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

2019
Vol.40 No.4
第40卷 第4期

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第40卷 第4期
2019年4月15日

目　次

南京江北新区大气单颗粒来源解析及混合状态 …… 于兴娜，时政，马佳，李梅，龚克坚(1521)
西安市$PM_{2.5}$中碳质气溶胶污染特征 …… 牟臻，陈庆彩，王羽琴，沈振兴，华晓羽，张梓萌，孙浩尧，王玛敏，张立欣(1529)
太原市冬季$PM_{2.5}$化学组分特征与来源解析 …… 刘素，马彤，杨艳，高健，彭林，曹力媛，逄妮妮，张浩杰(1537)
郑州市大气细颗粒物中水溶性离子季节性变化特征及其源解析
…… 闫广轩，张靖雯，雷豪杰，黄海燕，唐明双，曹治国，李云蓓，樊静，王跃思，李怀刚(1545)
珠海市郊区大气$PM_{2.5}$中元素特征及重金属健康风险评价 …… 杨毅红，贾燕，卞国建，于晓巍，钟昌琴，全鼎余(1553)
一次沙尘事件对沿海及海洋大气气溶胶中金属粒径分布的影响 …… 金同俊，祁建华，郗梓延，林学辉(1562)
基于SOA转化机制的沧州市重点企业秋冬季大气污染模拟
…… 高爽，伯鑫，马岩，雷团团，王刚，李时蓓，陆朝阳，毛娜，郝明亮，黄向峰(1575)
京津冀大气污染变化规律及其与植被指数相关性分析 …… 孙爽，李令军，赵文吉，齐梦溪，田欣，李珊珊(1585)
2015~2017年北京及近周边平房燃煤散烧及其污染排放遥感测算
…… 赵文慧，李令军，鹿海峰，姜磊，张立坤，王新辉，邱昀(1594)
基于地基遥感的杭州地区气溶胶光学特性 …… 齐冰，车慧正，徐婷婷，杜荣光，胡德云，梁卓然，马千里，姚杰(1604)
四川省人为源挥发性有机物组分清单及其臭氧生成潜势
…… 周子航，邓也，谭钦文，吴柯颖，宋丹林，黄凤霞，周小玲(1613)
餐饮源挥发性有机物组成及排放特征 …… 高雅琴，王红丽，许睿哲，景盛翱，刘跃辉，彭亚荣(1627)
广州番禺大气成分站一次典型光化学污染过程PAN和O_3分析 …… 邹宇，邓雪娇，李菲，殷长秦(1634)
北京市典型道路扬尘化学组分特征及年际变化 …… 胡月琪，李萌，颜旭，张超(1645)
南昌市扬尘$PM_{2.5}$中多环芳烃的来源解析及健康风险评价 …… 于瑞莲，郑权，刘贤荣，王珊珊，赵莉斯，胡恭任(1656)
道路扬尘排放因子建立方法与应用 …… 樊守彬，杨涛，王凯，李雪峰(1664)
现实工况下挖掘机尾气排放特征分析
…… 马帅，张凯山，王帆，庞凯莉，朱怡静，李臻，毛红梅，胡宝梅，杨锦锦，王斌(1670)
雾-霾天人体平均呼吸高度处不同粒径气溶胶的微生物特性 …… 杨唐，韩云平，李琳，刘俊新(1680)
霾天能见度参数化方案改进及预报效果评估 …… 赵秀娟，李梓铭，徐敬(1688)
支持向量机回归在臭氧预报中的应用 …… 苏筱倩，安俊琳，张玉欣，梁静舒，刘静达，王鑫(1697)
基于中国电网结构及一线典型城市车辆出行特征的PHEV二氧化碳排放分析 …… 郝旭，王贺武，李伟峰，欧阳明高(1705)
岩溶槽谷区地下河硝酸盐来源及其环境效应：以重庆龙凤槽谷地下河系统为例
…… 段世辉，蒋勇军，张远瞩，曾泽，王正雄，吴韦，彭学义，刘九缠(1715)
胶州湾表层水体中邻苯二甲酸酯的污染特征和生态风险 …… 刘成，孙翠竹，张哿，唐燎，邹亚丹，徐擎擎，李锋民(1726)
湛江湾沉积物中六六六(HCHs)、滴滴涕(DDTs)有机氯农药的分布特征与风险评估
…… 彭诗云，彭平安，孔德明，陈法锦，于赤灵，李嘉诚，梁宇钊，宋建中(1734)
生态净化系统中DOM光学特性及影响因素分析：以盐龙湖春季为例
…… 马睿，李璇，王莲，王家新，马卫星，丁成，吴向阳(1742)
溶解性有机物(DOM)与区域土地利用的关系：基于三维荧光-平行因子分析(EEM-PARAFAC)
…… 李昀，魏鸿杰，王侃，张招招，于旭彪(1751)
汉丰湖流域农业面源污染氮磷排放特征分析 …… 谢经朝，赵秀兰，何丙辉，李章安(1760)
基于RZWQM模型模拟太行山低山丘陵区农田土壤硝态氮迁移及淋溶规律
…… 郑文波，王仕琴，刘丙霞，雷玉平，曹建生(1770)
澜沧江流域梯级水库建设下水体营养盐和叶绿素a的空间分布特征 …… 程豹，望雪，马金川，杨正健，刘德富，马骏(1779)
福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征 …… 何露露，杨平，谭立山，仝川，黄佳芳(1788)
尾水受纳河流中PhACs在传统水相中的分布及环境风险
…… 王硕，刘建超，郑超亚，张吉琛，许嘉诚，徐莹莹，陆光华(1797)
绿色屋顶雨洪调控能力与效益评价 …… 李俊生，尹海伟，孔繁花，陈佳宇，邓金玲(1803)
超声活化过硫酸盐降解水中典型嗅味 …… 孙昕，孙杰，李鹏飞，汤加刚，杨晴，唐晓(1811)
金属有机框架MIL-53(Fe)可见光催化还原水中U(Ⅵ) …… 闫增元，习海玲，袁立永(1819)
覆盖材料对洱海不同湖区沉积物溶解态有机磷和无机磷释放影响及差异
…… 龚佳健，倪兆奎，肖尚斌，赵海超，席银，王圣瑞(1826)
氢氧化镧改性介孔稻壳生物炭除磷性能 …… 许润，石程好，唐倩，石稳民，康建雄，任拥政(1834)
改性污泥基生物炭的性质与重金属吸附效果 …… 陈坦，周泽宇，孟瑞红，刘彦廷，王洪涛，陆文静，金军，刘颖(1842)
纳米磁性磷酸二氢钙对Cd的吸附、回收与再生 …… 李玉娇，杨志敏，陈玉成，黄磊，唐海燕(1849)
赤铁矿抑制硫酸盐废水厌氧消化产甲烷过程中硫化氢形成与机制 …… 黄绍福，叶捷，周顺桂(1857)
微藻膜反应器处理海水养殖废水性能及膜污染特性 …… 马航，李之鹏，柳峰，徐仲，尤宏，王芳，陈其伟(1865)
生活污水预沉淀-SNAD颗粒污泥工艺小试 …… 李冬，崔雅倩，赵世勋，刘志诚，张杰(1871)
生活污水与人工配水对好氧颗粒污泥系统的影响 …… 李冬，王樱桥，李帅，张杰，王玉颖(1878)
硫磺/硫铁矿自养反硝化系统脱氮性能 …… 周娅，买文宁，梁家伟，代吉华，牛颖，李伟利，唐启(1885)
异养硝化细菌*Pseudomonas putida* YH的脱氮特性及降解动力学 …… 汪旭晖，杨垒，任勇翔，陈宁，肖倩，崔珅，郦丹(1892)
污泥龄及pH值对反硝化除磷工艺效能的影响 …… 韦佳敏，黄慧敏，程诚，蒋志云，刘文如，沈耀良(1900)
盐度条件下ANAMMOX-EGSB反应器颗粒污泥微生物群落 …… 王晗，李瀚翔，陈猷鹏，郭劲松，晏鹏，方芳(1906)
内源碳PHA的贮存对混合菌群耐低温特性的影响 …… 杨建鹏，张健，田晴，朱艳彬，李方，Wolfgang Sand(1914)
中国市政污泥中磷的含量与形态分布 …… 王超，刘清伟，职音，程柳，王宁，李彩丹，毛宇翔(1922)
广州市售水产品中全氟烷基化合物的污染特征和安全风险评价 …… 王旭峰，王强，黎智广，黄珂，李刘冬，赵东豪(1931)
长江上游典型农业源溪流溶存氧化亚氮(N_2O)浓度特征及影响因素 …… 田琳琳，王正，胡磊，任光前，朱波(1939)
内蒙古河套灌区不同盐碱程度土壤CH_4吸收规律 …… 杨文柱，焦燕，杨铭德，温慧洋(1950)
水稻光合碳在植株-土壤系统中分配与稳定对施磷的响应
…… 王莹莹，肖谋良，张昀，袁红朝，祝贞科，葛体达，吴金水，张广才，高晓丹(1957)
土壤水分和温度对西南喀斯特棕色石灰土无机碳释放的影响 …… 徐学池，黄媛，何寻阳，王桂红，苏以荣(1965)
黄土丘陵区侵蚀坡面土壤微生物量碳时空动态及影响因素 …… 覃乾，朱世硕，夏彬，赵允格，许明祥(1973)
农用地土壤抗生素组成特征与积累规律 …… 孔晨晨，张世文，聂超甲，胡青青(1981)
生物发酵制药VOCs与嗅味治理技术研究与发展 …… 王东升，朱新梦，杨晓芳，焦茹媛，赵珊，宋荣娜，吕明晗，杨敏(1990)
《环境科学》征订启事(1612)　《环境科学》征稿简则(1787)　信息(1663，1796，1833)

环 境 科 学
Environmental Science
第 40 卷 第 4 期 2019 年 4 月
Vol. 40, No. 4 Apr., 2019

福州地区海湾和河口潮汐沼泽湿地秋季上覆水营养盐分布特征

何露露[1]，杨平[1]，谭立山[1]，仝川[1,2,3]，黄佳芳[1,2,3]*
(1. 福建师范大学地理科学学院，福州 350007；2. 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室，福州 350007；3. 福建师范大学亚热带湿地研究中心，福州 350007)

摘要：2015 年秋季，采集福建省福州市沿海兴化湾(福州一侧)、福清湾、闽江口、敖江口和罗源湾 5 个海湾和河口分布的潮汐沼泽湿地的上覆水，并测定上覆水中的氮、磷营养盐浓度及其他水体理化指标，探讨不同海湾和河口潮汐沼泽湿地上覆水营养盐浓度形成差异的原因. 结果表明：①不同海湾和河口潮汐沼泽湿地上覆水中的氮、磷营养盐浓度均存在显著差异($P < 0.05$)，福清湾氮、磷营养盐浓度均较高，兴化湾氮营养盐浓度最低，敖江口磷营养盐浓度最低，其中福清湾上覆水营养盐浓度主要受区域水产养殖、陆源污染、地形的影响，而兴化湾主要受潮汐影响显著；②植被类型对沼泽湿地上覆水营养盐浓度有一定影响，南方碱蓬群落沼泽湿地上覆水中的氮营养盐浓度较高，互花米草群落沼泽湿地上覆水中的氮、磷营养盐浓度较低；同一海湾或河口沼泽湿地不同植物群落下上覆水中的营养盐浓度不同，且规律复杂. 潮汐、地表径流、植物群落、地形、人为活动均会对海湾和河口沼泽湿地上覆水中的营养盐浓度产生重要影响.

关键词：湿地；植物群落；上覆水；营养盐；河口/海湾；福州
中图分类号：X52 **文献标识码**：A **文章编号**：0250-3301(2019)04-1788-09 **DOI**：10.13227/j.hjkx.201807267

Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn

HE Lu-lu[1], YANG Ping[1], TAN Li-shan[1], TONG Chuan[1,2,3], HUANG Jia-fang[1,2,3]*
(1. School of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China; 2. Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process of Ministry of Education, Fuzhou 350007, China; 3. Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China)

Abstract: Overlying water from the tidal marshes in five estuaries and bays, namely, Xinghua Bay (Fuzhou Part), Fuqing Bay, Luoyuan Bay, Minjiang River Estuary, and Aojiang River Estuary of the Fuzhou region were collected in autumn of 2015, and the nitrogen and phosphorus nutrient concentration and other physical and chemical indicators of the overlying water were measured to discuss the reasons for the differences in the nutrient concentration of the overlying water in tidal marsh wetlands in different bays and estuaries. There were significant differences in the nitrogen and phosphorus nutrient concentrations of the overlying waters of the tidal marshes in the different bays and estuaries ($P < 0.05$). The concentrations of nitrogen and phosphorus in Fuqing Bay were relatively high, while Xinghua Bay had the lowest nitrogen nutrient concentration and Aojiang River Estuary had the lowest phosphorus nutrient concentration. The nutrient concentration of the overlying water in Fuqing Bay is mainly affected by regional aquaculture, land-source pollution, and topography, while that in Xinghua Bay is mainly affected by tides. The vegetation type had an effect on the nutrient concentration of the overlying water in the wetlands. The concentration of nitrogenous nutrients in the overlying water of the marsh wetland in the *Suaeda australis* community was relatively high, while the nitrogen and phosphorus nutrient concentrations in the overlying water of the *Spartina alterniflora* community wetland was relatively low; the concentrations of nutrients in the overlying water of different plant communities in the same bay or estuary marsh wetland were different, and the relationships were complex. Tides, surface runoff, plant communities, topography, and human activities all had an important impact on the nutrient concentrations in the overlying waters of the bay and estuary wetlands.

Key words: wetlands; plant community; overlying water; nutrient; estuary/bay; Fuzhou

滨海湿地作为海洋和陆地相互作用形成的过渡生态系统，在净化污染物、改善资源状况和维护自然生态平衡等方面发挥着重要作用[1,2]. 频繁的人类活动对滨海湿地营养盐的浓度、迁移和转化造成了巨大的影响[3~5]. 当自然过程(径流和潮汐)和人类活动向滨海湿地输入的氮、磷等营养盐超过湿地沉积物的吸附和接纳能力时，营养盐会在一定条件下释放到上覆水中[6]，释放过程是引起水环境恶化甚至发生富营养化的重要化学过程[7]. 研究滨海湿地上覆水氮、磷营养盐浓度是评价河口和海湾水体环境质量和了解沉积物对外源营养盐载入负荷能力的基础工作，

收稿日期：2018-07-30；**修订日期**：2018-10-24
基金项目：国家科技基础性工作专项(2013FY111805)；国家自然科学基金青年科学基金项目(41601102)；福建师范大学校级创新团队项目(IRTL1205)
作者简介：何露露(1993～)，女，硕士研究生，主要研究方向为湿地生物地球化学循环，E-mail:893313349@qq.com
* 通信作者，E-mail:wahugeo@fjnu.edu.cn

一方面可以反映当地人类活动对水环境的影响，另一方面也可以反映当地滨海湿地的营养状况.

福建省海岸线漫长曲折，河口和海湾数量众多. 潮汐沼泽湿地主要分布于沙埕港及福宁湾、三都澳、罗源湾、闽江口、福清湾及海坛岛、兴化湾、晋江河口及泉州湾、九龙江河口及厦门港、漳浦县海岸和东山湾等地沿岸[8]. 目前，福建省滨海湿地受到来自自然和人类活动的双重威胁. 本研究通过采集和测定福州市兴化湾、福清湾、闽江口、敖江口和罗源湾潮汐沼泽湿地的上覆水营养盐浓度，对5个海湾和河口上覆水营养盐的空间分布特征和不同植物群落类型下的上覆水营养盐特征进行探讨，以期为福建沿海海湾和河口水质管理和保护提供基础数据.

1　材料与方法

1.1　研究区和采样点设置

在福建省福州市境内选择5个主要海湾和河口，由南至北分别为兴化湾(福清一侧)、福清湾、闽江口、敖江口和罗源湾(图1). 其中，兴化湾位于福建省中南部，是福建省最大的海湾，湾口朝向东南，湾内水域和滩涂宽阔，湾顶有木兰溪、秋芦溪和渔溪等河流注入[9,10]，水产养殖活动释放的废水是该海湾水体主要的污染源之一. 福清湾位于福建省福清市龙高半岛东北，海湾内有植物覆盖的湿地主要分布在鸬鹚屿、海口农场、龙江出海口、东阁华侨农场、东壁岛和八尺岛等滩涂上[11]，该海湾水体受陆源污染较大，以畜禽养殖业的排污量为主[12]. 闽江是福建省最大的河流，径流量丰富，年径流量为548.7×10^9 m^3，属丰水少沙水系[13]，河口水体同样受陆源污染较大，海洋赤潮时有发生[14]. 敖江为福建第六大河流，是闽东独立水系，发源于古田县东北部鹫峰山脉，流经罗源县，至连江县，在浦口与东岱口注入东海. 罗源湾位于闽东沿海，海湾曲折，口窄腹大，形似葫芦[15]，罗源湾与福清湾都属于半封闭形海湾，与其它海湾和河口相比，罗源湾水体污染除受水产养殖活动影响外，临海工业和港口运输业的兴起是其水体污染的重要原因之一，水环境质量的不断恶化使该海湾水质在福建省13个主要海湾中位于倒数第二[16]. 在各海湾和河口，设置数量不等的采样点. 各研究区地理坐标、采样点数量和优势植物见表1.

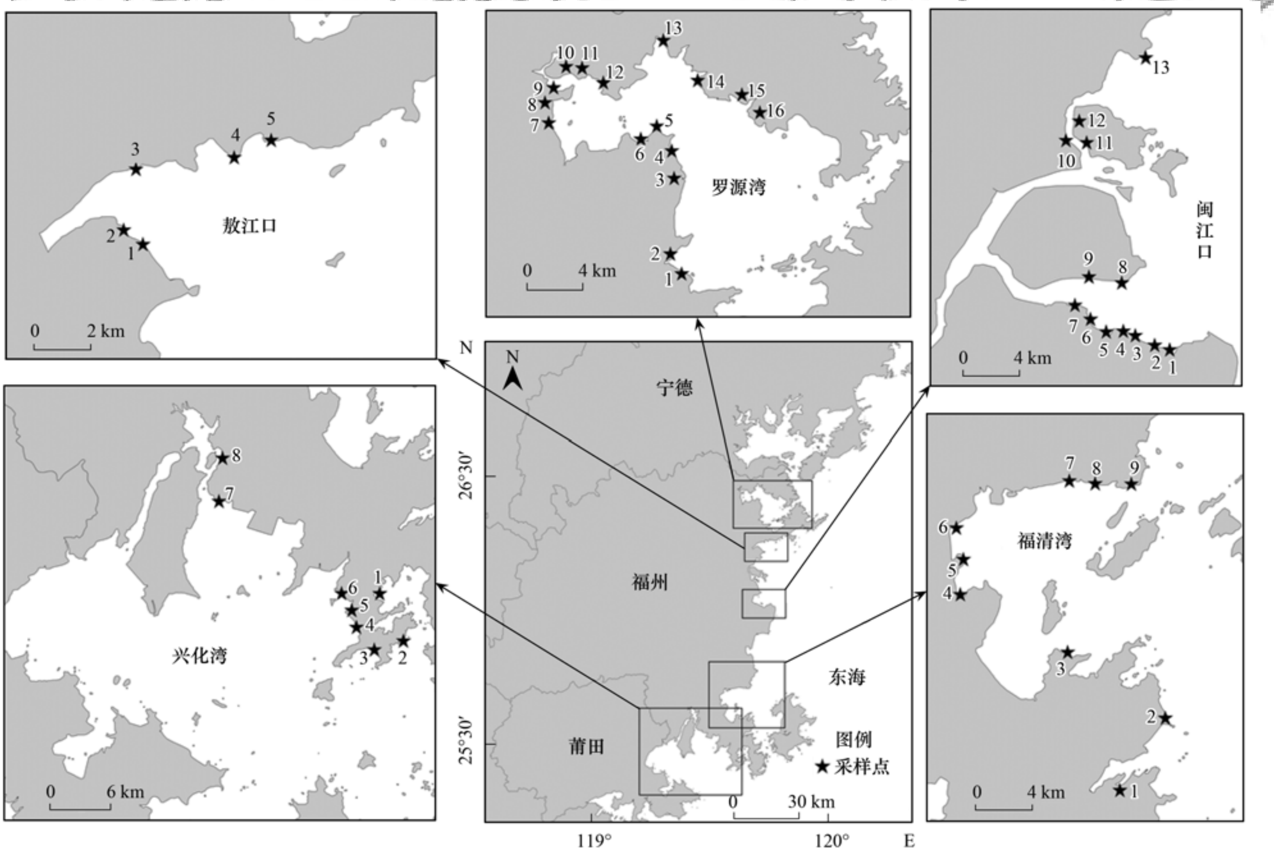

图1　河口、海湾的位置及采样点分布示意

Fig. 1　Location of the estuaries and bays and distribution of the sampling sites

1.2　样品采集与测定

于2015年10月24日~11月15日，用聚乙烯塑料瓶，在每个采样点低洼处，采集500 mL上覆水水样(沉积物以上5~10 cm)，每个采样点3个

重复. 在水样中滴加硫酸至 pH<2 后, 将所有样品置于保温箱中低温遮光保存, 在 6 h 内运回实验室, 并立刻用 0.45 μm 混合纤维滤膜过滤, 过滤后的水样装入容积为 50 mL 的聚乙烯瓶内, 置于冰箱中4℃冷藏, 保存备用.

利用连续流动分析仪(SKALAR San++, 荷兰)测定上覆水中的 NH_4^+-N、NO_3^--N 和 PO_4^{3-}-P 浓度[17]. 其中, NH_4^+-N采用次溴酸钠氧化法, NO_3^--N采用镉铜还原法, PO_4^{3-}-P采用抗坏血酸还原磷钼蓝法. 仪器最低检测限为 0.005 $mg\cdot L^{-1}$. 利用 HI 98121 便携式 pH/氧化还原电位/温度计, 现场测定上覆水体 pH、氧化还原电位和水温; 利用 HI8734 便携式 TDS 测定仪测定水体总溶解固体浓度, 利用 YSI 550A 便携式溶氧仪测定上覆水体溶解氧浓度, 利用便携式盐度计测定盐度.

表1 采样区和采样点概况

Table 1 Description of the sampling sites and study areas

采样区	地理坐标	样点数	采样点对应的优势植物
兴化湾	25°22′N ~ 25°35′N, 119°22′E ~ 119°34′E	8	互花米草(*Spartina alterniflora*)(采样点 1 ~ 6), 南方碱蓬(*Suaeda australis*)(采样点7、采样点8)
福清湾	25°30′N ~ 25°41′N, 119°27′E ~ 119°36′E	9	互花米草(采样点1 ~ 4、采样点8、采样点9), 南方碱蓬(采样点5 ~ 7)
闽江口	26°01′N ~ 26°10′N, 119°35′E ~ 119°41′E	13	互花米草(采样点9、采样点11 ~ 13), 短叶茳芏(*Cyperus malaccensis*)(采样点1 ~ 6), 芦苇(*Phragmites australis*)(采样点7、采样点8、采样点10)
敖江口	26°15′N ~ 26°16′N, 119°38′E ~ 119°42′E	5	互花米草(采样点1、采样点2、采样点4、采样点5), 芦苇(采样点3)
罗源湾	26°20′N ~ 26°29′N, 119°36′E ~ 119°43′E	16	互花米草(采样点1 ~ 16)

1.3 数据处理与统计分析

数据统计与分析分别采用 EXCEL 和 SPSS 19.0 软件, 绘图用 Origin 8. 其中, 用 EXCEL 计算平均值和标准误; 利用 SPSS 19.0 进行 ANOVA 方差检验和 LSD 多重比较, 差异比较采用独立样本 T 检验, 显著性水平为 $P<0.05$, 上覆水理化指标与营养盐浓度之间的相关性利用 Pearson 相关分析法, 进一步采用多元逐步回归分析, 构建上覆水营养盐浓度与主要影响因素的回归方程.

2 结果与分析

2.1 上覆水理化指标

5 个海湾和河口沼泽湿地上覆水的 pH、氧化还原电位、盐度、水温、总溶解固体浓度和溶解氧浓度均存在显著差异(表2). 与水产养殖同样发达的罗源湾相比, 兴化湾沼泽湿地上覆水 pH、盐度、总溶解固体浓度和溶解氧浓度均无显著差异, 但水温和氧化还原电位显著高于罗源湾($P<0.01$); 福清湾沼泽湿地上覆水 pH、盐度、总溶解固体浓度和水温都显著高于同样因地表径流和人为活动带来较多污染物的闽江口($P<0.01$); 敖江口沼泽湿地上覆水的氧化还原电位及水温均高于同为河口区的闽江口($P<0.01$). 总体上, 兴化湾沼泽湿地上覆水的 pH、盐度、水温、总溶解固体浓度、溶解氧浓度均高于其他地区, 同为河口区的闽江口及敖江口沼泽湿地上覆水的 pH、盐度、总溶解固体浓度则相对较低.

表2 5 个海湾和河口沼泽湿地上覆水理化指标特征1)

Table 2 Physical and chemical characteristics of the overlying water in the wetlands of five estuaries/bays

项目	pH	氧化还原电位 /mV	盐度/‰	水温/℃	总溶解固体浓度 /$g\cdot L^{-1}$	溶解氧浓度 /$mg\cdot L^{-1}$
兴化湾($n=24$)	(8.17 ± 0.11)a	(210.63 ± 18.07)a	(23.47 ± 1.07)a	(26.57 ± 0.97)a	(25.67 ± 1.32)a	(10.08 ± 0.76)a
福清湾($n=27$)	(7.99 ± 0.22)a	(186.41 ± 10.15)ab	(15.74 ± 2.71)b	(24.18 ± 0.31)b	(17.07 ± 3.05)b	(8.24 ± 0.56)ab
闽江口($n=39$)	(7.45 ± 0.11)b	(161.03 ± 12.21)b	(3.85 ± 0.50)c	(21.18 ± 0.45)c	(3.89 ± 0.39)c	(6.38 ± 0.53)b
敖江口($n=15$)	(7.32 ± 0.14)b	(223.27 ± 20.31)a	(2.60 ± 1.70)c	(24.17 ± 0.52)b	(1.43 ± 0.59)c	(7.66 ± 0.13)ab
罗源湾($n=48$)	(7.92 ± 0.03)a	(163.73 ± 4.15)b	(20.24 ± 1.09)a	(21.85 ± 0.45)c	(21.82 ± 1.62)a	(9.69 ± 0.98)a

1)表中数据为平均值 ± 标准误差; 同一列数据标注不同小写字母表示两两之间上覆水理化指标差异性达到显著性水平($P<0.05$), 含有相同字母的表示无显著差异($P>0.05$)

2.2 各海湾和河口沼泽湿地上覆水中营养盐的浓度

5 个海湾和河口沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N浓度为 0.35 ~ 1.41 $mg\cdot L^{-1}$, 由高到低排序依次为福清湾(1.41 ± 0.23) $mg\cdot L^{-1}$、闽江口(1.26 ± 0.59) $mg\cdot L^{-1}$、敖江口(0.88 ± 0.12) $mg\cdot L^{-1}$、罗源湾(0.49 ± 0.16) $mg\cdot L^{-1}$和兴化湾(0.35 ± 0.09) $mg\cdot L^{-1}$; 上覆水中的NO_3^--N浓度为 0.27 ~ 1.83 $mg\cdot L^{-1}$, 由高到低排序依次为福清湾(1.83 ± 0.61) $mg\cdot L^{-1}$、闽江口(0.93 ± 0.15) $mg\cdot L^{-1}$、罗源湾(0.65 ± 0.02) $mg\cdot L^{-1}$、敖江口(0.58 ± 0.03) $mg\cdot L^{-1}$和兴化湾(0.27 ± 0.06) $mg\cdot L^{-1}$; 上覆水中

的PO_4^{3-}-P浓度为0.09~0.26 mg·L^{-1}，由高到低排序依次为福清湾(0.26±0.04) mg·L^{-1}、兴化湾(0.17±0.01) mg·L^{-1}、罗源湾(0.13±0.01) mg·L^{-1}、闽江口(0.12±0.02) mg·L^{-1}和敖江口(0.09±0.03) mg·L^{-1}.

如图2，不同海湾和河口沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度均差异显著(P<0.05). 主要表现为：福清湾上覆水中的NH_4^+-N浓度在不同程度上高于其他地区，与兴化湾差异达到显著水平(P<0.05)，与闽江口、敖江口和罗源湾之间差异不显著(P>0.05)；福清湾上覆水中的NO_3^--N浓度显著高于其他4个地区(P<0.05)，而兴化湾、闽江口、敖江口、罗源湾4个地区之间差异不显著(P>0.05)；福清湾PO_4^{3-}-P浓度也显著高于其他4个地区(P<0.05)，但兴化湾、罗源湾、闽江口之间无显著差异(P>0.05)，敖江口PO_4^{3-}-P浓度不仅显著低于福清湾(P<0.05)，同时显著低于兴化湾(P<0.05). 总体来看，福清湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度均较高，兴化湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N浓度则较低，敖江口沼泽湿地上覆水中的PO_4^{3-}-P浓度最低.

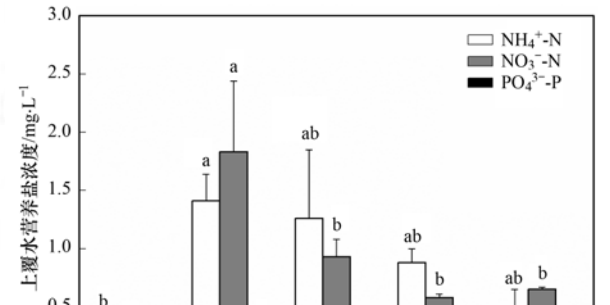

图2　5个海湾和河口湿地上覆水中的营养盐浓度

Fig. 2　Nutrient concentrations of the overlying water of the wetlands of the five bays/estuaries

2.3　不同植物群落下沼泽湿地上覆水中的营养盐浓度

兴化湾互花米草和南方碱蓬群落上覆水中的NH_4^+-N浓度分别为(0.38±0.07) mg·L^{-1}和(0.24±0.03) mg·L^{-1}，NO_3^--N浓度分别为(0.34±0.03) mg·L^{-1}和(0.05±0.02) mg·L^{-1}，PO_4^{3-}-P浓度分别为(0.18±0.01) mg·L^{-1}和(0.14±0.01) mg·L^{-1}. 不同植物群落下沼泽湿地上覆水NH_4^+-N浓度无显著差异(P>0.05)，NO_3^--N及PO_4^{3-}-P浓度差异显著(P<0.05)，如图3所示. 其中，南方碱蓬群落上覆水中的NO_3^--N及PO_4^{3-}-P浓度均显著小于互花米草(P<0.05).

福清湾互花米草、南方碱蓬群落上覆水中的NH_4^+-N浓度分别为(0.91±0.06) mg·L^{-1}和(1.79±0.11) mg·L^{-1}，NO_3^--N浓度分别为(1.60±0.20) mg·L^{-1}和(2.22±0.42) mg·L^{-1}，PO_4^{3-}-P浓度分别为(0.20±0.01) mg·L^{-1}和(0.38±0.04) mg·L^{-1}. 不同植物群落下沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N和PO_4^{3-}-P浓度均差异显著(P<0.05)，NO_3^--N浓度无显著差异(P>0.05)，如图3. 其中，南方碱蓬群落上覆水中的NH_4^+-N和PO_4^{3-}-P浓度均显著大于互花米草群落(P<0.05).

闽江口互花米草、短叶茳芏和芦苇群落上覆水中的NH_4^+-N浓度为(0.31±0.02)、(0.68±0.12)、(1.02±0.18) mg·L^{-1}，NO_3^--N浓度分别为(0.91±0.08)、(1.06±0.11)和(0.98±0.21) mg·L^{-1}，PO_4^{3-}-P浓度分别为(0.05±0.01)、(0.14±0.02)和(0.20±0.03) mg·L^{-1}. 不同植物群落下沼泽湿地上覆水中的NO_3^--N浓度无显著差异(P>0.05)，NH_4^+-N和PO_4^{3-}-P浓度差异显著(P<0.05). 其中，互花米草群落上覆水中的NH_4^+-N和PO_4^{3-}-P浓度均显著小于短叶茳芏群落及芦苇群落(P<0.05).

敖江口互花米草和芦苇群落上覆水中的NH_4^+-N浓度为(0.90±0.02) mg·L^{-1}和(0.83±0.01) mg·L^{-1}，NO_3^--N浓度为(0.61±0.03) mg·L^{-1}和(0.56±0.01) mg·L^{-1}，PO_4^{3-}-P浓度为(0.10±0.03) mg·L^{-1}和(0.04±0.01) mg·L^{-1}. 不同植物群落下沼泽湿地上覆水中的NO_3^--N和NH_4^+-N浓度无显著差异(P>0.05)，PO_4^{3-}-P浓度差异显著(P<0.05).

罗源湾互花米草群落上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度分别为：(0.49±0.17)、(0.65±0.02)和(0.13±0.01) mg·L^{-1}.

5个海湾和河口不同植物群落下沼泽湿地上覆水中的营养盐浓度特征见表3，其中互花米草群落下沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度均低于其他3种植物群落，并与南方碱蓬群落之间差异达到显著水平(P<0.05).

2.4　上覆水营养盐浓度与水体理化指标间的关系

将5个海湾和河口沼泽湿地上覆水中的营养盐浓度与上覆水的理化性质进行相关分析. 结果显示(表4)，上覆水中的NH_4^+-N浓度与水体盐度、总溶解性固体浓度、溶解氧浓度之间均存在显著负相关关系(P<0.05)，NO_3^--N浓度与水体盐度、总溶解性固体浓度之间同样存在显著负相关关系(P<0.05)；而上覆水中的PO_4^{3-}-P浓度与水体各项理化

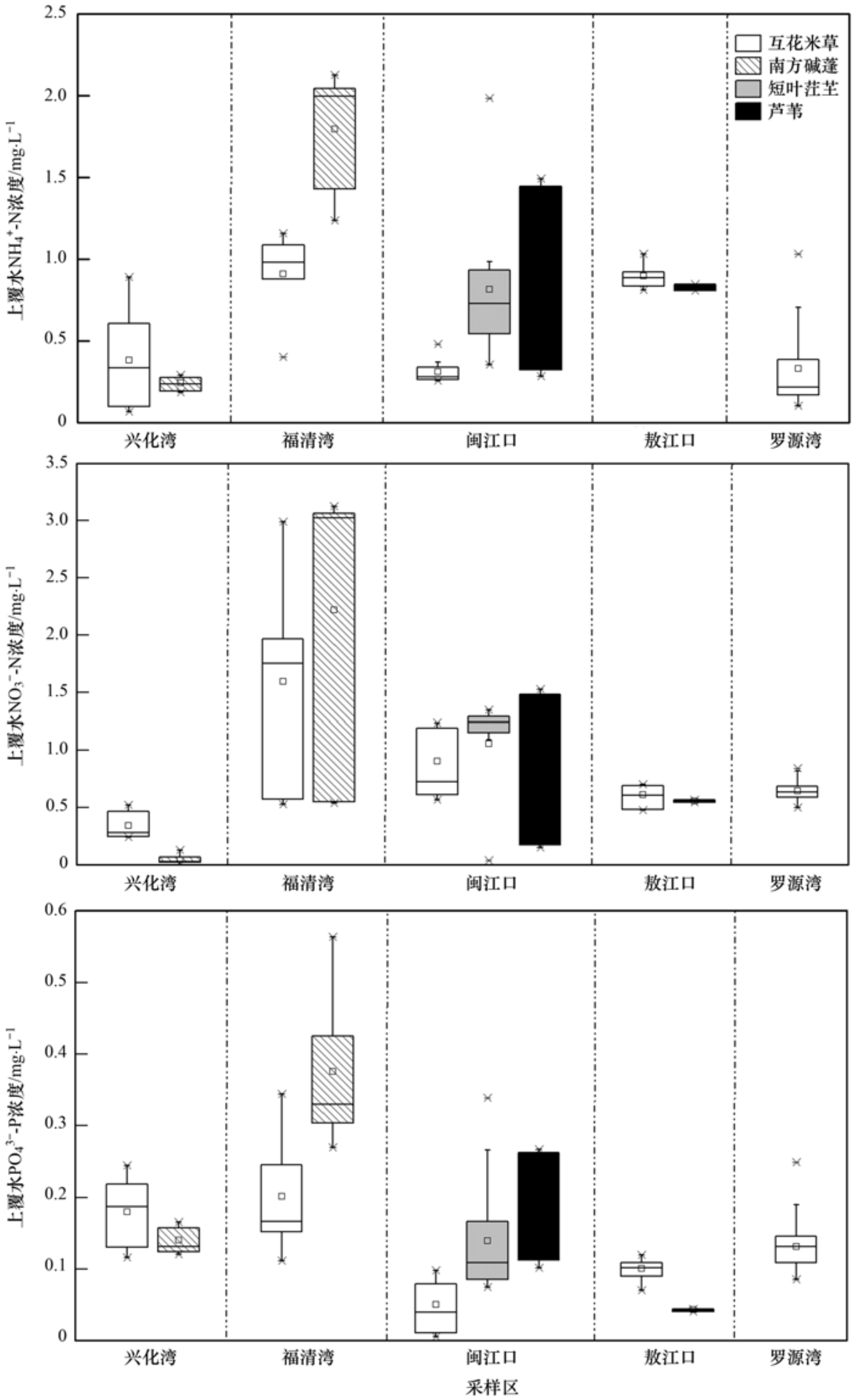

图 3 单个海湾/河口尺度内不同植物群落湿地上覆水营养盐浓度

Fig. 3 Concentrations of NH_4^+-N, NO_3^--N, and PO_4^{3-}-P in overlying water from different plant communities in the vegetated wetlands of a single bay/estuary

表 3 不同植被类型下的沼泽湿地上覆水营养盐浓度[1)]

Table 3 Concentrations of NH_4^+-N, NO_3^--N, and PO_4^{3-}-P in overlying water from different plant communities in the vegetated wetlands of 5 bays/estuaries

项目	NH_4^+-N	NO_3^--N	PO_4^{3-}-P
互花米草	(0.56 ± 0.05) b	(0.78 ± 0.05) b	(0.14 ± 0.01) b
南方碱蓬	(1.17 ± 0.21) a	(1.35 ± 0.38) a	(0.28 ± 0.04) a
短叶茳芏	(0.81 ± 0.12) ab	(1.06 ± 0.11) ab	(0.14 ± 0.02) b
芦苇	(0.97 ± 0.13) a	(0.87 ± 0.16) ab	(0.16 ± 0.03) b

1) 表中数据为平均值 ± 标准误差; 同一列数据标注不同小写字母表示不同植物上覆水营养盐两两之间理化指标差异性达到显著性水平($P < 0.05$), 含有相同字母的表示无显著差异($P > 0.05$)

表 4　沼泽湿地上覆水营养盐浓度与水体理化性质间的相关关系1)

Table 4　Correlation between the nutrient concentrations and the physico-chemical properties of the overlying water in the wetland

	pH	氧化还原电位	盐度	水温	总溶解固体浓度	溶解氧浓度
NH_4^+-N浓度	−0.139	−0.114	−0.390**	−0.137	−0.358*	−0.527**
NO_3^--N浓度	−0.231	−0.179	−0.243*	−0.043	−0.282*	−0.085
PO_4^{3-}-P浓度	−0.087	−0.006	−0.029	0.104	−0.027	−0.160

1）＊＊表示在 $P<0.01$ 水平显著相关；＊表示在 $P<0.05$ 水平显著相关

指标之间相关性不显著($P>0.05$).

为进一步探讨上覆水各理化因子对上覆水NH_4^+-N、NO_3^--N浓度的贡献大小，利用多元回归分析中逐步回归法，分别建立上覆水NH_4^+-N、NO_3^--N浓度(分别为 Y_a、Y_b)与上覆水 pH 值(X_1)、氧化还原电位(X_2)、盐度(X_3)、水温(X_4)、总溶解性固体浓度(X_5)、溶解氧浓度(X_6)之间的最优回归方程(表5). 结果表明，上覆水NH_4^+-N浓度与上覆水溶解氧浓度相关性更明显，上覆水NO_3^--N浓度与上覆水总溶解性固体浓度相关性更明显.

表 5　上覆水氮营养盐与上覆水理化因子的多元回归线性拟合方程

Table 5　Multiple regression equations between the N nutrient concentrations and physico-chemical properties of the overlying water

因变量	回归方程	F 值	R^2	P
Y_a	$Y_a=-0.219X_6+2.729$	18.724	0.281	<0.01
Y_b	$Y_b=-0.025X_5+1.254$	4.159	0.08	<0.01

3　讨论

本研究结果表明，福清湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度在 5 个海湾和河口中处于较高水平. 原因在于：第一，福清湾地区大量水产养殖场的存在，特别是对虾养殖，有研究发现，2015 年福州市南美白对虾养殖总面积6 433.3 hm^2，在各县(市、区)中，福清市的养殖面积最大，达4 466.6 hm^2[18]，养殖产生的残饵和排泄物进入水体，以有机或无机物的溶解态和颗粒态存在，水体中 N、P 浓度升高，在水动力作用下，会影响到邻近水域生态环境[19~21]；第二，周边地区的农业活动以及工业废弃物的排放，福清湾直排入海的污染物量远大于福州其它的沿海县(市)，其中以畜禽养殖业的排污量尤为突出，人为增加了河口湿地上覆水体中的营养盐浓度；第三，福清湾东侧有平潭岛和一系列小岛阻隔，属半封闭形海湾，不利于与外海间的水质交换，污染物易积聚[12]，这些因素的综合作用，促使福清湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N、PO_4^{3-}-P浓度处于较高水平.

此外，兴化湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N浓度则比较低. 一方面，兴化湾沼泽湿地上覆水总溶解性固体浓度及盐度最高，说明其受到潮汐的影响较为显著，涨潮时，潮水一般会带来盐度较高(平均盐度 29.4 ~ 33.2)、营养盐浓度较低(活性磷酸盐：0.037 $mg\cdot L^{-1}$，无机氮：0.23 $mg\cdot L^{-1}$)的海水[10,22]，会对上覆水营养盐起到一定的稀释作用[23]，同时增加水体总溶解性固体浓度，这些潮水在河口和海湾停留一段时间，与陆源(包括河水和地下水)径流带来的营养盐浓度不同，会对河口和海湾上覆水中的营养盐浓度造成影响，相关研究表明，上覆水中的 NO_3^--N 浓度通常与盐度负相关[24,25]，当盐度增加时，沉积物中的硝化和反硝化速率会显著减小[26~30]，兴化湾采样点上覆水盐度、总溶解性固体浓度显著高于其它海湾和河口，因此其NO_3^--N浓度处于最低水平；另一方面，兴化湾沼泽湿地上覆水的溶解氧浓度最高，同样也表明其受潮汐扰动影响，促使水体溶解氧浓度增加，除此以外，该地区存在海带、紫菜、龙须菜等养殖活动，植物和藻类通过光合作用释放氧气[31]，使水体保持相对较高的溶解氧浓度，本研究中通过多元逐步回归分析发现，上覆水NH_4^+-N浓度更多受上覆水溶解氧浓度的影响，并与之呈显著负相关关系(表4)，这与大多数研究结果一致，较高的溶解氧环境会抑制或降低沉积物NH_4^+-N的释放[32~34]，因此兴化湾上覆水中NH_4^+-N浓度最低. 综合以上因素，使得兴化湾沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N浓度水平较低.

本研究中，南方碱蓬沼泽湿地上覆水中的氮营养盐浓度较高，这与其植株矮小、生物量低，因此对氮营养盐的吸收和转化能力差相关. 研究发现，湿地植物氮、磷吸收量与其生物量显著正相关[35~37]. 与其它植物群落相比，互花米草群落下的沼泽湿地上覆水中NH_4^+-N、NO_3^--N和PO_4^{3-}-P浓度相对较低，可能由于互花米草根系发达，地下部分通常由短而细的须根和长而粗的地下茎(根状茎)组成，能很好地将地上部分光合作用产生的氧气输送到根部，并从根毛分泌出来，致使根系周围的环境保持一定的好氧状态，为多种微生物生存创造了有利的条件，间接影响氮、磷的去除和转化，并且它具有更高的氮、磷吸收潜力，从而有利于对营养物质的吸收[38~42]. 本研究还发现，同一个海湾或

河口不同植物群落下沼泽上覆水中的营养盐浓度存在差异，可能因为不同植物群落位于河口、海湾的位置不同. 此外，不同植物对污染物质的去除能力和净化效果有较大的差异，这与植物的生长速度、生长阶段、植物的生物量、植物自身氮磷累积量和植物根际微生物作用有关[43~46].

4 结论

(1)福州市兴化湾(福州一侧)、福清湾、闽江口、敖江口和罗源湾 5 个海湾和河口沼泽湿地中，兴化湾沼泽湿地上覆水中的氮营养盐浓度最低，福清湾上覆水中的 N、P 营养盐浓度最高，主要与区域水产养殖、陆源污染、区域地形有关. 沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N浓度随水体盐度、总溶解性固体浓度、溶解氧浓度的增加而降低，受溶解氧浓度影响更显著，NO_3^--N浓度同样随水体盐度、总溶解性固体浓度的升高而降低，且总溶解性固体浓度对其影响更显著，而上覆水中的PO_4^{3-}-P浓度与水体各理化因子之间相关性并不显著.

(2)植被类型对同一河口/海湾内沼泽湿地上覆水营养盐浓度有一定影响，但规律复杂. 南方碱蓬群落沼泽湿地上覆水中的氮营养盐浓度较高，互花米草群落沼泽湿地上覆水中的NH_4^+-N、NO_3^--N和PO_4^{3-}-P浓度最低，这与植株的大小、生物量、根系发达程度有关.

参考文献：

[1] Wolanski E, Brinson M M, Cahoon D R, *et al*. Coastal wetlands: a synthesis[A]. In: Perillo G M E, Wolanski E, Cahoon D R, *et al* (Eds.). Coastal Wetlands: An Integrated Ecosystem Approach[M]. Amsterdam: Elsevier, 2009. 1-62.

[2] Eyre B D, McKee L J. Carbon, nitrogen, and phosphorus budgets for a shallow subtropical coastal embayment (Moreton Bay, Australia)[J]. Limnology and Oceanography, 2002, **47**(4): 1043-1055.

[3] 宋晓林，吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展[J]. 湿地科学，2009，**7**(4)：379-384.
Song X L, Lv X G. A review on the ecological restoration of degraded estuarine wetlands in China[J]. Wetland Science, 2009, **7**(4): 379-384.

[4] 董慧，郑西来，张健. 河口沉积物孔隙水营养盐分布特征及扩散通量[J]. 水科学进展，2012，**23**(6)：815-821.
Dong H, Zheng X L, Zhang J. Distribution of nutrients in interstitial water and diffusion flux in estuary[J]. Advances in Water Science, 2012, **23**(6): 815-821.

[5] Percuoco V P, Kalnejais L H, Officer L V. Nutrient release from the sediments of the Great Bay Estuary, N. H. USA[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2015, **161**: 76-87.

[6] Kelderman P, Kansiime F, Tola M A, *et al*. The role of sediments for phosphorus retention in the Kirinya wetland (Uganda)[J]. Wetlands Ecology and Management, 2007, **15**(6): 481-488.

[7] 杨东明，黄树辉，张雅琴，等. 三垟湿地沉积物—间隙水—上覆水界面磷形态研究[J]. 环境污染与防治，2012，**34**(1)：48-51.
Yang D M, Huang S H, Zhang Y Q, *et al*. Study on the phosphorus forms in the interface of sediment-interstitial water-surface water of Sanyang wetland[J]. Environmental Pollution and Control, 2012, **34**(1): 48-51.

[8] 陈渠. 基于3S的福建湿地类型及其分布研究[D]. 福州：福建师范大学，2007.
Chen Q. Study on wetland types and their distribution in Fujian based on 3S technologies[D]. Fuzhou: Fujian Normal University, 2007.

[9] 王春忠，陈晓，郑建峰. 福建兴化湾溶解无机氮、溶解无机磷时空变化及营养状态评价[J]. 生态科学，2011，**30**(6)：581-585.
Wang C Z, Chen X, Zheng J F. Temporal-spatial variation of dissolved inorganic nitrogen and dissolved inorganic phosphorus in seawater and assessments on nutrient level of the Xinghua bay[J]. Ecological Science, 2011, **30**(6): 581-585.

[10] 蔡玉婷，蔡建堤，陈财珍. 福建兴化湾环境质量评价与分析[J]. 海洋开发与管理，2013，**30**(1)：59-62.

[11] 林祥. 福清湾表层沉积物重金属分布及生态风险评价[J]. 福建水产，2012，**34**(3)：214-219.
Lin X. Distribution and ecological risk assessment of heavy metals in surface sediments of Fuqing bay[J]. Journal of Fujian Fisheries, 2012, **34**(3): 214-219.

[12] 张敏艳. 福州市近岸海域水质状况评价及污染原因分析[J]. 绿色科技，2012，(1)：98-100.

[13] 叶翔，陈坚，暨卫东，等. 闽江口营养盐生物地球化学过程研究[J]. 环境科学，2011，**32**(2)：375-383.
Ye X, Chen J, Ji W D, *et al*. Research the biogeochemical processes of nutrients in Minjiang estuary[J]. Environmental Science, 2011, **32**(2): 375-383.

[14] 郑小宏. 闽江口海域氮磷营养盐含量的变化及富营养化特征[J]. 台湾海峡，2010，**29**(1)：42-46.
Zheng X H. Changes in nitrogen and phosphate and eutrophication character in Minjiang Estuary[J]. Journal of Oceanography in Taiwan Strait, 2010, **29**(1): 42-46.

[15] 张超，马启敏. 罗源湾水质评价与富营养化研究[J]. 中国海洋大学学报，2011，**41**(S1)：398-402.
Zhang C, Ma Q M. Study on water quality assessment and eutrophication in the Luoyuan Bay[J]. Periodical of Ocean University of China, 2011, **41**(S1): 398-402.

[16] 王颢，杨琳，林志兰，等. 福建省罗源湾生源要素分布及结构的研究[J]. 海洋环境科学，2013，**32**(1)：95-98.
Wang H, Yang L, Lin Z L, *et al*. Research on distribution and structure of biogenic element in Luoyuan bay in Fujian Province[J]. Marine Environmental Science, 2013, **32**(1): 95-98.

[17] 孙东耀，仝川，陈坤龙，等. 台风"杜鹃"对闽江河口区沼泽土壤间隙水和潮水中营养盐含量的影响[J]. 湿地科学，2017，**15**(6)：809-817.
Sun D Y, Tong C, Chen K L, *et al*. Effects of Typhoon Dujuan on contents of nutrient in soil pore water of marshes and tidal water in Min River Estuary[J]. Wetland Science, 2017, **15**(6): 809-817.

[18] 陈颜锋，江小斌，杨小强. 福州市2015年南美白对虾养殖遇到的困境与应对策略[J]. 水产养殖，2016，**37**(8)：20-22.

[19] 蔡继晗，李凯，郑向勇，等. 水产养殖对环境的影响及其防治对策分析[J]. 水产养殖，2010，**31**(5)：32-38.
Cai J H, Li K, Zheng X Y, *et al*. The influences of aquaculture on environment and the prevention strategy analysis[J]. Journal

of Aquaculture, 2010, **31**(5): 32-38.

[20] 皮坤, 张敏, 李保民, 等. 主养草鱼与主养黄颡鱼池塘沉积物-水界面氮磷营养盐通量变化及与环境因子的关系[J]. 水产学报, 2018, **42**(2): 246-256.
Pi K, Zhang M, Li B M, *et al*. Diffusion fluxes of nitrogen and phosphorus across sediment-water interface in different aquaculture model ponds[J]. Journal of Fisheries of China, 2018, **42**(2): 246-256.

[21] 郭永坚, 沈勇平, 王芳, 等. 草鱼不同养殖模式实验围隔内沉积物-水界面营养盐通量的研究[J]. 水生生物学报, 2013, **37**(4): 595-605.
Guo Y J, Shen Y P, Wang F, *et al*. Nutrient fluxes across sediment-water interface in different *Grass carp* polyculture enclosures[J]. Acta Hydrobiologica Sinica, 2013, **37**(4): 595-605.

[22] 福建省海洋与渔业厅. 2015 年第 6 期海洋生态环境质量通报[EB/OL]. http://www.fujian.gov.cn/xw/ztzl/snfw/hjqx/hyhjzl/zyhwshjzltb/201606/P020180323856773305596.pdf, 2015.

[23] 杨丽标, 雷坤, 孟伟. 夏季大辽河河口区水体反硝化及其影响因素[J]. 环境科学, 2015, **36**(3): 905-913.
Yang L B, Lei K, Meng W. Denitrification in water of Daliao River Estuary in summer and the effect of environmental factors[J]. Environmental Science, 2015, **36**(3): 905-913.

[24] Berounsky V M, Nixon S W. Rates of nitrification along an estuarine gradient in Narragansett Bay[J]. Estuaries, 1993, **16**(4): 718-730.

[25] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, *et al*. Effects of salinity on NH_4^+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments[J]. Estuaries, 1999, **22**(1): 21-30.

[26] Magalhães C M, Joye S B, Moreira R M, Wiebe W J, Bordalo A A. Effect of salinity and inorganic nitrogen concentrations on nitrification and denitrification rates in intertidal sediments and rocky biofilms of the Douro River estuary, Portugal[J]. Water Research, 2005, **39**(9): 1783-1794.

[27] Osborne R I, Bernot M J, Findlay S E G. Changes in nitrogen cycling processes along a salinity gradient in tidal wetlands of the Hudson River, New York, USA[J]. Wetlands, 2015, **35**(2): 323-334.

[28] 汪旭明, 任洪昌, 仝川. 盐度对河口潮汐湿地温室气体产生和排放的影响研究进展[J]. 湿地科学, 2014, **12**(6): 814-820.
Wang X M, Ren H C, Tong C. Effect of salinity on production and emission of greenhouse gases in estuarine tidal wetlands: a review[J]. Wetland Science, 2014, **12**(6): 814-820.

[29] 张林海, 刘荣芳, 仝川, 等. 盐度对闽江河口淡水洲滩土壤潜在反硝化速率及脱氮效率的影响[J]. 湿地科学, 2015, **13**(5): 528-534.
Zhang L H, Liu R F, Tong C, *et al*. Effect of salinity on the potential denitrification rate and nitrogen removal of the Min River Estury freshwater river beach Soil[J]. Wetland Science, 2015, **13**(5): 528-534.

[30] Marton J M, Herbert E R, Craft C B. Effects of salinity on denitrification and greenhouse gas production from Laboratory-incubated tidal forest soils[J]. Wetlands, 2012, **32**(2): 347-357.

[31] 胡茂俊, 刘新红, 高岩, 等. 城市污水的微生物-植物联合修复对水体N_2O、N_2 和 O_2 释放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, **33**(1): 35-42.
Hu M J, Liu X H, Gao Y, *et al*. Effect of microorganism-plant joint remediation on N_2O, N_2 and O_2 release flux from polluted waters in urban river[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2016, **33**(1): 35-42.

[32] 蒋小欣, 阮晓红, 邢雅囡, 等. 城市重污染河道上覆水氮营养盐浓度及 DO 水平对底质氮释放的影响[J]. 环境科学, 2007, **28**(1): 87-91.
Jiang X X, Ruan X H, Xing Y N, *et al*. Effects of nutrient concentration and DO status of heavily polluted urban stream water on nitrogen release from sediment[J]. Environmental Science, 2007, **28**(1): 87-91.

[33] 邱昭政, 颜昌宙, 赵艳玲, 等. 不同溶氧条件下九龙江口湿地沉积物-水界面氨氮释放与氧化规律[J]. 生态环境学报, 2011, **20**(12): 1902-1908.
Qiu Z Z, Yan C Y, Zhao Y L, *et al*. The release and oxidation of ammonia at the sediment-water interface of Jiulong River Estuary wetland under different oxygen conditions[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2011, **20**(12): 1902-1908.

[34] 闫兴成, 王明玥, 许晓光, 等. 富营养化湖泊沉积物有机质矿化过程中碳、氮、磷的迁移特征[J]. 湖泊科学, 2018, **30**(2): 306-313.
Yan X C, Wang M Y, Xu X G, *et al*. Migration of carbon, nitrogen and phosphorus during organic matter mineralization in eutrophic lake sediments[J]. Journal of Lake Sciences, 2018, **30**(2): 306-313.

[35] Fukuhara H, Nemoto F, Takeuchi Y, *et al*. Nitrate dynamics in a reed belt of a shallow sand dune lake in Japan: analysis of nitrate retention using stable nitrogen isotope ratios[J]. Hydrobiologia, 2007, **584**(1): 49-58.

[36] Sousa A I, Lillebø A I, Caçador I, *et al*. Contribution of *Spartina maritima* to the reduction of eutrophication in estuarine systems[J]. Environmental Pollution, 2008, **156**(3): 628-635.

[37] 刘佩佩, 白军红, 王婷婷, 等. 白洋淀优势植物群落生物量及其影响因子[J]. 湿地科学, 2013, **11**(4): 482-487.
Liu P P, Bai J H, Wang T T, *et al*. Biomass of dominant plant communities and their influencing factors in Baiyangdian Lake[J]. Wetland Science, 2013, **11**(4): 482-487.

[38] 曾艳, 田广红, 陈蕾伊, 等. 互花米草入侵对土壤生态系统的影响[J]. 生态学杂志, 2011, **30**(9): 2080-2087.
Zeng Y, Tian G H, Chen L Y, *et al*. Influence of *Spartina alterniflora* invasion on soil ecosystem: a review[J]. Chinese Journal of Ecology, 2011, **30**(9): 2080-2087.

[39] 王伟伟, 李道季, 高磊. 盐沼植物对沉积物间隙水营养盐分布的影响[J]. 环境科学, 2009, **30**(11): 3209-3217.
Wang W W, Li D J, Gao L. Vegetation influence on nutrients distribution in pore water of salt marsh sediment[J]. Environmental Science, 2009, **30**(11): 3209-3217.

[40] 杨永兴, 刘长娥, 杨杨. 长江河口九段沙互花米草湿地生态系统 N、P、K 的循环特征[J]. 生态学杂志, 2009, **28**(2): 223-230.
Yang Y X, Liu C E, Yang Y. Characteristics of N, P and K cycling in *Spartina alterniflora* wetland ecosystem in Jiuduansha shoal of Yangtze River estuary[J]. Chinese Journal of Ecology, 2009, **28**(2): 223-230.

[41] Huett D O, Morris S G, Smith G, *et al*. Nitrogen and phosphorus removal from plant nursery runoff in vegetated and unvegetated subsurface flow wetlands[J]. Water Research, 2005, **39**(14): 3259-3272.

[42] Yang Q, Chen Z H, Zhao J G, *et al*. Contaminant removal of domestic wastewater by constructed wetlands: effects of plant species[J]. Journal of Integrative Plant Biology, 2007, **49**(4):

437-446.

[43] Gentry L E, David M B, Below F E, *et al*. Nitrogen mass balance of a tile-drained agricultural watershed in east-central Illinois[J]. Journal of Environmental Quality, 2009, **38**(5): 1841-1847.

[44] Yang F, Yan Z Y, Liu Y N, *et al*. Research on the plant selection of buffer zone and pollutants removal ability of plants in Ashi River basin[J]. Applied Mechanics and Materials, 2014, **692**: 44-49.

[45] 邵学新, 李文华, 吴明, 等. 杭州湾潮滩湿地3种优势植物碳氮磷储量特征研究[J]. 环境科学, 2013, **34**(9): 3451-3457.
Shao X X, Li W H, Wu M, *et al*. Dynamics of carbon, nitrogen and phosphorus storage of three dominant marsh plants in Hangzhou bay coastal wetland[J]. Environmental Science, 2013, **34**(9): 3451-3457.

[46] 张树楠, 肖润林, 刘锋, 等. 生态沟渠对氮、磷污染物的拦截效应[J]. 环境科学, 2015, **36**(12): 4516-4522.
Zhang S N, Xiao R L, Liu F, *et al*. Interception effect of vegetated drainage ditch on nitrogen and phosphorus from drainage ditches[J]. Environmental Science, 2015, **36**(12): 4516-4522.

《环境科学》再获“百种中国杰出学术期刊”称号

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 40 No. 4

Apr. 15, 2019

CONTENTS

Source Apportionment and Mixing State of Single Particles in the Nanjing Jiangbei New Area ······ YU Xing-na, SHI Zheng, MA Jia, *et al.* (1521)
Characteristics of Carbonaceous Aerosol Pollution in $PM_{2.5}$ in Xi'an ······ MU Zhen, CHEN Qing-cai, WANG Yu-qin, *et al.* (1529)
Chemical Composition Characteristics and Source Apportionment of $PM_{2.5}$ During Winter in Taiyuan ······ LIU Su, MA Tong, YANG Yan, *et al.* (1537)
Seasonal Variation and Source Analysis of Water-soluble Inorganic Ions in Fine Particulate Matter in Zhengzhou ······ YAN Guang-xuan, ZHANG Jing-wen, LEI Hao-jie, *et al.* (1545)
Elemental Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in Atmospheric $PM_{2.5}$ in a Suburb of Zhuhai City ······ YANG Yi-hong, JIA Yan, BIAN Guo-jian, *et al.* (1553)
Impact of a Dust Event on the Size Distribution of Metal Elements in Atmospheric Aerosols at a Coastal Region and over the Ocean ······ JIN Tong-jun, QI Jian-hua, XI Zi-yan, *et al.* (1562)
CALPUFF Modeling of the Influence of Typical Industrial Emissions on $PM_{2.5}$ in an Urban Area Considering the SOA Transformation Mechanism ··· GAO Shuang, BO Xin, MA Yan, *et al.* (1575)
Variation in Pollutant Concentrations and Correlation Analysis with the Vegetation Index in Beijing-Tianjin-Hebei ······ SUN Shuang, LI Ling-jun, ZHAO Wen-ji, *et al.* (1585)
Estimation of Coal Consumption and the Emission of Related Contaminants in the Plain Area Around Beijing During 2015-2017 ······ ZHAO Wen-hui, LI Ling-jun, LU Hai-feng, *et al.* (1594)
Column-integrated Aerosol Optical Properties Determined Using Ground-based Sun Photometry Measurements in the Hangzhou Region ······ QI Bing, CHE Hui-zheng, XU Ting-ting, *et al.* (1604)
Speciated VOCs Emission Inventory and Ozone Formation Potential in Sichuan Province ······ ZHOU Zi-hang, DENG Ye, TAN Qin-wen, *et al.* (1613)
Characterization of Volatile Organic Compounds from Cooking Emissions ······ GAO Ya-qin, WANG Hong-li, XU Rui-zhe, *et al.* (1627)
Analysis of Peroxyacetyl Nitrate and Ozone During a Typical Photochemical Pollution Process at the Panyu Atmospheric Composition Station ······ ZOU Yu, DENG Xue-jiao, LI Fei, *et al.* (1634)
Characteristics and Interannual Variation of Chemical Components in Typical Road Dust in Beijing ······ HU Yue-qi, LI Meng, YAN Xu, *et al.* (1645)
Sources Analysis and Health Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the $PM_{2.5}$ Fraction of Fugitive Dust in Nanchang City ······
······ YU Rui-lian, ZHENG Quan, LIU Xian-rong, *et al.* (1656)
Methods and Application of Road Fugitive Dust Emission Factor Localization ······ FAN Shou-bin, YANG Tao, WANG Kai, *et al.* (1664)
Characterization of Tailpipe Emissions from in-use Excavators ······ MA Shuai, ZHANG Kai-shan, WANG Fan, *et al.* (1670)
Microbial Properties of Different Size Aerosols at Human Average Respiratory Height During Fog-haze Days ······ YANG Tang, HAN Yun-ping, LI Lin, *et al.* (1680)
Modification and Performance Tests of Visibility Parameterizations for Haze Days ······ ZHAO Xiu-juan, LI Zi-ming, XU Jing (1688)
Application of Support Vector Machine Regression in Ozone Forecasting ······ SU Xiao-qian, AN Jun-lin, ZHANG Yu-xin, *et al.* (1697)
Analysis of PHEV CO_2 Emission Based on China's Grid Structure and Travelling Patterns in Mega Cities ······ HAO Xu, WANG He-wu, LI Wei-feng, *et al.* (1705)
Sources of Nitrate in Groundwater and Its Environmental Effects in Karst Trough Valleys: A Case Study of an Underground River System in the Longfeng Trough Valley, Chongqing ······
······ DUAN Shi-hui, JIANG Yong-jun, ZHANG Yuan-zhu, *et al.* (1715)
Pollution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Phthalate Esters (PAEs) in the Surface Water of Jiaozhou Bay ······ LIU Cheng, SUN Cui-zhu, ZHANG Ge, *et al.* (1726)
Distribution Characteristics and Ecological Risk Assessment of Organochlorine Pesticides in Sediments of Zhanjiang Bay ······ PENG Shi-yun, PENG Ping-an, KONG De-ming, *et al.* (1734)
Analysis of the Optical Properties and Factors Influencing DOM in an Ecological Purification System: A Case Study of Yanlong Lake in Spring ······ MA Rui, LI Xuan, WANG Lian, *et al.* (1742)
Analysis of the Relationship Between Dissolved Organic Matter (DOM) and Watershed Land-use Based on Three-dimensional Fluorescence-Parallel Factor (EEM-PARAFAC) Analysis ······
······ LI Yun, WEI Hong-jie, WANG Kan, *et al.* (1751)
Analysis of the Characteristics of Nitrogen and Phosphorus Emissions from Agricultural Non-point Sources on Hanfeng Lake Basin ······ XIE Jing-chao, ZHAO Xiu-lan, HE Bing-hui, *et al.* (1760)
Simulation of the Migration and Leaching of Nitrate Nitrogen in the Farmland Soil Profile in a Hilly Area of Taihang Mountain with the RZWQM Model ······
······ ZHENG Wen-bo, WANG Shi-qin, LIU Bing-xia, *et al.* (1770)
Spatial Distribution Characteristics of Nutrients and Chlorophyll A in the Lancang River Basin Under Cascade Reservoirs ······ CHENG Bao, WANG Xue, MA Jin-chuan, *et al.* (1779)
Nutrient Distribution of Overlying Water in Tidal Marshes in Five Estuaries and Bays of the Fuzhou Region in Autumn ······ HE Lu-lu, YANG Ping, TAN Li-shan, *et al.* (1788)
Distribution and Environmental Risk of Pharmaceutically Active Compounds in the Traditionally Aqueous Phase of Effluent-receiving Rivers ······
······ WANG Shuo, LIU Jian-chao, ZHENG Chao-ya, *et al.* (1797)
Effects of a Green Roof on Stormwater Regulation and Cost-benefit Analysis ······ LI Jun-sheng, YIN Hai-wei, KONG Fan-hua, *et al.* (1803)
Ultrasonically Activated Persulfate Degrades Typical Odors in Water ······ SUN Xin, SUN Jie, LI Peng-fei, *et al.* (1811)
Metal Organic Framework MIL-53(Fe) as a Photocatalyst for Visible-light Catalytic Reduction of U(Ⅵ) in Aqueous Solution ······ YAN Zeng-yuan, XI Hai-ling, YUAN Li-yong (1819)
Effects and Differences of the Release of Dissolved Organic and Inorganic Phosphorus in Different Sediments Covered by Different Materials of Erhai Lake ······
······ GONG Jia-jian, NI Zhao-kui, XIAO Shang-bin, *et al.* (1826)
Phosphate Removal Using Rice Husk Biochars Modified with Lanthanum Hydroxide ······ XU Run, SHI Cheng-hao, TANG Qian, *et al.* (1834)
Characteristics and Heavy Metal Adsorption Performance of Sewage Sludge-derived Biochar from Co-pyrolysis with Transition Metals ······ CHEN Tan, ZHOU Ze-yu, MENG Rui-hong, *et al.* (1842)
Adsorption, Reclaim, and Regeneration of Cd by Magnetic Calcium Dihydrogen Phosphate Nanoparticles ······ LI Yu-jiao, YANG Zhi-min, CHEN Yu-cheng, *et al.* (1849)
Effect of Hematite on the Inhibition of Hydrogen Sulfide Formation and Its Mechanism During Anaerobic Digestion and Methanogenesis of Sulfate Wastewater ······
······ HUANG Shao-fu, YE Jie, ZHOU Shun-gui (1857)
Pollutant Removal Performance and Membrane Fouling Characteristics in Marine Aquaculture Wastewater Treatment by a Microalgae Membrane Reactor ······
······ MA Hang, LI Zhi-peng, LIU Feng, *et al.* (1865)
Pre-precipitation of Sewage-SNAD Granular Sludge Process Test ······ LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, *et al.* (1871)
Impact of Actual Domestic Sewage and Simulated Wastewater on an Aerobic Granular Sludge System ······ LI Dong, WANG Ying-qiao, LI Shuai, *et al.* (1878)
Nitrogen Removal Performance of a Sulfur/Pyrite Autotrophic Denitrification System ······ ZHOU Ya, MAI Wen-ning, LIANG Jia-wei, *et al.* (1885)
Nitrogen Removal by Heterotrophic Nitrifying Bacterium *Pseudomonas putida* YH and Its Kinetic Characteristics ······ WANG Xu-hui, YANG Lei, REN Yong-xiang, *et al.* (1892)
Effect of Sludge Retention Time and pH on the Denitrifying Phosphorus Removal Process ······ WEI Jia-min, HUANG Hui-min, CHENG Cheng, *et al.* (1900)
Microbial Community of Granular Sludge in an ANAMMOX-EGSB Reactor Under Saline Conditions ······ WANG Han, LI Han-xiang, CHEN You-peng, *et al.* (1906)
Effect of Intracellular Carbon Source (PHA) Storage on the Mixed Growth Microbial Community Resistance to Low Temperature ······ YANG Jian-peng, ZHANG Jian, TIAN Qing, *et al.* (1914)
Contents and Forms of Phosphorous in the Municipal Sewage Sludge of China ······ WANG Chao, LIU Qing-wei, ZHI Yin, *et al.* (1922)
Contamination Characteristics and Safety Risk Assessment of Perflurorinated Alkylated Substances in Aquatic Products from Guangzhou ······
······ WANG Xu-feng, WANG Qiang, LI Zhi-guang, *et al.* (1931)
Characteristics of the Dissolved Nitrous Oxide (N_2O) Concentrations and Influencing Factors in a Representative Agricultural Headwater Stream in the Upper Reach of the Yangtze River
······ TIAN Lin-lin, WANG Zheng, HU Lei, *et al.* (1939)
CH_4 Uptake in Different Saline-alkaline Soils in Hetao Irrigation District, Inner Mongolia ······ YANG Wen-zhu, JIAO Yan, YANG Ming-de, *et al.* (1950)
Allocation and Stabilization Responses of Rice Photosynthetic Carbon in the Plant-Soil System to Phosphorus Application ······ WANG Ying-ying, XIAO Mou-liang, ZHANG Yun, *et al.* (1957)
Effect of Soil Moisture and Temperature on the Soil Inorganic Carbon Release of Brown Limestone Soil in the Karst Region of Southwestern China ······
······ XU Xue-chi, HUANG Yuan, HE Xun-yang, *et al.* (1965)
Temporal and Spatial Dynamics of Soil Microbial Biomass Carbon and Its Influencing Factors on an Eroded Slope in the Hilly Loess Plateau Region ······
······ QIN Qian, ZHU Shi-shuo, XIA Bin, *et al.* (1973)
Composition, Characteristics, and Accumulation of Antibiotics in the Soil in Agricultural Land ······ KONG Chen-chen, ZHANG Shi-wen, NIE Chao-jia, *et al.* (1981)
VOCs and Odors Control and Development in Pharmaceutical Fermentation Industry ······ WANG Dong-sheng, ZHU Xin-meng, YANG Xiao-fang, *et al.* (1990)