

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

- 主办 中国科学院生态环境研究中心
- 出版 科学出版社



2020

Vol.41 No.2
第41卷 第2期

目次

基于GAM模型分析中国典型区域网格化PM_{2.5}长期变化影响因素 南洋, 张倩倩, 张碧辉(499)

我国PCDD/Fs网格化大气排放清单 陈露露, 黄韬, 陈凯杰, 宋世杰, 高宏, 马建民(510)

成都平原PM_{2.5}中碳质组分时空分布特征与来源 史芳天, 罗彬, 张巍, 刘培川, 郝宇放, 杨文文, 谢绍东(520)

南京江北新区冬季PM_{2.5}中化学组分的昼夜变化特征及其来源解析 邱晨晨, 于兴娜, 丁铖, 时政, 张瑞芳, 侯思宇, 侯新红(529)

南京北郊四季PM_{2.5}中有机物的污染特征及来源解析 李翔婕, 施晓雯, 马嫣, 郑军(537)

长三角背景点夏季大气PM_{2.5}中正构烷烃和多环芳烃的污染特征和来源解析 薛国艳, 王榕慧, 吴灿, 谢郁宁, 陈玉宝, 李杏茹, 王心培, 李大鹏, 张思, 葛双双, 丁志健(554)

2017年秋季长春市PM_{2.5}中多环芳烃的污染来源及健康风险评价 张艺璇, 曹芳, 郑涵, 张东东, 翟晓瑶, 范美益, 章炎麟(564)

京津冀及周边区域PM_{2.5}叠加沙尘重污染过程特征及预报效果分析 朱媛媛, 高愈霄, 柴文轩, 王帅, 李亮, 王威, 王光, 刘冰, 王晓彦, 李健军(574)

河南省臭氧污染特征与气象因子影响分析 齐艳杰, 于世杰, 杨健, 尹沙沙, 程家合, 张瑞芹(587)

河南省气溶胶光学特性的时空变化特征 张瑞芳, 于兴娜(600)

黑炭气溶胶质谱仪(SP-AMS)分析春季PM_{2.5}中水溶性有机气溶胶 黄雯倩, 陈彦彤, 李旭东, 赵竹子, 马帅帅, 叶招莲, 盖鑫磊(609)

南京市黑碳气溶胶时间演变特征及其主要影响因素 杨晓旻, 施双双, 张晨, 王红磊, 王振彬, 朱彬(620)

连云港不同功能区挥发性有机物污染特征及臭氧生成潜势 乔月珍, 陈凤, 李慧鹏, 赵秋月(630)

挥发性有机物污染控制方案的运行费用效能比较 羌宁, 史天哲, 缪海超(638)

西安市大气降水污染和沉降特征及其来源解析 丁铖, 于兴娜, 侯思宇(647)

4种动物养殖场空气中抗生素耐药菌的多样性及群落结构 沙云菲, 孙兴滨, 辛文鹏, 高浩泽, 程首涛, 高敏, 王旭明(656)

辽宁省2000~2030年机动车排放清单及情景分析 金嘉欣, 孙世达, 王芃, 林应超, 王婷, 吴琳, 魏宁, 常俊雨, 毛洪钧(665)

国六柴油机DPF再生时VOCs排放特性 钱枫, 薛常鑫, 许小伟, 马东, 李朋, 祝能(674)

南小水流域地表水和地下水的稳定同位素和水化学特征及其指示意义 郭亚文, 田富强, 胡宏昌, 刘亚平, 赵思晗(682)

乐安河中下游重金属时空分布特征及风险评价 余杨, 吕雅宁, 王伟杰, 渠晓东, 刘聚涛, 温春云(691)

温榆河水环境质量与浮游植物群落结构的时空变化及其相互关系 朱利英, 陈媛媛, 刘静, 王亚炜, 王春荣, 魏源送, 张育新(702)

新安江水库河口区水质及藻类群落结构高频变化 笪文怡, 朱广伟, 黎云祥, 吴志旭, 郑文婷, 兰佳, 王裕成, 许海, 朱梦圆(713)

环渤海芦苇湿地磷的吸附容量及释放风险评估 宋佳伟, 徐刚, 张扬, 吕迎春(728)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化 刘思儒, 赵继东, 肖尚斌, 倪兆奎, 王圣瑞(734)

西安市降雪中DOM荧光特性和来源分析 杨毅, 韩丽媛, 刘焕武, 雷颖, 李斌, 徐会宁(743)

透水砖铺装的设施构造对运行效果的影响 张佳炜, 刘勇, 金建荣, 李田(750)

微米SiC/石墨烯复合物光催化降解罗丹明B 朱红庆, 杨兵, 魏世强, 杨静静, 张进忠(756)

锰铁改性针簇莫来石对水中BPA和EE2的去除 周秋红, 龙天渝, 何靖, 郭劲松, 高俊敏(763)

载钼磁性水热生物炭的制备及其除磷性能 宋小宝, 何世颖, 冯彦房, 花昀, 唐婉莹, 朱秋蓉, 薛利红, 杨林章(773)

复合金属改性生物炭对水体中低浓度磷的吸附性能 孙婷婷, 高菲, 李莉, 黎睿, 董磊(784)

磁性硅藻土负载纳米氧化钙对水中磷酸盐吸附 徐楚天, 李大鹏, 张帅, 耿雪, 陈丽媛, 宋小君, 郭超然, 黄勇(792)

污水厂尾水受纳河段沉积物磷形态及释放风险效应 汤宁, 李如忠, 王聿庆, 何瑞亮, 刘超(801)

生物膜生态浮床对城市尾水净化特征分析 赵志瑞, 张佳瑶, 李铎, 李方红(809)

磁凝凝对市政污水中抗生素抗性基因和重金属抗性基因的削减效能 于雯超, 郑利兵, 魏源送, 王哲晓, 张鹤清, 黄光华, 焦赞仪, 吴振军(815)

四环素抗生素对污泥中四环素抗性基因丰度和表达水平的作用影响 阮晓慧, 钱雅洁, 薛罡, 高品(823)

异养硝化细菌*Pseudomonas aeruginosa* YL的脱氮过程及N₂O产生特性 杨垒, 崔坤, 任勇翔, 郭淋凯, 张志昊, 肖倩, 陈宁, 汪旭晖(831)

包埋厌氧氨氧化菌的环境因子影响特性及群落结构分析 王晓瞳, 杨宏, 苏扬, 刘旭妍(839)

包埋反硝化填料强化二级出水深度脱氮性能研究及中试应用 周亚坤, 杨宏, 王少伦, 何海超, 刘宗跃, 苏扬, 张辉(849)

厌氧时间对间歇进水-间歇曝气的好氧颗粒污泥系统影响 张杰, 王玉颖, 李冬, 曹思雨, 李帅(856)

除磷颗粒诱导的同步短程硝化反硝化除磷颗粒污泥工艺 李冬, 刘博, 王文琪, 张杰(867)

桂西南地球化学异常区农田重金属空间分布特征及污染评价 王佛鹏, 肖乃川, 周浪, 庞瑞, 宋波(876)

青藏高原表土重金属污染评价与来源解析 杨安, 王艺涵, 胡健, 刘小龙, 李军(886)

黄河三角洲不同植物群落土壤酶活性特征及影响因子分析 莫雪, 陈斐杰, 游冲, 刘福德(895)

管理措施对黄土高原油松人工林土壤水溶性碳氮及其三维荧光特征的影响 宋亚辉, 张娇阳, 刘鸿飞, 薛蕙, 李秧秧(905)

生物炭输入对不同滨岸带土壤营养元素有效态变化的影响 周慧华, 袁旭音, 熊钰婷, 韩年, 叶宏萌, 陈耀祖(914)

水热炭减少稻田氨挥发损失的效果与机制 余姗, 薛利红, 花昀, 李德天, 谢斐, 冯彦房, 孙庆业, 杨林章(922)

接种菌根真菌对湿生植物根际土壤硝化反硝化活性的影响及其微生物机制 刘焱, 王磊, 曹湛波, 段灏(932)

基于漂浮箱法和扩散模型测定淡水养殖鱼塘甲烷排放通量的比较 胡涛, 黄健, 丁颖, 孙志荣, 徐梦凡, 刘树伟, 邹建文, 吴双(941)

超高效液相色谱串联质谱法同时测定叶菜中13种抗生素 陈乾, 刘洋, 肖丽君, 邹德玉, 刘海学, 吴惠惠(952)

青菜中镉的吸收和累积对晒的响应规律 余焱, 罗丽韵, 刘哲, 付平南, 李花粉(962)

两种不同镉富集能力油菜品种耐性机制 卞建林, 郭俊梅, 王学东, 杨俊兴, 杨军, 陈同斌, 曹柳, 成永霞, 任战红, 王杰, 周小勇(970)

可生物降解螯合剂GLDA强化三叶草修复镉污染土壤 贺玉龙, 余江, 谢世前, 李佩柔, 周宽, 何欢(979)

我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 乔玉辉, 陈清, 熊静, 郭丽莉, 江荣风, 李花粉(986)

畜禽粪便和桃树枝工业化堆肥过程中微生物群落演替及其与环境因子的关系 蔡涵冰, 冯雯雯, 董永华, 马中良, 曹慧锦, 孙俊松, 张保国(997)

4种粪便堆肥过程中抗生素的降解特性 朱为静, 朱凤香, 王卫平, 洪春来, 姚燕来(1005)

《环境科学》征订启事(553) 《环境科学》征稿简则(655) 信息(664, 755, 885)

洱海藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量时空变化

刘思儒^{1,2}, 赵继东³, 肖尚斌¹, 倪兆奎², 王圣瑞^{1,2,4*}

(1. 三峡大学水利与环境学院, 宜昌 443002; 2. 北京师范大学水科学研究院, 城市水循环与海绵城市技术北京市重点实验室, 北京 100875; 3. 大理州洱海流域管理局, 大理 671000; 4. 云南省高原湖泊流域污染过程与管理重点实验室, 昆明 650034)

摘要: 选择藻类水华高风险期, 研究沉积物氮磷释放通量时空变化及影响因素, 以揭示沉积物氮磷释放对洱海水质影响。结果表明: ①2009、2013 和 2018 年洱海沉积物氮磷释放通量整体呈上升趋势, 与 2009 相比, 2013 年增幅较大, 而 2018 年与 2013 年相比增幅较小; 溶解性总氮 (DTN) 释放通量在 $11.71 \sim 14.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 其中有机氮 (DON) 释放通量在 $6.39 \sim 8.42 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 DTN 的 58%, 无机氮 (DIN) 释放通量在 $5.31 \sim 5.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 DTN 的 42%; 溶解性总磷 (DTP) 释放通量在 $0.11 \sim 0.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 无机磷 (DIP) 释放通量在 $0.07 \sim 0.09 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 DTP 的 66%, 有机磷 (DOP) 释放通量在 $0.04 \sim 0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 占 DTP 的 34%。②洱海沉积物氮磷释放通量空间差异也较大, 其中氮释放通量呈南部 > 北部 > 中部趋势, 磷释放通量表现为北部 > 中部 > 南部趋势; 2009、2013 和 2018 年相比, 由北向南各湖区氮释放通量增幅分别为 17%、13% 和 23%, 磷释放通量增幅分别为 19%、28% 和 29%。③2009、2013 和 2018 年相比, 洱海沉积物氮磷含量总体稳定, 不是影响其释放通量变化主因, 水华高风险期水体 pH 增加和 DO 下降是影响沉积物氮磷释放通量变化的重要因素, 洱海保护应关注水体环境因子变化导致的沉积物氮磷释放增加问题。

关键词: 洱海; 氮磷; 释放通量; 时空变化; 沉积物; 影响因子

中图分类号: X524 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2020)02-0734-09 DOI: 10.13227/j.hjxx.201907160

Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai

LIU Si-ru^{1,2}, ZHAO Ji-dong³, XIAO Shang-bin¹, NI Zhao-kui², WANG Sheng-rui^{1,2,4*}

(1. College of Hydraulic & Environmental Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 2. Beijing Key Laboratory of Urban Hydrological Cycle and Sponge City Technology, College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing 100875, China; 3. Dali Administration of Erhai Lake Basin, Dali 671000, China; 4. Yunnan Key Laboratory of Pollution Process and Management of Plateau Lake-Watershed, Kunming 650034, China)

Abstract: Spatial and temporal characteristics of release fluxes of sediment nitrogen (N) and phosphorus (P) were investigated in the high-risk period of algal blooms in Lake Erhai. Moreover, the influence factors were examined. Results show that the release flux of N and P increased in recent years, exhibiting a clear increase in the period from 2009 to 2013, and a slight increase in the period since 2013. The release flux of dissolved total nitrogen (DTN) ranged between $11.71 \sim 14.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, within which the release flux of dissolved organic nitrogen (DON) and dissolved inorganic nitrogen (DIN) were $6.39 \sim 8.42 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $5.31 \sim 5.73 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, accounting for 58% and 42% of the DTN, respectively. The release flux of dissolved total phosphorus (DTP) ranged between $0.11 \sim 0.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, within which the release flux of dissolved organic phosphorus (DOP) and dissolved inorganic phosphorus (DIP) were $0.04 \sim 0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ and $0.07 \sim 0.09 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, accounting for 34% and 66% of the DTP, respectively. The distribution of release flux of N showed a decreasing order: south > north > middle, while P was north > middle > south. The release flux of N increased by 17%, 13% and 23%, and the release flux of P increased by 19%, 28%, and 29% in north, middle, and south part of Lake Erhai from 2009 to 2018. Comparing the years 2009, 2013 and 2018, although the contents of N and P were stable, the release flux of N and P in the sediment was enhanced due to increasing pH and decreasing DO. Therefore, the increasing release of nitrogen and phosphorus from sediments, caused by changes in the water environment factors, should be paid attention to for the protection of Lake Erhai.

Key words: Lake Erhai; nitrogen and phosphorus; release flux; temporal and spatial variation; sediment; impact factor

氮磷是湖泊生物地球循环所关注的主要营养元素^[1,2],也是控制湖泊富营养化的关键影响因子。沉积物作为湖泊营养盐重要蓄积库,在一定条件下,其氮磷可通过扩散等过程向上覆水体释放,进而影响湖泊水质。外源污染得到控制后,沉积物氮磷释放仍然可使湖泊水体营养盐维持在较高水平^[3-5]。藻类水华高风险期,湖泊水体藻类生物量较高,在合适的

气象水文条件下易发生大规模暴发^[6,7],较高的藻类生物量促进沉积物氮磷向上覆水体释放,Chen等^[8]在实验室模拟研究了藻类对沉积物磷释放影

收稿日期: 2019-07-18; 修订日期: 2019-09-19

基金项目: 国家万人计划项目(312232102)

作者简介: 刘思儒(1995~),男,硕士研究生,主要研究方向为湖泊富营养化过程与机制, E-mail: 929184565@qq.com

* 通信作者, E-mail: wangsr@bnu.edu.cn

响,结果显示有藻环境沉积物 SRP 释放通量显著上升;姜霞等^[9]研究了巢湖沉积物 NH_4^+ -N 迁移转化,发现藻类水华高风险期上覆水氮浓度出现不同程度下降趋势,而藻类水华增加了沉积物氮释放风险;Wang 等^[10]的研究表明藻类水华影响水体 pH 和 DO 等环境因子变化,进而促进沉积物氮磷释放。由此可见,研究藻类水华高风险期沉积物氮磷释放是水质影响对控制湖泊富营养化需要关注的重要问题。

近年来,洱海水体氮磷营养盐浓度虽总体维持在 II ~ III 类水平,但总体呈升高趋势^[11],生态系统已由“草型-清水”转变为“藻型-浊水”状态^[12]。洱海保护治理虽已投入大量资金,特别是自 2016 年实施抢救性保护行动以来,外源入湖污染负荷控制取得了一定成效,但湖泊水质并没有得到明显改善,藻类水华风险依然较高。由此推测认为,沉积物氮磷释放可能对洱海水质,特别是对藻类水华发生可能具有较大影响。因此,为了探究这一问题,本研究针对藻类水华高风险期 9 月^[13],分别选择 2009 年出现局部水华、2013 年出现大规模水华和 2018 年未出现明显水华 3 个年份,其中各年份藻类数量分别为 2 740、3 174 和 1 391 万个 $\cdot \text{L}^{-1}$,探究近十年洱海沉积物氮磷释放通量时空变化,并从沉积物氮磷含量和水体 pH、DO 环境因子变化等方面,试图探讨造成沉积物氮磷释放通量时空变化的原因,以期为阐明洱海富营养化机制和下一阶段保护治理提供数据支持和理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域及样品采集

洱海位于云南大理白族自治州 ($\text{E}99^\circ 32' \sim 100^\circ 27'$, $\text{N}25^\circ 25' \sim 26^\circ 16'$),是云南省第二大湖泊。湖周长为 128 km,湖面面积 251 km^2 ,蓄水量达 27.43 $\times 10^8 \text{ m}^3$,最大水深 21.3 m (平均水深 10.6 m)。洱海是典型高原断陷湖泊,根据湖底地形可将洱海分为北部(康廊~海舌以北)、中部(挖色湖心为中心,龙龕~海舌)和南部(龙龕以南)^[14]。其中北部和南部水深较浅,有水生植物分布;中部水深较深,基本无水生植物生长^[15]。

每年 9 月洱海藻类水华风险较高^[12],为了能够较好掌握藻类水华高风险期沉积物氮磷释放通量变化,本研究分别于 2009 年、2013 年及 2018 年 9 月采集洱海水样、表层及柱状沉积物;全湖共选取 7 个点位(见图 1),包括北部红树湾(1)、沙坪湾(2)、中部靠西岸(3)、中部湖心(4)、中部湖区(5)、南部湖心平台(6)和南部出湖口(7)。柱状沉积物按 0

~2、2~5、7~10 cm 分层,分层沉积物以 5 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 高速离心获得间隙水样品(4~8 mL),将得到的上覆水和间隙水立即过膜(滤膜孔径为 0.45 μm)后冷冻储存待测。

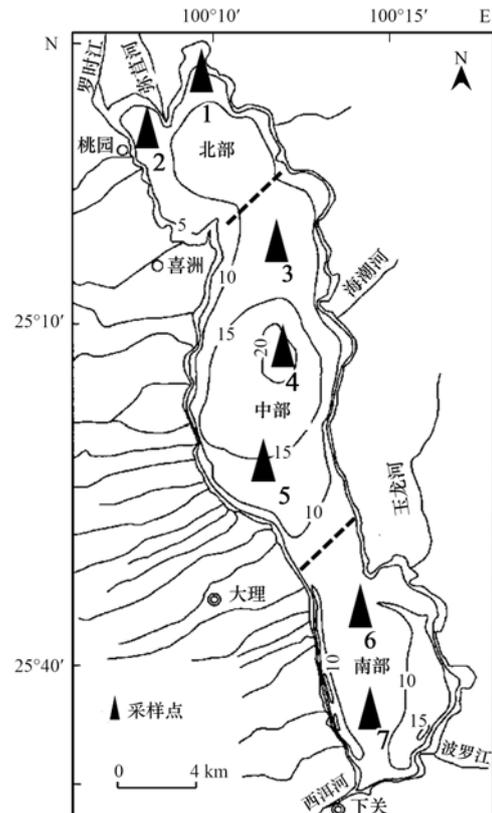


图 1 洱海采样点位分布示意

Fig. 1 Distribution of sampling points in Erhai lake

1.2 指标测定

本研究水体 pH 和 DO 等参数在现场用便携式现场测定仪进行测定;上覆水与沉积物间隙水 DTN、 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、DTP 及 SRP 按文献^[16]的方法进行测定,其中 DTN 采用过硫酸钾氧化吸光度法, NH_4^+ -N 用纳氏试剂分光光度法, NO_3^- -N 用紫外分光光度法,DTP 用过硫酸钾消解-钼锑抗分光光度法,SRP 用钼酸铵分光光度法,而 DON (有机氮) = DTN (溶解性总氮) - DIN (NH_4^+ -N + NO_3^- -N),DOP = DTP - SRP。沉积物总氮用过硫酸钾消化法^[17]测定,沉积物总磷用 SMT 法^[18]测定。所有样品测定重复 3 次且实验数据均取 3 次结果平均值,控制误差在 5% 以内。

1.3 沉积物氮磷释放通量计算

本研究沉积物氮磷释放通量采用孔隙水扩散模型法计算,根据沉积物间隙水和上覆水浓度梯度,按照 Fick 第一定律计算沉积物氮磷释放通量。扩散通量计算公式如下:

$$F = \varphi \cdot D_s (\partial c / \partial Z)_{Z=0} \quad (1)$$

式中, F 为分子在沉积物-水界面扩散通量, $\text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; φ 为沉积物孔隙率, %; $(\partial c / \partial Z)_{Z=0}$ 为分子在沉积物-水界面浓度梯度, $\text{mg} \cdot (\text{L} \cdot \text{cm})^{-1}$; D_s 为分子实际扩散系数 ($\text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$). 文献[19, 20]给出了真实扩散系数 D_s 与孔隙度 φ 之间的经验关系:

$$\begin{aligned} D_s &= \varphi^2 \cdot D_0, & \varphi \leq 0.7 \\ D_s &= \varphi \cdot D_0, & \varphi > 0.7 \end{aligned} \quad (2)$$

式中, D_0 为理想溶液扩散系数, 根据现场温度进行校正. 25℃时, $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 的 $D_0 = 7.4 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的 $D_0 = 7.4 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$; SRP 的 $D_0 = 7.4 \times 10^{-6} \text{cm}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ [19]. 目前 DON 和 DOP 没有对应的扩散系数值, 故 DON 采用 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$, DOP 采用 SRP 扩散系数均值. DTN 扩散通量为 DIN 与 DON 扩散通量之和, DTP 扩散通量为 DOP 与 SRP 扩散通量之和.

1.4 数据分析

本研究数据及释放通量计算均用 Excel 处理, 图表利用 Origin 8.5 绘制.

2 结果与分析

2.1 藻类水华高风险期洱海沉积物氮磷释放通量时间变化

本研究洱海沉积物氮释放通量 (DTN) 包括无机氮 (DIN) 与有机氮 (DON) 释放通量, 其中 DIN 包括氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 与硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$); 沉积物磷释放通量包括无机磷 (DIP) 与有机磷 (DOP) 释放通量, 其

中无机磷释放通量即为正磷酸盐 (SRP) 释放通量.

如图 2 所示, 2009、2013 和 2018 年相比, 洱海沉积物氮释放通量 (DTN) 总体呈增加趋势, 由 2009 年的 $11.71 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 增加到 2018 年的 $14.15 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 增加 20%, 其中 2013 与 2009 年相比增幅达 13%, 年均增幅为 3.25%, 2018 与 2013 年相比, 增幅为 7%, 年际增幅仅为 1.4%. 不同形态氮相比, 溶解性有机氮 (DON) 是洱海沉积物氮释放通量主体, 占 DTN 的 58%, 释放通量在 $6.39 \sim 8.42 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $7.54 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; 无机氮 (DIN) 其次, 占 DTN 释放通量的 42%, 释放通量在 $5.31 \sim 5.73 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$, 均值为 $5.49 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$; DIN 中氨氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 释放通量占绝对主体, 占无机氮释放通量的 97%, 在 $5.12 \sim 5.57 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 间, 而硝氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 仅占无机氮释放通量的 3%, 在 $0.13 \sim 0.19 \text{mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 间变化.

就变化趋势而言, 除硝氮外其余形态氮释放通量均呈增长趋势, 其中有机氮 2013 年与 2009 年相比, 增幅为 22%, 年均增幅为 5.5%, 而 2018 年与 2013 年相比, 增幅为 8%, 年均增幅仅有 1.6%; 无机氮 2013 年与 2009 年相比, 增幅为 2%, 年均增幅仅为 0.5%, 而 2018 年与 2013 年相比, 增幅为 6%, 年均增幅为 1.2%, 即 DIN 与 DTN、DON 变化趋势不同, 主要表现为 2018 与 2013 相比增长较快, 而 2009 年与 2013 年相比增长较慢; 氨氮由于在无机氮中占比较大, 其变化趋势与无机氮一致; 硝氮虽然 2013 年与 2009 年相比, 2013 年与 2018 年相比, 降幅分

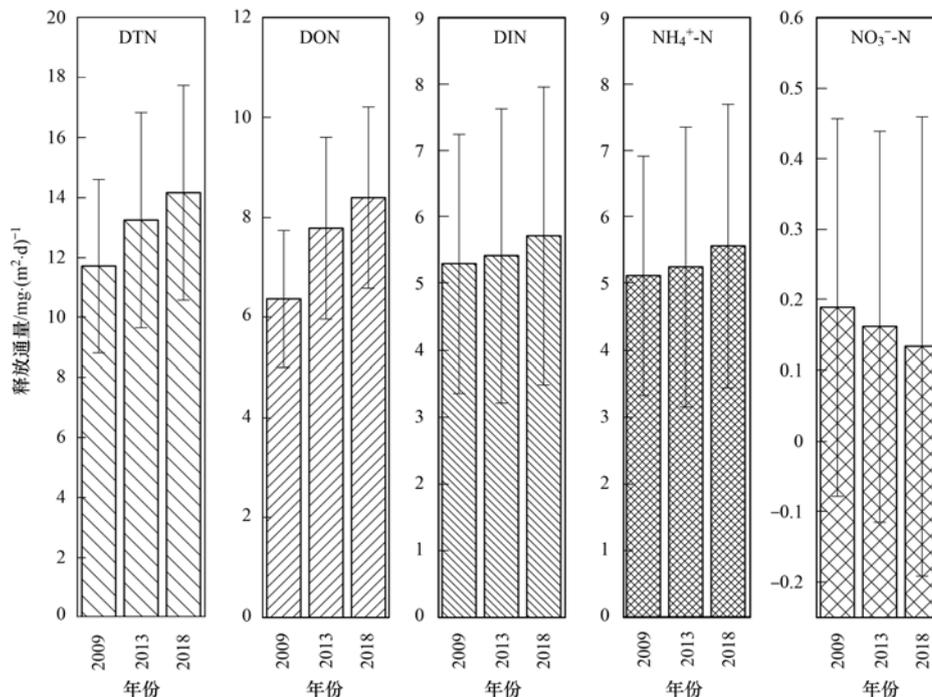


图 2 不同年份洱海沉积物不同形态氮释放通量变化

Fig. 2 Changes in nitrogen release flux of different forms in sediments of Lake Erhai in different years

别达 13% 和 16%, 但由于其释放通量较小, 故整体变化相对较小. 洱海沉积物氮释放通量表现为 2009 年到 2013 年间增长较快, 2013 年~2018 年间增长相对较小, 而其中 DON 释放通量在 2009、2013 和 2018 年间增长最快.

本研究洱海沉积物 DTP 释放通量在 $0.11 \sim 0.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ (图 3), 2018 年与 2009 年相比, 增长了 26%, 其中 2013 年与 2009 年相比, 增加了 16%, 年均增幅为 4%, 2018 年与 2013 年相比, 增加了 10%, 年际增幅为 2%. 从不同形态磷来看, SRP 是洱海沉积物磷释放通量的主体, 占 DTP 释放通量的 66%, 在 $0.07 \sim 0.09 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$ 间变化, 2009 年与 2013 年相比及 2013~2018 年相比增幅分别为 13% 和 14%, 年均增幅分别为 3.25% 和 2.8%, 与焦立新等^[21]研究 2010 年洱海沉积物释放通量接近. 而 DOP 其次, 占 DTP 释放通量的 34%, 释放通量在 $0.04 \sim 0.05 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$. 2018 年与 2009 年相比, 增长 26%, 其中 2009 年与 2013 年相比增幅为 22%, 年均增幅为 5.5%, 2013 年与 2018 年相比增幅为 4%, 年际增幅为 0.8%. 因此, 洱海沉积物磷释放通量 2009~2013 年间增长较大, 而 2013~2018 年间增长相对较小, 且 2009~2013 年间的年均增幅是 2013~2018 的 2 倍. 其中, 2009~2013 年间主要为 DOP 释放通量增长较快, 而 2013~2018 年间则为 SRP 增长较快.

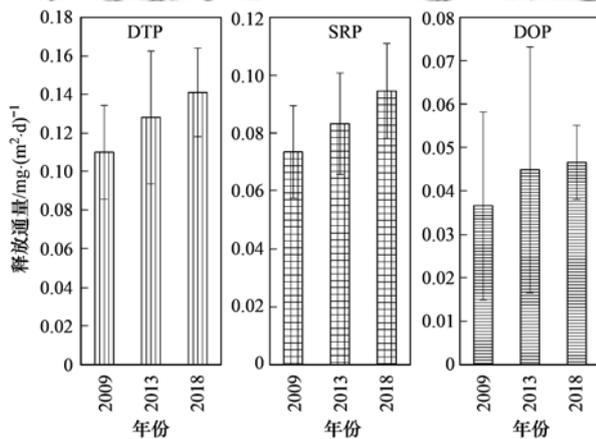


图 3 不同年份洱海沉积物不同形态磷释放通量变化

Fig. 3 Changes in phosphorus release flux of different morphology in Lake Erhai sediments in different years

综上所述可见, 洱海沉积物氮磷释放通量总体呈上升趋势, 且表现为 2009~2013 年增幅较大, 2013~2018 年增幅较小. 其中 DON 占 DTN 释放通量比例较高, 其增幅变化与 DTN 一致, 均表现为 2009~2013 年增幅较大, 2013~2018 年增幅较小; 而 DIN 整体呈 2013~2018 年增幅较大, 而 2009~2013 年增幅相对较小, 其中氨氮释放占无机氮比例

较高, 且呈上升趋势, 硝氮释放量占比小且呈下降趋势. 磷释放通量变化中 SRP 占 DTP 占比较高, DTP、SRP 和 DOP 释放通量均表现为 2013 年与 2009 年相比增幅较大, 而 2013 年与 2018 年相比增幅较小. 主要与近年来洱海外源治理推进较快, 水质逐渐改善有关, 沉积物含量较高的氮磷因浓度梯度作用向上覆水体释放, 使沉积物氮磷释放通量随时间而不断增加; 而硝氮则出现不同趋势, 可能与水体溶解氧下降, 使反硝化作用增加等因素有关.

2.2 藻类水华高风险期洱海沉积物氮磷释放通量空间变化

洱海沉积物氮磷释放通量空间变化如图 4 和图 5 所示, DTN 释放通量 2009、2013 和 2018 年空间差异较大, 全湖均呈南部 > 北部 > 中部的趋势, 由北向南各湖区释放通量增幅分别为 17%、13% 和 23%. 2009 年 DIN 释放通量由北向南空间分布呈波动趋势变化, 2013 年与 2018 年由北向南空间呈波动上升趋势, 增幅分别达 9% 和 8.1%, 中部点位均表现出较低的释放通量. 沉积物 DIN 释放通量各湖区变化表现为北部、南部湖区增幅分别为 8% 和 15%, 中部湖区 2013 年与 2009 年相比呈下降趋势, 降幅达 9.6%, 而 2018 年与 2013 年相比则表现为上升, 增幅为 8.6%. $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占 DIN 释放通量比较大, 故 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 空间变化表现与 DIN 一致, 而 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 释放通量在 2009 年、2013 年由北向南空间分布呈先上升后下降趋势, 降幅分别为 62% 和 51%, 而 2018 年呈先下降后上升趋势, 增幅达 43%. 2009、2013 和 2018 年各湖区变化表现为北部与中部呈下降趋势, 降幅分别为 54% 和 20%, 而南部湖区呈上升趋势, 增幅为 12%. DON 释放通量空间分布由北向南均呈上升趋势, 其增幅在 35%~38%. DON 释放通量北中南各湖区变化均表现上升趋势, 增幅分别为 25%、20% 和 27%.

沉积物 DTP 释放通量空间分布差异较大, 整体呈北部 > 中部 > 南部的趋势, 2009、2013 和 2018 年由北向南降幅分别为 19%、28% 和 29%, 由北向南各湖区增幅为 20%、30% 和 13%. 其中 SRP 释放通量空间分布与 DTP 一致, 各年份由北向南表现为下降趋势, 降幅分别为 29%、31% 和 36%. SRP 释放通量由北向南各湖区均表现为上升趋势, 2009、2013 和 2018 年增幅分别为 21%、25% 和 8%; 沉积物 DOP 释放通量均呈中部高而南北低的趋势, 其变化幅度在 9%~38%, DOP 释放通量各湖区变化均呈上升趋势, 增幅分别为 26%、30% 和 19%.

总体来看, 洱海沉积物氮磷释放空间差异较大, 其中氮释放通量呈现南部 > 北部 > 中部的趋势; 相

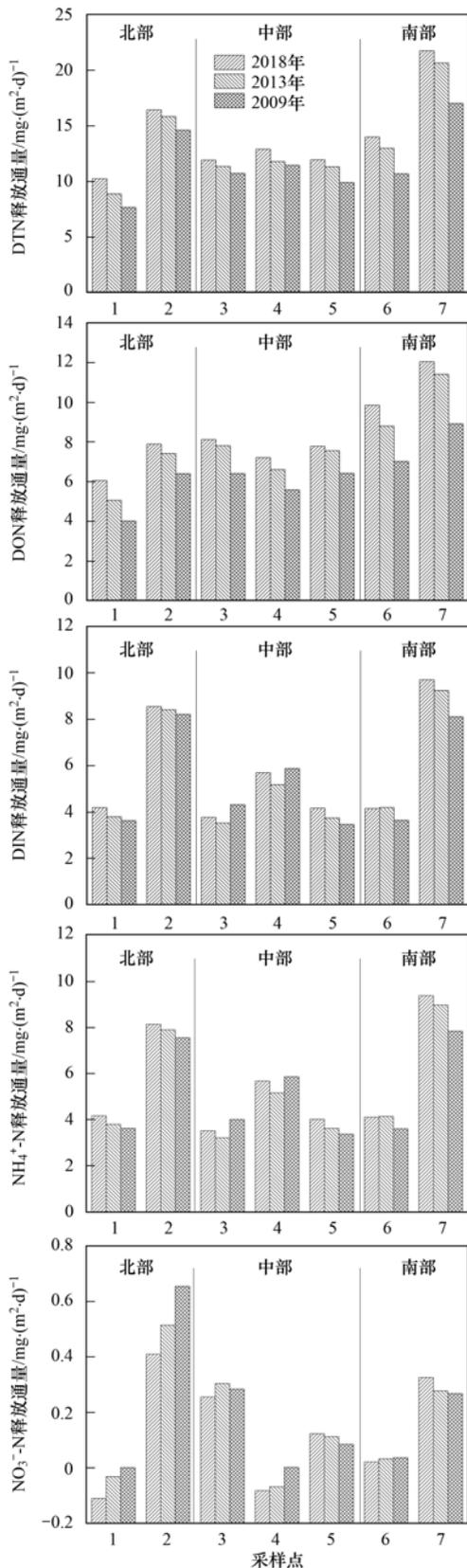


图4 洱海沉积物不同形态氮释放通量空间分布变化
Fig. 4 Spatial distribution changes in different nitrogen release fluxes in Lake Erhai sediments

比而言,不同形态氮南部湖区均呈上升趋势且增幅最大,而中部释放通量变化趋势不同.沉积物磷释放通量空间差异主要表现为北部 > 中部 > 南部,不同

形态磷释放通量空间变化主要表现为中部湖区增幅最大,其次为北部.洱海沉积物氮释放通量空间变化较大,一方面与洱海污染物主要由北部入湖,而南部湖区主要受城市面源污染影响有关^[22];另一方面可能与南北湖区以前分布一定面积的沉水植被,而近年来水生植物退化明显有关.而沉积物磷释放主要受洱海水体由北向南流动,外源携带磷污染物由北向南逐渐沉积于湖底所致,加上中部湖区湖水较深,相对南北湖区较易积累磷,导致中部湖区沉积物磷释放通量较高^[21].

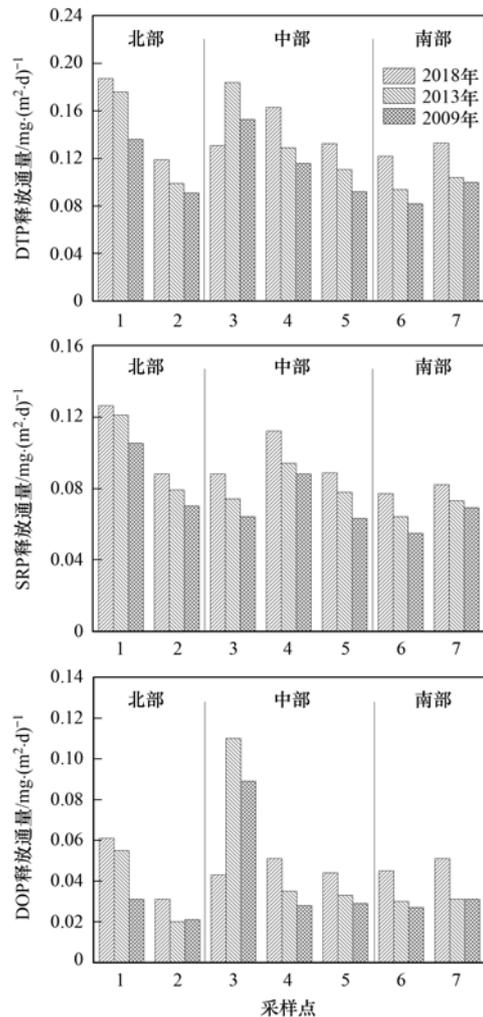


图5 洱海沉积物不同形态磷释放通量空间分布变化
Fig. 5 Spatial distribution changes in different phosphorus release fluxes in Lake Erhai sediments

3 讨论

3.1 洱海沉积物氮磷含量对释放通量影响

一般来讲,当外源污染得到控制后,湖泊水体氮磷浓度会有所下降,进而可能导致沉积物氮磷释放通量增加^[23];主要是由于沉积物 $\omega(\text{TN})$ 与 $\omega(\text{TP})$ 较高,则其具有较强的氮磷释放潜能^[24,25].本研究发现2009、2013、2018年洱海沉积物 $\omega(\text{TN})$ 在3766~3854 mg·kg⁻¹之间, $\omega(\text{TP})$ 在785~1080

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 之间,表明 2009、2013 及 2018 年相比,洱海沉积物氮磷含量总体较为稳定,即沉积物氮磷含量并不是造成 2009、2013 和 2018 年洱海沉积物氮磷释放通量增加的主要原因。

根据洱海沉积物 TN、TP 含量空间分布及变化情况可见(见图 6), $\omega(\text{TN})$ 不同年份空间变化均表现为北部($4\,548\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 南部($4\,224\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 中部($3\,008\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$),即 $\omega(\text{TN})$ 空间分布与氮释放通量相似,均呈现南北高,中部低的特点。但 2009、2013 和 2018 年相比,洱海沉积物总氮含量空间分布由北向南各湖区变化分别为 -2.3% 、 1.1% 和 3.4% ,与南部湖区沉积物氮释放通量在不同年份均出现明显增长的趋势相同外,其北部和中部

湖区均呈不同变化趋势。沉积物 $\omega(\text{TP})$ 各年份空间分布均表现为中部($969\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 北部($951\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$) > 南部($802\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$);因中部水深较深,易于沉积物累积,其沉积物磷含量较高,而沉积物磷释放通量表现为由北向南递减的变化趋势,但中部释放通量与北部差异较小,与北部和中部湖区沉积物 $\omega(\text{TP})$ 较为一致有关。以上结论与 Wang 等^[26]研究沉积物总磷含量影响释放通量结论一致。2009、2013 和 2018 年相比,洱海沉积物总磷含量由北向南各湖区变化分别为 -4.6% 、 6.1% 和 4.5% ,中部和南部湖区与沉积物磷释放通量均表现为上升趋势外,在北部湖区呈不同的变化趋势。

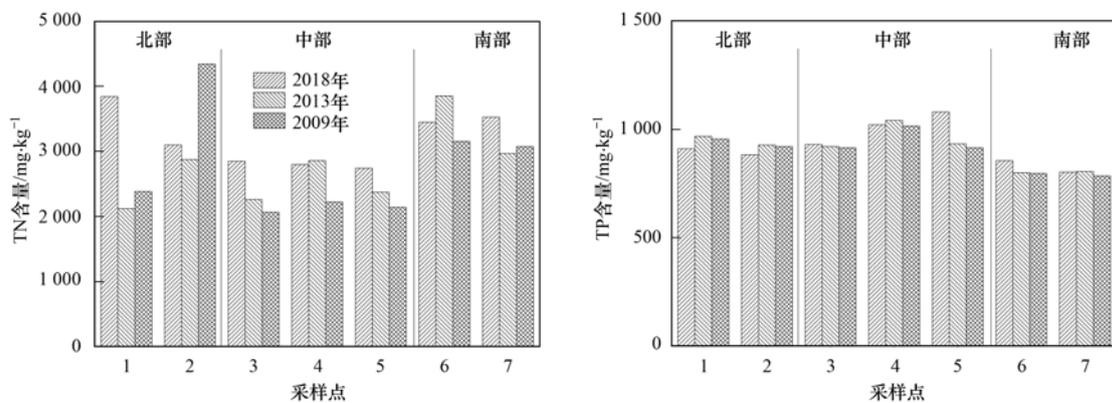


图 6 洱海沉积物总氮总磷空间分布变化

Fig. 6 Spatial distribution changes in total nitrogen and phosphorus in sediments of Lake Erhai

总体而言,洱海沉积物 TN 和 TP 含量近年来总体变化较小,其空间差异较大,但由于沉积物氮磷含量与氮磷释放通量各湖区变化趋势不一致,表明沉积物氮磷含量不是影响氮磷释放通量变化的主因,洱海沉积物氮磷释放通量可能主要受环境因子变化等因素影响。

3.2 水体 pH 和 DO 变化对洱海沉积物氮磷释放通量影响

除沉积物氮磷含量及上覆水与沉积物间隙水氮磷浓度梯度外,pH 和 DO 等环境因子对沉积物氮磷释放也有重要影响^[27~29]。本研究测定 2009、2013 及 2018 年洱海全湖 pH、DO 全年均值及 9 月结果见表 1,洱海全年 pH 均值在 8.58 ~ 8.87 之间,增幅仅为 3.1%,DO 均值在 7.0 ~ 7.40 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,增幅为 5%;而 9 月 pH 值由 8.07 上升至 8.80,增幅达

8.2%,DO 浓度呈波动下降趋势,在 6.9 ~ 7.31 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,降幅达 5.6%。即洱海水体全年 pH、DO 均值变化较小,但 9 月变化较大,且与全年均值相比表现出不同的变化趋势,与卫志宏等^[30]的研究结论一致。可能与 9 月洱海处于藻类水华暴发高风险期有关,该时期藻类快速增长而使水体 pH 值相较于全年均值出现更大幅度的增长^[31],而水体 DO 浓度因藻类生长大量消耗水体溶解氧,而明显小于全年均值。pH 值弱碱性加快了沉积物有机质矿化及氮释放^[32],使氮释放通量增大,与本研究洱海沉积物藻类水华高风险期沉积物氮释放通量较高的结果一致。当 $\text{pH} < 10$ 时,硝氮释放受 pH 值变化影响较小,但好氧环境下有利于硝氮释放^[33],结合 9 月洱海 DO 浓度呈波动下降趋势,证实了洱海沉积物硝氮释放通量受 DO 下降影响而呈下降趋势。9 月洱

表 1 洱海水体 pH、DO 于 2009、2013、2018 年全年及 9 月均值变化

Table 1 Mean changes of pH and DO of Lake Erhai water in 2009, 2013, 2018 and September

项目	pH			DO/ $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$		
	2009 年	2013 年	2018 年	2009 年	2013 年	2018 年
全年平均	8.58	8.87	8.86	7	7.19	7.4
9 月	8.07	8.36	8.80	7.31	6.81	6.9

海水体 pH 上升,且 DO 波动下降,其沉积物磷释放通量明显增加,其原因在于高 pH 有利于磷酸盐根离子从 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ 胶体中解吸附^[34],沉积物正磷酸盐释放增加^[35, 36],而低溶解氧条件也更利于正磷酸盐释放^[37].

洱海水体 pH 和 DO 空间分布差异明显(图 7),其中 pH 表现为南部 > 北部 > 中部,DO 表现为中部 > 北部 ≈ 南部.北部湖区因 3 条主要入湖河流带来的外源污染和南部湖区受下关城区及有机物污染等影响^[38],pH 值较高,而北部湖区污染物降解消耗溶解氧和南部湖区风浪较大藻类不易聚集,湖水垂向层次的充分混合使得 DO 较低^[39],与氮释放表现为南部湖区较高的结果一致,表明水体 pH 上升,DO 下降对沉积物氮释放具有促进作用,从而影响洱海沉积物氮释放通量空间分布.磷释放通量空间分布主要表现为北部高,南部低,与 pH、DO 空间分布存在差异,可能与洱海沉积物 $\omega(\text{TP})$ 分布有关,南部 $\omega(\text{TP})$ 含量较低,使沉积物可释放磷含量也较低,而北部湖区作为污染物主要入湖区域,积累了大量污染物,而在高 pH、低 DO 及高 $\omega(\text{TP})$ 作用下,磷释放通量较大,中部湖区有机磷释放量较大可能受多因素作用,其具体机制还需进一步研究.总体而言,9 月洱海水体 pH 和 DO 相对于全年均值出现了更大幅度变化,对沉积物氮磷释放通量变化起主要影响作用.

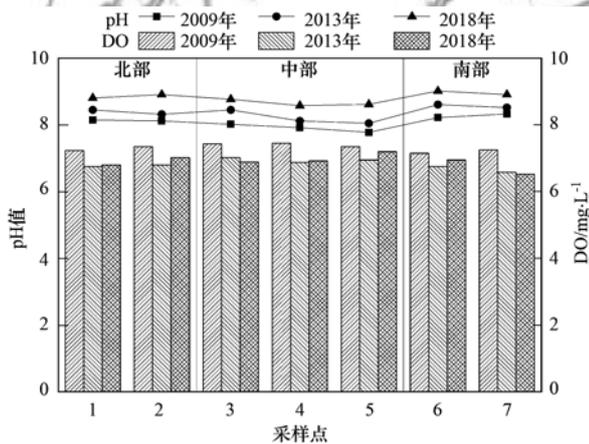


图 7 不同年份 9 月洱海各点位水体 pH、DO 值

Fig. 7 The pH and DO values of Lake Erhai water in September of different years

由此可见,沉积物 $\omega(\text{TN})$ 、 $\omega(\text{TP})$ 及水体 pH、DO 均对洱海沉积物氮磷释放通量有较大影响.特别是因高 pH 和低 DO 有利于沉积物氮磷释放,洱海水体 pH 和 DO 等环境因子与全年均值相比变化较大,故不能仅看全年均值变化,更要关注藻类水华暴发的变化.目前洱海水体呈 pH 上升和 DO 下降的变化趋势,应对藻类水华高峰期湖泊水体进行详细

观测,关注 pH 和 DO 等变化导致的沉积物氮磷释放增加,而为藻类快速增长提供营养等问题;其次,实施生态修复等措施,可增加水体溶解氧和稳定 pH 值;同时,虽洱海沉积物氮磷含量近年来变化较小,但由于其含量较高,也应在重点区域采取针对性底泥污染控制措施.目前洱海富营养化问题依然严峻,加强外源污染控制的同时,沉积物氮磷释放研究及控制也需要高度关注,加上科学有效地湖泊生态系统调控及管理,才能从根本上解决洱海水环境问题.

4 结论

(1) 2009 年、2013 年和 2018 年相比,洱海沉积物 DTN 释放通量范围在 $11.71 \sim 14.15 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,DTP 释放通量范围在 $0.11 \sim 0.14 \text{ mg} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{d})^{-1}$,且 2009 与 2013 年相比增幅较大,而 2013 与 2018 年相比增幅较小;除 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 外,各形态氮磷释放通量均呈增加趋势.DTN 释放通量中 DON 释放通量占比较高,达到 58%,而 DIN 中 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 占比较高;DTP 释放通量中 SRP 释放通量占比较高,高达 66%.

(2) 洱海沉积物氮磷释放通量空间差异较大,氮释放通量表现为南部 > 北部 > 中部,南部湖区释放通量均呈上升趋势且增幅最大,达到 23%,而北部和中部湖区分别增长了 17% 和 13%.磷释放通量表现为北部 > 中部 > 南部的趋势,空间变化主要为中部湖区增幅最大,达到 30%,其次为北部和南部湖区的 20% 和 13%.

(3) 洱海沉积物 $\omega(\text{TN})$ 在 $3766 \sim 3854 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,沉积物 $\omega(\text{TP})$ 在 $785 \sim 1080 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 之间,2009、2013 和 2018 年相比,其含量较为稳定,沉积物氮磷含量不是影响其氮磷释放通量变化的主因,而水华高风险期水体 pH、DO 变化较大则是造成洱海沉积物氮磷释放通量增加的主要原因,应关注洱海水体环境因子变化导致沉积物氮磷释放增加问题.

参考文献:

- [1] Zhou Q X, Gibson C E, Zhu Y M. Evaluation of phosphorus bioavailability in sediments of three contrasting lakes in China and the UK[J]. *Chemosphere*, 2001, **42**(2): 221-225.
- [2] Kaiserli A, Voutsas D, Samara C. Phosphorus fractionation in lake sediments-Lakes Volvi and Koronia, N. Greece [J]. *Chemosphere*, 2002, **46**(8): 1147-1155.
- [3] Bachmann R W, Hoyer M V, Canfield Jr D E. Internal heterotrophy following the switch from macrophytes to algae in Lake Apopka, Florida[J]. *Hydrobiologia*, 2000, **418**(1): 217-227.
- [4] Lauridsen T L, Jensen J P, Jeppesen E, et al. Response of submerged macrophytes in Danish lakes to nutrient loading reductions and biomanipulation[J]. *Hydrobiologia*, 2003, **506**-

- 509(1-3): 641-649.
- [5] 李宝, 丁士明, 范成新, 等. 滇池福保湾底泥内源氮磷营养盐释放通量估算[J]. 环境科学, 2008, **29**(1): 114-120.
Li B, Ding S M, Fan C X, *et al.* Estimation of releasing fluxes of sediment nitrogen and phosphorus in Fubao Bay in Dianchi Lake[J]. Environmental Science, 2008, **29**(1): 114-120.
- [6] 汪偲, 侯泽英, 储昭升, 等. 藻华高风险期微囊藻在洱海中的垂直分布特征及其影响因素[J]. 环境科学研究, 2018, **31**(7): 1250-1257.
Wang C, Hou Z Y, Chu Z S, *et al.* Vertical distribution of microcystis and its influence factors in Lake Erhai during high risk period for algal bloom [J]. Research of Environmental Sciences, 2018, **31**(7): 1250-1257.
- [7] 孔繁翔, 高光. 大型浅水富营养化湖泊中蓝藻水华形成机理的思考[J]. 生态学报, 2005, **25**(3): 589-595.
Kong F X, Gao G. Hypothesis on cyanobacteria bloom-forming mechanism in large shallow eutrophic lakes[J]. Acta Ecologica Sinica, 2005, **25**(3): 589-595.
- [8] Chen M S, Ding S M, Chen X, *et al.* Mechanisms driving phosphorus release during algal blooms based on hourly changes in iron and phosphorus concentrations in sediments[J]. Water Research, 2018, **133**: 153-164.
- [9] 姜霞, 钟立香, 王书航, 等. 巢湖水华暴发期水-沉积物界面溶解性氮形态的变化[J]. 中国环境科学, 2009, **29**(11): 1158-1163.
Jiang X, Zhong L X, Wang S H, *et al.* Dissolvable nitrogen variation at water-sediment interface during alga blooming process in Chaohu Lake[J]. China Environmental Science, 2009, **29**(11): 1158-1163.
- [10] Wang J Z, Jiang X, Zheng B H, *et al.* Effect of algal bloom on phosphorus exchange at the sediment-water interface in Meiliang Bay of Taihu Lake, China[J]. Environmental Earth Sciences, 2016, **75**(1): 57.
- [11] 赵海超, 王圣瑞, 赵明, 等. 洱海水体溶解氧及其与环境因子的关系[J]. 环境科学, 2011, **32**(7): 1952-1959.
Zhao H C, Wang S R, Zhao M, *et al.* Relationship between the DO and the environmental factors of the water body in Lake Erhai [J]. Environmental Science, 2011, **32**(7): 1952-1959.
- [12] 代和芳, 李一华, 杨思诚. 洱海藻类水华的发生及防治建议[J]. 云南农业, 2017, (11): 77-78.
- [13] 王芸. 洱海夏秋季蓝藻种群动态变化及水华成因分析[J]. 大理学院学报, 2008, **7**(12): 39-42.
Wang Y. Study on the group development of cyanophyta and the cause of alga bloom in Erhai Lake in Summer and Autumn[J]. Journal of Dali University, 2008, **7**(12): 39-42.
- [14] 李原, 李任伟, 尚榆民, 等. 云南洱海的环境沉积学研究——表层沉积物的粒度分布、水流方向和能量[J]. 沉积学报, 1999, **17**(S1): 769-774.
Li Y, Li R W, Shang Y M, *et al.* The environment sedimentological study on Erhai Lake, Yunnan Province-Sediments particle size distribution, flow direction and energy distribution[J]. Acta Sedimentologica Sinica, 1999, **17**(S1): 769-774.
- [15] 李文章, 张莉, 王圣瑞, 等. 洱海沉积物水提取态有机氮特征及与其他来源溶解性有机氮的差异[J]. 环境科学, 2017, **38**(7): 2801-2809.
Li W Z, Zhang L, Wang S R, *et al.* Characteristics of water extractable organic nitrogen from Erhai Lake sediment and its differences with other sources [J]. Environmental Science, 2017, **38**(7): 2801-2809.
- [16] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第三版). 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- [17] 钱君龙, 张连弟, 乐美磷. 过硫酸盐消化法测定土壤全氮全磷[J]. 土壤, 1990, **22**(5): 258-262.
- [18] 奇伟, 康志文, 钱凤珍, 等. 黄河上游沉积物中磷含量分布及其环境意义[J]. 内蒙古环境科学, 2009, **21**(4): 16-22.
Qi W, Kang Z W, Qian F Z, *et al.* The phosphorus contents of the surface sediments from the upstream of the Yellow River[J]. Inner Mongolian Environmental Sciences, 2009, **21**(4): 16-22.
- [19] Ullman W J, Sandstrom M W. Dissolved nutrient fluxes from the nearshore sediments of Bowling Green Bay, central Great Barrier Reef Lagoon (Australia) [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1987, **24**(3): 289-303.
- [20] Sweets J P R A, Bär-Gilissen M J, Cornelese A A, *et al.* Oxygen - consuming processes at the profundal and littoral sediment - water interface of a small meso - eutrophic lake (Lake Vechten, The Netherlands) [J]. Limnology and Oceanography, 1991, **36**(6): 1124-1133.
- [21] 焦立新, 赵海超, 王圣瑞, 等. 2010年洱海全湖磷负荷时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(5): 534-539.
Jiao L X, Zhao H C, Wang S R, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of phosphorus loading in Erhai Lake in 2010[J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(5): 534-539.
- [22] 陈纬栋. 洱海流域农业面源污染负荷模型计算研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2011.
Chen W D. Research on modelling agricultural diffuse source pollution load of Lake Erhai basin[D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2011.
- [23] 朱永青. 淀山湖底泥氮磷营养盐释放及其影响因素研究[J]. 环境污染与防治, 2014, **36**(5): 70-77, 82.
Zhu Y Q. Study on the releasing of nutrient from sediment of Dianshan Lake and its influencing factors [J]. Environmental Pollution & Control, 2014, **36**(5): 70-77, 82.
- [24] 彭文启, 王世岩, 刘晓波. 洱海水质评价[J]. 中国水利水电科学研究院学报, 2005, (3): 192-198.
Peng W Q, Wang S Y, Liu X B. Water quality evaluation of Erhai Lake[J]. Journal of China Institute of Water, 2005, (3): 192-198.
- [25] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态氮的时空分布特征[J]. 环境科学研究, 2013, **26**(3): 235-242.
Zhao H C, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of the nitrogen forms in the sediments of Erhai Lake [J]. Research of Environmental Sciences, 2013, **26**(3): 235-242.
- [26] Wang S R, Jin X C, Zhao H C, *et al.* Phosphorus fractions and its release in the sediments from the shallow lakes in the middle and lower reaches of Yangtze River area in China[J]. Colloids and Surfaces A: Physicochemical and Engineering Aspects, 2006, **273**(1-3): 109-116.
- [27] Li H Y, Liu L, Li M Y, *et al.* Effects of pH, temperature, dissolved oxygen, and flow rate on phosphorus release processes at the sediment and water interface in storm sewer[J]. Journal of Analytical Methods in Chemistry, 2013, **2013**: 104316.
- [28] Zhang L, Wang S R, Wu Z H. Coupling effect of pH and dissolved oxygen in water column on nitrogen release at water-sediment interface of Erhai Lake, China[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2014, **149**: 178-186.
- [29] Zhao H C, Zhang L, Wang S R, *et al.* Features and influencing factors of nitrogen and phosphorus diffusive fluxes at the sediment-water interface of Erhai Lake [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2018, **25**(2): 1933-1942.
- [30] 卫志宏, 杨振祥, 唐雄飞, 等. 洱海湖泊及湖湾水质水生态

- 模型及特征分析[J]. 昆明理工大学学报(自然科学版), 2013, **38**(2): 93-101.
- Wei Z H, Yang Z X, Tang X F, *et al.* Three-dimensional modeling study of water quality processes and characteristics in Erhai Lake[J]. Journal of Kunming University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2013, **38**(2): 93-101.
- [31] 王静. 不同水源条件下氮磷营养物对铜绿微囊藻生长的影响研究[D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2016.
- Wang J. Effects of nitrogen and phosphorus nutrients on the growth of *Microcystis aeruginosa* of different water sources[D]. Xi'an: Xi'an University of Architecture and Technology, 2016.
- [32] 梁淑轩, 贾艳乐, 闫信, 等. pH 值对白洋淀沉积物氮磷释放的影响[J]. 安徽农业科学, 2010, **38**(36): 20859-20862.
- Liang S X, Jia Y L, Yan X, *et al.* Effect of the pH value on the nitrogen and phosphorus release from the sediment Baiyangdian [J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences, 2010, **38**(36): 20859-20862.
- [33] 吴晶晶. 环境因子对洱海沉积物氮释放的影响[D]. 邯郸: 河北工程大学, 2011.
- Wu J J. Effects of environmental factors on N release in sediment from Erhai Lake[D]. Handan: Hebei University of Engineering, 2011.
- [34] Wu Y H, Wen Y J, Zhou J X, *et al.* Phosphorus release from lake sediments: effects of pH, temperature and dissolved oxygen [J]. KSCE Journal of Civil Engineering, 2014, **18**(1): 323-329.
- [35] Boers P C M. The influence of pH on phosphate release from lake sediments[J]. Water Research, 1991, **25**(3): 309-311.
- [36] 尹大强, 覃秋荣, 阎航. 环境因子对五里湖沉积物磷释放的影响[J]. 湖泊科学, 1994, **6**(3): 240-244.
- Yin D Q, Qin Q R, Yan H. Effects of environmental factors on release of phosphorus from sediments in Wuli Lake[J]. Journal of Lakes Sciences, 1994, **6**(3): 240-244.
- [37] 王晓蓉, 华兆哲, 徐菱, 等. 环境条件变化对太湖沉积物磷释放的影响[J]. 环境化学, 1996, **15**(1): 15-19.
- Wang X R, Hua Z Z, Xu L, *et al.* The effects of the environmental conditions on phosphorus release in lake sediments [J]. Environmental Chemistry, 1996, **15**(1): 15-19.
- [38] 王圣瑞. 洱海富营养化过程与机理[M]. 北京: 科学出版社, 2015.
- Wang S R. Eutrophication process and mechanism of Erhai Lake [M]. Beijing: Science Press, 2015.
- [39] 朱梦姝, 张虎才, 常凤琴, 等. 2015~2016年洱海水质参数季节性变化[J]. 环境保护前沿, 2017, **7**(4): 297-308.
- Zhu M S, Zhang H C, Chang F Q, *et al.* The seasonal variations of the water quality of Erhai during 2015-2016[J]. Advances in Environmental Protection, 2017, **7**(4): 297-308.



CONTENTS

Influencing Factors of Long-term Variations on Gridded PM _{2.5} of Typical Regions in China Based on GAM Model	NAN Yang, ZHANG Qian-qian, ZHANG Bi-hui (499)
Gridded Atmospheric Emission Inventory of PCDD/Fs in China	CHEN Lu-lu, HUANG Tao, CHEN Kai-jie, et al. (510)
Spatio-Temporal Variations and Source Apportionment of Carbonaceous Species in PM _{2.5} Across Multiple Sampling Locations in the Chengdu Plain	SHI Fang-tian, LUO Bin, ZHANG Wei, et al. (520)
Diurnal Variations and Source Apportionment of Water-soluble Ions in PM _{2.5} During Winter in Nanjing Jiangbei New Area	QIU Chen-chen, YU Xing-na, DING Cheng, et al. (529)
Characterization, Seasonal Variation, and Source Apportionments of Particulate Amines (PM _{2.5}) in Northern Suburb of Nanjing	LI Xu-jie, SHI Xiao-wen, MA Yan, et al. (537)
Pollution Characteristics and Source Apportionment of n-Alkanes and PAHs in Summertime PM _{2.5} at Background Site of Yangtze River Delta	XUE Guo-yan, WANG Ge-hui, WU Can, et al. (554)
Source Apportionment and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in PM _{2.5} in Changchun City, Autumn of 2017	ZHANG Yi-xuan, CAO Fang, ZHENG Han, et al. (564)
Heavy Pollution Characteristics and Assessment of PM _{2.5} Predicted Model Results in Beijing-Tianjin-Hebei Region and Surrounding Areas During November 23 to December 4, 2018	ZHU Yuan-yuan, GAO Yu-xiao, CHAI Wen-xuan, et al. (574)
Analysis of Characteristics and Meteorological Influence Factors of Ozone Pollution in Henan Province	QI Yan-jie, YU Shi-jie, YANG Jian, et al. (587)
Spatio-Temporal Distribution and Variation Characteristics of Aerosol Optical Properties in Henan Province	ZHANG Rui-fang, YU Xing-na (600)
Analysis of Water Soluble Organic Aerosol in Spring PM _{2.5} with Soot Particle Aerosol Mass Spectrometry (SP-AMS)	HUANG Wen-qian, CHEN Yan-tong, LI Xu-dong, et al. (609)
Temporal Evolution and Main Influencing Factors of Black Carbon Aerosol in Nanjing	YANG Xiao-min, SHI Shuang-shuang, ZHANG Chen, et al. (620)
Pollution Characteristics and Ozone Formation Potential of Ambient Volatile Organic Compounds(VOCs) in Summer and Autumn in Different Functional Zones of Lianyungang, China	QIAO Yue-zhen, CHEN Feng, LI Hui-peng, et al. (630)
Operation and Maintenance of Cost-Effective Volatile Organic Compounds Abatement Alternatives	QIANG Ning, SHI Tian-zhe, MIAO Hai-chao (638)
Pollution and Deposition Characteristics of Precipitation and Its Source Apportionment in Xi'an City	DING Cheng, YU Xing-na, HOU Si-yu (647)
Bacterial Diversity and Community Structure Antibiotic-resistant Bacteria in Bioaerosol of Animal Farms	SHA Yun-fei, SUN Xing-bin, XIN Wen-peng, et al. (656)
Vehicle Emission Inventory and Scenario Analysis in Liaoning from 2000 to 2030	JIN Jia-xin, SUN Shi-da, WANG Peng, et al. (665)
VOCs Emission Characteristics of DPF Regeneration in National VI Diesel Engine	QIAN Feng, XUE Chang-xin, XU Xiao-wei, et al. (674)
Characteristics and Significance of Stable Isotopes and Hydrochemistry in Surface Water and Groundwater in Nanxiaohogou Basin	GUO Ya-wen, TIAN Fu-qiang, HU Hong-chang, et al. (682)
Spatio-Temporal Distribution and Risk Assessment of Heavy Metals in Middle and Lower Reaches of Le'an River	YU Yang, LÜ Ya-ning, WANG Wei-jie, et al. (691)
Spatio-temporal Evolution and Relationship of Water Environment Quality and Phytoplankton Community in Wenyu River	ZHU Li-ying, CHEN Yuan-yuan, LIU Jing, et al. (702)
High-Frequency Dynamics of Water Quality and Phytoplankton Community in Inflowing River Mouth of Xin'anjiang Reservoir, China	DA Wen-yi, ZHU Guang-wei, LI Yun-xiang, et al. (713)
Phosphorus Storage Capacity and Loss Risk in Coastal Reed Wetland Surrounding Bohai Sea	SONG Jia-wei, XU Gang, ZHANG Yang, et al. (728)
Spatio-Temporal Variation of Release Flux of Sediment Nitrogen and Phosphorus in High-Risk Period of Algal Bloom in Lake Erhai	LIU Si-ru, ZHAO Ji-dong, XIAO Shang-bin, et al. (734)
Fluorescence Characteristics and Source Analysis of DOM in Snowfall of Xi'an	YANG Yi, HAN Li-yuan, LIU Huan-wu, et al. (743)
Performance Assessment of Permeable Interlocking Concrete Pavement Facility Structure	ZHANG Jia-wei, LIU Yong, JIN Jian-rong, et al. (750)
Photocatalytic Degradation of Rhodamine B with Micro-SiC/Graphene Composite Under Visible Light Irradiation	ZHU Hong-qing, YANG Bing, WEI Shi-qiang, et al. (756)
Removal of BPA and EE2 from Water by Mn-Fe Embedded in Acicular Mullite	ZHOU Qiu-hong, LONG Tian-yu, HE Jing, et al. (763)
Fabrication of La-MHTC Composites for Phosphate Removal; Adsorption Behavior and Mechanism	SONG Xiao-bao, HE Shi-ying, FENG Yan-fang, et al. (773)
Adsorption of Low-Concentration Phosphorus from Water by Composite Metal Modified Biochar	SUN Ting-ting, GAO Fei, LIN Li, et al. (784)
Phosphate Adsorption from Water on CaO ₂ -loaded Magnetic Diatomite	XU Chu-tian, LI Da-peng, ZHANG Shuai, et al. (792)
Phosphorus Forms and Release Risk of Sediments in Urban Sewage Treatment Plant Effluent and Receiving Stream Reach	TANG Ning, LI Ru-zhong, WANG Yu-qing, et al. (801)
Purification Characteristics of Urban Tail Water from Sewage Treatment Plant by Biofilm Ecological Floating Bed	ZHAO Zhi-rui, ZHANG Jia-yao, LI Duo, et al. (809)
Removal Performance of Antibiotic Resistance Genes and Heavy Metal Resistance Genes in Municipal Wastewater by Magnetic-Coagulation Process	YU Wen-chao, ZHENG Li-bing, WEI Yuan-song, et al. (815)
Effect of Tetracycline Antibiotic on Abundance and Transcriptional Expression Level of Tetracycline Resistance Genes in Activated Sludge	RUAN Xiao-hui, QIAN Ya-jie, XUE Gang, et al. (823)
Denitrification Process and N ₂ O Production Characteristics of Heterotrophic Nitrifying Bacterium <i>Pseudomonas aeruginosa</i> YL	YANG Lei, CUI Shen, REN Yong-xiang, et al. (831)
Environmental Factors Influence and Microbial Community Structure Analysis of Entrapped Anaerobic Ammonium Oxidizing Bacteria	WANG Xiao-tong, YANG Hong, SU Yang, et al. (839)
Research on Denitrification Performance of Enhanced Secondary Effluent by Embedded Denitrification Filler and Pilot Application	ZHOU Ya-kun, YANG Hong, WANG Shao-lun, et al. (849)
Temporal Anaerobic Effect on Aerobic Granular Sludge with Intermittent Influent-Intermittent Aeration	ZHANG Jie, WANG Yu-ying, LI Dong, et al. (856)
Simultaneous Short-Cut Nitrification-Denitrification Phosphorus Removal Granules Induced by Phosphorus Removal Granules	LI Dong, LIU Bo, WANG Wen-qi, et al. (867)
Spatial Distribution Characteristics and Pollution Assessment of Heavy Metals on Farmland of Geochemical Anomaly Area in Southwest Guangxi	WANG Fo-peng, XIAO Nai-chuan, ZHOU Lang, et al. (876)
Evaluation and Source of Heavy Metal Pollution in Surface Soil of Qinghai-Tibet Plateau	YANG An, WANG Yi-han, HU Jian, et al. (886)
Characteristics and Factors of Soil Enzyme Activity for Different Plant Communities in Yellow River Delta	MO Xue, CHEN Fei-jie, YOU Chong, et al. (895)
Effects of Management Measures on Soil Water-soluble Carbon and Nitrogen and Their Three-Dimensional Fluorescence Characteristics of <i>Pinus tabulaeformis</i> Plantations on Loess Plateau	SONG Ya-hui, ZHANG Jiao-xiang, LIU Hong-fei, et al. (905)
Effects of Biochar Input on Changes of Available Nutrient Elements in Riparian Soils with Different Landuse Types	ZHOU Hui-hua, YUAN Xu-yin, XIONG Yu-ting, et al. (914)
Effect of Applying Hydrochar for Reduction of Ammonia Volatilization and Mechanisms in Paddy Soil	YU Shan, XUE Li-hong, HUA Yun, et al. (922)
Effects of Mycorrhizal Fungi on Nitrification and Denitrification in the Rhizospheric Soil of Aquatic Plants and Its Microbial Mechanism	LIU Duo, WANG Lei, CAO Zhan-bo, et al. (932)
Comparison of Floating Chamber and Diffusion Model Methods for Measuring Methane Emissions from Inland Fish-Aquaculture Ponds	HU Tao, HUANG Jian, DING Ying, et al. (941)
Simultaneous Quantitative Detection of Thirteen Common Antibiotics in Leafy Vegetables by Ultra-High Performance Liquid Chromatography-Tandem Mass Spectrometry	CHEN Qian, LIU Yang, XIAO Li-jun, et al. (952)
Accumulation and Translocation of Cd in <i>Brassica rapa</i> Under the Influence of Selenium	YU Yao, LUO Li-yun, LIU Zhe, et al. (962)
Tolerance Mechanism and Cadmium Enrichment Abilities in Two <i>Brassica napus</i> L. Cultivars	BIAN Jian-lin, GUO Jun-mei, WANG Xue-dong, et al. (970)
Enhanced Phytoextraction of Cadmium Contaminated Soil by <i>Trifolium Repens</i> with Biodegradable Chelate GLDA	HE Yu-long, YU Jiang, XIE Shi-qian, et al. (979)
Heavy Metal Contents in Animal Manure in China and the Related Soil Accumulation Risks	MU Hong-yu, ZHUANG Zhong, LI Yan-ming, et al. (986)
Microbial Community Succession in Industrial Composting with Livestock Manure and Peach Branches and Relations with Environmental Factors	CAI Han-bing, FENG Wen-wen, DONG Yong-hua, et al. (997)
Degradation Characteristics of Antibiotics During Composting of Four Types of Feces	ZHU Wei-jing, ZHU Feng-xiang, WANG Wei-ping, et al. (1005)