

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第33卷 第6期

Vol.33 No.6

2012

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析	曹金玲,许其功,席北斗,李小平,杨柳燕,江立文,魏自民,吴献花(1777)
基于“源”“汇”景观格局指数的海河流域总氮流失评价	孙然好,陈利顶,王伟,王赵明(1784)
云蒙湖流域土地利用变化对非点源氮污染负荷的影响	孟晓云,于兴修,泮雪芹(1789)
深圳市沿岸表层海水中全氟化合物的残留特征及其分布规律	陈清武,张鸿,柴之芳,沈金灿,杨波(1795)
典型电器工业区河涌沉积物中多环芳烃的分布、来源和潜在生态风险	邓代永,邱孟德,孙国萍,郭俊,张宏涛,张琴,许玫英(1801)
珠江下游河段沉积物中重金属含量及污染评价	谢文平,王少冰,朱新平,陈昆慈,潘德博,洪孝友,尹怡(1808)
扎龙湿地南山湖沉积岩芯重金属污染特征及来源判别	苏丹,臧淑英,叶华香,孙丽,贾晓丹,李苗(1816)
汕头湾沉积物磷的形态分布与季节变化特征研究	赵建刚,乔永民(1823)
氮磷比对东海浮游植物群落生长影响的微宇宙实验	黄伟,朱旭宇,曾江宁,寿鹿,陈全震,江志兵(1832)
春季福建北部海域浙闽沿岸流消亡期浮游桡足类种类组成及其分布	王彦国,林景宏,王春光,林茂(1839)
滩涂红树林种植-养殖耦合系统中多环芳烃含量水平分析	陈冠秋,李耀初,黄晋沐,南燕,林茂宏(1846)
四溴双酚 A 在 5 种巢湖鱼类体内的组织分布与生物浓缩因子研究	杨苏文,王圣瑞,闫振广,张普青(1852)
五氯酚对稀有鮑鲫卵黄蛋白原及 p53 的诱导效应	熊力,马永鹏,张晓峰,金帮明,李伟,苏永良,毛思予,刘堰(1858)
全氟辛烷磺酸(PFOS)对斑马鱼卵黄蛋白原 mRNA 水平的影响	程艳,崔媛,党志超,谢文平,李海山,殷缓缓,陈会明(1865)
水溶性有机物电子转移能力与荧光峰强度的关系研究	陶亚,袁田,周顺桂,袁勇,庄莉,王辉亮(1871)
MIEX 中试实验对二级出水中有机物去除的 3DEEM 解析	杨建,高金华,常江(1878)
XDLVO 理论解析钙离子对腐殖酸反渗透膜污染的影响机制	姚淑娣,高欣玉,郭本华,包南,谢慧君,梁爽(1884)
栅藻 LX1 在水产养殖废水中的生长、脱氮除磷和油脂积累特性	马红芳,李鑫,胡洪管,于茵,巫寅虎(1891)
氯化铁用于反硝化同步化学生物絮凝工艺研究	王宏杰,董文艺,刘莉莎,韩贵超(1897)
合成氨废水短程反硝化特性研究	李妍,李泽兵,马家轩,王晓毅,赵白航,李军(1902)
基于新型反应器的好氧颗粒污泥的稳定性控制	李志华,杨帆,李胜,谢磊,王晓昌(1907)
采用非生长能量代谢参数表征颗粒污泥稳定性	李志华,吴军,李胜,谢磊,王晓昌(1913)
酸-碱预处理促进剩余污泥厌氧消化的研究	袁光环,周兴求,伍健东(1918)
小回流比条件下污泥浓度分区试验研究	史思,王素兰,李瑞,邢传宏(1923)
非离子表面活性剂对污泥调质脱水效果的影响	侯海攀,濮文虹,时亚飞,于文华,樊明明,刘欢,杨昌柱,李野,杨家宽(1930)
中国空气污染指数变化特征及影响因素分析	李小飞,张明军,王圣杰,赵爱芳,马潜(1936)
南京 3 类不同大气污染过程下气溶胶水溶性无机离子的特征研究	张秋晨,朱彬,苏继峰,王红磊(1944)
深圳市郊区大气中 PM _{2.5} 的特征分析	戴伟,高佳琪,曹罡,欧阳峰(1952)
餐饮业油烟的颗粒物分析	谭德生,邝元成,刘欣,戴飞鸿(1958)
Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ 低温催化还原 NO 性能研究	刘荣,杨志琴(1964)
自然型氨基酸及其钾盐的 CO ₂ 吸收和再生特性	晏水平,陈竞翔,徐明亮,艾平,张衍林(1971)
耕作方式对紫色水稻土农田生态系统 CH ₄ 和 N ₂ O 排放的影响	张军科,江长胜,郝庆菊,唐其文,程炳红,李辉,陈璐豪(1979)
垄作覆膜条件下田间氨挥发及影响因素	上官宇先,师日鹏,李娜,韩坤,李会科,王林权(1987)
添加不同 N 源条件下典型除草剂对土壤呼吸和 N ₂ O 排放的影响	孙青,史淳星,石坤,言儒斌,蒋静艳,吴以中(1994)
某石墨阳极法氯碱生产场地二噁英污染特征分析	余立凤,魏文侠,田亚静,吴广龙,李培中,赵丹(2000)
脱硫石膏对酸化森林土壤短期修复效果的研究	罗遥,康荣华,余德祥,谭炳全,段雷(2006)
岩溶山地土壤氧化铁形态及其与成土环境的关系	张治伟,朱章雄,傅瓦利,文志林(2013)
废弃尾矿库 15 种植物对重金属 Pb、Zn 的积累和养分吸收	施翔,陈益泰,王树凤,李江川(2021)
铬胁迫对 3 种草本植物生长及铬积累的影响	王爱云,黄姗姗,钟国锋,徐刚标,刘志祥,申响保(2028)
湘西花垣矿区主要植物种类及优势植物重金属蓄积特征	杨胜香,田启建,梁士楚,周耀渝,邹慧成(2038)
增施 CO ₂ 对 C3 和 C4 植物根际氯氰菊酯残留浓度的影响	慕楠,刁晓君,王曙光,王鹏腾,李攀峰(2046)
生物强化去除吡啶的特性及微生物种群动态变化分析	乔琳,赵宏,王建龙(2052)
A/O MBR 处理生活污水效率与菌群多样性的关系	邝斌宇,史青,Montcho Leon Monthero,丁嫚,温东辉(2061)
石油污染土壤生物修复过程中氮循环功能基因的动态检测	吴彬彬,卢滇楠,刘铮(2068)
武汉市儿童多途径铅暴露风险评估	郝汉舟,陈同斌,吴基良,雷梅,田辉,祖文普,钟学斌(2075)
电子鼻预处理装置的开发及适用性研究	卜凡阳,文晓刚,万梅,刘锐,陈吕军,张永明(2083)
ToxTell 生物传感器在 Cu ²⁺ 、Cd ²⁺ 冲击活性污泥系统分析中的应用	王学江,王鑫,刘免,吴真,杨连珍,夏四清(2090)
环境样品免疫检测基质效应分析与控制	盛建武,何苗,施汉昌(2095)
热等离子体熔融固化模拟医疗废物的研究	张璐,严建华,杜长明,陆胜勇,李晓东(2104)
城市生活垃圾组分低温干燥特性及模型研究	吴亚娟,刘红梅,陆胜勇,严建华,李晓东(2110)
厌氧-准好氧联合型生物反应器填埋场产气规律的研究	韩智勇,刘丹,李启彬(2118)
处理垃圾渗滤液的 Fe/C 空气阴极 MFC 性能研究	唐玉兰,彭漫,于燕,何亚婷,傅金祥,赵玉华(2125)
基于冗余分析的典型喀斯特山区土壤-石漠化关系研究	龙健,廖洪凯,李娟,陈彩云(2131)
北京市能源消费与经济增长关系的协整检验分析	陈操操,张妍,刘春兰,王海华,李铮(2139)
《环境科学》征稿简则(1877)	《环境科学》征订启事(1890)
信息(1822,1857,1896,2138)	

我国湖泊富营养化效应区域差异性分析

曹金玲¹, 许其功^{1, 2*}, 席北斗^{1, 2}, 李小平³, 杨柳燕⁴, 江立文⁵, 魏自民⁶, 吴献花⁷

(1. 中国环境科学研究院, 北京 100012; 2. 中国环境科学研究院环境基准与风险评估国家重点实验室, 北京 100012; 3. 华东师范大学河口海岸国家重点实验室, 上海 200062; 4. 南京大学环境学院污染控制与资源化国家重点实验室, 南京 210093; 5. 华东交通大学土木建筑学院, 南昌 330013; 6. 东北农业大学生命科学学院, 哈尔滨 150030; 7. 玉溪师范学院玉溪高原湖泊生态环境研究中心, 玉溪 653100)

摘要: 通过分析我国湖泊富营养化相关指标的区域差异性, 发现在相同营养物质条件下, 浮游藻类生物量却有所差异, 说明不同区域浮游藻类对营养物质总氮(TN)和总磷(TP)的利用效率存在显著的区域差异性. 利用 SPSS 中的曲线估计功能, 分析我国不同湖泊区域 lg Chl-a 分别与 lg TN 和 lg TP 的线性方程, 通过比较线性方程的斜率分析不同湖泊区域浮游藻类对营养物质 TN 和 TP 的利用效率, 蒙新高原、云贵高原、东北平原-山地、长江中下游平原及华北平原, lg Chl-a 与 lg TP 线性方程的斜率由高到低依次为 1.002、0.817、0.761、0.545、0.250. lg Chl-a 与 lg TN 线性方程的斜率由高到低依次为 1.401、1.058、0.447、0.239、0.099, 分别为长江中下游平原、云贵高原、华北平原、东北平原-山地及蒙新高原. 由此可见, 东北平原-山地和蒙新高原 TP 对浮游藻类生长的影响大于 TN, 而在华北平原、长江中下游平原和云贵高原, TN 对浮游藻类生长的影响大于 TP. 另一方面, 通过分析浮游藻类生物量与水体透明度之间的相关性, 阐明藻类生长繁殖对不同区域湖泊水体透明度影响的区域差异性, 结果表明, 湖泊中浮游藻类生长繁殖对水体透明度影响最大的是云贵高原, 其次是东北平原-山地、蒙新高原和华北平原, 长江中下游平原水体透明度与浮游藻类生物量之间没有显著相关性.

关键词: 区域差异性; 富营养化效应; 叶绿素 a; 透明度; 总氮; 总磷

中图分类号: X131.2; X524 **文献标识码:** A **文章编号:** 0250-3301(2012)06-1777-07

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China

CAO Jin-ling¹, XU Qi-gong^{1, 2}, XI Bei-dou^{1, 2}, LI Xiao-ping³, YANG Liu-yan⁴, JIANG Li-wen⁵, WEI Zi-min⁶, WU Xian-hua⁷

(1. Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. State Key Laboratory of Estuarine and Coastal Research, East China Normal University, Shanghai 200062, China; 4. State Key Laboratory of Pollution Control and Resource Reuse, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210093, China; 5. School of Civil Engineering and Architecture, East China Jiaotong University, Nanchang 330013, China; 6. College of Life, Northeast Agricultural University, Harbin 150030, China; 7. Yuxi Research Center for Eco-environment Sciences on Plateau Lakes, Yuxi Normal University, Yuxi 653100, China)

Abstract: Although biomass of algae (Chl-a) were in variant levels between different lake regions in China under the same nutrients conditions, it demonstrated that efficiencies of TN/TP used by algae had regional differences. In order to clarify the differences, curve estimation in SPSS was used to analyze the linear relationship between lg Chl-a and lg TN/lg TP. The slopes of these linear equations were identified as the efficiencies of TN/TP used by algae. The slopes of linear equations from Mengxin Plateau, Yungui Plateau, Northeast Mountain-Plain, lower reach of Yangtze River Plain and North Plain were 1.002, 0.817, 0.761, 0.545, 0.250, orderly. The efficiencies of TN used by algae ranged from the highest to the lowest were lower reach of Yangtze River Plain, Yungui Plateau, North Plain, Northeast Mountain-Plain, Mengxin Plateau, and the slopes of linear equations were 1.401, 1.058, 0.447, 0.239, 0.099, respectively. Consequently, in Northeast Mountain-Plain, Mengxin Plateau the efficiencies of TP used by algae were higher than those of TN, and in Yangtze River Plain, Yungui Plateau, North Plain, the efficiencies of TN used by algae were higher than those of TP. On the other hand, in order to describe the effects of algae on transparency in different lakes, the relationships between Chl-a and SD were analyzed. The results showed that in Yungui Plateau the effect of algae on transparency was the most obvious as the variation of SD explained by Chl-a was the highest, and Northeast Mountain-Plain, Mengxin Plateau and North Plain followed. However, in lower reach of Yangtze River Plain, the relationship between Chl-a and SD was not significant.

Key words: regional heterogeneity; eutrophication effects; Chl-a; transparency; total nitrogen (TN); total phosphorus (TP)

收稿日期: 2011-08-31; 修订日期: 2011-11-02

基金项目: 国家水体污染控制与治理科技重大专项(2009ZX07106-001); 国家重点基础研究发展规划(973)项目(2008CB418006)

作者简介: 曹金玲(1981~), 女, 博士, 助理研究员, 主要研究方向为湖泊富营养化控制, E-mail: jlciao2010@126.com

* 通讯联系人, E-mail: xuqigong@tom.com

我国湖泊数量众多、分布广泛、类型多样、成因复杂,不同区域湖泊的物理、化学、生物学特性等方面存在显著差异,致使湖泊营养物水平、富营养化的成因、效应及演变过程具有明显的区域差异性。目前我国进行湖泊富营养化的评价、控制及治理等方面的研究普遍采用地表水环境质量标准(GB 3838-2002)及国外的一些标准,缺乏体现区域差异的湖泊营养物基准和富营养化控制标准^[1~4],使得湖泊富营养化的综合治理缺乏针对性和区域性,并不能从根本上解决湖泊富营养化逐渐恶化的趋势。

美国早在1998年就制定了区域营养物基准的国家战略,2000年4月制定了湖泊/水库营养物基准技术指南^[5],并首先制定一级分区湖泊营养物基准,各州根据营养物基准技术指南陆续制定本州的营养物基准,实现营养物基准的分区制定,针对不同区域湖泊富营养化的特点,因地制宜地开展治理工作。建立基于区域差异性的湖泊营养物基准的前提是合理划分营养物生态分区,同时对湖泊进行分类(包括地理因素和非地理因素)。营养物生态分区的划定,主要依据地形地貌、气候、地质构造、湖泊营养物水平、富营养化主要驱动因素以及富营养化效应等多方面指标的区域差异性。湖泊富营养化效应的区域差异性,是进行营养物生态分区所需参考的重要指标,所谓的富营养化效应包括富营养化发生以后水体透明度、溶解氧下降、水体发臭、微囊藻毒素污染等负面作用,另外一方面还包括藻类对营养物质的生态效应。

目前,对于某个典型湖泊或区域内多个湖泊富营养化所产生的效应以及藻类对营养物质的生态效应方面的研究比较多见^[6~11],但探讨不同区域湖泊富营养化效应区域差异性的研究较少见^[12,13]。为了进行科学的营养物生态分区,制定基于区域差异性的湖泊营养物基准和富营养化控制标准,本研究针对全国范围内不同区域的一百多个湖泊的富营养化效应及藻类对营养物质的生态效应进行分析,系统考察了这些效应的区域差异性,以期为我国营养物生态分区提供参考。

1 材料与方法

1.1 数据收集

于2008~2010年进行了全国主要湖泊水质生态指标的监测和数据收集工作,数据主要来源于地方环境监测部门(2008年)以及现场监测(2009~2010年)。

1.2 水质监测

现场用塞氏盘测量采样点水体的透明度(secchi-depth,SD)。采样后立即带回实验室,根据文献[14]中的方法,在24 h内测定其总氮(TN)、总磷(TP)、高锰酸盐指数和叶绿素a(Chl-a)。

1.3 数据的处理与分析

利用SPSS 17.0^[15]的曲线估计及线性拟合功能分析Chl-a与SD、TN、TP的相关性。Chl-a与SD的关系可以说明湖泊透明度的变化与水体中藻类生长情况的相应程度,营养物质TN、TP与Chl-a的关系可以说明藻类对营养物质的效应。

2 结果与讨论

2.1 我国湖泊富营养化相关指标区域差异性

为了探明不同区域湖泊富营养化效应的区域差异性,首先,需要明晰不同区域湖泊富营养化相关指标统计变量的区域差异性。根据2008~2011年6~9月的监测数据,分析TN、TP及Chl-a的频率分布以及统计变量情况,从而明晰不同区域湖泊富营养化相关指标的区域差异性。由于TN、TP及Chl-a不符合正态分布,故将三者进行对数转换,转换后符合正态分布,这样可以进行频率分布的比较。

由图1(a)及表1可知,华北平原lg TN的离散程度最大并且TN浓度的均值最高;长江中下游平原lg TN的离散程度最小,但TN浓度的均值却不是最小的,说明长江中下游平原TN浓度集中分布在较小的范围内,而这个范围又是浓度比较高的情况;东北平原-山地和云贵高原TN浓度的均值相差不大,但云贵高原lg TN分布范围较东北平原-山地大,这可能是由于云贵高原内的富营养化湖泊滇池、洱海等影响lg TN的整体分布情况,使其分布在较宽的范围;蒙新高原和东北平原TN浓度的均值较接近,但华北平原lg TN的分布范围较蒙新高原大。

由图1(b)及表2可知,华北平原lg TP的离散程度及TP浓度的均值最大,东北平原-山地lg TP的离散程度最小,云贵高原TP浓度的均值最小;东北平原-山地和蒙新高原TP浓度的平均值相同,但蒙新高原lg TP的离散程度较东北平原-山地大;尽管云贵高原TP浓度的均值最小,但lg TP的离散程度较大,同样是由于云贵高原区域内湖泊之间水质的差异较大,导致水质数据的离散程度较大。

由图1(c)及表3可知,蒙新高原Chl-a浓度的均值最小,但lg Chl-a的离散程度较大;长江中下

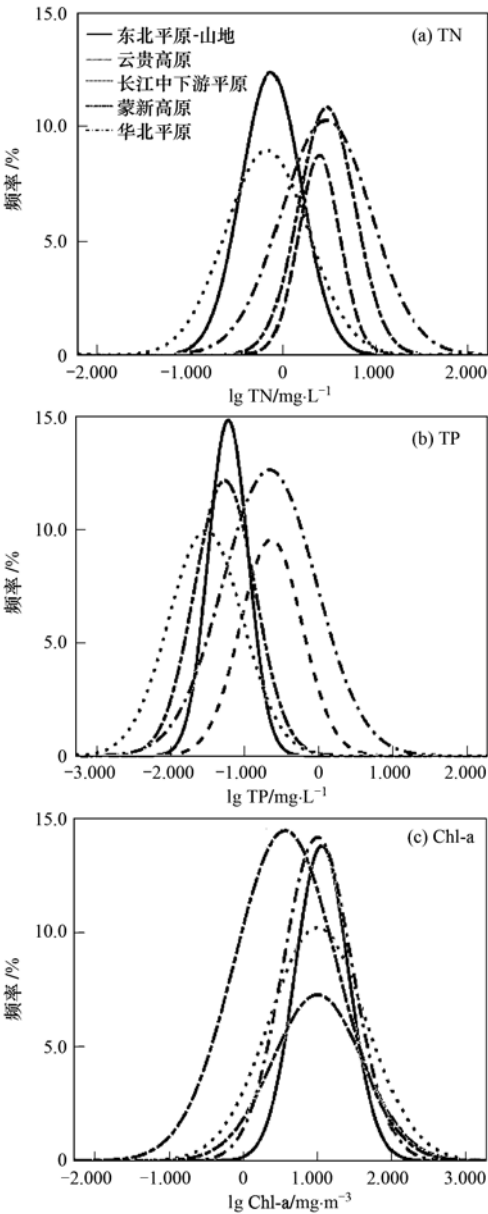


图1 不同湖泊区域 TN、TP 和 Chl-a 的频率分布
Fig. 1 Frequency distribution of TN, TP and Chl-a in different lake regions

游平原和云贵高原 Chl-a 浓度的均值最大,lg Chl-a 的离散程度接近,但同样数据较离散;华北平原和东北平原-山地 lg Chl-a 的离散程度接近,均较小,且 Chl-a 浓度的均值居中. 由以上的分析可以看到,华北平原地区 lg TN 和 lg TP 的离散程度较大,但其 lg Chl-a 的离散程度却较小;长江中下游平原 lg TN 和 lg TP 的离散程度较小,但其 lg Chl-a 的离散程度却较大;同样蒙新高原 lg TN 和 lg TP 的离散程度较小,但 lg Chl-a 的离散程度却较大. 东北平原-山地 lg TN、lg TP 以及 lg Chl-a 的离散程度均较小. 云贵高原 lg TN、lg TP 以及 lg Chl-a 的离散程度均较大. 蒙新高原 TN 浓度的均值较高,TP 浓度的均值较低,Chl-a 浓度的均值同样较低,而云贵高原营养物质 TN 和 TP 浓度的均值均较低,但其 Chl-a 浓度的均值却较高. 东北平原-山地 TN、TP 以及 Chl-a 浓度的均值均较低. 华北平原营养物质 TN 和 TP 浓度的均值均是最高,但 Chl-a 浓度的均值却较长江中下游的低;长江中下游平原 TN 浓度的均值较华北平原和蒙新高原低,TP 浓度的均值较华北平原低,但其 Chl-a 浓度的均值却是最高. 由此可以看出,不同区域湖泊中浮游藻类对营养物质 TN 和 TP 的利用效率存在显著差异,导致同样的营养物水平条件下,浮游藻类的生物量 (Chl-a) 存在显著差异.

2.2 浮游藻类对营养物质磷生态效应的区域差异性
由我国湖泊富营养化相关指标区域差异性分析的结果可以看出,不同湖泊浮游藻类对营养物质 TN 和 TP 的利用效率存在区域差异性,利用 lg Chl-a 分别与 lg TN 和 lg TP 线性方程的斜率表征浮游藻类对营养物质的利用效率,通过不同区域之间的比较,具体说明差异性. 浮游植物生物量(以 Chl-a 表示)与营养物质 TN、TP 的经验模型是湖泊管理者

表1 不同湖泊区域总氮 (TN) 的统计量(2008~2011 年 6、7、8、9 月)

湖区	长江中下游平原	华北平原	东北平原-山地	云贵高原	蒙新高原
样本数/个	396	142	116	712	184
平均值/mg·m ⁻³	2. 809	4. 835	0. 986	1. 196	3. 721
中位数/mg·m ⁻³	2. 310	2. 568	0. 710	0. 600	2. 975
标准偏差	1. 565	3. 956	0. 873	2. 102	2. 429
标准误差	0. 079	0. 332	0. 081	0. 079	0. 179

通过营养物质削减来评价湖泊富营养化程度的工具^[12]. 以往的研究结果表明,这些经验模型都是基于多个湖泊的调查数据,通过统计分析手段,得到简单的线性方程^[10,16]或者复杂的多项式模型^[17,18]. 本研究将 Chl-a 浓度与营养物质 TN、TP 的相关性即

Chl-a/TP(TN) 作为评价浮游藻类对营养物质利用效率的指标.

营养物质与浮游植物生物量(以 Chl-a 表示)之间的关系可以说明湖泊水体富营养化的限制营养盐^[19]. 以往的研究结果表明,Chl-a 的浓度与许多因

表 2 不同湖区总磷 (TP) 的统计量 (2008 ~ 2011 年 6、7、8、9 月)

Table 2 Statistical parameters of TP in different lake regions (data used in June, July, August, September, 2008-2011)

湖区	长江中下游平原	华北平原	东北平原-山地	云贵高原	蒙新高原
样本数/个	481	107	116	684	186
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.372	0.894	0.072	0.067	0.072
中位数/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	0.210	0.307	0.068	0.026	0.044
标准偏差	0.482	3.255	0.042	0.127	0.091
标准误差	0.022	0.315	0.004	0.005	0.007
变异系数	1.295	3.639	0.587	1.900	1.268

表 3 不同湖区叶绿素 a (Chl-a) 的统计量 (2008 ~ 2011 年 6、7、8、9 月)

Table 3 Statistical parameters of Chl-a in different lake regions (data used in June, July, August, September, 2008-2011)

湖区	长江中下游平原	华北平原	东北平原-山地	云贵高原	蒙新高原
样本数/个	483	87	67	491	155
平均值/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	25.299	20.103	15.788	23.091	8.558
中位数/ $\text{mg} \cdot \text{m}^{-3}$	12.000	8.690	12.337	14.313	3.927
标准偏差	41.394	32.068	12.690	32.524	10.915
标准误差	1.884	3.438	1.550	1.471	0.877
变异系数	1.636	1.595	0.804	1.409	1.275

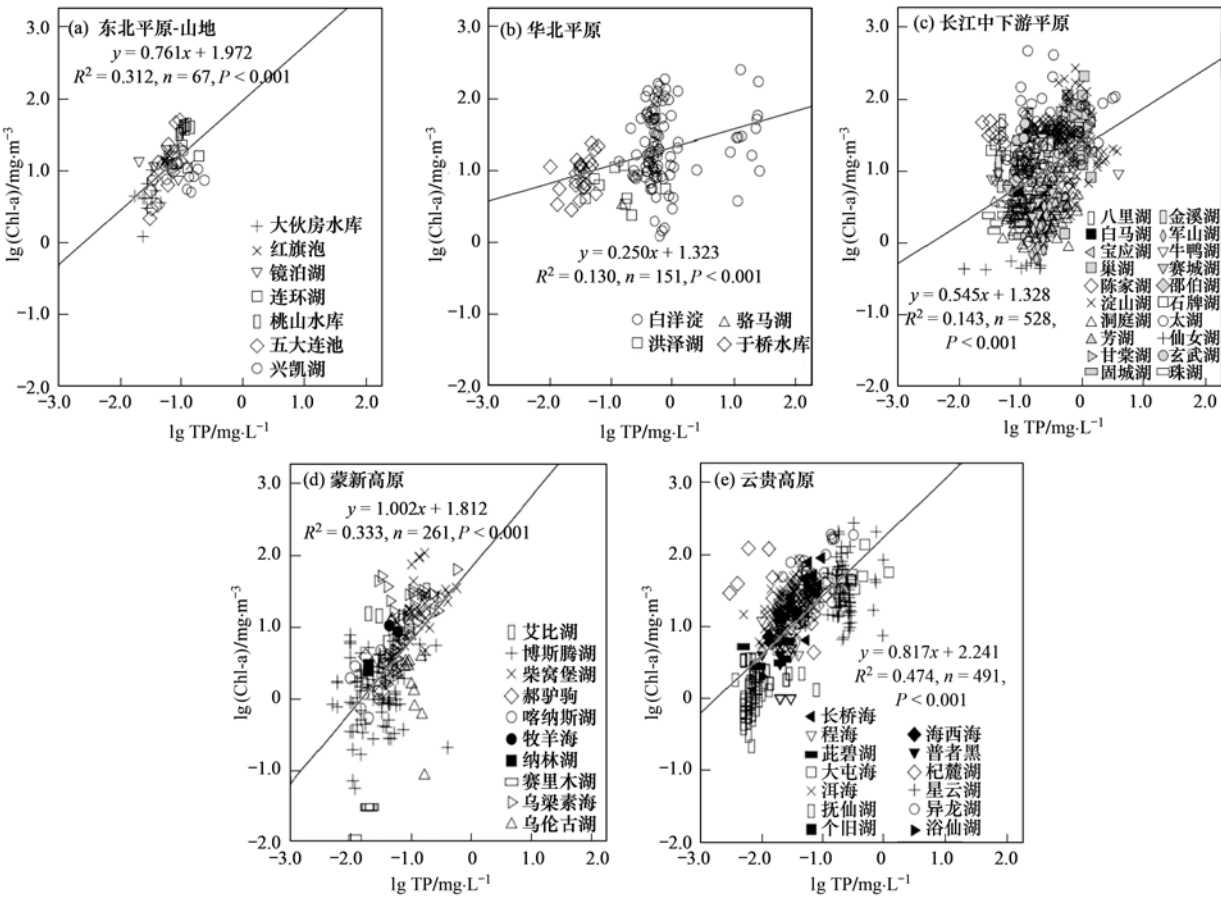


图 2 不同湖泊区域 TP 对浮游藻类的生态效应

Fig. 2 Ecological effect of TP on algae in different lake regions

子有关^[8], 其中总磷是最重要的限制营养物质^[10,20,21]. lg Chl-a 与 lg TP 有较强的线性相关性, 说明湖泊中藻类的生长繁殖是受 TP 浓度的限制, 线性方程的斜率以及截距受一些因素的影响而具有

差异性. 由图 2 可知, 我国不同区域 lg Chl-a 浓度与 lg TP 的线性方程斜率存在较大差异, 其中, 东北平原-山地、蒙新高原和云贵高原湖泊中 lg Chl-a 与 lg TP 有较好的线性相关性, 斜率分别为 0.761、

1.002 和 0.817, 长江中下游和华北平原两者的线性相关性较弱, 斜率分别为 0.545 和 0.250。由此可知, 5 个湖泊区域浮游藻类对 TP 利用效率由高到低依次是蒙新高原、云贵高原、东北平原-山地、长江中下游平原及华北平原, 5 个湖泊区域 lg TP 对 lg Chl-a 变化的解释度由高到低依次是云贵高原、蒙新高原、东北平原-山地、长江中下游平原和华北平原, 分别为 31.2%、13.0%、14.3%, 33.3% 和 47.4%, 说明在 5 个区域中 Chl-a 浓度受 TP 限制最为明显的是云贵高原, 最弱的是华北平原。Liu 等^[22]研究云贵高原杞麓湖 Chl-a 与 TP 的线性相关性, 发现 TP 可以解释 Chl-a 浓度变化的 42%, 与本研究得到的云贵高原湖泊中 lg Chl-a 与 lg TP 相关性的结果一致。

2.3 浮游藻类对营养物质氮生态效应的区域差异性

5 个湖泊区域中, 华北平原、长江中下游平原和云贵高原, lg Chl-a 与 lg TN 之间呈显著正相关关系 (图 3), 线性方程的斜率分别为 0.447、1.401 和 1.058, 说明长江中下游平原浮游藻类对 TN 的利用效率最高。东北平原-山地及蒙新高原 lg Chl-a 与 lg TN 之间的相关性较弱, 说明这 2 个区域浮游藻类

对 TN 的利用效率较低。lg TN 对 lg Chl-a 变化的解释度由高到低依次是云贵高原、长江中下游平原、华北平原、东北平原-山地及蒙新高原。说明 TN 对湖泊中藻类生长状况影响最大的是云贵高原, 可以通过 TN 的削减达到抑制藻类生长的目的, 而在东北平原-山地以及蒙新高原, TN 对藻类生长的影响较小, 很难通过 TN 的削减达到富营养化控制的目的。Trevisan 等^[9]对亚马逊平原中部 (经度范围为 60°00' ~ 60°30'W) 的湖泊中 Chl-a 浓度与 TN 和 TP 的线性相关性进行拟合的结果发现, 这一区域的湖泊中 TN 和 TP 与 Chl-a 浓度均有较好的线性相关性 ($R^2 = 0.88, P = 0.000$; $R^2 = 0.85, P = 0.000$), 但当 TN 和 TP 同时进行多元回归时, 发现只有 TN 可以解释 Chl-a 浓度的变化 ($R^2 = 0.89, P_{TN} = 0.022, P_{TP} = 0.233$)。Trevisan 等^[9]的研究结果与本研究中位于我国亚热带地区长江中下游平原 (经度范围为 114°00' ~ 122°00'E) 的结果类似。

综合 lg Chl-a 与 lg TP 和 lg TN 的关系发现, lg TP 对 lg Chl-a 变化的解释度大于 lg TN 的区域是蒙新高原和东北平原-山地, 说明在蒙新高原和东北平原-山地, TP 是影响藻类生长的主要营养物

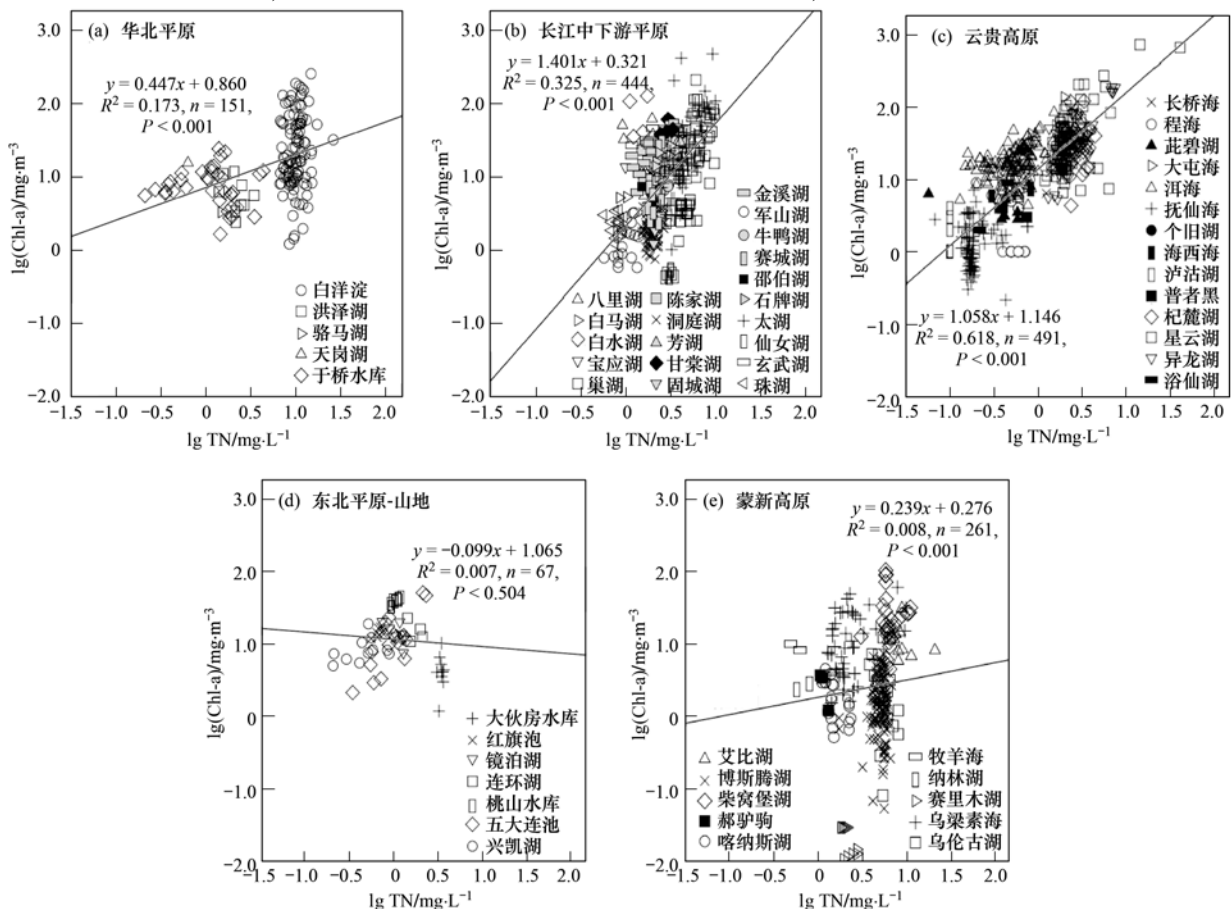


图3 不同湖泊区域 TN 对浮游藻类的生态效应

Fig. 3 Ecological effect of TN on algae in different lake regions

质; $\lg \text{TN}$ 对 $\lg \text{Chl-a}$ 变化的解释度大于 $\lg \text{TP}$ 的区域是云贵高原、华北平原和长江中下游平原,说明在以上 3 个区域, $\lg \text{TN}$ 是影响藻类生长的主要营养物质. 由此可以看出,不同区域湖泊浮游藻类对营养物质 TN 和 TP 的利用效率以及营养物质限制类型存在差异,因此,在进行营养物生态分区时,应充分考虑不同区域富营养化效应的差异性.

2.4 藻类生物量对水体透明度影响的区域差异性

在发生富营养化的水体中,以蓝藻、绿藻为优势种类的水藻大量繁殖,导致水体浑浊,透明度明显降低,使得美观程度和水体功能下降. 但由于我国湖泊分布广泛,成因复杂,富营养化的成因和机制不尽相同,导致水体透明度与藻类生长状况之间的相应关系呈现明显的区域差异性. 由图 4 可知,云贵高原、蒙新高原和华北平原, Chl-a 与 SD 之间均呈幂函数

关系,但云贵高原 Chl-a 对 SD 变化的解释度最高,达到 64.4%,而蒙新高原和华北平原, Chl-a 对 SD 变化的解释度分别为 26.7% 和 22.5%. 东北平原-山地, Chl-a 与透明度呈倒数关系, Chl-a 对透明度变化的解释度为 30.7%. 长江中下游平原, Chl-a 与透明度之间没有任何的相关性.

由以上的分析可以看出,5 个湖泊区域中藻类生长繁殖对水体透明度影响存在明显的区域差异性,透明度受藻类生长繁殖影响最大的是云贵高原,其次是东北平原-山地,蒙新高原和华北平原,而长江中下游平原两者之间没有任何相关性,可能是由于这一区域多为浅水湖泊,人类活动向湖体排放的污染物很难通过沉降作用沉于湖底,而是悬浮于水体中,从而影响水体的透明度,因此,这一区域湖泊水体透明度受藻类生长繁殖影响小于水体扰动对透明度的影响.

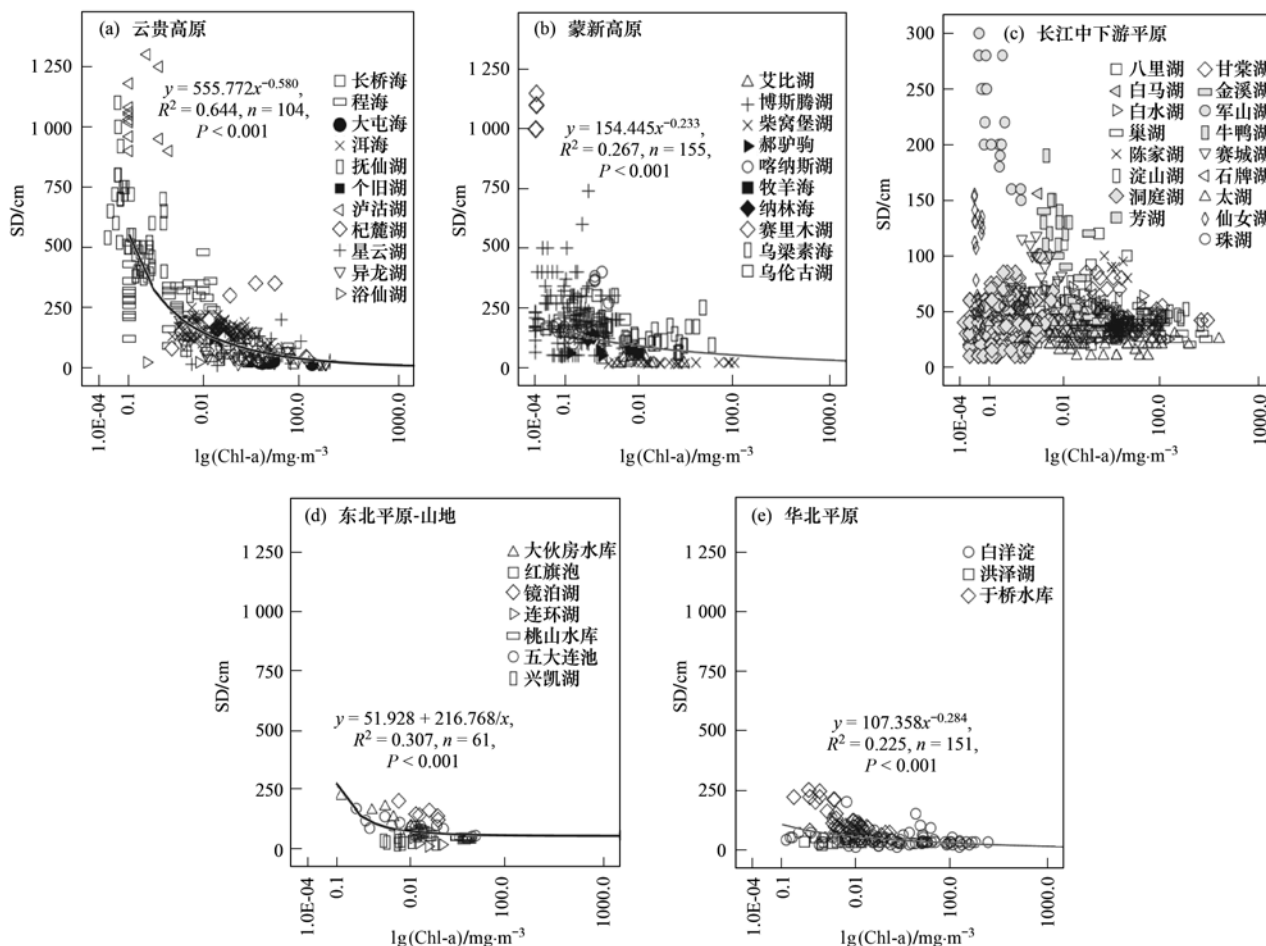


图 4 不同湖泊区域 Chl-a 与透明度的关系

Fig. 4 Relationship between Chl-a and SD in different lake regions

3 结论

(1) 东北平原-山地、华北平原、长江中下游平

原、蒙新高原及云贵高原,5 个湖泊区域中 $\lg \text{TP}$ 对 $\lg \text{Chl-a}$ 变化的解释度最大的是云贵高原达 47.4%,最小的是华北平原为 13.0%,说明 5 个湖

泊区域中 Chl-a 浓度受 TP 限制最为明显的是云贵高原, 最弱的是华北平原。浮游藻类对 TP 的利用效率由高到低依次是蒙新高原、云贵高原、东北平原-山地、长江中下游平原及华北平原。

(2) lg TN 对 lg Chl-a 变化的解释度最大的同样是云贵高原, 达 61.8%, 最小的是东北平原-山地, 说明 5 个湖泊区域中 Chl-a 浓度受 TN 限制最为明显的是云贵高原, 最弱的是东北平原-山地。浮游藻类对 TN 的利用效率由高到低依次是长江中下游平原、云贵高原、华北平原、东北平原-山地及蒙新高原。由此可见, 东北平原-山地和蒙新高原 TP 对 Chl-a 浓度变化的解释度高于 TN, 而在华北平原、长江中下游平原和云贵高原, TN 对 Chl-a 浓度变化的解释度高于 TP。

(3) 湖泊中浮游藻类生长繁殖对水体透明度影响最大的是云贵高原, 其次是东北平原-山地、蒙新高原和华北平原, 长江中下游平原水体透明度与浮游藻类生物量之间未见显著相关性。

参考文献:

- [1] 吴丰昌, 孟伟, 宋永会, 等. 中国湖泊水环境基准的研究进展 [J]. 环境科学学报, 2008, **28**(12): 2385-2393.
- [2] 霍守亮, 陈奇, 席北斗, 等. 湖泊营养物基准的制定方法研究进展 [J]. 生态环境学报, 2009, **18**(2): 743-748.
- [3] 孟伟, 张远, 郑丙辉. 水环境质量基准、标准与流域水污染物总量控制策略 [J]. 环境科学研究, 2006, **19**(3): 1-6.
- [4] 孟伟, 刘征涛, 张楠, 等. 流域水质目标管理技术研究 (II) ——水环境基准、标准与总量控制 [J]. 环境科学研究, 2008, **21**(1): 1-8.
- [5] Gibson G, Carlson R, Simpson J. Nutrient criteria technical guidance manual: lakes and reservoirs (EPA-822-B-00-001) [R]. Washington DC: United States Environment Protection Agency, 2000.
- [6] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 内蒙古乌梁素海富营养化与环境因子的相关分析 [J]. 环境科学与技术, 2010, **33**(7): 125-129.
- [7] Pan B Z, Wang H J, Liang X M, *et al.* Factors influencing chlorophyll a concentration in the Yangtze-connected lakes [J]. *Fresenius Environmental Bulletin*, 2009, **18**(10): 1894-1900.
- [8] Wang H J, Liang X M, Jiang P H, *et al.* TN: TP ratio and planktivorous fish do not affect nutrient-chlorophyll relationships in shallow lakes [J]. *Freshwater Biology*, 2008, **53**(5): 935-944.
- [9] Trevisan G V, Forsberg B R. Relationships among nitrogen and total phosphorus, algal biomass and zooplankton density in the central Amazonia lakes [J]. *Hydrobiologia*, 2007, **586**(1): 357-365.
- [10] Dillon P J, Rigler F H. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes [J]. *Limnology and Oceanography*, 1974, **19**(5): 767-773.
- [11] Huszar V L M, Caraco N F, Roland F, *et al.* Nutrient-chlorophyll relationships in tropical-subtropical lakes: do temperate models fit? [J]. *Biogeochemistry*, 2006, **79**(1-2): 239-250.
- [12] Havens K E, Nürnberg G K. The phosphorus-chlorophyll relationship in lakes: potential influences of color and mixing regime [J]. *Lake and Reservoir Management*, 2004, **20**(3): 188-196.
- [13] Phillips G, Pietiläinen O P, Carvalho L, *et al.* Chlorophyll-nutrient relationships of different lake types using a large European dataset [J]. *Aquatic Ecology*, 2008, **42**(2): 213-226.
- [14] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [15] 卢纹岱. SPSS for Windows 统计分析 [M]. (第三版). 北京: 电子工业出版社, 2003. 477-502.
- [16] Jones J R, Bachmann R W. Prediction of phosphorus and chlorophyll levels in lakes [J]. *Journal of Water Pollution Control Federation*, 1976, **48**(9): 2176-2182.
- [17] Mazumder A. Phosphorus-chlorophyll relationships under contrasting herbivory and thermal stratification: predictions and patterns [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2004, **51**(2): 390-400.
- [18] Prairie Y T, Duarte C M, Kalff J. Unifying nutrient-chlorophyll relationships in lakes [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1989, **46**(7): 1176-1182.
- [19] Peters R H. The role of prediction in limnology [J]. *Limnology Oceanography*, 1986, **31**(5): 1143-1159.
- [20] Van Nieuwenhuysse E E, Jones J R. Phosphorus chlorophyll relationship in temperate streams and its variation with stream catchment area [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1996, **53**(1): 99-105.
- [21] Prepas E E, Trew D O. Evaluation of the phosphorus-chlorophyll relationship for lakes off the Precambrian Shield in western Canada [J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 1983, **40**(1): 27-35.
- [22] Liu Y, Guo H C, Yang P J. Exploring the influence of lake water chemistry on chlorophyll a: a multivariate statistical model analysis [J]. *Ecological Modelling*, 2010, **221**(4): 681-688.

CONTENTS

Regional Heterogeneity of Lake Eutrophication Effects in China	CAO Jin-ling, XU Qi-gong, XI Bei-dou, <i>et al.</i> (1777)
Correlating Landscape Pattern with Total Nitrogen Concentration Using a Location-weighted Sink-source Landscape Index in the Haihe River Basin, China	SUN Ran-hao, CHEN Li-ding, WANG Wei, <i>et al.</i> (1784)
Impact of the Land-use Change on the Non-point Source Nitrogen Load in Yunneng Lake Watershed	MENG Xiao-yun, YU Xing-xiu, PAN Xue-qin (1789)
Residue Characteristics and Distributions of Perfluorinated Compounds in Surface Seawater Along Shenzhen Coastline	CHEN Qing-wu, ZHANG Hong, CHAI Zhi-fang, <i>et al.</i> (1795)
Distribution and Potential Ecological Risk of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Sediments from Typical Electronics Industrial Zone	DENG Dai-yong, QIU Meng-de, SUN Guo-ping, <i>et al.</i> (1801)
Residues and Potential Ecological Risk Assessment of Metal in Sediments from Lower Reaches and Estuary of Pearl River	XIE Wen-ping, WANG Shao-bing, ZHU Xin-ping, <i>et al.</i> (1808)
Character and Sources Identification of Heavy Metals Contamination in Sediment from the Core Sediment in Nanshan Lake, the Zhalong Wetland	SU Dan, ZANG Shu-ying, YE Hua-xiang, <i>et al.</i> (1816)
Distribution Characteristics of Phosphorus Forms in Surface Sediments of the Shantou Bay in China	ZHAO Jian-gang, QIAO Yong-min (1823)
Microcosm Experiments on the Influence of Different N/P Ratios on Phytoplankton Community Growth in the East China Sea	HUANG Wei, ZHU Xu-yu, ZENG Jiang-ning, <i>et al.</i> (1832)
Species Composition and Distribution Characteristics of Pelagic Copepods in the Northern Sea of Fujian During Withdraw of Zhe-Min Coastal Current	WANG Yan-guo, LIN Jing-hong, WANG Chun-guang, <i>et al.</i> (1839)
PAHs Concentrations in Aquatic Products and Food Safety Evaluation in the Coupled Mangrove Planting-Aquaculture Ecological System	CHEN Guan-qiu, LI Yao-chu, HUANG Jin-mu, <i>et al.</i> (1846)
Tissue Distribution and Bioconcentration Factors of Tetrabromobisphenol A in Five Fishes in Lake Chaohu	YANG Su-wen, WANG Sheng-rui, YAN Zhen-guang, <i>et al.</i> (1852)
Induction Effects of Pentachlorophenol on Vitellogenin and p53 in Chinese Rare Minnow (<i>Gobiocypris rarus</i>)	XIONG Li, MA Yong-peng, ZHANG Xiao-zheng, <i>et al.</i> (1858)
Effects of Perfluorooctane Sulfonate (PFOS) Exposure on Vitellogenin mRNA Level in Zebrafish (<i>Brachydanio rerio</i>)	CHENG Yan, CUI Yuan, DANG Zhi-chao, <i>et al.</i> (1865)
Relationship Between Electron Transfer Capacity and <i>Fluorescence Characteristics</i> of Dissolved Organic Matter	TAO Ya, YUAN Tian, ZHOU Shun-gui, <i>et al.</i> (1871)
Characterization of the Change in DOM During Municipal Secondary Effluent Treatment with Magnetic Ion Exchange Resin by 3DEEM	YANG Jian, GAO Jin-hua, CHANG Jiang (1878)
Reverse Osmosis Membrane Fouling by Humic Acid Using XDLVO Approach; Effect of Calcium Ions	YAO Shu-di, GAO Xin-yu, GUO Ben-hua, <i>et al.</i> (1884)
Growth, Removal of Nitrogen and Phosphorus, and Lipid Accumulation Property of <i>Scenedesmus</i> sp. LX1 in Aquaculture Wastewater	MA Hong-fang, LI Xin, HU Hong-ying, <i>et al.</i> (1891)
Iron Chloride for Simultaneous Denitrification and Chemical-Biological Flocculation Process	WANG Hong-jie, DONG Wen-yi, LIU Li-sha, <i>et al.</i> (1897)
Characteristic Research of Shortcut Denitrification in Synthetic Ammonia Industrial Wastewater Treatment Process	LI Yan, LI Ze-bing, MA Jia-xuan, <i>et al.</i> (1902)
Stability Control of Aerobic Granules Using an Innovative Reactor	LI Zhi-hua, YANG Fan, LI Sheng, <i>et al.</i> (1907)
Description of the Stability of Granules Using Nongrowth-related Parameters	LI Zhi-hua, WU Jun, LI Sheng, <i>et al.</i> (1913)
Enhancement of Anaerobic Digestion of Excess Sludge by Acid-Alkali Pretreatment	YUAN Guang-huan, ZHOU Xing-qiu, WU Jian-dong (1918)
Pilot Validation of Sludge Concentration Partition at Small Reflux Ratio Condition	SHI Si, WANG Su-lan, LI Rui, <i>et al.</i> (1923)
Influence of Non-ionic Surfactants on Sludge Dewaterability	HOU Hai-pan, PU Wen-hong, SHI Ya-fei, <i>et al.</i> (1930)
Variation Characteristics and Influencing Factors of Air Pollution Index in China	LI Xiao-fei, ZHANG Ming-jun, WANG Sheng-jie, <i>et al.</i> (1936)
Characteristics of Aerosol Water-Soluble Inorganic Ions in Three Types Air-Pollution Incidents of Nanjing City	ZHANG Qiu-chen, ZHU Bin, SU Ji-feng, <i>et al.</i> (1944)
Characterization of Atmospheric PM _{2.5} in the Suburb of Shenzhen	DAI Wei, GAO Jia-qi, CAO Gang, <i>et al.</i> (1952)
Analysis on Oil Fume Particles in Catering Industry Cooking Emission	TAN De-sheng, KUANG Yuan-cheng, LIU Xin, <i>et al.</i> (1958)
Low-Temperature Catalytic Reduction of NO over Fe-MnO _x -CeO ₂ /ZrO ₂ Catalyst	LIU Rong, YANG Zhi-qin (1964)
CO ₂ Absorption and Regeneration Performance of a Natural Amino Acid and Its Potassium Salt	YAN Shui-ping, CHEN Jing-ao, XU Ming-liang, <i>et al.</i> (1971)
Effects of Tillage-Cropping Systems on Methane and Nitrous Oxide Emissions from Agro-Ecosystems in a Purple Paddy Soil	ZHANG Jun-ke, JIANG Chang-sheng, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (1979)
Factors Influencing Ammonia Volatilization in a Winter Wheat Field with Plastic Film Mulched Ridges and Unmulched Furrows	SHANGGUAN Yu-xian, SHI Ri-peng, LI Na, <i>et al.</i> (1987)
Effects of Typical Herbicides on Soil Respiration and N ₂ O Emissions from Soil Added with Different Nitrogen Fertilizers	SUN Qing, SHI Chun-xing, SHI Kun, <i>et al.</i> (1994)
Analysis of Characteristics of Dioxin Contamination in the Chlor-alkali Site that Uses Graphite Anode for Production	YU Li-feng, WEI Wen-xia, TIAN Ya-jing, <i>et al.</i> (2000)
Effect of Flue Gas Desulfurization Gypsum Application on Remediation of Acidified Forest Soil	LUO Yao, KANG Rong-hua, YU De-xiang, <i>et al.</i> (2006)
Morphology of Soil Iron Oxides and Its Correlation with Soil-Forming Process and Forming Conditions in a Karst Mountain	ZHANG Zhi-wei, ZHU Zhang-xiong, FU Wa-li, <i>et al.</i> (2013)
Pb, Zn Accumulation and Nutrient Uptake of 15 Plant Species Grown in Abandoned Mine Tailings	SHI Xiang, CHEN Yi-tai, WANG Shu-feng, <i>et al.</i> (2021)
Effect of Cr(VI) Stress on Growth of Three Herbaceous Plants and Their Cr Uptake	WANG Ai-yun, HUANG Shan-shan, ZHONG Guo-feng, <i>et al.</i> (2028)
Bioaccumulation of Heavy Metals by the Dominant Plants Growing in Huayuan Manganese and Lead/Zinc Mineland, Xiangxi	YANG Sheng-xiang, TIAN Qi-jian, LIANG Shi-chu, <i>et al.</i> (2038)
Effect of CO ₂ Fertilization on Residual Concentration of Cypermethrin in Rhizosphere of C3 and C4 Plant	MU Nan, DIAO Xiao-jun, WANG Shu-guang, <i>et al.</i> (2046)
Bioaugmented Removal of Pyridine and the Microbial Community Dynamic Analysis	QIAO Lin, ZHAO Hong, WANG Jian-long (2052)
Relationship Between Sewage Treatment Efficiency and Bacterial Community Diversity in an A/O MBR	KUANG Bin-yu, SHI Qing, Montcho Leon Monthero, <i>et al.</i> (2061)
Dynamic Changes in Functional Genes for Nitrogen Cycle During Bioremediation of Petroleum-Contaminated Soil	WU Bin-bin, LU Dian-nan, LIU Zheng (2068)
Risk Assessment of Lead Exposure from Different Intake Pathways for Children in Wuhan City	HAO Han-zhou, CHEN Tong-bin, WU Ji-liang, <i>et al.</i> (2075)
Implementation of a Pretreatment Device for an Electronic Nose	BU Fan-yang, WEN Xiao-gang, WAN Mei, <i>et al.</i> (2083)
Copper and Cadmium Toxicities to Activated Sludge Investigated with ToxTell Biosensor	WANG Xue-jiang, WANG Xin, LIU Mian, <i>et al.</i> (2090)
Matrix Effect and Control of Immunoassay for Environmental Samples	SHENG Jian-wu, HE Miao, SHI Han-chang (2095)
Study on Vitrification of Simulated Medical Wastes by Thermal Plasma	ZHANG Lu, YAN Jian-hua, DU Chang-ming, <i>et al.</i> (2104)
Study on the Low Temperature Drying of Components of Municipal Solid Waste and Its Model Analysis	WU Ya-juan, LIU Hong-mei, LU Sheng-yong, <i>et al.</i> (2110)
Aerogenesis Evolution of the Anaerobic-semiaerobic Bioreactor Landfill	HAN Zhi-yong, LIU Dan, LI Qi-bin (2118)
Performance of Microbial Fuel Cells with Fe/C Catalyst Carbon Felt Air-Cathode for Treating Landfill Leachate	TANG Yu-lan, PENG Man, YU Yan, <i>et al.</i> (2125)
Relationships Between Soil and Rocky Desertification in Typical Karst Mountain Area Based on Redundancy Analysis	LONG Jian, LIAO Hong-kai, LI Juan, <i>et al.</i> (2131)
Energy Consumption and GDP Growth in Beijing: Cointegration and Causality Analysis	CHEN Cao-cao, ZHANG Yan, LIU Chun-lan, <i>et al.</i> (2139)

《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)

2012年6月15日 33卷 第6期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 33 No. 6 Jun. 15, 2012

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: 70.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行人