG, DESCY and CEE) were tested to evaluate the water quality of rivers in the Dongjiang basin by means of correlation coefficient analysis, factor analysis, cluster analysis, box plot analysis and discriminant analysis. Pearson correlation coefficient analysis showed that IPS, IBD and IDG were closely related, and IPS, IBD, IDG and CEE had significant correlation with BOD_5 , COD_{KMnO_4} , NO_2-N , NO_3-N . IPS, IBD, IDG and CEE gave better performance in comparison of the seven diatom indices characterized for different water quality groups sorted by 8 key physicochemical variables (DO , BOD_5 , COD_{KMnO_4} , TN , NO_3-N , NO_2-N , TP and SiO_2) indentified by factor analysis. Results from stepwise discriminant analysis (P to entered = 0.20, P to removed = 0.25) were represented as follows: for IPS and CEE, NO_2-N was the only selected variable, and the correction percent was low by 55.6% and 48.1%. The discriminant analysis selected NO_2-N , COD_{KMnO_4} and DO for IBD, and the correction percent was up to 74.1%, IDG was discriminated by two variables (BOD_5 and NO_3-N), and the correction percent was 63.0%. IBD and IDG showed clear and reasonable trend in the box plots with water quality groups clustered from the diatom communities. This study suggested that the diatom indices can be applied for monitoring rivers in the Dongjiang basin, especially IBD and IDG.

Key Words: benthic diatom; Dongjiang river basin; water quality assessment

附着硅藻广泛存在于江河、湖泊、溪流等各种水体^[1-2],对水体温度、酸碱度、营养物、有机污染、重金属等非常敏感^[3-6],被认为是河流水质以及生态质量评价中非常适合的指示生物^[7-8]。欧盟、美国、澳大利亚、南非、台湾和巴西等国家和地区^[8-17]从 20 世纪 70 年代开始至今,相继发展了 10 余种河流附着硅藻水质评价指数,并得到广泛采纳与应用。例如,美国环境保护署(EPA)1999 年发布的《河流和浅层河流适用的快速生物评价议定书》^[18],欧盟的《水框架指令》^[19]都建立起从附着硅藻样品采集,预处理到指数计算与评价的一套标准方法。目前,常用指数包括硅藻生物指数(Biological Diatom Index, IBD)^[20],硅藻营养化指数(Trophic Diatom Index, TDI)^[3,21-22],斯雷德切克指数(Sládeček's Index, SLA)^[23],特定污染敏感指数(Specific Polluosensitivity Index, IPS)^[24],硅藻属指数(Generic Diatom Index, IDG)^[25],戴斯指数(Descy Index, DESCY)^[26]和欧盟硅藻指数(European Economic Community Index, CEE)^[27]等。

在我国一般进行河流物化监测与评价,反映的是采样瞬时水环境物理和化学特征^[28]。尽管,河流附着硅藻监测与评价能够反映各种污染物对河流长期、累积、综合的生态效应,但该方法还未在我国得到广泛应用与推广。

东江是珠江流域三大水系之一,为香港、深圳、东莞等城市提供饮用水补给的同时,还担负发电、航运、灌溉、渔业、防咸等多种功能,在该区域经济发展和人民生活中起着举足轻重的作用。

本文以东江流域为研究区域,利用主成分分析,聚类分析,箱型图分析等多种分析方法,研究了 IBD、TDI、SLA、IPS、IDG、DESCY 及 CEE 国际上常用的 7 项附生硅藻指数在东江河流水质评价中的适用状况,以期为构建适合我国河流特征的附着硅藻水质评价指数、划分水质硅藻评价等级、合理解释河流水生态状况,以及该技术的大面积推广与应用奠定理论与实践基础。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况与采样点

东江为珠江流域第三大水系,地跨广东、江西两省,面积 33200 km²,干流全长 523 km,多年平均气温为 20.4℃,多年平均降雨量 1750 mm。

东江上游源头分为寻乌水和九曲河两支流,一级支流包括寻乌水、九曲河、浈江、新丰江、康禾河、公庄河、秋香江、西枝江、淡水河、石马河和增江等。研究中采样点覆盖东江的所有一级支流,全流域共设置 27 个采集

点,分布见图 1。

1.2 硅藻样品采集、处理与分析

根据欧盟标准方法 EN 13946^[29] 和 EN 14407^[30], 河流附着硅藻采样多在枯水季进行。本文采样时间为 2011 年 1 月,附着硅藻采样基质选取能抵抗水流、地势开阔处无树荫遮挡的石头,每个采集点至少采集 5 块石头,用干净牙刷刷洗石头向阳面硅藻,甲醛(3%—4%)固定。样品经过氧化氢(35%)和浓盐酸(98%)消解, Naphrax(RI = 1.74)封片胶封片,光学显微镜(LM)1000 倍油镜镜头下检出,视野内所有完整及破损面积不超过 1/4 的硅藻细胞都要鉴定和计数,每个样片计数超过 400 个细胞,硅藻种类的鉴定主要根据 Krammer and Lange-Bertalot 鉴定体系(1986—1991)^[31]。

1.3 水样采集与理化指标测定

同步采集河水样品,水样采集,保存以及测定参照《水和废水监测分析方法(第四版)》^[32],现场测定 pH 值、电导率(Cond.),实验室测得溶解氧(DO)、五日生化需氧量(BOD₅)、高锰酸盐指数(COD_{KMnO₄})、总氮(TN)、氨氮(NH₄-N)、硝氮(NO₃-N)、亚硝氮(NO₂-N)、总磷(TP)、磷酸盐(PO₄-P)、硅酸盐(SiO₂)和氯化物(Cl)13 项指标。

1.4 数据分析

硅藻指数 IPS、IBD、IDG、TDI、SLA、DESCY 均基于 Zelinka 和 Marvan 经典方程^[33]:

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

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。CEE 指数的计算采用双重网格法,7 项硅藻指数通过软件 Omnidia 5.3 算出^[34]。

除了 TDI(数值范围 0—100)外,其他 6 项指数均转换为 0 到 20 的数值范围。其中 TDI 指数数值越低,表明样点富营养程度越低,数值越高则说明样点越趋向于富营养化;其他 6 项指数,数值越低表明样点污染程度越高,数值越高则说明样点水质越洁净。

为了研究 7 项硅藻评价指标的适用性,进行以下分析:

1) 利用皮尔逊相关系数矩阵分析 7 项指数之间,7 项指数与 13 项理化指标之间的相关程度。

2) 对 13 项理化指标进行标准化处理后,通过相关系数分析剔除极显著相关一组变量中的一个($P < 0.01$),以确保变量的独立代表性。剩下的变量进入因子分析:利用 KMO 和 Bartlett 球形检验法检验理化变量进行因子分析的可行性^[35];然后利用主成分分析和方差极大正交旋转提取因子和旋转因子,保留特征根大于 1 的主成分因子,对主成分因子负荷贡献大于 50% 的理化变量保留作为主要水质参数。采用组间联接法,以欧氏距离作为类间距离,对主要水质参数进行层次聚类(简称类别 A)。

3) 作 7 项硅藻指数分布在类别 A 的箱型图,箱型图中箱子下端和上端为样本容量的 25% 和 75%,中横线为样本中位数,箱子长度为 50% 的样本容量,虚状线延伸距离不超过箱子长度的 1.5 倍。圆圈代表远离中位数的离异点。具有相同字母的箱子间差异不显著,显著水平 $P = 0.05$ 。

4) 步骤 3 选出的指数将 27 个样点分出水质类别(简称类别 B),利用逐步判别分析类别 B 的分组效果:

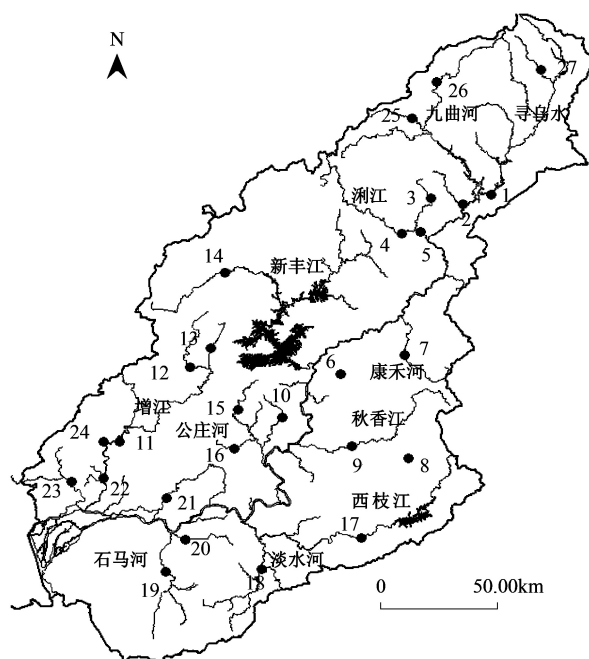


图 1 采样点分布示意图

Fig. 1 Locations of the sampling sites

设定引入变量的显著性水平为 0.10,剔除变量的显著性水平为 0.15,从理化指标步骤(2)中筛选出可以引入判别式的指标(若选出的指标较少,即提高引入的显著性水平到 0.20,剔除的显著性水平到 0.25),同时得出各指数的回归性误判分组正确率和交叉验证分组正确率。用于判别分析的理化变量均进行标准化处理。

5)利用步骤 4 筛选出的理化指标,作出其在类别 B 的箱型图,分析其分布趋势,筛选指数进行下一步的分析。

6)通过硅藻群落结构数据进行层次聚类,得类别 C。以各组优势种组合的指示作用评价分组情况,硅藻种群指示作用根据 van Dam^[5]和 Hofmann^[36]体系确定,于 Omnidia 5.3^[34]中完成。

7)利用步骤 5 选出的指数,作出在类别 C 分布的箱型图。分析箱型图,选出最合适的硅藻评价指数。

2 结果

2.1 硅藻指数之间以及与水质理化指标的相关性分析

结果显示 SLA 与其余 5 项硅藻指数相关性较低,仅与 IPS, CEE 显著相关($P<0.05$),CEE 与 TDI 不相关,其余指数间均存在极显著相关($P<0.01$)。SLA 与所有水质理化指标均无相关性,TDI 只与 Cl 显著负相关($P<0.05$),CEE 与 DO、Cond.、TN 显著相关,其余指数与 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、pH 不存在线性相关,与 BOD_5 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、TP 具有较强的相关性。

2.2 水质理化指标分类

剔除水质极显著相关的 Cl、 $\text{NH}_4\text{-N}$ 、 $\text{PO}_4\text{-P}$ 、Cond. (表 1, $P<0.01$),确保证理化指标的独立代表性。其余 9 项理化指标经检验:KMO 值 0.769, Bartlett 球形检验显著水平 $P<0.05$ (表 2),可以进行因子分析。主成分分析,第一、第二主成分累积解释总方差的 72.680%,特征根均大于 1 (表 3),前 2 个成分已反映原始数据所提供的大部分信息。剔除贡献较低的 pH 值,保留其余对主成分负荷贡献大于 50% 的 8 项理化参数(DO、 BOD_5 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ 、TN、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 、 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、TP、 SiO_2)作为主要水质参数(表 4)。以上 8 项水质参数的层次聚类将试验区水质分为四组(A1, A2, A3, A4)。

表 1 理化指标极显著相关系数

Table 1 Significant correlations among physiochemical variables

变量 1 Variable 1	变量 2 Variable 2	相关系数 Correlation coefficients
电导率 Conductivity	氯化物 Chloride	0.926 **
总氮 Total nitrogen(TN)	氨氮 $\text{NH}_4\text{-N}$	0.986 **
总氮 Total nitrogen(TN)	电导率 Conductivity	0.968 **
总磷 Total phosphorus(TP)	磷酸盐 $\text{PO}_4\text{-P}$	0.978 **

* * $P<0.01$

表 2 KMO 和 Bartlett 检验

Table 2 KMO and Bartlett's tests

取样足够度的 Kaiser-Meyer-Olkin 度量	Kaiser-Meyer-Olkin Measure of Sampling Adequacy	0.769
Bartlett 球形检验	近似卡方 Approx. Chi-Square	185.871
Bartlett's Test of Sphericity	自由度 df.	26
	显著性 Sig.	0.000

表 3 因子分析

Table 3 Total variance explained by factor analysis

成分 Component	旋转平方和载入 Rotation Sums of Squared Loadings		
	合计 Total	方差贡献率 Percent of variance/%	累积贡献率 Cumulative percent/%
1	4.434	49.270	49.270
2	2.107	23.410	72.680

2.3 硅藻指数对比分析

图 2 显示,7 项硅藻指数在 A1 至 A4 水质类别箱型图中无显著差异 ($P < 0.05$), IPS、IBD、IDG 和 CEE 随着水质分类等级的增加而呈下降趋势。DECSY、TDI 和 SLA 3 个指数则呈现波动的趋势。选择 IPS、IBD、IDG 和 CEE 4 项指数进入下一步评价工作。

2.4 IPS、IBD、IDG 和 CEE 指数分类评价

利用 IPS、IBD、IDG 和 CEE 4 个指数进行水质分类,得类别 B (B1, B2, B3, B4)。类别 B 中分组标准如下: $B1 \geq 13$; $13 > B2 \geq 10$; $10 > B3 \geq 7$; $B4 < 7$ 。

分组后,进行逐步判别分析。当引入及剔除变量显著水平分别为 $P = 0.10$ 和 $P = 0.15$ 时,图 3 显示类别 B 中引入的水质因子较少,IPS 和 CEE 都只选出了

$\text{NO}_2\text{-N}$, IBD 选出了 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$, IDG 选出了 BOD_5 、 $\text{NO}_3\text{-N}$ 。 BOD_5 在箱型图趋势表现出随机波动,而 $\text{NO}_3\text{-N}$ 随 B1 至 B4 水质类别变化呈现阶梯上升趋势。

调整引入及剔除变量显著水平分别为 $P = 0.20$ 和 $P = 0.25$ 时,表 5 显示 IPS 和 CEE 指数依然只选出 $\text{NO}_2\text{-N}$ 指标,判别正确率较低,为 55.6% 和 48.1%; IBD 指数引入了 $\text{NO}_2\text{-N}$ 、 $\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$ 和 DO 3 个解释变量,判别正确率为 74.1%,交叉检验正确率达到 63.0%; IDG 指数引入了 BOD_5 和 $\text{NO}_3\text{-N}$ 两个变量,回归性判别和交叉检验的分组正确率为 63.0% 和 51.9%。选择 IBD 和 IDG 指数进行下一步分析。

表 5 逐步判别分析(引入的 $P = 0.20$, 剔除的 $P = 0.25$)

Table 5 Results from the stepwise discriminant analysis (Selected and remove variables at $P = 0.20$ and $P = 0.25$, respectively)

指数 Indices	引入的变量 Selected Variables	要删除 变量的 F 值 F -to-remove	回顾性判别的分组正确率/% Percent of original correct classifications	交叉检验的分组正确率/% Percent of correct classifications after jackknifed cross-validation
特定污染敏感指数 Specific Pollution Sensitivity Index (IPS)	$\text{NO}_2\text{-N}$	< 0.001	55.6%	55.6%
硅藻生物指数 Biological Diatom Index (IBD)	$\text{NO}_2\text{-N}$	0.003	74.1%	63.0%
	$\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$	0.213		
	DO	0.173		
硅藻属指数 Generic Diatom Index (IDG)	BOD_5	0.004	63.0%	51.9%
	$\text{NO}_3\text{-N}$	0.068		
欧盟硅藻指数 European Economic Community Index (CEE)	$\text{NO}_2\text{-N}$	0.006	48.1%	48.1%

2.5 硅藻群落结构分类评价

全流域共鉴定出硅藻 98 个种和亚种,分属 8 科 30 属,以舟形藻属 (*Navicula*),菱形藻属 (*Nitzschia*) 和曲壳藻属 (*Achnanthes*) 种类数最多,分别为 14, 13 和 11 种。其中 30 种所占比例为 1% 以上,比例 5% 以上的有 *Ni. palea*, 9.24%; *Gomphonema minutum*, 7.63%; *G. parvulum*, 6.78%; *A. catenata*, 6.43%; *Eolimna minima*, 6.23%。

利用皮尔逊相关系数的组内联接聚类方法将 27 个样点的硅藻群落数据进行水质分类(图 4),得类别 C (C1, C2, C3, C4)。各组优势种的指示作用参照 Van Dam 和 Hofmann 的硅藻生态指示值名录。C1: *Eunotia minor* 和 *Achnanthes helvetica* 为贫污染性种,组内主要为 *Achnanthes* 属, van Dam 认为 *Achnanthes* 属具较宽的生态范围,但平均来说 *Achnanthes* 属种类指示较低的无机营养盐水平; C2: *Gomphonema productum* 为洁净到中等

表 4 因子负荷矩阵(负荷贡献大于 0.5)

Table 4 Component matrix

	成分 Component	
	1	2
五日生化需氧量 Biochemical oxygen demand (BOD_5)	0.933	
总磷 Total phosphorus (TP)	0.904	
溶解氧 Dissolved oxygen (DO)	-0.844	
亚硝氮 $\text{NO}_2\text{-N}$	0.828	
总氮 Total nitrogen (TN)	0.755	
高锰酸盐指数 Chemical oxygen demand ($\text{COD}_{\text{KMnO}_4}$)	0.753	0.562
硅酸盐 SiO_2		-0.887
硝氮 $\text{NO}_3\text{-N}$		0.761

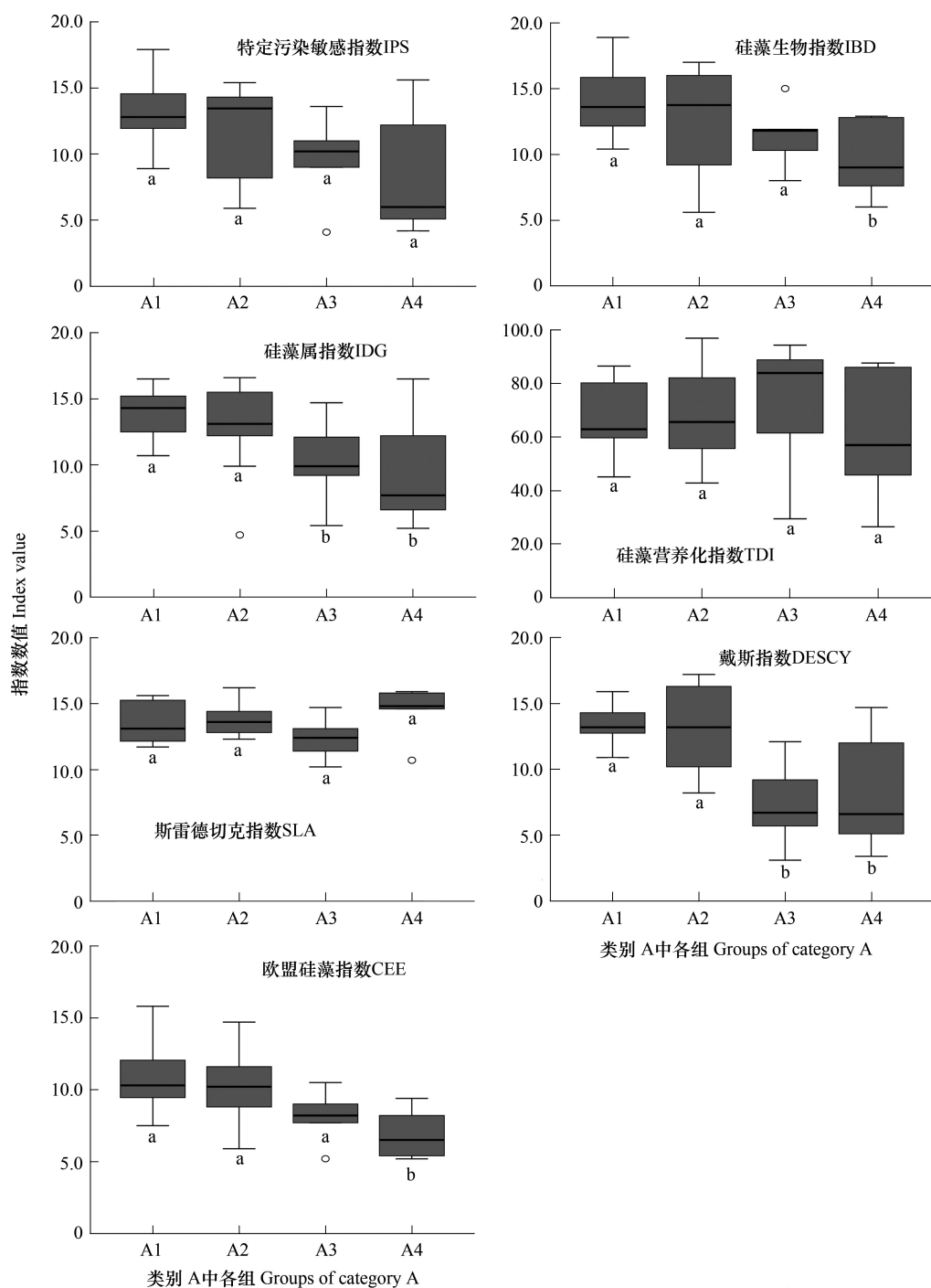


图2 7项硅藻指数在类别A中分布的箱型图

Fig.2 Box plots of the seven diatom indices in Category A

污染水体的指示种, *Cymbella turgidula* 为贫到中等营养水体的指示种, 而 *G. parvulum* 为中等到强有机污染性和富营养化种类; C3: *Eo. minima* 为指示水质中等有机污染程度和富营养化的种类, *G. minutum*, *Diadomesis confervacea* 和 *Luticola mutica* 均为富营养化水体的常见指示种; C4: *Nitzschia palea* 和 *Eo. subminuscula* 为强有机污染性和极富营养化的种类, *Ni. inconspicua* 和 *Cocconeis placentula* var. *euglypta* 为富营养化的指示种。因此类别 C 中, 水质污染程度随着 C1 到 C4 递加。

图5展示IBD和IDG指数在类别C箱型图中的分布。IBD和IDG指数均呈现随着C1到C4(水质污染程度递加)逐渐下降的趋势, 说明通过硅藻群落结构分类后, IBD和IDG指数也能很好的评价东江河流的水

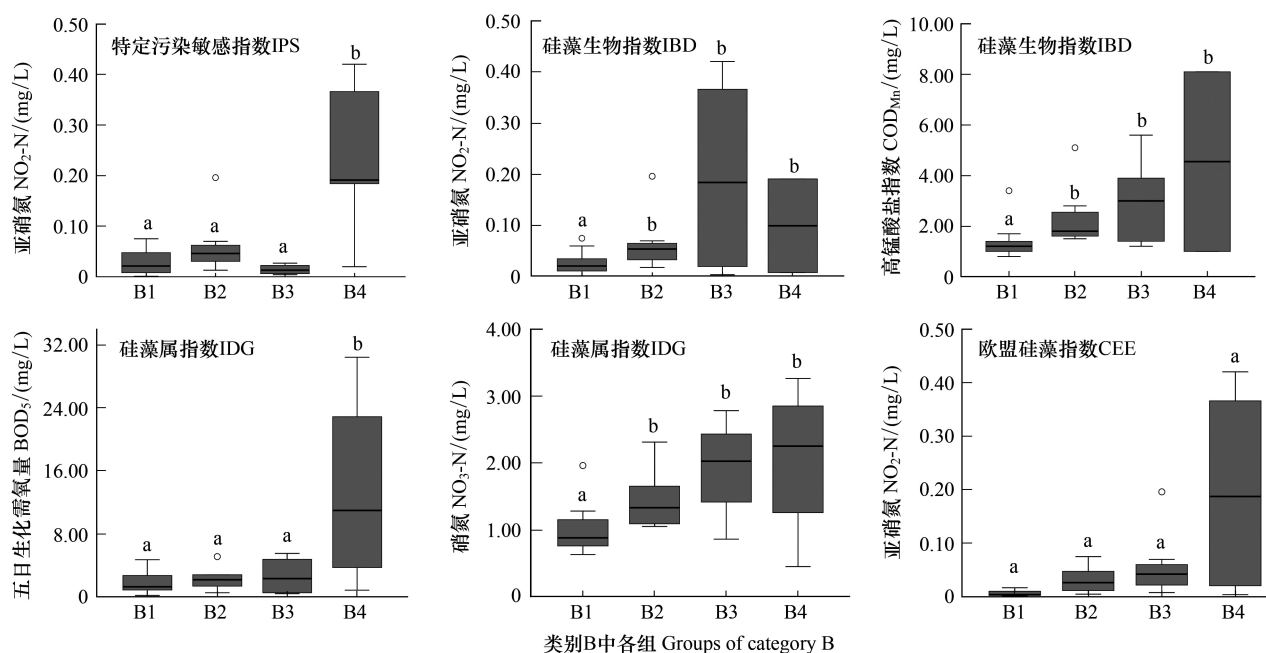


图3 引入的理化变量在类别B中分布的箱型图 (引入的 $P = 0.10$, 剔除的 $P = 0.15$)

Fig. 3 Box plots of the selected physiochemical variables in Category B (Selected and remove variables at $P = 0.10$ and $P = 0.15$, respectively)

质状况。

3 讨论

本文分析了7项硅藻指数 (IBD、TDI、SLA、IPS、IDG、DESCY、CEE) 在东江河流水质评价中的适用性。Taylor^[17]认为欧洲硅藻评价指数适用于世界多个国家和地区的河流水质评价,原因在于硅藻在世界范围内广泛分布。更多学者认为硅藻评价指数具有最佳适用区域^[17,37-38]。例如 IPS, IBD 和 IDG 根植于法国河流监测数据,能很好地评价法国河流水质状态;TDI 适用于英格兰和苏格兰地区水体富营养化评价,EPI-D (Diatom-Based Eutrophication Pollution Index, 富营养化污染硅藻指数)^[39]被认为是意大利地中海沿岸河流水质的最合适的硅藻指数。IDP 指数 (The Pampean Diatom Index, 南美大草原硅藻指数)^[40]则能够有效运用于阿根廷南美大草原河流水质评价。Watanabe 开发的 DAIPo 指数在日本广泛应用于河流有机污染评价,但在欧洲河流中却缺乏适用性^[37]。

SLA 由 Sládeček 于 1986 年提出,指数计算包含 323 个硅藻种,用于指示水中有机污染程度。本研究发现 SLA 指数不仅与有机指标 BOD_5 和 COD_{KMnO_4} 无显著相关性,与其余理化指标也无明显联系,在不同的水质类别 A 箱型图中随机波动。因此,SLA 对东江水质评价不适应。Kwandrans^[10]利用 SLA 指数评价波兰南部河流时也有与本文一致的结果。

DESCY 由 Descy 于 1979 年首次提出,该指数计算包括 106 个硅藻常见种。Vibaste^[41]在爱沙尼亚河流水质研究中发现 DESCY 指数与其它指数相关性较弱,只与 pH 存在较弱的联系,而与其他理化参数均无相关关系。本研究,DESCY 在类别 A 的箱型图中没有明显分布趋势。由于 DESCY 指数计算覆盖的硅藻种类较少,加之开发年代久远而又缺乏后续修订,容易导致 DESCY 指数评价的不准确性。

TDI 指数由 Kelly 和 Whitton 于 1995 年首次提出,共有三版,已被验证能够有效评价英国河流营养状态^[3,21-22,42]。本研究中,TDI 在类别 A 的箱型图分布中没有表现出合理的变化趋势。Kelly 等^[3]在开发 TDI 指数时发现 TDI 很难区分有机污染及水体富营养化对硅藻群落结构的影响,从而影响评价结果的准确性。本次研究结果可能也与有机污染影响有关。在第二版^[21]中 TDI 指数范围由 0 到 5 改变为 0 到 100,对一些种类的指示值作了修订,还引入污染耐受种百分数 (Percentage pollution tolerant valves, % PTV) 的概念,即计算硅藻耐

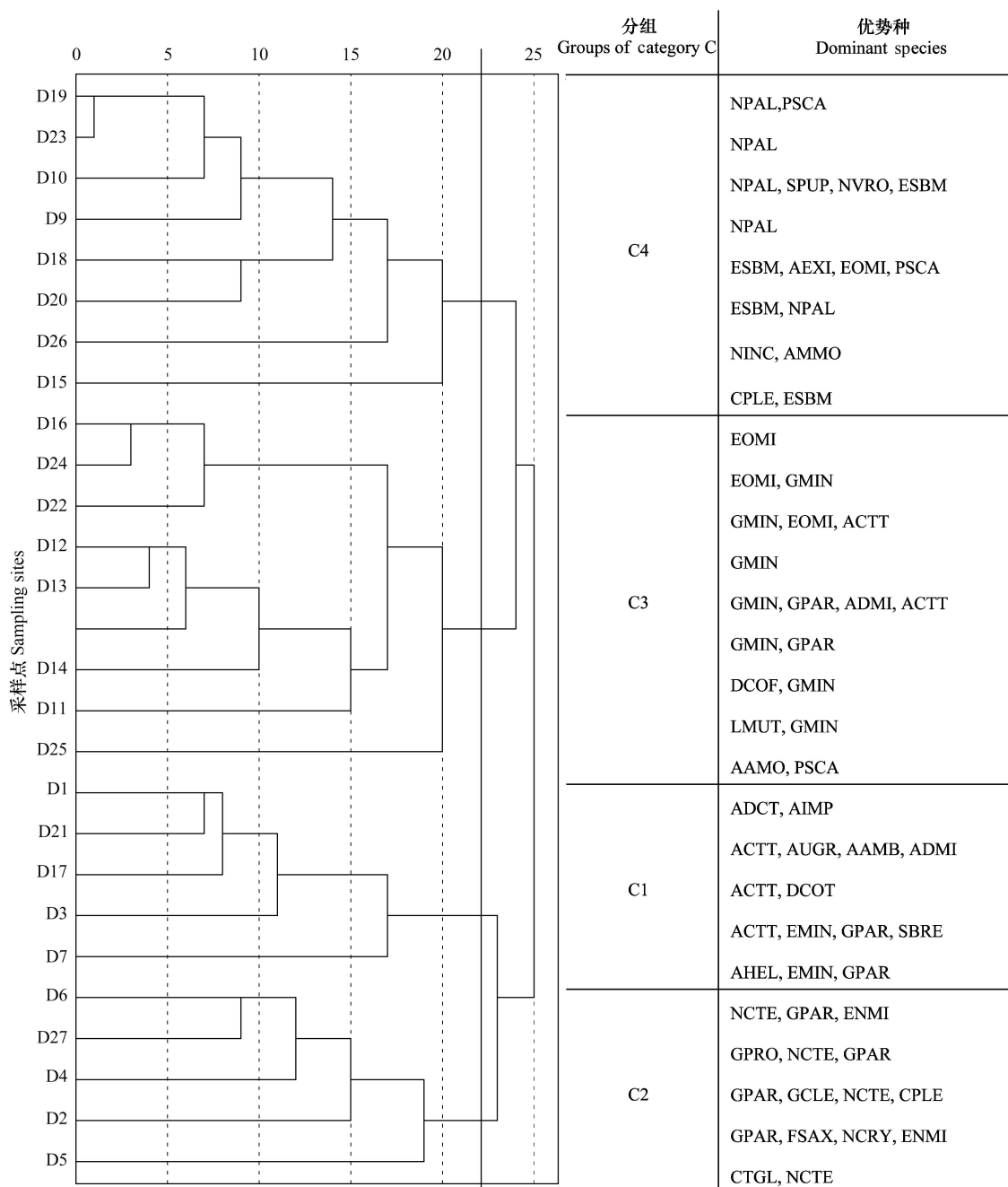


图4 硅藻种群聚类图(包括类别C各组和各样点优势种)

Fig. 4 Dendrogram based on the cluster analysis of the diatom communities (also groups of Category C and main dominant diatom taxa at each station are shown)

AAMB: *Aulacoseira ambigua*; AUGR: *A. granulata*; AAMO: *Achnanthes amoena*; ACTT: *A. catenata*; AEXI: *A. exilis*; AHEL: *A. helvetica*; AIMP: *A. imperfecta*; ADCT: *Achnantheidium catenatum*; ADMI: *A. minutissimum*; AMMO: *Amphora montana*; CPLE: *Cocconeis placentula* var. *euglypta*; CTGL: *Cymbella turgidula*; DCOF: *Diademes confervacea*; DCOT: *D. contenta*; EMIN: *Eunotia minor*; ENMI: *Encyonema minutum*; EOMI: *Eolimna minima*; ESBM: *E. subminuscula*; FSAX: *Frustulia saxonica*; GCLE: *Gomphonema clevei*; GMIN: *G. minutum*; GPAR: *G. parvulum*; GPRO: *G. productum*; LMUT: *Luticola mutica*; NCRY: *Navicula cryptocephala*; NCTE: *N. cryptotenella*; NVRO: *N. viridula* var. *rostellata*; NINC: *Nitzschia inconspicua*; NPAL: *N. palea*; PSCA: *Pinnularia subcapitata*; SBRE: *Surirella brebissonii*; SPUP: *Sellaphora pupula*

受有机污染种的百分比,作为 TDI 指数评价水体富营养化的补充说明。据著者经验,% PTV 小于 20% 可以看做有机污染对于 TDI 指数评价营养状况的影响很小或无影响。在本文评价中,27 个样点中有 16 个 % PTV 大于 20%,样点 16 和 20 分别达到 86.9% 和 89.9%。TDI 指数对于我国南方河流营养化评价的适用性有待于

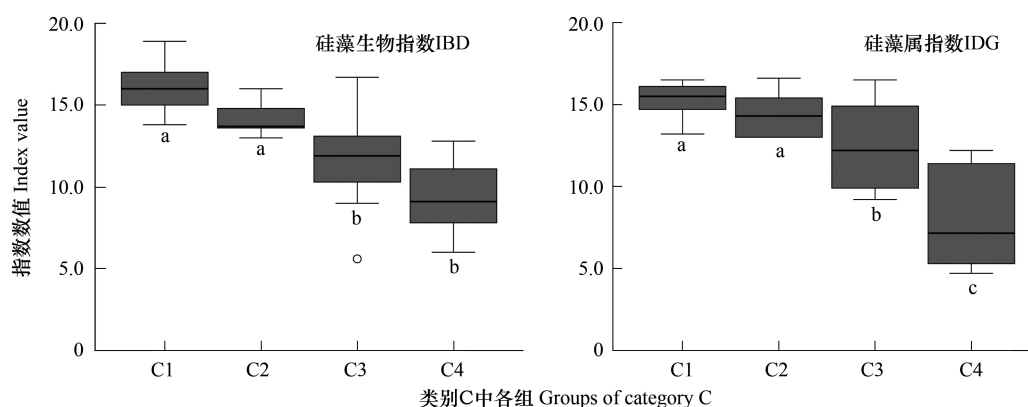


图5 IBD 和 IDG 指数在类别 C 中分布的箱型图

Fig. 5 Box plots of IBD and IDG in Category C

进一步的验证。

本文通过相关性分析和类别 A 的箱型图分析检验,4 项硅藻指数 (IBD, IPS, IDG, CEE) 均为东江水系河流水质适用的评价指数。IPS 指数无疑为应用范围最广的硅藻指数,于 1982 年法国农业与环境工程研究院 (CEMAGREF) Coste 首先提出,经过后续更新和修正,2006 版 IPS 指数包括 4590 个硅藻单位 (包括变种和同种异名)。相对于其它硅藻指数,IPS 指数包含的种类广泛,准确性较高,但不同鉴定者的鉴定差异也会被放大,而且迅速发展的硅藻分类学也使 IPS 指数发展遇到瓶颈,无休止地将新的种类引入指数会带来庞大的鉴定工作量。因此一个基于完整采样网络和包含有限的硅藻种类的评价指数 IBD 诞生了,IBD 指数建立于法国,根植于从 1977—1994 年 949 个采集断面的 1332 个样品的数据上,联合分析 14 项理化参数,同时将其在 7 个水质等级出现的概率纳入计算范畴。IBD 指数继而发展为包括采样,预处理和计算分析等标准化的水质生物评价方法^[43]。本文研究发现 IBD 和 IPS 指数有很强的相关关系,刘威^[44]以漓江为研究区域,也发现 IPS 和 IBD 联系密切,并且确认 IPS 和 IBD 适用于漓江的水质评估。与 IPS 和 IBD 有显著相关性的 IDG 指数为属水平的指数,本文研究中发现 IDG 指数的评价表现较好,但有些研究发现 IDG 指数指示作用较弱^[45]。Taylor^[17]提出要注意现在硅藻分类学的快速发展带来大量的新硅藻种类的产生,特别是属水平下的细分对于 IDG 指数得分的影响。Prygiel^[46]认为要区别对待不同属对于 IDG 的贡献,例如 *Navicula* (舟形藻属) 和 *Nitzschia* (菱形藻属) 含有很宽的生态指示值范围,而 *Eunotia* (短缝藻属) 和 *Achnanthes* (曲壳藻属) 的指示值范围则相对较窄。Feio^[45]建议引入新的硅藻属名录来计算 IDG 指数,认为虽然这会对鉴定工作带来难度,但能使 IDG 成为更实际可用的水质评价指数。总的来说,IDG 指数为简单而又实用的硅藻指数,但实际应用时需要进行必要的调整和修正。CEE 指数为欧盟范围内的硅藻指数,曾有效评价欧洲 300 多条河流水质。不同于由 Zelinka and Marvan 经典方程发展出来的其他六项指数,CEE 指数的计算采用双重网格法。即将计算的 208 个硅藻种分为 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 CEE 指数值为组与亚组交叉网格的数值。虽然方法差异性较大,但在本文研究中,CEE 指数与 IBD, IDG 和 IPS 指数有较密切的联系,同时也适用于东江河流的水质评价。

通过判别分析,进入群落结构分类评价检验的 IBD 和 IDG 为东江最适用的评价指数。评价指数的适用性时还需要考虑一些问题,例如硅藻评价指数除了对理化参数有必要的响应外,也与其他参数,如海拔,河流等级,坡度,流速,流域面积,土地利用状况等有联系。Leira^[45]提出进行水质评估时很难确定硅藻种群结构的变化中哪一部分是由于人为干扰,哪一部分是自然因素所导致。Feio^[45]的研究发现硅藻指数不仅能指示水体的有机污染程度和富营养化,还能反映土地利用状况和河道形态。因此,利用分析手段证明硅藻指数的变化主要来源于水质因素而非地质因素对于硅藻指数评价的准确性非常重要。

References:

- [1] Stevenson R J, Pan Y D, van Dam H. Assessing environmental conditions in rivers and streams with diatoms// Smol J P, Stoermer E F. The Diatoms: Applications to Environmental and Earth Sciences. New York: Cambridge University Press, 2010: 57-87.
- [2] Lane R C, Reiss C K, DeCelles S, Brown T M. Benthic diatom composition in isolated forested wetlands subject to drying: Implications for monitoring and assessment. *Ecological Indicators*, 2009, 9: 1121-1128.
- [3] Kelly M G, Whitton B A. The Trophic Diatom Index: a new index for monitoring eutrophication in rivers. *Journal of Applied Phycology*, 1995, 7: 433-444.
- [4] Zalack T J, Smucker J N, Vis L M. Development of a diatom index of biotic integrity for acid mine drainage impacted streams. *Ecological Indicators*, 2010, 10: 287-295.
- [5] van Dam H, Mertens A, Sinkeldam J. A coded checklist and ecological indicator values of freshwater diatoms from the Netherlands. *Netherlands Journal of Aquatic Ecology*, 1994, 28: 117-133.
- [6] Gold C, Feurtet-Mazel A, Coste M, Boudou A. Field transfer of periphytic diatom communities to assess short-term structural effects of metals (Cd, Zn) in rivers. *Water Research*, 2002, 36: 3654-3664.
- [7] Ivanov P L, Chipev N, Temiskova D. Diatoms of the river Iskar (Sofia Plain) and their implication for water quality assessment. Part I. The diatom flora, ecology and community structure. *Journal of Environmental Protection and Ecology*, 2003, 4(2): 288-300.
- [8] Harding W R, Archibald C G M, Taylor J C. The relevance of diatoms for water quality assessment in South Africa. *Water SA*, 2005, 31(1): 41-46.
- [9] Prygiel J, Coste M. The assessment of water quality in the Artois-Picardie water (France) by the use of diatom indices. *Hydrobiologia*, 1993, 269/270: 343-349.
- [10] Kwandrans J, Eloranta P, Kawecka B, Wojtan K. Use of benthic diatom communities to evaluate water quality in rivers of southern Poland. *Journal of Applied Phycology*, 1998, 10: 193-201.
- [11] Potapova M, Charles F D. Diatom metrics for monitoring eutrophication in rivers of the United States. *Ecological Indicators*, 2007, 7: 48-70.
- [12] Fore S L, Grafe C. Using diatoms to assess the biological condition of large rivers in Idaho (U. S. A.). *Freshwater Biology*, 2002, 47: 2015-2037.
- [13] Lobo E A, Callegaro V L M, Hermany G, Bes D, Wetzel C A, Oliveira M A. Use of epilithic diatoms as bioindicators from lotic systems in southern Brazil, with special emphasis on eutrophication. *Acta Limnologica Brasiliensia*, 2004, 16(1): 25-40.
- [14] Wu J T. A generic index of diatom assemblages as bioindicator of pollution in the Keelung River of Taiwan. *Hydrobiologia*, 1999, 397: 79-87.
- [15] Wu J T, Kow L T. Applicability of a generic index for diatom assemblages to monitor pollution in the tropical River Tsanwun, Taiwan. *Journal of Applied Phycology*, 2002, 14: 63-69.
- [16] Chessman C B, Townsend A S. Differing effects of catchment land use on water chemistry explain contrasting behaviour of a diatom index in tropical northern and temperate southern Australia. *Ecological Indicators*, 2010, 10: 620-626.
- [17] Taylor C J, Prygiel J, Vosloo A, de la Rey A P, van Rensburg L. Can diatom-based pollution indices be used for biomonitoring in South Africa? A case study of the Crocodile West and Marico water management area. *Hydrobiologia*, 2007, 592: 455-464.
- [18] Barbour T M, Gerritsen J, Snyder D B, Stribling B J. Rapid bioassessment protocols for use in streams and Wadeable Rivers: periphyton, benthic macroinvertebrates and fish. 2nd ed. EPA 841-B-99-002. Washington, D. C. : U. S. Environmental Protection Agency, Office of Water, 1999.
- [19] European Commission. Directive 2000/60/EC of The European Parliament and of the Council-Establishing a Framework for Community Action in the Field of Water Policy. Belgium, Brussels, 2000, October, 23.
- [20] Coste M, Boutry S, Tison-Rosebery J, Delmas F. Improvements of the Biological Diatom Index (BDI): Description and efficiency of the new version (BDI-2006). *Ecological Indicators*, 2009, 9: 621-650.
- [21] Kelly M G. Use of the trophic diatom index to monitor eutrophication in rivers. *Water Research*, 1998, 32: 236-242.
- [22] Kelly M G, Adams C, Graves A C, Jamieson J, Krokowski J, Lycett E B, Murray-Bligh J, Pritchard S, Wilkins C. The Trophic Diatom Index: A User's Manual, Revised ed. Bristol: Environment Agency, 2001.
- [23] Sládeček V. Diatoms as indicators of organic pollution. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, 1986, 14: 555-566.
- [24] Cemagref. Etude des methods biologiques d'appréciation quantitative de la qualité des eaux. Rapport Q. E. Lyon. Lyon: Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse-Cemagref, 1982.
- [25] Coste M, Ayphassorho H. Étude de la qualité des eaux du Bassin Artois-Picardie à l'aide des communautés de diatomées benthiques (application des indices diatomiques). Rapport Cemagref. Douai: Bordeaux-Agence de l'Eau Artois-Picardie, 1991.

- [26] Descy J P. A new approach to water quality estimation using diatoms. *Nova Hedwigia*, 1979, 64: 305-323.
- [27] Descy J P, Coste M. A test of methods for assessing water quality based on diatoms. *Verhandlungen Internationale Vereinigung für theoretische und angewandte Limnologie*, 1991, 24: 2112-2116.
- [28] Lavoie I, Campeau S, Grenier M, Dillon J P. A diatom-based index for the biological assessment of eastern Canadian rivers; an application of correspondence analysis (CA). *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2006, 8: 1793-1811.
- [29] EN 13946. Water quality-Guidance standard for the routine sampling and pretreatment of benthic diatoms from rivers. 2003.
- [30] EN 14407. Water quality-Guidance standard for the identification, enumeration and interpretation of benthic diatom samples from running waters. 2005.
- [31] Krammer K, Lange-Bertalot H. *Bacillariophyceae*. Berlin: Spektrum Akademischer Verlag GmbH Heidelberg, 2000.
- [32] SEPA, Editorial committee of water and wastewater monitoring analysis method. *Water and wastewater monitoring analysis method*. 4th ed. Beijing: China Environmental Science Press, 2006.
- [33] Zelinka M, Marvan P. Zur Präzisierung der biologischen Klassifikation des Reinheit fliessender Gewässer. *Archiv für Hydrobiologie*, 1961, 57: 389-407.
- [34] Lecoq C, Coste M, Prygiel J. "Omnidia": soft-ware for taxonomy, calculation of diatom indices and inventories management. *Hydrobiologia*, 1993, 269(270): 509-513.
- [35] Cristina D, Isabel P, Liliana G. A multimetric diatom index to assess the ecological status of coastal Galician rivers (NW Spain). *Hydrobiologia*, 2010, 644: 371-384.
- [36] Hofmann G. Aufwuchs-Diatomeen in Seen und ihre Eignung als Indikatoren der Trophie. *Bibliotheca Diatomologica* 1994, 30: 1-241.
- [37] Zgrundo A, Bogaczewicz-Adamczak B. Applicability of diatom indices for monitoring water quality in coastal streams in the Gulf of Gdansk Region, northern Poland. *International Journal of Oceanography and Hydrobiology*, 2004, 33(3): 31-46.
- [38] Taylor C J, van Vuuren J M S, Pieterse A J H. The application and testing of diatom-based indices in the Vaal and Wilge Rivers, South Africa. *Water SA*, 2007, 33(1): 51-60.
- [39] Dell'Uomo A. L'Indice Diatomico di Eutrofizzazione/Polluzione (EPI-D) nel monitoraggio delle acque correnti. *Linee guida*. Roma: 2004.
- [40] Gómez N, Licursi M. The Pampean Diatom Index (IDP) for assessment of rivers and streams in Argentina. *Aquatic Ecology*, 2001, 35: 173-181.
- [41] Vilbaste S. Application of diatom indices in the evaluation of the water quality in Estonian streams. *Proceedings of the Estonian Academy of Sciences. Biology. Ecology*, 2004, 53(1): 37-51.
- [42] Kelly M G. Short term dynamics of diatoms in an upland stream and implications for monitoring eutrophication. *Environmental Pollution*, 2003, 125: 117-122.
- [43] AFNOR. Norme française NFT 90-354. Détermination de l'Indice Biologique Diatomées (IBD). France: 2000.
- [44] Zhao X G, Cai D S, Liu W, Wang X T. Diatom monitoring method Study on water quality in Lijiang. *Journal of Guangxi Normal University*, 2009, 27(2): 142-147.
- [45] Feio J M, Almeida F P S, Craveiro C S, Calado J A. A comparison between biotic indices and predictive models in stream water quality assessment based on benthic diatom communities. *Ecological Indicators*, 2009, 9: 497-507.
- [46] Prygiel J, Lévêque L, Iserentant R. A new practical diatom index for the assessment of water quality in monitoring networks. *Revue des sciences de l'eau*, 1996, 9(1): 97-113.
- [47] Leira M, Sabater S. Diatom assemblages distribution in catalan rivers, NE Spain, in relation to chemical and physiographical factors. *Water Research*, 2005, 39: 73-82.

参考文献:

- [32] 国家环境保护总局,《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法. 第四版. 北京: 中国环境科学出版社, 2006.
- [44] 赵湘桂, 蔡德所, 刘威, 王旭涛. 漓江水质硅藻生物监测方法研究. *广西师范大学学报: 自然科学版*, 2009, 27(2): 142-147.

《生态学报》2012 年征订启事

《生态学报》是中国生态学学会主办的自然科学高级学术期刊,创刊于 1981 年。主要报道生态学研究原始创新性科研成果,特别欢迎能反映现代生态学发展方向的优秀综述性文章;研究简报;生态学新理论、新方法、新技术介绍;新书评介和学术、科研动态及开放实验室介绍等。

《生态学报》为半月刊,大 16 开本,280 页,国内定价 70 元/册,全年定价 1680 元。

国内邮发代号:82-7 国外邮发代号:M670 标准刊号:ISSN 1000-0933 CN 11-2031/Q

全国各地邮局均可订阅,也可直接与编辑部联系购买。欢迎广大科技工作者、科研单位、高等院校、图书馆等订阅。

通讯地址:100085 北京海淀区双清路 18 号 电 话:(010)62941099; 62843362

E-mail: shengtaixuebao@rcees.ac.cn 网 址: www.ecologica.cn

编辑部主任 孔红梅 执行编辑 刘天星 段 靖

生 态 学 报
(SHENGTAI XUEBAO)
(半月刊 1981 年 3 月创刊)
第 32 卷 第 16 期 (2012 年 8 月)

ACTA ECOLOGICA SINICA
(Semimonthly, Started in 1981)
Vol. 32 No. 16 (August, 2012)

编 辑	《生态学报》编辑部 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085 电话:(010)62941099 www.ecologica.cn shengtaixuebao@rcees.ac.cn	Edited by	Editorial board of ACTA ECOLOGICA SINICA Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China Tel: (010)62941099 www.ecologica.cn Shengtaixuebao@rcees.ac.cn
主 编	冯宗炜	Editor-in-chief	FENG Zong-Wei
主 管	中国科学技术协会	Supervised by	China Association for Science and Technology
主 办	中国生态学学会 中国科学院生态环境研究中心 地址:北京海淀区双清路 18 号 邮政编码:100085	Sponsored by	Ecological Society of China Research Center for Eco-environmental Sciences, CAS Add:18, Shuangqing Street, Haidian, Beijing 100085, China
出 版	科 学 出 版 社 地址:北京东黄城根北街 16 号 邮政编码:1000717	Published by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 1000717, China
印 刷	北京北林印刷厂	Printed by	Beijing Bei Lin Printing House, Beijing 100083, China
发 行	科 学 出 版 社 地址:东黄城根北街 16 号 邮政编码:100717 电话:(010)64034563 E-mail: journal@cspg.net	Distributed by	Science Press Add:16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China Tel: (010)64034563 E-mail: journal@cspg.net
订 购	全国各地邮局	Domestic	All Local Post Offices in China
国外发行	中国国际图书贸易总公司 地址:北京 399 信箱 邮政编码:100044	Foreign	China International Book Trading Corporation Add: P. O. Box 399 Beijing 100044, China
广告经营 许 可 证	京海工商广字第 8013 号		



ISSN 1000-0933
CN 11-2031/Q

国内外公开发行

国内邮发代号 82-7

国外发行代号 M670

定价 70.00 元