

# 环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第12期

Vol.37 No.12

**2016**

中国科学院生态环境研究中心 主办  
科学出版社 出版



目次(卷终)

基于数值计算的细颗粒物采样管路传输损失评估 ..... 罗李娜,程真,朱雯斐,张强,楼晟荣,乔利平,晏乃强(4457)

南京北郊重金属气溶胶粒子来源分析 ..... 秦鑫,张泽锋,李艳伟,沈艳,赵姝慧(4467)

南京青奥会期间不同天气条件下大气气溶胶中水溶性离子的分布特征 ..... 师远哲,安俊琳,王红磊,邹嘉南,王俊秀(4475)

苏州市 PM<sub>2.5</sub> 中水溶性离子的季节变化及来源分析 ..... 王念飞,陈阳,郝庆菊,王欢博,杨复沫,赵晴,薄宇,贺克斌,姚玉刚(4482)

成都西南郊区春季 PM<sub>2.5</sub> 中元素特征及重金属潜在生态风险评价 ..... 杨怀金,杨德容,叶芝祥,张恒德,马学款,汤志亚,毛冬艳(4490)

泉州市大气降尘中稀土元素地球化学特征及来源解析 ..... 张棕巍,于瑞莲,胡恭任,胡起超,王晓明(4504)

青奥会期间基于δ<sup>13</sup>C观测的大气 CO<sub>2</sub> 来源解析 ..... 徐家平,李旭辉,肖薇,次仁旺姆,温学发,刘寿东,杜雪婷,曹畅(4514)

民航飞机起飞过程气态污染物排放特征分析 ..... 韩博,黄佳敏,魏志强(4524)

畜禽养殖场空气中可培养抗生素耐药菌污染特点研究 ..... 张兰河,贺雨伟,陈默,高敏,仇天雷,王旭明(4531)

有序介孔材料过滤脱除纳米颗粒物 ..... 邢奕,王骢,路培,李子宜,刘应书,于晗(4538)

基于 DOC + CDPF 技术的公交车燃用生物柴油气态物道路排放特性 ..... 楼狄明,张允华,谭丕强,胡志远(4545)

亚热带浅水池塘水-气界面甲烷通量特征 ..... 龙丽,肖尚斌,张成,张文丽,谢恒,李迎春,雷丹,穆晓辉,张军伟(4552)

浙江汤浦水库浮游植物季节演替及其影响因子分析 ..... 马沛明,施练东,张俊芳,胡菊香,赵先富(4560)

太湖典型沉水植物生理指标对水质的响应 ..... 高敏,胡维平,邓建才,胡春华(4570)

利用 UV-vis 及 EEMs 对比冬季完全混合下两个不同特征水库溶解性有机物的光学特性 ..... 黄廷林,方开凯,张春华,周石磊,曾明正,龙圣海,李扬,夏超,从海兵(4577)

三峡前置库汉丰湖试运行年水体水质现状及控制效果评估 ..... 杨兵,何丙辉,王德宝(4586)

太湖贡湖湾水域抗生素污染特征分析与生态风险评价 ..... 武旭跃,邹华,朱荣,王靖国(4596)

滇池不同湖区沉积物正构烷烃的分布特征及其环境意义 ..... 余丽燕,韩秀秀,黄晓虎,吴亚林,杨浩,黄涛,余艳红,黄昌春(4605)

洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性 ..... 王书锦,刘云根,王妍,侯磊,张超(4615)

蠡湖表层沉积物氮矿化过程及其赋存形态变化 ..... 赵丽,王书航,姜霞,黄晓峰,陈俊伊(4626)

三峡库区表层沉积物重金属含量时空变化特征及潜在生态风险变化趋势研究 ..... 卓海华,孙志伟,谭凌智,吴云丽,兰静(4633)

模拟巢湖流域氯菊酯的迁移转化和生态风险 ..... 刘亚莉,王继忠,彭书传,陈天虎(4644)

有机质胶体对卡马西平在多孔介质中迁移影响模拟实验 ..... 张思,何江涛,朱晓婧(4651)

无机型城市景观水体表观污染的悬浮颗粒物粒度分布特征:以中国运河苏州段为例 ..... 李倩倩,潘杨,贡丹燕,黄勇,夏侯刚(4662)

清水江流域岩石风化特征及其碳汇效应 ..... 吕婕梅,安艳玲,吴起鑫,吴永贵(4671)

南方典型农田区浅层地下水污染特征 ..... 郭卉,虞敏达,何小松,罗岳平(4680)

水化学和环境同位素在示踪枣庄市南部地下水硫酸盐污染源中的应用 ..... 马燕华,苏春利,刘伟江,朱亚鹏,李俊霞(4690)

粗放型绿色屋顶对多环芳烃的控制效果 ..... 沈庆然,侯娟,李田(4700)

超滤的预处理工艺对比研究:化学混凝与电絮凝 ..... 赵凯,杨春风,孙境求,李静,胡承志(4706)

QCM-D 与 AFM 联用解析 EfOM 在 SiO<sub>2</sub> 改性 PVDF 超滤膜表面的吸附机制 ..... 姜家良,王磊,黄丹曦,黄松,朱振亚,徐亚伟,李青青(4712)

群体感应淬灭菌的分离及其膜污染控制性能 ..... 赵畅,王文昭,徐期勇(4720)

水力负荷对生物沉淀池污染物净化性能的影响特性 ..... 王文东,马翠,刘荟,范银萍,刘国旗,张珂(4727)

外加微量 N<sub>2</sub>H<sub>4</sub> 下 SBR 中硝化微生物特性 ..... 肖芄颖,张代钧,卢培利(4734)

部分半硝化 AGS-SBR 工艺的启动及其种群结构分析 ..... 鲁航,信欣,管蕾,邹长武,余静(4741)

典型油田多环芳烃污染对土壤反硝化微生物群落结构的影响 ..... 姚炎红,王明霞,左小虎,李振轮,罗锋,周志峰(4750)

生物强化膜生物反应器(MBR)处理邻苯二甲酸二乙酯(DEP)效果及微生物群落结构分析 ..... 张可,关允,罗鸿兵,陈伟,陈佳,陈强(4760)

开闭路条件下沉积物微生物燃料电池阳极细菌群落差异解析 ..... 吴义诚,邓全鑫,王泽杰,郑越,李岱霖,赵峰(4768)

全氟辛酸(PFOA)厌氧生物可降解性 ..... 李飞,陈轶丹,周真明,廖晓斌,马红芳,苑宝玲(4773)

水肥用量对玉米季土壤 CO<sub>2</sub> 排放的综合影响 ..... 杨硕欢,张保成,王丽,胡田田(4780)

福建西部山地水土流失区土壤呼吸的空间异质性 ..... 姚雄,余坤勇,曾琪,杨玉洁,张今朝,刘健(4789)

基于不确定性分析的土壤-水稻系统镉污染综合风险评估 ..... 杨阳,陈卫平,李艳玲,王美娥,彭驰(4800)

北京市不同地区土壤中的球囊霉素荧光特征及其与土壤理化性质的关系 ..... 柴立伟,刘梦娇,蒋大林,樊灏,曹晓峰,黄艺(4806)

准东煤炭产业区周边土壤重金属污染与健康风险的空间分布特征 ..... 刘芳,塔西甫拉提·特依拜,依力亚斯江·努尔麦麦提,王楠,杨春,夏楠,高宇潇(4815)

河北平原潮土中微生物对氮降解特征 ..... 张灿灿,庞会从,高太忠,张静,李晓玉,付胜霞(4830)

砷-非对蜈蚣草根不同碳基团的影响 ..... 廖晓勇,龚雪刚,阎秀兰,马旭,吴泽赢(4841)

碱性固体对污泥的调质堆肥影响及产品对土壤的改良潜力 ..... 蔡函臻,宁西翠,王权,张增强,任秀娜,李荣华,王美净, Mukesh Kumar Awasthi(4848)

不同热解及来源生物炭对西北黄土吸附敌草隆的影响 ..... 孙航,蒋煜峰,石磊平,慕仲锋,展惠英(4857)

南丹矿业活动影响区人群头发中重金属含量特征 ..... 田美玲,钟雪梅,夏德尚,伏凤艳,陆素芬,李黎,宋波(4867)

Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) 复合氧化物制备及其除氟性能 ..... 汪爱河,周康根,刘行,陈泉州,刘芳(4874)

铁锰复合氧化物/壳聚糖珠:一种环境友好型除磷吸附剂 ..... 付军,范芳,李海宁,张高生(4882)

不同粒径垃圾焚烧飞灰重金属毒性浸出及生物可给性 ..... 王春峰,陈冠飞,朱艳臣,姚丹,皇晓晨,王连军(4891)

《环境科学》第37卷(2016年)总目录 ..... (4899)

《环境科学》征稿简则(4466) 《环境科学》征订启事(4699) 信息(4489,4881)

# 洱海入湖河口湿地干湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布特征及污染风险差异性

王书锦<sup>1</sup>, 刘云根<sup>1,2\*</sup>, 王妍<sup>1,2</sup>, 侯磊<sup>1,2</sup>, 张超<sup>3</sup>

(1. 西南林业大学环境科学与工程学院, 昆明 650224; 2. 西南林业大学农村污水处理研究所, 昆明 650224; 3. 西南林业大学林学院, 昆明 650224)

**摘要:** 以云南洱海罗时江河口湿地为典型对象, 利用柱状底泥分层采样器采集罗时江河口湿地表层(0~10 cm)、中层(10~30 cm)和底层(30~60 cm)沉积物样品, 分析干、湿季沉积物总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)垂向分布特征, 并对沉积物进行污染风险评价。结果表明: ①干季罗时江河口湿地表层、中层和底层沉积物 TN 平均含量分别为 1.734、1.453 和 1.255 g·kg<sup>-1</sup>, TP 平均值分别为 1.085、1.034 和 0.992 g·kg<sup>-1</sup>, OM 平均值分别为 59.051、47.730 和 42.133 g·kg<sup>-1</sup>; 湿季罗时江河口湿地表层、中层和底层沉积物 TN 平均含量分别为 1.147、0.948 和 0.895 g·kg<sup>-1</sup>, TP 平均值分别为 0.599、0.523 和 0.519 g·kg<sup>-1</sup>, OM 平均值分别为 53.098、46.897 和 43.395 g·kg<sup>-1</sup>; 干、湿季各指标含量垂向分布随沉积深度的增加呈下降趋势, 表层富集明显; 三层沉积物各指标含量均为干季高于湿季, 且除 OM 外, TN 和 TP 均达到显著差异( $P < 0.01$ )。②单因子指数(PI)、有机氮指数(ON)和有机磷指数(OI)评价结果表明, 整体上干季沉积物氮磷属于重度污染, 有机质属于中度污染; 湿季沉积物氮和有机质均为中度污染, 磷为轻度污染; 总体上沉积物氮、磷、有机质污染水平为干季高于湿季, 且干、湿季各污染指数均为表层最高, 中层次之, 底层最低, 表层污染最为严重。③干、湿季罗时江河口湿地污染来源存在差异, 干季以外源为主, 湿季以内源为主; 干季沉积物营养盐潜在释放风险较湿季大, 且以表层释放风险最大。

**关键词:** 洱海流域; 罗时江河口湿地; 沉积物氮、磷、有机质; 干、湿季垂向分布特征; 污染风险评价

中图分类号: X52; X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)12-4615-11 DOI: 10.13227/j.hjks.201605193

## Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons

WANG Shu-jin<sup>1</sup>, LIU Yun-gen<sup>1,2\*</sup>, WANG Yan<sup>1,2</sup>, HOU Lei<sup>1,2</sup>, ZHANG Chao<sup>3</sup>

(1. College of Environmental Science and Engineering, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 2. Research Institute of Rural Sewage Treatment, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China; 3. College of Forestry, Southwest Forestry University, Kunming 650224, China)

**Abstract:** The estuarine wetland of Luoshijiang River, which flows into Erhai Lake in Yunnan province, was regarded as the typical research object. Sediment samples in the estuarine wetland of Luoshijiang River were collected by the cylindrical sediment sampler and the samples were from surface layer (0-10cm), middle layer (10-30 cm), and bottom layer (30-60 cm). The vertical distribution of total nitrogen, total phosphorus, and total organic material in dry and rainy season was analyzed and contamination risk assessment of sediment was accomplished. The results showed that: ① In dry season, average concentrations of total nitrogen in sediment on surface, middle and bottom layer at estuarine wetland of Luoshijiang River were respectively 1.734, 1.453 and 1.255 g·kg<sup>-1</sup>, the average concentrations of total phosphorus were respectively 1.085, 1.034 and 0.992 g·kg<sup>-1</sup>, the average concentrations of organic material were respectively 59.051, 47.730 and 42.133 g·kg<sup>-1</sup>. In rainy season, average concentrations of total nitrogen in sediment on surface, middle and bottom layer at estuarine wetland of Luoshijiang River were respectively 1.147, 0.948 and 0.895 g·kg<sup>-1</sup>, the average concentrations of total phosphorus were respectively 0.599, 0.523 and 0.519 g·kg<sup>-1</sup>, the average concentrations of organic material were respectively 53.098, 46.897 and 43.395 g·kg<sup>-1</sup>. ② Single factor pollution index, organic nitrogen and organic index assessment were used to evaluate the contamination level of sediment, the assessment results showed that: In dry season, the contamination level of nitrogen and phosphorus in sediment was on severe level, organic material contamination was on medium level. In rainy season, the contamination levels of ON and OI were medium, and that of PI was mild. Generally, the contamination levels of nitrogen, phosphorus and organic material in sediment tendency were as follows: dry season > rainy season, and the pollution index of each layer followed the sequence of surface layer > middle layer > bottom layer, and the most extraordinary contamination of them on surface layer was uncovered whatever the season was. ③ Pollution origin of estuarine wetland of Luoshijiang River in dry and wet season

收稿日期: 2016-05-26; 修订日期: 2016-07-17

基金项目: 国家自然科学基金项目(51469030, 31560237, 31460195)

作者简介: 王书锦(1989~), 男, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生态修复, E-mail: haigui2018@163.com

\* 通讯联系人, E-mail: henryliu1008@163.com



had great differences, it was mainly the exogenous source in dry season, but it was the internal source in wet season; The potential risk of release of nutrient salt of sediment in dry season was higher than the wet, and the risk in the surface layer was the highest.

**Key words:** Erhai River basin; the estuarine wetland of Luoshijiang River; nitrogen, phosphorus and organic material in sediment; vertical distribution characteristics in dry and rainy season; pollution risk assessment

河口湿地对入湖河流污染物具有很好的截留、贮存和净化功能,对消减入湖污染负荷具有积极作用<sup>[1,2]</sup>. 云贵高原受东亚和南亚季风的共同影响,形成冬干、夏湿,干湿季节较为分明的区域降水季节特征. 这种独特的干湿季节使流域水文过程<sup>[3]</sup>、湿地植被适生性<sup>[4]</sup>、沉积物营养物质迁移转化<sup>[5,6]</sup>等发生明显变化. 当前,国内对沉积物营养物质空间分布、形态组成及转化机理之间的关系进行了研究,如赵海超等<sup>[7-9]</sup>对洱海沉积物氮、磷、有机质含量及其形态时空分布进行了研究,结果表明不同季节沉积物氮、磷、有机质含量空间分布存在差异,但总体呈表层富集明显;向速林等<sup>[10]</sup>研究了鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征,认为表层沉积物总磷主要由无机磷组成,且以 Fe-P 含量最高,垂向分布上总磷和各形态磷含量随沉积深度增加而降低;Smolders 等<sup>[11]</sup>和王圣瑞等<sup>[12]</sup>研究认为,氮在沉积物中以不同形态存在,其在地球化学循环中的作用有所不同;李如忠等<sup>[13]</sup>对沉积物中氮、磷、有机质的迁移规律、释放风险和生物有效性进行了研究,结果表明十五里河沉积物中各形态氮磷在纵向和垂直方向上表现出一定的规律性,且主要氮磷形态之间还具有显著的相关性,不同沉积深度生物有效性氮磷含量存在差异. 这些研究主要集中在平原湿地或湖泊沉积物,而对高原河口湿地干、湿季下沉积物营养盐的垂向分布特征及污染风险差异性的研究鲜见报道. 本文以高原洱海罗时江河口湿地为研究对象,分析了干、湿季不同沉积深度沉积物氮、磷、有机质的含量特征,并运用单因子指数、有机氮和有机指数法对沉积物营养盐进行污染风险评价,研究结果对罗时江河口湿地的保护及洱海富营养化防控具有重要意义.

## 1 材料与方 法

### 1.1 研究区概况

罗时江河口湿地是削减罗时江携带的农业面源污染物、保护洱海水质的最后屏障,该湿地位于洱海北部湖湾 (E 100° 05' 59.9" ~ 100° 06' 5.9", N 25° 56' 52.8" ~ 25° 57' 24.9"), 面积约 0.5 km<sup>2</sup>. 研究区属北亚热带高原季风气候区,光照充足,四季不明显,冬春干旱,夏秋多雨,雨季旱季分明,年均温度

为 15.6℃,年均降雨量约为 942 mm. 湿地西北和东北部分别有罗时江、黑泥沟携带大量的泥沙、氮磷污染物注入. 湿地内植被多为人工栽植的水生植物,其中挺水植物主要有:芦苇 (*Phragmites australis* (Cav.) Trin. ex Steud.)、荷花 (*Nillumbik nucifera* Gaertn.)、梭鱼草 (*Pontederia cordata* L.)、再力花 (*Thalia dealbata* Fraser ex Roscoe.)、香蒲 (*Typha orientalis* Presl.)、菰 (*Zizania latifolia* (Griseb.) Stapf.); 沉水植物主要有:金鱼藻 (*Ceratophyllum demersum* Linn.)、微齿眼子菜 (*Potamogeton maackianus* A. Bennett.)、黑藻 (*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle.); 浮叶植物主要有:睡莲 (*Nymphaea tetragona* Georgi.) 等.

### 1.2 样点布设

采用网格法布点(图 1),网格大小为 100 m × 100 m,去除无效网格(如整个网格中为小岛、或无水淹没区),罗时江河口湿地中共划分 45 个网格,在网格中心处取样,其中 23、28、30、31、33、34、35、36 号样点网格,由于网格被小岛分割,未在网格中心取样,根据地形条件及水流状况增加 1~2 个采

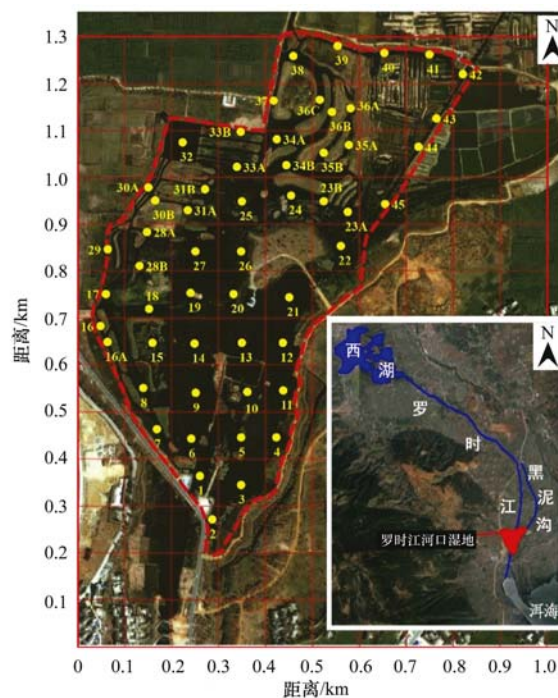


图 1 罗时江河口湿地区位及样点布置示意

Fig. 1 Locations of sediments sampling sites in estuarine wetland of Luoshijiang River

样点,增加后采样点共有 55 个。

### 1.3 样品采集与分析

采样时间分别为 2013 年 11 月 20 日(干季), 2014 年 6 月 20 日(湿季), 利用柱状底泥采样器自上而下分层取样, 其中表层为 0~10 cm、中层为 10~30 cm、底层为 30~60 cm, 分层取样后放入便携式冷恒温箱带回实验室分析沉积物中总氮(TN)、总磷(TP)、有机质(OM)含量。沉积物 TN、TP、OM 分析方法分别采用高氯酸-硫酸消化法(LY-T 1228-1999)、酸熔-钼锑抗比色法(LY/T 1232-1999)和重铬酸钾氧化-外加加热法(LY/T 1237-1999)。

数据分析采用 SPSS 19.0 和 Excel 2013, 空间分布图采用 Surfer 12.0 软件中的等值线功能绘制。

### 1.4 污染风险评价方法及标准

#### (1) 单因子指数法

单因子指数法常被用于评价污染物的污染状况, 本研究采用单因子指数法对罗时江河口湿地沉积物 TP 的污染状况进行评价, 计算公式如下<sup>[14]</sup>:

$$PI = C_i / C_s \quad (1)$$

式中, PI 为单项评价指数或标准指数, PI 大于 1 表明含量超过评价标准值;  $C_i$  为评价因子  $i$  的实测值,  $g \cdot kg^{-1}$ ;  $C_s$  为评价因子  $i$  的评价标准值,  $g \cdot kg^{-1}$ 。本研究采用 TP 的评价标准 ( $TP = 0.60 g \cdot kg^{-1}$ ), 与加拿大安略省环境和能源部发布的指南<sup>[15]</sup>中沉积物中能引起最低级别生态风险效应的 TP 的含量相一致。沉积物单因子指数评价标准见表 1。

表 1 沉积物单因子指数评价标准

Table 1 Evaluation standards of single factor index in sediments				
PI	PI < 0.5	0.5 ≤ PI < 1.0	1.0 ≤ PI < 1.5	PI ≥ 1.5
类型	清洁	轻度污染	中度污染	重度污染
等级	I	II	III	IV

#### (2) 有机指数及有机氮指数法

单因子指数法忽略了 OM 指标, 因此本研究用有机污染指数法对罗时江河口湿地沉积物污染现状进一步评价, 使评价结果更完善。有机指数法常被用于评价沉积物的营养状况, 而有机氮则是评价沉积物所受氮污染程度的重要指标。计算公式(2)~(4)和评价标准(表 2)如下<sup>[16-18]</sup>:

$$ON = TN(\%) \times 0.95 \quad (2)$$

$$OI = OC(\%) \times ON(\%) \quad (3)$$

$$OC = OM(\%) / 1.724 \quad (4)$$

式中, ON 为有机氮, %; OC 为有机碳, %; OI 为有机指数, 其中 TN 换算成质量分数形式, 即  $1.000$

$g \cdot kg^{-1} = 0.1\%$ 。

表 2 沉积物有机指数、有机氮评价标准

Table 2 Evaluation standards of organic index and organic nitrogen in sediments			
有机指数(OI)	有机氮(ON)%	污染程度	污染风险
OI < 0.05	ON < 0.033	清洁	I
0.05 ≤ OI < 0.2	0.033 ≤ ON < 0.066	较清洁	II
0.2 ≤ OI < 0.5	0.066 ≤ ON < 0.133	中度污染	III
OI ≥ 0.5	ON ≥ 0.133	重度污染	IV

## 2 结果与分析

### 2.1 干、湿季沉积物总氮垂向分布特征

由图 2 可知, 干季罗时江河口湿地表、中、底 3 层沉积物 TN 含量分别在 0.335~3.720、0.500~3.067 和 0.265~2.622  $g \cdot kg^{-1}$  之间, 平均值分别为 1.734、1.453 和 1.255  $g \cdot kg^{-1}$ 。55 个样点中有 75.93% 的样点沉积物 TN 含量随着沉积深度增加而减少, 各样点沉积物 TN 含量降幅在 1.00%~84.54% 之间, 平均降幅达 39.92%。

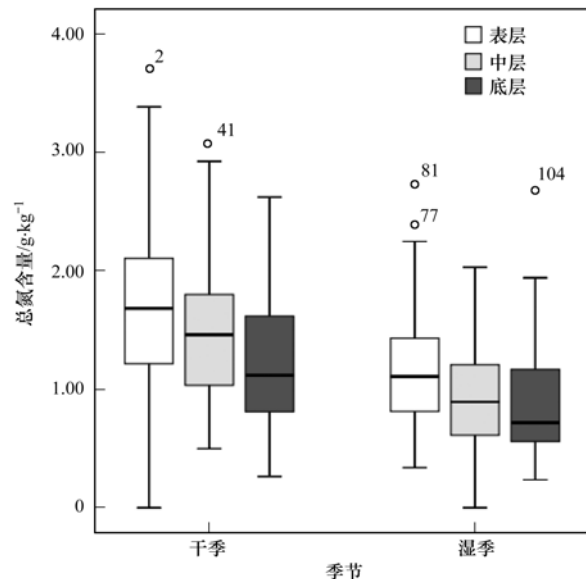


图 2 干、湿季沉积物 TN 含量垂向分布

Fig. 2 Vertical distribution of total nitrogen concentration in sediments of dry and wet seasons

湿季罗时江河口湿地表、中、底 3 层沉积物 TN 含量分别在 0.339~2.742、0.213~2.029 和 0.292~0.895  $g \cdot kg^{-1}$  之间, 平均值分别为 1.147、0.948 和 0.895  $g \cdot kg^{-1}$ 。55 个样点中有 70.8% 的样点沉积物 TN 含量以表层最高并向底层递减, 各样点上沉积物 TN 含量降幅在 8.5%~87.1% 之间, 平均降幅达 45.8%。

干、湿季罗时江河口湿地沉积物 TN 含量随着沉积深度增加而减少, 表层富集明显, 且各层沉积物 TN 含量为干季高于湿季 ( $P < 0.01$ , 见表 3)。

表 3 干、湿季各层沉积物 TN 方差分析

Table 3 Analysis of variance for total nitrogen in each layer of sediments in dry and wet seasons

独立样本 <i>T</i> 检验	<i>F</i>	Sig.	<i>t</i>	df	Sig. ( 双侧)	均值差值	标准误差值	
干湿季表层 TN	假设方差相等	3.129	0.080	4.659	104	0.000	0.565	0.121
	假设方差不相等			4.687	96.501	0.000	0.565	0.121
干湿季中层 TN	假设方差相等	4.346	0.040	4.676	103	0.000	0.510	0.109
	假设方差不相等			4.750	97.781	0.000	0.510	0.107
干湿季底层 TN	假设方差相等	1.750	0.189	3.522	101	0.001	0.381	0.108
	假设方差不相等			3.554	100.249	0.001	0.381	0.107

## 2.2 干、湿季沉积物总磷垂向分布特征

由图 3 可知,干季表层沉积物 TP 含量在 0.628 ~ 1.860  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 1.085  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 中层 TP 含量在 0.548 ~ 2.472  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 1.034  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 底层 TP 含量在 0.526 ~ 2.788  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 0.992  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 55 个样点中有 65.45% 的样点沉积物 TP 含量随着沉积深度增加而减少,各样点沉积物 TP 含量降幅在 3.64% ~ 53.28% 之间,平均降幅达 23.93%.

湿季表层沉积物 TP 含量在 0.170 ~ 1.371  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 0.589  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 中层 TP 含量在 0.213 ~ 1.047  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 0.513  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ ; 底层 TP 含量在 0.292 ~ 0.789  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值为 0.511  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 55 个样点中有 59.18% 的样点沉积物 TP 含量以表层最高并向底层递减,各样点上沉积物 TP 含量降幅在 3.3% ~ 71.1% 之间,平均降幅达 33.2%.

与 TN 分布规律一致,罗时江河口湿地各层沉积物 TP 含量为干季大于湿季 ( $P < 0.01$ , 见表 4),

表 4 干、湿季各层沉积物 TP 方差分析

Table 4 Analysis of variance for total phosphorus in each layer of sediments in dry and wet seasons

独立样本 <i>T</i> 检验	<i>F</i>	Sig.	<i>t</i>	df	Sig. ( 双侧)	均值差值	标准误差值	
干湿季表层 TP	假设方差相等	0.274	0.602	10.570	106	0.000	0.496	0.047
	假设方差不相等			10.560	105.171	0.000	0.496	0.047
干湿季中层 TP	假设方差相等	15.998	0.000	10.635	105	0.000	0.521	0.049
	假设方差不相等			10.841	74.902	0.000	0.521	0.048
干湿季底层 TP	假设方差相等	8.652	0.004	8.841	102	0.000	0.481	0.054
	假设方差不相等			9.219	72.919	0.000	0.481	0.052

## 2.3 干、湿季沉积物有机质垂向分布特征

由图 4 可知,干季罗时江河口湿地表、中、底 3 层沉积物 OM 含量分别在 17.947 ~ 233.493、2.615 ~ 166.008 和 10.043 ~ 115.757  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值分别为 59.051、47.730 和 42.133  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 55 个样点中有 66.67% 的样点沉积物 OM 含量随着沉积深度增加而减少,各样点沉积物 OM 含量降幅在

垂向分布以表层含量最高,中层次之,底层最低.

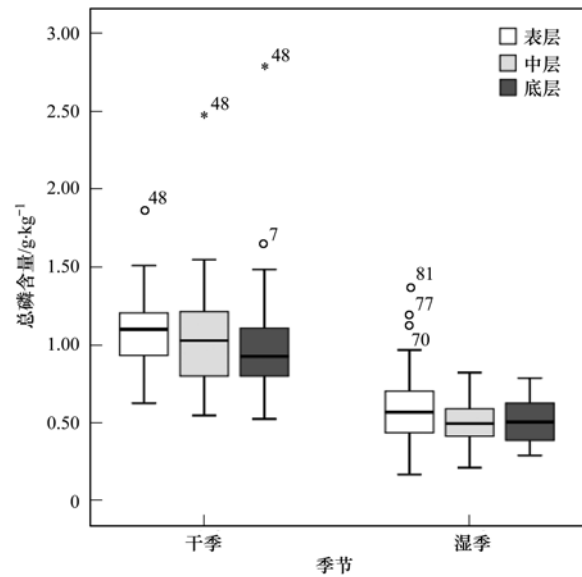


图 3 干、湿季沉积物 TP 含量垂向分布

Fig. 3 Vertical distribution of total phosphorus concentration in sediments of dry and wet seasons

1.41% ~ 88.79% 之间,平均降幅达 44.1%.

湿季罗时江河口湿地表、中、底 3 层沉积物 OM 含量分别在 8.199 ~ 98.962、11.944 ~ 232.678 和 10.049 ~ 159.800  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$  之间,平均值分别为 53.098、46.897 和 43.395  $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ . 55 个样点中有 79.17% 的样点沉积物 OM 含量以表层最高并向底层递减,各样点上沉积物 OM 含量降幅在 0.2% ~

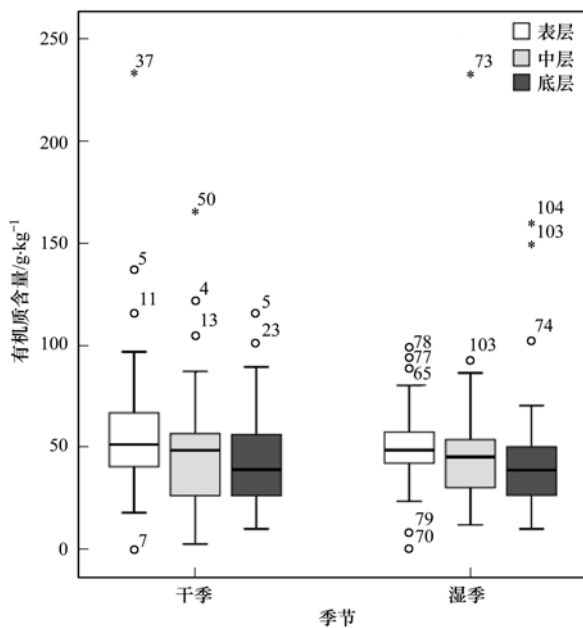


图 4 干、湿季沉积物 OM 含量垂向分布

Fig. 4 Vertical distribution of total organic matter concentration in sediments of dry and wet seasons

表 5 干、湿季各层沉积物 OM 方差分析

Table 5 Analysis of variance for organic matter in each layer of sediments in dry and wet seasons

独立样本 T 检验		F	Sig.	t	df	Sig. (双侧)	均值差值	标准误差值
干湿季表层 OM	假设方差相等	5.173	0.025	1.142	105	0.256	5.953	5.212
	假设方差不相等			1.148	79.953	0.254	5.953	5.184
干湿季中层 OM	假设方差相等	0.046	0.831	0.143	106	0.887	0.833	5.846
	假设方差不相等			0.142	103.395	0.887	0.833	5.860
干湿季底层 OM	假设方差相等	0.277	0.600	-0.258	101	0.797	-1.261	4.886
	假设方差不相等			-0.254	87.553	0.800	-1.26	4.958

表 6 干、湿季沉积物单因子指数评价结果

Table 6 Result of single factor index evaluation in sediments of dry and wet seasons

分层	干季 PI						湿季 PI					
	最小值	最大值	平均值	标准误差	污染程度	污染风险	最小值	最大值	平均值	标准误差	污染程度	污染风险
表层	1.047	3.100	1.809	0.053	重度污染	IV	0.283	2.285	0.946	0.057	轻度污染	II
中层	0.913	4.120	1.723	0.073	重度污染	IV	0.354	1.745	0.808	0.033	轻度污染	II
底层	0.877	4.647	1.654	0.080	重度污染	IV	0.487	1.315	0.759	0.040	轻度污染	II

(见图 5)。综上所述,各层沉积物污染风险从高到低依次为表层、中层、底层,且干季污染风险较高。

#### (2) 干、湿季有机氮(ON)指数评价结果

根据表 7 可知,干季罗时江河口湿地 3 层沉积物 ON 在 0.025 ~ 0.353 之间,平均值分别为 0.178、0.140 和 0.119;湿季 3 层沉积物 ON 在 0.020 ~ 0.260 之间,平均值分别为 0.111、0.091 和 0.084。总体上,各层沉积物 ON 为干季高于湿季 ( $P < 0.01$ ),干季介于中度污染和重度污染之间,污染风险达到 III ~ IV 级,湿季属于中度污染,污染风险达到 III 级。与 PI 评价结果一致,干、湿季 3 层沉积物 ON

72.7% 之间,平均降幅达 34.0%。

与氮磷的规律一致,干、湿季罗时江河口湿地 3 层沉积物 OM 垂向分布均为表层 > 中层 > 底层,但干、湿季各层沉积物 OM 含量无显著性差异(见表 5)。

#### 2.4 沉积物氮、磷、有机质污染风险差异性

##### (1) 干、湿季单因子(PI)指数评价结果

采用公式(1)~(4)对干、湿季罗时江河口湿地沉积物表、中和底层氮、磷、有机质进行评价,结果如表 6~8 和图 5~7 所示。

根据表 6 可知,干季罗时江河口湿地 3 层沉积物 PI 在 0.877 ~ 4.647 之间,平均值分别为 1.809、1.723 和 1.654;湿季 3 层沉积物 PI 在 0.283 ~ 2.285 之间,平均值分别为 0.946、0.808 和 0.759。总体上,各层沉积物 PI 为干季高于湿季 ( $P < 0.01$ ),干季属于重度污染,污染风险达到 IV 级,湿季属于轻度污染,污染风险达到 II 级。此外,干季和湿季 3 层沉积物 PI 均呈表层 > 中层 > 底层的趋势

亦呈表层 > 中层 > 底层的趋势(见图 6),且以干季表层 ON 污染指数最高。

##### (3) 干、湿季有机指数(OI)评价结果

由表 8 可知,干季罗时江河口湿地 3 层沉积物 OI 在 0.015 ~ 1.878 之间,平均值分别为 0.613、0.424 和 0.308;湿季 3 层沉积物 OI 在 0.013 ~ 2.360 之间,平均值分别为 0.344、0.273 和 0.055。总体上,沉积物 OI 为干季高于湿季,且除底层外,表层和中层差异性显著 ( $P < 0.01$ ),干季介于中度污染和重度污染之间,污染风险达到 III ~ IV 级,湿季属于中度污染,污染风险达到 III 级。与 PI、ON 评价结

果一致,干季和湿季三层沉积物 ON 亦呈表层 > 中层 > 底层的趋势(图 7).

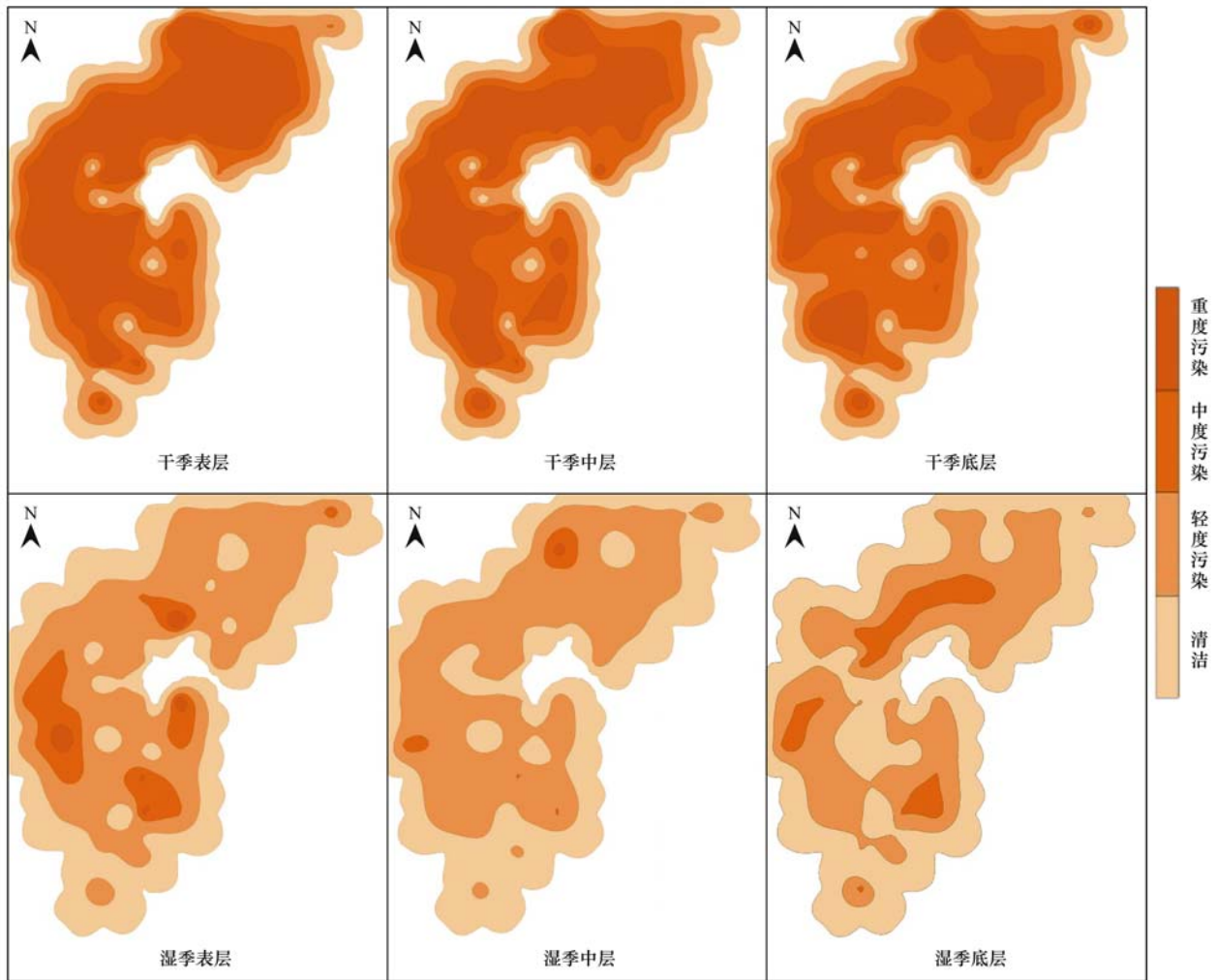


图 5 干、湿季三层沉积物 PI 指数分布

Fig. 5 Distribution of single factor index in sediments of dry and wet seasons

表 7 干、湿季沉积物有机氮指数评价结果

Table 7 Result of organic nitrogen evaluation in sediments of dry and wet seasons

分层	干季 ON						湿季 ON					
	最小值	最大值	平均值	标准误差	类型	污染风险	最小值	最大值	平均值	标准误差	污染程度	污染风险
表层	0.032	0.353	0.178	0.011	重度污染	IV	0.032	0.260	0.111	0.007	中度污染	III
中层	0.047	0.278	0.140	0.009	重度污染	IV	0.020	0.193	0.091	0.006	中度污染	III
底层	0.025	0.249	0.119	0.009	中度污染	III	0.022	0.255	0.084	0.007	中度污染	III

表 8 干、湿季沉积物 OI 评价结果

Table 8 Result of organic index evaluation in sediments of dry and wet seasons

分层	干季 OI						湿季 OI					
	最小值	最大值	平均值	标准误差	类型	污染风险	最小值	最大值	平均值	标准误差	污染程度	污染风险
表层	0.064	1.837	0.613	0.063	重度污染	IV	0.017	1.298	0.344	0.035	中度污染	III
中层	0.015	1.878	0.424	0.059	中度污染	III	0.029	1.214	0.273	0.037	中度污染	III
底层	0.047	1.673	0.308	0.048	中度污染	III	0.013	2.360	0.253	0.055	中度污染	III



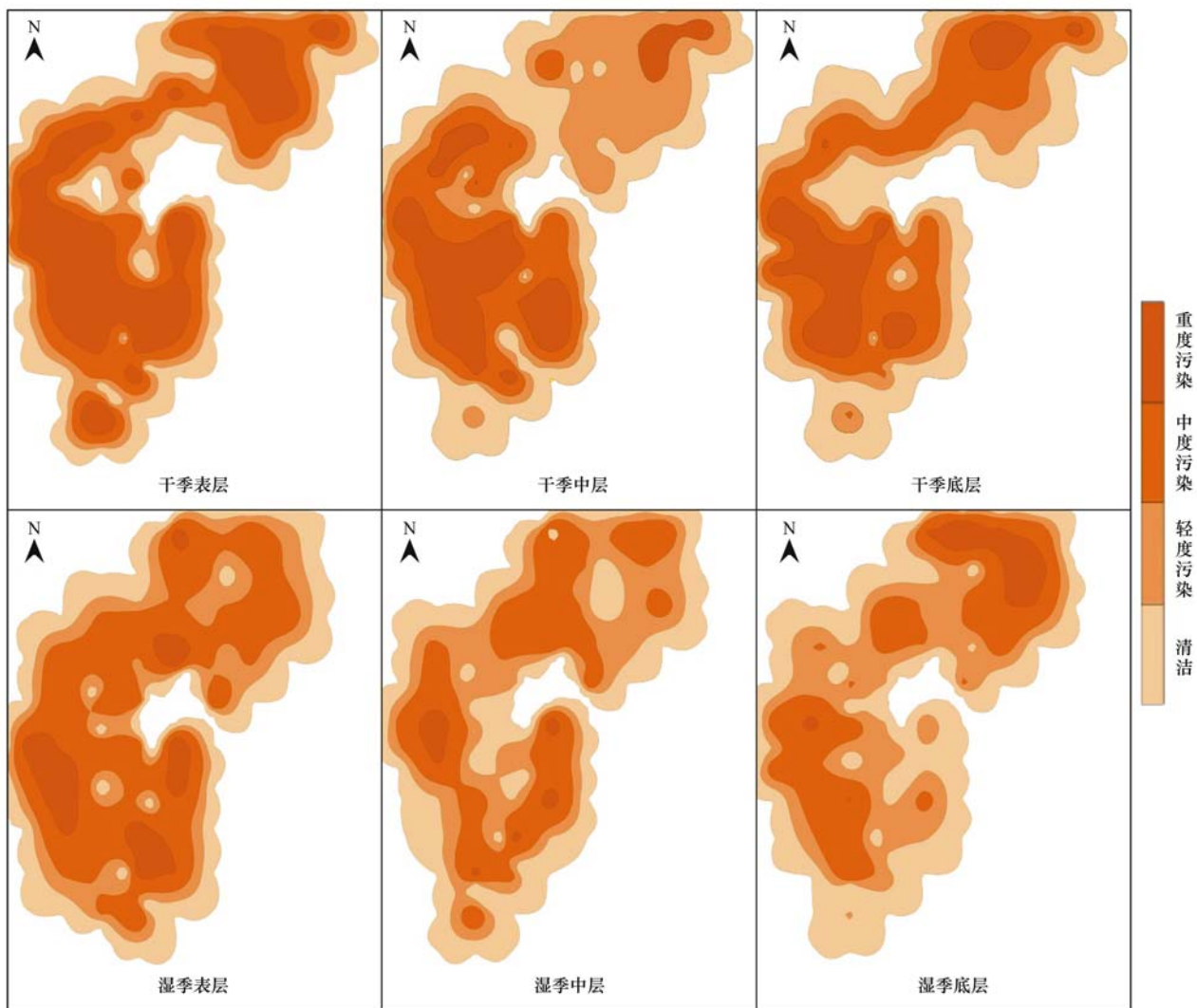


图 6 干、湿季三层沉积物 ON 指数分布

Fig. 6 Distribution of organic nitrogen in sediments of dry and wet seasons

### 3 讨论

沉积物氮、磷、有机质时空分布主要受外源输入、沉积环境、人为因素、水动力条件及污染状况等影响<sup>[19]</sup>。罗时江河口湿地干、湿季沉积物氮、磷、有机质垂向分布差异性,反映了罗时江河口湿地干、湿季外源输入、沉积环境、水动力条件及氮、磷、有机质污染来源各异。

OM 主要来源于流域内生物残体的迁移和湿地内水生动植物残体的沉积,有机残体经过湿地生物的分解及矿化,不断与水体发生交换,逐步沉积和埋藏于沉积物中<sup>[20]</sup>。湿地沉积物 C/N 是 OM 来源的有效指示指标,OM 的来源不同,C/N 比值也具有明显差异<sup>[21-23]</sup>。一般认为,当 C/N > 10 时,沉积物 OM 以外源为主,C/N < 10 时,以内源 OM 为主,C/N ≈ 10 时,外源与内源 OM 基本达到平衡状态<sup>[24,25]</sup>。

不同的生物种类 C/N 的比值也存在差异性,高等植物 C/N 为 14 ~ 23,水生生物为 2.8 ~ 3.4,而浮游动植物为 6 ~ 13,藻类为 5 ~ 14<sup>[26]</sup>。

由表 9 可知,干季罗时江河口湿地表层沉积物 C/N 值在 1.236 ~ 9.803 之间,平均值为 3.276,31.6% 的比值介于 5 ~ 14 之间,26.3% 的比值介于 2.8 ~ 3.4 之间;湿季罗时江河口湿地表层沉积物 C/N 值在 1.590 ~ 15.960 之间,平均值为 5.335,61.2% 的比值介于 5 ~ 14 之间,30.6% 的比值介于 2.8 ~ 3.4 之间。综上所述,表明干、湿季罗时江河口湿地表层沉积物 OM 主要受内源影响,且以藻类及浮游动植物为主。湿季某些点位的 C/N 值大于 10,则说明该区域可能受到外源 OM 进入水体后不能迅速分解氧化而造成的影响。而罗时江河口湿地沉积物 OM 的垂直分布情况可能与湿地中植物枯萎死亡后在沉积物中的长期累积有关,也有可能与

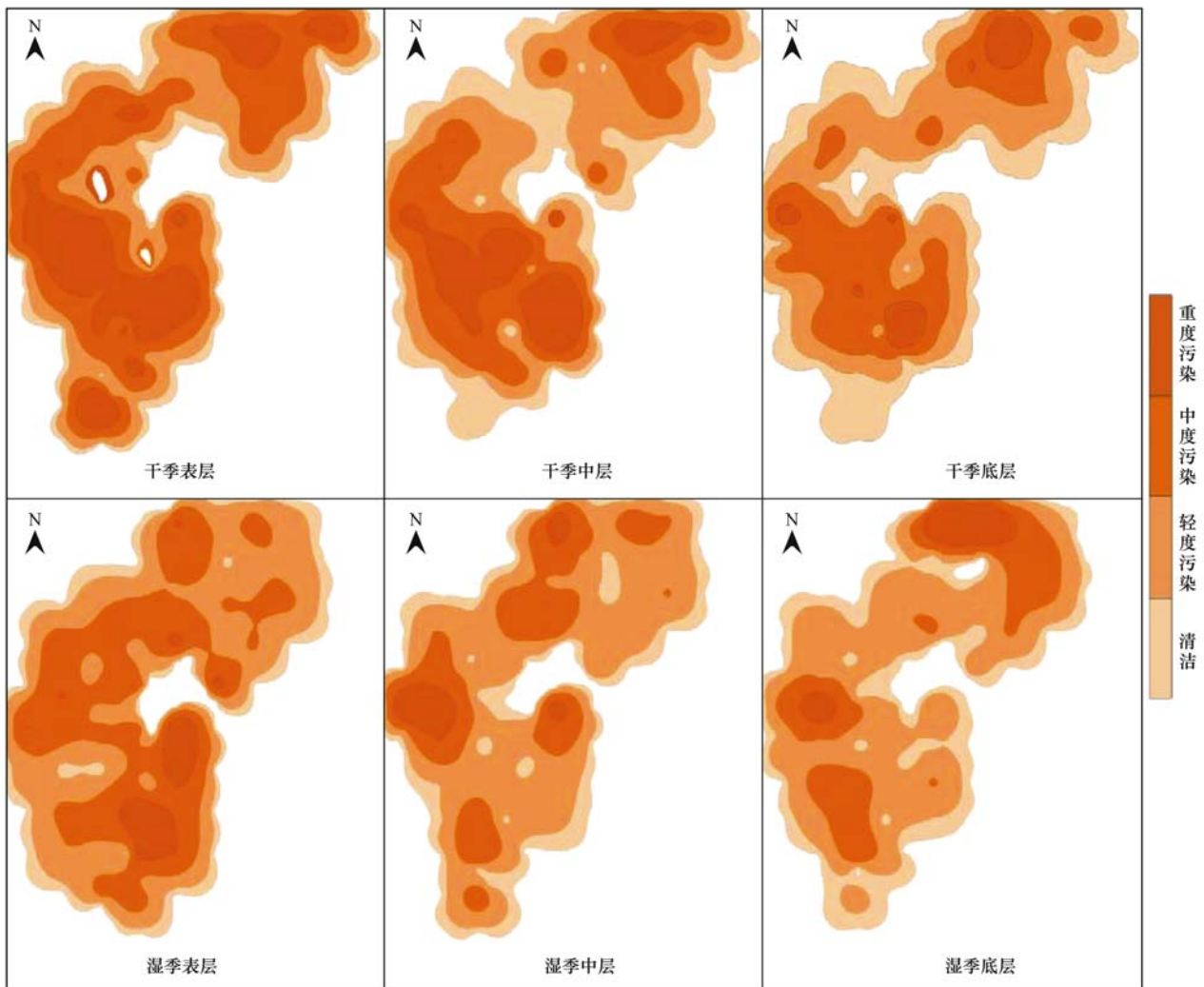


图7 干、湿季三层沉积物 OI 指数分布

Fig. 7 Distribution of organic index in sediments of dry and wet seasons

OM 自身特点有关, 沉积物中的 OM 在微生物作用下, 不断发生矿化分解, 尤其是其中的 TOC, 在甲烷菌的作用下, 转化为  $\text{CO}_2$  释放到大气中<sup>[24]</sup>, 导致了 OM 在垂向上呈逐渐降低的趋势。

表9 干、湿季表层沉积物 C/N 比值

Table 9 Ratio of C/N in the surface layer sediment of dry and wet seasons

季节	最小值	最大值	平均值
干季	1.236	9.803	3.276
湿季	1.590	15.960	5.335

罗时江河口湿地干、湿季 3 层沉积物 TN、TP 和 OM 相关性如表 10 所示。干季沉积物 TN 和 OM 呈显著相关, 而到了湿季呈极显著正相关, 这表明罗时江河口湿地沉积物中 TN 与 OM 之间具有同源性。干季沉积物 TP 与 TN、OM 均无相关性, 到了湿季表层沉积物 TP 和 TN、TP 和 OM 均呈极显著正相

关, 表明干、湿季罗时江河口湿地沉积物中氮磷污染来源存在差异性, TN 和 TP 主要受外源影响, OM 主要受内源影响, 且湿季以外源为主, 干季以内源为主。

罗时江流域以面源污染为主, 农业面源已成为该流域的主要污染源<sup>[27]</sup>。而大蒜种植是造成该流域农业面源污染的主要原因<sup>[28]</sup>。资料显示干季大理地区大蒜和玉米等作物种植面积广、需肥量大且养分盈余量高<sup>[29]</sup>, 随着湿季雨季的到来, 含氮磷化肥在土壤中随着大雨冲刷地表径流汇入河道最终进入湿地, 因此湿季表层沉积物 TP 和 TN、TP 和 OM 均呈极显著正相关。罗时江河口湿地沉积物 TN 和 TP 含量均为干季显著高于湿季, 一定程度上也反映了罗时江河口湿地受内源污染的影响较外源大。

有研究显示氮磷在表层沉积物富集的现象, 主要是由于近年来外源污染输入增加<sup>[30,31]</sup>, 而另有学

表 10 干、湿季各层沉积物氮、磷和有机质相关性分析<sup>1)</sup>

Table 10 Correlations of TN, TP and OM in the each layer of sediments in dry and wet seasons

		干季			湿季		
		TN	TP	OM	TN	TP	OM
表层	TN	1			1		
	TP	-0.03	1		0.714 **	1	
	OM	0.171 *	-0.122	1	0.248 **	0.318 **	1
中层	TN	1			1		
	TP	-0.123	1		-0.205	1	
	OM	0.184 *	-0.149	1	0.286 **	0.054	1
底层	TN	1			1		
	TP	0.058	1		-0.096	1	
	OM	0.187 *	-0.015	1	0.220 **	-0.133	1

1) \*\* 表示相关性极显著(样本数  $n=55$ , 显著性水平  $P<0.01$ ); \* 表示相关性显著(样本数  $n=55$ , 显著性水平  $P<0.05$ )

者认为这种现象还有可能是由于氮磷在生物地球化学作用下迁移至沉积物表层所致<sup>[32]</sup>。罗时江河口湿地氮磷在表层富集的现象说明近年来罗时江河口湿地沉积物中氮磷含量有明显增加趋势,可能的原因是由于近年来流域内农业和旅游业的发展,农村及农业面源污染物输入量增加<sup>[33]</sup>,从而使得大量的氮磷物质向沉积物表层沉积;此外,随着沉积深度增加,生物对有机质矿化作用释放的氮素逐渐减弱<sup>[34]</sup>,且表层以下厌氧环境使得磷从沉积物中释放至上覆水体<sup>[35]</sup>,最终导致沉积物氮磷含量随沉积深度增加而减少。这与翟继红等<sup>[36]</sup>和岳维忠等<sup>[37]</sup>关于平原河口湿地底泥氮磷分布特征的研究类似。

PI、ON 和 OI 的评价结果较为一致,即干季罗时江河口湿地沉积物的评价指数较高,湿季较低。总体趋势为干季污染程度较重,湿季污染程度较轻,且干、湿季均以表层污染程度最高,底层最低。与太湖流域<sup>[38]</sup>和西溪湿地<sup>[39]</sup>沉积物相比,罗时江河口湿地营养盐污染处于较高水平。

沉积物是湿地氮磷营养盐的蓄积库<sup>[40]</sup>,在外源得到控制后,沉积物氮磷释放将逐渐成为水体富营养化控制的重点,尤其是对潜水湿地而言。虽然不是所有形态的氮磷都能释放至水体,但是沉积物 TN 和 TP 形态代表氮磷素在沉积物中的污染程度以及潜在的释放风险<sup>[41]</sup>。罗时江河口湿地沉积物 PI、ON 指数呈干季大于湿季,且表层污染最为严重。据现场调查,干季研究区风力较大,在风力作用下易引起沉积物扰动使得沉积物处于再悬浮状态<sup>[42]</sup>,有助于营养盐的释放或者再生。此外,OM 对氮磷释放具有重要的影响。如王圣瑞等<sup>[43]</sup>和易文利<sup>[44]</sup>研究认为有机污染较重的情况下,沉积物氮磷素释放量变化幅度大于污染较轻的沉积物。由此可以推断,干

季罗时江河口湿地沉积物氮磷的潜在释放风险较大,尤其是表层沉积物,更易对水体造成二次污染。

#### 4 结论

(1)干、湿季罗时江河口湿地沉积物氮、磷、有机质含量存在差异,各指标含量为干季大于湿季,除 OM 外,TN 和 TP 均存在显著性差异( $P<0.01$ );干、湿季沉积物营养盐垂向分布规律一致,即以表层富集明显,且营养盐含量随沉积深度增加而降低。罗时江河口湿地沉积物 TN 和 TP 主要受湿季外源影响,OM 主要受干季内源影响。

(2)运用单因子指数法、有机氮指数法和有机指数法对干、湿季沉积物氮、磷、有机质污染状况进行评价,干季 3 层沉积物磷污染均为重度污染;氮污染除底层为中度污染外,表层和中层均为重度污染;有机污染除表层属于重度污染外,中层和底层均为中度污染。湿季三层沉积物除磷属于轻度污染,氮和有机污染均为中度污染。总体而言,罗时江河口湿地沉积物营养盐干季污染水平较湿季高,且干、湿季均以表层污染风险最高,底层最低。

#### 参考文献:

- [1] 李如忠,丁丰. 巢湖主要入湖河口湿地植被生态学特征分析—以派河和十五里河为例[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2009, 17(1): 80-84.  
Li R Z, Ding F. Mainly estuarine wetland vegetation analysis of ecological characteristics of the rivers into the Chaohu Lake—as pai river and Shiwuli river for an example[J]. Journal of Anhui Institute of Architecture & Industry (Natural Science), 2009, 17(1): 80-84.
- [2] Hu L M, Hu W P, Deng J C, et al. Nutrient removal in wetlands with different macrophyte structures in eastern Lake Taihu, China [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(12): 1725-1732.
- [3] 陈力,段唯鑫. 三峡蓄水后库区洪水波传播规律初步分析[J]. 水文, 2014, 34(1): 30-34.  
Chen L, Duan W X. Preliminary analysis of flood wave routing in

- three gorges reservoir area [J]. *Journal of China Hydrology*, 2014, **34**(1): 30-34.
- [ 4 ] Pan K, Wang W X. Trace metal contamination in estuarine and coastal environments in China [J]. *Science of the Total Environment*, 2012, **421-422**: 3-16.
- [ 5 ] Vane C H, Harrison I, Kim A W, *et al.* Organic and metal contamination in surface mangrove sediments of South China [J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2009, **58**(1): 134-144.
- [ 6 ] Qiu Y W, Lin D, Liu J Q, *et al.* Bioaccumulation of trace metals in farmed fish from South China and potential risk assessment [J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, **74**(3): 284-293.
- [ 7 ] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物中不同形态磷的时空分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 227-234. Zhao H C, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of temporal and spatial distribution of different forms of phosphorus in the sediments of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 227-234.
- [ 8 ] 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.
- [ 9 ] 赵海超, 王圣瑞, 焦立新, 等. 洱海沉积物有机质及其组分空间分布特征 [J]. *环境科学研究*, 2013, **26**(3): 243-249. Zhao H C, Wang S R, Jiao L X, *et al.* Characteristics of composition and spatial distribution of organic matter in the sediment of Erhai Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2013, **26**(3): 243-249.
- [ 10 ] 向速林, 周文斌. 鄱阳湖沉积物中磷的赋存形态及分布特征 [J]. *湖泊科学*, 2010, **22**(5): 649-654. Xiang S L, Zhou W B. Phosphorus existing forms and distribution characteristic in Lake Poyang sediments [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2010, **22**(5): 649-654.
- [ 11 ] Smolders A J P, Lamers L P M, Lucassen E C H E T, *et al.* Internal eutrophication: how it works and what to do about it—a review [J]. *Chemistry and Ecology*, 2006, **22**(2): 93-111.
- [ 12 ] 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. Wang S R, Jiao L X, Jin X C, *et al.* Distribution of total, exchangeable and fixed nitrogen in the sediments from shallow lakes in the middle and lower reaches of the Yangtze River [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2008, **28**(1): 37-43.
- [ 13 ] 李如忠, 李峰, 周爱佳, 等. 巢湖十五里河沉积物氮磷形态分布及生物有效性 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(5): 1503-1510. Li R Z, Li F, Zhou A J, *et al.* Distribution and bioavailability of nitrogen and phosphorus species in the sediments from Shiwuli Stream in Lake Chaohu [J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2012, **33**(5): 1503-1510.
- [ 14 ] 邱祖凯, 胡小贞, 姚程, 等. 山美水库沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 [J]. *环境科学*, 2016, **37**(4): 1389-1396. Qiu Z K, Hu X Z, Yao C, *et al.* Pollution characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in sediments of Shanmei Reservoir in Fujian, China [J]. *Environmental Science*, 2016, **37**(4): 1389-1396.
- [ 15 ] Leivuori M, Niemistö L. Sedimentation of trace metals in the Gulf of Bothnia [J]. *Chemosphere*, 1995, **31**(8): 3839-3856.
- [ 16 ] 隋桂荣. 太湖表层沉积物中 OM、TN、TP 的现状与评价 [J]. *湖泊科学*, 1996, **8**(4): 319-324. Sui G R. Statement and evaluation of organic matter, total nitrogen and total phosphate in surface layer sediments in Taihu Lake [J]. *Journal of Lake Sciences*, 1996, **8**(4): 319-324.
- [ 17 ] 孙顺才, 黄漪平. 太湖 [M]. 北京: 海洋出版社, 1993. 224-228. Sun S C, Huang Y P. Taihu [M]. Beijing: Maritime Press, 1993. 224-228.
- [ 18 ] 王永华, 钱少猛, 徐南妮, 等. 巢湖东区底泥污染物分布特征及评价 [J]. *环境科学研究*, 2004, **17**(6): 22-26. Wang Y H, Qian S M, Xu N N, *et al.* Characteristics of distribution of pollutants and evaluation in sediment in the east area of Chaohu Lake [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2004, **17**(6): 22-26.
- [ 19 ] 卢少勇, 许梦爽, 金相灿, 等. 长寿湖表层沉积物氮磷和有机质污染特征及评价 [J]. *环境科学*, 2012, **33**(2): 393-398. Lu S Y, Xu M S, Jin X C, *et al.* Pollution Characteristics and evaluation of nitrogen, phosphorus and organic matter in surface sediments of lake Changshouhu in Chongqing, China [J]. *Environmental Science*, 2012, **33**(2): 393-398.
- [ 20 ] 沈丽丽, 何江, 吕昌伟, 等. 哈素海沉积物中氮和有机质的分布特征 [J]. *沉积学报*, 2010, **28**(1): 158-165. Shen L L, He J, Lü C W, *et al.* Distribution characteristics of nitrogen and organic matter in sediments of the Hasuhai Lake [J]. *Acta Sedimentologica Sinica*, 2010, **28**(1): 158-165.
- [ 21 ] 张晓晶, 李畅游, 张生, 等. 乌梁素海表层沉积物营养盐的分布特征及环境意义 [J]. *农业环境科学学报*, 2010, **29**(9): 1770-1776. Zhang X J, Li C Y, Zhang S, *et al.* Distribution analysis of nutrient Salt in the sediment of Lake Wulangsuhai with respect to Its effects on the environment [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, **29**(9): 1770-1776.
- [ 22 ] 余辉, 张文斌, 卢少勇, 等. 洪泽湖表层底质营养盐的形态分布特征与评价 [J]. *环境科学*, 2010, **31**(4): 961-968. Yu H, Zhang W B, Lu S Y, *et al.* Spatial distribution characteristics of surface sediments nutrients in Lake Hongze and their pollution status evaluation [J]. *Environmental Science*, 2010, **31**(4): 961-968.
- [ 23 ] 邢建伟, 钱薇薇, 绳秀珍. 2012 年夏季长江口颗粒有机碳、氮分布特征及其来源 [J]. *环境科学*, 2014, **35**(7): 2520-2527. Xing J W, Xian W W, Sheng X Z. Distribution and source of particulate organic carbon and particulate nitrogen in the Yangtze River estuary in summer 2012 [J]. *Environmental Science*, 2014, **35**(7): 2520-2527.
- [ 24 ] 冯峰, 王辉, 方涛, 等. 东湖沉积物中微生物量与碳、氮、磷的相关性 [J]. *中国环境科学*, 2006, **26**(3): 342-345. Feng F, Wang H, Fang T, *et al.* The correlation between microbial biomass and carbon, nitrogen, phosphorus in the sediments of Lake Donghu [J]. *China Environmental Science*, 2006, **26**(3): 342-345.

- [25] Krishnamurthy R V, Bhattacharya S K, Kusumgar S. Palaeoclimatic changes deduced from  $^{13}\text{C}/^{12}\text{C}$  and C/N ratios of Karewa Lake sediments, India[J]. *Nature*, 1986, **323**(6084): 150-152.
- [26] 蔡金榜, 李文奇, 刘娜, 等. 洋河水库底泥污染特性研究[J]. *农业环境科学学报*, 2007, **26**(3): 886-893.  
Cai J B, Li W Q, Liu N, *et al.* Characteristics of contaminated sediments in Yanghe reservoir[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, **26**(3): 886-893.
- [27] 封吉猛, 王欣泽, 林燕, 等. 洱海流域北部入湖河流污染特征分析[J]. *净水技术*, 2013, **32**(5): 11-15.  
Feng J M, Wang X Z, Lin Y, *et al.* Analysis of water pollution characteristics of inflowing rivers into north of Erhai Lake Basin [J]. *Water Purification Technology*, 2013, **32**(5): 11-15.
- [28] 刘培财, 雷宝坤, 翟丽梅, 等. 农田氮素管理模式对洱海流域大蒜生长和氮素流失风险的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2011, **30**(7): 1364-1370.  
Liu P C, Lei B K, Zhai L M, *et al.* Effects of nitrogen managements on growth of garlic and risk of nitrogen loss in field of Erhai Lake basin, China [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, **30**(7): 1364-1370.
- [29] Shang X, Wang X Z, Zhang D L, *et al.* An improved SWAT-based computational framework for identifying critical source areas for agricultural pollution at the lake basin scale[J]. *Ecological Modelling*, 2012, **226**: 1-10.
- [30] 王庭健, 苏睿, 金相灿, 等. 城市富营养湖泊沉积物中磷负荷及其释放对水质的影响[J]. *环境科学研究*, 1994, **7**(4): 12-19.  
Wang T J, Su R, Jin X C, *et al.* The effects to water quality of phosphorus loading and its release in the sediments of urban eutrophic lakes[J]. *Research of Environmental Sciences*, 1994, **7**(4): 12-19.
- [31] 张路, 范成新, 池俏俏, 等. 太湖及其主要入湖河流沉积磷形态分布研究[J]. *地球化学*, 2004, **33**(4): 423-434.  
Zhang L, Fan C X, Chi Q Q, *et al.* Phosphorus species distribution of sediments in Lake Taihu and its main inflow rivers [J]. *Geochimica*, 2004, **33**(4): 423-434.
- [32] 殷迪. 洱海流域经济发展与湖泊水环境关系分析[D]. 武汉: 华中师范大学, 2012.  
Yin D. Study on the relationship between economic growth and lake environment in Erhai Basin [D]. Wuhan: Central China Normal University, 2012.
- [33] 马艳, 董利民. 洱海流域农村面源污染对水环境的影响及其控制对策[J]. *华中师范大学研究生学报*, 2011, **18**(1): 150-153.  
Ma Y, Dong L M. The Influence on water environment of non-point source pollution in the countryside of Erhai Basin and the controlling measures[J]. *Huazhong Normal University Journal of Postgraduates*, 2011, **18**(1): 150-153.
- [34] 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.  
Chen G Y, Li J Q, Li Q M, *et al.* Different forms of nitrogen contents and their vertical variations of transformation modes of the sediments of Lake Yuehu, Wuhan [J]. *Journal of Lake Sciences*, 2008, **20**(4): 463-469.
- [35] 孙慧卿. 影响湖泊沉积物表层磷行为的关键因素研究[D]. 南京: 南京林业大学, 2012.  
Sun H Q. The effect of the key factors on the phosphorus behavior of the sediment surface in Taihu lake [D]. Nanjing: Nanjing Forestry University, 2012.
- [36] 翟继红, 曾从盛, 仝川, 等. 闽江河口湿地沉积物有机磷和无机磷含量及垂直分布特征[J]. *亚热带资源与环境学报*, 2010, **5**(1): 9-14.  
Zhai J H, Zeng C S, Tong C, *et al.* Organic and Inorganic phosphorus in sediments of the Min River estuarine wetlands: contents and profile distribution [J]. *Journal of Subtropical Resources and Environment*, 2010, **5**(1): 9-14.
- [37] 岳维忠, 黄小平. 珠江口柱状沉积物中磷的分布特征及其环境意义[J]. *热带海洋学报*, 2005, **24**(1): 21-27.  
Yue W Z, Huang X P. Distribution characteristics of phosphorus in core sediments from Zhujiang river estuary and its environmental significance [J]. *Journal of Tropical Oceanography*, 2005, **24**(1): 21-27.
- [38] 杨洋, 刘其根, 胡忠军, 等. 太湖流域沉积物碳氮磷分布与污染评价[J]. *环境科学学报*, 2014, **34**(12): 3057-3064.  
Yang Y, Liu Q G, Hu Z J, *et al.* Spatial distribution of sediment carbon, nitrogen and phosphorus and pollution evaluation of sediment in Taihu Lake Basin [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2014, **34**(12): 3057-3064.
- [39] 陈如海, 詹良通, 陈云敏, 等. 西溪湿地底泥氮、磷和有机质含量竖向分布规律[J]. *中国环境科学*, 2010, **30**(4): 493-498.  
Chen R H, Zhan L T, Chen Y M, *et al.* Contents of nitrogen, phosphorus and organic materials in sediments and theirs distribution along depth at Xixi Wetland [J]. *China Environmental Science*, 2010, **30**(4): 493-498.
- [40] Mustafa A, Scholz M. Nutrient accumulation in *Typha latifolia* L. and sediment of a representative integrated constructed wetland[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2011, **219**(1-4): 329-341.
- [41] Zhang B, Fang F, Guo J S, *et al.* Phosphorus fractions and phosphate sorption-release characteristics relevant to the soil composition of water-level-fluctuating zone of Three Gorges Reservoir[J]. *Ecological Engineering*, 2012, **40**: 153-159.
- [42] 王立志, 王国祥, 俞振飞, 等. 风浪扰动引起湖泊底泥磷释放的模拟实验研究[J]. *水土保持学报*, 2011, **25**(2): 121-124, 129.  
Wang L Z, Wang G X, Yu Z F, *et al.* Simulated study on phosphorous release of sediment in Shallow Lakes caused by wind-wave disturbance [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2011, **25**(2): 121-124, 129.
- [43] 王圣瑞, 赵海超, 王娟, 等. 有机质对湖泊沉积物不同形态氮释放动力学影响研究[J]. *环境科学学报*, 2012, **32**(2): 332-340.  
Wang S R, Zhao H C, Wang J, *et al.* The effects of organic matter on the release kinetics of nitrogen with different forms in the lake sediments[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2012, **32**(2): 332-340.
- [44] 易文利. 有机质对磷素在沉积物-水-沉水植物间迁移转化的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.  
Yi W L. The effects of organic matter on phosphorus distribution characteristic in sediment-water-plant system [D]. Yangling: Northwest Agriculture & Forestry University, 2008.



## CONTENTS

Transport Loss Estimation of Fine Particulate Matter in Sampling Tube Based on Numerical Computation .....	LUO Li-na, CHENG Zhen, ZHU Wen-fei, <i>et al.</i> (4457)
Sources Analysis of Heavy Metal Aerosol Particles in North Suburb of Nanjing .....	QIN Xin, ZHANG Ze-feng, LI Yan-wei, <i>et al.</i> (4467)
Distribution Characteristics of Water Soluble Ions Under Different Weather Conditions During the Youth Olympic Games in Nanjing .....	SHI Yuan-zhe, AN Jun-lin, WANG Hong-lei, <i>et al.</i> (4475)
Seasonal Variation and Source Analysis of the Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Suzhou .....	WANG Nian-fei, CHEN Yang, HAO Qing-ju, <i>et al.</i> (4482)
Characteristics of Elements and Potential Ecological Risk Assessment of Heavy Metals in PM <sub>2.5</sub> at the Southwest Suburb of Chengdu in Spring .....	..... YANG Huai-jin, YANG De-rong, YE Zhi-xiang, <i>et al.</i> (4490)
Geochemical Characteristics and Source Apportionment of Rare Earth Elements in the Dustfall of Quanzhou City .....	ZHANG Zong-wei, YU Rui-lian, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (4504)
<sup>13</sup> C-based Sources Partitioning of Atmospheric CO <sub>2</sub> During Youth Olympic Games, Nanjing .....	XU Jia-ping, LI Xu-hui, XIAO Wei, <i>et al.</i> (4514)
Gaseous Emission Characterization of Civil Aviation Aircraft During Takeoff .....	HAN Bo, HUANG Jia-min, WEI Zhi-qiang (4524)
Pollution Characteristics of Antibiotic Resistant Bacteria from Atmospheric Environment of Animal Feeding Operations .....	ZHANG Lan-he, HE Yu-wei, CHEN Mo, <i>et al.</i> (4531)
Removing Nano Particles by Filtration Using Materials with Ordered Mesoporous Structure .....	XING Yi, WANG Cong, LU Pei, <i>et al.</i> (4538)
Emission Characteristics of Gaseous Pollutants from City Bus Fueled with Biodiesel Based on DOC + CDPF Technology in Real Road Conditions .....	..... LOU Di-ming, ZHANG Yun-hua, TAN Pi-qiang, <i>et al.</i> (4545)
Characteristics of Methane Flux Across the Water-air Interface in Subtropical Shallow Ponds .....	LONG Li, XIAO Shang-bin, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (4552)
Succession of Phytoplankton Assemblages and Its Influencing Factors in Tangpu Reservoir, Zhejiang Province .....	MA Pei-ming, SHI Lian-dong, ZHANG Jun-fang, <i>et al.</i> (4560)
Responses of Physiological Indices of Typical Submerged Macrophytes to Water Quality in Taihu Lake .....	GAO Min, HU Wei-ping, DENG Jian-cai, <i>et al.</i> (4570)
Optical Characteristics of Dissolved Organic Matter from Two Different Full Mixed Reservoirs in Winter Based on UV-vis and EEMs .....	..... HUANG Ting-lin, FANG Kai-kai, ZHANG Chun-hua, <i>et al.</i> (4577)
Hanfeng Pre-dam Commissioning Eutrophication Status and Control Evaluation in Three Gorges Reservoir .....	YANG Bing, HE Bing-hui, WANG De-bao (4586)
Occurrence, Distribution and Ecological Risk of Antibiotics in Surface Water of the Gonghu Bay, Taihu Lake .....	WU Xu-yue, ZOU Hua, ZHU Rong, <i>et al.</i> (4596)
Distribution Characteristics of <i>n</i> -alkanes in Sediment Core and Implication of Environment in Different Lakes of Dianchi .....	YU Li-yan, HAN Xiu-xiu, HUANG Xiao-hu, <i>et al.</i> (4605)
Vertical Distribution and Pollution Risk Assessment of Nitrogen, Phosphorus, and Organic Matter in Sediment of Inflowing Rivers of Erhai Lake Estuarine Wetland in Wet and Dry Seasons .....	..... WANG Shu-jin, LIU Yun-gen, WANG Yan, <i>et al.</i> (4615)
Variation of Nitrogen Forms in Sediments of Lihu Lake During Mineralization .....	ZHAO Li, WANG Shu-hang, JIANG Xia, <i>et al.</i> (4626)
Temporal and Spatial Variation Characteristics of the Heavy Metals Content in the Surface Sediment and the Potential Ecological Risk Trends in the Three Gorges Reservoir Area .....	..... ZHUO Hai-hua, SUN Zhi-wei, TAN Ling-zhi, <i>et al.</i> (4633)
Modeling the Environmental Behaviors and Ecological Risks of Permethrin in Chaohu Lake .....	LIU Ya-li, WANG Ji-zhong, PENG Shu-chuan, <i>et al.</i> (4644)
Simulation Experiment; Effect of Organic Colloid on Carbamazepine Transport in Porous Media .....	ZHANG Si, HE Jiang-tao, ZHU Xiao-jing (4651)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Inorganic Type Urban Landscape Water: Taking the Canal of Suzhou Section as Example .....	..... LI Qian-qian, PAN Yang, GONG Dan-yan, <i>et al.</i> (4662)
Rock Weathering Characteristics and the Atmospheric Carbon Sink in the Chemical Weathering Processes of Qingshuijiang River Basin .....	LÜ Jie-mei, AN Yan-ling, WU Qi-xin, <i>et al.</i> (4671)
Pollution Characteristics Analysis in Shallow Groundwater of Typical Farmland Area, Southern China .....	GUO Hui, YU Min-da, HE Xiao-song, <i>et al.</i> (4680)
Identification of Sulfate Sources in the Groundwater System of Zaozhuang; Evidences from Isotopic and Hydrochemical Characteristics .....	MA Yan-hua, SU Chun-li, LIU Wei-jiang, <i>et al.</i> (4690)
Removal of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons by Extensive Green Roofs .....	SHEN Qing-ran, HOU Juan, LI Tian (4700)
Comparative Study on Pretreatment Process of Ultrafiltration; Chemical Coagulation and Electrocoagulation .....	ZHAO Kai, YANG Chun-feng, SUN Jing-qiu, <i>et al.</i> (4706)
Adsorption Mechanisms Analysis of EOM on PVDF Ultrafiltration Membranes Modified by SiO <sub>2</sub> Using QCM-D and AFM .....	JIANG Jia-liang, WANG Lei, HUANG Dan-xi, <i>et al.</i> (4712)
Isolation of Quorum Quenching Bacteria and Their Function for Controlling Membrane Biofouling .....	ZHAO Chang, WANG Wen-zhao, XU Qi-yong (4720)
Effects of Hydraulic Loading Rate on the Removal of Pollutants from an Integrated Biological Settling Tank .....	WANG Wen-dong, MA Cui, LIU Hui, <i>et al.</i> (4727)
Characteristics of Nitrobacteria in SBR with Trace N <sub>2</sub> H <sub>4</sub> Addition .....	XIAO Peng-ying, ZHANG Dai-jun, LU Pei-li (4734)
Start-up of Partial Nitrification AGS-SBR and Analysis of Its Microbial Community Composition .....	LU Hang, XIN Xin, GUAN Lei, <i>et al.</i> (4741)
Effects of PAHs Pollution on the Community Structure of Denitrifiers in a Typical Oilfield .....	YAO Yan-hong, WANG Ming-xia, ZUO Xiao-hu, <i>et al.</i> (4750)
Performance and Microbial Community Analysis of Bioaugmented Treatment of Diethyl Phthalate (DEP) in Membrane Bioreactor .....	ZHANG Ke, GUAN Yun, LUO Hong-bing, <i>et al.</i> (4760)
Comparative Analysis of the Bacterial Community on Anodic Biofilms in Sediment Microbial Fuel Cell Under Open and Closed Circuits .....	..... WU Yi-cheng, DENG Quan-xin, WANG Ze-jie, <i>et al.</i> (4768)
Anaerobic Biodegradability of Perfluorooctanoic Acid (PFOA) .....	LI Fei, CHEN Yi-dan, ZHOU Zhen-ming, <i>et al.</i> (4773)
Comprehensive Effects of the Application of Water and Fertilizer Amount on CO <sub>2</sub> Emission from Soils of Summer-maize Field .....	YANG Shuo-huan, ZHANG Bao-cheng, WANG Li, <i>et al.</i> (4780)
Spatial Heterogeneity of Soil Respiration in the Soil Erosion Area of West Mountains in Fujian Province, China .....	YAO Xiong, YU Kun-yong, ZENG Qi, <i>et al.</i> (4789)
Comprehensive Risk Evaluation of Cadmium in Soil-rice System Based on Uncertainty Analysis .....	YANG Yang, CHEN Wei-ping, LI Yan-ling, <i>et al.</i> (4800)
Fluorescence Properties of Glomalin and Its Relationship with Soil Physicochemical Characteristics in Different Regions of Beijing City .....	..... CHAI Li-wei, LIU Meng-jiao, JIANG Da-lin, <i>et al.</i> (4806)
Spatial Distribution Characteristics of Heavy Metal Pollution and Health Risk in Soil Around the Coal Industrial Area of East Junggar Basin .....	..... LIU Fang, Tashpolat Tiyp, Ilyas Nurmamat, <i>et al.</i> (4815)
Characteristics of Microbial Nitrogen Degradation in Fluvo-aquic Soil of Hebei Plain .....	ZHANG Can-can, PANG Hui-cong, GAO Tai-zhong, <i>et al.</i> (4830)
Influence of Arsenate and Phenanthrene on Carbon-groups of <i>Pteris vittata</i> L. Roots .....	LIAO Xiao-yong, GONG Xue-gang, YAN Xiu-lan, <i>et al.</i> (4841)
Effect of Alkali Solids Amendment on Sewage Sludge Aerobic Composting and the Potential of Related Products on Infertile Soil Amelioration .....	..... CAI Han-zhen, NING Xi-cui, WANG Quan, <i>et al.</i> (4848)
Adsorption and Influential Factors of Diuron on the Loess Soil by Adding Different Biochar Prepared at Varying Temperatures .....	SUN Hang, JIANG Yu-feng, SHI Lei-ping, <i>et al.</i> (4857)
Characteristics of Heavy Metal Contents in Human Hairs of Mine Contaminated Areas in Nandan County .....	TIAN Mei-ling, ZHONG Xue-mei, XIA De-shang, <i>et al.</i> (4867)
Preparation of Mg-Al-Me (Me = La, Ce, Zr) Composite Oxides for Efficient Fluoride Uptake .....	WANG Ai-he, ZHOU Kang-gen, LIU Xing, <i>et al.</i> (4874)
Fe-Mn Binary Oxide Impregnated Chitosan Bead (FMCB): An Environmental Friendly Sorbent for Phosphate Removal .....	FU Jun, FAN Fang, LI Hai-ning, <i>et al.</i> (4882)
Leaching Toxicity and Bioaccessibility of Heavy Metals in MSW Fly Ash with Various Particle Sizes .....	WANG Chun-feng, CHEN Guan-fei, ZHU Yan-chen, <i>et al.</i> (4891)

# 《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 赵进才

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 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明  
赵进才 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)

2016年12月15日 第37卷 第12期(卷终)

## ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 12 Dec. 15, 2016

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	赵进才	Editor-in -Chief		ZHAO Jin-cai
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	中国国际图书贸易集团有限公司 (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