

百方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心
■ 出版 科学出版社



2019

Vol.40 No.1
第40卷 第1期

目次

2015~2016年北京市3次空气重污染红色预警PM_{2.5}成因分析及效果评估..... 吕喆,魏巍,周颖,程水源,王晓琦(1)

长三角地区重点源减排对PM_{2.5}浓度的影响..... 于燕,王泽华,崔雪东,陈锋,徐宏辉(11)

上海市实施清洁空气行动计划的健康收益分析..... 戴海夏,安静宇,李莉,黄成,严茹莎,朱书慧,马英歌,宋伟民,阚海东(24)

京津冀及周边地区PM_{2.5}时空变化特征遥感监测分析..... 陈辉,厉青,李莹,张连华,毛慧琴,周伟,刘伟汉(33)

MODIS C006气溶胶光学厚度产品在京津冀典型环境背景下的适用性..... 王海林,刘琼,陈勇航,孙冉,李霞,张华,魏刚,胡俊,刘统强(44)

气象因素对香港地区臭氧污染的影响..... 赵伟,高博,刘明,卢清,马社霞,孙家仁,陈米国,范绍佳(55)

天津夏季边界层低层大气中PAN和O₃的输送特征分析..... 姚青,马志强,林伟立,刘敬乐,王晓佳,蔡子颖,韩素芹(67)

成都冬季PM_{2.5}化学组分污染特征及来源解析..... 吴明,吴丹,夏俊荣,赵天良,杨清健(76)

郑州市冬季天气PM_{2.5}传输路径和潜在源分析..... 段时光,姜楠,杨留明,张瑞芹(86)

常州春季PM_{2.5}中WSOC和WSON的污染特征与来源解析..... 李清,黄雯倩,马帅帅,黄红缨,叶招莲,陈敏东(94)

天津隧道机动车VOCs污染特征与排放因子..... 孙露娜,刘妍,赵静波,孙世达,宋从波,张静,李悦宁,林应超,王婷,毛洪钧(104)

机动车源大气颗粒物粒径分布及碳组分特征..... 梅德清,朱宗宁,孙天硕,王向丽,梅丛蔚,肖政臻(114)

超低排放路线下燃煤烟气可凝结颗粒物在WFGD、WESP中的转化特性..... 杨柳,张斌,王康慧,麻丁仁,盛文(121)

超低排放燃煤电厂颗粒物脱除特性..... 阮仁晖,谭厚章,段钰锋,杜勇乐,刘鹤欣,萧嘉繁,杨富鑫,张朋(126)

北京建筑施工裸地时空变化及扬尘污染排放..... 张立坤,李令军,姜磊,赵文慧,鹿海峰,王新辉,邱昀(135)

SCR装置对焦炉煤气燃烧废气中PCDD/Fs、PCBs和PCNs的协同脱除..... 任美慧,樊芸,王胜,许亮,张宁,张雪萍,陈吉平,张海军(143)

古浪河流域大气降水稳定同位素的时空特征及其环境意义..... 桂娟,李宗省,冯起,卫伟,李永格,吕越敏,袁瑞丰,张百娟(149)

夏季闽江CDOM的空间分布与降解特征..... 程琼,庄婉娥,王辉,陈苇,杨丽阳(157)

亚热带河口陆基养虾塘水体CDOM三维荧光光谱平行因子分析..... 朱爱菊,孙东耀,谭季,黄佳芳,罗敏(164)

基于UV-vis及EEMs解析周村水库夏秋季降雨不同相对分子质量DOM的光谱特征及来源..... 周石磊,张艺冉,黄廷林,刘艳芳,张磊,李贵霞,岳琳,罗晓(172)

分层型水源水库溶解性有机物质及其膜污染特性..... 李凯,王晓东,黄廷林,李舒,刘双(185)

重庆西部山区典型湖泊水-气界面CO₂交换通量及其影响因素..... 罗佳宸,倪茂飞,李思悦(192)

基于稀疏表达的水体遥感反射率高光谱重构及其应用..... 李渊,李云梅,郭宇龙,张运林,张毅博,胡耀霖,夏忠(200)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征..... 李如忠,阙凤翔,熊鸿斌,王莉(211)

特大城市河流表层沉积物磷形态分布及有效性:以成都市为例..... 丁瑶,欧阳莉莉,石清,高平川,赖承钺,陈舒平,贾滨洋,姚刚(219)

黄河中游(渭南—郑州段)全/多氟烷基化合物的分布及通量..... 李琦路,程相会,赵祯,郭萌然,袁梦,华夏,方祥光,孙红文(228)

重工业城市岩溶地下水中多环芳烃污染特征及来源..... 苗迎,孔祥胜,李成展(239)

沈抚新城地下水中PAHs的污染特征及健康风险评价..... 张士超,姚宏,向鑫鑫,刘殷佐,刘明利,鲁根涛,于晓华(248)

多环芳烃及其衍生物在北京纳污河流中的分布及健康风险..... 付璐婧,李一兵,乔梦,赵旭(256)

原水性质对新型含Ca²⁺复合混凝剂混凝过程的影响..... 曲江东,徐慧,徐建坤,段晋明,门彬,王东升(263)

水体中磺胺甲噁唑间接光降解作用..... 李聪鹤,车潇炜,白莹,石晓勇,苏荣国(273)

MoS₂/BiOI复合光催化剂制备及其光催化氧化还原性能..... 张亮,赵朝成,高先瑶,闫青云,王帅军,董培,侯亚璐(281)

纳米零价铜活化分子氧降解水中恩诺沙星..... 倪永炯,程永清,徐梦苑,邱春根,马晓雁,李军,邓靖(293)

不同类型LDHs负载改性麦饭石对Cr(VI)吸附性能..... 张翔凌,邓礼楚,方晨佳,雷雨,何春艳,高晨光,赵双杰,向洋(300)

单层硅烷负载磁铁矿纳米颗粒的制备及除磷性能..... 邢明超,谢强,陈守慧,吴德意(310)

新生态型聚硅酸铁锰处理染料废水的优化..... 唐立朋,魏群山,吕强,张弛,刘亚男,柳建设(318)

不同外加电压下自养型生物阴极还原硫酸盐的性能及生物膜群落响应..... 胡佳萍,曾翠平,骆海萍,刘广立,张仁铎,卢耀斌(327)

碳源对O/A-F/F模式积累内源聚合物及反硝化的影响..... 崔有为,金常林,王好韩,李晶(336)

进水C/P对SNEDPR系统脱氮除磷性能的影响..... 甄建园,于德爽,王晓霞,陈光辉,都叶奇,袁梦飞,杜世明(343)

不同污泥龄(SRT)对SNEDPR系统脱氮除磷影响..... 王晓霞,甄建园,赵骥,于德爽,都叶奇,杜世明,袁梦飞,张帆(352)

后置短程反硝化AOA-SBR工艺实现低C/N城市污水的脱氮除磷..... 巩秀珍,于德爽,袁梦飞,王晓霞,陈光辉,王钧,毕春雪,都叶奇(360)

缺氧-好氧连续流亚硝化颗粒污泥反应器的启动及稳定运行..... 李冬,郭跃洲,劳会妹,曹美忠,张杰(369)

低温SNAD颗粒污泥工艺启动方式..... 李冬,崔雅倩,赵世勋,刘志诚,张杰(376)

不同取样尺度和数量下针阔混交林土壤呼吸的空间异质性..... 严俊霞,孙琦,李君剑,李洪建(383)

轮作方式对冬水田温室气体排放的影响..... 冯夕,江长胜,彭小乐,李彦沛,郝庆菊(392)

紫色土N₂O排放及氨氧化微生物群落结构对玉米秸秆与化肥减量配施的响应..... 黄容,高明,王莹燕,黎嘉成,徐国鑫,罗梅,徐畅(401)

岩溶地区不同土地利用方式土壤固碳细菌群落结构特征..... 张双双,靳振江,贾远航,李强(412)

丹江口库区库滨带植被土壤细菌群落多样性及PICRUSt功能预测分析..... 孙峰,田伟,张菲,陈彦,任学敏,庞发虎,李玉英,姚伦广,陈兆进(421)

硫酸盐还原菌介导的吸附态砷的迁移转化..... 贾欠欠,李伟,王亚男,段晋明,刘玉灿(430)

铅锌冶炼厂周边农田土壤重金属污染空间分布特征及风险评估..... 王洋洋,李方方,王笑阳,杨志辉,韩科,阮心玲(437)

新疆干旱区某矿冶场对周围土壤重金属累积的影响..... 杨伟光,王美娥,陈卫平(445)

九龙江流域水稻土重金属赋存形态及污染评价..... 林承奇,黄华斌,胡恭任,于瑞莲,郝春莉,林颖(453)

草海典型高原湿地食物链中汞同位素组成特征..... 许议元,何天容(461)

Cd、Zn交互作用对三七景天根系形态和重金属吸收积累的影响..... 郭俊梅,杨俊兴,杨军,陈同斌,李厚恩,徐铁兵,周小勇,叶勇,于豹(470)

不同浓度镉处理对铅胁迫下玉米生长和铅吸收的影响..... 王起凡,郭伟,常青,潘亮,周昕南,杨亮,李娥(480)

广西龙江鱼类镉含量分布特征及生物积累特性分析..... 王俊能,赵学敏,胡国成,钟松雄,姚玲爱,马千里,许振成(488)

6种消解方法对荧光测定生物体内聚苯乙烯微塑料的影响..... 邹亚丹,徐擎擎,张智,李富云,李锋民(496)

一种负载功能型微生物的营养缓释填料的制备及性能评价..... 冯克,徐丹华,成卓韦,於建明,陈建孟(504)

《环境科学》征订启事(113) 《环境科学》征稿简则(238) 信息(93, 262, 342)

巢湖十五里河河床地貌单元沉积物硝化速率及污染特征

李如忠, 阙凤翔, 熊鸿斌*, 王莉

(合肥工业大学资源与环境工程学院, 合肥 230009)

摘要: 2017年7月~2018年3月, 在巢湖流域十五里河城市段河床地貌特征丰富的两处河段, 就深潭、浅滩、砾石滩、点砂坝和常规流水区等5种地貌单元类型, 按季节采集表层沉积物样和水样, 解析不同地貌单元沉积物硝化速率及其变化性, 并开展不同地貌单元硝化速率的差异性和影响因素分析. 结果表明: ①十五里河中上游河段氮磷污染严重, 且水体氧化还原电位(ORP)值基本都低于零, 表明河水处于显著的还原状态. ②5种地貌单元沉积物的PNR变化范围为0.002~0.079 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为0.023 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 高低排序依次为: 深潭 > 点砂坝 > 浅滩 > 砾石滩 > 流水区, 相应的季节变化规律基本表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季. ③5种地貌单元表层沉积物ANR变幅为0.140~13.543 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为3.658 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, 总体表现为浅滩最高, 常规流水区次之, 砾石滩和点砂坝大体相当, 深潭最小, 且季节变化规律与PNR相似. ④差异性分析表明, 深潭、浅滩与其他4种地貌PNR均存在显著差异性, 超过半数的地貌单元ANR呈极显著差异性. ⑤回归分析表明, 5种地貌单元的PNR、ANR与上覆水水质指标的相关性相对较强, 而与沉积物理化指标的相关性较弱.

关键词: 地貌单元; 沉积物; 潜在硝化速率(PNR); 表面硝化速率(ANR); 巢湖

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2019)01-0211-08 DOI: 10.13227/j.hjkk.201806001

Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin

LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin*, WANG Li

(School of Resources and Environmental Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Sediment and overlying water samples were collected seasonally from five different geomorphic structures (i. e., pools, riffles, gravel bars, point bars, and runs) from two urban reaches of the Shiwulihe River in the Chaohu Lake Basin dominated by high ammonia concentration between July 2017 and March 2018. Both the sediment potential and areal nitrification rates were measured and their seasonal and geomorphological variability were evaluated. The specific differences between every two geomorphic structures were determined using the Mann-Whitney *U* test and the relationship between the overlying water environment or benthic sediments and sediment nitrification was explored based on regression analysis. The results show that: ① The studied reaches are seriously polluted by nitrogen and phosphorus and most of the oxidation-reduction potential (ORP) values in the overlying water were below 0 mV, suggesting strong reducing conditions of the water column. ② The potential nitrification rates (PNRs) across the five geomorphic structures range from 0.002 to 0.079 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, with a mean value of 0.023 $\mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$. The ranking order of PNRs is pools > point bars > riffles > gravel bars > runs, with a seasonal change pattern of summer > spring > autumn > winter. ③ The areal nitrification rates (ANRs) across the five geomorphic structures range between 0.140 and 13.543 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$, with an average of 3.658 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$. In general, the highest mean value was observed in riffles, followed by runs, and gravel bars and point bars; the smallest value was observed in pools. In addition, ANRs appear to have seasonal change patterns similar to that of the PNRs. ④ According to the difference analysis, there are significant differences between pools or riffles and other features of the PNRs. Extremely significant ANR differences were observed between more than half of the geomorphic structures. ⑤ Regression analysis shows a stronger correlation between sediment nitrification and the overlying water environment, compared with the surface sediment properties.

Key words: geomorphic structure; sediment; potential nitrification rate (PNR); areal nitrification rate (ANR); Chaohu Lake

河流系统中硝化与反硝化过程往往表现为一定的耦合关系. 有研究发现, 反硝化过程中产生的6%~70%的 N_2 源自于硝化作用产生的含氮氧化物^[1]. 由于硝化作用可以将氨氮转化为硝态氮, 从而为反硝化过程提供大量的反应底物, 这对增强河流反硝化脱氮具有重要的环境生态意义^[2]. 因此, 对于高氨氮浓度情形的河流水环境管理, 水体硝化反硝化潜力一直都格外引人关注^[3]. 与反硝化过程相似, 目前有关硝化作用的研究也主要集中在近岸

海域、湖库、湿地生态系统等水体沉积物方面^[4-6], 而对河流系统, 尤其是城市河道沉积物硝化潜力的研究, 则相对较为不足. 城市河道由于接纳大量的已处理(或未经处理)排放的生活污水、工业废水, 使得河水氮素污染水平总体偏高, 且大多表现为氨

收稿日期: 2018-06-01; 修订日期: 2018-07-05

基金项目: 国家自然科学基金项目(51579061)

作者简介: 李如忠(1970~), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为水环境保护与修复机制, E-mail: Lrz1970@163.com

* 通信作者, E-mail: xhb6324@sina.com

氮浓度高于硝态氮浓度。如何有效改善城市河道水环境状况,成为当前国内外城市环境管理中普遍面临的难题^[7]。

大量研究表明,河流形态和水动力学条件对河床地貌结构或地貌单元的塑造、河流底质沉积现象的发生和分布有着举足轻重的影响^[8]。与此同时,河床地貌单元还通过对沉积物水力渗透性、河水径流过程等的影响,间接控制着河段尺度内河流水力学特征和沉积物的性质^[9, 10]。例如,河道中深潭、浅滩、砾石滩、点砂坝等地貌结构,不仅影响河水流速和潜流垂直交换的不均匀性,还对沉积物的物质组分和空间分布的非均质性产生影响,从而在一定程度上左右了河水-沉积物系统的氮循环过程^[8],但对河床地貌的具体环境影响,现有研究依然不够充分,甚至还缺乏权威、一致的结论。从河流水污染控制和水环境保护来看,由于河床地貌类型的特殊性,加之其在整个河道的河床表面积中占有较大的比重,因此有必要弄清不同地貌单元沉积物的硝化或反硝化潜力,从而为科学制定相关对策和措施提供依据。事实上,有关河流水质对河床地貌特征时空变异的响应及其作用机制,也一直受到人们的关注^[11~13]。巢湖是我国五大淡水湖之一,湖泊富营养化相当严重,如何有效削减入湖氮素负荷,成为困扰巢湖水体富营养化治理的难题之一。十五里河是合肥市城区氮磷污染物进入巢湖的主要传输通道之一,水质常年处于劣 V 类水平,水体氮素(特别是氨氮)污染严重。近些年来,合肥市政府一直试图通过河道整治和滨岸带水环境修复,降低十五里河水体氮素污染和改善河流水质,但成效几乎都不大。沉积物硝化作用可以为河流反硝化脱氮提供丰富的底物来源,这对减轻水体氮素污染具有积极意义。本研究以该河流中上游的局部河段为对象,就河床不同地貌特征区表层沉积物的硝化潜力及影响因素,开展定量化分析与评估,以期对十五里河水环境修复中河流反硝化脱氮能力提升对策的制定提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

十五里河发源于合肥市大蜀山东南麓,地处东经 $116^{\circ}40'$ ~ $117^{\circ}52'$, 北纬 $31^{\circ}30'$ ~ $32^{\circ}37'$, 全长 35 km, 河流形态曲折变化明显, 为典型的江淮丘陵地区小流水体。该河自西北向东南贯穿蜀山区和包河区主城区, 在义城镇附近汇入巢湖, 是合肥市西南部城区连通巢湖的主要水文通道。上游河道干流中, 由于天鹅湖溢流坝的修建, 将十五里河拦

腰截断, 坝下主河道长 22.64 km, 相应的流域面积 111.25 km^2 。十五里河流域地形总体平缓, 高程约 7.9 ~ 59.9 m, 地貌以丘陵岗地和河湖低洼平原为主, 局部河床地貌类型丰富, 且该流域年均降水量约 1 000 mm。

十五里河流域上游为城市建成区, 河流渠道化特征显著; 中游为城市在建区, 以住宅用地占主导, 并有部分工业园区和景观用地; 下游东南部为城郊结合部, 以农业用地为主。城市用地占 55.04%, 耕地占 22.17%, 村镇 8.52%, 水域 6.98%, 林地、草地等占比都很小。十五里河是巢湖流域水质污染最为严重的河流之一, 水体氮磷污染突出, NH_4^+-N 、TN 和 TP 平均浓度分别达 19.89、22.29 和 $1.33 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ ^[14]。

1.2 样品采集与预处理

根据十五里河河床地貌特点, 在建成区与在建区之间的主河道, 筛选两处地貌单元构成丰富的河流片段(两者相距约 1.5 km), 就深潭、浅滩、砾石滩、点砂坝和常规流水区等 5 种地貌单元类型, 分别采集表层 2 ~ 5 cm 的沉积物样。针对每种地貌单元类型, 均选择 3 个代表性采样区域, 并在每个区域内各设置 3 个采样点位, 将采集的沉积物现场充分混合后用于代表该采样区域。另外, 针对每个采样区域各采集一份上覆水样。因此, 每轮采样中采集的水样、沉积物样各 15 个, 相应样品总数均为 60 个。

采样安排在 2017 年 7、10、12 月和 2018 年 3 月, 该时节分别对应于当地的夏、秋、冬和春季。每个采样点采集沉积物 800 g 左右, 并以塑料袋密封暂存。现场测定了河流水温 T 、pH、氧化还原电位 ORP、总溶解固体 TDS 和电导率 EC 等。分批次完成每轮样品的采集, 每次均将采集的水样和沉积物尽快送回实验室冷藏。其中一部分新鲜沉积物用于硝化速率的测定, 剩余沉积物则放置在阴凉通风处, 自然风干, 经研磨过 100 目尼龙筛后, 装入自封袋中, 以备沉积物理化性质分析。

1.3 样品分析测试

沉积物样品的实验室分析项目有 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、有机质(OM)和 pH 等, 其中 TN 采用过硫酸钾消解法测定; $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 和 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 先利用 $2 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ KCl 溶液浸提, 再分别采用紫外分光光度计和可见光分光光度计测定; TP 采用钼锑抗比色法测定; 有机质含量采用烧失量估算; pH 值以 pH 计测定(水土比为 5:1)。

水样的实验室分析项目包括 TN、 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 、 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 、TP、溶解反应性磷(SRP)和 COD。其中,

COD 采用快速消解仪测定, 其它指标的具体测定方法参见文献[15].

1.4 硝化速率及硝化量确定

本研究利用潜在硝化速率(potential nitrification rate, PNR)和表面硝化速率(areal nitrification rate, ANR)刻画沉积物的硝化潜力, 其中潜在硝化速率采用氯酸钾抑制法定量确定. 有关潜在硝化速率和表面硝化速率的具体确定方法, 参见文献[16, 17]. 根据表面硝化速率计算结果, 估算单位时间河床沉积物氮的总硝化量[NIF, $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$], 表达式为:

$$\text{NIF} = \sum_{i=1}^n S \times P_i \times \text{ANR}_i \quad (1)$$

式中, S 表示河床表面积, m^2 ; P_i 表示地貌单元类型 i 占河床面积比率, %; ANR_i 表示地貌单元类型 i 的表面硝化速率, $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$.

1.5 数据处理

采用 Mann-Whitney U 检验法, 分析河床不同地貌单元类型沉积物硝化速率的差异性; 采用回归分析技术, 拟合硝化速率与水质、沉积物理化指标的

关系. 相关数据处理及图形绘制借助 SPSS17.0 和 Excel 软件完成.

2 结果与分析

2.1 河水与沉积物氮磷污染特征

采样点所在的两处河流片段之间没有明显的点污染源汇入, 相应的 5 种河床地貌单元上覆水水质数据统计结果, 见表 1. 2017 年 7、10、12 月和翌年 3 月, 采样水温平均值分别为 28.4、19.2、8.9 和 17.3 $^{\circ}\text{C}$. 显然, 水体氮、磷浓度均很高, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、TN 和 TP 平均值分别为 11.35、26.01 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 1.24 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$. 尽管 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度相对于文献[14]已有明显下降, 但与国家《地表水环境质量标准》(GB 3838-2002)中 V 类水质标准阈值(2.0 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)相比, 超标倍数仍达 4.7 倍, TN 甚至高达 12 倍, TP 也达到了 2.1 倍. 而且, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 平均浓度是 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度(均值为 0.97 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)的 11.7 倍, 河流表现出了明显的高氮、高氨氮污染特征. pH 呈中性偏弱碱性. 此外, 绝大部分地貌单元 ORP 处于负值水平, 表明河水处于显著的还原状态.

表 1 河流水质统计结果

项目	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TN $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	SRP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	COD $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	ORP $/\text{mV}$	EC $/\mu\text{S}\cdot\text{cm}^{-1}$	TDS $/\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$	pH
深潭	12.53	1.15	26.75	0.64	1.35	41.69	-21.50	492.50	250.83	7.88
浅滩	9.34	0.98	24.87	0.60	1.18	31.95	-8.25	487.83	244.25	7.76
砾石滩	11.20	0.95	26.03	0.60	1.29	30.24	-10.08	534.67	264.83	7.70
点砂坝	13.11	0.84	28.07	0.83	1.28	37.46	-2.83	487.58	242.92	7.81
流水区	10.66	0.91	24.33	0.57	1.11	33.40	7.92	489.00	242.17	7.93

地貌单元表层沉积物 4 个季度的氮磷含量及其他理化指标均值情况见表 2. 总体上, 研究区各类型地貌单元沉积物氮、磷污染存在一定的差异性且污染均很严重, 两者都显著超过了加拿大安大略省环境和能源部发布指南中能引起最低级别生物毒性效应的 TN 和 TP 含量(分别为 550 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 600 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$). 其中, TN 变化范围为 1 309.23 ~ 2 261.95 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 1 834.34 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$

(变异系数为 15.31%), 最小值出现在流水区的春季, 最大值在浅滩的冬季, 且深潭和流水区 TN 含量高于其它 3 种地貌类型; TP 变化范围为 720.98 ~ 1 424.37 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 1 043.51 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (变异系数为 14.71%), 最小值出现在砾石滩的春季, 最大值出现在流水区的秋季, 且砾石滩和点砂坝 TP 含量相对较低, 但彼此悬殊并不显著.

表 2 表层沉积物基本理化性质

项目	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TN $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	TP $/\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	OM /%	pH
深潭	696.85 ± 146.35	82.87 ± 46.88	1 877.58 ± 331.86	1 049.93 ± 133.58	7.15 ± 1.34	7.63 ± 0.19
浅滩	497.66 ± 96.78	69.81 ± 54.15	1 817.94 ± 240.21	1 069.08 ± 181.42	4.69 ± 0.78	7.69 ± 0.26
砾石滩	504.20 ± 140.55	69.04 ± 41.62	1 793.80 ± 269.13	967.46 ± 130.51	4.76 ± 0.79	7.70 ± 0.25
点砂坝	523.86 ± 109.74	72.92 ± 46.25	1 811.52 ± 267.77	999.06 ± 191.82	6.88 ± 0.90	7.65 ± 0.33
流水区	556.92 ± 92.59	85.19 ± 63.66	1 870.88 ± 296.77	1 132.05 ± 126.33	6.54 ± 1.17	7.62 ± 0.26

总体上, 表层沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量分布特征与 TN 基本一致, 即深潭和流水区最高, 点

砂坝次之, 浅滩和砾石滩较小. $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 变化幅度为 283.08 ~ 870.68 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 555.90

$\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 最小值出现在砾石滩春季, 最大值出现在深潭夏季. NO_3^- -N变化范围为 $13.50 \sim 196.45 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 均值为 $75.96 \text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (变异系数为 66.52%), 最小值出现在浅滩冬季, 最大值出现在流水区的秋季, 且最大值是最小值的 14.55 倍. 而且, 5种地貌单元 NH_4^+ -N均呈现夏、秋季较高, 冬季和春季较低的特点, NO_3^- -N含量则表现出夏季较高, 其他季节相当的变化特征. 从数值上来看, 5种地貌单元中 NH_4^+ -N约占TN的 $27\% \sim 37\%$, 而 NO_3^- -N仅占 $3\% \sim 5\%$, 两者的悬殊程度较上覆水有所收窄. 沉积物中有机质OM含量在 $3.25\% \sim 9.10\%$ 范围内波动, 均值为 6.00% (变异系数为 16.56%), 其中深潭的有机质含量显著高于其他地貌特征, 其次是点砂坝和流水区, 浅滩和砾石滩最小.

2.2 不同地貌单元硝化速率及其季节变化特征

2.2.1 潜在硝化速率

由图1可见, 河床各地貌单元沉积物的PNR差异总体较为明显, 大致表现为: 深潭 > 点砂坝 > 浅滩 > 砾石滩 > 流水区, 且除点砂坝春季PNR高于夏季外, 其他地貌单元基本都表现为夏季最高, 春季次之, 秋季则稍高于冬季的变化规律, 这与秦如彬等^[17]对合肥城乡交错带不同溪流沟渠沉积物的潜在硝化速率的研究结论基本一致. 但对具体地貌单元而言, 不同季节间的潜在硝化速率也表现出一定的差异性特征.

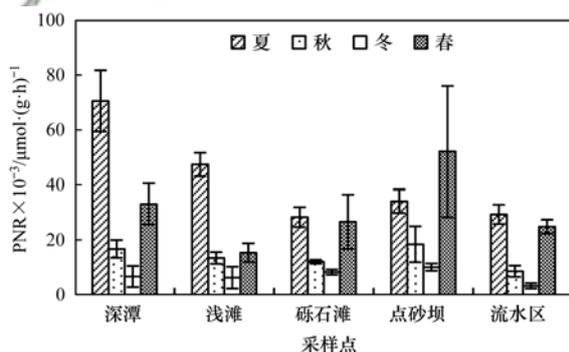


图1 河床地貌单元沉积物潜在硝化速率的季节变化性

Fig. 1 Seasonal variation of potential nitrification rates of different geomorphic structures

从数值大小看, 深潭沉积物PNR变化范围为 $0.002 \sim 0.079 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.031 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 夏季均值为 $0.070 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 分别是春、秋和冬季的 2.1 、 4.2 和 10.5 倍. 点砂坝PNR变化范围为 $0.008 \sim 0.079 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.028 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 但其春季PNR最高, 均值为 $0.052 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 分别是夏、秋和冬季的 1.5 、 2.8 和 5.2 倍. 浅滩沉积物PNR变化范围

为 $0.002 \sim 0.052 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.020 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 夏季PNR分别为春、秋和冬季的 3.1 、 3.5 和 7.6 倍. 砾石滩沉积物PNR变幅为 $0.008 \sim 0.038 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.018 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 且春、夏季相当, 秋、冬季也颇为接近, 春夏季约为秋冬季的两倍左右. 而常规流水区沉积物PNR最小值为 $0.002 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 最大值仅为 $0.032 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 均值为 $0.016 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 夏季略高于春季, 分别为秋、冬季的 3.5 和 9.0 倍. 而且, 常规流水区的冬季PNR平均值在5种地貌单元类型中最低.

王超等^[16]也采用氯酸钾抑制法定量估算了淦阳河水系沉积物潜在硝化潜力, 得到PNR的变幅为 $0.001 \sim 0.387 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 中值为 $0.103 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 总体水平高于巢湖十五里河的5种地貌单元. 秦如彬等^[17]采用同样方法, 对合肥城郊结合部地区污染程度差异性显著的3条源头溪流沟渠沉积物硝化潜力进行了分析, 结果发现PNR最小值为 $0.001 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 最大值仅为 $0.015 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 明显低于本研究沉积物潜在硝化速率. 不仅如此, Strauss等^[18]针对美国中西部地区36条小河流沉积物硝化速率的分析测试, 发现PNR变化范围为 $0 \sim 0.0016 \mu\text{mol}\cdot(\text{g}\cdot\text{h})^{-1}$, 同样明显低于十五里河.

2.2.2 表面硝化速率

5种地貌单元沉积物的表面硝化速率ANR季节变化情况见图2. 可以看出, ANR也呈现出与PNR相似的季节变化规律, 与秦如彬等^[17]对合肥地区重污染源头溪流(关镇河支渠)沉积物表面硝化速率的季节变化规律基本一致. 温度条件对硝化细菌活性的影响很大, Brady^[19]认为硝化作用的最适温度范围是 $25 \sim 35^\circ\text{C}$, 低于 5°C 或者高于 50°C 时硝化作用将基本停止; 也有学者认为, $28 \sim 30^\circ\text{C}$ 为硝化细菌最适宜生长温度, 低于 5°C 或高于 42°C 环

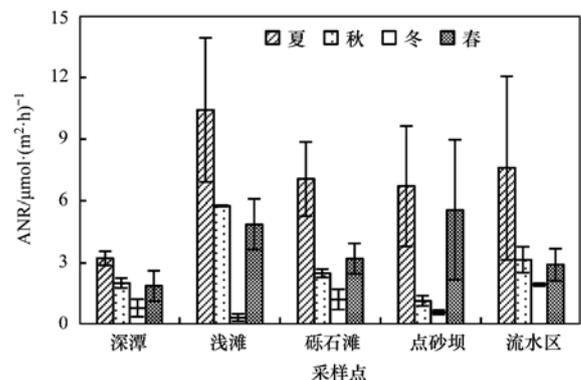


图2 不同地貌单元沉积物表面硝化速率的季节变化性

Fig. 2 Seasonal variation of areal nitrification rates of different geomorphic structures

境下硝化细菌均很难存活^[20]。尽管两种观点不完全一致,但从相关温度对应的硝化效果来看基本相同,这可能正是 5 种地貌单元沉积物 PNR、ANR 呈现显著的季节性变化特征且变化规律基本一致的主要原因。

从河床地貌单元类型角度来看,ANR 与 PNR 则存在较为明显的出入,即总体表现为浅滩最高,常规流水区次之,砾石滩和点砂坝大体相当,深潭则数值最小。其中,浅滩沉积物 ANR 变幅为 0.14 ~ 13.54 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 5.36 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,夏季 ANR 是冬季的 29.7 倍,即季节性悬殊很大。常规流水区 ANR 变幅为 1.88 ~ 12.64 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 3.91 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,虽然夏季 ANR 明显最高,但其它季节之间差异并不显著。点砂坝 ANR 变化范围为 0.49 ~ 9.49 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 3.52 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,夏、春季较为接近,分别为 6.72、5.58 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均显著高于秋、冬季节。砾石滩 ANR 变化范围为 0.70 ~ 7.05 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 3.51 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,夏季最高,春、秋季较为接近。与其它 4 种地貌单元不同的是,深潭的 ANR 季节性差异明显较小,变幅为 0.35 ~ 3.63 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,均值为 1.99 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,且基本保持在 1 ~ 3 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 范围。

秦如彬等^[17]在对合肥市城乡交错带 3 条源头溪流沟渠沉积物硝化潜力的研究中,得到 ANR 范围 30 ~ 139 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$; Kemp 等^[21]针对美国曼哈顿东南部二级支流沉积物的研究,得到 ANR 变化范围为 218 ~ 413 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$,两者都显

著高于十五里河;即便相较于淝阳河水系的 ANR 变化范围 3 ~ 143 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ [中值为 38 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$]^[16],5 种河床地貌单元仍明显偏低,表明十五里河沉积物硝化潜力处于较低水平。

本研究所选的河床地貌单元都集中在总长约 100 m 的两处河段上,河道宽度约 15 m,河床上深潭、浅滩、砾石滩、点砂坝和常规流水区面积占河床总面积的百分比,分别约为 10%、35%、20%、15% 和 20%;相应地 ANR 平均值分别为 1.99、5.36、3.51、3.52 和 3.91 $\mu\text{mol}\cdot(\text{m}^2\cdot\text{h})^{-1}$ 。于是,由式(1)计算得到河床沉积物氮的总硝化量为 6 129.96 $\mu\text{mol}\cdot\text{h}^{-1}$,相当于 85.82 $\text{mg}\cdot\text{h}^{-1}$ 。

2.3 不同地貌单元硝化速率的差异性

由于河床地貌单元沉积物的 PNR 和 ANR 数据信息($n=12$, $N=60$)不满足方差齐性的检验要求,即不满足单因素方差分析(One-way ANOVA)条件,故此采用非参数检验中的 Mann-Whitney U 检验法,分别就潜在硝化速率和表面硝化速率,开展 5 种河床地貌单元类型的差异性分析,结果见表 3。

可以看出,就 PNR 而言,深潭与浅滩存在极显著差异性($P<0.01$),而与其他 3 种地貌存在显著差异性($0.01<P<0.05$);浅滩与深潭、流水区存在极显著差异性($P<0.01$),而与砾石滩和点砂坝之间存在显著的差异性($0.01<P<0.05$);砾石滩、点砂坝和流水区三者两两之间的 PNR 差异均不明显($P>0.05$)。就 ANR 而言,除深潭与砾石滩、流水区,浅滩与点砂坝,砾石滩与流水区不存在显著关系外,其它地貌单元两两之间均存在极显著关系($P<0.009$)。也就是说,无论是 PNR 还是 ANR,5 种地貌单元并没有表现出完全的显著差异性。

表 3 河床地貌单元沉积物硝化速率的差异性¹⁾

Table 3 Differences of the nitrification rates between geomorphic structures

项目	情形比较	P 值	差异程度	项目	情形比较	P 值	差异程度
PNR	深潭-浅滩	0.000	极显著	ANR	深潭-浅滩	0.000	极显著
	深潭-砾石滩	0.012	显著		深潭-砾石滩	0.547	否
	深潭-点砂坝	0.013	显著		深潭-点砂坝	0.009	极显著
	深潭-流水区	0.047	显著		深潭-流水区	0.170	否
	浅滩-砾石滩	0.037	显著		浅滩-砾石滩	0.000	极显著
	浅滩-点砂坝	0.036	显著		浅滩-点砂坝	0.300	否
	浅滩-流水区	0.009	极显著		浅滩-流水区	0.000	极显著
	砾石滩-点砂坝	0.987	否		砾石滩-点砂坝	0.002	极显著
	砾石滩-流水区	0.568	否		砾石滩-流水区	0.433	否
	点砂坝-流水区	0.580	否		点砂坝-流水区	0.000	极显著

1) $P>0.05$ 表示差异性不显著; $0.01<P<0.05$ 表示差异性显著; $P<0.01$ 表示差异性极显著

2.4 硝化速率与环境因素的关系

采用回归分析技术,针对 5 种地貌单元的 PNR、ANR 与其相应的水质指标(NO_3^- -N、SRP、COD、ORP 和 T)、沉积物理化指标(TN、 NO_3^- -N、

NH_4^+ -N、TP、OM 和含水率)等因素进行拟合($n=12$)。由 PNR 与水质指标的回归分析结果(表 4),不难看出,半数以上地貌单元类型中 PNR 与 COD、ORP 和 T 存在显著的相关性,并且 PNR 与 ORP、 T

均呈显著正相关,而与 COD 存在显著负相关,这与 COD 需要消耗溶解氧,从而抑制硝化作用有关。

具体来说,深潭 PNR 与水体 T 、ORP 分别存在线性和指数关系,并与 T 呈现显著的正相关性,而与 COD 呈显著的线性负相关,与 SRP 存在指数关系;浅滩中 PNR 与 NO_3^- -N、SRP 和 T 均存在极显著

的指数或线性关系,而与 COD 呈现极显著的幂函数关系;砾石滩 PNR 仅与 ORP 有极显著的指数函数关系,与其他水质指标没有表现出显著的相关性;点砂坝 PNR 与 COD 表现为显著的指数关系,而与 ORP 呈极显著指数关系;流水区与 SRP 和 T 呈幂函数关系,与 ORP 呈线性关系且为正相关。

表 4 PNR 与水质指标回归分析结果¹⁾

Table 4 Regression models of PNR and water quality indexes

项目	NO_3^- -N	SRP	COD	ORP	T
深潭	— ²⁾	$y = 0.1302e^{-2.825x}$ ($R^2 = 0.448, P = 0.017$)	$y = -0.0850 \ln(x) + 0.3475$ ($R^2 = 0.589, P = 0.004$)	$y = 0.0257e^{0.0083x}$ ($R^2 = 0.752, P = 0.000$)	$y = 0.0021x - 0.0061$ ($R^2 = 0.431, P = 0.020$)
浅滩	$y = 0.0214x - 0.0004$ ($R^2 = 0.785, P = 0.000$)	$y = 0.0038e^{2.3008x}$ ($R^2 = 0.546, P = 0.006$)	$y = 1.1422/x - 0.0188$ ($R^2 = 0.582, P = 0.004$)	—	$y = 0.0032e^{0.0808x}$ ($R^2 = 0.623, P = 0.002$)
砾石滩	—	—	—	$y = 0.0173e^{0.0057x}$ ($R^2 = 0.798, P = 0.000$)	—
点砂坝	—	—	$y = 0.1035e^{-0.0400x}$ ($R^2 = 0.384, P = 0.032$)	$y = 0.0237e^{0.0069x}$ ($R^2 = 0.770, P = 0.000$)	—
流水区	—	$y = 0.0360x^{1.8508}$ ($R^2 = 0.399, P = 0.027$)	—	$y = 0.0001x + 0.0154$ ($R^2 = 0.846, P = 0.000$)	$y = 0.0002x^{1.3871}$ ($R^2 = 0.701, P = 0.001$)

1) x 代表自变量,即各水质指标值; y 代表因变量,即 PNR 值;2) “—”表示没有显著的函数关系,下同

类似地,ANR 也与 COD、ORP 和 T 存在较好的相关性(表 5),其中与 ORP 均呈指数关系、与 T 存在指数或线性关系,而与 COD 存在多种函数关系。这里,深潭 ANR 与 T 呈极显著的正相关性,而与 NO_3^- -N 未表现出明显的相关关系;浅滩 ANR 与 NO_3^- -N、 T 呈显著或极显著的正相关性,砾石滩

ANR 与 NO_3^- -N 也为正的线性关系,与其他指标表现为幂函数或指数函数关系;同时,点砂坝 ANR 与 SRP、COD 和 ORP 之间均表现出显著的指数关系。相对而言,常规流水区与上覆水指标的相关性偏弱,除与 NO_3^- -N 呈幂函数关系、与 T 表现为指数关系外,与其他指标关系不明显。

表 5 ANR 与水质指标回归分析结果¹⁾

Table 5 Regression models of ANR and water quality indexes

项目	NO_3^- -N	SRP	COD	ORP	T
深潭	—	$y = 64.3830e^{-4.791x}$ ($R^2 = 0.648, P = 0.003$)	$y = -13.200 \ln(x) + 54.259$ ($R^2 = 0.584, P = 0.004$)	$y = 3.8038e^{0.0106x}$ ($R^2 = 0.609, P = 0.003$)	$y = 0.4033x - 1.9776$ ($R^2 = 0.670, P = 0.001$)
浅滩	$y = 1.0948x + 0.9133$ ($R^2 = 0.604, P = 0.003$)	—	$y = 58.0366/x - 0.0103$ ($R^2 = 0.439, P = 0.019$)	—	$y = 0.0984x + 0.1285$ ($R^2 = 0.745, P = 0.000$)
砾石滩	$y = 2.6636x + 0.9680$ ($R^2 = 0.768, P = 0.000$)	—	$y = 123.0172/x - 1.1260$ ($R^2 = 0.518, P = 0.002$)	$y = 2.9847e^{0.0056x}$ ($R^2 = 0.489, P = 0.011$)	$y = 1.0573e^{0.0498x}$ ($R^2 = 0.368, P = 0.037$)
点砂坝	—	$y = 12.614e^{-2.138x}$ ($R^2 = 0.427, P = 0.021$)	$y = 21.163e^{-0.061x}$ ($R^2 = 0.363, P = 0.038$)	$y = 2.2169e^{0.0109x}$ ($R^2 = 0.768, P = 0.000$)	—
流水区	$y = 3.8972x^{0.5932}$ ($R^2 = 0.441, P = 0.019$)	—	—	—	$y = 1.1896e^{0.0544x}$ ($R^2 = 0.686, P = 0.001$)

1) x 代表自变量,即各项水质指标值; y 代表因变量,即 ANR 值

与上覆水相比,沉积物理化性质对于表层沉积物硝化速率的影响较弱。总体上,深潭的 PNR 与 OM 表现为极显著的相关性($y = 0.0002e^{0.6388x}$, $R^2 = 0.522, P = 0.008$), ANR 与 OM 呈显著的相关关系($y = 0.0074e^{0.8038x}$, $R^2 = 0.416, P = 0.024$);浅滩 PNR、ANR 及砾石滩 ANR 均与 NO_3^- -N 呈极显著的线性正相关性,相应的函数关系分别为: $y = 0.0003x + 0.0011$ ($R^2 = 0.810, P = 0.000$)、 $y = 0.0138x + 1.0305$ ($R^2 = 0.575, P = 0.004$)和 y

$= 0.036x + 1.034$ ($R^2 = 0.376, P = 0.034$)。文献 [16] 也发现 PNR、ANR 均与 OM、 NO_3^- -N 呈现正的相关关系,这与本研究结果一致。

砾石滩 PNR、ANR 与 TN 均存在指数函数关系,相应地数学表达式为 $y = 0.471e^{-0.002x}$ ($R^2 = 0.803, P = 0.000$)和 $y = 114.780e^{-0.002x}$ ($R^2 = 0.612, P = 0.003$)。同样地,点砂坝 PNR、ANR 也与 TN 呈指数函数关系,相应地数学表达式分别为 $y = 1.583e^{-0.002x}$ ($R^2 = 0.822, P = 0.000$)和 y

$$= 1\,786.700e^{-0.004x} \quad (R^2 = 0.841, P = 0.000).$$

3 讨论

在河流上覆水与沉积物垂直交换过程中, 溶解氧会随之被带到附着在颗粒物表层的生物膜表面, 并刺激好氧作用过程的发生^[22]; 随着这种交换作用的减弱, 溶解氧补给量也将随之减少, 导致沉积物供氧不足, 甚至引起厌氧反应的发生, 使得氮的生物地球化学循环发生改变^[23]. 十五里河上覆水与沉积物中氮、磷和有机质丰富, 严重的氮素污染状况和显著的还原性条件, 使得溶解氧成为该河流硝化反硝化作用的限制性因素^[16]. 深潭与浅滩、砾石堆、流水区等地貌特征相比, 水深较大、水流速度较为和缓, 上覆水中溶解氧传输至沉积物表层的量相对偏少^[24]. 不仅如此, 深潭沉积物多属于细质状淤积物, 其渗透性较弱, 而且沉积物中微生物的呼吸作用加快了溶解氧的消耗, 导致表面硝化能力不足, 这可能是深潭表层沉积物 ANR 相较于其它地貌单元明显偏低的主要原因.

氨氮是硝化作用的底物, 适量的氨氮浓度可以促进亚硝化和硝化细菌数量的增加, 从而直接或间接影响河流沉积物的硝化速率. 但水体氨氮也具有一定的生态毒性, 对水生动植物、微生物等具有生态危害性^[25, 26], 特别是高氨氮浓度可能由于对硝化细菌的毒性效应, 导致硝化作用受到抑制. 此外, 硝化细菌对高浓度氨氮的敏感性显著高于亚硝化菌, 过高的氨氮浓度导致亚硝酸盐累积, 从而也可能抑制硝化作用. 尽管十五里河水体 pH 仅处于中性偏弱碱性状态, 相应条件下氨氮产生大量游离态氮的可能性并不很大, 但由于河水 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ 平均浓度高达 $11.35 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 生成的游离态氮依旧有可能抑制硝化细菌的生长发育, 这或许也是十五里河沉积物表面硝化速率总体偏低的重要原因之一.

十五里河中上游地区属于城市建成区和在建区, 河道岸线固定、两侧堤岸稳固, 渠道化程度较高, 河槽内无河漫滩, 河水动力学条件往往成为塑造河床地貌特征类型的主要驱动力. 现场调查发现, 夏季暴雨带来的突增径流对十五里河河床地貌结构影响很大, 一部分地貌单元的沉积物被冲刷带起, 并在搬迁的过程中掺混合沉积. 由于本研究中两个河段内各种地貌单元类型的空间相距不是很远, 容易导致河床沉积物混合现象的发生, 这可能是表 3 中部分地貌单元硝化速率差异性不够显著的主要原因.

潜在硝化速率是表征沉积物的最大硝化潜力, 而表面硝化速率是反映实际条件下沉积物的硝化过

程, 在溶解氧正常或较高的水生生态系统中, 当 PNR 较高时, 相应地 ANR 应该也较高, 但在本文研究中, ANR 却相对较低. 笔者以为, 这可能与十五里河氮素污染严重, 上覆水因氧化还原电位较低而整体环境处于缺氧状态等有关, 从而导致硝化潜能难以充分发挥^[27], 这与王超等^[16]对淝阳河水系沉积物的研究基本一致. 另外, 5 种河床地貌单元 PNR、ANR 与上覆水水质指标的相关性较强, 而与表层沉积物理化指标的相关性弱一些, 表明十五里河上覆水环境条件, 特别是溶解氧对表层沉积物的硝化作用影响巨大.

4 结论

(1) 十五里河中上游氮、磷污染较为严重, 水体处于显著的还原状态.

(2) 不同河床地貌单元沉积物具有较高的潜在硝化速率, 而表面硝化速率则明显偏低.

(3) 不同河床地貌单元 PNR 数值差异较为明显, 大体表现为: 深潭 > 点砂坝 > 浅滩 > 砾石滩 > 常规流水区, ANR 则表现为浅滩最高, 常规流水区次之, 砾石滩和点砂坝大体相当, 深潭最小; PNR 和 ANR 表现出相似的季节性变化规律, 大致表现为: 夏季 > 春季 > 秋季 > 冬季.

(4) 差异性分析表明, 深潭、浅滩均与其他 4 种地貌单元类型的 PNR 存在显著或极显著的差异性, 而砾石滩、点砂坝和流水区三者两两之间的 PNR 差异并不明显; 除深潭与砾石滩、流水区, 浅滩与点砂坝, 砾石滩与流水区不存在显著关系外, 其它地貌单元两两之间均存在极显著关系.

(5) 回归分析表明, 河床地貌单元 PNR、ANR 与上覆水指标的相关性较强, 而与沉积物理化指标的相关性略弱, 表明十五里河表层沉积物的硝化作用受上覆水环境条件控制更显著.

参考文献:

- [1] Isnansetyo A, Seguchi M, Koriyama M. Nitrification potential rate of different sediment types of the Ariake Sea tidal flat in Summer and Autumn[J]. *Research Journal of Environmental and Earth Sciences*, 2011, **3**(6): 704-716.
- [2] Wang H T, Liao G S, D'Souza M, *et al.* Temporal and spatial variations of greenhouse gas fluxes from a tidal mangrove wetland in Southeast China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, **23**(2): 1873-1885.
- [3] 王若冰, 赵钰, 单保庆, 等. 海河流域典型重污染河流淝阳河沉积物氨化和硝化速率研究[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(3): 858-866.
Wang R B, Zhao Y, Shan B Q, *et al.* Ammonification and nitrification rates in sediment of typical heavy polluted river (Fuyang River) in the Haihe River Basin[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(3): 858-866.
- [4] Pauer J J, Auer M T. Nitrification in the water column and

- sediment of a hypereutrophic lake and adjoining river system[J]. *Water Research*, 2000, **34**(4): 1247-1254.
- [5] 牟晓杰, 刘兴土, 全川, 等. 人为干扰对闽江河口湿地土壤硝化-反硝化潜力的影响[J]. *中国环境科学*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
- Mou X J, Liu X T, Tong C, *et al.* Effects of human disturbance on nitrification and denitrification potential in the Min River estuarine wetland[J]. *China Environmental Science*, 2013, **33**(8): 1413-1419.
- [6] Yao L, Chen C R, Liu G H, *et al.* Environmental factors, but not abundance and diversity of nitrifying microorganisms, explain sediment nitrification rates in Yangtze lakes[J]. *RSC Advances*, 2018, **8**(4): 1875-1883.
- [7] Bettez N D, Groffman P M. Denitrification potential in stormwater control structures and natural riparian zones in an urban landscape [J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, **46**(20): 10909-10917.
- [8] Lefebvre S, Marmonier P, Peiry J L. Nitrogen dynamics in rural streams: differences between geomorphologic units[J]. *Annales de Limnologie-International Journal of Limnology*, 2006, **42**(1): 43-52.
- [9] Rex J F, Petticrew E L, Albers S J, *et al.* The influence of Pacific salmon decay products on near - field streambed sediment and organic matter dynamics: a flume simulation[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2014, **39**(10): 1378-1385.
- [10] 王宏涛, 董哲仁, 赵进勇, 等. 蜿蜒型河流地貌异质性及生态学意义研究进展[J]. *水资源保护*, 2015, **31**(6): 81-85.
- Wang H T, Dong Z R, Zhao J Y, *et al.* Review on geomorphological heterogeneity of meandering river and its ecological significance[J]. *Water Resources Protection*, 2015, **31**(6): 81-85.
- [11] Hester E T, Doyle M W. In-stream geomorphic structures as drivers of hyporheic exchange[J]. *Water Resources Research*, 2008, **44**(3): W03417.
- [12] Dong X L, Ruhí A, Grimm N B. Evidence for self-organization in determining spatial patterns of stream nutrients, despite primacy of the geomorphic template [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2017, **114**(24): E4744-E4752.
- [13] Tatariw C, Chapman E L, Sponseller R A, *et al.* Denitrification in a large river: consideration of geomorphic controls on microbial activity and community structure[J]. *Ecology*, 2013, **94**(10): 2249-2262.
- [14] 李如忠, 杨源, 丁贵珍, 等. 基于 OTIS 模型的巢湖十五里河源头段参数敏感性分析[J]. *环境科学研究*, 2014, **27**(11): 1265-1271.
- Li R Z, Yang Y, Ding G Z, *et al.* OTIS model-based parameter sensitivity analysis for headwater stream in the Shiwulihe River, Chaohu Lake Basin [J]. *Research of Environmental Sciences*, 2014, **27**(11): 1265-1271.
- [15] 国家环境保护总局. 水和废水监测分析方法[M]. (第四版). 北京: 中国环境科学出版社, 2002.
- [16] 王超, 单保庆, 赵钰. 濉阳河水系沉积物硝化速率分布及溶解氧的限制效应[J]. *环境科学学报*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- Wang C, Shan B Q, Zhao Y. Spatial distribution of nitrification rate and the restriction effect of oxygen in the Fuyang River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2015, **35**(6): 1735-1740.
- [17] 秦如彬, 李如忠, 高苏蒂, 等. 城乡交错带典型溪流沟渠沉积物氮污染特征及硝化-反硝化潜力[J]. *环境科学*, 2017, **38**(3): 936-945.
- Qin R B, Li R Z, Gao S D, *et al.* Pollution characteristics and nitrification and denitrification potential of superficial sediments from streams in an urban-rural fringe [J]. *Environmental Science*, 2017, **38**(3): 936-945.
- [18] Strauss E A, Mitchell N L, Lamberti G A. Factors regulating nitrification in aquatic sediments: Effects of organic carbon, nitrogen availability, and pH[J]. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 2002, **59**(3): 554-563.
- [19] Brady N C, Weil R R. Nitrogen and sulfur economy of soils[A]. In: Brady N C, Weil R R. *The Nature and Properties of Soils* [M]. New Jersey: Prentice-Hall, 1996. 584-642.
- [20] Rissanen A J, Tirola M, Ojala A. Spatial and temporal variation in denitrification and in the denitrifier community in a boreal lake [J]. *Aquatic Microbial Ecology*, 2011, **64**(1): 27-40.
- [21] Kemp M J, Dodds W K. Centimeter-scale patterns in dissolved oxygen and nitrification rates in a prairie stream[J]. *Journal of the North American Benthological Society*, 2001, **20**(3): 347-357.
- [22] Cornwell J C, Owens M S. Quantifying sediment nitrogen releases associated with estuarine dredging[J]. *Aquatic Geochemistry*, 2011, **17**(4-5): 499-517.
- [23] Belviso S, Thouzeau G, Schmidt S, *et al.* Significance of vertical flux as a sink for surface water DMSP and as a source for the sediment surface in coastal zones of northern Europe [J]. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 2006, **68**(3-4): 473-488.
- [24] Lin L, Davis L, Cohen S, *et al.* The influence of geomorphic unit spatial distribution on nitrogen retention and removal in a large river[J]. *Ecological Modelling*, 2016, **336**: 26-35.
- [25] 刘炎, 石小荣, 崔益斌, 等. 高浓度氨氮胁迫对细丝裸藻的毒性效应[J]. *环境科学*, 2013, **34**(11): 4386-4391.
- Liu Y, Shi X R, Cui Y B, *et al.* Toxic effects of high concentrations of ammonia on *Euglena gracilis* [J]. *Environmental Science*, 2013, **34**(11): 4386-4391.
- [26] Chew S F, Ip Y K. Excretory nitrogen metabolism and defence against ammonia toxicity in air-breathing fishes[J]. *Journal of Fish Biology*, 2014, **84**(3): 603-638.
- [27] 王亚蕊, 陈向超, 陈丙法, 等. 藻屑堆积对沉积物-水界面污染物的释放效应[J]. *环境科学学报*, 2018, **38**(1): 142-153.
- Wang Y R, Chen X C, Chen B F, *et al.* The release of pollutants in sediment-water interface after algal-debris accumulated in sediments [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2018, **38**(1): 142-153.

CONTENTS

Cause and Effect Evaluation of PM _{2.5} During Three Red Alerts in Beijing from 2015 to 2016	LÜ Zhe, WEI Wei, ZHOU Ying, <i>et al.</i> (1)
Effects of Emission Reductions of Key Sources on the PM _{2.5} Concentrations in the Yangtze River Delta	YU Yan, WANG Ze-hua, CUI Xue-dong, <i>et al.</i> (11)
Health Benefit Analyses of the Clean Air Action Plan Implementation in Shanghai	DAI Hai-xia, AN Jing-yu, LI Li, <i>et al.</i> (24)
Monitoring and Analysis of the Spatio-temporal Change Characteristics of the PM _{2.5} Concentration Over Beijing-Tianjin-Hebei and Its Surrounding Regions Based on Remote Sensing	CHEN Hui, LI Qing, LI Ying, <i>et al.</i> (33)
Applicability of MODIS C006 Aerosol Products in a Typical Environmental Area of the Beijing-Tianjin-Hebei Region	WANG Hai-lin, LIU Qiong, CHEN Yong-hang, <i>et al.</i> (44)
Impact of Meteorological Factors on the Ozone Pollution in Hong Kong	ZHAO Wei, GAO Bo, LIU Ming, <i>et al.</i> (55)
Transport Characteristics of PAN and O ₃ in the Lower Atmosphere of the Boundary Layer in Tianjin in Summer	YAO Qing, MA Zhi-qiang, LIN Wei-li, <i>et al.</i> (67)
Analysis of Pollution Characteristics and Sources of PM _{2.5} Chemical Components in Chengdu in Winter	WU Ming, WU Dan, XIA Jun-rong, <i>et al.</i> (76)
Transport Pathways and Potential Sources of PM _{2.5} During the Winter in Zhengzhou	DUAN Shi-guang, JIANG Nan, YANG Liu-ming, <i>et al.</i> (86)
Characteristics and Sources of Water-soluble Organic Carbon/Nitrogen in PM _{2.5} During Spring in Changzhou	LI Qing, HUANG Wen-qian, MA Shuai-shuai, <i>et al.</i> (94)
Pollution Characteristics and Emission Factors of VOCs from Vehicle Emissions in the Tianjin Tunnel	SUN Lu-na, LIU Yan, ZHAO Jing-bo, <i>et al.</i> (104)
Size Distribution and Carbon Component Characteristics of Atmospheric Particulate Matter from Motor Vehicles	MEI De-qing, ZHU Zong-ning, SUN Tian-shuo, <i>et al.</i> (114)
Conversion Characteristics of Combustible Particles from Coal-fired Flue Gas in WFGD and WESP	YANG Liu, ZHANG Bin, WANG Kang-hui, <i>et al.</i> (121)
Particle Removal Characteristics of an Ultra-low Emission Coal-fired Power Plant	RUAN Ren-hui, TAN Hou-zhang, DUAN Yu-feng, <i>et al.</i> (126)
Spatial and Temporal Distribution Characteristics and Fugitive Dust Emission of Building Sites in Beijing	ZHANG Li-kun, LI Ling-jun, JIANG Lei, <i>et al.</i> (135)
Simultaneous Removal of Polychlorinated Dibenzo- <i>p</i> -dioxins/dibenzofurans, Polychlorinated Biphenyls, and Polychlorinated Naphthalenes From Flues Gases From Coke Gas Burning Using Selective Catalytic Reduction Equipment	REN Mei-hui, FAN Yun, WANG Sheng, <i>et al.</i> (143)
Space-Time Characteristics and Environmental Significance of the Stable Isotopes in Precipitation in the Gulang River Basin	GUI Juan, LI Zong-xing, FENG Qi, <i>et al.</i> (149)
Spatial Distribution and Degradation of CDOM in the Minjiang River in Summer	CHENG Qiong, ZHUANG Wan-e, WANG Hui, <i>et al.</i> (157)
Parallel Factor Analysis of Fluorescence Excitation Emission Matrix Spectroscopy of CDOM from the Mid-culture Period of Shrimp Ponds in a Subtropical Estuary	ZHU Ai-ju, SUN Dong-yao, TAN Ji, <i>et al.</i> (164)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter With Different Relative Molecular Weight from Rainwater From Summer and Autumn in the Zhoucun Reservoir Based on UV-Vis and EEMs	ZHOU Shi-lei, ZHANG Yi-ran, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (172)
Characteristics and Fouling Potential of Dissolved Organic Matter in a Stratified Source Water Reservoir	LI Kai, WANG Xiao-dong, HUANG Ting-lin, <i>et al.</i> (185)
Water-Air Interface CO ₂ Exchange Flux of Typical Lakes in a Mountainous Area of the Western Chongqing and Their Influencing Factors	LUO Jia-chen, NI Mao-fei, LI Si-yue (192)
Reconstruction of Water Hyperspectral Remote Sensing Reflectance Based on Sparse Representation and Its Application	LI Yuan, LI Yun-mei, GUO Yu-long, <i>et al.</i> (200)
Nitrification Rates and Pollution Characteristics of Sediments with Different Geomorphic Features in the Shiwuli Stream, Chaohu Lake Basin	LI Ru-zhong, QUE Feng-xiang, XIONG Hong-bin, <i>et al.</i> (211)
Distribution and Bioavailability of Phosphorus in Surface Sediments in Megalopolis: A Case Study of Chengdu	DING Yao, OUYANG Li-li, SHI Qing, <i>et al.</i> (219)
Distribution and Fluxes of Perfluoroalkyl and Polyfluoroalkyl Substances in the Middle Reaches of the Yellow River (Weinan-Zhengzhou Section)	LI Qi-lu, CHENG Xiang-hui, ZHAO Zhen, <i>et al.</i> (228)
Distribution and Sources of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in a Karst Groundwater System in a Strongly Industrial City	MIAO Ying, KONG Xiang-sheng, LI Cheng-zhan (239)
Pollution Characteristic and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in the Groundwater of Shen-Fu New City in the Hunhe River Basin	ZHANG Shi-chao, YAO Hong, XIANG Xin-xin, <i>et al.</i> (248)
Distribution and Risk Assessment of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons and Their Derivatives in Wastewater-Receiving Rivers in Beijing	FU Lu-jing, LI Yi-bing, QIAO Meng, <i>et al.</i> (256)
Influence of the Coagulation Mechanism on the Coagulation Performances Using New Composite Coagulants: Role of the Raw Water Characteristics	QU Jiang-dong, XU Hui, XU Jian-kun, <i>et al.</i> (263)
Indirect Photodegradation of Sulfamethoxazole in Water	LI Cong-he, CHE Xiao-wei, BAI Ying, <i>et al.</i> (273)
Fabrication of the Heterojunction Photocatalyst MoS ₂ /BiOI and Its Investigation of Its Photocatalytic Reduction and Oxidation Activities	ZHANG Liang, ZHAO Chao-cheng, GAO Xian-yao, <i>et al.</i> (281)
Nanoscale Zero-valent Copper-Activated Molecular Oxygen for the Degradation of Enrofloxacin in Water	NI Yong-jiong, CHENG Yong-qing, XU Meng-yuan, <i>et al.</i> (293)
Adsorption of Cr(VI) in Water by Malfanite Modified with Different LDHs Coatings	ZHANG Xiang-ling, DENG Li-chu, FANG Chen-jia, <i>et al.</i> (300)
Preparation of the Silane Monolayer on Magnetite Nanoparticles and Its Performance with Respect to Phosphate Removal from Water	XING Ming-chao, XIE Qiang, CHEN Shou-hui, <i>et al.</i> (310)
Optimization of Dyeing Wastewater Treatment with New Eco-friendly Polysilicate Ferromanganese	TANG Li-peng, WEI Qun-shan, LÜ Qiang, <i>et al.</i> (318)
Sulfate Reduction and Microbial Community of Autotrophic Biocathode in Response to Externally Applied Voltage	HU Jia-ping, ZENG Cui-ping, LUO Hai-ping, <i>et al.</i> (327)
Effect of Carbon Sources on the Accumulation of Endogenous Polymers and Denitrification in the O/A-F/F Mode	CUI You-wei, JIN Chang-lin, WANG Hao-han, <i>et al.</i> (336)
Effect of the Influent C/P Ratio on the Nutrient Removal Characteristics of the SNEDPR System	ZHEN Jian-yuan, YU De-shuang, WANG Xiao-xia, <i>et al.</i> (343)
Effect of Different Sludge Retention Time (SRT) Operations on the Nutrient Removal Characteristics of a SNEDPR System	WANG Xiao-xia, ZHEN Jian-yuan, ZHAO Ji, <i>et al.</i> (352)
Denitrification and Phosphorus Removal from Low C/N Urban Sewage Based on a Post-Partial Denitrification AOA-SBR Process	GONG Xiu-zhen, YU De-shuang, YUAN Meng-fei, <i>et al.</i> (360)
Startup and Stabilization of Nitrosation in an Anoxic-aerobic Continuous-flow Reactor with Granules	LI Dong, GUO Yue-zhou, LAO Hui-mei, <i>et al.</i> (369)
Startup Strategies for the SNAD Granular Sludge Process at Low Temperature	LI Dong, CUI Ya-qian, ZHAO Shi-xun, <i>et al.</i> (376)
Effect of the Sampling Scale and Number on the Heterogeneity of Soil Respiration in a Mixed Broadleaf-conifer Forest	YAN Jun-xia, SUN Qi, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (383)
Effects of the Crop Rotation on Greenhouse Gases from Flooded Paddy Fields	FENG Xi, JIANG Chang-sheng, PENG Xiao-le, <i>et al.</i> (392)
Response of the Soil N ₂ O Emission and Ammonia-oxidizing Microorganism Community to the Maize Straw Return with Reducing Fertilizer in Purple Soil	HUANG Rong, GAO Ming, WANG Ying-yan, <i>et al.</i> (401)
Community Structure of CO ₂ -fixing Soil Bacteria from Different Land Use Types in Karst Areas	ZHANG Shuang-shuang, JIN Zhen-jiang, JIA Yuan-hang, <i>et al.</i> (412)
Composition and Predictive Functional Analysis of Rhizosphere Bacterial Communities in Riparian Buffer Strips in the Danjiangkou Reservoir, China	SUN Feng, TIAN Wei, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (421)
Migration and Transformation of Adsorbed Arsenic Mediated by Sulfate Reducing Bacteria	JIA Qian-qian, LI Wei, WANG Ya-nan, <i>et al.</i> (430)
Spatial Distribution and Risk Assessment of Heavy Metal Contamination in Surface Farmland Soil Around a Lead and Zinc Smelter	WANG Yang-yang, LI Fang-fang, WANG Xiao-yang, <i>et al.</i> (437)
Effect of a Mining and Smelting Plant on the Accumulation of Heavy Metals in Soils in Arid Areas in Xinjiang	YANG Wei-guang, WANG Mei-e, CHEN Wei-ping (445)
Assessment of the Speciation and Pollution of Heavy Metals in Paddy Soils from the Jiulong River Basin	LIN Cheng-qi, HUANG Hua-bin, HU Gong-ren, <i>et al.</i> (453)
Characteristics of Stable Mercury Isotopic Compositions in the Food Web of the Caohai Lake	XU Yi-yuan, HE Tian-rong (461)
Interaction of Cd and Zn Affecting the Root Morphology and Accumulation of Heavy Metals in <i>Sedum aizoon</i>	GUO Jun-mei, YANG Jun-xing, YANG Jun, <i>et al.</i> (470)
Effects of Different Concentrations of Lanthanum on the Growth and Uptake of Pb by Maize Grown Under Moderate Lead Stress	WANG Qi-fan, GUO Wei, CHANG Qing, <i>et al.</i> (480)
Distribution and Bioaccumulation Characteristics of Cadmium in Fish Species from the Longjiang River in the Guangxi Autonomous Region	WANG Jun-neng, ZHAO Xue-min, HU Guo-cheng, <i>et al.</i> (488)
Influence of Six Digestion Methods on the Determination of Polystyrene Microplastics in Organisms Using the Fluorescence Intensity	ZOU Ya-dan, XU Qing-qing, ZHANG Ge, <i>et al.</i> (496)
Preparation of a Nutritional Slow-release Packing Material with Function Microorganisms and Its Characteristics Evaluation	FENG Ke, XU Dan-hua, CHENG Zhuo-wei, <i>et al.</i> (504)