

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第4期

Vol.34 No.4

2013

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

唐山大气颗粒物中水溶性无机盐的观测研究 苗红妍,温天雪,王丽,李杏茹,王跃思(1225)

鼎湖山 PM_{2.5} 中水溶性离子浓度特征分析 赵亚南,王跃思,温天雪,刘全(1232)

北京夏冬季霾天气下气溶胶水溶性离子粒径分布特征 黄怡民,刘子锐,陈宏,王跃思(1236)

深圳市 PM_{2.5} 化学组成与时空分布特征 云慧,何凌燕,黄晓锋,兰紫娟,李响,曾立武(1245)

福州城市及郊区冬、夏两季大气中多环芳烃特征研究 易志刚,黄幸然,毕峻奇,郭萍萍,郑丽丽(1252)

河西走廊及兰州地区典型有机氯农药的大气残留及时空分布特征 丁中原,毛潇萱,马子龙,田慧,郭强,黄韬,高宏,李军,张干(1258)

淄博市大气污染特征模型模拟及环境容量估算 薛文博,王金南,杨金田,雷宇,燕丽,贺晋瑜,韩宝平(1264)

香溪河秋季水-气界面温室气体通量日变化观测及影响因素分析 黄文敏,朱孔贤,赵玮,余博识,袁希功,冯瑞杰,毕永红,胡征宇(1270)

变异系数法评价人类活动对地下水环境的影响 赵微,林健,王树芳,刘记来,陈忠荣,寇文杰(1277)

基于 ArcSWAT 模型的长乐江流域非点源氮素污染源识别和分析 邓欧平,孙嗣咏,吕军(1284)

西安周边河流溶解无机碳浓度及同位素组成初探 郭威,李祥忠,刘卫国(1291)

滇池流域宝象河暴雨径流初始冲刷效应 郭怀成,向男,周丰,王永华,李发荣,朱翔,毛国柱,于书霞,李娜,盛虎,杨永辉,何成杰,王翠榆(1298)

三峡库区沉积物秋冬初的磷释放通量估算 牛凤霞,肖尚斌,王雨春,刘德富,黎国育,王亮,纪道斌,杨正健(1308)

海南东部河流、河口及近岸水域颗粒态重金属的分布及污染状况 辛成林,任景玲,张桂玲,郭亚平,张国玲,刘素美(1315)

黄河口表层沉积物中重金属的环境地球化学特征 吴斌,宋金明,李学刚(1324)

扎龙湿地沉积物重金属空间分布特征及其潜在生态风险评价 叶华香,臧淑英,张丽娟,张玉红(1333)

上海市典型疏浚泥重金属生态风险评价 唐庆丽,程金平,高昊旻,姚磊,蒋真毅,吴旻,谢翠松,梁海,王鹤,皮帅帅,余朝毅(1340)

我国沿海地区城镇污水处理厂污泥重金属污染状况及其处置分析 张灿,陈虹,余忆玄,王立军,韩建波,陶平(1345)

江苏某地长江、太湖水源水及出厂水中有机物雌激素活性的比较 金涛,吕学敏,曾一凡,张冰冰,马鲲鹏,姜朴,唐非(1351)

北京市污水处理厂中邻苯二甲酸酯污染水平及其归趋 周益奇,刘云霞(1357)

降解 DMF 引起污泥毒性及其毒性空间分布特性研究 胡园园,杨娜,丁毅,徐文璐,陈秀荣,艾奇峰,陈善佳,王利鹏,黄华(1363)

渤海湾有机锡污染对野生脉红螺的生态风险 安立会,张燕强,宋双双,刘玥,高俊敏,陈浩,赵兴茹,雷坤,郑丙辉(1369)

巨牡蛎(*Crassostrea* sp.)对燃煤电厂脱硫海水中汞的生物累积 刘锡尧,袁东星,陈耀瑾(1374)

咪唑氯盐离子液体对蚯蚓急性毒性及体重影响研究 黄若男,范军杰,涂宏志,谭凌燕,刘惠君,徐冬梅(1380)

铝盐混凝除砷影响因素及机制研究 陈桂霞,胡承志,朱灵峰,童华卿(1386)

混凝和活性炭吸附去除微污染源水中 DON 的研究 刘冰,余国忠,古励,赵承美,李清飞,翟慧敏(1392)

活性炭催化臭氧氧化扑热息痛的机制研究 王佳裕,戴启洲,鱼杰,颜亦舟,陈建孟(1402)

氯酚溶液的 γ 辐照还原降解研究 彭云霞,何仕均,龚文琪,王建龙(1411)

C/N 比对反硝化过程中亚硝酸盐积累的影响分析 袁怡,黄勇,邓慧萍,盛学敏,潘杨,李祥(1416)

以甲醇为碳源生物反硝化过程释放一氧化二氮的试验研究 翟晓峰,蒋成爱,吴光学,曾运涛(1421)

固体纤维素类废物作为反硝化碳源滤料的比选 李斌,郝瑞霞(1428)

基于能源回收的城市污水厌氧氨氧化生物脱氮新工艺 卢健聪,高大文,孙学影(1435)

多模式厌氧/缺氧/好氧污水处理工艺的稳态与动态模拟 周振,吴志超,王志伟,杜兴庄,蒋玲燕,邢灿(1442)

高氨氮废水与城市生活污水短程硝化系统菌群比较 赵志瑞,马斌,张树军,李滨,白志辉,王晓辉,庄国强,张洪勋(1448)

活性污泥絮体的分形结构分析 阮晓东,刘俊新(1457)

负荷交替法快速培养好氧硝化颗粒污泥的研究 沈娜,杨昌柱,濮文虹,罗应东(1464)

预加不同比例不同粒径好氧颗粒对 SBR 中好氧颗粒污泥形成的影响 熊光城,濮文虹,杨昌柱(1472)

同时回收氮磷提高碱性发酵污泥脱水性能的机制研究 张超,陈银广,顾国维(1479)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性 谢薇薇,袁伊,王志伟,孔繁翔,史小丽(1485)

阿魏酸和香豆素对铜绿微囊藻的化感作用 郭亚丽,傅海燕,黄国和,高攀峰,柴天,严滨,廖欢(1492)

象山港国华电厂强增温海域浮游动物群落结构和多样性的时空特征 朱艺峰,黄简易,林霞,杨莹,邢超,严小军(1498)

环氧树脂降解嗜盐菌的筛选及其处理高盐环氧树脂废水的特性研究 王进,徐真,彭书传,夏明山,岳正波,陈天虎(1510)

铜绿假单胞菌胞内酶粗提液对十溴联苯醚的降解 史广宇,尹华,叶锦韶,彭辉,张娜,何宝燕(1517)

酵母提取物对葡萄糖发酵生产生物破乳菌 *Alcaligenes* sp. S-XJ-1 的影响 黄翔峰,王凯,黎明霞,王彩林,陆丽君,刘佳(1524)

玉米秸秆厌氧降解复合菌系的微生物群落结构 乔江涛,郭荣波,袁宪正,师晓爽,许晓晖,范晓蕾,邱艳玲(1531)

红霉素对产甲烷菌的抑制及其驯化 刘子旭,孙力平,李玉友,邱春生(1540)

4 种 NAPLs 污染物在二维砂箱中的指进锋面形态特征研究 杨宾,李慧颖,伍斌,杜晓明,李发生(1545)

污灌区土壤中多环芳烃的垂直分布及可能来源 姚林林,张彩香,李佳乐,廖小平,王焰新(1553)

呼和浩特市不同功能区土壤重金属污染特征及评价 郭伟,孙文惠,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,张君(1561)

水稻光合同化碳在土壤不同粒径、密度分组中的分配特征 李苗苗,聂三安,陈晓娟,罗璐,朱捍华,石辉,葛体达,童成立,吴金水(1568)

亚热带不同稻田土壤微生物量碳的剖面分布特征 盛浩,周萍,袁红,廖超林,黄运湘,周清,张杨珠(1576)

施用堆腐有机肥对水稻土中六氯苯脱氯降解影响 刘翠英,蒋新(1583)

螯合剂和生物表面活性剂对 Cu、Pb 污染壤土的淋洗修复 刘霞,王建涛,张萌,王力,杨亚提(1590)

不同温度下烧制的秸秆炭对可变电荷土壤吸附 Pb(II) 的影响 蒋田雨,姜军,徐仁扣,周立祥,王世梅(1598)

绿色木霉改性玉米秸秆溢油吸附剂的制备及其性能研究 蓝舟琳,彭丹,郭楚玲,朱超飞,薛秀玲,党志(1605)

改性与成型层状氢氧化镁铝对不同水体中 PO₄³⁻ 的脱除性能 邢坤,王海增(1611)

羧基化碳纳米管载铂催化剂对微生物燃料电池阴极氧还原性能的影响 涂丽杏,朱能武,吴平霄,李平,吴锦华(1617)

新型生物质活性炭烟气脱硫研究 刘洁岭,汤争光,陈杰,蒋文举,江霞(1623)

城市工业行业能源消费强度等级划分方法及应用 毛建素,马兰(1628)

厦门城市化进程中的居民食物碳消费及其环境负荷 闫祯,崔胜辉,李桂林,任引,徐礼来(1636)

《环境科学》征订启事(1283) 《环境科学》征稿简则(1332) 信息(1350,1509,1582,1644) 专辑征稿通知(1523)

利用流式细胞仪分选技术研究湖泊真核超微藻的遗传多样性

谢薇薇^{1,2}, 龚伊¹, 王志伟², 孔繁翔¹, 史小丽^{1*}

(1. 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008; 2. 南京农业大学生命科学学院, 南京 210095)

摘要: 利用流式细胞仪分选技术及 PCR、构建基因克隆库的方法初步调查了冬季太湖、玄武湖、紫霞湖真核超微藻的遗传多样性及影响因子, 以揭示 3 个湖泊真核超微藻的差异, 更全面地了解不同湖泊浮游藻类的群落结构. 结果表明不同湖泊真核超微藻多样性存在明显差异, 玄武湖以隐藻 (Cryptophyta) 为主, 紫霞湖优势种为隐藻, 还有少量金藻 (Chrysophyta), 太湖真核超微藻多样性较为丰富, 有金藻、隐藻、硅藻 (Bacillariophyta)、绿藻 (Chlorophyta), 且不同湖区也有差异. 梅梁湾 N2 点以金藻为主, 贡湖湾 N4 点隐藻、硅藻、绿藻数量相当, 但发现较多真菌, 靠近大湖区的 W2 点多样性最为丰富, 4 种藻均有发现. 不同湖泊真核超微藻多样性与环境因子的冗余分析表明, 总磷含量与其多样性显著相关.

关键词: 流式细胞仪; 分选; 湖泊; 真核超微藻; 遗传多样性

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)04-1485-07

Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes

XIE Wei-wei^{1,2}, GONG Yi¹, WANG Zhi-wei², KONG Fan-xiang¹, SHI Xiao-li¹

(1. State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 2. College of Life Science, Nanjing Agricultural University, Nanjing 210095, China)

Abstract: A novel approach based on flow cytometric sorting followed by construction of 18S rRNA clone libraries was used to study the diversity of eukaryotic picophytoplankton of lakes. The composition of eukaryotic picophytoplankton community appeared highly variable in three lakes. Eukaryotic picophytoplankton was dominated by Cryptophyta in the Lake Xuanwu, and was mainly composed of Cryptophyta and Chrysophyta in the Lake Zixia. In the Lake Taihu, four phyla were discovered, including Cryptophyta, Chrysophyta, Bacillariophyta and Chlorophyta. Meanwhile, the diversity of eukaryotic picophytoplankton differed in various lake regions. In the Meiliang Bay, Chrysophyta was the dominant, and the other three phyla were found in the Gonghu Bay. In the central lake, all of those four phyla were discovered, implying this region contained the highest diversity. The canonical correspondence analysis between the diversity of eukaryotic picophytoplankton and environmental factors revealed the concentration of total phosphorus had the highest important impact on the eukaryotic picophytoplankton communities.

Key words: flow cytometry; sort; lakes; eukaryotic picophytoplankton; genetic diversity

真核超微藻 (eukaryotic picophytoplankton) 为粒径在 2 ~ 3 μm 之间的真核原生生物^[1]. 光合自养型真核超微藻广泛分布于海洋和淡水生态系统中, 因其具有较大的比表面积和高的碳吸收效率, 是水体初级生产力的重要贡献者^[2-4], 在水生生态系统的物质循环和能量流动中起着十分重要的作用^[5]. 超微型藻个体微小、形态相似, 无法用传统显微镜观察法辨别, 直到近 10 年来, 随着分子生物学技术的应用, 人们才对超微型藻多样性有了进一步的认识^[6-8]. 直接采用真核生物的通用引物扩增滤膜上的超微藻, 其克隆测序结果不能客观反映超微型藻类的多样性^[9], 克隆测序的结果有三分之二以上属于异养真核微生物, 与其它方法如荧光原位杂交得

到的结果不同^[10,11], 这可能是由于环境样品 DNA 的复杂性^[12,13].

流式细胞仪 (flow cytometry, FCM) 用于浮游植物方面的研究已有 20 多年, 主要根据细胞的大小及色素差异对一些特定种群进行识别与计数^[14,15]. 然而利用流式细胞仪分选功能研究超微藻则十分少见, 只有少量的关于原核超微藻的研究^[16,17], 以及 Marie 等^[18] 和 Shi 等^[19] 关于海洋真核超微藻的研究. 近年来开发了流式细胞仪分选和分子生物学结

收稿日期: 2012-06-27; 修订日期: 2012-08-07

基金项目: 国家自然科学基金项目 (31270507, 31070420); 江苏省自然科学基金项目 (BK2011877)

作者简介: 谢薇薇 (1988 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为环境微生物, E-mail: xieweiwei1988@163.com

* 通讯联系人, E-mail: xlshi@niglas.ac.cn

合的方法,根据藻的自发荧光分选收集超微型真核藻和超微蓝藻,用不同引物对其构建克隆库,该方法能大大提高超微型藻序列在整个克隆库中的比重,更好地揭示光合自养超微型浮游藻类的多样性^[8, 18, 19].

本研究通过流式细胞仪分选出 3 个湖泊的真核超微藻,利用真核生物通用引物构建基因克隆库,以揭示 3 个湖泊真核超微藻的遗传多样性,帮助人们更全面地了解不同湖泊浮游藻类的群落结构。

1 材料与方法

1.1 湖泊简介及藻样采集

我国第三大淡水湖太湖面积为 2 428 km²,平均深度为 1.89 m,最大深度 2.6 m,湖泊总蓄水量为 4.43 × 10⁹ m³,是典型的浅碟形湖泊。近年来由于污染严重,蓝藻大规模暴发,太湖已成为一个富营养化湖泊。南京市小型浅水湖泊玄武湖面积 3.68 km²,平均水深为 1.6 m,库容约为 5 × 10⁶ m³。近 20 年玄武湖水体富营养化日趋严重,虽然对湖泊采取了截污、清淤等措施,富营养化水平仍然较高,浮游植物密度高,时常出现水华。南京紫金山上紫霞湖面积为 0.22 km²,最大水深为 8.6 m,是一小型人工蓄水湖泊,外源营养物质补给少,营养水平较低。

太湖面积较大,选择 3 个采样位点(图 1),梅梁湾 N2 点,贡湖湾 N4 点,以及靠近大湖面区域的 W2 点。玄武湖、紫霞湖面积较小,选择湖心采样。2011 年 12 月分别采集这 5 个位点,取表层和底层混合水各 1 L,水样用 20 μm 的滤膜粗滤,去除较大的浮游动物及藻类,分选前置于 -80℃ 超低温冰箱保存。

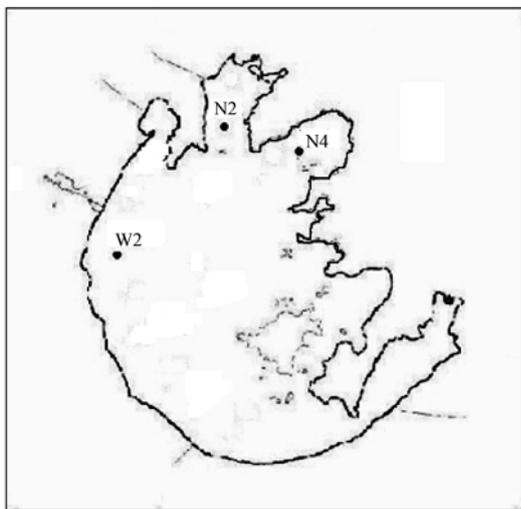


图 1 太湖采样点分布示意

Fig. 1 Sampling sites in the Lake Taihu

1.2 流式细胞仪分选

采用流式细胞仪(FACSVantage SE, BD)对藻细胞进行分选。激光器为 Coherent 水冷氩离子激光器,激发波长为 488 nm 和 635 nm。产生的固有信号包括前向光散射(FSC)及侧向光散射(SSC),分别表征细胞大小和颗粒性质。其荧光信号通过 3 个检测通道被收集:FL2(575/26 nm),表征藻红素含量;FL3(695/40 nm),表征叶绿素 a 含量;FL4(670/14 nm),表征藻蓝素含量。R2 区域藻蓝素较高,主要为原核蓝藻。分选左侧藻蓝素较低的 R1 区域真核超微藻(图 2),收集 10 万个细胞,加 180 μL 细胞溶解液,置于 -80℃ 冰箱保存,用于分子生物学实验。

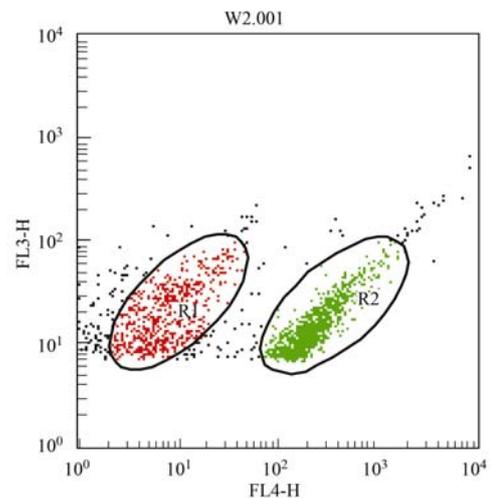


图 2 流式细胞仪分选

Fig. 2 Flow cytometric sorting

1.3 藻样 DNA 的提取及扩增

采用 Qiagen 试剂盒(DNeasy[®] Blood & Tissue Kit)提取分选藻样的 DNA,用于目的片段扩增。

扩增条件:50 μL PCR 反应液中含有 25 mmol·L⁻¹ MgCl₂, 2.5 mmol·L⁻¹ dNTP, 10 × buffer, 5 U·μL⁻¹ Taq DNA 聚合酶(TaKaRa 公司)。采用真核生物通用引物 Euk328f: 5' ACCTGGTTGATCC TGCCAG 3', Euk329r: 5' TGATCCTTCYGCAGG TTCAC 3'。扩增反应程序:95℃ 预变性 5 min, 然后 95℃ 变性 60 s, 57℃ 复性 90 s, 72℃ 延伸 90 s, 循环 35 次,最后 72℃ 延伸 10 min。

扩增完成后用 1% 琼脂糖凝胶电泳检测,切取 PCR 产物目的片段(约 1 780 bp)。采用 Promega 公司的 PCR 纯化试剂盒(Wizard[®] SV Gel and PCR Clean-Up System)进行纯化。

1.4 克隆与序列分析

PCR 产物经纯化回收后与载体 pGEM-T Easy

连接,并转化感受态大肠杆菌,挑取白斑单菌落检测是否为阳性克隆,对扩增出目的片段的菌液进行测序比对。

将测序获得的序列剪切掉载体和引物区,采用 Bellerophon 在线软件分析,去除嵌合体序列。将核苷酸序列相似度为 98% 的克隆定为属于同一 OTU,代表相同的属或种^[20]。本研究共得到 126 个真核超微藻序列,Cluster 软件分析后发现 60 个 OTUs。采用 MAFFT 5.8 software 对本研究得到的 60 个 OTUs 和 43 个参考序列进行比对,Gblocks 软件剪切掉变异较大的区域,Modeltest 软件计算得到针对该 103 个序列构建进化树的最佳参数,最后用 PAUP

4.0 构建 Neighbour Joining 生物进化树,重复 1 000 次得到 Bootstrap 值,MEGA 4.1 软件对进化树进行编辑。

2 结果与分析

2.1 3 个湖泊的水质理化特征

不同湖泊水质理化特征不同,太湖的不同湖区也有差异(表 1)。玄武湖水体富营养化,其总磷含量较高。太湖 3 个位点中 W2 点靠近大湖面,水质相对较好,其总磷含量最低,梅梁湾 N2 点水质较差,其总磷含量较高。紫霞湖因其溶解性营养盐较低,所以叶绿素 a 浓度最低。

表 1 湖泊中各采样点的水质参数(2011-12)

Table 1 Physicochemical parameters in three lakes in December, 2011

位置 ¹⁾	TN /mg·L ⁻¹	TP /mg·L ⁻¹	Chl-a /μg·L ⁻¹	PO ₄ ³⁺ -P /μg·L ⁻¹	NH ₄ ⁺ -N /mg·L ⁻¹	NO ₃ /mg·L ⁻¹	NO _x -N /mg·L ⁻¹	pH	DO /%
TH-N2	2.08	0.13	6.70	6.00	0.02	0.44	0.45	7.95	101.7
TH-N4	2.80	0.09	7.90	28.77	0.29	1.47	1.51	7.80	99.5
TH-W2	1.68	0.07	7.00	14.59	0.05	0.38	0.39	7.79	93.9
XWH	2.11	0.15	8.04	9.78	0.17	1.36	1.39	7.80	129.7
ZXH	3.69	0.15	3.62	0.57	0.11	2.67	2.70	8.20	98.6

1) TH-N2: 太湖 N2; TH-N4: 太湖 N4; TH-W2: 太湖 W2; XWH: 玄武湖; ZXH: 紫霞湖

2.2 3 个湖泊的主要群落结构分析

不同湖泊的真核超微藻多样性存在明显差异(图 3)。太湖真核超微藻的多样性相对丰富,有金藻(Chrysophyta)、隐藻(Cryptophyta)、绿藻(Chlorophyta)和硅藻(Bacillariophyta),但 3 个点位各有不同。N2 点真核超微藻以金藻为主(35%),及少量隐藻、绿藻,各约 10%。同时也发现了部分其他真核生物,如囊泡虫(Alveolata)、真菌(Fungi)。N4 点真核超微藻有硅藻、隐藻、绿藻,但 80% 为一些未培养的真菌。W2 点的多样性最为丰富,4 种藻

均有发现,除绿藻相对较少(10%)外,其余 3 种藻数量相当约 25%。玄武湖的真核超微藻较为单一,只发现了隐藻,但同时出现较多的囊泡虫。紫霞湖优势种为隐藻(90%),且存在少量金藻。

2.3 优势种群序列分析

将测序结果与 GenBank 中的序列进行比对,结果表明真核超微藻主要为金藻、隐藻、绿藻及硅藻这四大门类(表 2)。金藻序列与 *Chrysophyceae* sp. 18、*Mallomonas elongata*、*Ochromonad* 等种类相似。隐藻序列与 *Cryptomonas* sp. M420、*Campylomonas reflexa*、*Campylomonas reflexa* 等种类相似,还有部分未培养的隐藻。绿藻序列与 *Crustomastix* sp. MBIC10709、*Chlamydomonas* sp. MBIC10592、*Tetraselmis* sp. RCC 500 等种类相似。硅藻序列与 *Cyclotella* sp. MC01、*Cyclotella choctawhatcheeana*、*Stephanodiscus hantzschii* 等种类相似。

2.4 系统发育学分析

本研究共得到 126 个真核超微藻序列,分析后发现 60 个 OTUs,构建 NJ 进化树(图 4)。通过与国内外研究发现的序列相比较^[21-24],确定了大部分真核超微藻的具体分类,主要属于隐藻、金藻、硅藻和绿藻,但还有部分为未培养的藻类,无法进行精确定位。本研究所得到的隐藻序列主要分布在 Clade

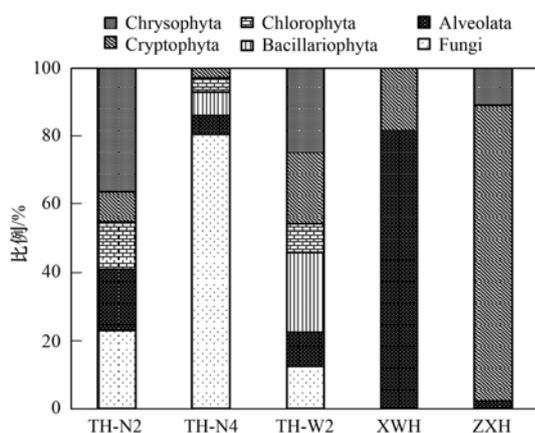


图 3 各位点主要群落组成

Fig. 3 Representative phylogenetic groups in different sites

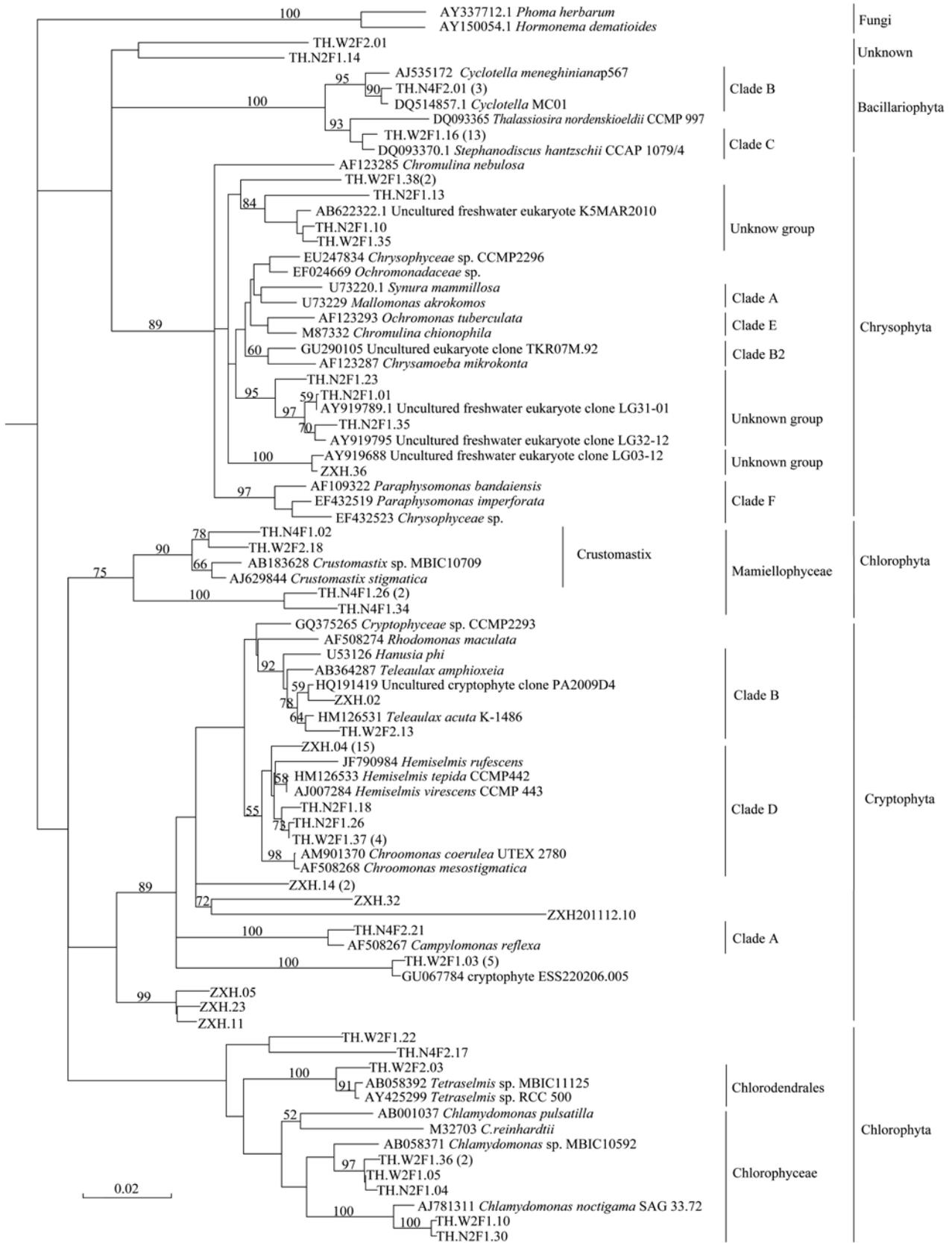


图 4 基于 18S rRNA 的 3 个湖泊真核超微藻系统发育学分析

Fig. 4 Phylogenetic tree of 18S rRNA gene sequences for the eukaryotic picophytoplankton

表 2 优势种群的序列分析
Table 2 Sequence analysis of the dominant species

类群	相似序列	相似序列收录号	相似度 /%
金藻	<i>Chrysophyceae</i> sp. I8	EF432523.1	95
	<i>Mallomonas elongata</i>	GU935621.1	99
	<i>Mallomonas striata</i>	M87333.1	99
	<i>Mallomonas tonsurata</i>	FJ030893.1	99
	<i>Ochromonad</i>	JF698787.1	99
隐藻	<i>Cryptomonas</i> sp. M420	AJ007280.1	97
	<i>Campylomonas reflexa</i>	AF508267.1	98
	<i>Chroomonas mesostigmatica</i>	AF508268.1	99
	<i>Campylomonas reflexa</i>	AJ007283.1	96
	<i>Hemiselmis virescens</i>	AJ007284.1	98
绿藻	<i>Teleaulax amphioxea</i>	AJ421146.1	97
	<i>Teleaulax acuta</i>	HM126531.1	97
	<i>Crustomastix</i> sp. MBIC10709	AB183628.1	95
	<i>Crustomastix stigmatica</i>	AJ629844.1	97
	<i>Chlamydomonas</i> sp. MBIC10592	AB058371.1	99
硅藻	<i>Chlamydomonas noctigama</i>	AJ781311.1	98
	<i>Tetraselmis</i> sp. RCC 500	AY425299.1	98
	<i>Cyclotella</i> sp. MC01	DQ514857.1	99
	<i>Cyclotella choctawhatcheeana</i>	AM712618.1	99
	<i>Cyclotella meneghiniana</i>	AJ535172.1	99
	<i>Stephanodiscus hantzschii</i>	DQ093370.1	99

D 隐鞭毛藻 *Hemiselmis* 中, 其次分布在 Clade B 和 Clade A 中^[22]. 太湖的一个序列与卢森堡富营养的 Esch-sur-Sure 湖中的序列相似. 紫霞湖得到的几个序列在进化树中明显独立于其他分支, 可能是一些未知的新种. 本研究得到太湖和紫霞湖金藻序列并没有分布在 Robert 等^[21] 定义的金藻分支中 (Clade A、Clade E、Clade B2 和 Clade F), 而是与来自于贫营养湖泊 George 湖的克隆序列聚类在一起^[25]. 本研究所得的绿藻序列主要分布在衣藻纲 (*Chlamydomonas*) 中, 有一个序列与四片藻目 *Tetraselmis* 聚类在一起, 另外有两个序列分布在 *Crustomastix* 中, 太湖的 4 个序列不与任何分支聚类在一起, 可能是一些未知绿藻新种. 本研究得到的硅藻序列主要与小环藻 (*Cyclotella*) 和新星形冠盘藻 (*Stephanodiscus*) 归为一类.

2.5 统计分析

用 CANOCO 4.5 软件分析不同湖泊真核超微藻多样性与环境因子的相关性. 去趋势对应分析 (detrended correspondence analysis, DCA) 的结果显示, 样品矩阵第一轴的梯度长度 < 2 , 因此本研究中的不同湖泊真核超微藻多样性与环境因子具有线性相关关系, 选择冗余分析 (RDA) 来计算其相关性. 用于统计分析的所有数据均经过 $\lg(X + 1)$ 转换. 由图 5 可见, 不同湖泊的真核超微藻多样性存在较

大差异. 通过软件和蒙特卡罗筛选检验 (499 个非限制性筛选循环) 发现真核超微藻的多样性和总磷 (TP) 含量显著相关 ($P < 0.05$). 第一轴和第二轴的特征值分别是 0.454 和 0.294, 这两个轴共解释了 74.8% 真核超微藻的遗传多样性差异.

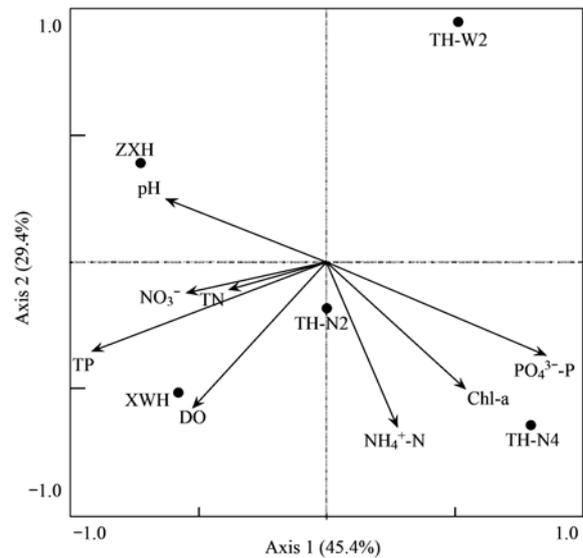


图 5 不同湖泊真核超微藻多样性与环境因子的 RDA 分析
Fig. 5 Redundancy analysis (RDA) biplot showed various compositions of the eukaryotic picoplankton were in relation to the important environmental factors in three lakes

3 讨论

传统收集超微藻的方法是用滤膜过滤, 不仅需要的水样多而且会收集到这个粒径的所有生物, 除了真核超微藻还有较多的蓝藻、细菌、真菌、杂质等, 严重影响扩增效率及扩增的多样性. 利用流式细胞仪分选只需要少量的水样, 分选出 10 万个细胞即可^[18], 且可有效去除很多人们不需要的物质, 如水体中大部分不能自发荧光的细菌、异养原生生物、真菌等. 原核蓝藻由于藻蓝素含量较高, 在流式细胞仪中与真核超微藻明显区分开, 可以更好地得到所需的种群. 所以利用流式细胞仪分选后建库可以扩增出一些含量较少的种群, 较过滤膜的方法得到的多样性更为丰富^[19].

如果某些异养原生生物是以寄生或共生的方式与超微型真核藻共存, 流式分选并不能完全将光合自养的超微型真核藻和这些异养超微型原生生物分开^[8]. 本研究克隆序列的比对结果表明, 在得到光合自养型的超微型真核藻序列的同时, 笔者也发现了一些异养超微型原生生物, 包括真菌、囊泡虫等. 近几年国外研究结果也表明真菌是湖泊中光合自养

型超微型真核藻类的寄生体,可能对藻的营养代谢和物质转化起重要的作用^[26],此外海洋研究结果表明囊泡虫是海洋超微型真核藻的主要寄生体^[27,28]. 本实验结果表明真菌和囊泡虫可能都是湖泊超微型藻的寄生体.

本研究选取富营养化的玄武湖,和营养水平较低的紫霞湖,以及空间异质性较大的太湖为研究对象,目的是比较不同湖泊超微型藻群落结构特征. 研究发现3个湖泊及太湖不同位点均有隐藻,可见隐藻适应性强,生长旺盛,这与之前采用 Plastid 16S rRNA 基因构建的基因克隆库结果一致^[29]. 太湖中除隐藻还发现了绿藻、硅藻和金藻,这些序列与许多海洋中的藻如 *Tetraselmis* sp. RCC 500、*Chlamydomonas noctigama*、*Crustomastix* sp. MBIC10709、*Cyclotella* sp. MC01 等聚在一起^[23,24],表明这些藻类分布广泛,可以在海洋及湖泊等不同水生环境中生存. 紫霞湖也发现了一些金藻序列.

由于真核生物的演化过程十分复杂,其系统进化树远没有细菌的成熟,除绿藻门外,金藻、隐藻和硅藻门的系统进化树都没有很明确的分支和名称,很难对环境序列准确定位. 大部分有关超微真核藻遗传多样性的研究都是关于海洋的,而湖泊的研究相对滞后^[30]. 本研究得到的序列有许多没有和已知的纯培养藻聚在一起,这表明湖泊中还有许多未知藻类,人们目前对于湖泊真核超微藻的认识还很有限,需要更多的深入研究和调查.

本研究表明总磷浓度是不同湖泊真核超微藻多样性的主要影响因子,两者存在显著相关性. 文献^[31,32]发现太湖不同湖区微型真核浮游生物的遗传多样性与总磷浓度显著相关. 文献^[33~35]发现不同湖泊微型真核浮游生物的群落组成与营养水平密切相关. 本研究发现太湖3个位点中湖心总磷浓度最低,而其多样性最为丰富,玄武湖总磷浓度高,其只发现了隐藻,进一步证明了微型真核生物的群落组成与营养水平相关.

4 结论

玄武湖、紫霞湖、太湖这3个湖泊的真核超微藻多样性存在明显差异. 富营养化的城市小型浅水湖泊玄武湖真核超微藻种类单一,以隐藻为主;贫营养的紫霞湖有金藻、隐藻;大型浅水湖泊太湖真核超微藻多样性丰富,有金藻、隐藻、绿藻及硅藻,且靠近大湖面的位点真核超微藻多样性最为丰富. 统计分析表明总磷浓度与真核超微藻多样性显著相

关,说明总磷是重要的环境影响因子.

参考文献:

- [1] Vault D, Eikrem W, Viprey M, *et al.* The diversity of small eukaryotic phytoplankton ($\leq 3 \mu\text{m}$) in marine ecosystems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 2008, **32**(5): 795-820.
- [2] Li W K W. Primary production of prochlorophytes, cyanobacteria, and eucaryotic ultraphytoplankton: measurements from flow cytometric sorting [J]. *Limnology and Oceanography*, 1994, **39**(1): 169-175.
- [3] Jardillier L, Zubkov M V, Pearman D J, *et al.* Significant CO₂ fixation by small prymnesiophytes in the subtropical and tropical northeast Atlantic Ocean [J]. *ISME Journal*, 2010, **4**(9): 1180-1192.
- [4] Cuvelier M L, Allen A E, Monier A, *et al.* Targeted metagenomics and ecology of globally important uncultured eukaryotic phytoplankton [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2010, **107**(33): 14679-14684.
- [5] Platt T, Subba-Rao D V, Irwin B. Photosynthesis of picoplankton in the oligotrophic ocean [J]. *Nature*, 1983, **301**(24): 702-704.
- [6] Moon-van der Staay S Y, Wachter R D, Vault D. Oceanic 18S rDNA sequences from picoplankton reveal unsuspected eukaryotic diversity [J]. *Nature*, 2001, **409**(6820): 607-610.
- [7] Lepère C, Boucher D, Jardillier L, *et al.* Succession and regulation factors of small eukaryote community composition in a lacustrine ecosystem (Lake Pavin) [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2006, **72**(4): 2971-2981.
- [8] Shi X L, Marie D, Jardillier L, *et al.* Groups without cultured representatives dominate eukaryotic picophytoplankton in the oligotrophic South East Pacific Ocean [J]. *PLoS ONE*, 2009, **4**(10): e7657.
- [9] Moon-van der Staay S Y, Van der Staay G W M, Guillou L, *et al.* Abundance and diversity of prymnesiophytes in the picoplankton community from the equatorial Pacific Ocean inferred from 18S rDNA sequences [J]. *Limnology and Oceanography*, **45**(1): 98-109.
- [10] Not F, Latasa M, Marie D, *et al.* A single species, *Micromonas pusilla* (Prasinophyceae), dominates the eukaryotic picoplankton in the western English Channel [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2004, **70**(7): 4064-4072.
- [11] Masquelier S, Vault D. Distribution of micro-organisms along a transect in the South-East Pacific Ocean (BIOSOPE cruise) using epifluorescence microscopy [J]. *Biogeosciences*, 2008, **5**(2): 311-321.
- [12] Zhu F, Massana R, Not F, *et al.* Mapping of picoeucaryotes in marine ecosystems with quantitative PCR of the 18S rRNA gene [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2005, **52**(1): 79-92.
- [13] Marie D, Zhu F, Balagué V, *et al.* Eukaryotic picoplankton communities of the Mediterranean Sea in summer assessed by molecular approaches (DGGE, TTGE, QPCR) [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2006, **55**(3): 403-415.

- [14] Veldhuis M J W, Kraay G W. Application of flow cytometry in marine phytoplankton research: current applications and future perspectives[J]. *Scientia Marina*, 2000, **64**(2): 121-134.
- [15] Czechowska K, Johnson D R, Van der Meer J R. Use of flow cytometric methods for single-cell analysis in environmental microbiology[J]. *Current Opinion in Microbiology*, 2008, **11**(3): 205-212.
- [16] Wallner G, Fuchs B, Spring S, *et al.* Flow sorting of microorganisms for molecular analysis [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 1997, **63**(11): 4223-4231.
- [17] Fuchs B M, Wobken D, Zubkov M V, *et al.* Molecular identification of picoplankton populations in contrasting waters of the Arabian Sea[J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2005, **39**(2): 145-157.
- [18] Marie D, Shi X L, Rigaut-Jalabert F, *et al.* Use of flow cytometric sorting to better assess the diversity of small photosynthetic eukaryotes in the English Channel [J]. *FEMS Microbiology Ecology*, 2010, **72**(2): 165-178.
- [19] Shi X L, Lepère C, Scanlan D J, *et al.* Plastid 16S rRNA gene diversity among eukaryotic picophytoplankton sorted by flow cytometry from the South Pacific Ocean[J]. *PLoS ONE*, 2011, **6**(4): e18979.
- [20] Romari K, Vaultot D. Composition and temporal variability of picoeukaryote communities at a coastal site of the English Channel from 18S rDNA sequences [J]. *Limnology and Oceanography*, 2004, **49**(3): 784-798.
- [21] Andersen R A, Van de Peer Y, Potter D, *et al.* Phylogenetic analysis of the SSU rRNA from members of the chrysophyceae [J]. *Protist*, 1999, **150**(1): 71-84.
- [22] Deane J A, Strachan I M, Saunders G W, *et al.* Cryptomonad evolution; nuclear 18S rDNA phylogeny versus cell morphology and pigmentation [J]. *Journal of Phycology*, 2002, **38**(6): 1236-1244.
- [23] Viprey M, Guillou L, Ferréol M, *et al.* Wide genetic diversity of picoplanktonic green algae (Chloroplastida) in the Mediterranean Sea uncovered by a phylum-biased PCR approach [J]. *Environmental Microbiology*, 2008, **10**(7): 1823-1830.
- [24] Alverson A J, Jansen R K, Theriot E C. Bridging the Rubicon: Phylogenetic analysis reveals repeated colonizations of marine and fresh waters by thalassiosiroid diatoms [J]. *Molecular Phylogenetics and Evolution*, 2007, **45**(1): 193-210.
- [25] Richards T A, Vepritskiy A A, Gouliamova D E, *et al.* The molecular diversity of freshwater picoeukaryotes from an oligotrophic lake reveals diverse, distinctive and globally dispersed lineages [J]. *Environmental Microbiology*, 2005, **7**(9): 1413-1425.
- [26] Lepère C, Domaizon I, Debroas D. Unexpected importance of potential parasites in the composition of the freshwater small-eukaryote community [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2008, **74**(10): 2940-2949.
- [27] Majaneva M, Rintala J M, Piisilä M, *et al.* Comparison of wintertime eukaryotic community from sea ice and open water in the Baltic Sea, based on sequencing of the 18S rRNA gene[J]. *Polar Biology*, 2012, **35**(6): 875-889.
- [28] Díez B, Pedrós-Alió C, Massana R. Study of genetic diversity of eukaryotic picoplankton in different oceanic regions by small-subunit rRNA gene cloning and sequencing [J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2001, **67**(7): 2932-2941.
- [29] 谢薇薇, 王志伟, 孔繁翔, 等. 太湖光合自养真核超微藻遗传多样性初探[J]. *湖泊科学*, 2012, **24**(1): 123-128.
- [30] Callieri C. Picophytoplankton in freshwater ecosystems: the importance of small-sized phototrophs[J]. *Freshwater Reviews*, 2007, **1**(1): 1-28.
- [31] Chen M J, Chen F Z, Yu Y, *et al.* Genetic diversity of eukaryotic microorganisms in Lake Taihu, a large shallow subtropical lake in China[J]. *Microbial Ecology*, 2008, **56**(3): 572-583.
- [32] 陈美军, 孔繁翔, 陈非洲, 等. 太湖不同湖区真核微型浮游生物基因多样性的研究[J]. *环境科学*, 2008, **29**(3): 769-774.
- [33] Lefranc M, Thénot A, Lepère C, *et al.* Genetic diversity of small eukaryotes in lakes differing by their trophic status[J]. *Applied and Environmental Microbiology*, 2005, **71**(10): 5935-5942.
- [34] Gaedke U, Seifried A, Adrian R. Biomass size spectra and plankton diversity in a shallow eutrophic lake[J]. *International Review of Hydrobiology*, 2004, **89**(1): 1-20.
- [35] 赵璧影, 陈美军, 孙颖, 等. 南京 8 个湖泊超微真核浮游生物遗传多样性的研究[J]. *环境科学*, 2010, **31**(5): 1293-1298.

CONTENTS

Water-soluble Inorganic Salts in Ambient Aerosol Particles in Tangshan	MIAO Hong-yan, WEN Tian-xue, WANG Li, <i>et al.</i> (1225)
Characterization of Water-soluble ions in PM _{2.5} at Dinghu Mount	ZHAO Ya-nan, WANG Yue-si, WEN Tian-xue, <i>et al.</i> (1232)
Characteristics of Mass Size Distributions of Water-Soluble Inorganic Ions During Summer and Winter Haze Days of Beijing	HUANG Yi-min, LIU Zi-ru, CHEN Hong, <i>et al.</i> (1236)
Characterising Seasonal Variation and Spatial Distribution of PM _{2.5} Species in Shenzhen	YUN Hui, HE Ling-yan, HUANG Xiao-feng, <i>et al.</i> (1245)
Characteristics of PAHs in the Atmosphere in Winter and Summer in the Urban and Suburban of Fuzhou	YI Zhi-gang, HUANG Xing-ran, BI Jun-qi, <i>et al.</i> (1252)
Seasonal Variation and Spatial Distribution of Typical Organochlorine Pesticides in the Atmosphere of Hexi Corridor and Lanzhou, Northwest China	DING Zhong-yuan, MAO Xiao-xuan, MA Zi-long, <i>et al.</i> (1258)
Simulation of Air Pollution Characteristics and Estimates of Environmental Capacity in Zibo City	XUE Wen-bo, WANG Jin-nan, YANG Jin-tian, <i>et al.</i> (1264)
Diurnal Changes in Greenhouse Gases at Water-Air Interface of Xiangxi River in Autumn and Their Influencing Factors	HUANG Wen-min, ZHU Kong-xian, ZHAO Wei, <i>et al.</i> (1270)
Influence of Human Activities on Groundwater Environment Based on Coefficient Variation Method	ZHAO Wei, LIN Jian, WANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1277)
Nitrogen Non-Point Source Pollution Identification Based on ArcSWAT in Changde River	DENG Ou-ping, SUN Si-yang, LÜ Jun (1284)
Study on the Content and Carbon Isotopic Composition of Water Dissolved Inorganic Carbon from Rivers Around Xi'an City	GUO Wei, LI Xiang-zhong, LIU Wei-guo (1291)
First Flush Effects of Storm Events of Baoxiang River in Lake Dianchi Watershed	GUO Huai-cheng, XIANG Nan, ZHOU Feng, <i>et al.</i> (1298)
Estimation of Releasing Fluxes of Sediment Phosphorus in the Three Gorges Reservoir During Late Autumn and Early Winter	NIU Feng-xia, XIAO Shang-bin, WANG Yu-chun, <i>et al.</i> (1308)
Distributions and Pollution Status of Heavy Metals in the Suspended Particles of the Estuaries and Coastal Area of Eastern Hainan	XIN Cheng-lin, REN Jing-ling, ZHANG Gui-ling, <i>et al.</i> (1315)
Environmental Characteristics of Heavy Metals in Surface Sediments from the Huanghe Estuary	WU Bin, SONG Jin-ming, LI Xue-gang (1324)
Distribution and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments of Zhalong Wetland	YE Hua-xiang, ZANG Shu-ying, ZHANG Li-juan, <i>et al.</i> (1333)
Ecological Risk Evaluation of Heavy Metals of the Typical Dredged Mud in Shanghai	TANG Qing-li, CHENG Jin-ping, GAO Hao-min, <i>et al.</i> (1340)
Pollution Characteristics of Heavy Metals in Sludge from Wastewater Treatment Plants and Sludge Disposal in Chinese Coastal Areas	ZHANG Can, CHEN Hong, YU Yi-xuan, <i>et al.</i> (1345)
Comparison of the Estrogenic Activity of Organic Compounds in Source Water and Finished Water from the Yangtze River and Taihu Lake in Certain Areas of Jiangsu Province	JIN Tao, LÜ Xue-min, ZENG Yi-fan, <i>et al.</i> (1351)
Occurrence and Fate of Phthalates in Wastewater Treatment Plants in Beijing, China	ZHOU Yi-qi, LIU Yun-xia (1357)
Research on Sludge Toxicity Caused by DMF Biodegradation and Toxicity Spatial Distribution in Sludge Floes	HU Yuan-yuan, YANG Na, DING Yi, <i>et al.</i> (1363)
Study on the Ecological Risk of Wild Veined Rapa Whelk (<i>Rapana venosa</i>) Exposed to Organotin Compounds in Bohai Bay, China	AN Li-hui, ZHANG Yan-qiang, SONG Shuang-shuang, <i>et al.</i> (1369)
Bioaccumulation of Mercury in <i>Crassostrea</i> sp. Exposed to Waste Seawater Discharged from a Coal-fired Power Plant Equipped with a Seawater Flue-gas Desulfurization System	LIU Xi-yao, YUAN Dong-xing, CHEN Yao-jin (1374)
Effects of Imidazolium Chloride Ionic Liquids on the Acute Toxicity and Weight of Earthworm	HUANG Ruo-nan, FAN Jun-jie, TU Hong-zhi, <i>et al.</i> (1380)
Influencing Factors and Mechanism of Arsenic Removal During the Aluminum Coagulation Process	CHEN Gui-xia, HU Cheng-zhi, ZHU Ling-feng, <i>et al.</i> (1386)
Removal of DON in Micro-polluted Raw Water by Coagulation and Adsorption Using Activated Carbon	LIU Bing, YU Guo-zhong, GU Li, <i>et al.</i> (1392)
Mechanism of Catalytic Ozonation for the Degradation of Paracetamol by Activated Carbon	WANG Jia-yu, DAI Qi-zhou, YU Jie, <i>et al.</i> (1402)
Reductive Degradation of Chlorophenols in Aqueous Solution by Gamma Irradiation	PENG Yun-xia, HE Shi-jun, GONG Wen-qi, <i>et al.</i> (1411)
Effect of C/N Ratio on Nitrite Accumulation During Denitrification Process	YUAN Yi, HUANG Yong, DENG Hui-ping, <i>et al.</i> (1416)
Nitrous Oxide Emission During Denitrification for Activated Sludge Acclimated with Methanol as the Organic Carbon	ZHAI Xiao-feng, JIANG Cheng-ai, WU Guang-xue, <i>et al.</i> (1421)
Comparison and Optimization of Cellulose Carbon Source for Denitrification Filter	LI Bin, HAO Rui-xia (1428)
A Novel Municipal Wastewater Treating Process for Energy Production and Autotrophic Nitrogen Removal Based on ANAMMOX	LU Jian-cong, GAO Da-wen, SUN Xue-ying (1435)
Modeling and Dynamic Simulation of the Multimode Anaerobic/Anoxic/Aerobic Wastewater Treatment Process	ZHOU Zhen, WU Zhi-chao, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1442)
Comparing Microbial Community of High Ammonia Wastewater and Municipal Sewage in a Partial Nitrification System	ZHAO Zhi-rui, MA Bin, ZHANG Shu-jun, <i>et al.</i> (1448)
Analysis of the Fractal Structure of Activated Sludge Floes	RUAN Xiao-dong, LIU Jun-xin (1457)
Rapid Cultivation of Aerobic Nitrifying Granular Sludge with Alternate Loading Method	SHEN Na, YANG Chang-zhu, PU Wen-hong, <i>et al.</i> (1464)
Acceleration of the Formation of Aerobic Granules in SBR by Inoculating Different Proportions and Different Diameters of Mature Aerobic Granules	XIONG Guang-cheng, PU Wen-hong, YANG Chang-zhu (1472)
Mechanisms of the Improvement in Dewaterability of Alkaline Fermented Sludge by Simultaneous Ammonium and Phosphate Recovery	ZHANG Chao, CHEN Yin-guang, GU Guo-wei (1479)
Use of Flow Cytometric Sorting to Assess the Diversity of Eukaryotic Picophytoplankton of Lakes	XIE Wei-wei, GONG Yi, WANG Zhi-wei, <i>et al.</i> (1485)
Allelopathy Effects of Ferulic Acid and Coumarin on <i>Microcystis aeruginosa</i>	GUO Ya-li, FU Hai-yan, HUANG Guo-he, <i>et al.</i> (1492)
Spatiotemporal Characteristics of Zooplankton Community Structure and Diversity in the Strong Temperature Increment Seawaters near Guohua Power Plant in Xiangshan Bay	ZHU Yi-feng, HUANG Jian-yi, LIN Xia, <i>et al.</i> (1498)
Screening of Epoxy-degrading Halophiles and Their Application in High-salt Wastewater Treatment	WANG Jin, XU Zhen, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (1510)
Biodegradation of Decabromodiphenyl Ether by Intracellular Enzyme Obtained from <i>Pseudomonas aeruginosa</i>	SHI Guang-yu, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1517)
Influence of Yeast Extract on the Fermentation of Glucose by the Demulsifying Strain <i>Alcaligenes</i> sp. S-XJ-1	HUANG Xiang-feng, WANG Kai, LI Ming-xia, <i>et al.</i> (1524)
Phylogenetic Analysis of Methanogenic Corn Stalk Degrading Microbial Communities	QIAO Jiang-tao, GUO Rong-bo, YUAN Xian-zheng, <i>et al.</i> (1531)
Inhibition of Methanogenium by Erythromycin and Its Domestation	LIU Zi-xu, SUN Li-ping, LI Yu-you, <i>et al.</i> (1540)
Sand Box Study on Fingering Front Morphology for NAPLs Infiltrated in Homogeneous Porous Media	YANG Bin, LI Hui-ying, WU Bin, <i>et al.</i> (1545)
Vertical Distribution and Possible Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbon in Sewage Area Soil	YAO Lin-lin, ZHANG Cai-xiang, LI Jia-le, <i>et al.</i> (1553)
Characteristic and Evaluation of Soil Pollution by Heavy Metal in Different Functional Zones of Hohhot	GUO Wei, SUN Wen-hui, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1561)
Distribution Characteristics of Rice Photosynthesized Carbon in Soil Aggregates of Different Size and Density	LI Miao-miao, NIE San-an, CHEN Xiao-juan, <i>et al.</i> (1568)
Profile of Soil Microbial Biomass Carbon in Different Types of Subtropical Paddy Soils	SHENG Hao, ZHOU Ping, YUAN Hong, <i>et al.</i> (1576)
Effect of Composting Organic Fertilizer Supplies on Hexachlorobenzene Dechlorination in Paddy Soils	LIU Cui-ying, JIANG Xin (1583)
Remediation of Cu-Pb-Contaminated Loess Soil by Leaching with Chelating Agent and Biosurfactant	LIU Xia, WANG Jian-tao, ZHANG Meng, <i>et al.</i> (1590)
Effects of Different Temperatures Biochar on Adsorption of Pb(II) on Variable Charge Soils	JIANG Tian-yu, JIANG Jun, XU Ren-kou, <i>et al.</i> (1598)
Preparation and Performance Investigation of <i>Trichoderma viride</i> -Modified Corn Stalk as Sorbent Materials for Oil Spills	LAN Zhou-lin, PENG Dan, GUO Chu-ling, <i>et al.</i> (1605)
Removal of PO ₄ ³⁻ from Solution, Wastewater and Seawater by Modification and Granulation Magnesium and Aluminium Layered Double Hydroxide	XING Kun, WANG Hai-zeng (1611)
Influence of Carboxylic Carbon Nanotube Supported Platinum Catalyst on Cathode Oxygen Reduction Performance of MFC	TU Li-xing, ZHU Neng-wu, WU Ping-xiao, <i>et al.</i> (1617)
Flue Gas Desulfurization by a Novel Biomass Activated Carbon	LIU Jie-ling, TANG Zheng-guang, CHEN Jie, <i>et al.</i> (1623)
Method for Grading Industrial Sectors in Energy Consumption and Its Application	MAO Jian-su, MA Lan (1628)
Dynamics and Environmental Load of Food Carbon Consumption During Urbanization: A Case Study of Xiamen City, China	YAN Zhen, CUI Sheng-hui, LI Gui-lin, <i>et al.</i> (1636)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 汤鸿霄 陈吉宁 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2013年4月15日 34卷 第4期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 4 Apr. 15, 2013

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in -Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@ rcees. ac. cn http://www. hjkx. ac. cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@ mail. sciencep. com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 90.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行