

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第36卷 第2期

Vol.36 No.2

2015

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

霾与非霾期间汞在不同粒径颗粒物上的分布特征	朱琮宇,程金平,魏雨晴,薄丹丹,陈筱佳,江璇,王文华(373)
大气传输路径对上甸子本底站气溶胶光学特性的影响	蒲维维,石雪峰,马志强,赵秀娟,张小玲,徐晓峰(379)
近3年太原市夏季降水的化学特征研究	郭晓方,崔阳,王开扬,何秋生,王新明(388)
太原市PM _{2.5} 中有机碳和元素碳的污染特征	刘珊,彭林,温彦平,白慧玲,刘凤娴,史美鲜,李丽娟(396)
青海省西宁市和天峻县大气颗粒物中有机氯农药和类二噁英多氯联苯的水平与分布	李秋旭,何畅,马召辉,马丽花,扎西卓玛,王英,金军(402)
北京10个常绿树种颗粒物吸附能力研究	王兵,张维康,牛香,王晓燕(408)
人工湿地空气微生物群落碳源代谢特征	宋志文,王琳,徐爱玲,吴等等,夏岩(415)
春季融雪补给后巩乃斯河水物理化学性质空间分布特征研究	刘翔,郭玲鹏,张飞云,马杰,牟书勇,赵鑫,李兰海(421)
青藏高原湖泊小流域水体离子组成特征及来源分析	李鹤,李军,刘小龙,杨曦,张伟,王洁,牛颖权(430)
亚热带深水水库——龙滩水库季节性分层与富营养化特征分析	张垒,李秋华,黄国佳,欧腾,李钊,吴迪,周黔兰,高廷进(438)
长江河口水库沉积物磷形态、吸附和释放特性	金晓丹,吴昊,陈志明,宋红军,何义亮(448)
黄河口溶解无机碳时空分布特征及影响因素研究	郭兴森,吕迎春,孙志高,王传远,赵全升(457)
苕溪干流悬浮物和沉积物的磷形态分布及成因分析	陈海龙,袁旭音,王欢,李正阳,许海燕(464)
滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力	孟亚媛,王圣瑞,焦立新,刘文斌,肖焱波,祖维美,徐天敏,丁帅,周童(471)
城郊排水沟渠溶质传输的暂态存储影响及参数灵敏性	李如忠,钱靖,董玉红,唐文坤,杨继伟(481)
艾比湖表层沉积物重金属的来源、污染和潜在生态风险研究	张兆永,吉力力·阿不都外力,姜逢清(490)
工矿业绿洲城郊排污渠沉积物重金属的形态分布规律及风险评价	臧飞,王胜利,南忠仁,王兆炜,任业萌,王德鹏,廖琴,周婷(497)
山东省典型工业城市土壤重金属来源、空间分布及潜在生态风险评价	戴彬,吕建树,战金成,张祖陆,刘洋,周汝佳(507)
UV协同ClO ₂ 去除三氯生及其降解产物的研究	李玉瑛,何文龙,李青松,金伟伟,陈国元,李国新(516)
氯化铁絮凝-直接过滤工艺对地下水中As(V)的去除机制研究	康英,段晋明,景传勇(523)
负载纳米零价铁铜藻基活性炭的制备及其去除水中Cr(VI)的研究	曾淦宁,武晓,郑林,伍希,屠美玲,王铁杆,艾宁(530)
磁性石墨烯吸附水中Cr(VI)研究	刘伟,杨琦,李博,陈海,聂兰玉(537)
TiO ₂ @酵母复合微球固定床吸附荧光增白剂-VBL的研究	吴菲,张凯强,白波,王洪伦,索有瑞(545)
MnO ₂ /CFP复合电极的制备及电吸附Pb ²⁺ 特性的研究	刘方园,胡承志,李永峰,梁乾伟(552)
吸附相反应技术制备微弱光响应的多组分掺杂TiO ₂ 催化剂	王挺,祝轶琛,孙志轩,吴礼光(559)
掺铁TiO ₂ 纳米管阵列模拟太阳光光电催化降解双酚A的研究	项国梁,喻泽斌,陈颖,徐天佐,彭振波,刘钰鑫(568)
天然矿物负载Fe/Co催化H ₂ O ₂ 氧化降解阳离子红3R	马楠,刘华波,谢鑫源(576)
臭氧微气泡处理酸性大红3R废水特性研究	张静,杜亚威,刘晓静,周玉文,刘春,杨景亮,张磊(584)
碳源类型、温度及电子受体对生物除磷的影响	韩芸,许松,董涛,王斌帆,王显耀,彭党聪(590)
低温低溶解氧EBPR系统的启动、稳定运行及工艺失效问题研究	马娟,李璐,俞小军,魏雪芬,刘娟丽(597)
O池溶解氧水平对石化废水A/O工艺污染物去除效果和污泥微生物群落的影响	丁鹏元,初里冰,张楠,王星,王建龙(604)
改善污泥脱水性能的丝状真菌的分离及其促进污泥脱水的机制初探	周雨璐,付豪逸,范先锋,王振宇,郑冠宇(612)
热碱处理对污水处理厂污泥特性的影响研究	杨世东,陈霞,刘操,肖本益(619)
不同退化程度羊草草原碳收支对模拟氮沉降变化的响应	齐玉春,彭琴,董云社,肖胜生,贾军强,郭树芳,贺云龙,闫钟清,王丽芹(625)
地表臭氧浓度升高对旱作农田N ₂ O排放的影响	吴杨周,胡正华,李岑子,陈书涛,谢燕,肖启涛(636)
亚热带次生林不同土壤呼吸组分的多年观测研究	刘义凡,陈书涛,胡正华,沈小帅,张旭(644)
川中丘陵县域土壤氮素空间分布特征及其影响因素	罗由林,李启权,王昌全,李冰,张新,冯文颖,翁倩,吴冕(652)
黄土丘陵区土地利用变化对深层土壤活性碳组分的影响	张帅,许明祥,张亚锋,王超华,陈盖(661)
汶川地震灾区不同气候区土壤微生物群落碳源代谢多样性	张广帅,林勇明,马瑞丰,邓浩俊,杜锟,吴承祯,洪伟(669)
土壤电动修复的电极空间构型优化研究	刘芳,付融冰,徐珍(678)
有机氯农药污染场地挖掘过程中污染物的分布及健康风险	张石磊,薛南冬,杨兵,李发生,陈宣宇,刘博,孟磊(686)
水稻不同生育期根际及非根际土壤砷形态迁移转化规律	杨文骏,王英杰,周航,易开心,曾敏,彭佩钦,廖柏寒(694)
植物根系体外溶液提取方法研究:以多环芳烃为例	朱满党,都江雪,乐乐,李金凤,杨青青,陆守昆,占新华(700)
垂序商陆叶细胞壁结合锰机制研究	徐向华,刘翠英,李平,郎漫,赵小艳,杨建军,官敏(706)
1株筛自柴油污染土壤的铜绿假单胞菌对萘的降解特性研究	刘文超,吴彬彬,李晓森,卢滇楠,刘永民(712)
CdSe/ZnS量子点对斑马鱼胚胎发育的毒性效应	陈幕飞,黄承志,蒲德永,郑朝依,袁开米,金星星,张耀光,金丽(719)
锯齿新米虾对Cu ²⁺ 和毒死蜱毒性的生理响应	李典宝,张玮,王丽卿,张瑞雷,季高华(727)
同步衍生超声乳化微萃取气相色谱法测定环境水样中的苯胺类化合物	田立勋,戴之希,王国栋,翁焕新(736)
热水环境中Na ⁺ 活化斜发沸石吸附钙离子除硬过程研究	张硕,王栋,陈远超,张兴文,陈贵军(744)
区域经济-污染-环境三维评价模型的构建与应用	樊新刚,米文宝,马振宁(751)
《环境科学》征订启事(401)	
《环境科学》征稿简则(437)	
信息(489,522,726,735)	

滇池表层沉积物氮污染特征及其潜在矿化能力

孟亚媛^{1,2,3,4}, 王圣瑞^{2,3}, 焦立新^{2,3}, 刘文斌^{2,3}, 肖焱波^{1,4*}, 祖维美¹, 徐天敏¹, 丁帅¹, 周童¹

(1. 云南民族大学化学与生物技术学院, 昆明 650500; 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. 中国环境科学研究院国家环境保护湖泊污染控制重点实验室, 湖泊生态环境创新基地, 北京 100012; 4. 云南民族大学植物营养与新型肥料研究所, 昆明 650500)

摘要: 利用滇池 53 个表层沉积物样品, 研究了其不同形态氮含量及空间分布特征, 探讨了滇池沉积物氮潜在矿化能力及其污染特征, 以期揭示滇池沉积物氮污染影响因素及沉积物氮释放风险。结果表明: ①滇池全湖表层沉积物总氮 (TN) 平均含量为 $3\,515.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 其中草海北部疏挖区、盘龙江入湖口及海口入湖区域含量较高, 宝象河河口疏挖区域 TN 含量相对较低; 总有机氮 (TON) 含量较高, 占 TN 的 85.86%; 溶解态无机氮 (DIN) 含量较低, 占 TN 的 14.10%, TON 与 TN 空间分布趋势一致, 而 DIN 则不同; 与我国其他湖泊相比, 滇池沉积物氮含量已经处于较高水平, 其污染程度仅低于污染严重的城市湖泊; ②滇池全湖表层沉积物潜在可矿化氮 (PMN) 平均含量 $1\,154.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 占 TN 的 32.90%, 潜在释放风险较大; 其中草海湖区、外海北部盘龙江入湖口湖区、中部洛龙河和梁王河入湖口湖区及白鱼口湖区显著高于其它湖区; 目前滇池 pH 值有利于其沉积物氮矿化, 有机质通过释放 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 影响其沉积物氮矿化; 污染较重的水域, 滇池上覆水氮浓度受其沉积物氮矿化影响较大, 而污染较轻水域, 则受影响较小。

关键词: 氮形态; 空间分布; 矿化能力; 滇池; 表层沉积物

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2015)02-0471-10 DOI: 10.13227/j.hjxx.2015.02.014

Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake

MENG Ya-yuan^{1,2,3,4}, WANG Sheng-rui^{2,3}, JIAO Li-xin^{2,3}, LIU Wen-bin^{2,3}, XIAO Yan-bo^{1,4*}, ZU Wei-mei¹, XU Tian-min¹, DING Shuai¹, ZHOU Tong¹

(1. School of Chemistry and Biotechnology, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China; 2. State Key Laboratory of Environmental Criteria and Risk Assessment, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 3. Research Center of Lake Eco-Environment, State Environmental Protection Key Laboratory for Lake Pollution Control, Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing 100012, China; 4. Institute of Plant Nutrition and Fertilization, Yunnan Minzu University, Kunming 650500, China)

Abstract: The nitrogen content, its different forms and their spatial distribution were studied by using the 53 sediment samples from different sites in Dianchi Lake. Thereafter, the potential nitrogen mineralization ability of the sediments and their pollution characteristics were also explored to understand the influencing factors of nitrogen pollution and its release risk from the sediment surface to the overlying water of Dianchi. The results showed: ① the average total nitrogen content of surface sediment in Dianchi Lake was $3\,515.60\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, which was at a high level from the inlets in Caohai Northeast thinning digging area, Panlong River and the Haikou into Dianchi Lake, but relatively low in Baoxiang River Estuary dredging area. The total organic nitrogen (TON) content, accounting for 85.86% of TN, was at a high level; on the other hand, the dissolved inorganic nitrogen (DIN) content was lower, which accounted for 14.10% of TN. The spatial distribution of TON and TN kept the same trend, but not the DIN. Compared with other Lakes of China, the nitrogen content of sediment in Dianchi was at a high level, and the extent of pollution was just below the serious polluted City Lakes. ② The average potential mineralizable nitrogen (PMN) content of Lake Dianchi was $1\,154.76\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, accounting for 32.90% of TN, which raised the potential risk of its release into the overlying water. Higher PMN was found in the Caohai Lake area and the inlet of Panlong River in the North, the inlet of Luolong Rive in the Middle Lake, the inlet of Baiyukou Lake and Liangwang River in the South. Nowadays, the pH value of Dianchi Lake was favorable for its sediment nitrogen mineralization, and its nitrogen mineralization was affected by the release of $\text{NH}_4^+\text{-N}$ from organic matter. In the heavy polluted area, the concentration of the overlying water nitrogen was seriously affected by nitrogen mineralization of sediment from Dianchi, while the light polluted area was less affected.

Key words: nitrogen forms; spatial distribution; mineralization capacity; Dianchi Lake; surface sediment

收稿日期: 2014-08-31; 修订日期: 2014-10-03

基金项目: 国家自然科学基金项目 (U1202235); 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2012ZX07102-004)

作者简介: 孟亚媛 (1989 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为滇池内源氮负荷特征及溶解性有机氮 (DON) 生物有效性, E-mail: 1916114770@qq.com

* 通讯联系人, E-mail: 1814196178@qq.com

氮是湖泊生态系统的重要营养元素,也是湖泊富营养化的关键影响因子^[1]. 沉积物是湖泊重要的氮营养盐蓄积库^[2],既容纳来自上覆水沉降和颗粒物输运等途径所埋葬的氮,又可在适当的条件下释放氮进入上覆水而重新参加氮循环^[3]. 因此,沉积物氮含量、形态及其分布特征与湖泊沉积物氮内源负荷息息相关,其形态与含量可反映沉积物氮可被生物利用的潜在能力和其氮污染特征^[4],不仅对湖泊富营养化具有重要作用^[5],在一定程度上也能够反映湖泊污染程度及其地球化学信息. 就湖泊富营养化控制而言,外源污染控制是关键,但随外源污染逐步得到控制后,沉积物氮、磷释放将逐渐成为湖泊富营养化控制的重点,特别是对浅水湖泊而言,沉积物氮污染控制就显得更为重要. 累积在沉积物中的氮营养盐,可通过矿化等途径重新释放进入上覆水,进而改变上覆水营养状况^[6]. 然而,并不是所有形态的沉积物氮都能直接释放进入上覆水,其中可交换态氮(EN)是沉积物最易释放进入上覆水的氮形态,是沉积物氮中最“活跃”的组分,在沉积物-水界面发生着剧烈迁移和转化,能直接被初级生产者吸收利用^[6,7]. 而有机氮矿化是沉积物氮潜在矿化的重要机制,累积氮矿化量在一定程度上可反映沉积物和土壤氮矿化潜力^[8];另外,与土壤相比,湖泊沉积物具有较大的氮矿化潜能^[9,10]. 因此,研究沉积物氮含量、形态及其氮潜在矿化能力有助于进一步认识湖泊沉积物-水界面氮内源负荷机制,对揭示氮在湖泊沉积物-水界面迁移转化机制具有重要意义,也是揭示湖泊沉积物富营养化风险的重要基础.

滇池位于昆明市主城区下游,是国家重点治理的“三湖”之一,面积 298 km²,平均水深 4.4 m,最大水深 10.90 m,换水周期 3~5 a;其承载了昆明市近 60% 的人口,及 80% 的 GDP,受人类活动影响较大,水污染严重,每到夏秋季,水华频繁暴发. 目前针对滇池氮污染的研究主要集中在上覆水氮含量及时空分布等方面,而有关沉积物氮污染方面的研究也主要集中在总氮及不同形态氮含量及分布等方面^[11,12];缺乏针对滇池沉积物氮污染及其矿化能力方面的系统研究;而针对沉积物氮污染及其潜在矿化能力方面的研究能够定量滇池氮循环过程及其对湖泊的富营养化的影响,是揭示滇池富营养化机制急需解决的重要科学问题之一. 因此,本研究以滇池沉积物总氮、各形态氮含量及空间分布与氮潜在矿化能力为对象,并与我国其他湖泊沉积物氮含量及形态进行了对比分析,通过阐明滇池沉积物氮污

染特征及氮潜在矿化能力,旨在为进一步揭示滇池氮循环机制提供科学依据.

1 材料与方法

1.1 采样点位和采样方法

根据滇池水质特点,将全湖分为草海、外海北部、中部、南部 4 个区域,利用全球卫星定位系统(GPS)定位,设置了 53 个采样点,于 2013 年 3 月采集了沉积物-水界面 20 cm 处的底层上覆水,装入聚乙烯塑料桶,带回实验室于 4℃ 保存备用. 利用彼得森采泥器采取表层 10 cm 沉积物装入保温箱带回实验室冷冻干燥^[13],过 100 目筛备用,采样点见图 1.

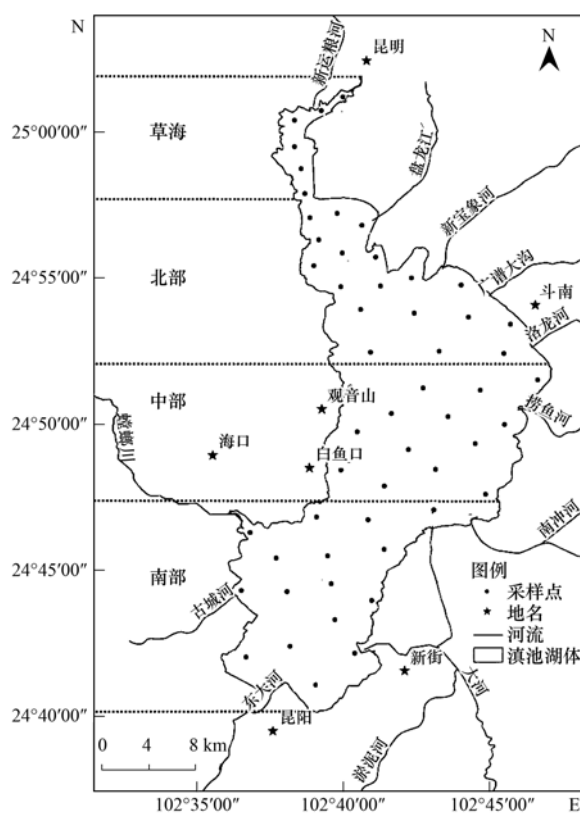


图 1 滇池采样点位布置

Fig. 1 Location of sampling sites in Dianchi Lake

1.2 测定方法

沉积物总氮(TN)用过硫酸钾消化法^[14],有机质含量根据沉积物在 500℃ 下煅烧 2 h 的烧失量计算^[15],可交换态氮(EN)采用 K₂SO₄ 溶液提取法,潜在矿化氮(PMN)采用 Worsfold 等^[16]提出的淹水培养法,可矿化态氮(MN)为 PMN 与 EN 的差值^[17],有机氮(TON)为 TN 与 EN 的差值^[18],不可矿化态有机氮(RN),即残渣态氮,为 TON 与 MN 的差值.

上覆水总氮(TN)采用碱性过硫酸钾氧化法测定,氨氮(NH₄⁺-N)采用纳氏试剂比色法,硝氮

(NO_3^- -N)采用紫外分光光度法测定,亚硝氮(NO_2^- -N)采用N-(1-萘基)-乙二胺光度法,具体方法参考文献[19].

1.3 数据统计分析

数据分析采用 SPSS 17.0 和 Excel 2007,空间分布图采用 Origin 8.6、Surfer 11.0 软件绘制.

2 结果分析

2.1 滇池表层沉积物总氮与各形态氮含量及空间分布

2.1.1 滇池表层沉积物总氮含量及空间分布

滇池全湖沉积物总氮与各形态氮含量及空间分布结果见图 2. 结果显示,滇池沉积物总氮含量较高,范围为 $1\,596.25 \sim 5\,558.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $3\,515.60 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,与朱元荣等的研究结果相类似^[20],滇池表层沉积物的 TN 含量在 $1\,596.60 \sim 3\,223.52 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均含量达到 $(2\,258.51 \pm 462.91) \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$. 依据沉积物总氮含量评价(美国 EPA 沉积物污染评价标准,总氮含量大于 $2\,000$

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 为重污染)^[21],滇池为重污染湖泊;其沉积物总氮含量较高,空间分布总体呈现草海>外海中部>外海北部>外海南部,其中草海中心、外海北部盘龙江入湖口、外海南部的海口入湖湖区含量较高,外海北部宝象河河口疏挖湖区 TN 含量较低,TN 最高值为最低值的 3.5 倍. 卢少勇等^[18]研究滇池沉积物氮污染特征,由北向南衰减,但南部海口出湖区湖滨带位于滇池出水口,部分吸纳滇池污染物,其污染状况介于外海与草海间.

2.1.2 滇池表层沉积物各形态氮含量及空间分布

滇池不同区域表层沉积物不同形态氮含量及其占 TN 百分比结果见图 3,其有机氮(TON)含量较高,为 $1\,531.68 \sim 4\,760.09 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $3\,019.66 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TN 的 85.86%;而无机氮(DIN)含量较低,为 $64.57 \sim 746.22 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $495.94 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TN 的 14.10%. DIN 主要以 NH_4^+ -N为主,含量为 $57.73 \sim 667.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $366.38 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 DIN 的 73.87%; NO_2^- -N 含量较低,仅为 $0.36 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,只占 TN 的 0.01% (该结果可忽略); NO_3^- -N 含量为 $6.50 \sim 299.27 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (平均值为 $129.40 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),其占 DIN 的 26.10%.

沉积物有机氮可分为可矿化态氮(MN)和非可矿化态氮(RN). 本研究滇池沉积物非可矿化氮含量范围为 $1\,057.95 \sim 3\,653.83 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值 $2\,360.84 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TON 的 78.15%,占 TN 的 67.11%,为沉积物有机氮的主要部分;MN 含量范围为 $72.75 \sim 1\,483.35 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,平均值为 $658.82 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占 TON 的 22.44%,占 TN 的 18.73%.

本研究滇池沉积物不同形态氮含量关系为 $\text{TON} > \text{RN} > \text{MN} > \text{DIN/EN} > \text{NH}_4^+$ -N $> \text{NO}_3^-$ -N $\gg \text{NO}_2^-$ -N. 根据各形态氮含量及其占 TN 比例,不同形态氮含量区域差异显著. 滇池全湖 4 个区域沉积物 TN 均以有机氮为主,而 DIN 以 NH_4^+ -N为主,TON 以 RN 为主,各形态氮在 4 个区域所占比例的分布特征为,TON 由北向南逐渐递减(占 83.53% ~ 88.32%);DIN 与 NH_4^+ -N由北向南逐渐递增(分别占 11.68% ~ 16.47%、6.23% ~ 11.80%). PMN、MN 与 NO_3^- -N 由大到小的排列顺序:草海、外海南部、外海北部及外海中部(分别占 29.68% ~ 40.52%、15.87% ~ 28.31%、3.29% ~ 5.43%),RN 为外海中部、外海北部、草海及外海南部(占 59.48% ~ 70.32%).

研究表明沉积物各形态氮含量及空间分布特征

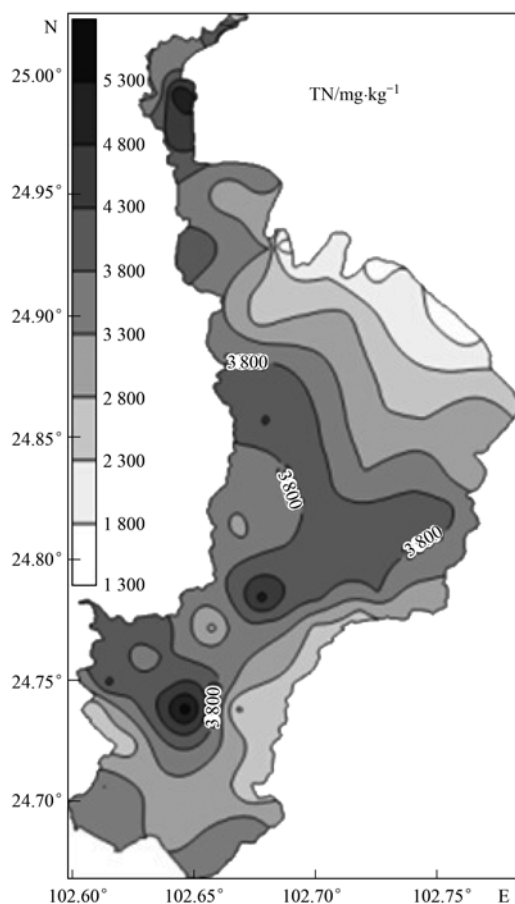


图 2 滇池表层沉积物 TN 含量分布及空间分布

Fig. 2 Content distribution and spatial distribution of total nitrogen in surface sediment of Dianchi Lake

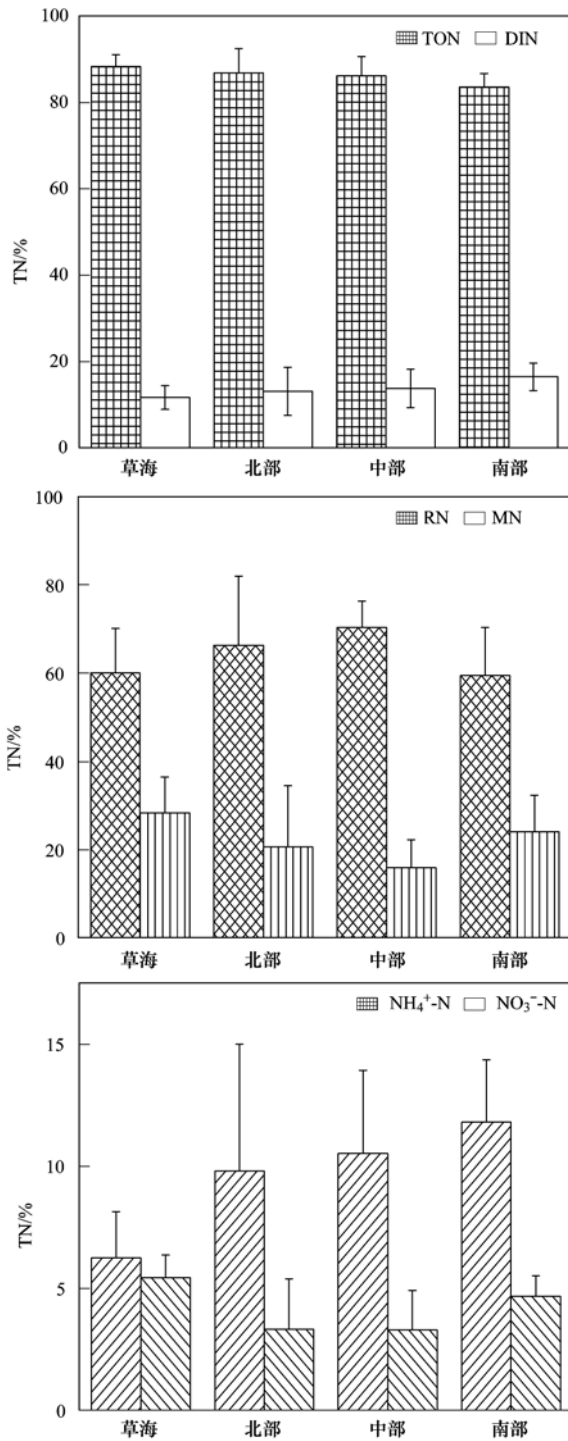


图3 滇池表层沉积物不同区域各形态氮含量占TN比例

Fig. 3 Content of different nitrogen fractionation in surface sediment of Dianchi Lake

能够表征湖泊污染程度及其地球化学信息,从而反映沉积物氮可被生物利用的潜在能力^[4]。滇池表层沉积物各形态氮含量及空间分布见图4。TON、MN、RN与TN空间分布特征类似,TON、MN、RN均在草海中心,外海北部盘龙江河口入湖口,中部的洛龙河和梁王河入湖口、观音山东、白鱼口,南部

的海口入湖口含量较高,TON低值出现在罗家营、柴河入湖口洛龙河入湖口,MN低值区出现在大清河河口、捞鱼河和梁王河入湖口,RN低值区域出现在外海南部柴河、东大河入湖河口。DIN空间分布呈现外海中部>外海南部>草海>外海北部,高值区域在外海中部的梁王河、大河入湖口、白鱼口,北部的盘龙江河口,南部的海口、古城河入湖口,低值区域在大清河入湖口。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 空间分布呈现外海南部>外海中部>外海北部>草海,其高值区域和底值区域也跟DIN一样。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 空间分布呈现草海>外海北部>外海中部>外海南部,高值区在草海中心,外海北部灰湾中,中部的梁王河、柴河入湖河口,南部的海口、古城河入湖口,低值在罗家营、大清河入湖口。沉积物不同形态氮在空间分布上的差异显著,反映了滇池不同区域沉积物氮来源及水动力条件等各异的。

2.2 滇池表层沉积物潜在可矿化氮含量及空间分布

PMN是沉积物有机氮库中最活跃的组分,可被视作有机氮矿化出来的氮和矿质氮在各项中达到平衡后,可被淋洗出的无机氮;其通过沉积物-水界面交换进入上覆水,从而影响湖泊营养水平,其含量在一定程度上可反映沉积物潜在氮矿化能力。沉积物各形态可矿化氮分布特征及含量如图5所示,PMN值与EN含量不同,呈现草海>外海中部>外海南部≈外海北部的空间分布趋势,其中草海北部疏挖区、断桥区,外海北部疏挖区、盘龙江河口入湖口,中部的洛龙河和梁王河入湖口、观音山东、白鱼口,南部的海口入湖口含量较高,大清河入湖口含量较底,含量在 $564.27 \sim 1957.71 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均含量为 $1154.76 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占TN的32.90%,这比Wang等^[5]研究长江中下游湖泊沉积物PMN含量要高一倍多。

PMN以可矿化氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)为主,含量在 $155.3 \sim 2084.4 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $989.50 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占可矿化氮的76.1%~96.3%,这可能是因为有机质矿化所致,其空间分布特征与PMN相似;可矿化硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)次之,含量在 $41.3 \sim 320.7 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值为 $165.25 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,占可矿化氮的0.46%~23.90%,其空间分布特征呈现外海中部>外海南部>外海北部>草海,其中外海南部古城河入湖口、外海西部观音山、白鱼口区含量较高,外海北部、草海含量较低;可矿化亚硝氮($\text{NO}_2^-\text{-N}$)含量几乎接近零,仅为 $0.470 \sim 2.65 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,平均值 $1.01 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,可忽略;各可

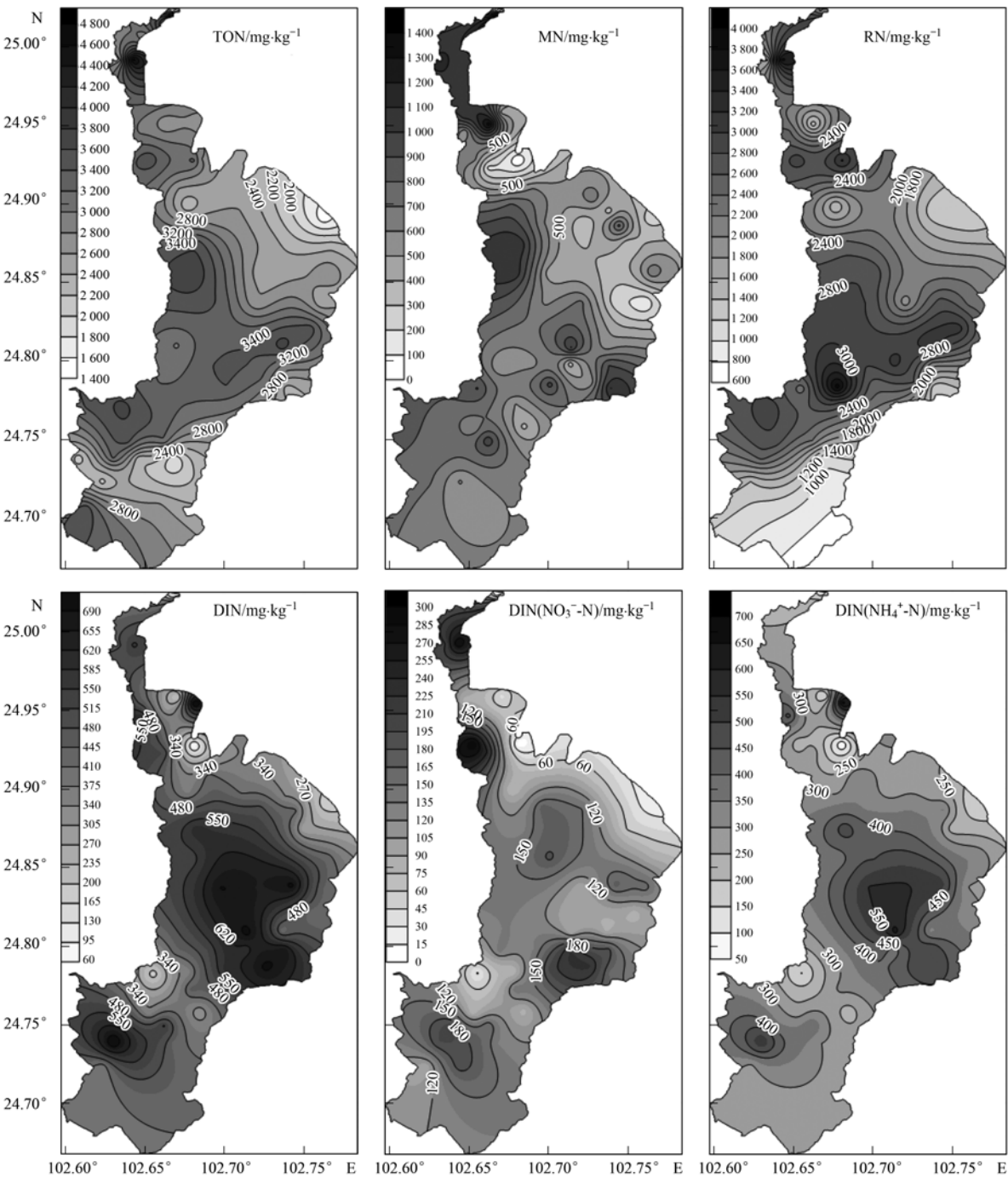


图 4 滇池表层沉积物不同形态氮含量及空间分布

Fig. 4 Spatial distribution of nitrogen fractionation in surface sediment of Dianchi Lake

矿化氮形态含量总体符合 $\text{NH}_4^+\text{-N} > \text{NO}_3^-\text{-N} \gg \text{NO}_2^-\text{-N}$ 的规律. PMN 矿化后增加的部分主要是来自有机氮氨化反应而生成的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$.
各形态可转化态氮(EN、MN)对滇池沉积物矿化的贡献结果见图 6,其中 EN 对氮矿化的贡献率为 30.80% ~ 41.45%,平均值为 40.09%,MN 贡献率为 52.76% ~ 69.19%,平均值为 59.99%. 总体来讲,滇池全湖沉积物不同区域 EN 与 MN 对氮矿化

的贡献率排序呈现外海中部 > 外海南部 > 外海北部 > 草海; 草海 > 外海北部 > 外海南部 > 外海中部的趋势.

3 讨论

3.1 滇池表层沉积物氮污染特征及影响因素

3.1.1 滇池表层沉积物氮污染特征

为了进一步揭示滇池沉积物氮污染特征,本研

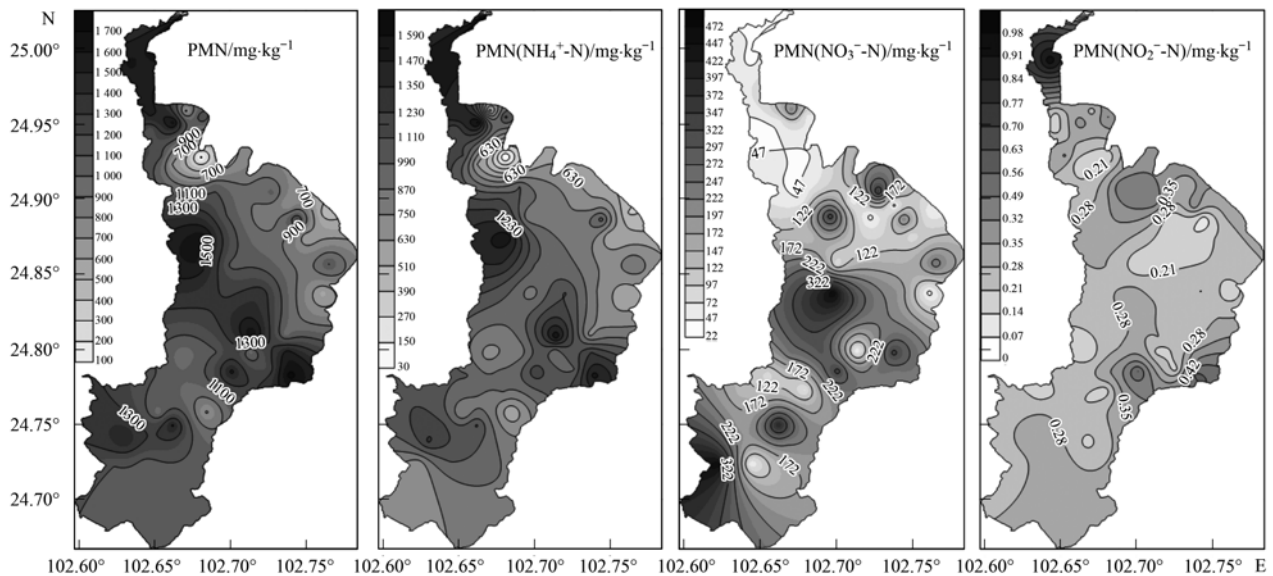


图5 滇池全湖潜在可矿化态含量及空间分布

Fig. 5 Content and spatial distribution of potentially mineralizable nitrogen in surface sediment of Dianchi Lake

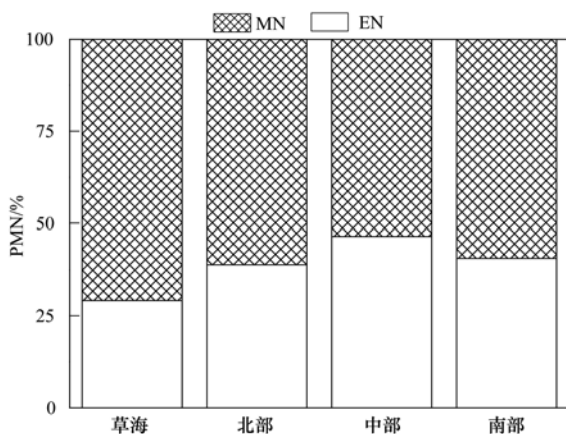


图6 滇池全湖表层沉积物 EN、MN 对氮矿化的贡献

Fig. 6 Contribution of EN and MN to nitrogen mineralization in surface sediment of Dianchi Lake

究还选取了我国其他典型湖泊,比较了其于滇池沉积物的氮污染特征(图7)。结果显示滇池沉积物 TN 与 TON、DIN 含量明显高于我国其他大型天然湖泊,其中 TN 分别是洱海的 1.44 倍、鄱阳湖的 2.10 倍、太湖的 2.93 倍、洞庭湖的 2.70 倍及武汉月湖的 0.71 倍。即滇池沉积物高于太湖、洞庭湖、鄱阳湖,而稍高于洱海,仅稍低于污染严重的城市湖泊,如武汉月湖沉积物内源污染较严重,主要是由于入湖污染负荷高^[22],且水体缓流,自净能力低。

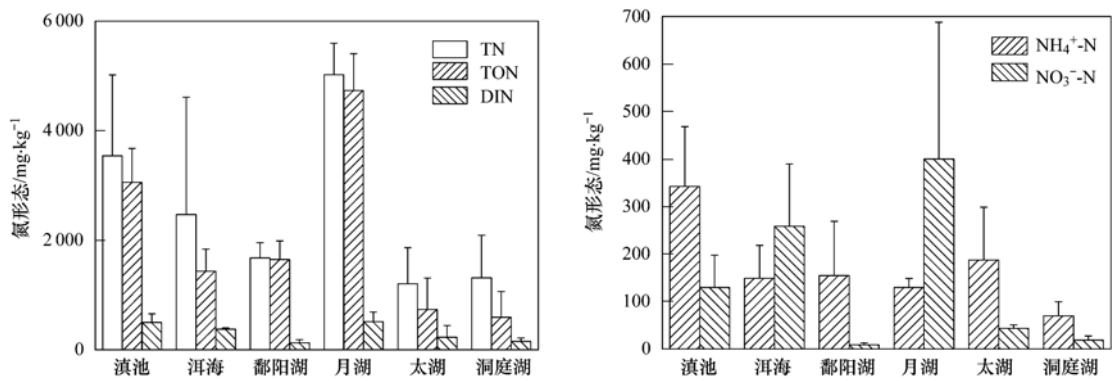
TON 是 TN 的主要存在形式,就我国各湖区湖泊而言,其沉积物有机氮占总氮的百分比均超过了 45%,其中滇池占 85.99%;鄱阳湖最高,其沉积物有机氮占总氮的百分比为 98.4%,洞庭湖最低,占

45.22%。本研究滇池沉积物 TON 含量分别是洱海的 2.13 倍、鄱阳湖的 1.85 倍、太湖的 4.16 倍、洞庭湖的 5.15 倍及武汉月湖的 0.65 倍。

DIN 是沉积物氮中较“活跃”的部分,也是沉积物-水界面交换最频繁的形态,在水生生物繁盛的湖区,沉积物氮释放后易被藻类、水草等初级生产者吸收,从而加快了有机氮的矿化进程,可为湖泊再生提供氮素来源。本研究滇池沉积物 DIN 含量分别是洱海的 1.32 倍、鄱阳湖的 3.88 倍、太湖的 2.18 倍、洞庭湖的 3.23 倍及武汉月湖的 0.97 倍。

DIN 一般以可交换态氮为主,是由于沉积物颗粒对水体中 NH_4^+ 进行可交换吸附而形成,且这类吸附通常是发生在沉积物颗粒表面的离子交换反应,可交换态硝氮次之,其中滇池、鄱阳湖、太湖、洞庭湖均体现此特征,而洱海、武汉月湖与此不同,其沉积物硝氮含量大于氨氮。滇池沉积物氨氮含量高于其它湖泊,而硝氮含量则滇池明显高于鄱阳湖、太湖、洞庭湖,而低于洱海和武汉月湖。

MN 是微生物在适宜活动中将沉积物中的有机氮矿化所产生的能被植物吸收利用的那部分氮素,反映了沉积物的生物有效性。与焦立新^[17]对洪泽湖、鄱阳湖、太湖、玄武湖、洞庭湖及武汉月湖等浅水湖泊沉积物 MN 含量的研究结果相比,滇池沉积物 MN 含量是洪泽湖 ($427.89 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.54 倍、鄱阳湖 ($67.75 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 9.72 倍、太湖 ($429.02 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 1.54 倍、玄武湖 ($903.15 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的 0.73 倍、洞庭湖 ($754.92 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 的



经过资料搜集^[22-28]为 TN: $n = 75$; TON: $n = 65$; EN: $n = 64$; $\text{NH}_4^+ \text{-N}$: $n = 78$;
 $\text{NO}_3^- \text{-N}$: $n = 57$,数据来源比较广泛,可能: $\text{DIN} + \text{TON} \neq \text{TN}$, $\text{NH}_4^+ \text{-N} + \text{NO}_3^- \text{-N} \neq \text{DIN}$

图 7 滇池与其他湖泊沉积物内源氮污染特征比较

Fig. 7 Pollution characteristics of inner nitrogen between sediments of Dianchi Lake and other Lakes

0.87 倍及武汉月湖($838.70 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)的 0.79 倍。
3.1.2 滇池表层沉积物氮污染影响因素

沉积物各形态氮不同区域分布差异显著,反映了滇池不同区域水动力条件及氮污染来源等各异,因此,滇池沉积物氮污染影响因素主要分为 3 个因素,包括滇池地形及水动力条件、外源污染、内源氮释放作用,其中以外源污染为主^[30]。

首先,滇池位于城市下游区,是本区水循环的侵蚀基准面,也是污染物的富集场所,既是水源地,又是城市生活污水、工业废水及农业回归水的接纳水体,加之滇池是一半封闭型湖泊,外海西南部的海口是滇池唯一的出口,换水周期长(3~5 a),湖流以风成流为主(60% 以小于 $5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$ 的流速,2 m 层最高可达 $29.5 \text{ cm} \cdot \text{s}^{-1}$)^[31],使污染物在较强南偏西风的作用下,由北部向南迁移,再加流经时间较长,污染物较易沉积到底泥中,长期以来,上覆水氮污染物逐渐沉积到滇池底泥中,造成滇池沉积物氮污染较严重。

其次,滇池 TN 外源污染物主要来自污水处理厂尾水、未收集的点源、农田与农村面源及城市面源等,不同区域 TN 入湖负荷分布如图 8,其空间分布总体呈现外海北部($3\,869.4 \text{ t}$) > 草海($2\,777 \text{ t}$) > 外海中部($1\,862.6 \text{ t}$) > 外海南部($1\,205.2 \text{ t}$),而草海靠近昆明市区,入湖污染物占总入湖污染物的 28.59%,而草海环境容量只占整个湖泊的 1.3%^[32],同时草海湖区相对封闭,污染物进入草海后的大量营养盐极易沉积进入底泥,而使其沉积物氮含量高于其它湖区。因此,不同区域 TN 入湖氮负荷量与滇池全湖氮污染特征分布呈正相关,其中污

水处理厂尾水和城市面源,约占整个滇池流域 TN 入湖污染负荷总量的 74%。草海陆域和外海北岸为昆明主城区,区域内建成区面积广、人口密度大,对滇池外源污染的贡献率最高,昆明主城区 TN 入湖量占滇池流域入湖污染物总量的 68%,导致草海中心和断桥区、外海北部盘龙江入湖水域沉积物总氮含量较高,而外海西南部海口入湖口含量较高是由于海口是滇池的唯一出口,是滇池内湖和外源的交接口。外海北部宝象河河口疏挖区域为 TN 含量较低,主要是由于对该区域进行了底泥疏浚工程,表层污染重的沉积物被清除,加之这几年滇池外源污染治理力度的加大,打破底泥与湖水间的平衡,为维持沉积物-水界面氮的平衡,可能使积蓄在底泥中的氮被释放出来补充湖水的氮。再次,沉积物-水界面长期发生的交换吸附、固定及释放等过程也是导致沉积物中氮素积累重要原因。

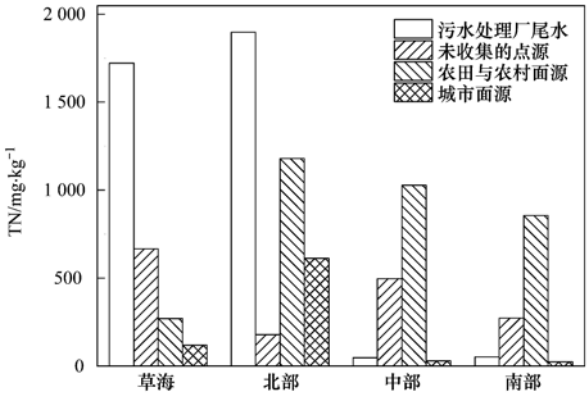


图 8 外源污染物来源

Fig. 8 Exogenous pollution sources

3.2 滇池表层沉积物氮矿化能力影响因素及其对滇池水质的影响

3.2.1 表层沉积物氮矿化能力对滇池水质的影响

湖泊上覆水 N 浓度在一定程度上反映了水体营养水平,而表层沉积物是氮生物地球化学循环的最为活跃的区域,有机态氮经矿化产生 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,在表层间隙水中累积并向上覆水释放,促进藻类生长以及有机态氮的再度沉积,造成水体的二次污染^[33~35]. 因此分析二者之间的相关性及其沉积物氮矿化能力对滇池水质的影响能够深入研究氮的迁移转化规律,从而进一步阐述沉积物-水界面氮的分布、迁移与滇池富营养化的关系.

由表 1 可见,滇池湖滨带入湖口和污染较重的区域,PMN、PMN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、MN 均与水体中的 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 显著正相关($P < 0.01$),EN($\text{NO}_3^-\text{-N}$)与 TN、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ ($P < 0.05$)有正相关关系,但未达到显著水平. 而与 EN、EN

($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、PMN($\text{NO}_3^-\text{-N}$) 相关性较弱,甚至呈负相关. 说明在复杂的湖泊沉积物环境中潜在可矿化态间存在相互转化,滇池表层沉积物中潜在可矿化态氮的高低能够对湖泊水体氮营养盐浓度产生影响,已有研究表明氨氮向上覆水释放的过程就是沉积物中 N 对上覆水的营养供给机制^[36],沉积物中无机氮向水体迁移中氨氮占大部分,亚硝氮及硝氮比例较小^[17]. 在滇池湖滨带入湖口和污染较重的区域是治理滇池的重点区域,并对其进行了疏浚工程和外源污染控制,打破了沉积物与上覆水间的氮平衡,为维持沉积物-水界面氮的平衡,使积蓄在底泥中的氮被释放出来补充上覆水氮. 因而当沉积物可矿化态氮含量增高时就成为水体氨氮含量增高的来源之一,从而提高了上覆水氮浓度. 因而,在控制外源氮污染输入的同时,应重视沉积物生物有效氮的释放及其对水质的影响.

表 1 滇池沉积物不同形态氮与其上覆水不同形态氮相关关系¹⁾

Table 1 Relationship between nitrogen forms of overlying water and those of surface sediments

沉积物		水体		
		TN	$\text{NO}_3^-\text{-N}$	$\text{NH}_4^+\text{-N}$
滇池湖滨带入湖口和污染较重的区域($n = 27$)	EN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	-0.004	0.048	-0.0105
	EN($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	0.340	0.225	0.401 *
	EN	0.199	0.173	0.153
	PMN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	0.740 **	0.660 **	0.7225 **
	PMN($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	-0.318	-0.229	-0.180
	PMN	0.634 **	0.591 **	0.682 **
	MN	0.591 **	0.556 **	0.662 **
滇池湖中心和滇池污染相对较轻区域($n = 13$)	EN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	-0.010	0.442	0.270
	EN($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	0.083	-0.377	-0.089
	EN	0.021	0.426	0.097
	PMN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)	-0.381	-0.208	0.551
	PMN($\text{NO}_3^-\text{-N}$)	-0.430	-0.147	-0.148
	PMN	-0.473	-0.222	0.487
	MN	-0.515	-0.473	0.464

1) * * 表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关, * 表示在 $P < 0.05$ 水平(双侧)上显著相关

滇池污染较轻区域沉积物 EN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、PMN、PMN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、PMN($\text{NH}_4^+\text{-N}$) 与上覆水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有显著正相关关系,EN($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、EN 与水体中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 有正相关关系,但未达到显著水平,而其它形态的氮间相关性较小,甚至呈负相关,但无显著性. 说明沉积物中氨氮的释放是影响水体中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 质量浓度的因素之一,沉积物处于厌氧环境,此时在兼性厌氧细菌和厌氧细菌的分解下有机物质经过降解和矿化产生的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 有一部分为平衡沉积物-水界面氮浓度而释放进入上覆水. 且沉积物氮浓度达到一定的程度下,才会向上层水体释放污染物,王心宇

等^[37]研究发现滇池沉积物与入湖河流沉积物中污染物的含量呈显著相关,说明人类活动是沉积物中污染物含量变化的重要因素,大量的文献也报道水体和沉积中污染物的相关性很低,两相中污染物的分布规律不一致.

目前滇池上覆水与表层沉积物可矿化态氮含量与分布情况以及各形态氮在水体及沉积物-水界面间的相互作用来看,沉积物氮矿化导致滇池富营养化已存在潜在威胁. 因此,对于滇池,在外源减少或得到控制情况下,沉积物氮内负荷将会是控制滇池富营养化的重要影响因子,在湖泊富营养化治理中,

应该加强沉积物氮矿化释放方面的研究.

3.2.2 滇池表层沉积物氮潜在可矿化能力影响因素

沉积物氮矿化是微生物驱动的生物化学过程.湖泊沉积物与土壤氮矿化的机制相似^[27],其影响因素也与土壤相似,包括4个方面,温度等环境因子、pH等自身理化性质、有机质及微生物因素^[38,39].沉积物在pH为6~8间^[40],温度35℃时矿化能力最强^[41,42],而滇池表层沉积物pH全湖分布为7.0~8.5之间,平均温度为14.7℃^[43].因此,就滇池目前的理化指标而言,pH对其沉积物氮矿化影响较大,有利于氮矿化,而温度可能不是影响滇池沉积物氮矿化的主要原因,而微生物对氮矿化的影响有待于进一步研究,本研究主要分析了有机质对滇池沉积物氮矿化影响.

沉积物有机质主要来源于外源有机颗粒与死亡水生生物残骸等,在其降解过程中,沉积物-水界面

发生着剧烈的氮循环^[44].有机质矿化作用不仅增加了溶液中铵离子浓度,而且有机质矿化降解能为NH₄⁺-N的吸附提供吸附位点^[3].

计算滇池表层沉积物氮与其有机质含量间的Pearson相关系数见表2,OM与沉积物EN(NH₄⁺-N)、PMN(NH₄⁺-N)均呈显著正相关($P < 0.01$),EN与NO₃⁻-N及PMN与NO₃⁻-N相关性不显著,与PMN、MN及EN也不显著,表明滇池有机质与其沉积物氮矿化的影响显著,其对沉积物氮矿化的影响可能以释放NH₄⁺-N为主,有机质矿化降解释放氮(NH₄⁺为主)是沉积物及湖泊生态系统氮平衡的重要组成部分,有机质中的轻组有机质、溶解性有机质对氮矿化均有一定影响,与其氨氮吸附/释放间显著正相关,沉积物-水界面有机质矿化分解使得其EN是以NH₄⁺-N为主要形态^[9,10].

表2 滇池有机质与表层沉积物氮形态的相关系数¹⁾

Table 2 Correlation coefficient between organic matter and nitrogen forms of surface sediment in Dianchi Lake							
组别	EN(NH ₄ ⁺ -N)	EN(NO ₃ ⁻ -N)	EN	PMN(NH ₄ ⁺ -N)	PMN(NO ₃ ⁻ -N)	PMN	MN
OM	0.630 **	0.188	0.259	0.426 **	-0.236	0.320	0.255

1) **表示在 $P < 0.01$ 水平(双侧)上显著相关

4 结论

(1)滇池全湖表层沉积物TN平均含量为3 515.60 mg·kg⁻¹,空间分布总体呈现草海>外海中部>外海北部>外海南部.TON占TN的85.86%,DIN含量较低,占TN的14.10%,TON与TN的空间分布特征一致,而DIN空间分布呈现外海中部>外海南部>草海>外海北部,此污染特点则由地形、沉积物性质以及人为活动等因素共同决定;与其他湖泊相比,滇池沉积物氮含量已经处于较高水平,其污染程度仅低于污染严重的城市湖泊.

(2)滇池全湖表层沉积物PMN平均含量为1 154.76 mg·kg⁻¹,占TN的32.90%,潜在的释放风险较大,空间分布呈现草海>外海中部>外海南部、外海北部.pH、有机质是影响沉积物氮矿化的重要因素,目前的pH值有利于滇池沉积物氮矿化,有机质通过释放NH₄⁺-N影响沉积物氮矿化;在污染较重的区域,滇池上覆水氮浓度受其沉积物氮矿化影响较大,与上覆水氮浓度显著正相关,而污染较轻的水域,则受影响较小.

(3)因此,滇池治理应考虑其沉积物氮污染特征,应分区、分级、分期治理其沉积物氮负荷.不同

区域分别施以不同措施,其中重污染区域应控制营养盐外源输入,实施污染底泥环保疏浚等工程措施;污染较轻区域,应实施生态恢复,控制水动力扰动等措施.

参考文献:

[1] Hecky R E, Kilham P. Nutrient limitation of phytoplankton in freshwater and marine environments: a review of recent evidence on the effects of enrichment [J]. Limnology and Oceanography, 1988, 33(4): 796-822.

[2] DePinto J V, Lick W, Paul J F. Transport and transformation of contaminants near the sediment-water interface [M]. New York: Lewis Publishers, 1994. 156-178

[3] 宋金明, 马红波, 李学刚, 等. 渤海南部海域沉积物中吸附态无机氮的地球化学特征[J]. 海洋与湖沼, 2004, 35(4): 315-322.

[4] 史静, 俎晓静, 张乃明, 等. 滇池草海沉积物磷形态、空间分布特征及影响因素[J]. 中国环境科学, 2013, 33(10): 1808-1813.

[5] Wang S R, Jiao L X, Jin X C, et al. Characteristics of organic nitrogen fractions in sediments of the shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River area in China [J]. Water and Environment Journal, 2012, 26(4): 473-481.

[6] Lau S S S, Lane S N. Biological and chemical factors influencing shallow lake eutrophication: a long-term study [J]. Science of the Total Environment, 2002, 288(3): 167-181.

[7] Christensen J P, Smethie W M Jr, Devol A H. Benthic nutrient

- regeneration and denitrification on the Washington continental shelf [J]. *Deep Sea Research Part A: Oceanographic Research Papers*, 1987, **34**(5-6): 1027-1047.
- [8] Keeney D R, Bremner J M. Comparison and evaluation of laboratory methods of obtaining an index of soil nitrogen availability [J]. *Agronomy Journal*, 1966, **58**(5): 498-503.
- [9] 王圣瑞, 倪栋, 焦立新, 等. 鄱阳湖表层沉积物有机质和营养盐分布特征[J]. *环境工程技术学报*, 2012, **2**(1): 23-28.
- [10] 王圣瑞, 焦立新, 金相灿, 等. 长江中下游浅水湖泊沉积物总氮、可交换态氮与固定态铵的赋存特征[J]. *环境科学学报*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [11] Lü J J, Yang H, Gao L, *et al.* Spatial variation of P and N in water and sediments of Dianchi Lake, China [J]. *Pedosphere*, 2005, **15**(1): 78-83.
- [12] 陈永川, 汤利, 张德刚, 等. 滇池沉积物总氮的时空变化特征研究[J]. *土壤*, 2007, **39**(6): 879-883.
- [13] 王小雷, 杨浩, 赵其国, 等. 云南滇池近现代沉积速率及气候干湿变化的粒度记录[J]. *地理研究*, 2011, **30**(1): 161-171.
- [14] 钱君龙, 张连弟, 乐美麟. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. *土壤*, 1990, **22**(5): 258-262.
- [15] Murphy T, Lawson A, Kumagai M, *et al.* Release of phosphorus from sediments in Lake Biwa [J]. *Limnology*, 2001, **2**(2): 119-128.
- [16] Worsfold P J, Monbet P, Tappin A D, *et al.* Characterisation and quantification of organic phosphorus and organic nitrogen components in aquatic systems: A Review [J]. *Analytica Chimica Acta*, 2008, **624**(1): 37-58.
- [17] 焦立新. 浅水湖泊表层沉积物氮形态特征及在生物地球化学循环中的功能[D]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2007. 21-55.
- [18] 卢少勇, 蔡珉敏, 金相灿, 等. 滇池湖滨带沉积物氮形态的空间分布[J]. *生态环境学报*, 2009, **18**(4): 1351-1357.
- [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. 254-279.
- [20] 朱元荣, 张润宇, 吴丰昌. 滇池沉积物中氮的地球化学特征及其对水环境的影响[J]. *中国环境科学*, 2011, **30**(6): 978-983.
- [21] MacDonald D D, Ingersoll C G. A guidance manual to support the assessment of contaminated sediments in freshwater ecosystems [M]. US Environmental Protection Agency Great Lakes National Program Office, 2002. 110-123.
- [22] 杨柳, 马克明, 郭青海, 等. 城市化对水体非点源污染的影响[J]. *环境科学*, 2004, **25**(6): 32-39.
- [23] 刘清学. 我国不同分区湖泊表层沉积物中氮形态及 DOM 光谱特性研究[D]. 青岛: 青岛科技大学, 2011. 19-44.
- [24] 黄丹. 洱海沉积物氮形态、释放通量及 DON 的生物有效性研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2012. 22-24.
- [25] 王雯雯, 王书航, 姜霞, 等. 洞庭湖沉积物不同形态氮赋存特征及其释放风险[J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(6): 598-605.
- [26] 吴芸. 平原河网区浅水湖泊氮污染特征研究[D]. 南京: 河海大学, 2007. 36-38.
- [27] 陈国元, 李建秋, 李清曼, 等. 武汉月湖沉积物不同形态氮含量与转换途径的垂直变化[J]. *湖泊科学* 2008, **20**(4): 463-469.
- [28] 欧阳媛, 王圣瑞, 金相灿, 等. 外加氮源对滇池沉积物氮矿化影响的研究[J]. *中国环境科学*, 2008, **29**(8): 879-884.
- [29] 张彦, 张远, 于涛, 等. 太湖沉积物及孔隙水中氮的时空分布特征[J]. *环境科学研究*, 2010, **23**(11): 1333-1342.
- [30] 中国环境科学研究院. 滇池生态安全与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2012. 45-60.
- [31] 王银珠, 张文华, 姜加虎. 滇池湖流特性的初步研究[J]. *海洋湖沼通报*, 1986, **1**(3): 14-20.
- [32] Xing K X, Guo H C, Sun Y F, *et al.* Assessment of the spatial-temporal eutrophic character in the Lake Dianchi [J]. *Journal of Geographical Sciences*, 2005, **15**(1): 37-43.
- [33] 马红波. 渤海沉积物中氮的赋存形态及其在循环中的作用[D]. 青岛: 中国科学院海洋研究所, 2001. 44-47.
- [34] Karl D M. A sea of change: biogeochemical variability in the North Pacific subtropical gyre [J]. *Ecosystems*, 1999, **2**(3): 181-214.
- [35] Berelson W M. The flux of particulate organic carbon into the ocean interior: a comparison of four U. S. JGOFS regional studies [J]. *Oceanography*, 2001, **14**(4): 59-67.
- [36] Herbert R A. Nitrogen cycling in coastal marine ecosystems [J]. *FEMS Microbiology Reviews*, 1999, **23**(5): 563-590.
- [37] 王心宇, 周丰, 伊旋, 等. 滇池沉积物中主要污染物含量时间分异特征研究[J]. *环境科学*, 2014, **35**(1): 194-201.
- [38] 王常慧, 邢雪荣, 韩兴国. 草地生态系统中土壤氮素矿化影响因素的研究进展[J]. *应用生态学报*, 2004, **15**(11): 2184-2188.
- [39] Sims J L, Wells J P, Tackett D L. Predicting nitrogen availability to rice: I. Comparison of methods for determining available nitrogen to rice from field and reservoir soils [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1967, **31**(5): 672-675.
- [40] 于军亭, 张帅, 张志斌, 等. 环境因子对浅水湖泊沉积物中氮释放的影响[J]. *山东建筑大学学报*, 2010, **25**(1): 58-61.
- [41] 赵琦齐, 沈玉娟, 李平, 等. 温度对太湖湖滨带不同水分梯度土壤氮矿化的影响[J]. *南京林业大学学报 (自然科学版)*, 2012, **35**(6): 147-150.
- [42] Bremer E, Kuikman P. Influence of competition for nitrogen in soil on net mineralization of nitrogen[J]. *Plant and Soil*, 1997, **190**(1): 119-126.
- [43] 袁静秀, 张文华, 王银珠. 滇池的热学状况[J]. *海洋与湖沼*, 1986, **17**(6): 481-492.
- [44] 王圣瑞. 湖泊沉积物-水界面过程: 氮磷生物地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 2013. 172-195.

CONTENTS

Size Distribution Characteristics of Particulate Mercury on Haze and Non-haze Days	ZHU Qiong-yu, CHENG Jin-ping, WEI Yu-qing, <i>et al.</i> (373)
Impact of Atmospheric Pollutants Transport Pathways on Aerosol Optical Properties at Shangdianzi Background Station	PU Wei-wei, SHI Xue-feng, MA Zhi-qiang, <i>et al.</i> (379)
Chemical Characteristics of 3-year Atmospheric Precipitation in Summer, Taiyuan	GUO Xiao-fang, CUI Yang, WANG Kai-yang, <i>et al.</i> (388)
Pollution Characteristics of Organic and Elemental Carbon in PM _{2.5} in Taiyuan	LIU Shan, PENG Lin, WEN Yan-ping, <i>et al.</i> (396)
Levels and Distribution of Organochlorine Pesticides and Dioxin-Like Polychlorinated Biphenyls in Atmospheric Particulates in Xining and Tianjun, Qinghai Province, China	LI Qiu-xu, HE Chang, MA Zhao-hui, <i>et al.</i> (402)
Particulate Matter Adsorption Capacity of 10 Evergreen Species in Beijing	WANG Bing, ZHANG Wei-kang, NIU Xiang, <i>et al.</i> (408)
Carbon Sources Metabolic Characteristics of Airborne Microbial Communities in Constructed Wetlands	SONG Zhi-wen, WANG Lin, XU Ai-ling, <i>et al.</i> (415)
Spatial Distribution Characteristics of the Physical and Chemical Properties of Water in the Kunes River After the Supply of Snowmelt During Spring	LIU Xiang, GUO Ling-peng, ZHANG Fei-yun, <i>et al.</i> (421)
Composition Characteristics and Source Analysis of Major Ions in Four Small Lake-watersheds on the Tibetan Plateau, China	LI He, LI Jun, LIU Xiao-long, <i>et al.</i> (430)
Seasonal Stratification and Eutrophication Characteristics of a Deep Reservoir, Longtan Reservoir in Subtropical Area of China	ZHANG Lei, LI Qiu-hua, HUANG Guo-jia, <i>et al.</i> (438)
Phosphorus Fractions, Sorption Characteristics and Its Release in the Sediments of Yangtze Estuary Reservoir, China	JIN Xiao-dan, WU Hao, CHEN Zhi-ming, <i>et al.</i> (448)
Spatial-Temporal Distributions of Dissolved Inorganic Carbon and Its Affecting Factors in the Yellow River Estuary	GUO Xing-sen, LÜ Ying-chun, SUN Zhi-gao, <i>et al.</i> (457)
Distributions of Phosphorus Fractions in Suspended Sediments and Surface Sediments of Tiaoxi Mainstreams and Cause Analysis	CHEN Hai-long, YUAN Xu-yin, WANG Huan, <i>et al.</i> (464)
Characteristics of Nitrogen Pollution and the Potential Mineralization in Surface Sediments of Dianchi Lake	MENG Ya-yuan, WANG Sheng-rui, JIAO Li-xin, <i>et al.</i> (471)
Influence of Transient Storage on Solute Transport and the Parameter Sensitivity Analysis in a Suburban Drainage Ditch	LI Ru-zhong, QIAN Jing, DONG Yu-hong, <i>et al.</i> (481)
Sources, Pollution Statue and Potential Ecological Risk of Heavy Metals in Surface Sediments of Aibi Lake, Northwest China	ZHANG Zhao-yong, Jilili Abuduwaili, JIANG Feng-qing (490)
Speciation Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Sediments in Suburban Outfall of Industrial Oasis Region	ZANG Fei, WANG Sheng-li, NAN Zhong-ren, <i>et al.</i> (497)
Assessment of Sources, Spatial Distribution and Ecological Risk of Heavy Metals in Soils in a Typical Industry-based City of Shandong Province, Eastern China	DAI Bin, LÜ Jian-shu, ZHAN Jin-cheng, <i>et al.</i> (507)
Removal of Triclosan with the Method of UV/ClO ₂ and Its Degradation Products	LI Yu-ying, HE Wen-long, LI Qing-song, <i>et al.</i> (516)
Mechanism of Groundwater As(V) Removal with Ferric Flocculation and Direct Filtration	KANG Ying, DUAN Jin-ming, JING Chuan-yong (523)
Preparation of Nano Zero-valent Iron/ <i>Sargassum horneri</i> Based Activated Carbon for Removal of Cr(VI) from Aqueous Solution	ZENG Gan-ming, WU Xiao, ZHENG Lin, <i>et al.</i> (530)
Adsorption of Cr(VI) on Magnetic Graphene from Aqueous Solution	LIU Wei, YANG Qi, LI Bo, <i>et al.</i> (537)
Adsorption of the TiO ₂ @Yeast Composite Microspheres for Adsorbing Fluorescent Whitening Agent-VBL in Fixed Bed	WU Fei, ZHANG Kai-qiang, BAI Bo, <i>et al.</i> (545)
Preparation and Pb ²⁺ Electrosorption Characteristics of MnO ₂ /CFP Composite Electrode	LIU Fang-yuan, HU Cheng-zhi, LI Yong-feng, <i>et al.</i> (552)
Preparation of Weak Light Driven TiO ₂ Multi Composite Photocatalysts via Adsorption Phase Synthesis	WANG Ting, ZHU Yi-chen, SUN Zhi-xuan, <i>et al.</i> (559)
Photoelectrocatalytic Degradation of Bisphenol A in Water by Fe Doped-TiO ₂ Nanotube Arrays Under Simulated Solar Light Irradiation	XIANG Guo-liang, YU Ze-bin, CHEN Ying, <i>et al.</i> (568)
Oxidation of Cationic Red 3R in Water with H ₂ O ₂ Catalyzed by Mineral Loaded with Fe/Co	MA Nan, LIU Hua-bo, XIE Xin-yuan (576)
Characteristics of Acid Red 3R Wastewater Treatment by Ozone Microbubbles	ZHANG Jing, DU Ya-wei, LIU Xiao-jing, <i>et al.</i> (584)
Effects of Carbon Sources, Temperature and Electron Acceptors on Biological Phosphorus Removal	HAN Yun, XU Song, DONG Tao, <i>et al.</i> (590)
Startup, Stable Operation and Process Failure of EBPR System Under the Low Temperature and Low Dissolved Oxygen Condition	MA Juan, LI Lu, YU Xiao-jun, <i>et al.</i> (597)
Effects of Dissolved Oxygen in the Oxidic Parts of A/O Reactor on Degradation of Organic Pollutants and Analysis of Microbial Community for Treating Petrochemical Wastewater	DING Peng-yuan, CHU Li-bing, ZHANG Nan, <i>et al.</i> (604)
Isolation of Filamentous Fungi Capable of Enhancing Sludge Dewaterability and Study of Mechanisms Responsible for the Sludge Dewaterability Enhancement	ZHOU Yu-jun, FU Hao-yi, FAN Xian-feng, <i>et al.</i> (612)
Impacts of Alkaline Thermal Treatment on Characteristics of Sludge from Sewage Treatment Plant	YANG Shi-dong, CHEN Xia, LIU Cao, <i>et al.</i> (619)
Responses of Ecosystem Carbon Budget to Increasing Nitrogen Deposition in Differently Degraded <i>Leymus chinensis</i> Steppes in Inner Mongolia, China	QI Yu-chun, PENG Qin, DONG Yun-she, <i>et al.</i> (625)
Impacts of Elevated Ozone Concentration on N ₂ O Emission from Arid Farmland	WU Yang-zhou, HU Zheng-hua, LI Cen-zi, <i>et al.</i> (636)
Multi-Year Measurement of Soil Respiration Components in a Subtropical Secondary Forest	LIU Yi-fan, CHEN Shu-tao, HU Zheng-hua, <i>et al.</i> (644)
Spatial Variability of Soil Nitrogen and Related Affecting Factors at a County Scale in Hilly Area of Mid-Sichuan Basin	LUO You-lin, LI Qi-quan, WANG Chang-quan, <i>et al.</i> (652)
Effects of Land Use Change on Soil Active Organic Carbon in Deep Soils in Hilly Loess Plateau Region of Northwest China	ZHANG Shuai, XU Ming-xiang, ZHANG Ya-feng, <i>et al.</i> (661)
Carbon Source Metabolic Diversity of Soil Microbial Community Under Different Climate Types in the Area Affected by Wenchuan Earthquake	ZHANG Guang-shuai, LIN Yong-ming, MA Rui-feng, <i>et al.</i> (669)
Optimization of Electrode Configuration in Soil Electrokinetic Remediation	LIU Fang, FU Rong-bing, XU Zhen (678)
Distribution and Health Risk of HCHs and DDTs in a Contaminated Site with Excavation	ZHANG Shi-lei, XUE Nan-dong, YANG Bing, <i>et al.</i> (686)
Transformation and Mobility of Arsenic in the Rhizosphere and Non-Rhizosphere Soils at Different Growth Stages of Rice	YANG Wen-tao, WANG Ying-jie, ZHOU Hang, <i>et al.</i> (694)
Extraction of Plant Root Apoplast Solution; A Case Study with Polycyclic Aromatic Hydrocarbons	ZHU Man-dang, DU Jiang-xue, YUE Le, <i>et al.</i> (700)
Mechanism of Manganese Binding to Leaf Cell Wall of <i>Phytolacca americana</i> L.	XU Xiang-hua, LIU Cui-ying, LI Ping, <i>et al.</i> (706)
Degradation Characteristics of Naphthalene with a <i>Pseudomonas aeruginosa</i> Strain Isolated from Soil Contaminated by Diesel	LIU Wen-chao, WU Bin-bin, LI Xiao-sen, <i>et al.</i> (712)
Toxic Effects of CdSe/ZnS QDs to Zebrafish Embryos	CHEN Mu-fei, HUANG Cheng-zhi, PU De-yong, <i>et al.</i> (719)
Physiological Response of <i>Neocaridina denticulata</i> to the Toxicity of Cu ²⁺ and Chlorpyrifos	LI Dian-bao, ZHANG Wei, WANG Li-qing, <i>et al.</i> (727)
Determination of Anilines in Environmental Water Samples by Simultaneous Derivatization and Ultrasound Assisted Emulsification Microextraction Combined with Gas Chromatography-Flame Ionization Detectors	TIAN Li-xun, DAI Zhi-xi, WANG Guo-dong, <i>et al.</i> (736)
Adsorption of Calcium Ion from Aqueous Solution Using Na ⁺ -Conditioned Clinoptilolite for Hot-Water Softening	ZHANG Shuo, WANG Dong, CHEN Yuan-chao, <i>et al.</i> (744)
Construction and Application of Economy-Pollution-Environment Three-Dimensional Evaluation Model for District	FAN Xin-gang, MI Wen-bao, MA Zhen-qing (751)

《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)

2015年2月15日 第36卷 第2期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 36 No. 2 Feb. 15, 2015

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: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发行