ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第39卷 第9期

Vol.39 No.9

2018

中国科学院生态环境研究中心 主办

科学出版社 出版

环境科学
(HUANJING KEXUE)
ENVIRONMENTAL SCIENCE
第 39 卷 第 9 期
2018 年 9 月 15 日

目　次

长三角区域非道路移动机械排放清单及预测 …… 黄成，安静宇，鲁君(3965)
基于 COPERT 模型的江苏省机动车时空排放特征与分担率 …… 李荔，张洁，赵秋月，李慧鹏，韩军赞(3976)
上海典型燃烧源铅和汞大气排放趋势分析 …… 杨静，陈龙，刘敏，孟祥周，张希(3987)
广东省秸秆燃烧大气污染物及 VOCs 物种排放清单 …… 孙西勃，廖程浩，曾武涛，张永波，梁小明，叶代启(3995)
重庆市北碚城区气溶胶中水溶性无机离子的质量浓度及其粒径分布 …… 李彦沛，郝庆菊，温天雪，吉东生，刘子锐，王跃思，江长胜(4002)
济南市夏、冬季 $PM_{2.5}$ 中化学组分的季节变化特征及来源解析 …… 刘晓迪，孟静静，侯战方，李静，邢继钊，魏本杰，张二勋，刘加珍，董杰(4014)
聊城冬季一重污染过程 $PM_{2.5}$ 污染特征及成因分析 …… 张敬巧，吴亚君，张萌，王涵，陈振兴，胡君，李慧，范晓龙，柴发合，王淑兰(4026)
夏季青岛大气气溶胶中不同形态磷的浓度、来源及沉降通量 …… 王楠，马淼，石金辉，高会旺，姚小红(4034)
晋城市冬季环境空气中挥发性有机物的污染特征及来源解析 …… 杨帆，闫雨龙，戈云飞，李如梅，李颖慧，余化龙，彭林(4042)
北京冬季降尘重金属富集程度及综合污染评价 …… 熊秋林，赵文吉，李大军，周涛(4051)
合肥市典型交通干道大气苯系物的特征分析 …… 孟凡昊，秦敏，梁帅西，谢品华，夏晖晖，段俊，方武，唐科，李昂，魏桢，王凤(4060)
填埋场作业面 NMOCs 臭氧生成潜势及高贡献物质 …… 李昊，刘彦君，陈坦，闫秋鹤，代辉祥，王洪涛，陆文静(4070)
北京市混凝土搅拌站风蚀扬尘排放特征 …… 李贝贝，韩凯丽，秦建平，王鑫，宋博，黄玉虎，张春来(4078)
基于源解析的傍河水源地污染风险季节性变化特征分析 …… 高翔，左锐，郭学茹，孟利，刘鑫，王膑，滕彦国，王金生(4086)
透水路面-生物滞留池组合道路的城市面源污染控制效果评估 …… 宫曼莉，左俊杰，任心欣，赵洪涛，罗茜，廖云杰，李叙勇(4096)
黄河兰州段水体中有色溶解性有机质组成、空间分布特征及来源分析 …… 赵夏婷，李珊，王兆炜，谢晓芸(4105)
黄河干流宁蒙段溶解性有机物组分特征及其与金属离子的相关性 …… 席玥，王婷，倪晋仁，韩鹏，仪马兰，郑彤，蒋咏，马若绮，崔锋(4114)
伊洛河和浑太河春季水体光学吸收特征的对比 …… 李柳阳，邵田田，张鑫，宋炎炎，苏东辉，王涛(4122)
马莲河流域化学风化的季节变化和影响因素 …… 王雨山，韩双宝，邓启军，祁晓凡(4132)
柳江盆地浅层地下水硝酸型水特征和成因分析 …… 徐进，何江涛，彭聪，曾颖(4142)
地下水氮污染原位修复缓释碳源材料的研发与物化-生境协同特性 …… 张雯，尹琳，周念清(4150)
三峡水库干流沉积物及消落带土壤磷形态及其分布特征 …… 张志永，万成炎，胡红青，彭建华，侯娟，丁庆秋，袁玉洁(4161)
蓄水前后三峡库区香溪河沉积物磷形态分布特征及释放通量估算 …… 刘心愿，宋林旭，纪道斌，刘德富，李欣，黄佳维，赵冲，唐咏春，平明明(4169)
锆改性沸石添加对重污染河道底泥磷释放和钝化的影响 …… 何思琪，张薇，林建伟，詹艳慧，李娟英，邢云青，高春梅，黄宏，梁舒静(4179)
洱海流域乡镇尺度上人类活动对净氮输入量的影响 …… 李影，刘宏斌，雷秋良，胡万里，王洪媛，翟丽梅，任天志，连慧姝(4189)
我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应 …… 聂家琴，王东启，陈杰，李杨杰，陈姝，陈振楼(4199)
东太湖水产养殖对沉积物中氨氧化原核生物的影响 …… 储瑜，何肖微，曾巾，赵大勇，孙强，曹萍，吴庆龙(4206)
处理采矿废水湿地沉积物中厌氧氨氧化过程 …… 汪海波，马丁，岳正波，陶巍，陈天虎，王进(4215)
华东地区某饮用水源地中磺胺类抗性基因的分布特征 …… 胡亚茹，姜蕾，张天阳，雷丹丹，姜巍巍，张东，林匡飞，崔长征(4222)
制革废水处理过程中磺胺类抗生素和抗性细菌的分布特征 …… 花莉，李璐，杨春燕(4229)
人工湿地不同基质和粒径对污水净化效果的比较 …… 赵林丽，邵学新，吴明，姜小三，陆琳莹(4236)
城市污水管网中不同生化作用的基质流向 …… 姚翔译，石烜，桑浪涛，金鹏康，王晓昌(4242)
微絮凝对腐殖酸超滤过程膜污染的减缓特性 …… 王旭东，石彩霞，廖正伟，贺酰淑，王磊(4249)
UV 强化草酸络合 Fe^{3+} 活化过硫酸盐氧化降解苯胺 …… 韩东晖，李瑛，李开明，应光国(4257)
焦化废水 A/O^2 和 A/O/H/O 处理工艺中多环芳烃的削减行为分析 …… 吴海珍，孙胜利，刘国新，韦景悦，吴超飞，韦朝海，钟练文，彭亚环(4265)
长期侧流提取对 EBPR 系统除磷及其磷回收性能的影响 …… 俞小军，李杰，周猛，宋璐，李维维，王亚娥，马娟，吕慧(4274)
NaCl 盐度对 A^2/O 工艺缺氧区胞外聚合物及生物絮凝性的影响 …… 张兰河，田蕊，郭静波，贾艳萍，张海丰，李正，陈子成(4281)
温度和 pH 值对铁盐型氨氧化过程氮素转化的影响 …… 陈方敏，金润，袁砚，李祥，黄勇，顾澄伟(4289)
游离氨(FA)对氨氧化菌(AOB)活性抑制动力学试验 …… 孙洪伟，于雪，高宇学，李维维，祁国平，许涓(4294)
HRT 对厌氧氨氧化协同异养反硝化脱氮的影响 …… 安芳娇，赵智超，黄利，黄剑明，邵兆伟，陈永志(4302)
长期储存亚硝化絮状污泥活性的恢复 …… 李田，魏凡凯，汪裕昌，沈耀良，吴鹏，宋吟玲(4310)
广西西江流域农田土壤重金属含量特征及来源解析 …… 宋波，张云霞，庞瑞，杨子杰，宾娟，周子阳，陈同斌(4317)
紫色土壤有机碳活性组分对生物炭施用量的响应 …… 罗梅，田冬，高明，黄容(4327)
秸秆及生物炭还田对油菜/玉米轮作系统碳平衡和生态效益的影响 …… 李娇，田冬，黄容，徐国鑫，黎嘉成，高明，王子芳(4338)
低积累水稻品种联合腐殖酸、海泡石保障重镉污染稻田安全生产的潜力 …… 谢晓梅，方至萍，廖敏，黄宇，黄小辉(4348)
臭氧和干旱交互作用对杨树叶片抗氧化酶活性的影响 …… 周慧敏，李品，高峰，冯兆忠，张殷波(4359)
再生水不同灌水水平对土壤酶活性及耐热大肠菌群分布的影响 …… 韩洋，李平，齐学斌，崔丙健，常迪，马欢欢(4366)
黄淮海地区鸡粪有机肥重金属含量特征及环境风险 …… 李发，徐应明，王林，梁学峰，孙约兵，纪艺凝，栾润宇(4375)
村镇生活垃圾重金属含量及其来源分析 …… 靳琪，高红，岳波，黄启飞，王瑜堂，吴小卉，於俊颖，杨惠媛(4385)
《环境科学》征订启事(3986)　《环境科学》征稿简则(4050)　信息(4085，4104，4337)

第 39 卷第 9 期
2018 年 9 月
环 境 科 学
ENVIRONMENTAL SCIENCE
Vol. 39, No. 9
Sep., 2018

我国典型潮间带沉积物-水界面无机氮源汇效应

聂家琴[1,2], 王东启[1,2*], 陈杰[1,2], 李杨杰[1,2,3], 陈姝[1,2], 陈振楼[1,2]
(1. 华东师范大学地理科学学院, 上海 201100; 2. 地理信息科学教育部重点实验室, 上海 201100; 3. 国家海洋局第二海洋研究所, 杭州 310012)

摘要: 以中国东部沿海 12 个典型潮间带为研究对象, 通过室内模拟测定了潮间带沉积物-水界面硝酸盐(NO_3^-)和氨氮(NH_4^+)的源汇通量, 分析了沉积物对上覆水体无机氮源汇效应的空间分布特征, 以及环境因子的影响. 结果发现: ① NO_3^--N 的总通量范围是 −2.91 ~ 3.34 mmol·(m²·h)⁻¹, NH_4^+-N的总通量范围是 −4.36 ~ 2.34 mmol·(m²·h)⁻¹. 12℃和35℃温度下, 无机氮的平均值是 −0.04 mmol·(m²·h)⁻¹, 我国东部典型潮间带沉积物表现为氨氮和硝氮的有效汇库. ② 潮间带的硝氮和氨氮通量存在纬度分异. 12℃时, 纬度越高, 氨氮硝氮通量值越大; 25℃和 35℃时, 潮间带硝氮通量值大小随纬度的变化为, 25° ~ 35°N < 15° ~ 25°N < 35° ~ 45°N. 而氨氮通量值, 25° ~ 35°N > 15° ~ 25°N > 35° ~ 45°N. ③ 温度通过影响硝化反硝化的耦合作用影响无机氮通量. 潮间带的NO_3^--N通量随温度的增加而减小, 15° ~ 25°N 和 35° ~ 45°N 地区NO_3^--N通量随温度先升高再降低, 25° ~ 35°N 地区NO_3^--N通量随温度一直减小. 每个纬度区, 温度越高, NH_4^+-N通量值越低. ④ 上覆水体的盐度、沉积物总有机碳(TOC)、总氮(TN)含量, 孔隙水氨氮、硝氮浓度, 容重等环境因子对通量没有单一的显著影响, 协同影响NO_3^--N、NH_4^+-N在潮滩沉积物水界面的空间分异.

关键词: 潮间带; 无机氮通量; 空间分布; 温度; 沉积物水界面
中图分类号: X52 **文献标识码**: A **文章编号**: 0250-3301(2018)09-4199-07 **DOI**: 10.13227/j.hjkx.201712094

Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China

NIE Jia-qin[1,2], WANG Dong-qi[1,2*], CHEN Jie[1,2], LI Yang-jie[1,2,3], CHEN Shu[1,2], CHEN Zhen-lou[1,2]
(1. School of Geographic Sciences, East China Normal University, Shanghai 201100, China; 2. Key Laboratory of Geographic Information Science of the Ministry of Education, East China Normal University, Shanghai 201100, China; 3. Second Institude of Oceanography, State Oceanic Administration, Hangzhou 310012, China)

Abstract: Taking 12 typical intertidal zones along the eastern coast of China as the research object, indoor tide simulation experiments were conducted to measure exchange fluxes of nitrate nitrogen (NO_3^--N) and ammonia nitrogen (NH_4^+-N) between overlying water and sediments, to investigate their spatial distribution, and to clarify controlling factors such as salinity, temperature, and organic matter. Results showed that the total NO_3^--N flux was −2.91-3.34 mmol·(m²·h)⁻¹, while the total flux of NH_4^+-N was −4.36-2.34 mmol·(m²·h)⁻¹. The average flux, at 12℃ and 35℃, was −0.04 mmol·(m²·h)⁻¹, indicating that typical intertidal zone sediment is an effective sink for ammonia nitrogen and nitrate nitrogen. There was a significant difference in the spatial distribution of nitrate and ammonia nitrogen fluxes. At 12℃, the higher the latitude, the greater the ammonia nitrogen flux; results for the 25°-35°N intertidal nitrate flux were as follows: < 15°-25°N < 35°-45°N at 25℃ and 35℃, while the flux of ammonia nitrogen was 25°N-35°N > 15°-25°N > 35°-45°N. The fluxes of the three intertidal zones decreased with increase in temperature, which controls the coupled nitrification-denitrification taking place in the upper layer of sediment and at the bottom of overlying water. NO_3^--N fluxes first increased and then decreased with temperature at 15°-25°N and 35°-45°N, while NO_3^--N fluxes at 25°-35°N always decreased with temperature. At each latitude, the higher the temperature, the lower the NH_4^+-N flux. There was no single significant effect of environmental factors on fluxes. Salinity, sediment organic carbon (OC), sediment total nitrogen (TN), concentrations of ammonia nitrogen and nitrate nitrogen in pore water, and bulk density synergistically affected the spatial differentiation of exchanged NO_3^--N and NH_4^+-N fluxes.

Key words: intertidal zone; dissolved inorganic nitrogen flux; spatial distribution; temperature; sediment-water interface

潮间带是海陆交替的过渡地带之一, 在削减入海径流的营养元素的过程中扮演重要角色[1]. 同时由于污染而不断累积和元素再循环, 潮滩沉积物又可能变成次生污染源, 加剧海岸带和河口区的富营养化[1~3]. 近年来, 随着人口和经济迅猛增长, 我国河口和近海区水体富营养化加剧, 许多学者在我国各个河口和潮间带开展了大量的氮素循环研究[1,4~6], 分析和讨论了环境因子, 如 TOC、TN、盐度、季节、沉积物形态、温度等的影响, 以及控制

收稿日期: 2017-12-12; **修订日期**: 2018-03-13
基金项目: 国家自然科学基金项目(41473094, 41671467); 科技部科技基础性工作专项(2014FY210600)
作者简介: 聂家琴(1992 ~), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为湿地生物地球化学, E-mail: 770459396@qq.com
* 通信作者, E-mail: dqwang@geo.ecnu.edu.cn

机制[7~10]，其中沉积物-水界面氮通量是评价潮滩削减或增加水体污染的重要指标.

陈振楼等[4]对长江口不同地区潮间带的研究发现，河口区上下游沉积物-水界面NO_3^--N通量的季节变化明显，且无机氮通量受TOC、沉积物粒度、水温等因素的综合影响. 王东启等[5]研究崇明东滩沉积物不同盐度上覆水体发现，盐度影响潮滩沉积物中微生物的生理活动，进而影响NH_4^+-N的通量变化. Koomklang等[6]对日本的Shido Bay研究发现，沉积物表层会向上覆水体释放更多NH_4^+-N，温度越高，沉积物越表现为上覆水体NH_4^+-N的源. Poulin等[11]对St. Lawrence河口的研究发现，河口沉积物主要表现为上覆水体NO_3^--N的汇，NH_4^+-N的源. Hopkinson等[12]对Massachusetts和Cape Cod海湾的研究发现，温度和呼吸作用是影响沉积物水界面无机氮通量的主要因素，而不是有机碳、沉积物类型等其他环境因素.

本文选取了中国东部典型海岸带潮间带为研究对象，通过实验室微环境模拟，探讨了不同温度条件下，中国东部海岸不同纬度地区潮间带沉积物-水界面无机氮交换特征，分析了对不同纬度潮间带沉积物对上覆水体无机氮的源汇特征，以及温度、盐度、沉积物类型等环境因子的影响，以期对不同纬度地区潮滩的污染治理、环境管理和生态保护提供数据支持.

1 材料与方法

1.1 样品的采集

沿着中国东部海岸线由北向南分别选取了12个典型潮间带，辽宁大辽河口(LH)、天津汉沽涧河河口(HG)、山东东营黄河口(DY)、山东青岛大沽河(QD)、江苏盐城浅滩(YC)、上海崇明岛东滩(DT)、浙江慈溪(CX)、福建福州闽江口(FZ)、厦门九龙江口(JL)、广东珠江口(ZJ)、广西英罗湾(YL)、海南东寨港(DZ). 选定滩面底质类型相对均匀、潮间带完整、人为扰动较小且相对稳定的潮间带区域进行取样. 各采样区域分布如图1所示，12个典型潮间带南北纬跨度大，包含温带季风气候区和亚热带季风气候区. 综合了沉积物类型、发育特点、植被类型的典型潮间带，每个潮间带区域设1~4个采样站，总共26个采样站，每个采样站2~3个平行样，使用自制的螺旋盖有机玻璃管采集了沉积物原位柱样样品67个，并用盐度计(YSI 30)现场测定上覆水体的盐度.

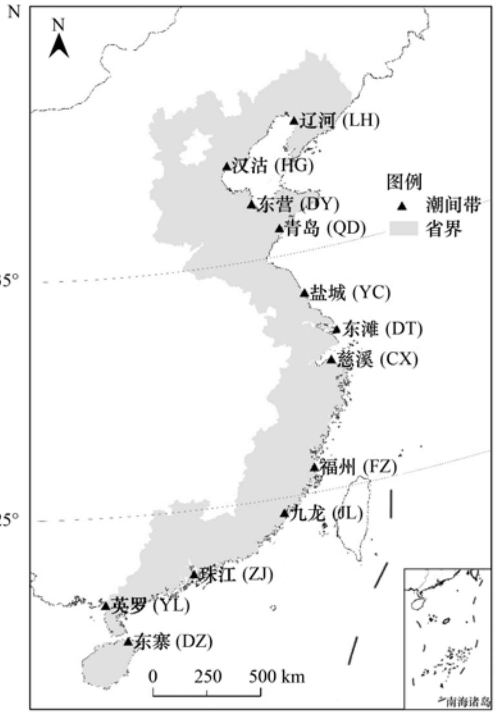

图1 采样点示意

Fig. 1 Map showing distribution of sampling sites

1.2 实验室培养

野外样品采集后在实验室冷藏保存，并根据各地海水的实测盐度值配置人工海水(氯化钠、氯化镁、硫酸镁、氯化钙、碳酸氢钠、氯化钾)，同时使用硝酸钠($NaNO_3$)和氯化铵(NH_4Cl)将人工海水氮浓度配置为硝酸盐氮(NO_3^--N) 2 $mg\cdot L^{-1}$和氨氮(NH_4^+-N) 0.5 $mg\cdot L^{-1}$. 使用恒温培养箱，设定了3个温度的培养(12、25、35℃). 在每个温度下，用新配置的海水模拟潮汐淹没和出落过程，首先对柱样进行预培养2 d(以6 h为间隔，人工向培养管中注入和倒出人工海水，操作过程中控制水流，减少柱样表层的扰动. 2 d后，向每个培养管里注满对应盐度的海水，测定培养初始的水体溶解氧(DO)数值后盖上丁基胶塞，使之没有气泡，再拧上双螺旋盖子. 并采集各培养管对应的海水作为初始水样50 mL. 培养6 h后，打开密封盖，测定培养后水体DO值，然后从每个培养管中采集培养后水样各50 mL. 培养的初始水样和培养后水样经0.45 μm滤膜过滤后编号储存聚乙烯瓶中冷冻(-20℃)保存，用以测定NO_3^-和NH_4^+浓度. 培养后的沉积物柱样按照1 cm分层切片，其中一根柱子的每个分层样品放入100 mL离心管，加入50 mL超纯水振荡混合后离心，再经过0.45 μm滤膜过滤后编号储存聚乙烯瓶中冷冻(-20℃)保存，用以测定和计算孔隙

水中 NO_3^- 和 NH_4^+ 浓度；再取一根柱子按照 1 cm 分层切片后 60℃烘干，干湿分别称重测含水率、容重，烘干土样研磨过筛后待测 TOC 与 TN.

1.3 样品分析和计算

水样 NO_3^- 浓度用流动化学分析仪（INTEGRAL FUTURA，ALLIANCE 公司，美国）测定，用次溴酸盐氧化法测定水体中 NH_4^+[13]. 沉积物总有机碳和总氮用元素分析仪（Elementar vario MICRO cube，德国）测定. 沉积物-水界面氮交换通量根据上覆水体培养前后 N 浓度的变化计算得出扩散通量：

$$F = \frac{M_t}{S \times t}$$

式中，F 是在 t 时间段内平均测得的沉积物-水界面扩散通量[$mmol \cdot (m^2 \cdot h)^{-1}$]；$S$ 是有机玻璃管中沉积物的截面积（m^2）；t 是引起上覆水体中物质浓度差的时间（h）. M_t 是 t 时间段内上覆水体物质的变化量（mmol），可通过上覆水体浓度变化计算 M_t：

$$M_t = V_t \cdot (c_t - c_0)$$

式中，c_t 是经过 t 时间后上覆水体中物质的浓度（$mmol \cdot L^{-1}$），c_0 是上覆水体中物质的初始浓度（$mmol \cdot L^{-1}$），V_t 是上覆水体的体积（L）.

沉积物容重用一定容积的土壤烘干后的重量与同容积水重的比值表示.

2 结果与分析

2.1 潮滩沉积物和上覆水体的理化性质

中国东部海岸线绵长，盐度差异较大，盐度最大值在青岛大沽河和海南东寨港，最低值在上海崇明东滩；同一片潮滩不同的样站盐度也不尽相同，差异最大的是青岛大沽河，同一潮间带两个样站的盐度差达到 29‰. 各潮滩表层 5 cm 沉积物的有机碳含量迥异，其中平均值在 5‰以下和 10‰以上的各有 3 个河口，分别是黄河口、盐城、慈溪，天津涧河河口、九龙江口和珠江口，相差最大的是在福州闽江口，差 5.36‰，除闽江口、崇明东滩外其它同一潮间带不同样站间的有机质差异都小于 2‰. 平均容重约为 1.17 $g \cdot cm^{-3}$，大部分容重处于 0.9 ~ 1.1 $g \cdot cm^{-3}$ 和 1.3 ~ 1.5 $g \cdot cm^{-3}$ 之间，容重和有机质之间呈现负相关关系. 在 35℃条件下沉积物孔隙水中氨氮和硝氮平均浓度高于 15℃条件下. 潮间带沉积物的具体理化参数见表 1.

表 1　潮间带沉积物的理化性质[1)]

Table 1　Physicochemical properties of sediments

采样点	盐度/‰	TOC/‰	TN/‰	孔隙水浓度/mg·L⁻¹				容重 /g·cm⁻³
				氨氮（15℃）	氨氮（35℃）	硝氮（15℃）	硝氮（35℃）	
LH-1	24.6	9.94	0.23	ND	ND	ND	0.36	1.05
LH-2	11.0	8.00	0.34	0.04	0.20	0.10	ND	1.36
HG-1	24.5	10.04	0.40	0.04	ND	0.12	ND	0.76
HG-2	16.6	10.57	0.60	0.05	0.01	0.20	0.37	0.83
DY-1	22.2	3.43	0.06	0.01	0.01	0.07	0.11	1.46
DY-2	26.0	2.19	0.09	0.03	0.05	0.15	0.32	1.40
QD-1	11.0	8.06	0.40	0.17	0.39	0.22	ND	1.06
QD-2	40.0	9.88	0.65	0.20	0.28	0.16	0.17	1.27
YC-1	25.0	2.59	0.08	0.16	0.18	0.08	ND	1.02
YC-2	25.0	3.29	0.08	0.36	ND	0.28	ND	1.43
YC-3	25.0	6.73	0.04	0.35	ND	0.08	ND	1.69
DT-1	1.0	10.12	0.38	ND	ND	0.16	0.03	0.96
DT-2	5.0	8.23	0.42	ND	ND	0.08	ND	1.34
DT-3	5.0	7.87	0.42	ND	0.03	0.08	0.02	1.37
DT-4	10.0	11.73	0.42	0.23	ND	0.08	ND	0.26
CX-1	10.0	3.33	0.47	ND	ND	0.01	0.07	1.30
CX-2	10.0	4.79	0.27	ND	ND	0.03	0.04	1.38
CX-3	10.0	5.94	0.27	ND	ND	0.11	0.05	1.41
FZ-1	20.0	5.95	0.06	ND	0.48	0.24	ND	1.37
FZ-2	18.3	11.31	0.71	0.01	0.01	0.18	0.87	1.02
JL-1	29.3	12.82	0.70	ND	ND	0.20	ND	1.03
JL-2	16.4	11.53	0.64	ND	ND	0.25	1.52	0.90
ZJ-1	16.3	12.98	0.89	ND	0.82	1.34	0.18	0.91
ZJ-2	16.3	13.07	0.90	ND	0.04	ND	ND	0.94
YL	29.3	7.09	0.12	0.06	0.15	0.16	1.76	1.43
DZ	40.0	6.67	0.18	0.09	0.23	0.16	0.55	1.52

1）ND 表示低于仪器检测限，未检出

2.2 潮间带沉积物-水界面NO_3^--N通量

根据中国东部海岸带纬度跨度，将 12 个潮间带区域按纬度由北到南分成 3 个区域（LH、HG、DY、QD 采样站在 35°～45°N 纬度带内，YC、DT、CX、FZ 采样站在 25～35°N 纬度带内，JL、ZJ、YL、DZ 采样站在 15°～25°N 纬度带内）. 本研究表明培养温度为 12℃时，各采样点的NO_3^--N通量范围是 －1.83～2.65 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，平均值是 0.39 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，沉积物主要表现为NO_3^--N的源，但其中 YC-2、YC-3、CX-3、JL-1 和 ZJ-2 样站沉积物是上覆水体的汇. 总体来看，纬度越高通量值越大，沉积物越表现为上覆水体NO_3^--N通量的源（图 2）. 培养温度为 25℃时和 12℃一样，沉积物主要表现为上覆水体的源，其中平均通量大小为 0.54 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，各采样点的通量在 －1.29～3.34 mmol·(m^2·h)$^{-1}$之间，通量值显示在 25°～35°N 区间最低，其他两个纬度区间的NO_3^--N通量平均值相比于 12℃和 35℃都较高. 35℃平均通量为 －0.13 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，沉积物表现为上覆水体NO_3^--N通量的汇. 各采样点的通量变化范围是 －2.91～0.14 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，其中 LH-1、YC-2、YC-3、DT-1、CX 和 JL 的潮滩沉积物是上覆水体NO_3^--N通量的汇.

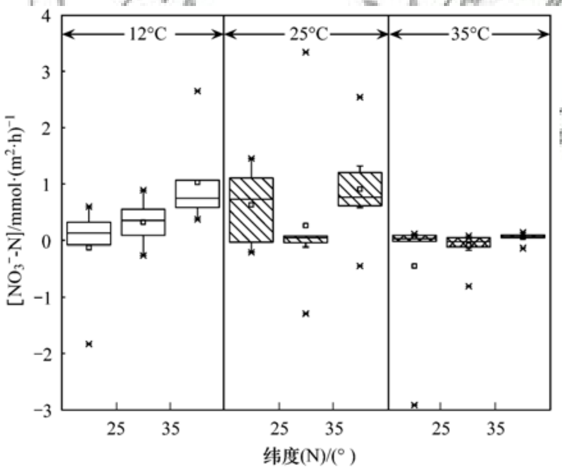

图 2 硝氮通量与温度和纬度的关系

Fig. 2 Relation between NO_3^--N flux and temperature and latitude

2.3 潮间带沉积物-水界面NH_4^+-N通量

培养温度为 12℃时，各采样点的NH_4^+-N通量范围是 －0.80～2.34 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，平均值是 0.33 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，沉积物主要表现为NH_4^+-N的源，但 15°～25°N 纬度区内除 DT 样站外其他样站的沉积物都表现为水体的汇. 低纬度区 15°～25°N（图 3）间的潮间带沉积物总体表现为上覆水体的汇，35°～45°N 和 25°～35°N 纬度带内的潮间带沉积物表现为上覆水体的源. 25℃时由于样品量较少，主要测的是盐城浅滩、崇明东滩和杭州湾，各采样点的通量在 －0.65～0.24 mmol·(m^2·h)$^{-1}$之间，平均值为 －0.31 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，除 CX 的 2 个样站外，其它样站都表现为NH_4^+-N通量的汇. 35℃各采样点的通量大多是负通量，变化范围在 －4.36～1.72 mmol·(m^2·h)$^{-1}$间，平均交换通量为 －0.71 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，沉积物基本表现为NH_4^+-N的汇，只有 FZ 的样站沉积物依旧表现为上覆水体的源. 35°～45°N 和 25°～35°N 纬度区的潮间带的NH_4^+-N通量都从正值变成负值，也就是沉积物的角色随着温度的升高由源向汇转变.

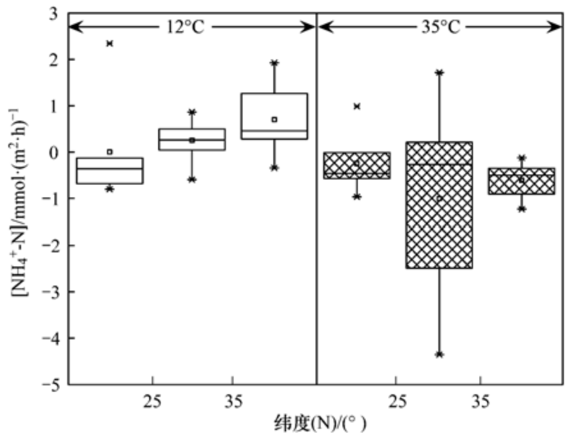

图 3 氨氮通量与温度和纬度的关系

Fig. 3 Relation between NH_4^+-N flux and temperature and latitude

2.4 潮间带沉积物对上覆水体无机氮源汇效应

以水体 NO_3^- 和 NH_4^+ 之和作为溶解无机氮，12℃ 和 35℃ 下的界面总平均值为 －0.04 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，表明我国东部 12 个典型潮间带沉积物总体上是水体无机氮的有效汇库. 其中NO_3^--N通量平均值是 0.12 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，潮间带沉积物表现为上覆水体NO_3^--N的源，NH_4^+-N通量平均值是 －0.19 mmol·(m^2·h)$^{-1}$，潮间带沉积物表现为上覆水体NH_4^+-N的汇. 12℃时潮间带沉积物是上覆水体NO_3^--N和NH_4^+-N通量的源，平均值是 0.36 mmol·(m^2·h)$^{-1}$；35℃时潮间带沉积物是上覆水体NO_3^--N和NH_4^+-N通量的汇，平均值是 －0.42 mmol·(m^2·h)$^{-1}$. 温度越高，潮间带沉积物越表现为上覆水氨氮和硝氮通量的汇. 不仅潮间带间沉积物水界面NO_3^--N和NH_4^+-N通量空间差异很大，同一潮间带不同潮滩样站NO_3^--N和NH_4^+-N通量值和变

化也不同步，界面迁移变化十分复杂.

由图 2、图 3 可见潮间带的NO_3^--N和NH_4^+-N通量空间分布都存在显著分异. 12℃时，纬度越高，潮间带NH_4^+-N、NO_3^--N通量值越大；25℃和 35℃时，NO_3^--N通量值随纬度变化表现为 25°～35°N < 15°～25°N < 35°～45°N，而NH_4^+-N通量值是 25°～35°N > 15°～25°N > 35°～45°N. 在不同温度下，15°～25°N 和 35°～45°N 纬度区潮间带的NO_3^--N通量随温度先升高再降低，25°～35°N 地区潮间带NO_3^--N通量值随温度一直减小，各个纬度区的NH_4^+-N通量均表现为温度越高，通量值越低；35℃时，35°～45°N 纬度区潮间带通量值降低最多. NH_4^+-N通量和NO_3^--N通量最小值均出现在盐城苏北浅滩，说明苏北浅滩潮间带沉积物是上覆水体无机氮的高汇.

3 讨论

3.1 典型潮间带无机氮交换通量和其他河口潮间带对比

本研究中得出的通量值落于各个潮滩通量值范围内，数量级相同(表 2)，和已有的相关研究结果进行对比可知，崇明东滩的NH_4^+-N通量范围最小值是陈振楼等[4]研究的 3 倍，NO_3^--N通量范围和他们的范围较为一致；黄河口地区的NH_4^+-N、NO_3^--N通量都在李玲玲[14]的数据范围内，且都是表现为NO_3^--N偏向于源，氨氮是低汇；闽江口潮间带的通量略高于林贤彪等[7]的研究，且NH_4^+-N、NO_3^--N都表现为低源；珠江口潮间带的研究结果和本实验数据基本一致. 不同的潮间带无机氮通量值差异较大(表 2)，同一潮间带盐度、容重、有机质含量等环境条件也存在差异(表 1)，需控制变量，研究单一因子的影响. 同时不同潮间带横向比较时，量化部分环境条件数值.

3.2 温度对潮间带无机氮交换通量的影响

温度可以促进微生物的成长与代谢，也会影响上覆水体中的含氧量. 刘素美等[19]研究发现有氧条件下有机质的降解作用消耗很少的 NH_4^+，产生大量 NO_3^-；缺氧条件下有机质的分解作用消耗大量 NO_3^-，产生少量 NH_4^+. Koriyama 等[18]和 Ozkan 等[20]的研究发现硝化和反硝化的耦合可能发生在沉积物的上层. 程勋亮等[21]的研究发现温度、上覆水体盐度、孔隙水中氨氮和有机质显著影响 NH_4^+ 界面通量，温度和孔隙水中NO_3^--N浓度显著影响 NO_3^- 界面通量. 温度的升高直接带来溶解氧的减少[21]，而硝化和反硝化过程都依赖于温度[22, 23].

表 2　世界各地河口潮间带沉积物-水界面无机氮通量对比/mmol·(m^2·d)$^{-1}$

Table 2　Comparison of exchange fluxes of inorganic nitrogen at the sediment-water interface between different intertidal zones and estuaries across the world/mmol·(m^2·d)$^{-1}$

地点	NH_4^+-N	NO_3^--N	NO_2^--N	文献
黄河口，中国	−9.16～6.94	−22.80～144.00	−1.20～2.10	[14]
长江口，中国	−18.45～10.65	−32.82～24.13	−1.15～2.82	[4]
闽江口，中国	−4.11～0.44	−2.17～1.44	−0.15～0.17	[7]
珠江口，中国	−1.32～0.99	−0.56～0.47	−1.52～0.14	[15]
胶州湾，中国	−0.41～48.00	−2.00～2.80	−0.05～6.20	[16]
St. Lawrence Estuary，加拿大	0.65～2.18	−2.29～0.69 1)		[11]
Douro River estuary，葡萄牙	0.67～23.47	0.96～19.44	0.02～3.07	[17]
Shido Bay，日本	0.075～9.83	/ 2)	/	[6]
Northern Galician Rias，西班牙	−0.132～3.01	−0.95～1.16	−0.006～0.21	[18]
12 个东部潮间带，中国	−52.32～28.08	−34.92～40.08	/	本研究

1)“−2.29～0.69”表示“NO_3^--N + NO_2^--N”的通量总和；2)“/”表示文章中没有该数值

室内模拟实验结果表明，温度和无机氮通量呈负相关关系(图 4)，NH_4^+-N通量和温度的关系最为显著，其他因素和通量之间没有显著相关性，这与 Hopkinson 等[12]的研究结果一致. 12℃时硝化微生物的活性较低，使得沉积物呈现为上覆水体NH_4^+-N通量的弱源. 培养温度为 25℃时，有机质的矿化作用虽在增强[18]，但硝化细菌的活性增强仍使得硝化作用起主要影响；温度再增加微生物活性进一步增强，NH_4^+-N主要转化成为NO_2^--N和NO_3^--N的形式[24]，最终随着温度的升高，NH_4^+-N通量降低甚至变成负值，沉积物由源变成上覆水体的NH_4^+-N通量汇.

NO_3^--N的界面通量和反硝化作用密切相关，受到硝化-反硝化耦合的影响[7, 25]. 温度可以通过改变微生物活性而抑制或加速沉积物中不同形式氮的

释放速率[25]，反硝化作用随着温度升高，溶解氧降低，微生物活性增强，通量低温时高，高温时低[9, 20]．12℃温度较低时，沉积物氧化层和上覆水体的底部会迅速发生硝化反应产生中间产物NO_2^--N，进而产生NO_3^--N[26]．随着温度的升高，溶解氧(OD)的减少[26]，反硝化作用越来越强，最终沉积物变成上覆水体的汇[4]．35℃时各纬度NO_3^--N通量都趋近于0，因高温促进反硝化作用，温度越高，上覆水体的溶解氧含量越低[27, 28]，厌氧环境又会抑制硝化反应的进行．其中25°～35°N地区NO_3^--N通量平均值远远低于其他两个纬度区的NO_3^--N通量．目前全球变暖的背景下，海岸带可能对于去除上覆水体氮负荷具有更大的潜力和贡献．

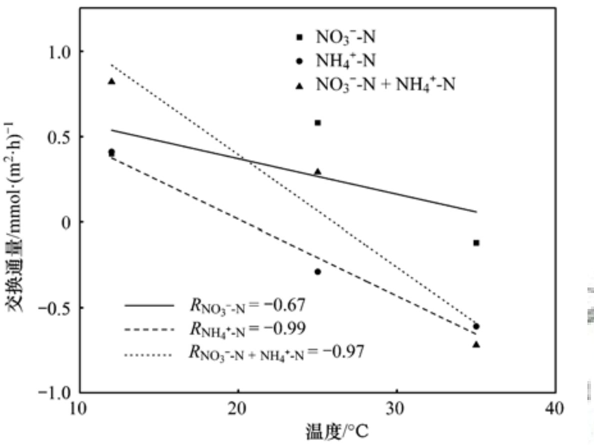

图4 沉积物-水界面无机氮交换通量与温度的相关性

Fig. 4 Correlation between temperature and NO_3^--N, NH_4^+-N and NO_3^--N + NH_4^+-N flux across the sediment-water interface

4 结论

(1)中国东部海岸带潮间带沉积物-水界面NO_3^--N的总通量范围是－2.91～3.34 mmol·(m²·h)$^{-1}$，NH_4^+-N的总通量范围是－4.36～2.34 mmol·(m²·h)$^{-1}$．潮间带沉积物表现为上覆水体无机氮的有效汇库－0.04 mmol·(m²·h)$^{-1}$．

(2)无机氮通量存在明显的空间分异，纬度位置越高，无机氮通量值越大，其中25～35°N潮间带沉积物可能受人类活动影响较大，因此无机氮的通量变化更为复杂．

(3)温度是影响潮间带无机氮通量的决定性因素，温度越高，沉积物越表现上覆水体无机氮通量的汇．其他环境因素如沉积物容重、孔隙水氨氮硝氮、溶解氧、总氮、总有机碳、盐度各影响因素综合作用使得无机氮空间差异明显．

致谢：感谢课题组汪萌、陈璐娟、许运凯、常思琪、俞林等在采样和实验方面提供的指导和帮助．

参考文献：

[1] 侯立军．长江口滨岸潮滩营养盐环境地球化学过程及生态效应[D]．上海：华东师范大学，2004．
Hou L J. Environmental geo-chemical processes of nutrients and ecological effects in the Yangtze estuarine and tidal ecosystem [D]. Shanghai: East China Normal University, 2004.

[2] Jickells T D. Nutrient biogeochemistry of the coastal zone[J]. Science, 1998, **281**(5374): 217-221.

[3] Ogilvie B, Nedwell D B, Harrison R M, *et al*. High nitrate, muddy estuaries as nitrogen sinks: the nitrogen budget of the river Colne estuary (United Kingdom)[J]. Marine Ecology Progress Series, 1997, **150**: 217-228.

[4] 陈振楼，王东启，许世远，等．长江口潮滩沉积物-水界面无机氮交换通量[J]．地理学报，2005，**60**(2)：328-336．
Chen Z L, Wang D Q, Xu S Y, *et al*. Inorganic nitrogen fluxes at the sediment-water interface in tidal flats of the Yangtze estuary [J]. Acta Geographica Sinica, 2005, **60**(2): 328-336.

[5] 王东启，陈振楼，钱嫦萍，等．盐度对崇明东滩沉积物-水界面NH_4^+交换行为的影响[J]．海洋环境科学，2002，**21**(3)：5-9．
Wang D Q, Chen Z L, Qian C P, *et al*. Effect of salinity on NH_4^+ exchange behavior at the sediment-water interface in East Chongming tidal flat[J]. Marine Environmental Science, 2002, **21**(3): 5-9.

[6] Koomklang J, Yamaguchi H, Ichimi K, *et al*. A role for a superficial sediment layer in upward nutrient fluxes across the overlying water-sediment interface[J]. Journal of Oceanography, 2018, **74**(1): 13-21.

[7] 林贤彪，林啸，颜燕燕，等．闽江口盐淡水湿地沉积物-水界面无机氮交换通量特征[J]．水土保持学报，2013，**27**(5)：260-266．
Lin X B, Lin X, Yan Y Y, *et al*. Inorganic nitrogen exchange fluxes at the sediment-water interface in saline-fresh water wetland of Min river estuary[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2013, **27**(5): 260-266.

[8] 高春梅，郑伊汝，张硕．海州湾海洋牧场沉积物-水界面营养盐交换通量的研究[J]．大连海洋大学学报，2016，**31**(1)：95-102．
Gao C M, Zheng Y R, Zhang S. Exchange fluxes of nutrients at sediment-seawater interface in marine ranching area of Haizhou bay[J]. Journal of Dalian Ocean University, 2016, **31**(1): 95-102.

[9] 张帆，葛长字，陈聚法，等．胶州湾大沽河口潮滩水体N、P营养盐的时空分布[J]．海洋湖沼通报，2012，(2)：59-68．
Zhang F, Ge C Z, Chen J F, *et al*. Temporal and spatial distribution of nutrients of phosphate and nitrogen in the tidal flat of Daguhe estuary, Jiaozhou bay[J]. Transactions of Oceanology and Limnology, 2012, (2): 59-68.

[10] Yu J H, Fan C X, Zhong J C, *et al*. Evaluation of *in situ* simulated dredging to reduce internal nitrogen flux across the sediment-water interface in Lake Taihu, China [J]. Environmental Pollution, 2016, **214**: 866-877.

[11] Poulin P, Pelletier é, Koutitonski V G, *et al*. Seasonal nutrient fluxes variability of northern salt marshes: examples from the lower St. Lawrence Estuary [J]. Wetlands Ecology and

Management, 2009, **17**(6): 655-673.

[12] Hopkinson C S Jr, Giblin A E, Tucker J. Metabolism and nutrient regeneration on the continental shelf of Eastern Massachusetts, USA[J]. Marine Ecology Progress Series, 2001, **224**: 1-19.

[13] 任妍冰, 李婷婷, 刘园园, 等. 次溴酸盐氧化法测定海水中氨氮试验条件的优化[J]. 环境监测管理与技术, 2013, **25**(3): 44-46.
Ren Y B, Li T T, Liu Y Y, *et al*. Optimization of test conditions of ammonia nitrogen in seawater by hypobromite oxidimetry method[J]. The Administration and Technique of Environmental Monitoring, 2013, **25**(3): 44-46.

[14] 李玲玲. 黄河口湿地沉积物中营养盐分布及交换通量的研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.
Li L L. Study On distribution and benthic fluxes of nutrients in sediment of the Yellow River estuary wetland[D]. Qingdao: Ocean University of China, 2010.

[15] 吕莹, 陈繁荣, 杨永强, 等. 春季珠江口内营养盐剖面分布和沉积物-水界面交换通量的研究[J]. 地球与环境, 2006, **34**(4): 1-6.
Lü Y, Chen F R, Yang Y Q, *et al*. Study on profile distribution of nutrients and exchange fluxes at sediment-water interface in inner Pearl River estuary in spring[J]. Earth and Environment, 2006, **34**(4): 1-6.

[16] Wang X L, Jiang F H, Shi X Y, *et al*. Influential factors on the exchange rate of dissolved inorganic nutrients at the sediment-water interface in Jiaozhou Bay, China[J]. Chinese Journal of Oceanology and Limnology, 2007, **25**(3): 270-276.

[17] Magalhães C M, Bordalo A A, Wiebe W J. Temporal and spatial patterns of intertidal sediment-water nutrient and oxygen fluxes in the Douro River estuary, Portugal[J]. Marine Ecology Progress Series, 2002, **233**: 55-71.

[18] Koriyama M, Koga A, Seguchi M, *et al*. Factors controlling denitrification of mudflat sediments in Ariake Bay, Japan[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2016, **188**(2): 96.

[19] 刘素美, 张经, 于志刚, 等. 渤海莱州湾沉积物-水界面溶解无机氮的扩散通量[J]. 环境科学, 1999, **20**(2): 12-16.
Liu S M, Zhang J, Yu Z G, *et al*. Benthic fluxes of dissolved inorganic nitrogen in the Laizhou Bay, Bohai Sea[J]. Environmental Science, 1999, **20**(2): 12-16.

[20] Ozkan E Y, Kocatas A, Buyukisik B. Nutrient dynamics between sediment and overlying water in the inner part of Izmir Bay, Eastern Aegean[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2008, **143**(1-3): 313-325.

[21] 程勋亮. 崇明东滩无机氮的迁移转化过程与影响机制分析[D]. 上海: 华东师范大学, 2015.
Cheng X L. The study on the transformation of inorganic nitrogen and influence mechanism in the East Chongming tidal flat[D]. Shanghai: East China Normal University, 2015.

[22] Cartaxana P, Caçador I, Vale C, *et al*. Seasonal variation of inorganic nitrogen and net mineralization in a salt marsh ecosystem[J]. Mangroves and Salt Marshes, 1999, **3**(2): 127-134.

[23] 金赞芳, 龚嘉临, 施伊丽, 等. 沉积物-水界面氮的源解析和硝化反硝化[J]. 环境科学, 2017, **38**(4): 1423-1430.
Jin Z F, Gong J L, Shi Y L, *et al*. Nitrate source identification and nitrification-denitrification at the sediment-water interface[J]. Environmental Science, 2017, **38**(4): 1423-1430.

[24] 李聪, 沈新强, 晁敏, 等. 象山港河纯养殖区沉积物-海水界面N、P营养盐的扩散通量[J]. 海洋环境科学, 2010, **29**(6): 848-852.
Li C, Shen X Q, Chao M, *et al*. Nitrogen and phosphorus fluxes in seawater-sediment in Xiangshan Bay[J]. Marine Environmental Science, 2010, **29**(6): 848-852.

[25] 李欣, 宋林旭, 纪道斌, 等. 春季敏感时期三峡水库典型支流沉积物-水界面氮释放特性[J]. 环境科学, 2018, **39**(3): 1113-1121.
Li X, Song L X, Ji D B, *et al*. Characteristics of nitrogen release at the sediment-water interface in the typical tributaries of the three gorges reservoir during the sensitive period in spring[J]. Environmental Science, 2018, **39**(3): 1113-1121.

[26] Jørgensen B B, Revsbech N P. Diffusive boundary layers and the oxygen uptake of sediments and detritus[J]. Limnology and Oceanography, 1985, **30**(1): 111-122.

[27] Nowicki B L. The effect of temperature, oxygen, salinity, and nutrient enrichment on estuarine denitrification rates measured with a modified nitrogen gas flux technique[J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 1994, **38**(2): 137-156.

[28] Cavari B Z, Phelps G. Denitrification in Lake Kinneret in the presence of oxygen[J]. Freshwater Biology, 1977, **7**(4): 385-391.

HUANJING KEXUE

Environmental Science (monthly)

Vol. 39 No. 9

Sep. 15, 2018

CONTENTS

Emission Inventory and Prediction of Non-road Machineries in the Yangtze River Delta Region, China ········ HUANG Cheng, AN Jing-yu, LU Jun (3965)
Vehicle Exhaust Emission Characteristics and Their Contributions in Jiangsu Province ········ LI Li, ZHANG Jie, ZHAO Qiu-yue, *et al.* (3976)
Historical Trends of Atmospheric Pb and Hg Emissions from Fossil Fuel Combustion in Shanghai ········ YANG Jing, CHEN Long, LIU Min, *et al.* (3987)
Emission Inventory of Atmospheric Pollutants and VOC Species from Crop Residue Burning in Guangdong Province ········ SUN Xi-bo, LIAO Cheng-hao, ZENG Wu-tao, *et al.* (3995)
Mass Concentrations and Size Distributions of Water-soluble Inorganic Ions in Atmospheric Aerosols in Beibei District, Chongqing ········ LI Yan-pei, HAO Qing-ju, WEN Tian-xue, *et al.* (4002)
Analysis of Seasonal Variations in Chemical Characteristics and Sources of $PM_{2.5}$ During Summer and Winter in Ji'nan City ········ LIU Xiao-di, MENG Jing-jing, HOU Zhan-fang, *et al.* (4014)
$PM_{2.5}$ Pollution Characterization and Cause Analysis of a Winter Heavy Pollution Event, Liaocheng City ········ ZHANG Jing-qiao, WU Ya-jun, ZHANG Meng, *et al.* (4026)
Concentrations, Sources, and Dry Deposition Fluxes of Different Forms of Phosphorus in Qingdao Aerosols in Summer ········ WANG Nan, MA Miao, SHI Jin-hui, *et al.* (4034)
Characteristics and Source Apportionment of Ambient Volatile Organic Compounds in Winter in Jincheng ········ YANG Fan, YAN Yu-long, GE Yun-fei, *et al.* (4042)
Enrichment Levels and Comprehensive Pollution Assessment of Dust Heavy Metals in Winter in Beijing ········ XIONG Qiu-lin, ZHAO Wen-ji, LI Da-jun, *et al.* (4051)
Characteristics of Atmospheric BTX near a Main Road in Hefei City ········ MENG Fan-hao, QIN Min, LIANG Shuai-xi, *et al.* (4060)
Ozone Generation Potential and Highly Contributing Substances of NMOCs from Landfill Working Face ········ LI Hao, LIU Yan-jun, CHEN Tan, *et al.* (4070)
Emission Characteristics of Wind-Eroded Dust from Concrete Batching Plants in Beijing ········ LI Bei-bei, HAN Kai-li, QIN Jian-ping, *et al.* (4078)
Seasonal Variation Characteristics of Pollution Risk in a Riverside Source Area Based on Source Apportionment ········ GAO Xiang, ZUO Rui, GUO Xue-ru, *et al.* (4086)
Evaluation of Effect of Urban Non-point Source Pollution Control on Porous Asphalt-Bio-retention Combined Roads ········ GONG Man-li, ZUO Jun-jie, REN Xin-xin, *et al.* (4096)
Composition, Spatial Distribution Characteristics and Source Analysis of Chromophoric Dissolved Organic Matter in the Lanzhou Reach of the Yellow River ········ ZHAO Xia-ting, LI Shan, WANG Zhao-wei, *et al.* (4105)
Characterization of Dissolved Organic Matter Fractions in the Ning-Meng Section of the Yellow River and Relationship with Metal Ions ········ XI Yue, WANG Ting, NI Jin-ren, *et al.* (4114)
Comparative Characteristics of Optical Absorption in Waters from Yiluo River and Huntai River in Spring ········ LI Liu-yang, SHAO Tian-tian, ZHANG Xin, *et al.* (4122)
Seasonal Variations in River Water Chemical Weathering and Its Influence Factors in the Malian River Basin ········ WANG Yu-shan, HAN Shuang-bao, DENG Qi-jun, *et al.* (4132)
Characteristics and Genesis of NO_3 Type Water in Shallow Groundwater in Liujiang Basin ········ XU Jin, HE Jiang-tao, PENG Cong, *et al.* (4142)
Development and Evaluation of a Sustainable Long-release Carbon Material Applied for In-Situ Remediation of Groundwater Nitrogen Pollution ········ ZHANG Wen, YIN Lin, ZHOU Nian-qing (4150)
Phosphorus Forms and Distribution Characteristics in the Sediment and Soil of the Water-Level-fluctuating Zone in the Main Stream of the Three Gorges Reservoir ········ ZHANG Zhi-yong, WAN Cheng-yan, HU Hong-qing, *et al.* (4161)
Distribution Characteristics and Release Fluxes of Phosphorus Forms in Xiangxi Bay Sediments in the Three Gorges Reservoir Before and After Impoundment ········ LIU Xin-yuan, SONG Lin-xu, JI Dao-bin, *et al.* (4169)
Effect of Zirconium-modified Zeolite Addition on Phosphorus Release and Immobilization in Heavily Polluted River Sediment ········ HE Si-qi, ZHANG Wei, LIN Jian-wei, *et al.* (4179)
Impact of Human Activities on Net Anthropogenic Nitrogen Inputs (NANI) at Township Scale in Erhai Lake Basin ········ LI Ying, LIU Hong-bin, LEI Qiu-liang, *et al.* (4189)
Simulation of Inorganic Nitrogen Fluxes at the Sediment-water Interface in a Typical Intertidal Zone, Eastern China ········ NIE Jia-qin, WANG Dong-qi, CHEN Jie, *et al.* (4199)
Effects of Aquaculture on Ammonia-oxidizing Prokaryotes in Sediments of Eastern Lake Taihu ········ CHU Yu, HE Xiao-wei, ZENG Jin, *et al.* (4206)
Transformation of Ammonia in Wetland Sediments for Treatment of Mining Wastewater ········ WANG Hai-bo, MA Ding, YUE Zheng-bo, *et al.* (4215)
Distribution Characteristics of Sulfonamide Antibiotic Resistance Genes in a Drinking Water Source in East China ········ HU Ya-ru, JIANG Lei, ZHANG Tian-yang, *et al.* (4222)
Distribution Characteristics of Sulfonamides and Sulfamethoxazole-Resistant Bacteria in Tannery Wastewater Treatment Processes ········ HUA Li, LI Lu, YANG Chun-yan (4229)
Effects of Different Substrates and Particle Sizes on Wastewater Purification ········ ZHAO Lin-li, SHAO Xue-xin, WU Ming, *et al.* (4236)
Substrate Flow by Different Biochemical Activities in the Urban Sewage Network ········ YAO Xiang-yi, SHI Xuan, SANG Lang-tao, *et al.* (4242)
Reducing Membrane Fouling from Micro-Flocculation in a Humic Acid Ultrafiltration Process ········ WANG Xu-dong, SHI Cai-xia, LIAO Zheng-wei, *et al.* (4249)
Enhanced Degradation of Aniline by PS Oxidation in the Presence of UV and Ferric Oxalate ········ HAN Dong-hui, LI Ying, LI Kai-ming, *et al.* (4257)
Behavior and Degradation of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons (PAHs) in Coking Wastewater of A/O^2 and A/O/H/O Processes ········ WU Hai-zhen, SUN Sheng-li, LIU Guo-xin, *et al.* (4265)
Effects of Long-term Side Stream Extracton on Phosphorus Removal and Recovery Performance of EBPR System ········ YU Xiao-jun, LI Jie, ZHOU Meng, *et al.* (4274)
Effect of NaCl Salinity on Extracellular Polymeric Substances and Bioflocculation of Anoxic Sludge in A^2/O Process ········ ZHANG Lan-he, TIAN Rui, GUO Jing-bo, *et al.* (4281)
Effect of Temperature and pH on Nitrogen Conversion in Feammox Process ········ CHEN Fang-min, JIN Run, YUAN Yan, *et al.* (4289)
Inhibitory Kinetics of Free Ammonia (FA) on Ammonia-oxidizing Bacteria (AOB) ········ SUN Hong-wei, YU Xue, GAO Yu-xue, *et al.* (4294)
Effect of HRT on Nitrogen Removal Using ANAMMOX and Heterotrophic Denitrification ········ AN Fang-jiao, ZHAO Zhi-chao, HUANG Li, *et al.* (4302)
Reactivation Performance of Nitrosation Flocculent Sludge After Long-term Storage ········ LI Tian, WEI Fan-kai, WANG Yu-chang, *et al.* (4310)
Analysis of Characteristics and Sources of Heavy Metals in Farmland Soils in the Xijiang River Draining of Guangxi ········ SONG Bo, ZHANG Yun-xia, PANG Rui, *et al.* (4317)
Soil Organic Carbon of Purple Soil as Affected by Different Application of Biochar ········ LUO Mei, TIAN Dong, GAO Ming, *et al.* (4327)
Effects of Straw and Biochar Addition on Soil Carbon Balance and Ecological Benefits in a Rape-maize Rotation Planting System ········ LI Jiao, TIAN Dong, HUANG Rong, *et al.* (4338)
Potential to Ensure Safe Production from Rice Fields Polluted with Heavy Cadmium by Combining a Rice Variety with Low Cadmium Accumulation, Humic Acid, and Sepiolite ········ XIE Xiao-mei, FANG Zhi-ping, LIAO Min, *et al.* (4348)
Interactive Effects of Ozone and Drought on Antioxidant Enzyme Activities of Poplar Leaves ········ ZHOU Hui-min, LI Pin, GAO Feng, *et al.* (4359)
Effects of Different Levels of Irrigation with Reclaimed Water on Soil Enzyme Activity and Distribution of Thermotolerant Coliforms ········ HAN Yang, LI Ping, QI Xue-bin, *et al.* (4366)
Characteristics of Heavy Metals in Chicken Manure Organic Fertilizers in the Huang-Huai-Hai Region and related Environmental Risk Assessment ········ LI Fa, XU Ying-ming, WANG Lin, *et al.* (4375)
Heavy Metal Content of Rural Living Solid Waste and Related Source and Distribution Analysis ········ JIN Qi, GAO Hong, YUE Bo, *et al.* (4385)