

DOI: 10.5846/stxb201607281538

李家兵, 张宝珠, 朱雨晨, 丁晓燕, 谢蓉蓉, 全川. 闽江河口短叶茳芏群落湿地沉积物反硝化强度对盐度的响应. 生态学报, 2017, 37(1): - .
Li J B, Zhang B Z, Zhu Y C, Ding X Y, Xie R R, Tong C. Response of denitrification intensity to salinity concentrations in *Cyperus Malaccensis* Sediments of the Min River Estuary. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(1): - .

闽江河口短叶茳芏群落湿地沉积物反硝化强度对盐度的响应

李家兵^{1,2}, 张宝珠², 朱雨晨², 丁晓燕², 谢蓉蓉², 全川^{1,3,4,*}

1 福建师范大学地理科学学院, 福州 350007

2 福建师范大学环境科学与工程学院, 福州 350007

3 福建师范大学亚热带湿地研究中心, 福州 350007

4 福建师范大学湿润亚热带生态地理过程教育部重点实验室, 福州 350007

摘要: 为了探讨河口区湿地沉积物反硝化强度对盐度的响应, 2015 年 7 月选择闽江河口覆盖短叶茳芏的鳝鱼滩和道庆洲湿地沉积物为研究对象, 采用密封厌氧培养, 计算不同培养时期在不同盐度下的反硝化速率。结果表明, 在反硝化培养的初期, 鳝鱼滩的反硝化速率从低盐度到高盐度分别为 15.5 ± 1.38 、 4.28 ± 8.46 和 12.94 ± 0.24 mg/(kg.d), 道庆洲分别为 31.93 ± 4.89 、 30.66 ± 5.375 和 36.69 ± 3.44 mg/(kg.d), 鳝鱼滩的 10 天反硝化速率在 0‰ 和 10‰ 盐度下降幅度分别是 5 天的 36.97%、53.01%, 高于道庆洲 22.64%、28.84%, 后期随着时间的变化整体上呈现减小的趋势并趋于 0。另外, 鳝鱼滩和道庆洲反硝化活性随着时间呈现逐渐增加的趋势, 其鳝鱼滩变化幅度在 95.6—99.8%, 道庆洲为 90.0—96.7%, 整个培养期间, 鳝鱼滩的反硝化活性均高于道庆洲的反硝化活性。以上结果反映出盐度对闽江河口湿地沉积物的反硝化速率起到一定的抑制作用。

关键词: 反硝化作用; 盐度; 沉积物; 闽江河口湿地

Response of denitrification intensity to salinity concentrations in *Cyperus Malaccensis* Sediments of the Min River Estuary

LI Jiabing^{1,2}, ZHANG Baozhu², ZHU Yuchen², DING Xiaoyan², XIE Rongrong², TONG Chuan^{1,3,4,*}

1 College of Geographical Sciences, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

2 College of Environmental Science and Engineering, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Research Centre of Wetlands in Subtropical Region, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

4 Fujian Province and Education of Ministry's Key Laboratory of Humid Sub-tropical Eco-geographical Process, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: An undisturbed sediment column sample covered by Shichito matgrass (*Cyperus malaccensis*) in the Shanyutan and Daoqingzhou wetland of the Min River estuary was selected to research the effects of salinity on the denitrification process of the wetland sediment in July 2015. Using the sealed anaerobic culture method, the denitrification rates, which varied with the culture time in different salinity conditions, were calculated. At the initial stage, from low salinity to high salinity culture conditions, the denitrification rates of the sediments in the Shanyutan wetland were 15.5 ± 1.38 , 4.28 ± 8.46 , and 12.94 ± 0.24 mg/(kg.d), respectively. The values in the Daoqingzhou wetland, however, were 31.93 ± 4.89 , 30.66 ± 5.375 and 36.69 ± 3.44 mg/(kg.d), respectively. The decreased amplitudes of the denitrification rates after 10 days in 0‰

基金项目: 国家科技基础性工作专项 (2013FY111800); 国家自然科学基金 (51541906); 福建省基本科研专项重点项目 (2014R1034-1); 福建省科技厅省属公益类科研专项 (2016R1032-1); 福建省教育厅 (JA14088); 福建省科技厅重点项目 (2015R0099)

收稿日期: 2016-07-28; 修订日期: 2016-00-00

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: tongch@fjnu.edu.cn

and 10‰ salinity conditions were 36.97%, and 53.01%, respectively, of the amplitudes after 5 days. The values were higher compared with 22.64% and 28.84% in the Daoqingzhou wetland. In the late culture stage, the denitrification rates showed decreasing trends down to zero. The denitrification activities in the Shanyutan and Daoqingzhou wetlands both showed trends of increasing. The variation ranges in the Shanyutan and Daoqingzhou wetland were 95.6 - 99.8% and 90.0-96.7%, respectively. During the entire training period, the denitrifying activity in the Shanyutan wetland was higher than that in the Daoqingzhou wetland. The results reflected that the salinity had an inhibition effect on the denitrification rate of the sediment in the Min River estuary wetland.

Key Words: denitrification; salinity; sediment; the Min River estuary wetland

河口区是大气圈、水圈、岩石圈和生物圈相互作用形成的重要生态类型之一,也是海岸带地区响应全球气候变化和人类活动较为敏感的生态系统之一^[1]。近年来,由于全球气候变暖导致海平面上升,使盐水不断上溯到河口区较高的上方区域,盐度梯度从接近海水盐度 33—37‰至上方区接近淡水 0.065—0.03‰^[2]。这种盐度上溯引起河口区域物理、化学和生物环境的变化,进而影响沉积物关键元素生物地球化学循环过程,其中氮素生物地球化学循环是其中研究的焦点之一。氮素生物地球化学循环主要包括氨化、硝化、矿化和反硝化等过程,作为氮素损失的主要过程反硝化作用的强弱将决定着温室气体 N_2O 释放的多寡。目前盐水入侵对此过程的影响研究主要集中在长江口和珠江口河口区域^[3-5],对于闽江河口区湿地盐分变化对湿地沉积物反硝化速率以及反硝化活性影响的研究相对较少。本文以福建省长乐市闽江河口区鳔鱼滩和道庆洲为研究区域,采集短叶荇荳群落沉积物,通过室内模拟培养,研究闽江河口区湿地沉积物反硝化过程对不同盐度梯度的响应,揭示闽江河口区湿地沉积物反硝化作用受盐水入侵的影响。

1 研究地区与研究方法

1.1 研究区概况

闽江河口位于福建省长乐市金峰镇,属于中亚热带与亚热带海洋性季风气候的过渡区,气候暖热湿润,年均温 19.85℃,年降水量 1905.73mm。该区拥有众多天然湿地沿河流两岸河漫滩呈带状分布,典型土著种主要为芦苇和短叶荇荳广为分布^[6]。闽江河口受潮汐作用影响较为显著,潮汐特征表现为口外正规半日潮,口内非正规半日浅海潮,水体盐度随潮汐变化而呈周期性变化,表现出从入海口到向上游呈现盐-淡水更替的特征并有上溯的趋势^[7]。本研究选择道庆洲(盐度:0.20‰±0.02‰)和鳔鱼滩均为短叶荇荳湿地(盐度:3.79‰±1.35‰),地理坐标分别为 25°57′21.4″N、119°24′25.6″E 和 26°01′48.0″N、119°37′35.3″E(图 1)。

1.2 实验材料

为了研究短叶荇荳沼泽湿地沉积物反硝化作用对不同盐度梯度的响应,实验于 2015 年 7 月选取闽江河口鳔鱼滩和道庆洲湿地分别代表微咸水和淡水两个类型,采集均完全被短叶荇荳覆盖(95%)的沉积物样品。在两个样地中,根据梅花形布点法,使用潮滩湿地松软沉积物柱状采集及分割一体采样器,在每个典型样区分别随机采集 4 个点位,每个点位采集 3 个表层沉积物(0-10cm)样品,两个点位共采集 24 个新鲜样品,带回实验室挑出可见的动植物残体,石头和其余杂物,自然风干后等分成 2 份:将其中一份风干样品研磨过 2mm 土筛后进行充分混合装袋作为培养使用;另一份风干样品研磨过 0.1492mm 土筛,装袋置于 4℃ 冰箱中保存备用。

1.3 实验设计

1.3.1 室内培养

本次研究根据闽江河口区盐度的变化将盐度梯度设为 3 个梯度,分别为 0‰(1 升去离子水中添加 0 克海盐)、5‰(1 升去离子水中添加 6 克海盐)、10‰(1 升去离子水中添加 12 克海盐),然后称取过 2 mm 土筛沉积物

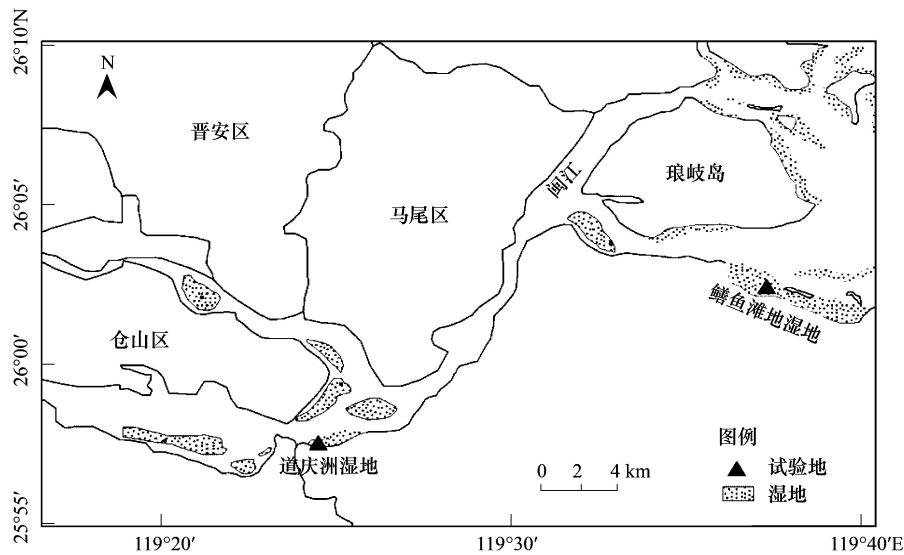


图1 闽江河口湿地采样点示意图

Fig.1 Location of sampling sites in two wetlands in the Min River estuary

5g, 分别放入 10×180mm 的螺口硬质玻璃试管中, 每个盐度梯度进行 3 个重复, 其中 0 天培养的不加 KNO_3 , 另外分别定量加入含氮量为 2.275mg 的 KNO_3 溶液, 加入去离子水至 12.5ml (包括 KNO_3 溶液的体积), 为了保证培养过程始终处于厌氧环境, 培养沉积物(水)体系冲入适量氮气, 最后将培养管放置于 23.5℃ 的培养箱中恒温培养。预培养 2 天后, 将 4mol/L 的 KCL 溶液 12.5ml 加入到不加 KNO_3 的试管中, 振荡 1 小时后, 静置 30 分钟, 进行过滤, 放置到干净的塑料瓶中测定硝态氮作为初始量; 对加 KNO_3 的培养瓶持续进行恒温培养, 开始正式计算时间, 分别在第 2、5、10、17 和 25 天取样, 各取 3 瓶表层土样作为 3 个平行样, 分别加 4mol/L 的 KCL 溶液 12.5ml, 振荡 1 小时后, 过滤到干净的塑料瓶中待测。

1.3.2 沉积物反硝化速率与活性计算

沉积物反硝化速率和反硝化活性根据培养前后沉积物中 NO_3^- 含量的差值来计算, 具体计算公式如下:

$$\Delta t = t_{i+1} - t_i \quad (1)$$

$$A_{\text{denit}} = C_{[\text{NO}_3^- - \text{N}]_{k+1}} - C_{[\text{NO}_3^- - \text{N}]_k} \quad (2)$$

$$R_{\text{denit}} = A_{\text{denit}} / \Delta t \quad (3)$$

$$R_{\text{反硝化活性}} = \frac{[\text{NO}_3^- - \text{N}]_0 - [\text{NO}_3^- - \text{N}]_k}{[\text{NO}_3^- - \text{N}]_0} \times 100\% \quad (4)$$

式中, t_i 为培养起始时间, t_{i+1} 为培养结束时间, $[\text{NO}_3^- - \text{N}]_k$ 、 $[\text{NO}_3^- - \text{N}]_{k+1}$ 分别为反硝化培养前后沉积物样品 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 浓度 (mg/kg); $[\text{NO}_3^- - \text{N}]_0$ 表示反硝化过程中硝态氮初始值 (第 0 d 的值); A_{denit} 为反硝化培养时期 $\text{NO}_3^- - \text{N}$ 的变化量; R_{denit} 为净反硝化速率 (mg/(kg·d)), $R_{\text{反硝化活性}}$ 为反硝化活性 (%)。

1.4 测定方法

电导率和 pH 分别用便携式电导计 (2265FS, USA) 和便携式 pH 计 (STARTER 300, USA) 测定; 铵态氮 ($\text{NH}_4^+ - \text{N}$) 和硝态氮 ($\text{NO}_3^- - \text{N}$) 采用 2 mol/L 的 KCl 浸提后用连续流动分析仪测定 (SKALAR SAN++, Netherlands); 有机质采用浓硫酸、重铬酸钾外加加热法测定, 全碳 (TC)、全氮 (TN) 采用 CN 元素分析仪 (Elementar Vario MAX CN, Germany) 测定。

1.5 数据统计与分析

数据处理采用 WPS Excel 2016 和 Origin 8.1 软件进行作图、计算及 SPSS22.0 进行相关分析。

2 结果与分析

2.1 道庆洲和鳊鱼滩湿地沉积物理化性质对比

从图 2 中可以看出,试验地鳊鱼滩和道庆洲的电导率、有机质、C/N 和铵态氮均随着季节的变化出现较为明显的波动,但 TN、TC、pH 和硝态氮等理化性质随季节的改变未出现较大波动。同时两个实验地点同一理化性质出现最大和最小值的季节也并不一致。对比两地的理化性质,鳊鱼滩的 pH 和电导率比道庆洲高,而有机质、TC、铵态氮和 C/N 则表现为道庆洲高于鳊鱼滩,两地的 TN 和 NO_3^- -N 差别不明显。

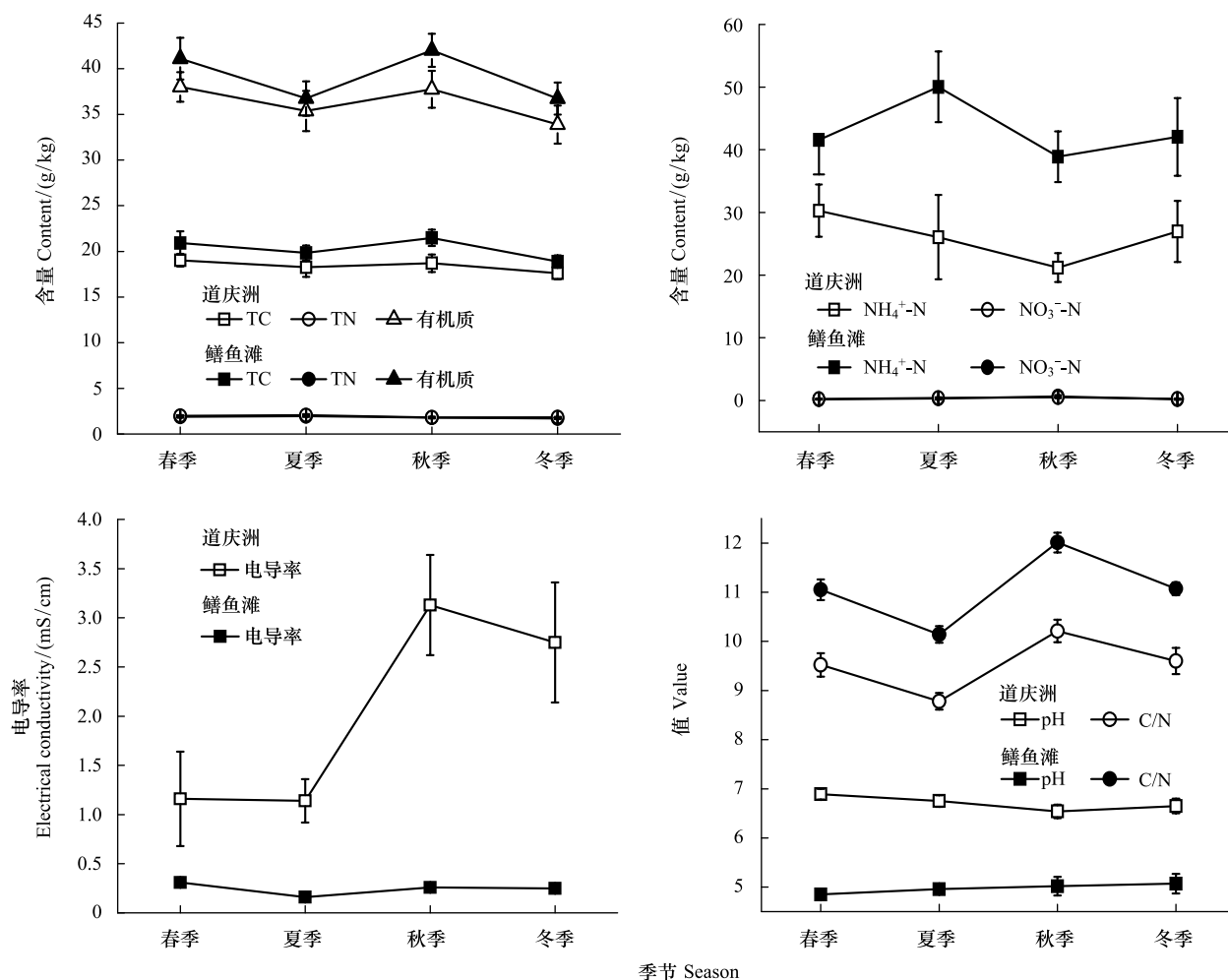


图 2 不同季节道庆洲和鳊鱼滩湿地沉积物理化性质

Fig.2 Seasonal variation of sediment physical and chemical characteristics in the Daoqingzhou and Shanyutan wetlands

2.2 盐水入侵对沉积物反硝化作用的影响

2.2.1 盐水入侵对反硝化速率的影响

由图 3 可知,两个采样点沉积物的反硝化速率在相同盐度的情况下变化的趋势大致相同,除了鳊鱼滩 (5‰) 外其它均表现出随时间的延长出现下降的趋势,最后趋于 0。第 5 天,除了鳊鱼滩 (5‰) 外不同盐度下两地的反硝化速率均都达到最大值,其鳊鱼滩的反硝化速率从低盐度到高盐度分别为 15.5 ± 1.38 、 4.28 ± 8.46 和 $12.94 \pm 0.24 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,最大值出现在低盐度条件下,最小值出现在中盐度环境下;而道庆洲在培养的第 5 天其反硝化速率均高于鳊鱼滩,反硝化速率从低盐度到高盐度分别为 31.93 ± 4.89 、 30.66 ± 5.375 和 $36.69 \pm 3.44 \text{ mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$,最大值出现在高盐度条件下,最小值出现在中盐度环境下。到第 10 天时,除了鳊鱼滩 (5‰) 外,两地其它盐度条件下反硝化速率均出现大幅度下降的趋势,下降的幅度鳊鱼滩要高于道庆洲,鳊鱼滩的反

硝化速率随盐度升高分别为 5.73 ± 4.67 、 12.54 ± 1.90 和 6.87 ± 3.64 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 其 0‰ 和 10‰ 下降幅度分别是 5 天的 36.97%、53.01%, 而 5‰ 增加到原来的 2.93 倍; 道庆洲在 10 天时的反硝化速率分别为 7.23 ± 1.17 、 10.13 ± 1.75 和 10.58 ± 0.90 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 相比较 5 天时分别降低到原来的 22.64%、33.01% 和 28.84%。在培养的第 17 天时鳊鱼滩反硝化速率从低盐度到高盐度分别为 5.74 ± 2.80 、 2.89 ± 2.36 和 8.70 ± 1.56 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 较 10 天反硝化速率来说, 低盐度基本没有变化, 中盐度仍大幅度降低, 降低到 10 天 23%, 高盐度略微升高; 道庆洲的反硝化速率从低盐度到高盐度分别为 9.23 ± 2.79 、 6.70 ± 0.42 和 3.61 ± 0.35 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 中低盐度分别下降到原来的 66.14% 和 34.31%, 相比较 10 天的反硝化速率来说除了低盐度有所增加外, 中高盐度均呈现下降趋势, 两地在培养时期内道庆洲的降低幅度要大于鳊鱼滩。在培养结束期第 25 天时, 两地的反硝化作用均处于较低的水平, 其值均小于 17 天的反硝化速率并趋于 0, 表明这是无论是鳊鱼滩还是道庆洲反硝化过程均趋缓, 有些盐度下反硝化作用处于静止的状态。综上所述, 盐度对两地的反硝化过程的影响较为明显, 在培养初期道庆洲的反硝化速率高于鳊鱼滩, 后期两地的反硝化速率大都显示降低趋势, 相对未加海盐的培养情况, 5‰ 和 10‰ 的盐度条件下下降幅度更大, 说明盐度的存在对反硝化速率均起到抑制作用。

2.2.2 盐水入侵对反硝化活性的影响

由图 4 可知, 鳊鱼滩和道庆洲两地在不同盐度梯度下沉积物反硝化活性在培养时期内均出现缓慢增加的趋势, 但增加的幅度均较小, 在第 17-25 天后变化则趋于平缓。具体来看, 鳊鱼滩反硝化活性变化幅度在 95.6—99.8%, 通过线性拟合, 发现盐度为 0‰ 反硝化活性变化率为 0.153, 5‰ 反硝化活性变化率为 0.154, 10‰ 反硝化活性变化率为 0.176, 可以看出盐度为 0‰ 和 5‰ 的反硝化活性变化率相当。另外, 反硝化活性在 17 天后逐步趋于平衡, 说明 17 天后反硝化基本达到平衡, 这种平衡可能是湿地沉积物营养元素的限制。不同盐浓度下道庆洲湿地反硝化活性变化趋势与鳊鱼滩类似, 反硝化活性随时间不断增加, 变化幅度约为 90.0—96.7%, 通过线性拟合, 发现盐度为 0‰ 反硝化活性变化率为 0.232, 5‰ 反硝化活性变化率为 0.233, 10‰ 反硝化活性变化率为 0.247, 盐度 0‰ 和 5‰ 的反硝化活性变化率相当。两地对比可以看出, 在同一培养时期鳊鱼滩的反硝化活性均高于道庆洲, 与鳊鱼滩的反硝化速率的降低幅度大于道庆洲呈现出一致性。

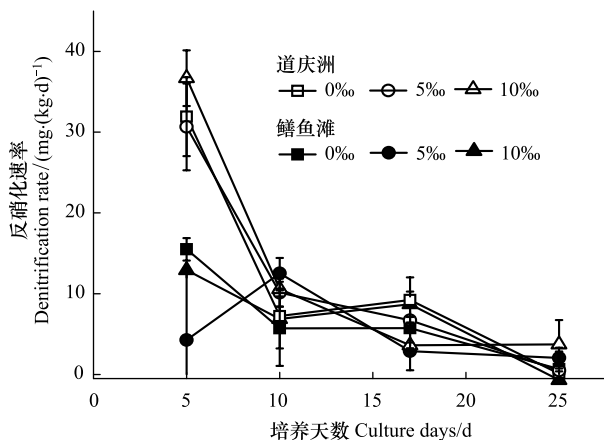


图 3 不同盐度下鳊鱼滩和道庆洲反硝化速率

Fig.3 Denitrification rate under different salt concentration in Shanyutan and Daoqingzhou wetlands

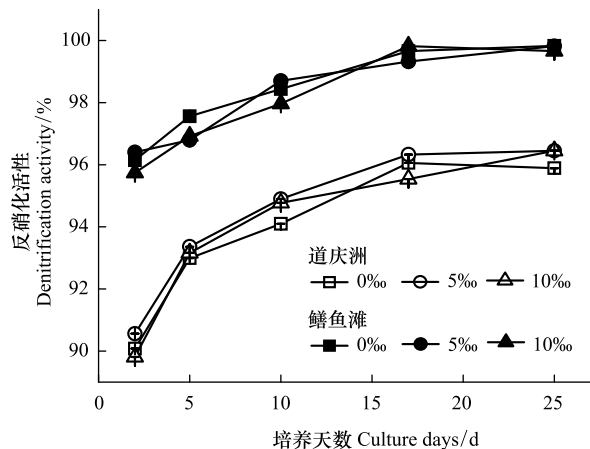


图 4 不同盐度下鳊鱼滩和道庆洲反硝化活性

Fig.4 Denitrification activity under different salt concentration in Shanyutan and Daoqingzhou wetlands

3 讨论

对于同一样地来说, 不同盐度梯度的反硝化速率总体上随培养时间呈现下降趋势。在培养前期反硝化速率出现道庆洲高于鳊鱼滩, 这与两个湿地的地理位置有关, 鳊鱼滩湿地靠近河口, 导致培养沉积物中盐分含量较高, 道庆洲湿地离海口较远盐度含量较低, 由于高盐度抑制沉积物对 NH_4^+ 的吸收影响反硝化速率, 研究表

明,盐度小于 6‰时,阳离子交换间的相互作用对沉积物 NH_4^+ 的滞留产生重要影响^[8],导致远离海口的道庆洲沉积物在起初具有较高的反硝化速率,而鳝鱼滩由于沉积物盐度较高反硝化作用受到抑制处于较低的状态。在试验培养期间,盐度对两地反硝化速率的影响存在一定差异。研究表明河口湿地沉积物反硝化速率从低盐度到高盐度时,下降幅度大,特别是盐度提高到 10‰时,下降幅度大致为 50%;当盐度高于 10‰后,对反硝化速率响应则不显著,无明显变化^[9]。这与本研究结论相似,本研究在 10‰盐度条件下鳝鱼滩和道庆洲反硝化速率分别降低了 53.01%和 28.84%,说明当盐度达到一定浓度,会降低河口湿地硝化速率和反硝化速率的耦合程度,在硝酸盐足够的前提下,反硝化速率也会因高盐度而降低^[10]。另外,沉积物中反硝化菌属在反硝化过程中也起着重要的作用,我国的长江口研究表明由于存在潮滩耐盐反硝化细菌,具有广盐性的水环境,湿地沉积物随盐度升高表现出对反硝化作用抑制不明显的情况^[11],这也是反硝化培养后期出现沉积物反硝化速率在不同盐度下没有出现较大差异的原因,尤其是反硝化细菌活性、氨氧化细菌(AOB)和硝化细菌受到盐度的影响,间接影响反硝化速率变化。黄河三角洲退化湿地研究结果表明沉积物中微生物群落数量和活性受到高盐浓度影响导致降低^[12],同样盐度对氨氧化细菌活性的影响及动力学特性试验结果也得出盐度为 0g/L 时的 AOB 活性比 5g/L 时高 37%,盐度继续增加,AOB 活性降低幅度越大^[13]。

鳝鱼滩和道庆洲湿地反硝化过程除了受到盐度的影响,同时还受到沉积物本身其它环境因子的影响,例如沉积物环境中的硝酸盐、温度、DO、沉积物质地、pH、微生物、植物类型等因素^[14-15]。将鳝鱼滩和道庆洲理化性质与两地反硝化速率做相关性分析,分析表明两地沉积物反硝化速率均与电导存在显著负相关关系($P < 0.05$),说明电导率的存在对湿地沉积物反硝化速率起到一定的抑制作用,这与盐度共同影响沉积物反硝化作用过程,这使道庆洲反硝化速率在各个培养时期内普遍高于鳝鱼滩方面起到了重要作用。另外,鳝鱼滩沉积物反硝化速率与 TN 存在显著正相关关系($P < 0.05$),而道庆洲反硝化速率与 NH_4^+-N 存在显著正相关关系($P < 0.05$),但与 C/N 存在显著负相关关系($P < 0.05$)(表 1)。

表 1 沉积物理化性质与反硝化速率相关性分析

Table 1 Correlation coefficient between sediment physical and chemical properties and denitrification rate

指标 Index	样地 Sites	pH	电导率 Electrical conductivity	硝态氮 $\text{NO}_3^- - \text{N}$	铵态氮 $\text{NH}_4^+ - \text{N}$	有机质 Organic matter	总碳 TC	总氮 TN	碳氮比 C/N ratio
反硝化速率	道庆洲	-0.059	-0.514 *	-0.136	0.634 *	-0.337	-0.320	0.204	-0.639 *
	鳝鱼滩	0.432	-0.683 *	-0.352	0.305	0.428	0.253	0.671 *	-0.407

* 代表相关性达到 0.05 显著水平

4 结论

(1)在培养初期,道庆洲的反硝化速率均高于鳝鱼滩,主要是鳝鱼滩湿地靠近河口,道庆洲湿地离海口较远,导致培养沉积物中盐分鳝鱼滩高于道庆洲,同等条件下高盐度抑制沉积物对 NH_4^+ 的吸收从而降低反硝化速率。

(2)在不同盐度梯度下,两地在培养期间沉积物反硝化速率整体随着时间呈现逐渐降低的趋势,最后两者均处于平稳阶段并趋于 0。反硝化活性随着时间呈缓慢增加趋势,鳝鱼滩反硝化活性大于道庆洲,说明在一定盐度范围内盐度对反硝化速率的抑制作用较为明显。

致谢:本研究在野外采样过程中得到福建师范大学地理科学学院黄佳芳、张林海、汪旭明、杨平等老师和同学的帮助,在此表示感谢。

参考文献 (References):

- [1] Simas T, Nunes J P, Ferreira J G. Effects of global climate change on coastal salt marshes. *Ecological Modelling*, 2001, 139(1): 1-15.

- [2] 钦佩, 左平, 何祯祥. 海滨系统生态学. 北京: 化学工业出版社, 2004: 166-169.
- [3] 娄焕杰, 王东启, 陈振楼, 李杨杰, 蒋辉, 许世远. 环境因子对长江口滨岸沉积物反硝化速率影响. 环境科学与技术, 2013, 36(4): 114-118.
- [4] 徐继荣, 王友绍, 殷建平, 王清吉, 张凤琴, 何磊, 孙翠慈. 珠江口入海河段 DIN 形态转化与硝化和反硝化作用. 环境科学学报, 2005, 25(5): 686-692.
- [5] 王东启, 陈振楼, 许世远, 胡玲珍, 王军. 长江口崇明东滩沉积物反硝化作用研究. 中国科学(D 辑), 2006, 36(6): 544-551.
- [6] 刘剑秋, 曾从盛, 陈宁. 闽江河口湿地研究. 北京: 科学出版社, 2006: 70-76.
- [7] 王维奇, 王纯, 曾从盛, 仝川. 闽江河口不同河段芦苇湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征. 生态学报, 2012, 32(13): 4087-4093.
- [8] Zimmerman A R, Benner R. Denitrification, nutrient regeneration and carbon mineralization in sediments of Galveston Bay, Texas, USA. Marine Ecology Progress Series, 1994, 114(3): 275-288.
- [9] Rysgaard S, Thastum P, Dalsgaard T, Christensen P B, Sloth N P. Effects of salinity on NH_4^+ adsorption capacity, nitrification, and denitrification in Danish estuarine sediments. Estuaries, 1999, 22(1): 21-30.
- [10] Kemp W M, Boynton W R. Spatial and temporal coupling of nutrient inputs to estuarine primary production: the role of particulate transport and decomposition. Bulletin of Marine Science, 1984, 35(3): 522-535.
- [11] 胡敏杰, 邹芳芳, 仝川, 胡伟芳, 纪钦阳. 闽江河口湿地沉积物生源要素含量及生态风险评价. 水土保持学报, 2014, 28(3): 119-124.
- [12] Wang Z Y, Xin Y Z, Gao D M, Li F M, Morgan J, Xing B S. Microbial community characteristics in a degraded wetland of the Yellow River Delta. Pedosphere, 2010, 20(4): 466-478.
- [13] 张宇坤, 王淑莹, 董怡君, 顾升波, 彭永臻. NaCl 盐度对氨氧化细菌活性的影响及动力学特性. 中国环境科学, 2015, 35(2): 465-470.
- [14] Eriksson P G, Svensson J M, Carrer G M. Temporal changes and spatial variation of soil oxygen consumption, nitrification and denitrification rates in a tidal salt marsh of the Lagoon of Venice, Italy. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2003, 58(4): 861-871.
- [15] 孙志高, 刘景双. 湿地土壤的硝化-反硝化作用及影响因素. 土壤通报, 2008, 39(6): 1462-1467.