

环境科学

(HUANJING KEXUE)

ENVIRONMENTAL SCIENCE

第37卷 第3期

Vol.37 No.3

2016

中国科学院生态环境研究中心 主办
科学出版社 出版



目次

一种气溶胶测量仪器标定系统的设计及性能评估	陈小彤, 蒋靖坤, 邓建国, 段雷, 郝吉明 (789)
空气细菌真菌污染的分级评价构建方法	张华玲, 姚大军, 张雨, 方子梁 (795)
2014年北京APEC期间大气醛酮污染物的污染特征与来源分析	何晓朗, 谭吉华, 郭送军, 马永亮, 贺克斌 (801)
北京市夏季不同O ₃ 和PM _{2.5} 污染状况研究	王占山, 张大伟, 李云婷, 董欣, 孙瑞雯, 孙乃迪 (807)
2013年1月南京北郊霾天气气溶胶的光学特性	王利朋, 马嫣, 郑军, 崔芬萍, 周瑶瑶 (816)
上海典型持续性PM _{2.5} 重度污染的数值模拟	常炉予, 许建明, 周广强, 吴剑斌, 谢英, 余钟奇, 杨辰 (825)
厦门室内多溴二苯醚的沉降通量、季节变化与人体暴露水平	韩文亮, 刘豫, 陈海明, 陈兴童, 范涛 (834)
复合催化膜生物反应器处理一氧化氮废气研究	黎宝仁, 陈洲洋, 王剑斌, 张再利, 樊青娟, 魏在山 (847)
环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究	孔秀君, 张鹏, 杨南南, 梁生康 (854)
面向GOCI数据的太湖总磷浓度反演及其日内变化研究	杜成功, 李云梅, 王桥, 朱利, 吕恒 (862)
三峡库区支流澎溪河水华高发期环境因子和浮游藻类的时空特征及其关系	周川, 蔚建军, 付莉, 崔玉洁, 刘德富, 姜伟, Douglas Haffner, 张磊 (873)
三峡库区消落带水体DOM不同分子量组分三维荧光特征	陈雪霜, 江韬, 卢松, 魏世强, 王定勇, 闫金龙 (884)
黄河河南段水体中正构烷烃的分布特征与来源解析	冯精兰, 席楠楠, 张飞, 刘书卉, 孙剑辉 (893)
岩溶地下河流域表层土壤有机氯农药分布特征及来源分析	谢正兰, 孙玉川, 张媚, 余琴, 徐昕 (900)
长期不同耕作方式下紫色水稻土和上覆水中汞及甲基汞的分布特征	王欣悦, 唐振亚, 张成, 王永敏, 王定勇 (910)
长江口沉积物重金属赋存形态及风险特征	尹肃, 冯成洪, 李扬飏, 殷立峰, 沈珍瑶 (917)
巢湖表层沉积物营养盐和重金属分布及污染评价	熊春晖, 张瑞雷, 吴晓东, 冯立辉, 王丽卿 (925)
三峡库区典型支流库湾消落带沉积泥沙特征及重金属评价	王永艳, 文安邦, 史忠林, 严冬春, 朱波, 唐家良 (935)
海河干流水产品汞污染特征及摄入风险评估	童银栋, 张巍, 邓春燕, 王学军 (942)
三峡库区干支流落干期消落带土壤可转化态氮含量及分布特征	何立平, 刘丹, 于志国, 周斌, 杨振宇, 兰国新, 郭冬琴, 林俊杰 (950)
三峡水库消落带土壤与优势植物淹水后对土-水系统汞形态的影响	梁丽, 王永敏, 张成, 余亚伟, 安思危, 王定勇 (955)
不同灌溉模式下水稻田径流污染试验研究	周静雯, 苏保林, 黄宁波, 管毓堂, 赵堃 (963)
富营养化城市景观水体表观污染下的悬浮颗粒物粒度分布特征	贡丹燕, 潘杨, 黄勇, 包伟, 李倩倩 (970)
间歇曝气对垂直潜流人工湿地脱氮效果的影响	汪健, 李怀正, 甄葆崇, 刘振东 (980)
非水溶性醌加速菌GWF生物还原高氯酸盐的研究	张媛媛, 郭延凯, 张超, 梁晓红, 田秀蕾, 牛文钰, 廉静, 郭建博 (988)
紫外辐射对腐殖酸溶液理化性质及其混凝性能的影响	王文东, 张轲, 范庆海, 郑丹 (994)
类水滑石复合材料吸附去除水中硫酸根离子	顾怡冰, 马邕文, 万金泉, 王艳, 关泽宇 (1000)
富里酸对重金属在沉积物上吸附及形态分布的影响	李雨清, 何江, 吕昌伟, 樊明德, 王维, 张瑞卿, 谢志磊, 汪精华, 于波, 恩和, 丁涛 (1008)
铁有机骨架材料的快速合成及对阴离子染料的吸附性能	孙德帅, 刘亚丽, 张晓东, 秦婷婷 (1016)
富里酸-膨润土复合体对氟的吸附特性	方敦, 田华婧, 叶欣, 何次利, 但悠梦, 魏世勇 (1023)
3种低分子量有机酸对紫色土吸附非的影响	谢黎, 陈本寿, 张进忠, 卢松, 江韬 (1032)
HDTMA改性蒙脱土对土壤Cr(VI)的吸附稳定化研究	蒋婷婷, 喻恺, 罗启仕, 吉敏, 林匡飞 (1039)
水热处理时间对污泥中氮磷钾及重金属迁移的影响	王兴栋, 林景江, 李智伟, 赵焕平, 余广伟, 汪印 (1048)
煤制气废水总酚负荷对反硝化的抑制效应研究	张玉莹, 陈秀荣, 王璐, 李佳慧, 徐燕, 庄有军, 于泽亚 (1055)
硫自养反硝化耦合厌氧氨氧化脱氮条件控制研究	周健, 黄勇, 刘忻, 袁怡, 李祥, 完颜德卿, 丁亮, 邵经纬, 赵蓉 (1061)
低温下活性污泥膨胀的微生物群落结构研究	端正花, 潘留明, 陈晓欧, 王秀朵, 赵乐军, 方乐琪 (1070)
游离氨(FA)耦合曝气时间对硝化菌活性的抑制影响	孙洪伟, 吕心涛, 魏雪芬, 赵华南, 马娟, 方晓航 (1075)
1株Arthrobacter arilaitensis菌的耐冷异养硝化和好氧反硝化作用	何腾霞, 倪九派, 李振轮, 孙权, 冶青, 徐义 (1082)
海洋菌株y3的分离鉴定及其异养硝化-好氧反硝化特性	孙庆花, 于德爽, 张培玉, 林学政, 徐光耀, 李津 (1089)
几种不同方法估算农田表层土壤固碳潜力:以甘肃庄浪县为例	师晨迪, 许明祥, 邱宇洁 (1098)
不同耕作方式下土壤水分状况对土壤呼吸的初期影响	张延, 梁爱珍, 张晓平, 陈升龙, 孙冰洁, 刘四义 (1106)
绿肥间作和秸秆覆盖对冬季油菜根际土壤有机碳及土壤呼吸的影响	周泉, 王龙昌, 熊瑛, 张赛, 杜娟, 赵琳璐 (1114)
黑岱沟露天煤矿排土场不同植被复垦土壤酶活性及理化性质研究	方瑛, 马任甜, 安韶山, 赵俊峰, 肖礼 (1121)
黄土丘陵区退耕时间序列梯度上草本植被群落与土壤C、N、P、K化学计量学特征	张海东, 汝海丽, 焦峰, 薛超玉, 郭美丽 (1128)
包头某铝厂周边土壤重金属的空间分布及来源解析	张连科, 李海鹏, 黄学敏, 李玉梅, 焦坤灵, 孙鹏, 王维大 (1139)
砷污染土壤复合淋洗修复技术研究	陈寻峰, 李小明, 陈灿, 杨麒, 邓琳静, 谢伟强, 钟宇, 黄斌, 杨伟强, 张志贝 (1147)
以预处理剩余污泥为燃料MFC产电性能及不连续供电的可行性	赵艳辉, 赵阳国, 郭亮 (1156)
废弃物焚烧飞灰中持久性自由基与二噁英及金属的关联探究	王天娇, 陈彤, 詹明秀, 郭颖, 李晓东 (1163)
淘汰落后产能政策对我国重点工业行业二噁英类减排的影响	耿静, 吕永龙, 任丙南, 王铁宇 (1171)
《环境科学》征订启事 (1138) 《环境科学》征稿简则 (1155) 信息 (824, 853, 883)	

环胶州湾污水处理厂排放口溶解有机氮生物可利用潜力研究

孔秀君^{1,2}, 张鹏^{1,2}, 杨南南^{1,2}, 梁生康^{1,2*}

(1. 中国海洋大学海洋化学理论与工程技术教育部重点实验室, 青岛 266100; 2. 中国海洋大学化学化工学院, 青岛 266100)

摘要: 溶解有机氮(DON)是陆源输入近海总溶解氮(TDN)的重要组成部分,其生物可利用性对探讨近海氮污染和富营养化形成机制具有重要意义. 本研究根据2012年7月、2012年11月、2013年3月和2013年5月在胶州湾海域4个污水处理厂进行的4次调查,分析了直排胶州湾污水处理厂水体中总溶解氮(TDN)及其中总溶解氨基酸(TDAA)的含量和季节分布特征,并以溶解有机碳 n (DOC)/溶解有机氮 n (DON)和氨基酸的构成和丰度为指标,评价了直排胶州湾各污水处理厂排放口DON的生物可利用性. 结果表明,TDN的变化范围为 $413.10 \sim 3580.65 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$,并基本呈现3月和11月高,5月和7月低的变化趋势,其中,DON在TDN中所占摩尔分数变化范围为2.14%~88.75%. 各污水处理厂排放口不同季节DOC/DON值较低,介于 $0.2 \sim 26.2 \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间,平均值为 $(5.05 \pm 6.39) \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$,而TDAA中所含碳在DOC中的摩尔分数即TDAA/DOC值较高,分布在0.33%~3.02%之间,平均值为 $1.54\% \pm 0.78\%$,基于TDAA/DOC估算排入胶州湾各污水处理厂排放口污水中具有生物可利用溶解有机质所占摩尔分数为0.44%~46.97%. 上述结果表明,直排胶州湾污水处理厂排放口DON具有较高的生物可利用性,对该海域富营养化贡献不容忽视.

关键词: 胶州湾; 污水处理厂排放口; 溶解有机氮; 总溶解氨基酸; 生物可利用性

中图分类号: X55 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2016)03-0854-08 DOI: 10.13227/j.hjxx.2016.03.009

Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay

KONG Xiu-jun^{1,2}, ZHANG Peng^{1,2}, YANG Nan-nan^{1,2}, LIANG Sheng-kang^{1,2*}

(1. Key Laboratory of Marine Chemistry Theory and Technology, Ministry of Education, Ocean University of China, Qingdao 266100, China; 2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Ocean University of China, Qingdao 266100, China)

Abstract: Dissolved organic nitrogen (DON) is an important portion of total dissolved nitrogen (TDN) transported to the coastal from land-based sources and its bioavailable moieties of DON are regarded as potentially important nitrogen sources for eutrophication in coastal environments. Based on the four field observations conducted in July, November 2012 and in March, May 2013 at the four sewage treatment plants (STPs) around the Jiaozhou Bay (JZB), the concentrations and compositions of total dissolved nitrogen (TDN) as well as total dissolved amino acids (TDAA) were analyzed, and the ratio of dissolved organic carbon (DOC) to DON and the composition and abundance of amino acids were regarded as indexes to evaluate the bioavailability of DON in STPs around JZB. The concentrations of TDN ranged from $413.10 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ to $3580.65 \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ and showed a seasonal variation tendency, which were higher in March and November and lower in May and July, and the percentages of DON to TDN varied from 2.14% to 88.75%. In the discharge outlets of STPs around JZB, the values of DOC/DON were low and ranged from $0.2 \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ to $26.2 \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ with an average of $(5.05 \pm 6.39) \text{ mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, while the values of TDAA/DOC were high and ranged from 0.33% to 3.02% with an average of $1.54\% \pm 0.78\%$. Based on TDAA/DOC, the bioavailable proportion of the dissolved organic matter was estimated, which accounted for 0.44% to 46.97%. In conclusion, DON in the discharge outlets of STPs around JZB possessed high bioavailability and might contribute to the eutrophication of coastal water in JZB.

Key words: Jiaozhou Bay (JZB); discharge outlets of sewage treatment plants; dissolved organic nitrogen (DON); total dissolved amino acids (TDAA); bioavailability

水生生态系统中,溶解有机氮(DON)是营养物质循环中的重要环节^[1,2],不仅可以与溶解无机氮(DIN)之间相互转化,而且是一类潜在的可被生物利用的重要营养源. 其中,一些小分子量的DON如尿素、溶解游离态氨基酸(DFAA)、核酸等已被证明是可以被浮游植物直接吸收利用^[3~6],对浮游植

物生长、种群演替及初级生产力的影响不容忽视. 其中,总溶解态氨基酸(TDAA)是构成溶解有机质

收稿日期: 2015-07-05; 修订日期: 2015-11-04

基金项目: 国家海洋局海洋公益性科研专项(201205018); 国家自然科学基金委-山东省联合基金项目(U1406403)

作者简介: 孔秀君(1990~),女,硕士,主要研究方向为污染生态化学, E-mail: kxiujun@126.com

* 通讯联系人, E-mail: liangsk@ouc.edu.cn

(DOM)的重要组成部分,其构成和丰度可用来指示DOM生物可利用性的潜力^[7, 8].

胶州湾位于黄海之滨,是中国北方海区典型的半封闭海湾.自20世纪70年代末以来,随着青岛市社会经济的高速发展,陆源污染物排放总量不断增加,富营养化已成为胶州湾海域最严重的环境问题之一,氮污染是导致胶州湾海域富营养化的关键因子^[9].目前,关于胶州湾氮污染物的来源、构成和分布研究侧重于溶解无机氮(DIN),而忽视了溶解有机氮(DON)对胶州湾氮污染的贡献.

为减少陆源排污,环胶州湾已经建成和运行多个公共污水处理厂,污水处理量达到114万t·d⁻¹,占入胶州湾污水总量的90%^[10].在2008年后,为减少氮污染物的排放,环胶州湾各污水处理厂经过升级改造,相继增加了硝化/反硝化系统;尽管这些脱氮工艺可能对DIN特别是氨氮(NH₄⁺-N)的去除十分有效,但对其他形态氮包括硝态氮(NO₃⁻-N)和DON的去除率往往较低^[11, 12].研究表明,经污水处理厂处理后的废水进入近海水体后,一方面,其中DON可通过微生物降解作用和光化学作用转化为小分子量的DON和DIN;另一方面,通过盐度调节作用,将原吸附于腐殖质上而难以被生物利用的氨氮以自由态释放,这些过程都增大了氮的生物可利用性,从而加重近海氮污染负荷和富营养化程度^[13].然而,目前尚未对环胶州湾污水处理厂排污口污水中DON的构成和生物可利用性进行系统研究.

本研究通过在不同季节对直排入胶州湾的4个公共污水处理厂排放口不同形态氮的调查,比较分析排入胶州湾不同公共污水处理厂TDN的构成,并以TDAA的构成及其在DOM中的丰度作为指标,评价所排放DON的生物可利用性.

1 材料与方法

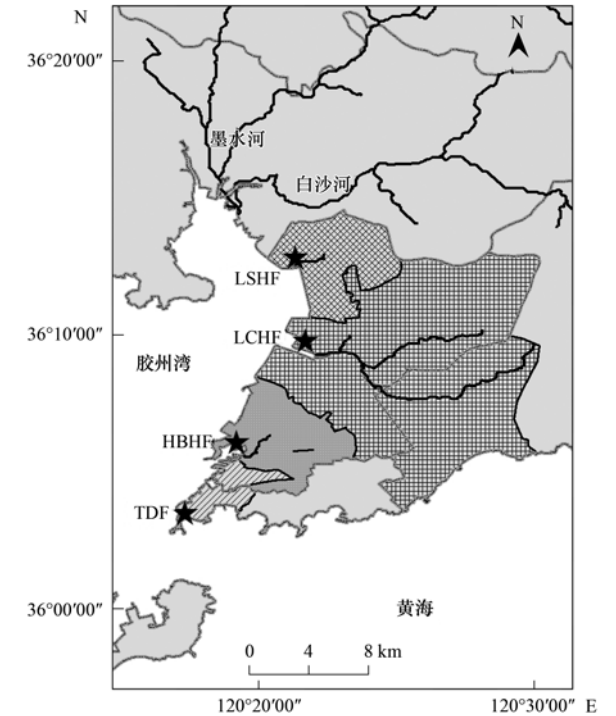
1.1 胶州湾简介

胶州湾位于山东半岛南岸,水域面积约320

km²,湾口狭小,最窄处仅为3.1 km,水深较浅,平均水深仅8.8 m,最大水深为64 m.青岛市主城区环胶州湾而建,胶州湾不仅是青岛市社会发展的重要载体,也是青岛市农业、工业和生活污水的主要承纳体,约占青岛市面积的65%的陆域所产生的污染物通过河流和排污口进入胶州湾^[9].20世纪70年代末以来,伴随着青岛市经济持续高速发展,人口不断增加,陆源污染物排放数量持续增多,导致胶州湾水质不断恶化,引发了赤潮(绿潮)灾害频发等一系列生态环境问题^[9, 14].

1.2 直排胶州湾污水处理厂简介

目前,所调查区域的直排入胶州湾污水处理厂都位于胶州湾东部人口密集的建成区,各污水处理厂的集污范围、处理量和处理工艺等见图1和表1.



TDF:团岛污水处理厂; HBHF:海泊河污水处理厂;
LCHF:李村河污水处理厂; LSHF:莱山河污水处理厂
图1 直排胶州湾污水处理厂集污范围和采样站位示意
Fig. 1 Region of drainage and sampling stations at STPs around JZB

表1 直排胶州湾公共污水处理厂集污区范围和处理工艺简介

Table 1 Region of drainage and introduction of treatment technology at STPs around the JZB

污水处理厂	简称	处理工艺 ¹⁾	设计处理量 /万 t	集污区面积 /km ²	集污区污染源构成	
					人口	GDP/万元
莱山河污水处理厂	LSHF	A ² /O 工艺	10	31.02	113 415	1 151 621.8
李村河污水处理厂	LCHF	改良 A ² /O 工艺	15	154.08	447 933	2 936 414.4
海泊河污水处理厂	HBHF	AB 法处理工艺	8	30.52	526 050	1 892 220.3
团岛污水处理厂	TDF	A ² /O 工艺	10	10.70	354 618	1 796 643.4

1) “A²/O”代表厌氧-缺氧-好氧法,是传统活性污泥工艺、生物硝化及反硝化工艺和生物除磷工艺的综合;“A/B”代表吸附-生物降解工艺

1.3 样品采集和处理方法

分别于2012年7月、2012年11月、2013年3月及2013年5月在直排胶州湾4个污水处理厂排放口进行取样分析,采样站点如图1所示. 用有机玻璃采水器采集排放口水样5 L, 0~4℃冷藏保存并在4 h内转移到实验室用全玻璃滤器过滤,滤膜孔径为0.7 μm(GF/F玻璃纤维滤膜,英国Whatman公司),并在使用前450℃下灼烧4 h;将所得滤液转入洁净的玻璃瓶中,-20℃保存,用于总溶解态氮(TDN)、硝态氮(NO_3^- -N)、亚硝态氮(NO_2^- -N)、铵态氮(NH_4^+ -N)、溶解有机碳(DOC)和总溶解态氨基酸(TDAA)的测定.

1.4 样品分析方法

NO_3^- -N、 NH_4^+ -N及 NO_2^- -N分别通过镉铜还原法^[15]、次溴酸钠法^[15]和重氮-偶氮法^[16]测定;DOC、TDN根据高温催化氧化(HTCO)方法进行测定^[17],所用仪器为TOC-V_{CPH}分析仪(Shimadzu Corp., Tokyo, Japan),以邻苯二甲酸氢钾和硝酸钾分别作为DOC和TDN测定的标准品. 每个样品平行测定6次,相对偏差小于0.5%. 溶解有机氮(DON)为TDN与溶解无机氮(DIN)的差值,其中DIN为 NH_4^+ -N、 NO_2^- -N和 NO_3^- -N三者之和.

氨基酸通过柱前邻苯二甲醛衍生后高效液相色谱法进行分离测定^[18],所用仪器为e2695型高效液相色谱仪(WatersAlliance, USA)并配置以荧光检测器和Agilent分离柱(ZORBAX EclipseAAA, 4.6 ×

150 mm, 5 μm). 所用标准品为14种氨基酸混标(Fulka, USA),共分离检测14种氨基酸,包括天冬氨酸(Asp)、谷氨酸(Glu)、丝氨酸(Ser)、组氨酸(His)、甘氨酸(Gly)、苏氨酸(Thr)、精氨酸(Arg)、丙氨酸(Ala)、酪氨酸(Tyr)、缬氨酸(Val)、甲硫氨酸(Met)、苯丙氨酸(Phe)、异亮氨酸(Ile)、亮氨酸(Leu),相对偏差在3%~5%.

1.5 数据处理方法

利用Origin 8.0软件绘制相关参数柱状分布;数据统计分析是应用SPSS 16.0(IBM Statistical Package for the Social Sciences Inc.)软件进行,相关性分析是利用皮尔森相关系数法进行相关性分析,若 $P < 0.001$ (双边检验),说明参量之间具有明显相关性.

2 结果与讨论

2.1 直排胶州湾污水处理厂不同季节TDN含量和构成特征

直排胶州湾的各污水处理厂排放口不同季节TDN含量变化如图2所示. 可以看出,各污水处理厂不同季节排放口TDN浓度和构成有所不同,其中,李村河污水处理厂和海泊河污水处理厂季节差异显著,而娄山河污水处理厂和团岛污水处理厂差异相对较小,但基本上呈现3月和11月高、5月和7月低的变化特征. 对于海泊河污水处理厂,其排放口3月TDN最高,达3580.65 μmol·L⁻¹,其次为

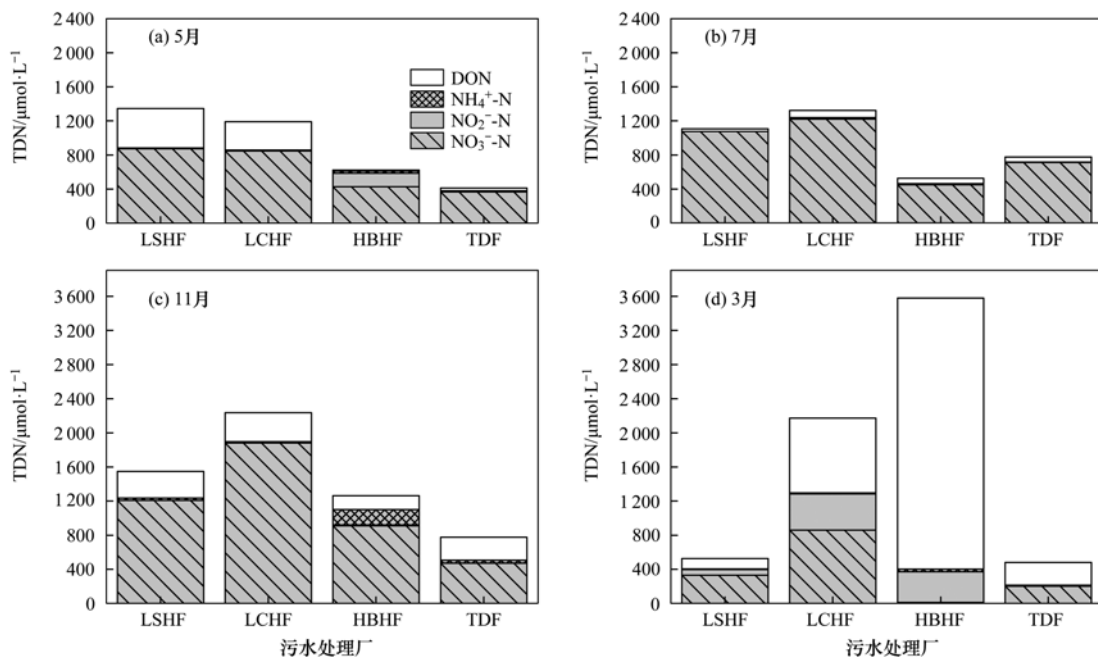


图2 直排胶州湾各污水处理厂不同季节TDN的浓度和构成

Fig. 2 Concentration and composition of TDN at STPs around JZB in different seasons

11 月, 达 $1\,262.50\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 而 5 月和 7 月相差不大, 分别为 $526.73\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 和 $624.45\ \mu\text{mol}\cdot\text{L}^{-1}$; 相应地, TDN 的构成也有显著差异, 3 月以 DON 为主, 摩尔分数高达 88.75%, DIN 摩尔分数仅为 12%, DIN 中以还原态的 NH_4^+-N 和 NO_2^--N 为主, 而其余 3 个季节 TDN 中以 DIN 为主, 摩尔分数在 65.4% ~ 97.9%, DIN 中以 NO_3^--N 为主, 占比都在 69% 以上. 3 月海泊河污水处理厂 TDN 含量显著高于其他季节且构成以具有还原态氮 (包括 DON、 NH_4^+-N 和 NO_2^--N) 为主, 表明该污水处理厂的生化处理工艺对氮的生物氧化作用效果不佳. 同样, 李村河污水处理厂排放口 TDN 浓度和构成也有较大差异. 实际上, 调查期间这两个污水处理厂正处于扩容和改造阶段, 导致其污水负荷和处理工艺尚不稳定. 而团岛污水处理厂和娄山河污水处理厂处理工艺较为稳定, 其排放口不同季节 TDN 差异不大.

另外, 调查结果表明, 海泊河污水处理厂排放口不同季节氨氮含量明显高于其他污水处理厂, 这可能是由于该污水处理厂采用 AB 法即两段活性污泥法工艺, 对生活污水中氨氮处理排放执行《城镇污水处理厂污染物排放标准》(GB 18918-2002) 中一级 B 指标, 即氨氮 $\leq 8\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的要求, 而其它 3 个污水处理厂均采用改进的 A^2/O 工艺, 可以满足该标准中一级 A 指标即氨氮 $\leq 5\ \text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的要求^[19~23].

2.2 直排胶州湾污水处理厂不同季节 DON 生物可利用性潜力评价

2.2.1 基于 DOC/DON 分析直排胶州湾污水处理厂排放口有机质生物可利用性

DOC/DON 可以作为指征 DOM 生物可利用性的一个重要参数. DOC/DON 值低, 表明有机质矿化程度低, 生物可利用高, 反之则表明有机质矿化程度高, 生物可利用低^[24, 25]. Pagilla 等^[26] 研究结果表明, $\text{DOC}/\text{DON} \leq 11$ 时, DOM 具有较高的生物可利用性潜力, 对受纳水体的氮污染具有显著影响. 胶州湾各污水处理厂不同季节水体中 DOC/DON 变化差异较大, 分布在 $0.2 \sim 26.2\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ 之间, 年平均值为 $(5.05 \pm 6.39)\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (图 3), 不同季节 DOC/DON 的平均值分别为 $(9.78 \pm 11.92)\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (5 月)、 $(6.90 \pm 2.52)\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (7 月)、 $(1.77 \pm 0.93)\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (11 月) 和 $(1.76 \pm 2.32)\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$ (3 月). 整体而言, 11 月和 3 月有机质的生物可利用性较 5 月和 7 月高, 可能是由于这两个季节温度较低, 未达到污水处理池中硝化/反硝化过程的适宜温度 (30°C 左右)^[27].

对于环胶州湾各污水处理厂的 DOC/DON, 只有 5 月海泊河污水处理厂和团岛污水处理厂出口大于 $11\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 而其余季节各污水处理厂出口都小于 $11\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 表明有机质具有一定的可矿化和生物可利用性潜力; 特别是各污水处理厂排放口在 3 月和 11 月时都低于 $5\ \text{mol}\cdot\text{mol}^{-1}$, 与美国伊利诺斯州污水处理厂和波兰北部污水处理厂 ($1.1 \sim$

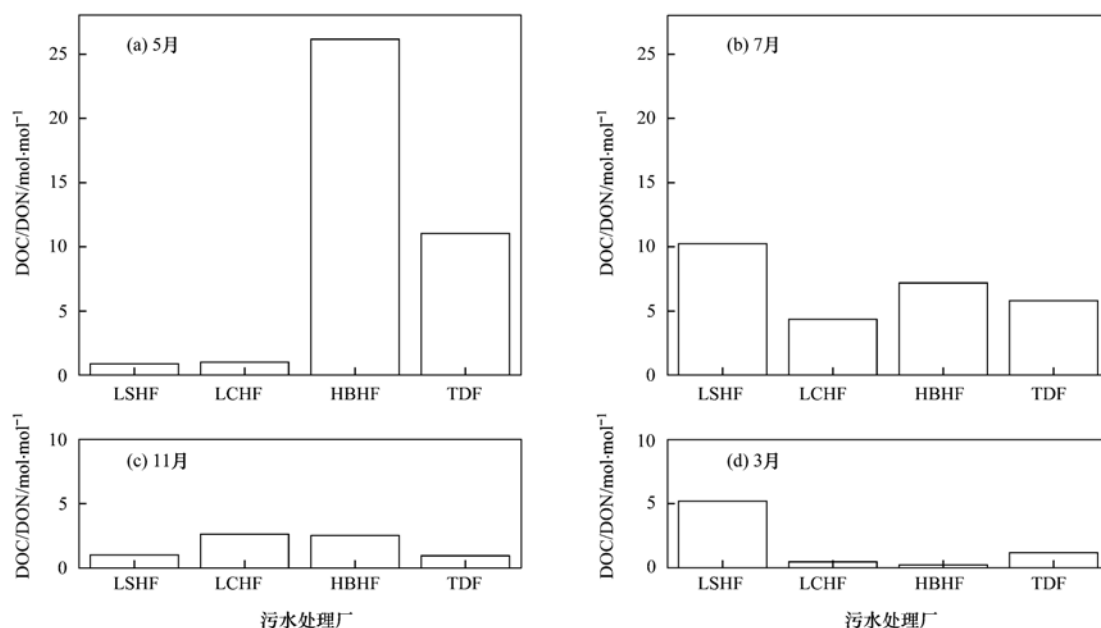


图3 入胶州湾污水处理厂排放口不同季节 DOC/DON 值

Fig. 3 Values of DOC/DON in the discharge outlets of STPs around JZB in different seasons

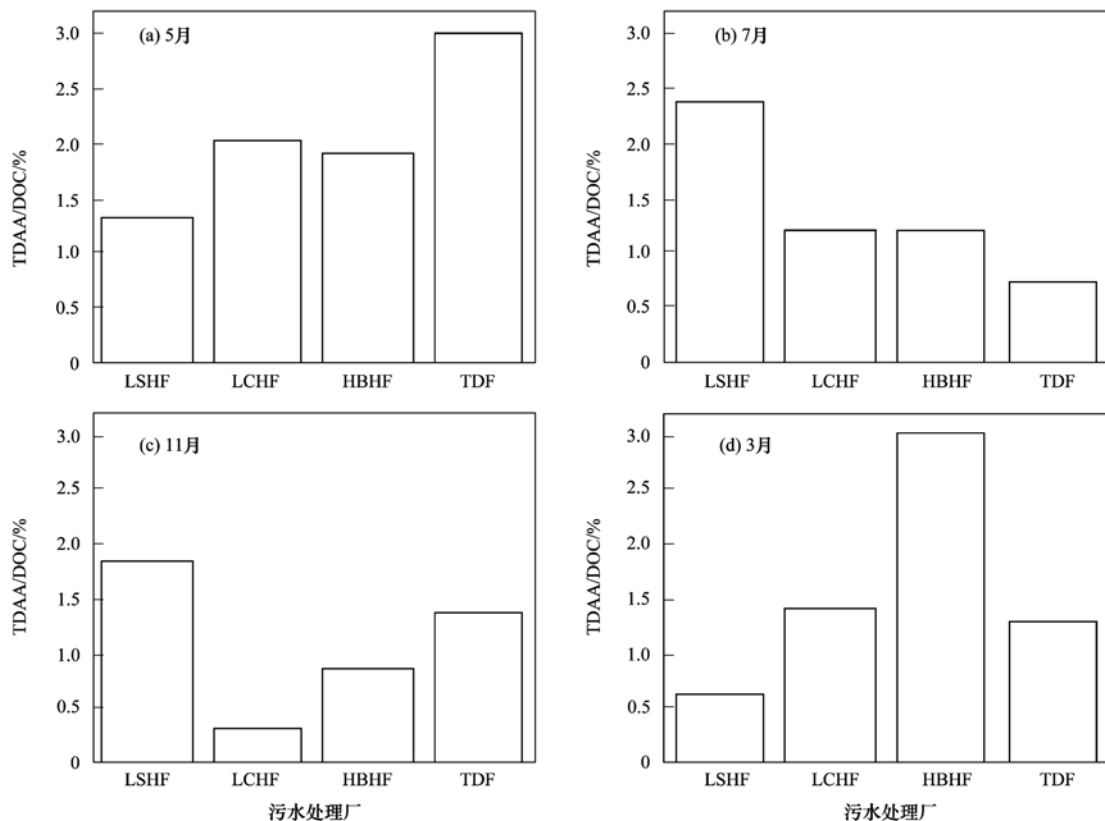
3.2 mol·mol⁻¹) 排污口中 DOC/DON 值接近^[26, 28], 表明这些污水处理厂的有机质具有较高的生物可利用性潜力。

2.2.2 直排胶州湾污水处理厂排放口中氨基酸丰度和构成对 DON 生物可利用性指示

(1) 基于氨基酸在有机质中丰度指示 DON 生物可利用性潜力

作为溶解有机质 (DOM) 中易于生物降解的组分, TDAA 在 DOM 中的占比可作为 DOM 生物可利用性潜力的评价指标, 其值越高, 表明 DOM 的生物

可利用性潜力越大^[7, 8]。由于 DOC 的测定误差小于 DON, 本研究以 TDAA 中所含碳在 DOC 中的摩尔分数即 x (TDAA/DOC) 来评价入胶州湾各污水处理厂排放口不同季节 DOM 的生物可利用性。结果表明 (图 4), 直排胶州湾各污水处理厂排放口不同季节 TDAA/DOC 值差异较大, 分布在 0.33% ~ 3.02% 之间, 平均值为 1.54% ± 0.78%, 这与长江水体 (1.79% ~ 2.60%)^[29] 和美国 Atchafalaya 河水 (0.94% ~ 2.95%) 相近, 而高于 Mississippi 河 (0.85% ~ 1.40%)^[30]。



TDAA/DOC 表示 TDAA 中所含碳在 DOC 中的摩尔分数

图 4 直排胶州湾各污水处理厂排放口不同季节氨基酸中所含碳在 DOC 中占比

Fig. 4 DOC normalized yields of amino acids in the discharge outlets of STPs around JZB in different seasons

Davis 等^[31]通过生物降解现场培养实验, 分析了 DOM 降解前后 TDAA 的丰度, 提出 TDAA/DOC 值为 1.60% 和 1.10% 时可分别作为有机质易降解 DOM (Labile DOM, L-DOM) 和半易降解 DOM (Semi-labile DOM, S-DOM) 的评价标准, 以水体中 TDAA/DOC 值与标准值相减, 二者差值再除以 TDAA/DOC 的占比可以大体估算 S-DOM 和 L-DOM 的比例^[30, 31]。据此方法估算出直排入胶州湾各污水处理厂排污口水体不同季节 L-DOM 有较大差异, 其中, 3 月海泊河污水处理厂、5 月团岛污水处理厂以及 7 月娄山河污水处理厂排放口 L-DOM 较高, 摩

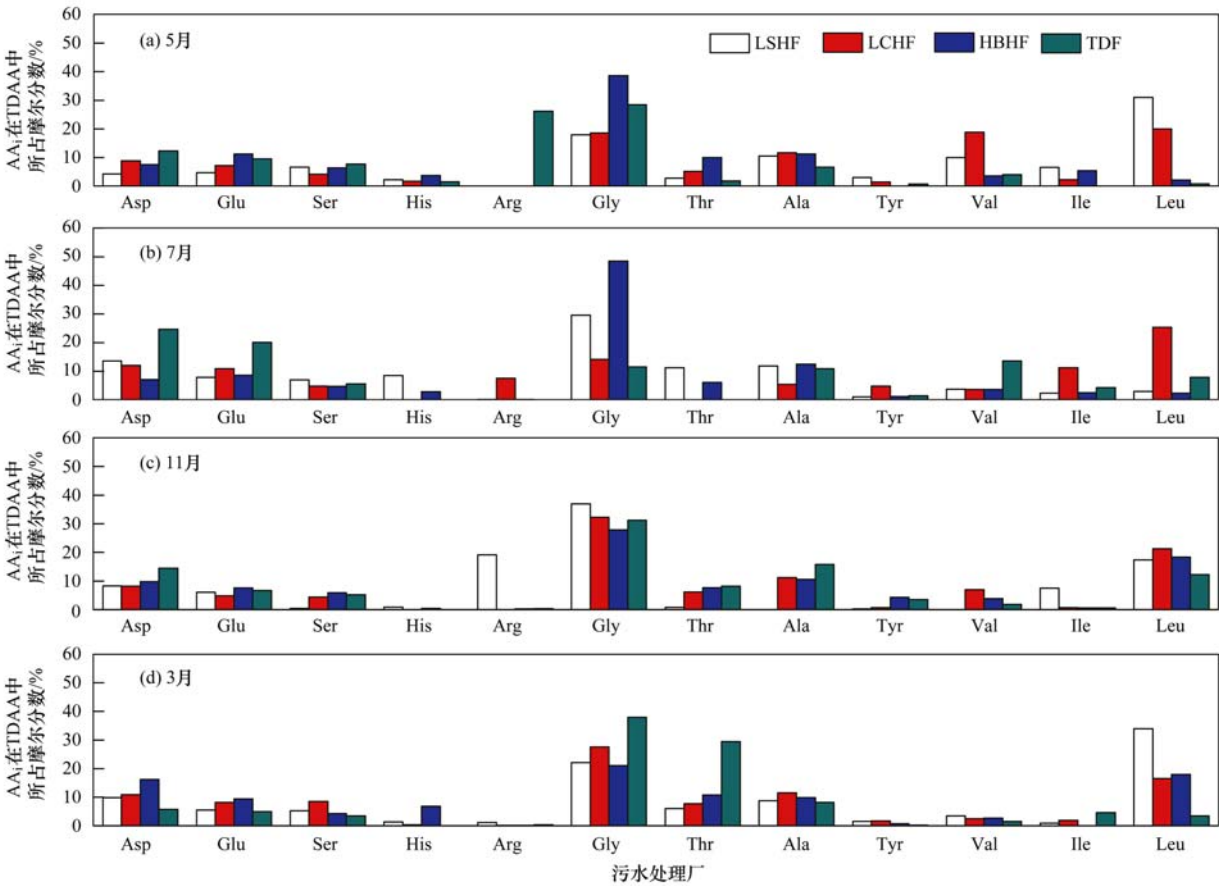
尔分数分别达到 46.95%、46.71% 和 32.85%; 5 月李村河污水处理厂和海泊河污水处理厂、11 月娄山河污水处理厂 L-DOM 较低, 摩尔分数分别达到 21.91%、16.55% 和 12.60%, 其余季节各污水处理厂排放口水体无 L-DOM。而以 S-DOM 标准衡量, 则直排入胶州湾各污水处理厂排污口水体在不同季节具有 S-DOM, 3 月、5 月、7 月和 11 月的平均摩尔分数分别达到 31.11%、46.97%、20.50% 和 0.44%。这与应用 DOC/DON 指示入胶州湾各污水处理厂排放口 DOM 具有一定生物可利用性的结果基本一致。需要指出的是, DOM 生物可利用性与 DOM 的

来源和接纳水体密切相关. 由于入胶州湾各污水处理厂 DOM 来源与河流有较大差异,且胶州湾海域微生物构成等与密西西比河流入的墨西哥湾有所不同,具有高生物可利用性的 TDAA/DOC 标准值的确定最好通过在胶州湾现场进行的生物降解实验来确定.

(2) 氨基酸构成

尽管直排胶州湾各污水处理厂排放口污水中氨基酸绝对丰度有所差异,但所检测出的 12 种氨基酸在 TDAA 中摩尔分数排序基本一致,其中, Gly 的含量最高,达到 27.76% 以上; 其次为 Leu, 占比在

14.61% 左右,再次为 Asp、Ala、Glu、Thr、Ser 和 Val,摩尔分数在 5.25% ~ 10.86% 之间,而 His、Arg、Ile 和 Tyr 含量较低,摩尔分数在 3.50% 以下(图 5),这与黄满红等^[32]应用氨基酸分析仪所测定的生活污水中的氨基酸组成由所不同,该研究表明生活污水中 Glu、Asp、Ala、Val 和 Leu 含量较高. 污水中氨基酸构成不同,这一方面可能与污水的来源不同有关,另一方面,也与污水处理厂排放口污水经生化降解过程有关,在此过程中,一些易降解的氨基酸组分相对含量降低,而相对难降解的氨基酸组分则被富集,导致氨基酸相对丰度发生变化.



AA_i/TDAA 表示每种氨基酸(Asp、Gly、Ser、His 等 12 种)在 TDAA 中的摩尔百分比; Asp:天冬氨酸; Gly:谷氨酸; Ser:丝氨酸; His:组氨酸; Arg:精氨酸; Gly:甘氨酸; Thr:苏氨酸; Ala:丙氨酸; Tyr:酪氨酸; Val:缬氨酸; Ile:异亮氨酸; Leu:亮氨酸

图 5 直排胶州湾各污水处理厂排放口不同季节氨基酸的构成

Fig. 5 Composition of amino acids in the discharge outlets of STPs around JZB in different seasons

水体中氨基酸的构成和相对丰度与不同种类氨基酸的生物可利用性有关,因此,氨基酸的组成可以粗略指示有机质的降解程度^[33, 34]. 环胶州湾各污水处理厂排放口中 Gly 含量最高,这可能是由于微生物细胞壁中富含 Gly^[35],相对于细胞质中的氨基酸, Gly 较难被生物降解,因此,随着 DOM 生物降解程度的加重, Gly 相对丰度会进一步增大^[34, 36, 37].

比如,海泊河污水处理厂 3 月 TDN 较高(图 2), DOC/DON 值较低(图 3), Gly 含量较低,表明其 DOM 未经过深度生物降解;而 7 月该污水处理厂 TDN 含量较 3 月显著降低, DOC/DON 值和 Gly 含量则较 3 月显著增高,表明 7 月该排放口污水中 DOM 发生明显的生物降解. 另外,作为 TDAA 的重要组成部分,组氨酸(His)富含于微生物细胞质

中^[35],较其他种类氨基酸易于降解,因而 His 含量随 DOM 生物降解加剧和生物可利用性减小而减小. 进一步发现表明 His/TDAA 与 TDAA/DOC 呈正相关 ($n = 16$, $R^2 = 0.5861$, $P < 0.01$, 图 6), 表明 His/TDAA 与 TDAA/DOC 一样,可作为 DOM 生物可利用性潜力的指标. 这与 Zhang 等^[38]应用氨基酸构成和丰度对长江口及其邻近海域 DOM 生物可利用性的研究结果基本一致.

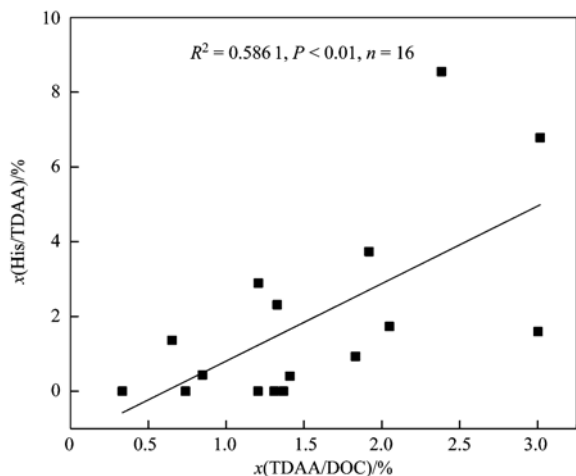


图 6 直排胶州湾各污水处理厂排放口 TDAA/DOC 与 His/TDAA 的相关性

Fig. 6 Correlation between TDAA/DOC and His/TDAA in the discharge outlets of STPs around JZB in different seasons

3 结论

(1) 直排胶州湾污水处理厂排放口水体中 TDN 浓度及其构成因季节和污水处理厂工艺不同而具有显著差异, TDN 的变化范围为 $413.10 \sim 3580.65 \mu\text{mol} \cdot \text{L}^{-1}$, 并基本呈现 3 月和 11 月月高、5 月和 7 月低的变化特征, 其中, DON 占比的变化范围在 $2.14\% \sim 88.75\%$ 之间.

(2) 直排胶州湾污水处理厂排放口 5 月、7 月、11 月和 3 月的 DOC/DON 的平均值分别为 (9.78 ± 11.92) 、 (6.90 ± 2.52) 、 (1.77 ± 0.93) 和 $(1.76 \pm 2.32) \text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, DOC/DON 值较低, 表明 DOM 具有较高的生物可利用性, 可能会加重胶州湾海域氮污染.

(3) 直排胶州湾各污水处理厂排放口不同季节 TDAA/DOC 值差异较大, 分布在 $0.33\% \sim 3.02\%$ 之间, 具有生物可利用 DOM 的摩尔分数则在 $0.44\% \sim 46.97\%$ 之间; 其中, TDAA 中 His/TDAA 可作为评价 DOM 生物可利用性潜力的指标.

参考文献:

[1] Eatherall A, Naden P S, Cooper D M. Simulating carbon flux to

the estuary: The first step[J]. Science of the Total Environment, 1998, **210-211**: 519-533.

[2] Hansell D A, Carlson C A. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter[M]. (2nd ed). San Diego: Academic Press, 2015. 127-232.

[3] Berman T, Chava S. Algal growth on organic compounds as nitrogen sources[J]. Journal of Plankton Research, 1999, **21** (8): 1423-1437.

[4] Hu Z X, Mulholland M R, Duan S S, et al. Effects of nitrogen supply and its composition on the growth of *Prorocentrum donghaiense*[J]. Harmful Algae, 2012, **13**: 72-82.

[5] Killberg-Thoreson L, Mulholland M R, Heil C A, et al. Nitrogen uptake kinetics in field populations and cultured strains of *Karenia brevis*[J]. Harmful Algae, 2014, **38**: 73-85.

[6] 胡章喜, 徐宁, 段舜山, 等. 尿素对中国近海 3 种典型赤潮藻生长的影响[J]. 环境科学学报, 2010, **30** (6): 1265-1271.

[7] Confer D R, Logan B E, Aiken B S, et al. Measurement of dissolved free and combined amino acids in unconcentrated wastewaters using high performance liquid chromatography[J]. Water Environment Research, 1995, **67**(1): 118-125.

[8] Pehlivanoglu-Mantas E, Sedlak D L. Measurement of dissolved organic nitrogen forms in wastewater effluents: Concentrations, size distribution and NDMA formation potential[J]. Water Research, 2008, **42**(14): 3890-3898.

[9] 王修林, 李国强, 石晓勇. 胶州湾主要化学污染物海洋环境容量[M]. 北京: 科学出版社, 2006. 8-93.

[10] 青岛市统计局. 青岛统计年鉴-2013[M]. 北京: 中国统计出版社, 2014. 216-218.

[11] Ambonguilat S, Gallard H, Garron A, et al. Evaluation of the catalytic reduction of nitrate for the determination of dissolved organic nitrogen in natural waters[J]. Water Research, 2006, **40**(4): 675-682.

[12] Lee W, Westerhoff P. Dissolved organic nitrogen measurement using dialysis pretreatment[J]. Environmental Science & Technology, 2005, **39**(3): 879-884.

[13] Bronk D A, Roberts Q N, Sanderson M P, et al. Effluent Organic Nitrogen (EON): Bioavailability and Photochemical and Salinity-Mediated Release[J]. Environmental Science & Technology, 2010, **44**(15): 5830-5835.

[14] 钱国栋, 汉红燕, 刘静, 等. 近 30 年胶州湾海水中主要化学污染物时空变化特征[J]. 中国海洋大学学报, 2009, **39** (4): 781-788.

[15] Grasshoff K, Kremling K, Ehrhardt M. Methods of seawater analysis[M]. New York: Verlag Chemie, Weinheim, 1976. 276-281.

[16] Barnes H. Apparatus and methods of oceanography. Part One: Chemical[M]. London: George Allen and Unwin Ltd, 1959. 341-345.

[17] Spyres G, Nimmo M, Worsfold P J, et al. Determination of dissolved organic carbon in seawater using high temperature catalytic oxidation techniques[J]. Trends in Analytical

- Chemistry, 2000, **19**(8): 498-506.
- [18] Kaiser K, Benner R. Hydrolysis-induced racemization of amino acids[J]. *Limnology and Oceanography: Methods*, 2005, **3**: 318-325.
- [19] 臧海龙, 金彪, 刘东旭, 等. 青岛市委山河污水处理厂升级改造工程设计[J]. *给水排水*, 2011, **37**(3): 35-38.
- [20] 段存礼, 顾瑞环, 程俊涛, 等. 青岛李村河污水厂升级改造工程设计及运行[J]. *中国给水排水*, 2011, **27**(12): 66-70.
- [21] 李永秋, 安森, 沈晓南, 等. 青岛市海泊河污水处理厂二级出水深度处理技术研究[J]. *环境科学与技术*, 2000, (4): 20-23, 43.
- [22] 武鹏崑, 李煜华, 许衍营, 等. 青岛市团岛污水处理厂工艺设计和运行总结[J]. *青岛建筑工程学院学报*, 2002, **23**(4): 64-66.
- [23] 张悦. 青岛海泊河污水处理厂自动化系统的设计特色[J]. *中国给水排水*, 1998, **14**(3): 47-49.
- [24] Görs S, Rentsch D, Schiewer U, *et al.* Dissolved organic matter along the eutrophication gradient of the Darß-Zingst Bodden Chain, Southern Baltic Sea; I. Chemical characterisation and composition[J]. *Marine Chemistry*, 2007, **104**(3-4): 125-142.
- [25] Hansell D A, Carlson C A. Biogeochemistry of marine dissolved organic matter[M]. San Diego: Academic Press, 2002.
- [26] Pagilla K R, Urgan-Demirtas M, Czerwionka K, *et al.* Nitrogen speciation in wastewater treatment plant influents and effluents—the US and Polish case studies [J]. *Water Science & Technology*, 2008, **57**(10): 1511-1517.
- [27] 李文君. 同步硝化反硝化脱氮效果研究[D]. 太原: 太原理工大学, 2008. 11-14.
- [28] Hopkinson C, Cifuentes L, Burdige D, *et al.* DON subgroup report[J]. *Marine Chemistry*, 1993, **41**(1-3): 23-36.
- [29] 石晓勇, 张桂成, 梁生康, 等. 长江大通站溶解有机氮生物可利用性潜力及输入通量[J]. *中国环境科学*, 2015, **35**(12): 3698-3706.
- [30] Shen Y, Fichot C G, Benner R. Floodplain influence on dissolved organic matter composition and export from the Mississippi-Atchafalaya River system to the Gulf of Mexico[J]. *Limnology and Oceanography*, 2012, **57**(4): 1149-1160.
- [31] Davis J, Benner R. Quantitative estimates of labile and semi-labile dissolved organic carbon in the western Arctic Ocean: A molecular approach[J]. *Limnology and Oceanography*, 2007, **52**(6): 2434-2444.
- [32] 黄满红, 李咏梅, 顾国维. 生活污水中蛋白质测试方法研究[J]. *环境工程学报*, 2009, **3**(3): 417-421.
- [33] Wheeler P A, North B B, Stephens G C. Amino acid uptake by marine phytoplankters[J]. *Limnology and Oceanography*, 1974, **19**(2): 249-259.
- [34] Yamashita Y, Tanoue E. Chemical characteristics of amino acid-containing dissolved organic matter in seawater[J]. *Organic Geochemistry*, 2004, **35**(6): 679-692.
- [35] Cowie G L, Hedges J I. Sources and reactivities of amino acids in a coastal marine environment[J]. *Limnology and Oceanography*, 1992, **37**(4): 703-724.
- [36] Colombo J C, Silerberg N, Gearing J N. Amino acids biogeochemistry in the Laurentian Trough: vertical fluxes and individual reactivity during early diagenesis [J]. *Organic Geochemistry*, 1998, **29**(4): 933-945.
- [37] Hecky R E, Mopper K, Kilham P, *et al.* The amino acid and sugar composition of diatom cell-walls [J]. *Marine Biology*, 1973, **19**(4): 323-331.
- [38] Zhang G C, Liang S K, Shi X Y, *et al.* Dissolved organic nitrogen bioavailability indicated by amino acids during a diatom bloom to dinoflagellate bloom succession in the Changjiang River estuary and its adjacent shelf [J]. *Marine Chemistry*, 2015, **176**: 83-95.

CONTENTS

Development and Performance Evaluation of a Supramicron Particle Generation System for Aerosol Instrument Calibration	CHEN Xiao-tong,JIANG Jing-kun,DENG Jian-guo, <i>et al.</i> (789)
Establishment of Assessment Method for Air Bacteria and Fungi Contamination	ZHANG Hua-ling, YAO Da-jun, ZHANG Yu, <i>et al.</i> (795)
Chemical Characteristics and Sources of Atmospheric Carbonyls During the 2014 Beijing APEC	HE Xiao-lang, TAN Ji-hua, GUO Song-jun, <i>et al.</i> (801)
Different Air Pollution Situations of O ₃ and PM _{2.5} During Summer in Beijing	WANG Zhan-shan, ZHANG Da-wei, LI Yun-ting, <i>et al.</i> (807)
Aerosol Optical Properties in the Northern Suburb of Nanjing During Haze Days in January 2013	WANG Li-peng, MA Yan, ZHENG Jun, <i>et al.</i> (816)
A Numerical Study of Typical Heavy Air Pollution Episode of PM _{2.5} in Shanghai	CHANG Lu-yu, XU Jian-ming, ZHOU Guang-qiang, <i>et al.</i> (825)
Indoor Deposition Flux, Seasonal Variations and Human Exposure Levels of Polybrominated Diphenyl Ethers in Xiamen, China	HAN Wen-liang, LIU Yu, CHEN Hai-ming, <i>et al.</i> (834)
Nitric Oxide Removal with a Fe-TiO ₂ /PSF Hybrid Catalytic Membrane Bioreactor	LI Bao-ren, CHEN Zhou-yang, WANG Jian-bin, <i>et al.</i> (847)
Potential Bioavailability of Dissolved Organic Nitrogen in the Discharge Outlets of Sewage Treatment Plants Around the Jiaozhou Bay	KONG Xiu-jun,ZHANG Peng,YANG Nan-nan, <i>et al.</i> (854)
Inversion Model and Daily Variation of Total Phosphorus Concentrations in Taihu Lake Based on GOCI Data	DU Cheng-gong, LI Yun-mei, WANG Qiao, <i>et al.</i> (862)
Temporal and Spatial Distribution of Environmental Factors and Phytoplankton During Algal Bloom Season in Pengxi River, Three Gorges Reservoir	ZHOU Chuan, YU Jian-jun, FU Li, <i>et al.</i> (873)
Three-dimensional Fluorescence Spectral Characteristics of Different Molecular Weight Fractionations of Dissolved Organic Matter in the Water-level Fluctuation Zones of Three Gorges Reservoir Areas	CHEN Xue-shuang, JIANG Tao, LU Song, <i>et al.</i> (884)
Distribution Characteristics and Source Apportionment of <i>n</i> -Alkanes in Water from Yellow River in Henan Section	FENG Jing-lan, XI Nan-nan, ZHANG Fei, <i>et al.</i> (893)
Distribution Characteristics and Source Identification of Organochlorine Pesticides in Surface Soil in Karst Underground River Basin	XIE Zheng-lan, SUN Yu-chuan, ZHANG Mei, <i>et al.</i> (900)
Effects of Long-term Different Tillage Methods on Mercury and Methylmercury Contents in Purple Paddy Soil and Overlying Water	WANG Xin-yue, TANG Zhen-ya, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (910)
Speciation and Risk Characteristics of Heavy Metals in the Sediments of the Yangtze Estuary	YIN Su, FENG Cheng-hong, LI Yang-yang, <i>et al.</i> (917)
Distribution and Pollution Assessment of Nutrient and Heavy Metals in Surface Sediments from Lake Gehu in Southern Jiangsu Province, China	XIONG Chun-hui, ZHANG Rui-lei, WU Xiao-dong, <i>et al.</i> (925)
Characteristics of Deposited Sediment and Assessment of Heavy Metals in Typical Tributaries Bay Riparian Zone of the Three Gorges Reservoir	WANG Yong-yan, WEN An-bang, SHI Zhong-lin, <i>et al.</i> (935)
Pollution Characteristics Analysis and Risk Assessment of Total Mercury and Methylmercury in Aquatic Products of the Haihe Stem River	TONG Yin-dong, ZHANG Wei, DENG Chun-yan, <i>et al.</i> (942)
Distribution and Content of Transferable Nitrogen in the Soil of Water Level Fluctuating Zones of Mainstream and Its Tributary of Three Gorges Reservoir Areas During the Dry Period	HE Li-ping, LIU Dan, YU Zhi-guo, <i>et al.</i> (950)
Effect of Soil and Dominant Plants on Mercury Speciation in Soil and Water System of Water-Level-Fluctuation Zone in the Three Gorges Area	LIANG Li, WANG Yong-min, ZHANG Cheng, <i>et al.</i> (955)
Runoff Pollution Experiments of Paddy Fields Under Different Irrigation Patterns	ZHOU Jing-wen, SU Bao-lin, HUANG Ning-bo, <i>et al.</i> (963)
Grain Size Distribution Characteristics of Suspended Particulate Matter as Influenced by the Apparent Pollution in the Eutrophic Urban Landscape Water Body	GONG Dan-yan, PAN Yang, HUANG Yong, <i>et al.</i> (970)
Effect of Intermittent Aeration on Nitrogen Removal Efficiency in Vertical Subsurface Flow Constructed Wetland	WANG Jian, LI Huai-zheng, ZHEN Bao-chong, <i>et al.</i> (980)
Effect of Non-dissolved Quinone on Perchlorate Reduction by Strain GWF	ZHANG Yuan-yuan, GUO Yan-kai, ZHANG Chao, <i>et al.</i> (988)
Effects of UV Radiation on the Physicochemical Properties and Coagulation Properties of Humic Acid Solution	WANG Wen-dong, ZHANG Ke, FAN Qing-hai, <i>et al.</i> (994)
Removal of Sulfate Ions from Aqueous Solution by Adsorption with Hydrotalcite-like Composite	GU Yi-bing, MA Yong-wen, WAN Jin-quan, <i>et al.</i> (1000)
Effects of Fulvic Acid on Adsorption and Form Distribution of Heavy Metals on Sediments	LI Yu-qing, HE Jiang, LÜ Chang-wei, <i>et al.</i> (1008)
Rapid Synthesis of Metal Organic Framework and Its Adsorption Properties on Anionic Dyes	SUN De-shuai, LIU Ya-li, ZHANG Xiao-dong, <i>et al.</i> (1016)
Adsorption Properties of Fluorine onto Fulvic Acid-Bentonite Complex	FANG Dun, TIAN Hua-jing, YE Xin, <i>et al.</i> (1023)
Influence of Three Low-Molecular-Weight Organic Acids on the Adsorption of Phenanthrene in Purple Soil	XIE Li, CHEN Ben-shou, ZHANG Jin-zhong, <i>et al.</i> (1032)
Adsorptive Stabilization of Soil Cr(VI) Using HDTMA Modified Montmorillonite	JIANG Ting-ting, YU Kai, LUO Qi-shi, <i>et al.</i> (1039)
Effects of Hydrothermal Treatment Time on the Transformations of N, P, K and Heavy Metals in Sewage Sludge	WANG Xing-dong, LIN Jing-jiang, LI Zhi-wei, <i>et al.</i> (1048)
Inhibition of Denitrification by Total Phenol Load of Coal Gasification Wastewater	ZHANG Yu-ying, CHEN Xiu-rong, WANG Lu, <i>et al.</i> (1055)
Element Sulfur Autotrophic Denitrification Combined Anaerobic Ammonia Oxidation	ZHOU Jian, HUANG Yong, LIU Xin, <i>et al.</i> (1061)
Changes of Microbial Community Structure in Activated Sludge Bulking at Low Temperature	DUAN Zheng-hua, PAN Liu-ming, CHEN Xiao-ou, <i>et al.</i> (1070)
Synergetic Inhibitory Effect of Free Ammonia and Aeration Phase Length Control on the Activity of Nitrifying Bacteria	SUN Hong-wei, LÜ Xin-tao, WEI Xue-fen, <i>et al.</i> (1075)
Heterotrophic Nitrification and Aerobic Denitrification of the Hypothermia Aerobic Denitrification Bacterium: <i>Arthrobacter arilaitensis</i>	HE Teng-xia, NI Jiu-pai, LI Zhen-lun, <i>et al.</i> (1082)
Isolation, Identification and Nitrogen Removal Characteristics of a Heterotrophic Nitrification-Aerobic Denitrification Strain y3 Isolated from Marine Environment	SUN Qing-hua, YU De-shuang, ZHANG Pei-yu, <i>et al.</i> (1089)
Estimation of Topsoil Carbon Sequestration Potential of Cropland Through Different Methods: A Case Study in Zhuanglang County, Gansu Province	SHI Chen-di, XU Ming-xiang, QIU Yu-jie (1098)
Priming Effects of Soil Moisture on Soil Respiration Under Different Tillage Practices	ZHANG Yan, LIANG Ai-zhen, ZHANG Xiao-ping, <i>et al.</i> (1106)
Effects of Green Manure Intercropping and Straw Mulching on Winter Rape Rhizosphere Soil Organic Carbon and Soil Respiration	ZHOU Quan, WANG Long-chang, XIONG Ying, <i>et al.</i> (1114)
Heidaigou Opencast Coal Mine: Soil Enzyme Activities and Soil Physical and Chemical Properties Under Different Vegetation Restoration	FANG Ying, MA Ren-tian, AN Shao-shan, <i>et al.</i> (1121)
C, N, P, K Stoichiometric Characteristic of Leaves, Root and Soil in Different Abandoned Years in Loess Plateau	ZHANG Hai-dong, RU Hai-li, JIAO Feng, <i>et al.</i> (1128)
Soil Heavy Metal Spatial Distribution and Source Analysis Around an Aluminum Plant in Baotou	ZHANG Lian-ke, LI Hai-peng, HUANG Xue-min, <i>et al.</i> (1139)
Mixture Leaching Remediation Technology of Arsenic Contaminated Soil	CHEN Xun-feng, LI Xiao-ming, CHEN Can, <i>et al.</i> (1147)
Performance of Electricity Generation and Feasibility of Discontinuous Power Supply of MFC by Using Pretreated Excess Sludge as Fuel	ZHAO Yan-hui, ZHAO Yang-guo, GUO Liang (1156)
Correlation of Persistent Free Radicals, PCDD/Fs and Metals in Waste Incineration Fly Ash	WANG Tian-jiao, CHEN Tong, ZHAN Ming-xiu, <i>et al.</i> (1163)
Effects of Eliminating Backward Production Capacities on Reduction of Dioxin Emissions in Key Industries	GENG Jing, LÜ Yong-long, REN Bing-nan, <i>et al.</i> (1171)

《环境科学》第6届编辑委员会

主 编: 欧阳自远

副主编: 赵景柱 郝吉明 田 刚

编 委: (按姓氏笔画排序)

万国江 王华聪 王凯军 王绪绪 田 刚 田 静 史培军
朱永官 刘志培 刘 毅 汤鸿霄 孟 伟 周宗灿 林金明
欧阳自远 赵景柱 姜 林 郝郑平 郝吉明 聂永丰 黄 霞
黄 耀 鲍 强 潘 纲 潘 涛 魏复盛

环 境 科 学

(HUANJING KEXUE)

(月刊 1976年8月创刊)

2016年3月15日 第37卷 第3期

ENVIRONMENTAL SCIENCE

(Monthly Started in 1976)

Vol. 37 No. 3 Mar. 15, 2016

主 管	中国科学院	Superintended	by	Chinese Academy of Sciences
主 办	中国科学院生态环境研究中心	Sponsored	by	Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences
协 办	(以参加先后为序) 北京市环境保护科学研究院 清华大学环境学院	Co-Sponsored	by	Beijing Municipal Research Institute of Environmental Protection School of Environment, Tsinghua University
主 编	欧阳自远	Editor-in-Chief		OUYANG Zi-yuan
编 辑	《环境科学》编辑委员会 北京市2871信箱(海淀区双清路 18号, 邮政编码:100085) 电话:010-62941102, 010-62849343 传真:010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn	Edited	by	The Editorial Board of Environmental Science (HUANJING KEXUE) P. O. Box 2871, Beijing 100085, China Tel: 010-62941102, 010-62849343; Fax: 010-62849343 E-mail: hjkx@rcees.ac.cn http://www.hjkx.ac.cn
出 版	科 学 出 版 社 北京东黄城根北街16号 邮政编码:100717	Published	by	Science Press 16 Donghuangchenggen North Street, Beijing 100717, China
印 刷 装 订	北京北林印刷厂	Printed	by	Beijing Bei Lin Printing House
发 行	科 学 出 版 社 电话:010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com	Distributed	by	Science Press Tel: 010-64017032 E-mail: journal@mail.sciencep.com
订 购 处	全国各地邮电局	Domestic		All Local Post Offices in China
国外总发行	中国国际图书贸易总公司 (北京399信箱)	Foreign		China International Book Trading Corporation (Guoji Shudian), P. O. Box 399, Beijing 100044, China

中国标准刊号: ISSN 0250-3301
CN 11-1895/X

国内邮发代号: 2-821

国内定价: 120.00元

国外发行代号: M 205

国内外公开发刊