

盐度对芦苇 (*Phragmites australis*) 表流湿地除氮效果的影响*

蔡 舰^{1,2}, 白承荣^{1,2}, 巴图那生³, 娜仁格日乐³, 高 光^{1**}

(1: 中国科学院南京地理与湖泊研究所湖泊与环境国家重点实验室, 南京 210008)

(2: 中国科学院大学, 北京 100049)

(3: 新疆巴音郭楞蒙古自治州博斯腾湖科学研究所, 库尔勒 841000)

摘 要: 利用芦苇湿地去除农业污水中的氮是博斯腾湖流域控制富营养化的重要手段。但是, 污水中的盐分往往会抑制芦苇 (*Phragmites australis*) 湿地的除氮效果。为了探索不同盐度对芦苇湿地脱氮效果的影响和机制, 研究 4 个不同的盐度梯度 (淡水、2‰、5‰ 和 10‰) 对芦苇表流湿地中氮去除的影响, 测定不同盐度下湿地表层 (0~10.0 cm) 和下层土壤 (10.0~20.0 cm) 中硝化、反硝化作用强度的变化。结果表明, 盐度上升显著降低了湿地氮的去除率, 但是不同离子形态的氮变化趋势并不一致。5‰ 和 10‰ 盐度下的芦苇湿地中总氮、铵态氮去除率分别下降了 9.03%、31.80% 和 23.10%、39.20%, 亚硝酸盐氮累积率分别上升了 190%、690%, 而硝态氮并未发生明显变化。相对于参与反硝化作用的菌群, 盐度对参与硝化作用菌群的抑制作用更强是产生此现象的主要原因。除此之外, 盐度升高导致植物根系泌氧减少也是土壤中的硝化作用强度降低的重要原因之一。

关键词: 芦苇表流湿地; 盐度; 农排污水; 除氮; 硝化作用; 反硝化作用; 博斯腾湖

Effect of salinity on nitrogen removal performance in a *Phragmites australis* constructed surface flow wetland

CAI Jian^{1,2}, BAI Chengrong^{1,2}, BATU Nasheng³, NAREN Gerile³ & GAO Guang^{1**}

(1: State Key Laboratory of Lake Science and Environment, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, P.R.China)

(2: University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, P.R.China)

(3: Institute of Lake Bosten, Bayingolin Mongolia Autonomous Prefecture of Xinjiang Uyghur Autonomous Province, Korle 841000, P.R.China)

Abstract: Application of surface flow wetland constructed by *Phragmites australis* to remove the nitrogen from agricultural drainage is one of most important policies to control the eutrophication in Lake Bosten. However, nitrogen removal process will be challenged from the salinity inhibition in wastewater. We explored the effect of salinity on nitrogen removal in 4 wetlands with increasing salinity (freshwater, 2‰, 5‰, and 10‰). Concurrently, we also assessed the nitrification and denitrification potential at two soil layers (0–10.0 cm and 10.0–20.0 cm, respectively). The results showed that removal rates of total nitrogen decreased by 9.03% and 31.80% in 5‰ and 10‰ salinity, respectively. Similarly, removal rates of the ammonia also declined by 23.10% and 39.20%, respectively. On balance, the higher salinity significantly inhibited the nitrogen removal, suggesting that salinity would interfere in nitrification process. By contrast, the nitrite nitrogen was increased by 190% and 690% in 5‰ and 10‰ salinity, respectively, implying that salinity potentially inhibited the nitrite oxidizers. Additionally, we also found that salinity and dissolve oxygen together regulated the nitrification and denitrification in different soil layers.

Keywords: *Phragmites australis* constructed surface flow wetland; salinity; agricultural drainage; nitrogen removal; nitrification; denitrification; Lake Bosten

* 国家水体污染控制与治理科技重大专项 (2013ZX07104-004) 和环保公益性行业科研专项 (201309041) 联合资助。
2016-11-04 收稿; 2017-01-15 收修改稿。蔡舰 (1989~), 男, 博士研究生; E-mail: c85714525@163.com.

** 通信作者; E-mail: guanggao@niglas.ac.cn.

由于自然变化和人类活动的影响,目前我国干旱-半干旱地区的许多湖泊和河流面临着咸化和富营养化的双重威胁.以位于新疆巴音郭楞蒙古自治州的博斯腾湖($41^{\circ}56'\sim 42^{\circ}14'N$, $86^{\circ}26'\sim 87^{\circ}40'E$)为例,其位于焉耆盆地的最低处,多年来接纳了附近流域的盐分和营养盐等污染物,使得其在成为微咸水体的同时,营养状况亦恶化为中富富营养化水平^[1-2].研究表明,博斯腾湖(以下简称博湖)富营养化的主要限制因子为总氮,而作为重要污染源之一的农业排渠每年向博湖输入的氮占输入总量的21%,削减农排水中的氮入湖负荷对控制博斯腾湖富营养化具有重要意义^[3-5].

芦苇作为一种耐污挺水植物,已被广泛用于构建湿地处理污水,利用芦苇构建湿地对流入博湖的农排水进行处理也是目前主要的污染物阻隔技术^[6-8].而博湖地区农排水中的较高盐度是影响芦苇湿地处理效果的一个重要因素,目前已经有一些盐度对芦苇湿地处理效果影响的研究,并通过芦苇的生理生化特性对不同盐度的响应来解释相关现象^[9-10].然而,许多研究表明湿地中的氮主要是通过微生物的硝化和反硝化作用去除,因此后者的变化更能阐释盐度影响湿地除氮效果的内在机制^[11-13].在污水处理系统中,盐度对硝化和反硝化作用的影响已经得到了广泛的研究,包括盐度大小、离子种类、反应器类型、盐度变化模式等一系列环境因子均有大量报道^[14-17].但是,在芦苇湿地处理的含盐面源污水,其盐度波动范围通常在2‰~10‰,小于高盐污水处理系统^[18].同时,湿地中的微生物生物量和群落组成亦和反应器中的有较大区别^[19-20].因此,污水处理系统中的规律和相关机理可能并不适用于芦苇湿地,仍有必要研究基于湿地系统的生物脱氮过程对盐度胁迫的响应.

通过室内构建持续进水芦苇表流湿地,研究不同盐度农业面源污水对湿地中氮的去除效果的影响,同时探索盐度对湿地土壤中不同深度的硝化、反硝化作用强度的影响,揭示其内在生物学机制,以期对芦苇表流湿地在处理干旱-半干旱地区含盐农业面源污水的应用提供理论依据和技术支撑.

1 材料与方法

1.1 实验装置

为满足干旱-半干旱地区的气候特点,芦苇表流湿地实验系统位于新疆省巴音郭楞蒙古自治州库尔勒市的博斯腾湖科学研究所($41.732804^{\circ}N$, $86.184318^{\circ}E$).实验装置由12组相同规格的玻璃水缸(长×宽×高=150.0 cm×50.0 cm×40.0 cm)组成,共设置4个实验组,每组3个平行.培植底泥取自耕地用土,带回实验室去除土中杂草后,为防止其本底盐分影响后续实验,用水浸泡冲洗数次,待出水盐度小于0.5‰后使用.土壤层厚度为20.0 cm.实验供试芦苇选自新疆博斯腾湖野生芦苇生长区,挖取同一时期、长势相近的植株进行移栽,种植密度为50株/ m^2 .实验系统始建于2015年6月,调试培育2个月,于2015年8月正式开始实验.

1.2 实验进水水质

实验系统进水以博斯腾湖黄水区农业面源污水为处理对象,由于实验进水水质波动较大且难以获取,选取博斯腾湖小湖区水作为基底原水,采用人工配水.配水成分如下:NaCl、 KH_2PO_4 、 NH_4Cl 与 $NaNO_3$,为探索盐度对溶解性氮不同离子形态去除的影响,铵态氮(NH_4^+-N)浓度和硝态氮(NO_3^--N)浓度接近相等.进水水质如下:pH为 8.06 ± 0.17 ,总氮(TN)浓度为 4.87 ± 0.25 mg/L,总磷(TP)浓度为 0.12 ± 0.04 mg/L, NH_4^+-N 浓度为 2.15 ± 0.08 mg/L, NO_3^--N 浓度为 2.28 ± 0.26 mg/L,亚硝态氮(NO_2^--N)浓度为 0.06 ± 0.03 mg/L,化学需氧量(COD)为 17.40 ± 1.03 mg/L.

1.3 实验运行和检测方法

实验共分4个不同盐度组,每组设置3个平行,盐度分别为淡水组、2‰、5‰和10‰,由于盐度为10‰时出水水质已经较差,因此不继续探讨更高的盐度.表流湿地水深设定为5 cm,采取阀门和胶管控制连续进水动态运行方式,水力负荷为 10.0 L/($m^2 \cdot d$),实验每隔3 d在上午12:00采集1次进、出水样品,实验共进行2个月.湿地中的盐度、pH值、水温和溶解氧(DO)浓度等采用YSI 556便携式水质监测仪进行现场监测,之后将水样带回实验室及时测定.TN浓度采用过硫酸钾消解紫外分光光度法测定; NO_3^--N 浓度采用紫外分光光度法测定; NH_4^+-N 浓度采用纳氏试剂分光光度法测定; NO_2^--N 浓度采用N-(1-萘基)-乙二胺分光光度法测定^[21].为研究盐度对硝化、反硝化作用强度的影响,每6 d采集1次湿地土壤(用自制约25.0 cm长管状采泥器采集),采集后用具分为表层(0~10.0 cm)和底层(10.0~20.0 cm),采用悬液培养法测定不同深度土壤

的硝化、反硝化强度,结果以氮计^[22-23]。

1.4 统计分析及数据处理

实验数据分析作图软件为 Origin 8.6 和 R 3.1.2. 使用 Shapiro-Wilk 法检验各组数据是否符合正态分布,使用 Bartlett 法检验各指标组间方差齐性. 使用 Pearson 相关性分析各指标之间的相关性. 对方差齐性的指标采用单因素方差分析(One-way ANOVA)比较组别之间是否存在显著性差异,采用 Duncan 检验比较哪些组存在显著性差异;不符合正态分布的指标采用 Kruskal-Wallis 检验来进行比较是否存在显著性差异,并采用 Behrens-Fisher 检验来比较哪些组存在显著性差异. 所有统计方法的显著水平平均设为 0.05.

2 结果与分析

2.1 芦苇湿地水体中基本理化参数变化

实验过程中,水温 and pH 值组间差异不显著,而不同组之间的盐度和 DO 则存在显著差异($P < 0.05$). 各组湿地的平均水温在 19.3~24.7℃之间,平均水温为 22.50 ± 1.36 ℃,没有明显的降温 and 升温过程. 湿地水体的 pH 值在 7.82~8.84 之间,平均值为 8.22 ± 0.21 . 盐度作为实验的主要控制因素,相比于进水时设定的盐度,较高盐度实验组由于湿地对盐分的滞留作用,水体中的盐度比设定有所增大,其中 10‰ 盐度组水体中盐度最高达到了 15.4‰,平均盐度为 13.00 ± 1.87 ‰. 同时 2‰ 和 5‰ 盐度组的平均盐度也分别上升至 $2.680\text{‰} \pm 0.263\text{‰}$ 和 $6.580\text{‰} \pm 0.723\text{‰}$. 此外,由于高盐度会抑制芦苇的生长和光合作用^[9],盐度较高实验组的 DO 含量明显降低,淡水组和 2‰ 盐度组的 DO 含量平均为 $77.4\% \pm 4.47\%$ 和 $80.1\% \pm 4.61\%$,而 5‰ 和 10‰ 盐度组的 DO 平均值则分别减小至 $60.30\% \pm 10.60\%$ 和 $39.70\% \pm 6.31\%$.

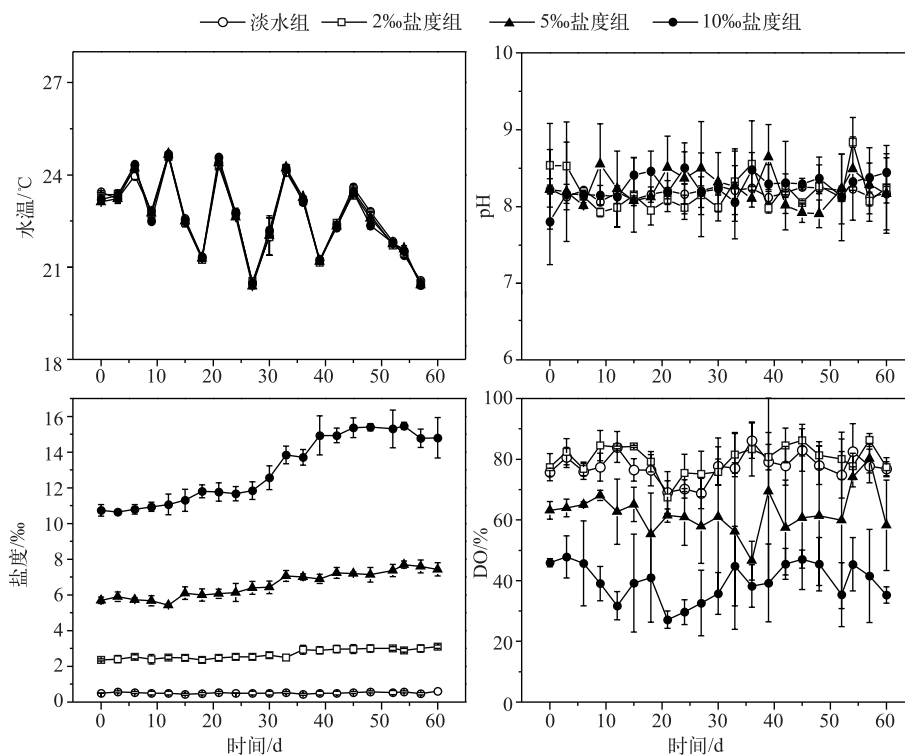


图 1 基本环境因子的动态变化

Fig.1 Dynamic changes of general environmental factors

2.2 盐度对芦苇湿地氮去除的影响

实验所用模拟污水中 TN 主要为溶解态氮,有 NO_3^- -N、 NH_4^+ -N 和 NO_2^- -N 3 种存在形式. 结果表明,5‰、

10‰盐度组的出水 TN 浓度分别为 1.85 ± 0.21 和 3.00 ± 0.32 mg/L, 比淡水组 (1.42 ± 0.19 mg/L) 分别高出 30.30% 和 111.00%, 而 2‰盐度组 (1.22 ± 0.06 mg/L) 与淡水组之间并无显著差异 ($P > 0.05$). 与 TN 出水浓度变化一致, 2‰盐度组的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 出水浓度为 0.20 ± 0.06 mg/L, 略高于淡水组对照的 0.18 ± 0.04 mg/L, 而 5‰、10‰盐度组出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度分别为 0.68 ± 0.09 和 1.03 ± 0.08 mg/L, 比淡水对照组分别提升了 277% 和 472%, 说明较高盐度对 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 去除有强烈抑制作用. $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 出水浓度也随着盐度的升高产生明显的累积效应, 2‰盐度组和淡水组出水 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度基本在 0.10 mg/L 左右, 而 5‰盐度组 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 出水浓度则上升至 0.18 ± 0.05 mg/L, 10‰盐度组上升至 0.52 ± 0.08 mg/L. 然而, 与 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度变化不同, 不同盐度处理组出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度并无明显差异 ($P > 0.05$), 按照盐度从小到大分别为 0.71 ± 0.07 、 0.67 ± 0.07 、 0.71 ± 0.18 和 0.68 ± 0.02 mg/L (图 2).

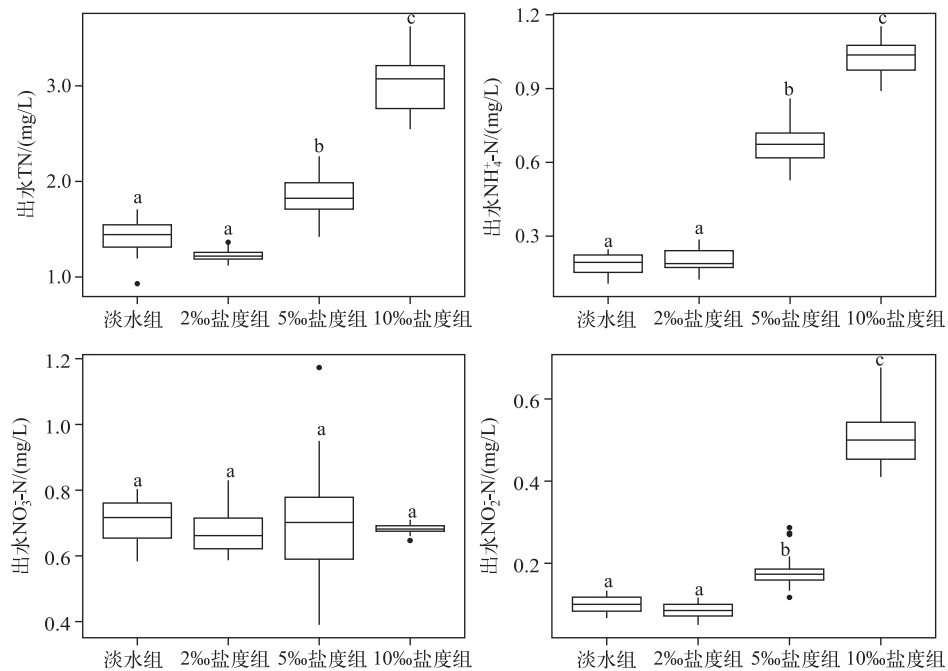


图 2 盐度对除氮效果的影响

Fig.2 Impacts of salinity on the nitrogen removal performance

2.3 盐度对不同深度硝化、反硝化作用强度的影响

本实验中,在受到盐度增高的胁迫时,硝化作用和反硝化作用呈现了完全不同的响应模式.同时,不同深度之间的硝化、反硝化作用强度也有显著差异 ($P < 0.05$).不同盐度处理组表层土壤的硝化作用强度 (surface nitrification intensity, 简称 sNI) 差异显著 ($P < 0.05$).淡水组和 2‰盐度组的 sNI 平均值分别为 3.78 ± 0.91 和 3.47 ± 0.55 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$. 5‰盐度组 sNI 比淡水组减少了 30.7%, 为 2.62 ± 0.20 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$. 10‰盐度组则降低了 57.9%, 仅有 1.59 ± 0.34 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$. 然而,盐度增加使得表层土壤的反硝化作用强度 (surface denitrification intensity, 简称 sDNI) 反而略有提高,淡水组、2‰、5‰和 10‰盐度组分别为 6.85 ± 0.24 、 7.01 ± 0.24 、 7.14 ± 0.32 和 7.24 ± 0.14 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 但差异并不显著 ($P > 0.05$) (图 3).

相对于表层土壤,底层土壤的硝化作用 (bottom nitrification intensity, 简称 bNI) 强度显著降低 ($P < 0.05$), 总平均值为 1.84 ± 0.43 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 比 sNI (2.86 ± 1.02 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$) 减小 34.7%. 与硝化作用相反,底层土壤的反硝化作用强度 (bottom denitrification intensity, 以下简称 bDNI) 要显著高于表层, 平均值为 10.26 ± 0.60 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$, 比 sDNI (7.06 ± 0.36 $\text{mg}/(\text{kg} \cdot \text{d})$) 升高 45.3%. 但无论是 bNI 还是 bDNI, 不同盐度组之间均没有显著差异 ($P > 0.05$), 说明本实验中盐度主要对表层微生物功能群落造成影响 (图 3).

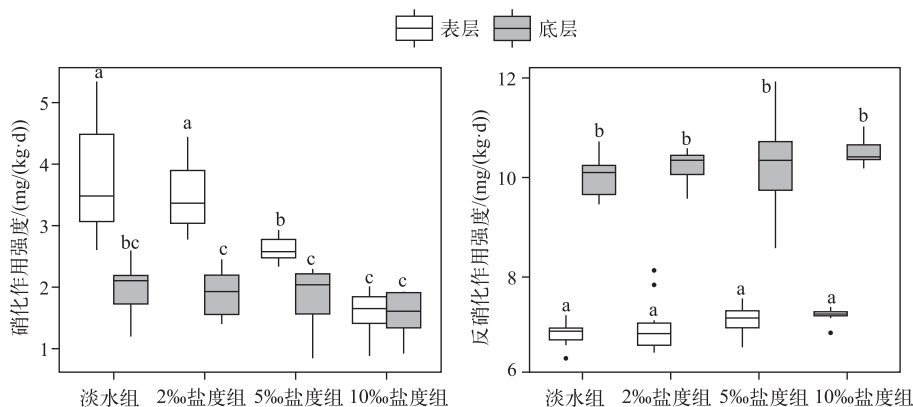


图3 盐度对不同深度湿地土壤硝化、反硝化作用强度的影响

Fig.3 Effects of salinity on nitrification and denitrification at different layers in wetland soil (significant differences are labeled with different letters)

2.4 不同深度硝化、反硝化作用强度与不同形态氮出水浓度的回归关系

通过线性回归,结果显示不同深度硝化、反硝化作用强度与不同形态氮的去除相关关系有很大差异(图4)。其中,sNI与出水TN浓度呈显著线性相关($P<0.05$),可以解释60% TN浓度变化,同时sNI均与出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度呈显著线性相关,分别能解释69%和59%的变化。而bNI只与出水 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度呈显著线性相关,并只能解释其9%的变化,说明湿地中硝化作用主要在表层进行,而表流湿地脱氮能力的降低主要与sNI相关。

相对而言,反硝化作用与大部分指标均无显著线性相关,仅有bDNI与出水 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度呈显著线性相关,但只能解释其45%的变化,说明芦苇表流湿地中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的去除可能主要由底层反硝化作用完成。

3 讨论

在本实验中,芦苇表流湿地在较高盐度(5‰和10‰)胁迫下,其出水TN浓度较淡水组和2‰盐度组有显著升高。这表明随着盐度升高,5‰和10‰盐度组芦苇湿地的脱氮效率受到明显抑制,去除率分别下降了9.0%和31.8%,这与许多研究的结果相似^[24-26]。但不同形态氮的变化趋势并不一致, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度去除率变化与TN一致,均受到显著抑制,5‰和10‰盐度组去除率分别下降了23.1%和39.2%;同时, $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 在高盐度组里面大量累积,相对于淡水对照组累积率分别上升了190%和690%;而 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的出水浓度并未有明显变化,说明芦苇湿地脱氮效果下降主要体现在 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 处理能力降低和 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 的累积,而其内在机制是因为微生物脱氮不同阶段对盐度以及其造成的环境变化响应不同。

芦苇表流湿地的脱氮主要由微生物的硝化作用、反硝化作用完成。先由好氧氨氧化细菌(AOB)将 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 氧化成 $\text{NO}_2^-\text{-N}$,再由亚硝酸盐氧化菌(NO_B)将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 氧化成为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,最后通过反硝化菌将 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 还原为 N_2 ^[27]。在盐度的胁迫下,不同功能的微生物群落有不同的响应机制和耐受范围。有研究表明,5‰的盐度即可导致AOB活性降低17%,而20‰的盐度则可抑制62%的AOB活性^[28],从而使得硝化速率大幅度降低。Liu等^[29]发现,在盐度升高的过程中,硝化过程中的NO_B比AOB更容易受到抑制。而张林海等^[30]在研究盐度对闽江淡水洲滩土壤反硝化作用影响时,则发现盐度从5‰升到25‰对反硝化作用没有显著影响,反而5‰的盐度要比淡水中的反硝化作用强度更高。本文中,芦苇表层湿地中的硝化、反硝化作用均与盐度呈显著负相关(表1),并且sNI与盐度之间的相关系数要显著高于sDNI($P<0.05$),这与杨琼等^[31]的研究结果一致。除此之外,出水中显著增高的 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 浓度是NO_B细菌被抑制的一个重要表现^[32-33]。由此可见,盐度升高对芦苇湿地硝化作用的抑制作用大于反硝化作用,而硝化作用过程中盐度对 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 氧化过程有明显抑制。

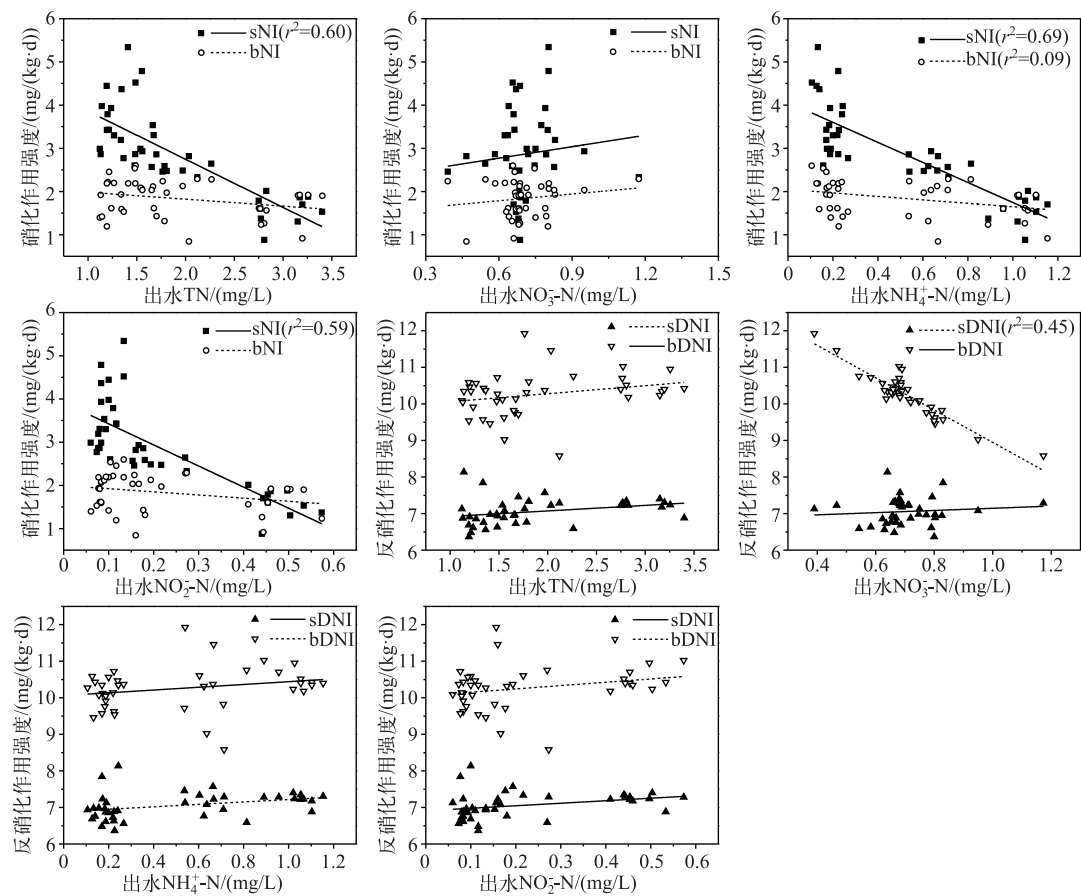


图 4 不同深度硝化、反硝化作用强度与不同形态氮出水浓度的线性回归分析

Fig.4 Linear regression between the concentrations of various effluent nitrogen forms with nitrification and denitrification intensity at different depths

表 1 不同深度硝化、反硝化作用强度与水体中基本环境因子的 Pearson 相关系数

Tab.1 Pearson correlation coefficient of basic water parameters with nitrification and denitrification intensity at different depths

环境因子	盐度	DO	水温	pH	sNI	bNI	sDNI	bDNI
盐度	1.00				-0.80 ***	-0.36 *	0.37 *	0.27
DO	-0.85 ***	1.00			0.78 ***	0.28	-0.36 *	-0.31
水温	-0.08	-0.07	1.00		-0.28	-0.18	-0.01	-0.07
pH	0.29	-0.17	-0.20	1.00	0.13	0.25	-0.08	-0.11

* 代表 $P<0.05$; *** 代表 $P<0.001$.

高盐度对湿地微生物脱氮的影响主要体现在两个方面:第一,较高的渗透压会造成微生物细胞脱水,导致微生物发生质壁分离,从而失活甚至死亡^[34];第二,盐度升高会改变湿地原本的理化环境,从而对微生物产生间接影响。例如,较高盐度会显著降低湿地植物的叶绿素 a 浓度,降低光合作用和根系泌氧能力,降低湿地 DO 含量,从而影响硝化作用速率^[35]。盐度还会导致硫酸盐还原过程的加强,从而抑制反硝化作用效率^[36]。表层土壤中的硝化、反硝化作用均与盐度、DO 含量呈显著相关关系,而底层土壤中的硝化作用和反

硝化作用与 DO 均无显著相关性(表 1)。值得注意的是, sDNI 与盐度呈显著正相关, 而与 DO 含量呈显著负相关, 可以推测盐度的上升不仅对反硝化作用没有产生抑制作用, 甚至可能通过降低环境中 DO 含量, 来略微加强反硝化作用。郑仁宏等^[13]在实验中发现表面流湿地土壤主要是缺氧或厌氧环境, 且表层土壤的 DO 含量和复氧能力均明显高于底层土壤, 这也是硝化作用主要在表层进行而反硝化作用主要在底层进行的原因。另一方面, 在湿地上覆水 DO 含量降低时, 表层土壤 DO 含量的降幅要明显大于底层土壤^[37], 这也解释了为何底层硝化、反硝化作用与水体中的 DO 含量无显著相关关系。综上所述, 湿地土壤中硝化、反硝化作用同时受到了盐度和 DO 含量 2 个因子的共同影响, 并且 DO 含量是造成不同深度硝化、反硝化作用差异的主要因子。

由于 sNI 的变化可解释大部分芦苇湿地出水 TN 浓度升高的变化, 以 DO 含量、盐度为预测变量分别对 TN 浓度、sNI 进行了二元线性回归分析, 得到的方程式分别为:

$$\text{TN} = 0.82 \text{ 盐度} + -0.01 \text{ DO} + 2.31 \quad (r^2 = 0.83, P < 0.01) \quad (1)$$

$$\text{sNI} = -0.99 \text{ 盐度} + 0.02 \text{ DO} + 2.22 \quad (r^2 = 0.66, P < 0.01) \quad (2)$$

在高盐度胁迫的情况下, TN 出水浓度、硝化作用均受到 DO 和盐度 2 个环境因子的共同影响, 因此在盐度增高的情况下, 适当的在表流湿地中进行曝气处理可减弱盐度对表流湿地硝化作用的抑制, 从而维持湿地的除氮功能。

4 结论

盐度对芦苇湿地脱氮效果有明显抑制效果, 与淡水对照组相比, 5‰和 10‰盐度组 TN 去除率分别下降了 9.03% 和 31.80%。不同形态氮的变化模式有很大差异, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 的去除率分别下降了 23.1% 和 39.2%, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 并未发生明显变化, 而 $\text{NO}_2^-\text{-N}$ 累积率则分别上升了 190% 和 690%。

湿地中微生物脱氮不同阶段对盐度变化的敏感性不同, 是高盐度胁迫下不同形态氮变化的主要原因。本实验结果表明, 在芦苇表流湿地中, 盐度升高对芦苇湿地硝化作用的抑制作用大于反硝化作用, 而硝化作用过程中盐度对亚硝酸盐氧化过程的抑制可能要大于对氨氧化过程。

芦苇湿地土壤不同深度中硝化、反硝化作用同时受到盐度和 DO 含量 2 个因子的共同影响, 在盐度增高的情况下, 适当的在表面湿地中进行曝气可减弱盐度对表流湿地脱氮作用的抑制。

5 参考文献

- [1] Xie Guijuan, Zhang Jianping, Tang Xiangming *et al.* Spatio-temporal heterogeneity of water quality (2010–2011) and succession patterns in Lake Bosten during the past 50 years. *J Lake Sci.*, 2011, **23**(6): 837–846. DOI:10.18307/2011.0603. [谢贵娟, 张建平, 汤祥明等. 博斯腾湖水质现状(2010—2011年)及近 50 年来演变趋势. 湖泊科学, 2011, **23**(6): 837–846.]
- [2] Sai Bayaertu, Chen Minpeng, Feng Li. Agricultural non-point source pollution of Bosten Lake Basin. *Water Resources Protection*, 2012, **28**(2): 25–29. [赛·巴雅尔图, 陈敏鹏, 冯丽. 博斯腾湖流域农业面源污染现状分析. 水资源保护, 2012, **28**(2): 25–29.]
- [3] Xia Jun, Zuo Qiting, Shao Mincheng eds. Sustainable utilization of water resources in Lake Bosten: Theory · Method · Practice. Beijing: Science Press, 2003. [夏军, 左其亭, 邵民诚. 博斯腾湖水资源可持续利用: 理论 · 方法 · 实践. 北京: 科学出版社, 2003.]
- [4] Ying Lisha. Analysis of pollution characteristics of the agricultural drainage into Lake Bosten [Dissertation]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2013. [盈丽莎. 博斯腾湖流域农田排水污染特征分析 [学位论文]. 成都: 四川师范大学, 2013.]
- [5] Gao Guang, Tang Xiangming, Sai Bayaertu eds. Ecological environment evolution of Lake Bosten. Beijing: Science Press, 2013. [高光, 汤祥明, 赛·巴雅尔图. 博斯腾湖生态环境演化. 北京: 科学出版社, 2013.]
- [6] Sun Yufang, Liu Weizhong. Evaluation on the service functional values of the wetland ecosystem in the Bosten Lake basin, Xinjiang. *Arid Zone Research*, 2008, **25**(5): 741–744. [孙玉芳, 刘维忠. 新疆博斯腾湖湿地生态系统服务功能价值评估. 干旱区研究, 2008, **25**(5): 741–744.]

- [7] Sun Bo, Xie Jiancang, Wang Ni *et al.* Effect of reeds on salt enrichment and improvement of saline-alkali land. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, **26**(3): 92-101. [孙博, 解建仓, 汪妮等. 芦苇对盐碱地盐分富集及改良效应的影响. 水土保持学报, 2012, **26**(3): 92-101.]
- [8] Chen Youyuan, Sun Ping, Chen Guanglin *et al.* A contrastive study on salt-alkaline resistance and removal efficiency of nitrogen and phosphorus by *Phragmites australis* and *Typha angustifolia* in coastal estuary area. *Environmental Science*, 2015, **36**(4): 1498-1496. DOI:10.13227/j.hjxx.2015.04.049. [陈友媛, 孙萍, 陈广琳等. 滨海区芦苇和香蒲耐盐碱性及除氮磷效果对比研究. 环境科学, 2015, **36**(4): 1498-1496.]
- [9] Bart D, Hartman JM. Environmental constraints on early establishment of *Phragmites australis* in salt marshes. *Wetlands*, 2014, **22**(2): 201-213. DOI:10.1672/0277-5212(2002)022[0201: ECOEEO]2.0.CO;2.
- [10] Zhao Huilin. Removal mechanism of nitrogen and phosphorus by salt-tolerant emergent macrophyte and the community characteristics of rhizosphere ammonia-oxidizing microorganisms[Dissertation]. Tianjin: Tianjin University, 2014. [赵卉琳. 耐盐挺水植物去除氮磷的机制及根际氨氧化菌群特征分析[学位论文]. 天津: 天津大学, 2014.]
- [11] Osman R. Nitrogen turnover in a wetland influenced by domestic sewage. Germany: University Kassel, 1981.
- [12] Vymazal J, Kröpfelová L. Removal of nitrogen in constructed wetlands with horizontal sub-surface flow: A review. *Wetlands*, 2009, **29**(4): 1114-1124. DOI:10.1672/08-216.1.
- [13] Zheng Renhong, Deng Shihuai, Li Yuanwei *et al.* Nitrification and denitrification in surface flow wetland. *Environmental Pollution & Control*, 2007, **29**(1): 37-39, 43. [郑仁宏, 邓仕槐, 李远伟等. 表面流人工湿地硝化和反硝化强度研究. 环境污染与防治, 2007, **29**(1): 37-39, 43.]
- [14] Dinçer AR, Kargı F. Salt inhibition of nitrification and denitrification in saline wastewater. *Environmental Technology*, 1999, **20**(11): 1147-1153. DOI:10.1080/09593332008616912.
- [15] Paulo BJ, Robbert K, Gerard M *et al.* Effect of different salt adaptation strategies on the microbial diversity, activity, and settling of nitrifying sludge in sequencing batch reactors. *Applied Microbiology & Biotechnology*, 2011, **93**(3): 1281-1294. DOI:10.1007/s00253-011-3428-7.
- [16] Jang D, Hwang Y, Shin H *et al.* Effects of salinity on the characteristics of biomass and membrane fouling in membrane bioreactors. *Bioresource Technology*, 2013, **141**(4): 50-56. DOI:10.1016/j.biortech.2013.02.062.
- [17] Yan J, Jetten M, Rang J *et al.* Comparison of the effects of different salts on aerobic ammonia oxidizers for treating ammonium-rich organic wastewater by free and sodium alginate immobilized biomass system. *Chemosphere*, 2010, **81**(5): 669-673. DOI:10.1016/j.chemosphere.2010.03.025.
- [18] Pernetti M, Di PL. Experimental evaluation of inhibition effects of saline wastewater on activated sludge. *Environmental Technology*, 2005, **26**(6): 695-703. DOI:10.1080/09593330.2001.9619509.
- [19] Brown MN, Briones A, Diana J *et al.* Ammonia-oxidizing archaea and nitrite-oxidizing nitrospiras in the biofilter of a shrimp recirculating aquaculture system. *FEMS Microbiology Ecology*, 2013, **83**(1): 17-25. DOI:10.1111/j.1574-6941.2012.01448.x.
- [20] Yin J, Jiang L, Wen Y *et al.* Treatment of polluted landscape lake water and community analysis of ammonia-oxidizing bacteria in constructed wetland. *Journal of Environmental Science & Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2009, **44**(7): 722-731. DOI:10.1080/10934520902847877.
- [21] Ministry of Environmental Protection of the People's Republic of China, Editorial Board of Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods eds. *Water and Wastewater Monitoring and Analysis Methods*: 4th edition. Beijing: China Environmental Science Press, 2002. [国家环境保护总局《水和废水监测分析方法》编委会. 水和废水监测分析方法: 第4版. 北京: 中国环境科学出版社, 2002.]
- [22] Xu Guanghui, Zheng Hongyuan eds. *Agricultural microbiology experimental technology*. Beijing: Beijing Agriculture Press, 1986. [徐光辉, 郑洪元. 农业微生物分析方法手册. 北京: 农业出版社, 1986.]
- [23] Yu K, Struwe S, Kjeller A *et al.* Denitrification rate determined by nitrate disappearance is higher than determined by nitrous oxide production with acetylene blockage. *Ecological Engineering*, 2008, **32**(1): 90-96. DOI:10.1016/j.ecoleng.2007.09.006.
- [24] Bao Ying, Xiang Jianhai. Effect of temperature, salinity and pH on ammonia oxidation in nitrosomonas. *Marine Sciences*, 2001, **25**(6): 42-43. [鲍鹰, 相建海. 温度、盐度和 pH 对生物过滤器去除铵态氮效率的影响. 海洋科学, 2001, **25**(6): 42-43.]

- [25] Putnam Duhon LA, Gambrell RP, Rusch KA *et al.* Effects of salinity on the microbial removal of nitrate under varying nitrogen inputs within the marshland upwelling system. *Journal of Environmental Science & Health Part A Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering*, 2012, **47**(12): 1739-1748. DOI:10.1080/10934529.2012.689221.
- [26] Wu Y, Tam NFY, Wong MH. Effects of salinity on treatment of municipal wastewater by constructed mangrove wetland microcosms. *Marine Pollution Bulletin*, 2008, **57**(6-12): 727-734. DOI:10.1016/j.marpollbul.2008.02.02.
- [27] Mustafa A, Scholz M. Characterization of microbial communities transforming and removing nitrogen in wetlands. *Wetlands*, 2011, **31**(3): 583-592. DOI:10.1007/s13157-011-0175-6.
- [28] Zhang Yukun, Wang Shuying, Dong Yijun *et al.* Effect of NaCl salinity on activity of ammonia-oxidizing bacteria and kinetic characterization. *China Environmental Science*, 2015, **35**(2): 465-470. [张宇坤, 王淑莹, 董怡君等. 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.]
- [29] Liu Y, Peng CY, Bing T *et al.* Determination effect of influent salinity and inhibition time on partial nitrification in a sequencing batch reactor treating saline sewage. *Desalination*, 2009, **246**(1/2/3): 556-566. DOI:10.1016/j.desal.2009.01.005.
- [30] Zhang Linhai, Liu Rongfang, Tong Chuan *et al.* Effect of salinity on the potential denitrification rate and nitrogen removal of the min river estuary freshwater river beach soil. *Wetland Science*, 2015, **13**(5): 528-534. [张林海, 刘荣芳, 仝川等. 盐度对闽江河口淡水洲滩土壤潜在反硝化速率及脱氮效率的影响. 湿地科学, 2015, **13**(5): 528-534.]
- [31] Yang Qiong, Tam Funyee, Li Shuangfei. Effects of sewage discharge on nitrification and denitrification in mangrove constructed wetlands. *Environmental Science & Technology*, 2015, **38**(3): 15-20. [杨琼, 谭凤仪, 黎双飞. 污水对红树林人工湿地硝化和反硝化作用研究. 环境科学与技术, 2015, **38**(3): 15-20.]
- [32] Kim DJ, Kim SH. Effect of nitrite concentration on the distribution and competition of nitrite-oxidizing bacteria in nitrification reactor systems and their kinetic characteristics. *Water Research*, 2006, **40**(5): 887-894. DOI:10.1016/j.watres.2005.12.023.
- [33] Natori T, Takemura Y, Harada H *et al.* The effect of salinity on nitrite accumulation in a down-flow hanging sponge reactor. *Journal of Chemical Technology & Biotechnology*, 2012, **87**(10): 1466-1472. DOI:10.1002/jctb.3770.
- [34] Jackson CR, Vallaire SC. Effects of salinity and nutrients on microbial assemblages in Louisiana wetland sediments. *Wetlands*, 2009, **29**(1): 277-287. DOI:10.1672/08-86.1.
- [35] Zhuang Yao. Effects of soil salinity rate on morphological characteristics of *Phragmites australis*, and its potential applications in constructed wetlands[Dissertation]. Nanjing: Nanjing University, 2011. [庄瑶. 土壤盐度对芦苇形态特征的影响以及构造湿地中芦苇的应用潜力[学位论文]. 南京: 南京大学, 2011.]
- [36] Kemp PF ed. Eco-DAS VIII Symposium Proceedings. Waco, Texas: American Society of Limnology and Oceanography, 2010. DOI:10.4319/ecodas.2010.978-0-9845591-1-4.
- [37] Huang J, Cai W, Zhong Q *et al.* Influence of temperature on micro-environment, plant eco-physiology and nitrogen removal effect in subsurface flow constructed wetland. *Ecological Engineering*, 2013, **60**(11): 242-248. DOI:10.1016/j.ecoleng.2013.07.023.