

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第34卷 第5期

Vol.34 No.5

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

基于过氧化物的消毒技术研究进展	习海玲,赵三平,周文	(1645)
环境损害评估:国际制度及对中国的启示	张红振,曹东,於方,王金南,齐霖,贾倩,张天柱,骆永明	(1653)
不同国家基于健康风险的土壤环境基准比较研究与启示	徐猛,颜增光,贺萌萌,张超艳,侯红,李发生	(1667)
蚯蚓堆肥及蝇蛆生物转化技术在有机废弃物处理应用中的研究进展	张志剑,刘萌,朱军	(1679)
基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究	刁晓君,席北斗,何连生,邓祥征,吴锋,王鹏腾	(1687)
我国东北地区地表水酸化现状	徐光仪,康荣华,罗遥,段雷	(1695)
西安市对渭河水质的影响分析	于婕,李怀恩	(1700)
极端干旱水文年(2011年)夏季珠江口溶解氧的分布特征及影响因素研究	叶丰,黄小平,施震,刘庆霞	(1707)
应用相平衡分配法建立湘江衡阳段沉积物重金属质量基准	韩超南,秦延文,郑丙辉,张雷,曹伟	(1715)
长江口海域底栖生态环境质量评价——AMBI和M-AMBI法	蔡文倩,孟伟,刘录三,朱延忠,周娟	(1725)
温州城市降雨径流中BOD ₅ 和COD污染特征及其初始冲刷效应	王骏,毕春娟,陈振楼,周栋	(1735)
影响悬浮颗粒物吸收系数测量的相关因素研究	余小龙,沈芳,张晋芳	(1745)
香溪河库湾春季pCO ₂ 与浮游植物生物量的关系	袁希功,黄文敏,毕永红,胡征宇,赵玮,朱孔贤	(1754)
紊流脉动强度对藻类生长及水环境的影响研究	雷雨,龙天渝,伞磊,安强,黄允秋	(1761)
高铁酸钾对水中藻类及其次生臭味污染物二甲基三硫醚同步去除研究	马晓雁,张泽华,王红宇,胡仕斐,李青松	(1767)
纳米Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ 非均相Fenton反应催化氧化邻苯二酚	何洁,杨晓芳,张伟军,王东升	(1773)
水中茶普生的紫外光降解机制及其产物毒性研究	马杜娟,刘国光,吕文英,姚锐,周丽华,谢成屏	(1782)
酸活化赤泥催化臭氧氧化降解水中硝基苯的效能研究	康雅凝,李华楠,徐冰冰,齐飞,赵伦	(1790)
镉污染应急处置含镉絮体稳定性实验研究	柳玉荣,魏清伟,杨仁斌,许振成,曾东	(1797)
基于光学在线监测及形态学研究的絮凝体强度分析方法	金鹏康,冯永宁,王宝宝,王晓昌	(1802)
不同电子供体下三氯苯酚的还原脱氯机制研究	万金泉,胡梦蝶,马邕文,黄明智	(1808)
壳聚糖季铵盐磁性颗粒的制备及其对甲基橙的吸附效果	张聪璐,胡筱敏,英诗颖,王芳	(1815)
城市污水二级出水超滤膜污染与膜特性的研究	孟晓荣,张海珍,王磊,王旭东,赵亮	(1822)
倒置A ² /O-MBR处理城市污水的中试研究	张健君,邹高龙,杨淑芳,丁星,王莉,毛乾庄,杨丹	(1828)
不同电子供体的硫自养反硝化脱氮实验研究	袁莹,周伟丽,王晖,何圣兵	(1835)
短程同步硝化反硝化过程的脱氮与N ₂ O释放特性	梁小玲,李平,吴锦华,王向德	(1845)
基于固相萃取的水中多种有毒有害有机污染物富集方法优化	张明全,李锋民,吴乾元,胡洪营	(1851)
多环麝香污染胁迫对蚯蚓特异性蛋白基因表达的影响	陈春,刘潇威,郑顺安,周启星,李松	(1857)
浙江省制药行业典型挥发性有机物臭氧产生潜力分析及健康风险评价	徐志荣,王浙明,许明珠,何华飞	(1864)
苯系物光催化开环降解产物低级醛类的健康效应	赵伟荣,廖求文,杨亚楠,戴九松	(1871)
四川妇女血清中多溴联苯醚的浓度水平与组成特征	邵敏,陈永亨,李晓宇	(1877)
咪唑类离子液体毒性的QSAR/QSPR研究	赵继红,赵永升,张宏忠,张香平	(1882)
宁夏石嘴山河滨工业园区表层土壤重金属污染的时空特征	樊新刚,米文宝,马振宁,王婷玉	(1887)
内蒙古包头白云鄂博矿区及尾矿区周围土壤稀土污染现状和分布特征	郭伟,付瑞英,赵仁鑫,赵文静,郭江源,张君	(1895)
福建省重点城市路面尘负荷及化学组成研究	郑桢,杨冰玉,吴水平,王新红,陈晓秋	(1901)
重金属污染场地电阻率法探测数值模拟及应用研究	王玉玲,能昌信,王彦文,董路	(1908)
丛枝菌根真菌对稀土尾矿中大豆生长和稀土元素吸收的影响	郭伟,赵仁鑫,赵文静,付瑞英,郭江源,张君	(1915)
海洋细菌N3对几种赤潮藻的溶藻效应	史荣君,黄洪辉,齐占会,胡维安,田梓杨,戴明	(1922)
1株分离自煤矿废水的铁硫氧化细菌LY01的鉴定及其氧化特性研究	刘玉娇,杨新萍,王世梅,梁银	(1930)
1株苯并[a]芘高效降解菌的筛选与降解特性	蔡瀚,尹华,叶锦韶,常晶晶,彭辉,张娜,何宝燕	(1937)
2,2',4,4'-四溴联苯醚的好氧微生物降解	张姝,Giulio Franco,李晓豹,卢晓霞,侯珍,杨君君	(1945)
养猪废水培养微生物絮凝剂产生菌群B-737及发酵特性	裴瑞林,信欣,张雪乔,周迎芹,姚力,羊依金	(1951)
1997~2011年北京市空气中酸性物质与降水组分变化趋势的相关性分析	陈圆圆,田贺忠,杨懂艳,邹本东,鹿海峰,林安国	(1958)
黄山降水酸度及电导率特征分析	石春娥,邓学良,吴必文,洪杰,张苏,杨元建	(1964)
夏季黄山不同高度大气气溶胶水溶性离子特征分析	文彬,银燕,秦彦硕,陈魁	(1973)
广州秋季灰霾污染过程大气颗粒物有机酸的污染特征	谭吉华,赵金平,段菁春,马永亮,贺克斌,杨复沫	(1982)
福建省三大城市冬季PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	陈衍婷,陈进生,胡恭任,徐玲玲,尹丽倩,张福旺	(1988)
上海市含碳大气颗粒物的粒径分布	袁宁,刘卫,赵修良,王广华,姚剑,曾友石,刘遂庆	(1995)
上海市浦东城区二次气溶胶生成的估算	崔虎雄,吴迺名,段玉森,伏晴艳,张懿华,王东方,王茜	(2003)
沙尘暴期间上海市大气颗粒物元素地球化学特征及其物源示踪意义	钱鹏,郑祥民,周立旻	(2010)
厦门秋季近郊地面CO ₂ 浓度变化特征研究	李燕丽,穆超,邓君俊,赵淑惠,杜可	(2018)
GC-MS和GC-ECD同时在线观测本底大气中的HCFC-142b	郭立峰,姚波,周凌晔,李培昌,许林	(2025)
城市居家环境空气真菌群落结构特征研究	方治国,欧阳志云,刘芃,孙力,王小勇	(2031)
城市污水处理厂挥发性芳香烃的气味指纹及定量评价研究	郭薇,王伯光,唐小东,刘舒乐,何洁,张春林	(2038)
内河多点分散码头大气污染叠加影响特征	刘建昌,李兴华,徐洪磊,程金香,王忠岱,肖杨	(2044)
义马煤中铅的热稳定性及转化行为研究	刘瑞卿,王钧伟	(2051)
基于能源消费情景模拟的北京市主要大气污染物和温室气体协同减排研究	谢元博,李巍	(2057)
《环境科学》征订启事(1652)	《环境科学》征稿简则(1789)	信息(1807, 1821, 1881, 1987)
编辑征稿通知(1863)		

基于生态分区的我国湖泊营养盐控制目标研究

刁晓君¹, 席北斗¹, 何连生^{1*}, 邓祥征², 吴锋², 王鹏腾³

(1. 中国环境科学研究院水环境系统工程研究室, 北京 100012; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所农业政策研究中心, 北京 100101; 3. 北京化工大学化工学院, 北京 100029)

摘要: 为更好地控制我国湖泊的富营养化水平, 在五大湖泊生态分区的基础上, 对不同生态分区的 100 个湖泊总氮 (TN)、总磷 (TP)、TN/TP 与叶绿素 a (Chl-a) 的关系进行了分析, 进而提出了不同生态分区的湖泊营养盐控制目标。结果表明, 五大湖泊生态分区中, 东北湖区富营养化水平最低, 华北湖区富营养化水平最高, 近几年五大湖区湖泊富营养水平呈上升趋势。从 TN、TP 对五大生态分区湖泊 Chl-a 浓度的影响看, TP 是东北和华北湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐, 而 TN 和 TP 同时是中东部、云贵和蒙新湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐。从 TN/TP 判断, 在 $TN/TP < 10$ 的湖泊中, 除华北湖区外的其他 4 个湖区湖泊 Chl-a 均受 TN 显著影响; TP 仅对东北、蒙新湖区湖泊的 Chl-a 有显著影响。在 $TN/TP > 17$ 的湖泊中, 除蒙新湖区外的其他 4 个湖区湖泊 Chl-a 均受 TP 显著影响, 而在中东部、云贵和蒙新湖区, TN 对 Chl-a 也有显著影响。在 $10 < TN/TP < 17$ 的湖泊中, 除了中东部湖区湖泊 TN 对 Chl-a 有显著影响外, 其他湖区的湖泊 TN 和 TP 对 Chl-a 均没有显著影响。氮磷控制策略方面, 华北湖区的湖泊应以优先控磷为主; 东北湖区 $TN/TP < 10$ 的湖泊应采取氮磷联合控制, 其他湖泊应以控磷为主; 中东部、云贵、蒙新湖区的湖泊均应氮磷联合控制。

关键词: 生态分区; 湖泊富营养化; 氮磷削减; 控制策略; TN/TP

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2013)05-1687-08

Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China

DIAO Xiao-jun¹, XI Bei-dou¹, HE Lian-sheng¹, DENG Xiang-zheng², WU Feng², WANG Peng-teng³

(1. Laboratory of Water Environmental Systems Engineering, Chinese Research of Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. Center for Chinese Agricultural Policy, Research Institute of Geographic and Natural Resource, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Chemical Engineering, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: In order to better reduce lake eutrophication, based on five ecoregions of lakes, the relationships of total nitrogen (TN), total phosphorus (TP), and TN/TP ratio with chlorophyll-a (Chl-a) in 100 lakes were discussed, furthermore, strategies of nutrient control were proposed respectively. Results showed that among the five ecoregions, the lake eutrophication level was the lowest in Dongbei ecoregion and the highest in Huabei ecoregion, but the eutrophication level in lakes of all the five ecoregions is increasing in recent years. Algal growth in lakes of Dongbei and Huabei ecoregions was limited by phosphorus, while it was simultaneously limited by nitrogen and phosphorus in lakes of other three ecoregions (Zhongdongbu, Yungui and Mengxin). In lakes with $TN/TP < 10$, significant correlation between Chl-a concentration and TN was found in lakes of the five ecoregions except for Huabei ecoregion, and significant correlation between Chl-a concentration and TP was found in lakes of Dongbei and Mengxin ecoregions. In lakes with $TN/TP > 17$, significant correlation between Chl-a concentration and TP was found in lakes of the five ecoregions except for Mengxin ecoregion, and significant correlation between Chl-a concentration and TN was found in lakes of Zhongdongbu, Yungui and Mengxin ecoregions. In lakes with $10 < TN/TP < 17$, no significant correlation between Chl-a and TN (or TP) was found in lakes of all ecoregions except for Zhongdongbu ecoregion where Chl-a concentration was significantly affected by TN. As for strategies of nutrient control and reduction in the five ecoregions, lakes of Huabei ecoregion should adopt TP control in priority, and in Dongbei ecoregion, TP and TN should be controlled simultaneously in lakes with $TN/TP < 10$, while other lakes should focus on TP control. Lakes in other three ecoregions (Zhongdongbu, Mengxin and Yungui) should control TP and TN simultaneously.

Key words: ecoregion; lake eutrophication; nutrient reduction; control strategy; TN/TP

目前,我国 80% 的湖泊已处于中度富营养和重度富营养状态^[1],湖泊富营养化治理刻不容缓。营养盐削减被国内外学者认为是控制湖泊富营养化和藻华发生的首要解决措施^[2]。从 20 世纪 80 年代早期开始,我国就制定了第一个有关地表水氮磷和有机污染削减的《地表水环境质量标准》(GB 3838-83),并开始了湖泊富营养化的科学研究和防治工

作。但是,由于全国不同区域湖泊营养盐含量、湖泊类型、水质特征、气候条件等差异较大,在未考

收稿日期: 2012-08-19; 修订日期: 2012-10-25

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2009ZX07106-001-007); 国家自然科学基金项目 (41201528)

作者简介: 刁晓君 (1975 ~), 女, 博士后, 主要研究方向为湖泊富营养化形成机制及修复技术, E-mail: diaoxiaojun2000@yahoo.com.cn

* 通讯联系人, E-mail: heliansheng08@126.com

虑上述差异以及基于这种差异性的营养盐基准和控制标准的情况下,大大影响了多年来我国湖泊富营养化的管理和控制效果^[3]. 国外的经验表明,将营养盐控制与湖泊生态分区管理相结合对治理湖泊富营养化极为有效^[4],显示出湖泊生态分区的重要性. 一些发达国家已经开展了湖泊生态分区、营养物基准和富营养化控制标准等研究工作^[5,6],但我国这方面的研究才刚刚起步. 本课题组在“十一五”、“十二五”等项目的支持下,对我国湖泊开展了分区研究,为更科学地治理和控制我国湖泊富营养化奠定了基础^[7,8].

对湖泊富营养化控制来说,氮磷控制具有重要意义,但在单独控磷还是同时控制氮磷方面还存在争议. 多数观点认为控制磷输入对降低湖泊富营养化较为重要,国外的不少报道也显示,通过控磷成功降低了部分湖泊的富营养化程度^[9~13]. 但是,也有不一致的结果,如美国的 Apopka 湖、George 湖和 Okeechobee 湖、中国的太湖和东湖及日本的霞浦湖等,控磷对削减湖泊富营养化基本没有作用^[14]. 因此,有学者提出应同时控制氮磷输入,因为氮是春季浮游植物生长的限制因子,会间接促成夏季蓝藻的暴发;同时大量的氮可能被输送到下游,加剧水生生态系统的富营养化问题^[14]. 这些不同的观点表明,湖泊富营养化的氮磷控制并不是个简单的问题,需要结合湖泊的实际情况综合考虑. 但由于我国湖泊众多,成本和效率上不允许逐个研究湖泊的氮磷控制问题,所以若能在湖泊生态分区基础上进行区域化湖泊氮磷控制研究,对降低治理湖泊富营养化成本、提高湖泊富营养化治理效率将有积极意义. 此外,不管是控磷还是同时控制氮磷,主要的依据多基于某个湖泊或某个区域少数几个湖泊的实验或监测数据,如 Schindler^[15]以加拿大安大略湖为对象,Wang 等^[16]以我国长江流域几个湖泊为对象,还缺乏从湖泊生态分区、多湖泊角度开展的相关研究.

因此,本研究在课题组前期对我国湖泊进行生态分区的基础上,对不同生态分区湖泊的 TP-Chla、TN-TP-Chla 的关系进行了分析,尤其从生态分区角度详细评价了 TN/TP 变化对叶绿素含量的影响,并结合不同生态分区的自然和地理特点,提出了不同生态分区湖泊的氮磷控制目标和策略,以期为提高我国湖泊富营养化控制的效率、科学性、策略性提供信息.

1 我国湖泊营养盐生态分区概况

我国湖泊数量众多,其中 1 km² 以上的湖泊有 2 759 个,在各个自然地理带及不同气候类型区均有天然湖泊分布,相对集中的区域有东北三省、华北平原、长江中下游平原、内蒙古、新疆、青藏高原和云贵高原^[17]. 为了更科学、高效地对我国湖泊开展研究,进行湖泊生态分区研究迫在眉睫. 国家水体污染控制与治理科技重大专项“我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准研究课题”(2009ZX07106-001)开展了湖泊营养物生态分区的研究,基于行政区划、湖泊分布、成因、水环境、资源赋存和水文特征等因素,结合中国西高东低的大地貌特征和南湿北干的气候条件,把我国湖泊划为东北中温带湿润亚湿润区湖泊营养物生态区(东北湖区)、华北平原暖温带亚湿润区湖泊营养物生态区(华北湖区)、云贵高原亚热带湿润区湖泊营养物生态区(云贵湖区)、甘新中温带暖温带干旱区湖泊营养物生态区(甘新湖区)、青藏高原湖泊营养物生态区(青藏湖区)、中东部平原亚热带湿润区湖泊营养物生态区(中东部湖区)、宁蒙中温带亚干旱区湖泊营养物生态区(宁蒙湖区)、东南热带湿润区湖泊营养物生态区(东南湖区)(图 1). 需要说明的是,这些只是一级分区,随着研究的深入,还将进行二级、三级分区,湖泊生态分区的科学性、合理性、实用性将逐步得到体现.

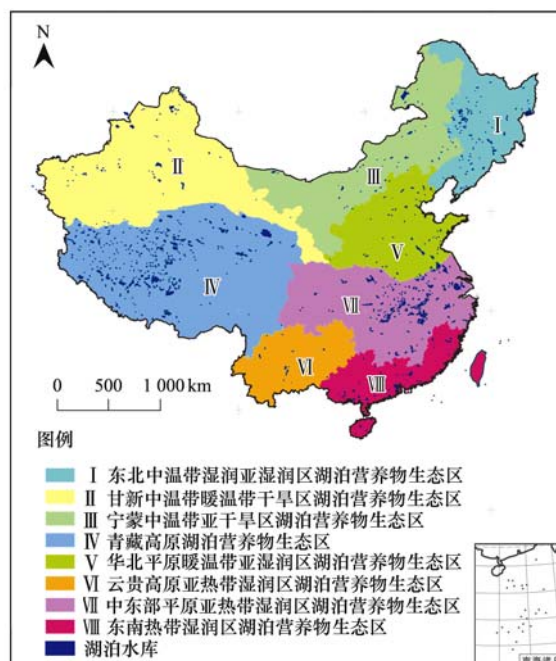


图 1 湖泊八大生态分区示意图

Fig. 1 Eight ecoregions of lakes

2 数据来源及分析方法

2.1 数据来源

在本研究中,由于甘新湖区和宁蒙湖区湖泊个数较少且多为咸水湖或盐湖,青藏湖区和东南湖区缺乏历史统计数据,所以前者合并成蒙新湖区,后者本研究不予讨论,因此,将八大生态分区改为了五大生态分区。

本研究采用的数据主要有两部分,一部分数据来源于“我国湖泊营养物基准和富营养化控制标准研究课题”实施过程中的全国湖泊富营养化区域差异性调查(2008~2011年),另一部分数据来自有关湖泊的常态监测(1990~2007年)。五大生态分区湖泊 TP、TN 分析使用的是 1990~2011 年的数据,但蒙新湖区除外(数据为 2005~2011 年)。由于各湖区叶绿素指标监测时间长短差别较大,所以叶绿素分析采用了不同时间的数据(云贵湖区 1990~2011 年,长江中下游湖区 1999~2011 年,蒙新和华北湖区 2005~2011 年,东北湖区为 2009~2011 年)。5 个湖区的总氮总磷与叶绿素关系分析采用了 2008~2011 年的数据。

根据不同湖区湖泊数量的情况,选择了部分湖泊进行分析,其中东北湖区湖泊数为 9 个(大伙房水库、镜泊湖、红旗泡、连环湖、兴凯湖、五大连池、桃山水库、松花湖、小兴凯湖),华北湖区湖泊数为 4 个(洪泽湖、骆马湖、白洋淀、于桥水库),中东部湖区湖泊数为 54 个(白马湖、宝应湖、固城湖、邵伯湖、玄武湖、巢湖、洞庭湖、太湖、白水湖、陈家湖、芳湖、八里湖、甘棠湖、赛城湖、仙女湖、金溪湖、军山湖、牛鸭湖、石牌湖、珠湖、高邮湖、石臼湖、天岗湖、白荡湖、泊湖、菜子湖、城东湖、城西湖、花园湖、黄湖、龙感湖、女山湖、七里湖、升金湖、石塘湖、沱湖、武昌湖、香涧湖、漕湖、澄湖、溇湖、傀儡湖、尚湖、昆承湖、千岛湖、淀山湖、蚌湖、赤湖、鄱阳湖、柘林湖、青岚湖、南湖、新妙湖、瑶湖),云贵湖区湖泊数为 21 个(长桥海、程海、大屯海、洱海、抚仙湖、个旧湖、海西海、南湖、普者黑、杞麓湖、星云湖、阳宗海、异龙湖、浴仙湖、碧塔湖、茈碧湖、滇池、泸沽湖、三角海、西湖、属都湖),蒙新湖区湖泊数为 12 个(郝驴驹、牧羊海、纳林湖、乌梁素海、艾比湖、博斯腾湖、柴窝堡湖、喀纳斯湖、赛里木湖、乌伦古湖、呼伦湖、吉力湖)。每个湖泊监测点个数不一,数据均为表层水 0.5 m 以下水样的测定结果^[18,19]。

2.2 数据分析

采用 SPSS 17.0 软件对不同生态分区湖泊的 TN、TP 浓度与 Chl-a 浓度进行多元线性回归和相关性分析,用相关系数(R)和回归标准误(SE)检验回归方程的拟合优度。

3 结果与讨论

3.1 五大生态分区湖泊的富营养化现状

五大生态分区营养盐浓度(TN、TP)和藻类生物量(以 Chl-a 表示)的变化情况见图 2。总体上看,1990~2011 年的 20 a 间,随着我国经济的持续发展和人口的不断增加,各湖区富营养化程度均呈上升的趋势,绝大多数湖泊水体的 TN 和 TP 处于 IV 类和 V 类,都已达到中度或重度富营养化状态。

总氮年际波动较大。东北湖区 TN 浓度较低;

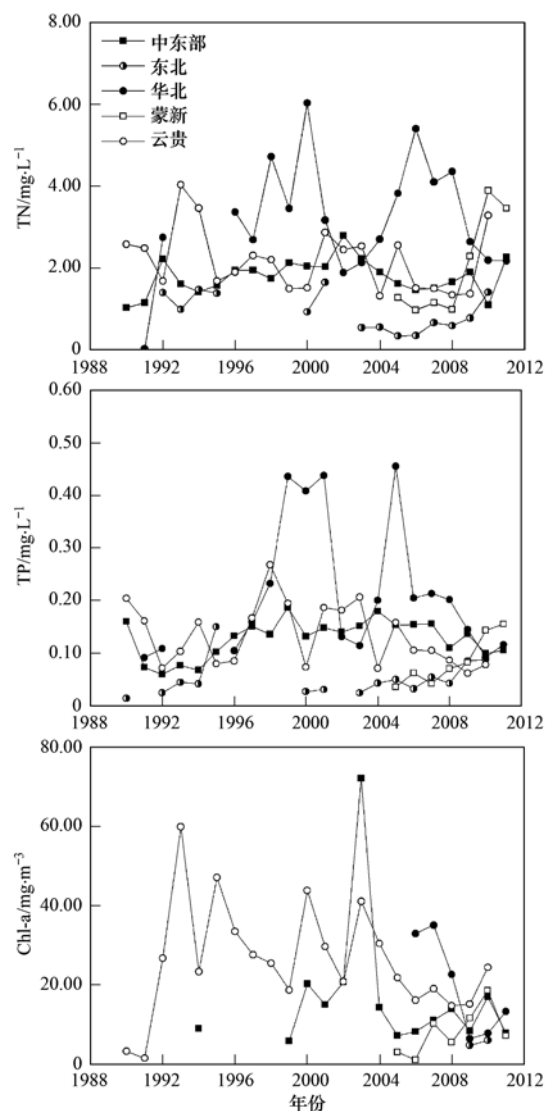


图 2 五大生态分区湖泊富营养化现状

Fig. 2 Status of lake eutrophication in the five ecoregions

蒙新湖区其次,但2008年后TN浓度明显增加并超过其他湖区;云贵湖区1995年前TN浓度较高,近年来与中东部湖区较为接近,但大部分时期均高于蒙新和东北湖区;华北湖区TN浓度最高,尤其1996~2008年期间,2008年后呈下降趋势。整体上看,除华北湖区外,其他湖区TN浓度2008年后有上升趋势,说明近几年我国多数湖泊面临TN胁迫压力。

总磷年际波动较小。东北和蒙新湖区TP浓度较低,云贵和中东部湖区其次,华北湖区TP浓度1998年后明显升高并超过其他湖区。整体上看,20a来我国湖泊TP浓度变化不大,这可能与一直强调磷对湖泊富营养化影响较大、控磷力度较大有关。

叶绿素年际波动较大。由于2006年前除云贵湖区外的其他湖区叶绿素浓度数据缺失,所以没法对比。整体上看,2006年后叶绿素浓度呈下降趋势,但2009年后略呈增加趋势,这说明我国多数湖泊富营养化控制还是取得了一定的效果,至于近几年增加的原因,是否与TN浓度增加有关,还需要做进一步分析。

综上所述,东北湖区富营养化程度最低,基本处于贫营养和中营养状态;蒙新湖区富营养化程度稍高于东北湖区,但由于湖区内湖泊多为咸水湖或盐湖,Chl-a浓度相对较低;中东部和云贵湖区富营养化程度较高,基本处于中度和重度富营养状态;华北湖区富营养化程度最为严重,绝大部分年份水体处于V类或劣V类,基本处于重度富营养化状态。

3.2 五大生态分区湖泊TP与Chl-a的关系

湖泊富营养化研究中,常以Chl-a浓度指示浮游植物生物量。通过Chl-a与营养物质的相关性分析可以揭示湖泊水体富营养化的限制营养盐。Chl-a的浓度变化与许多因子有关,其中磷是最重要的限制营养元素。

五大生态分区湖泊中,lgChl-a与lgTP均呈显著的线性正相关关系($P < 0.001$),表明我国大多数湖泊TP浓度是影响叶绿素含量的一个主要因子。东北和云贵湖区湖泊中lgChl-a与lgTP有较好的线性相关性,相关系数分别为0.470和0.482。蒙新湖区湖泊中lgChl-a与lgTP的线性相关性稍差,相关系数为0.365。中东部和华北湖区湖泊中lgChl-a与lgTP的线性相关性最低,相关系数分别为0.091和0.150。云贵和蒙新湖区湖泊中浮游藻类对TP的利用效率较高,线性方程的斜率分别为0.809和0.964;东北、中东部湖区中浮游藻类对TP的利用

效率稍低,线性方程的斜率分别为0.667和0.632,华北湖区湖泊中的浮游藻类对TP的利用效率最

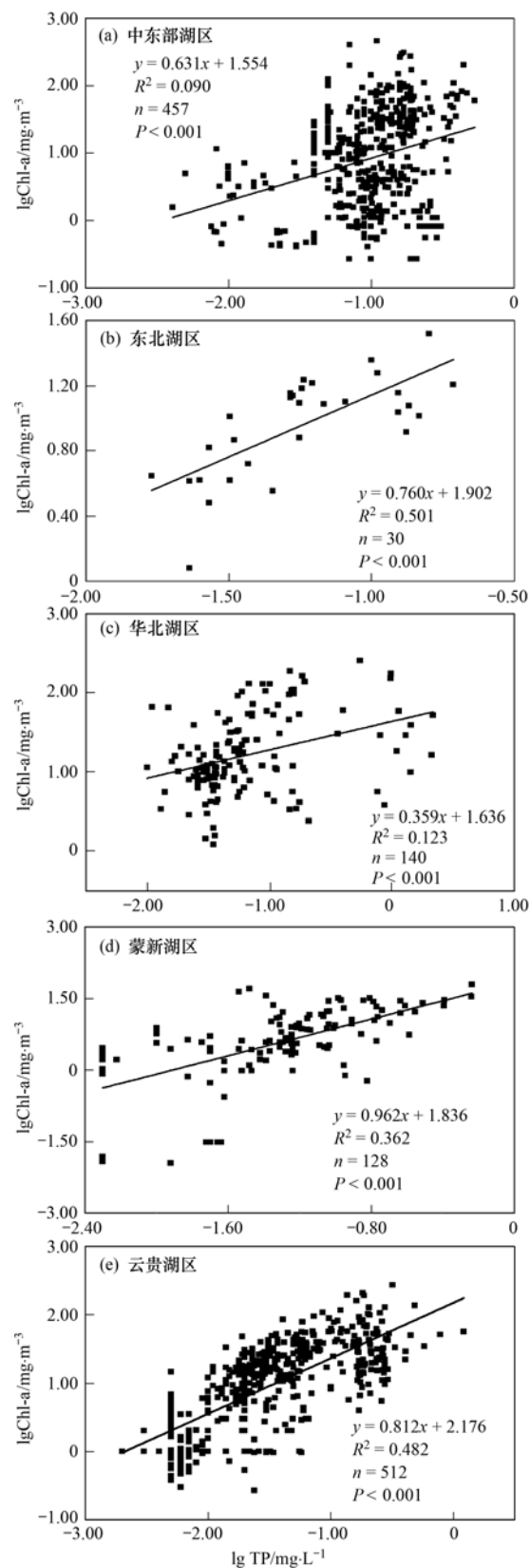


图3 五大生态分区湖泊Chl-a与TP的关系

Fig. 3 Relationships of Chl-a and TP in lakes of the five ecoregions

低,斜率仅为 0.390.

可以看出,五大生态分区湖泊的 Chl-a 和 TP 之间虽然呈线性关系,但相关程度存在差异,此外,浮游藻类对 TP 的利用效率也有很大差异,表明 Chl-a 与 TP 的相关关系可能受其他因素的影响,如 TN^[20,21]. 因此,需要分析 TN、TP 对 Chl-a 的综合影响.

3.3 五大生态分区湖泊 TN、TP 对 Chl-a 的综合影响

依据我国五大分区 100 个不同类型湖泊的 4 a (2008 ~ 2011 年) 现场调查数据结果,建立了 lg TN、lg TP 与 lg Chl-a 的二元线性回归方程,采用多元回归分析方法系统探讨了 TN、TP 对 Chl-a 的综合影响(表 1).

东北湖区:lg Chl-a = -0.078 lg TN + 0.444 lg TP + 1.596

华北湖区:lg Chl-a = -0.110 lg TN + 0.517 lg

TP + 1.927

中东部湖区:lg Chl-a = 1.507 lg TN + 0.321 lg TP + 1.035

云贵湖区:lg Chl-a = 0.662 lg TN + 0.399 lg TP + 1.627

蒙新湖区:lg Chl-a = 0.956 lg TN + 0.382 lg TP + 1.061

从表 1 可以看出,在五大分区湖泊中,除了东北和华北湖区的 TN 对 Chl-a 的影响不显著外,其他 TN、TP 对 Chl-a 均存在非常显著或极显著的影响($P < 0.01$ 或 $P < 0.001$). 也就是说,TP 是东北和华北湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐,而 TN 和 TP 同时是中东部、云贵和蒙新湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐. 表明我国多数湖泊富营养化同时受 TN、TP 的综合影响.

表 1 五大生态分区湖泊中 TN、TP 与 Chl-a 关系的二元回归统计分析¹⁾
Table 1 Statistics for regressions of Chl-a on TP and TN in lakes of five ecoregions

生态分区	变量	系数	标准误(SE)	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	df
东北湖区	截距 <i>b</i>	1.596	0.147	10.835	0.000***	0.632**	29
	lg TP	0.444	0.124	3.593	0.002**		
	lg TN	-0.078	0.096	-0.811	0.427		
华北湖区	截距 <i>b</i>	1.927	0.168	11.447	0.000***	0.465***	139
	lg TP	0.517	0.120	4.320	0.000***		
	lg TN	-0.110	0.148	-0.746	0.457		
中东部湖区	截距 <i>b</i>	1.035	0.105	9.817	0.000***	0.496***	456
	lg TP	0.321	0.091	3.529	0.000***		
	lg TN	1.507	0.156	9.643	0.000***		
云贵湖区	截距 <i>b</i>	1.627	0.074	22.106	0.000***	0.760***	511
	lg TP	0.399	0.051	7.783	0.000***		
	lg TN	0.662	0.062	10.685	0.000***		
蒙新湖区	截距 <i>b</i>	1.061	0.172	6.182	0.000***	0.642***	127
	lg TP	0.382	0.119	3.225	0.002**		
	lg TN	0.956	0.179	5.329	0.000***		

1) **表示 $P < 0.01$, ***表示 $P < 0.001$

在湖泊氮磷与叶绿素关系的研究中,TN/TP 质量比(TN/TP)也是一个关键参数,常根据 TN/TP 判别浮游藻类的营养限制类型. 一般认为,TN/TP 比较大时藻类受磷限制($TN/TP > 17$),TN/TP 比较小时受氮限制($TN/TP < 10$),TN/TP 比中等时受二者共同限制($10 < TN/TP < 17$)^[22]. 将五大生态分区湖泊按上述 TN/TP 界点分为 3 个组,比较每个组 lgChl-a 与 lgTP、lgTN 的回归关系(表 2). 可以看出,①在 $TN/TP < 10$ 的湖泊中,除了华北湖区,其他 4 个湖区的 TN 均对 Chl-a 有显著影响($P < 0.05$);而在华北、中东部和云贵湖区,TP 对 Chl-a 没有显著影响($P > 0.05$),基本符合传统的 TN/TP

< 10 时氮是主要限制性营养盐的观点. ②在 $10 < TN/TP < 17$ 湖泊中,除了中东部湖区 TN 对 Chl-a 有显著影响外($P < 0.05$),其他 TN 和 TP 对 Chl-a 均没有显著的影响($P > 0.05$),这可能是由于在 $10 < TN/TP < 17$ 时 TN、TP 关联的因素较多,掩盖了两者对 Chl-a 的直接影响. ③在 $TN/TP > 17$ 湖泊中,除蒙新湖区外,TP 均对 Chl-a 有非常显著的影响($P < 0.01$),为主要限制性营养盐;而在中东部、云贵和蒙新湖区,TN 对 Chl-a 也同时存在显著影响($P < 0.05$),这与传统的 $TN/TP > 17$ 时磷是唯一的限制性营养盐的观点存在一定差异,具体原因还有待进一步研究.

表 2 五大生态分区不同氮磷比湖泊中 TN、TP 与 Chl-a 关系的二元回归统计分析¹⁾

Table 2 Statistics for regressions of Chl-a on TP and TN in lakes with different TN/TP ratios in five ecoregions

生态分区	TN/TP	变量	系数	标准误(SE)	<i>t</i>	<i>P</i>	<i>R</i>	df
东北湖区	TN/TP < 10	截距 <i>b</i>	1. 567	0. 418	3. 747	0. 006 * *	0. 845 * *	7
		lgTP	1. 290	0. 526	2. 452	0. 040 *		
		lgTN	-1. 287	0. 312	-4. 127	0. 003 * *		
	10 < TN/TP < 17	截距 <i>b</i>	2. 170	0. 456	4. 756	0. 003 * *	0. 967 * * *	6
		lgTP	0. 807	0. 408	1. 979	0. 095		
		lgTN	-0. 022	0. 356	-0. 063	0. 952		
	TN/TP > 17	截距 <i>b</i>	-1. 508	0. 276	-5. 462	0. 000 * *	0. 741 * * *	14
		lgTP	-1. 123	0. 286	-3. 928	0. 000 * *		
		lgTN	0. 629	0. 720	0. 873	0. 389		
华北湖区	TN/TP < 10	截距 <i>b</i>	1. 874	0. 430	4. 359	0. 012 *	0. 910 *	12
		lgTP	0. 030	0. 549	0. 055	0. 959		
		lgTN	1. 187	0. 774	1. 534	0. 200		
	10 < TN/TP < 17	截距 <i>b</i>	1. 305	0. 777	1. 679	0. 114	0. 798 * * *	26
		lgTP	0. 114	0. 676	0. 169	0. 868		
		lgTN	0. 203	0. 672	0. 303	0. 766		
	TN/TP > 17	截距 <i>b</i>	1. 968	0. 298	6. 607	0. 000 * *	0. 523 * * *	99
		lgTP	0. 642	0. 194	3. 309	0. 001 * *		
		lgTN	0. 060	0. 203	0. 298	0. 767		
中东部湖区	TN/TP < 10	截距 <i>b</i>	0. 940	0. 253	3. 712	0. 000 * *	0. 497 * * *	127
		lgTP	0. 124	0. 318	0. 391	0. 697		
		lgTN	1. 916	0. 417	4. 600	0. 000 * *		
	10 < TN/TP < 17	截距 <i>b</i>	1. 169	0. 851	1. 374	0. 172	0. 518 * * *	141
		lgTP	0. 679	0. 783	0. 868	0. 387		
		lgTN	1. 995	0. 818	2. 439	0. 016 *		
	TN/TP > 17	截距 <i>b</i>	1. 390	0. 270	5. 154	0. 000 * *	0. 561 * * *	186
		lgTP	0. 493	0. 181	2. 725	0. 007 * *		
		lgTN	0. 975	0. 252	3. 871	0. 000 * *		
云贵湖区	TN/TP < 10	截距 <i>b</i>	1. 010	0. 317	3. 183	0. 002 * *	0. 689 * * *	69
		lgTP	-0. 163	0. 379	-0. 429	0. 670		
		lgTN	1. 302	0. 374	3. 480	0. 001 * *		
	10 < TN/TP < 17	截距 <i>b</i>	2. 347	0. 786	2. 985	0. 004 * *	0. 603 * * *	78
		lgTP	0. 944	0. 697	1. 355	0. 180		
		lgTN	-0. 277	0. 710	-0. 390	0. 698		
	TN/TP > 17	截距 <i>b</i>	2. 269	0. 172	13. 176	0. 000 * *	0. 835 * * *	362
		lgTP	0. 780	0. 112	6. 986	0. 000 * *		
		lgTN	0. 494	0. 101	4. 898	0. 000 * *		
蒙新湖区	TN/TP < 10	截距 <i>b</i>	1. 458	0. 231	6. 318	0. 000 * *	0. 957 * * *	13
		lgTP	0. 720	0. 268	2. 691	0. 025 *		
		lgTN	1. 155	0. 381	3. 033	0. 014 *		
	10 < TN/TP < 17	截距 <i>b</i>	2. 170	1. 596	1. 360	0. 190	0. 767 * * *	23
		lgTP	1. 286	1. 418	0. 907	0. 376		
		lgTN	0. 162	1. 301	0. 125	0. 902		
	TN/TP > 17	截距 <i>b</i>	0. 856	0. 180	4. 748	0. 000 * *	0. 584 * * *	89
		lgTP	0. 150	0. 106	1. 406	0. 163		
		lgTN	0. 526	0. 141	3. 742	0. 000 * *		

1) * 表示 $P < 0. 05$ * *, 表示 $P < 0. 01$, * * * 表示 $P < 0. 001$

结果显示,在五大生态分区,在传统的氮磷联合限制和磷限制(TN/TP > 10 ~ 17)的氮磷比范围内,氮也可以通过改变藻类对磷的响应对叶绿素含量产生显著的影响,从而说明藻类生长是受到氮磷两种营养盐联合控制的。因此在分析每个分区磷与叶绿

素的相关关系时,必须考虑氮对叶绿素的影响,建立预测能力更精确的磷与 Chl-a 相关关系的回归方程。在此基础上判断该生态分区的主要营养盐限制类型,提出在不同生态分区的氮磷控制目标,即在传统的控磷的基础上是否需要控氮,以及控氮对控磷

及藻类生物量的作用. 同时,回归方程也为氮磷削减量的制定提供了一定的科学依据.

4 五大生态分区湖泊氮磷控制目标

通过对五大生态分区湖泊数据的统计分析可以得出,在华北湖区湖泊,TN 不是藻类生长的限制性营养盐,营养盐控制应以优先控磷为主;在东北湖

区,TN/TP < 10 的湖泊 TN 和 TP 都是藻类生长的限制性营养盐,应采取氮磷联合控制,其他湖泊应以控磷为主;其他湖区湖泊 TN 和 TP 对藻类生长均有显著影响,甚至在那些依据传统观点应属于氮磷联合限制或磷限制的湖泊(TN/TP > 10 ~ 17),因此均属于氮磷联合限制状态,控磷同时联合控氮效果更佳(表3).

表3 五大生态分区湖泊氮磷控制目标选择
Table 3 Selection of nitrogen and phosphorus control in lakes of five ecoregions

生态分区	TN/TP	限制性营养盐	控制目标
东北湖区	普遍 > 17	氮磷联合限制或磷限制	TN/TP < 10 的湖泊氮磷联合控制,其他控磷为主
华北湖区	普遍 > 17	磷限制	优先控磷为主
中东部湖区	分布较为平均, > 17 的湖泊较多	氮磷联合限制	控磷同时联合控氮
云贵湖区	普遍 > 17	氮磷联合限制	控磷同时联合控氮
蒙新湖区	普遍 > 17	氮磷联合限制	控磷同时联合控氮

5 结论

(1)五大生态分区中,TN 年际波动较大,东北湖区 TN 浓度最低,华北湖区 TN 浓度最高;除华北湖区和蒙新湖区外,其他湖区 TN 浓度 2008 年后呈上升趋势. TP 浓度近 20 年来变化不大. 2006 年后叶绿素年际波动较大,2009 年后略呈增加趋势.

(2)五大生态分区湖泊中 lgChl-a 与 lgTP 均呈显著的线性正相关关系,但相关性存在差异. 浮游藻类对 TP 的利用效率从高到低为东北湖区、蒙新湖区、云贵湖区、中东部湖区和华北湖区. lgChl-a 与 lgTP 的相关性从高到低为东北湖区、云贵湖区、蒙新湖区、中东部湖区和华北湖区.

(3)从 TN、TP 对五大生态分区湖泊叶绿素浓度的影响看,TP 是东北和华北湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐,而 TN 和 TP 同时是中东部、云贵和蒙新湖区湖泊藻类生长的限制性营养盐. 从 TN/TP 判断,TN/TP < 10 时,除华北湖区外的其他 4 个湖区湖泊 Chl-a 均受 TN 显著影响;TP 仅对东北、蒙新湖区湖泊的 Chl-a 有显著影响. TN/TP > 17 时,除蒙新湖区外的其他 4 个湖区湖泊 Chl-a 均受 TP 显著影响,而在中东部、云贵和蒙新湖区,TN 对 Chl-a 也有显著影响. 在 10 < TN/TP < 17 时,除了中东部湖区 TN 对 Chl-a 有显著影响外,其他 TN 和 TP 对 Chl-a 均没有显著的影响.

(4)在华北湖区湖泊,营养盐控制应以优先控磷为主;在东北湖区,TN/TP < 10 的湖泊 TN 和 TP 都是藻类生长的限制性营养盐,应采取氮磷联合控制,其他湖泊应以控磷为主;其他湖区湖泊 TN 和

TP 对藻类生长均有显著影响,甚至在那些依据传统观点应属于氮磷联合限制或磷限制的湖泊(TN/TP > 10 ~ 17),因此均属于氮磷联合限制状态,控磷同时联合控氮效果更佳.

参考文献:

[1] 马经安,李红清. 浅谈国内外江河湖库水体富营养化状况[J]. 长江流域资源与环境, 2002, 12(6): 575-578.

[2] Kronvang B, Jeppesen E, Conley D J, et al. Nutrient pressures and ecological responses to nutrient loading reductions in Danish streams, lakes and coastal waters[J]. Journal of Hydrology, 2005, 304(1-4): 274-288.

[3] 刘鸿亮,李小平. 湖泊营养物控制的国家战略[J]. 环境保护, 2007, (14): 16-19.

[4] 周保华,潘恒健,谷长强. 湖泊水库营养状态分区研究进展[J]. 环境与可持续发展, 2006, (3): 10-13.

[5] US EPA. Nutrient criteria technical guidance manual lakes and reservoirs[R]. Washington DC: US EPA, 2000.

[6] 高娟,李贵宝,华璐,等. 日本水环境标准及其对我国的启示[J]. 中国水利, 2005, (11): 41-43.

[7] 高如泰,姜甜甜,席北斗,等. 湖北省湖泊营养物生态分区技术方法研究[J]. 环境科学研究, 2011, 24(1): 43-49.

[8] 姜甜甜,高如泰,席北斗,等. 云贵高原湖区湖泊营养物生态分区技术方法研究[J]. 环境科学, 2010, 31(11): 2599-2606.

[9] Schindler D W, Hecky R E, Findlay D L, et al. Eutrophication of lakes cannot be controlled by reducing nitrogen input: Results of a 37-year whole-ecosystem experiment[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2008, 105(2): 11254-11258.

[10] Edmondson W T, Lehman J T. The effect of changes in the nutrient income on the condition of Lake Washington [J]. Limnology and Oceanography, 1981, 26(1): 1-29.

[11] Coveney M F, Lowe E F, Battoe L E, et al. Response of a eutrophic, shallow subtropical lake to reduced nutrient loading [J]. Freshwater Biology, 2005, 50(10): 1718-1730.

- [12] Mehner T, Diekmann M, Gonsiorczyk T, *et al.* Rapid recovery from eutrophication of a stratified lake by disruption of internal nutrient load[J]. *Ecosystems*, 2008, **11**(7): 1142-1156.
- [13] Edmondson W T. Sixty years of Lake Washington: A curriculum vitae[J]. *Lake and Reservoir Management*, 1994, **10**(2): 75-84.
- [14] Conley D J, Paerl H W, Howarth R W, *et al.* Controlling eutrophication: nitrogen and phosphorus[J]. *Science*, 2009, **323**(5917): 1014-1015.
- [15] Schindler D W. Eutrophication and recovery in experimental lakes; Implications for lake management[J]. *Science*, 1974, **184**(4139): 897-899.
- [16] Wang H J, Wang H Z. Mitigation of lake eutrophication: Loosen nitrogen control and focus on phosphorus abatement[J]. *Progress in Natural Science*, 2009, **19**(10): 1445-1451.
- [17] 许其功, 曹金玲, 高如泰, 等. 我国湖泊水质恶化趋势及富营养化控制阶段划分[J]. *环境科学与技术*, 2011, **34**(11): 147-151.
- [18] 金相灿, 屠清瑛. 湖泊富营养化调查规范[M]. (第二版). 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [19] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [20] Smith V H. The nitrogen and phosphorus dependence of algal biomass in lakes: An empirical and theoretical analysis[J]. *Limnology and Oceanography*, 1982, **27**(6): 1101-1112.
- [21] Guildford S J, Hecky R E. Total nitrogen, total phosphorus, and nutrient limitation in lakes and oceans: Is there a common relationship? [J]. *Limnology and Oceanography*, 2000, **45**(6): 1213-1223.
- [22] Sakamoto M. Primary production by phytoplankton community in some Japanese lakes and its dependence on lake depth[J]. *Archiv Für Hydrobiologie*, 1966, **62**: 1-28.

CONTENTS

Advances in Peroxide-Based Decontaminating Technologies	XI Hai-ling, ZHAO San-ping, ZHOU Wen (1645)
Environmental Damage Assessment; International Regulations and Revelation to China	ZHANG Hong-zhen, CAO Dong, YU Fang, <i>et al.</i> (1653)
Human Health Risk-Based Environmental Criteria for Soil: A Comparative Study Between Countries and Implication for China	XU Meng, YAN Zeng-guang, HE Meng-meng, <i>et al.</i> (1667)
Organic Waste Treatment by Earthworm Vermicomposting and Larvae Bioconversion: Review and Perspective	ZHANG Zhi-jian, LIU Meng, ZHU Jun (1679)
Strategies of Nutrients Control in Lakes Based on Ecoregions of Lakes in China	DIAO Xiao-jun, XI Bei-dou, HE Lian-sheng, <i>et al.</i> (1687)
Current Status of Surface Water Acidification in Northeast China	XU Guang-yi, KANG Rong-hua, LUO Yao, <i>et al.</i> (1695)
Impact Analysis of Xi'an to the Water Quality of Weihe River	YU Jie, LI Huai-en (1700)
Distribution Characteristics of Dissolved Oxygen and Its Affecting Factors in the Pearl River Estuary During the Summer of the Extremely Drought Hydrological Year 2011	YE Feng, HUANG Xiao-ping, SHI Zhen, <i>et al.</i> (1707)
Application of Equilibrium Partitioning Approach to Establish Sediment Quality Criteria for Heavy Metals in Hengyang Section of Xiangjiang River	HAN Chao-nan, QIN Yan-wen, ZHENG Bing-hui, <i>et al.</i> (1715)
Assessing the Benthic Ecological Status in Yangtze River Estuary Using AMBI and M-AMBI	CAI Wen-qian, MENG Wei, LIU Lu-san, <i>et al.</i> (1725)
Pollution Load and the First Flush Effect of BOD ₅ and COD in Urban Runoff of Wenzhou City	WANG Jun, BI Chun-juan, CHEN Zhen-lou, <i>et al.</i> (1735)
Influencing Factors in Measuring Absorption Coefficient of Suspended Particulate Matters	YU Xiao-long, SHEN Fang, ZHANG Jin-fang (1745)
Relationship Between pCO ₂ and Algal Biomass in Xiangxi Bay in Spring	YUAN Xi-gong, HUANG Wen-min, BI Yong-hong, <i>et al.</i> (1754)
Effects of Turbulent Fluctuation Intensity on the Growth of Algae and Water Environment	LEI Yu, LONG Tian-yu, SAN Lei, <i>et al.</i> (1761)
Simultaneous Removal of Algae and Its Odorous Metabolite Dimethyl Trisulfide in Water by Potassium Ferrate	MA Xiao-yan, ZHANG Ze-hua, WANG Hong-yu, <i>et al.</i> (1767)
Catalyzed Oxidation of Catechol by the Heterogeneous Fenton-like Reaction of Nano-Fe ₃ O ₄ -H ₂ O ₂ System	HE Jie, YANG Xiao-fang, ZHANG Wei-jun, <i>et al.</i> (1773)
Photodegradation of Naproxen in Aqueous Systems by UV Irradiation: Mechanism and Toxicity of Photolysis Products	MA Du-juan, LIU Guo-guang, LÜ Wen-ying, <i>et al.</i> (1782)
Catalytic Ozonation of Nitrobenzene in Water by Acidification-activated Red Mud	KANG Ya-ning, LI Hua-nan, XU Bing-bing, <i>et al.</i> (1790)
Experimental Studies on Stability of Floes from Cadmium Pollution Emergency Treatment	LIU Wang-rong, GUO Qing-wei, YANG Ren-bin, <i>et al.</i> (1797)
Evaluation of Floc Strength Based on Morphological Analysis and Optical Online Monitoring	JIN Peng-kang, FENG Yong-ning, WANG Bao-bao, <i>et al.</i> (1802)
Mechanism of Reductive Dechlorination of Trichlorophenol with Different Electron Donors	WAN Jin-quan, HU Meng-die, MA Yong-wen, <i>et al.</i> (1808)
Preparation of Magnetic Quaternary Chitosan Salt and Its Adsorption of Methyl Orange from Water	ZHANG Cong-lu, HU Xiao-min, YING Shi-ying, <i>et al.</i> (1815)
Membrane Fouling by Secondary Effluent of Urban Sewage and the Membrane Properties	MENG Xiao-rong, ZHANG Hai-zhen, WANG Lei, <i>et al.</i> (1822)
Treatment of Municipal Wastewater Using the Combined Reversed A ² /O-MBR Process	ZHANG Jian-jun, ZOU Gao-long, YANG Shu-fang, <i>et al.</i> (1828)
Study on Sulfur-based Autotrophic Denitrification with Different Electron Donors	YUAN Ying, ZHOU Wei-li, WANG Hui, <i>et al.</i> (1835)
Nitrogen Removal and N ₂ O Emission Characteristics During the Shortcut Simultaneous Nitrification and Denitrification Process	LIANG Xiao-ling, LI Ping, WU Jin-hua, <i>et al.</i> (1845)
Optimization of Solid-Phase Extraction for Enrichment of Toxic Organic Compounds in Water Samples	ZHANG Ming-quan, LI Feng-min, WU Qian-yuan, <i>et al.</i> (1851)
Polycyclic Musks Exposure Affects Gene Expression of Specific Proteins in Earthworm <i>Eisenia fetida</i>	CHEN Chun, LIU Xiao-wei, ZHENG Shun-an, <i>et al.</i> (1857)
Health Risk Assessment and Ozone Formation Potentials of Volatile Organic Compounds from Pharmaceutical Industry in Zhejiang Province	XU Zhi-rong, WANG Zhe-ming, XU Ming-zhu, <i>et al.</i> (1864)
Health Effect of Volatile Aldehyde Compounds in Photocatalytic Oxidation of Aromatics Compounds	ZHAO Wei-rong, LIAO Qiu-wen, YANG Ya-nan, <i>et al.</i> (1871)
Compositions and Distribution Characteristics of Polybrominated Diphenyl Ethers in Serum of Women from Sichuan Province	SHAO Min, CHEN Yong-heng, LI Xiao-yu (1877)
QSAR/QSPR for Predicting the Toxicity of Imidazolium Ionic Liquids	ZHAO Ji-hong, ZHAO Yong-sheng, ZHANG Hong-zhong, <i>et al.</i> (1882)
Spatial and Temporal Characteristics of Heavy Metal Concentration of Surface Soil in Hebin Industrial Park in Shizuishan Northwest China	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-ning, <i>et al.</i> (1887)
Distribution Characteristic and Current Situation of Soil Rare Earth Contamination in the Bayan Obo Mining Area and Baotou Tailing Reservoir in Inner Mongolia	GUO Wei, FU Rui-ying, ZHAO Ren-xin, <i>et al.</i> (1895)
Road Dust Loading and Chemical Composition at Major Cities in Fujian Province	ZHENG An, YANG Bing-yu, WU Shui-ping, <i>et al.</i> (1901)
Numerical Simulation and Application of Electrical Resistivity Survey in Heavy Metal Contaminated Sites	WANG Yu-ling, NAI Chang-xin, WANG Yan-wen, <i>et al.</i> (1908)
Effects of Arbuscular Mycorrhizal Fungi on the Growth and Rare Earth Elements Uptake of Soybean Grown in Rare Earth Mine Tailings	GUO Wei, ZHAO Ren-xin, ZHAO Wen-jing, <i>et al.</i> (1915)
Algicidal Activity Against Red-tide Algae by Marine Bacterial Strain N3 Isolated from a HABs Area, Southern China	SHI Rong-jun, HUANG Hong-hui, QI Zhan-hui, <i>et al.</i> (1922)
Isolation, Identification and Oxidizing Characterization of an Iron-Sulfur Oxidizing Bacterium LY01 from Acid Mine Drainage	LIU Yu-jiao, YANG Xin-ping, WANG Shi-mei, <i>et al.</i> (1930)
Isolation of an Effective Benzo[a]pyrene Degrading Strain and Its Degradation Characteristics	CAI Han, YIN Hua, YE Jin-shao, <i>et al.</i> (1937)
Aerobic Microbial Degradation of 2,2',4,4'-Tetrabrominated Diphenyl Ether	ZHANG Shu, Franco Giulio, LI Xiao-bao, <i>et al.</i> (1945)
Piggery Wastewater Cultivating Biofloculant-Producing Flora B-737 and the Fermentation Characteristics	PEI Rui-lin, XIN Xin, ZHANG Xue-qiao, <i>et al.</i> (1951)
Correlation Between Acidic Materials and Acid Deposition in Beijing During 1997-2011	CHEN Yuan-yuan, TIAN He-zhong, YANG Dong-yan, <i>et al.</i> (1958)
Characteristics of Precipitation pH and Conductivity at Mt. Huang	SHI Chun-e, DENG Xue-liang, WU Bi-wen, <i>et al.</i> (1964)
Chemical Characteristics of Water-Soluble Components of Aerosol Particles at Different Altitudes of the Mount Huang in the Summer	WEN Bin, YIN Yan, QING Yan-shuo, <i>et al.</i> (1973)
Pollution Characteristics of Organic Acids in Atmospheric Particles During Haze Periods in Autumn in Guangzhou	TAN Ji-hua, ZHAO Jing-ping, DUAN Jing-chun, <i>et al.</i> (1982)
Characterization of Organic Carbon (OC) and Elemental Carbon (EC) in PM _{2.5} During the Winter in Three Major Cities in Fujian Province, China	CHEN Yan-ting, CHEN Jin-sheng, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (1988)
Size Distribution of Carbonaceous Particulate Matter in Atmosphere of Shanghai, China	YUAN Ning, LIU Wei, ZHAO Xiu-liang, <i>et al.</i> (1995)
Secondary Aerosol Formation Through Photochemical Reactions Estimated by Using Air Quality Monitoring Data in the Downtown of Pudong, Shanghai	CUI Hu-xiong, WU Ya-ming, DUAN Yu-sen, <i>et al.</i> (2003)
Geochemical Characteristics and Sources of Atmospheric Particulates in Shanghai During Dust Storm Event	QIAN Peng, ZHENG Xiang-min, ZHOU Li-min (2010)
Near Surface Atmospheric CO ₂ Variations in Autumn at Suburban Xiamen, China	LI Yan-li, MU Chao, DENG Jun-jun, <i>et al.</i> (2018)
<i>In-situ</i> Measurement of Background Atmospheric HCFC-142b Using GC-MS and GC-ECD Method	GUO Li-feng, YAO Bo, ZHOU Ling-xi, <i>et al.</i> (2025)
Airborne Fungal Community Composition in Indoor Environments in Beijing	FANG Zhi-guo, OUYANG Zhi-yun, LIU Peng, <i>et al.</i> (2031)
Study on Quantification Assessment and Odor Fingerprint of Volatile Aromatic Hydrocarbons from Sewage Treatment Plant	GUO Wei, WANG Bo-guang, TANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (2038)
Superposition Impact Character of Air Pollution from Decentralization Docks in a Freshwater Port	LIU Jian-chang, LI Xing-hua, XU Hong-lei, <i>et al.</i> (2044)
Thermal Stability and Transformation Behaviors of Pb in Yima Coal	LIU Rui-qing, WANG Jun-wei (2051)
Synergistic Emission Reduction of Chief Air Pollutants and Greenhouse Gases Based on Scenario Simulations of Energy Consumptions in Beijing	XIE Yuan-bo, LI Wei (2057)

《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5月15日 34卷 第5期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 34 No. 5 May 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