

洱海罗时江河口湿地沉积物

净氮矿化与硝化速率

李瑞琳 侯磊 袁海英 梁启斌¹

(西南林业大学 生态与环境学院, 云南 昆明 650224)

【摘要】: 为探究高原湖泊河口湿地氮循环过程, 以洱海罗时江河口湿地沉积物为研究对象, 布设 8 个监测点按季度开展现场调查, 分析沉积物无机氮的时空分异特征, 采用 PVC 顶盖原位培育法分别在夏、秋季开展沉积物净氮矿化与硝化速率实验研究。结果表明: (1) 湿地沉积物氨氮($\text{NH}_4^+\text{-N}$)、硝氮($\text{NO}_3^-\text{-N}$)和总氮(TN)含量分别为 5.92 ± 6.31 、 14.49 ± 20.89 和 $1408.98 \pm 625.29 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量沿进水口到出水口方向呈递减趋势, 且冬季显著高于其他季($P < 0.05$)。湿地西侧沉积物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量高于东侧, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量存在极显著的季节性差异, 春季显著高于夏秋冬季($P < 0.01$)。 (2) 沉积物净氮矿化和硝化速率的变化范围分别为 $-0.244 \sim 0.256$ 和 $-0.085 \sim 0.084 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$, 湿地进水口两个培养期的净氮矿化速率和培养期 II 的硝化速率显著低于其他监测点($P < 0.05$), 而培养期 I 的硝化速率在湿地中部较高。净氮矿化速率大于硝化速率并形成 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 累积。河口湿地沉积物培养后的无机氮主要以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在(占 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 总量的 55.37%)。 (3) Pearson 相关分析表明, 净氮矿化速率与含水率显著负相关($P < 0.05$), 硝化速率与培养前的 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量呈极显著的正相关关系($P < 0.01$), 而与培养前的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量显著负相关($P < 0.05$)。

【关键词】: 罗时江河口湿地 沉积物 净氮矿化速率 净硝化速率

【中图分类号】: X172;X52 **【文献标识码】:** A **【文章编号】:** 1004-8227(2021)09-2227-09

氮是生物体重要营养元素之一^[1], 氮肥供给能有效促进农作物的生长, 而化肥生产、使用等人类活动加剧氮的循环过程^[2], 同时活性氮随地表径流等进入湖泊造成水体富营养化^[3]。湿地是控制水体富营养化的重要屏障, 能有效削减湖泊上游农业面源中的氮等污染物^[4]。氮的矿化和硝化是重要的氮循环过程, 影响湿地生态系统中有效氮的供给及反硝化过程, 进而影响湿地的氮截留效率^[5]。因此, 研究湿地沉积物氮的矿化与硝化速率可为进一步解析湿地中氮截留及其循环过程奠定基础。目前, 国内学者对三江平原河口湿地^[1]、黄河口潮滩湿地^[5]、珠江河口湿地^[6]、闽江河口湿地^[7,8]、辽河口湿地^[9]、红树林湿地^[10]等开展沉积物净氮矿化和硝化速率研究, 而高原湖泊河口湿地沉积物氮的矿化硝化作用的研究鲜见报道。

洱海是大理州重要饮用水源保护地, 是云南省第二大高原湖泊^[11], 具有封闭半封闭特性, 其四面环山、中部为较低海拔的天然汇水区, 其入湖水量有限、换水周期长、污染物通过入湖河流汇集, 极易引起湖泊水体富营养化^[12]。洱海北部有罗时江、弥苴河、永安江三条入湖河流, 流域内村落聚集, 人口众多, 农田广布, 面源污染突出, 入湖河流水质最差曾达到劣 V 类^[13]。为保护洱海水环境质量, 流域内开展大量生态修复措施^[14,15], 2009 年建成的罗时江河口湿地具有重要污染物截留作用, 能有效削减污染物入湖通量^[16,17], 目前已有学者在罗时江河口湿地开展了沉积物总氮的分布及风险评价^[18]、植物收割对氮磷污染的去除^[19]、

¹作者简介: 李瑞琳(1998~), 女, 本科生, 主要研究方向为湿地中营养盐的生物地球化学循环。E-mail:1659787486@qq.com
梁启斌, E-mail:qbliang@swfu.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(41663016); 云南省应用基础研究计划面上项目(2016FB072, 2017FG001(-039))

沉积物氮氮释放潜力^[20]等研究,洱海流域入湖河口湿地沉积物氮循环关键过程的净氮矿化与硝化过程尚不明晰。本文采用 PVC 顶盖原位培养实验研究罗时江河口湿地沉积物净氮矿化与硝化速率,可进一步揭示该湿地沉积物有效氮的供给及氮循环过程,探究该湿地对氮截留效率的贡献,为今后洱海流域生态修复工程的设计及管理提供基础数据,具有重要现实意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

罗时江流经右所、邓川、上关三镇,全长 18.29 km,占洱海总来水量的 5.9%,年平均水资源量约为 0.526 亿 m³^[21],流域气候属高原亚热带季风气候,年平均气温 15.7℃。沿岸的村庄和农田排放大量生活污水和农田废水进入罗时江,污染严重,为削减河道入湖污染物浓度,建设了罗时江河口湿地(100° 5′ 56.41″ N~100° 6′ 6.37″ N,25° 56′ 49.59″ E~25° 57′ 23.80″ E,图 1),总占地 48.467 hm²,其中水域面积 44.467 hm²^[19]。湿地植物主要有:香蒲(*Typha orientalis*)、荷(*Nelumbo nucifera*)、芦苇(*Phragmites australis*)、金鱼藻(*Ceratophyllum demersum*)、睡莲(*Nymphaea tetragona*)、微齿眼子菜(*Potamogeton maackianus*)、穗状狐尾藻(*Myriophyllum spicatum*)、茭草(*Zizania latifolia*)等^[20]。

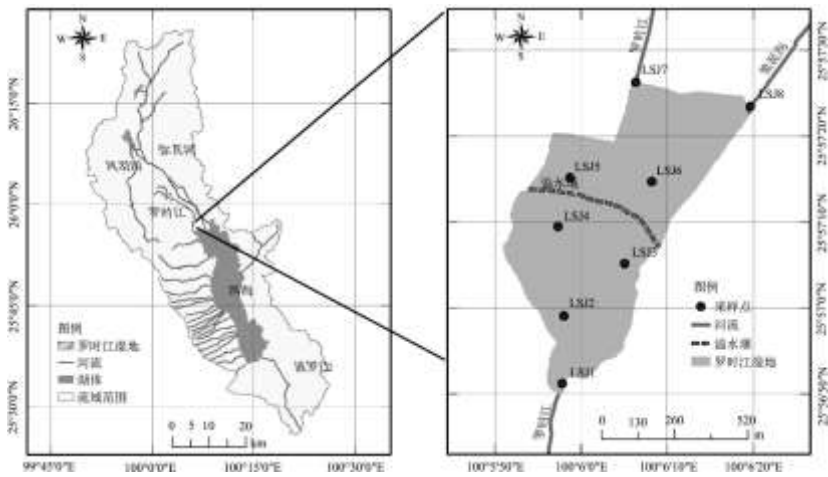


图 1 罗时江河口湿地地理位置及采样布点图

1.2 研究方法

结合湿地植物分布、水流状况和采样点发布的合理性等因素,设置了 8 个样点(图 1)。各点植物类型为:LSJ1(出水口)茭草,LSJ2 微齿眼子菜,LSJ3 荷花,LSJ4 香蒲,LSJ5 茭草,LSJ6 睡莲,LSJ7(罗时江进水口)芦苇,LSJ8(黑泥沟进水口)茭草。

为探究沉积物 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量分布状况,按季度于 2018 年 3、6、9、12 月在布设的 8 个采样点使用活塞式柱状沉积物采样器自上而下截取 0~10cm 的表层沉积物样品,装入做好标记的自封袋。因采样地不具备实验分析条件,无法对新鲜的沉积物样品及时进行分析测定,将样品冷藏带回实验室,常温风干后碾细混匀,测定 TN、NH₄⁺-N、NO₃⁻-N 含量。风干法使得沉积物的无机氮含量有一定增加,无机氮含量的变化与用新鲜样品所测定的结果高度相关,精度要求不高时可使用,此法也被其他学者用于黄河口湿地的相关研究^[5]。使用哈纳·沃德高精度便携式多参数综合测定仪(HI98194)现场同步测定所有沉积物样品的 pH、温度(T)、氧化还原电位(ORP)。

分别在 8 个监测点开展 PVC 顶盖原位培育法实验,利用柱状沉积物采样器分别在每个采样点采集 4 管 10cm 长的圆柱状样品,

其中 2 管样品带回实验室测定沉积物的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 含量(培育前的浓度), 另外 2 管样品剔除植物根须(防止培养过程中植物吸收管中的无机氮而影响试验结果), 分别装入 2 个 PVC 管中用透气的塑料薄膜包住上下口并用橡皮筋扎严, 埋回原位培养约 30d 后取出, 带回实验室测定 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量, 试验共设 2 个培养期, 即 2018 年 6 月 23 日~2018 年 7 月 23 日(I), 2018 年 9 月 15 日~2018 年 10 月 13 日(II)。带回实验室的沉积物样品测定含水率、有机质(OM)、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、TN 含量。沉积物 OM 含量用重铬酸钾-硫酸氧化硫酸亚铁标准溶液滴定法测定, TN 含量采用凯氏蒸馏定氮法测定, $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量采用氯化钾溶液提取-分光光度法测定。

1.3 计算方法

净矿化和硝化速率分别为 PVC 管中沉积物从时间 t_0 培育到时间 t_1 后 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量的变化值和培育前后沉积物 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量之差。设 C_0 和 C_1 分别为培育前后沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)之和, t_1-t_0 (d)为培育时长, 则净矿化速率 $R_{\min}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ 可按下式计算^[5]:

$$R_{\min} = \frac{C_1 - C_0}{t_1 - t_0} \tag{1}$$

同理, 以 $C_{0, \text{nitr}}$ 和 $C_{1, \text{nitr}}$ 分别表示培育前后沉积物中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量, t_1-t_0 (d)为培育时长, 则硝化速率 $R_{\text{nitr}}(\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1})$ 为^[5]:

$$R_{\text{nitr}} = \frac{C_{1, \text{nitr}} - C_{0, \text{nitr}}}{t_1 - t_0} \tag{2}$$

1.4 数据处理与统计

实验数据用 Excel2010 汇总, 利用 Origin2018 软件绘制柱状图, 运用 SPSS19 开展单因素方差分析(One Way ANOVA)差异性 & Pearson 相关性分析。

2 结果与讨论

2.1 罗时江河口湿地沉积物氮含量及理化指标

表 1 为研究期间罗时江河口湿地沉积物理化指标。罗时江河口湿地沉积物 ORP、T、pH 和 OM 平均值分别为 $-143.97 \pm 53.18\text{mV}$ 、 $18.64 \pm 4.61^\circ\text{C}$ 、 6.58 ± 0.24 和 $59.02 \pm 25.35\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 。

表 1 沉积物理化指标(均值±标准差)

监测点	ORP(mV)	T(°C)	pH	OM(g · kg ⁻¹)
LSJ1	-167.25±72.58	18.08±5.08	6.64±0.15	45.94±17.43
LSJ2	-156.43±62.71	18.53±5.07	6.73±0.50	65.80±20.56

LSJ3	-179.45±96.00	19.25±4.42	6.57±0.27	90.44±14.61
LSJ4	-109.11±38.29	19.62±5.38	6.48±0.16	72.60±23.48
LSJ5	-110.73±49.65	18.07±6.46	6.59±0.26	72.27±17.42
LSJ6	-133.21±6.07	18.43±5.10	6.60±0.16	28.32±23.72
LSJ7	-161.70±17.57	19.02±4.46	6.48±0.15	44.92±21.84
LSJ8	-133.85±10.98	18.14±5.20	6.51±0.20	51.88±11.48

罗时江河口湿地沉积物的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 和 TN 含量分别为： 5.92 ± 6.31 、 14.49 ± 20.89 和 $1408.98\pm625.29\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (图 2)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量沿进水口 (LSJ7、LSJ8) 向出水口方向 (LSJ1) 呈递减趋势，其平均含量分别为 11.60 、 $3.14\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。进水口处沉积物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量受上游来水中携带污染物影响，罗时江上游农田广布，未被作物吸收的氮随地表径流进入罗时江湿地，且湿地内水流速度减缓，导致大量 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 在进水口的沉积物积累，高于其他监测点^[22,23]。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量西部高于东部，西部 LSJ5 最高为 $21.15\pm36.34\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ ，东部 LSJ6 最低，仅有 $10.49\pm17.26\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

罗时江河口湿地沉积物的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 及 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量均具有明显的动态变化特征，单因素方差分析结果显示， $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量冬季显著高于春夏秋季 ($P<0.05$)， $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量存在极显著的季节差异，春季显著高于夏秋冬季 ($P<0.01$ ，图 2)。 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量与氮肥的施用量呈极显著正相关关系，罗时江上游农田采用大蒜-水稻轮作模式，冬季种植大蒜^[22]，施用大量氮肥使得沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量在冬季较高，为 $13.00\pm9.09\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量在春季为 $48.31\pm13.41\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 显著高于夏秋冬季节，这与春季上覆水中 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 浓度较高有关^[24]。

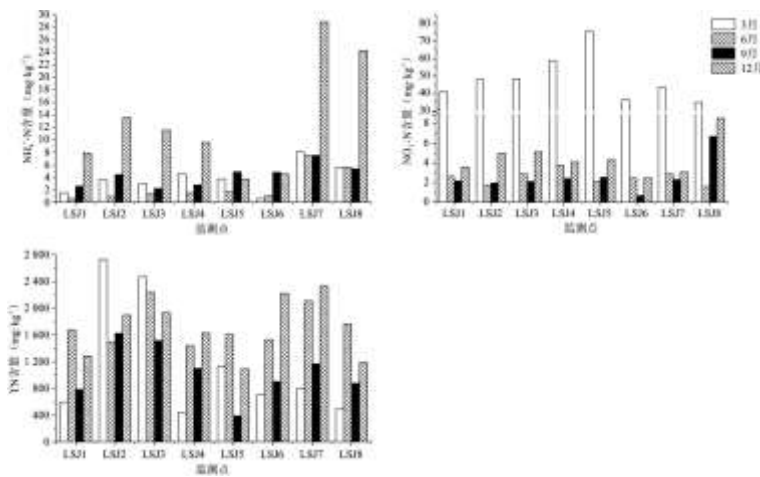


图 2 罗时江河口湿地沉积物氮的含量时空分异 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$)

2.2 罗时江河口湿地沉积物净氮矿化、硝化作用

罗时江河口湿地沉积物 (0~10cm) 净氮矿化和硝化速率变化范围分别为 $-0.244\sim0.256$ 和 $-0.085\sim0.084\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ ，平均值分别为 0.048 和 $0.015\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ (图 3)，与其他学者的研究结果基本一致 (表 2)，且硝化速率低于净氮矿化速率，这是由于硝化作用的反应物 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 源于矿化作用产生^[25]。培养后的 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 含量占 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 总量的 55.37%，说明河口湿地沉积物中无机

氮以 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 形式存在为主。有研究表明 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 含量较 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 更易在反硝化作用和淋溶作用中降低,使得留在沉积物中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 浓度更高^[26,27]。

图 3 可知,净氮矿化和硝化速率空间特征显著,湿地进水口的 LSJ7 及 LSJ8 两个培养期的净氮矿化速率显著低于其他监测点 ($P<0.05$),而培养期 I 的硝化速率在湿地中部 LSJ3、LSJ5 较高,培养期 II 的硝化速率进水口处的 LSJ8 显著低于其他监测点 ($P<0.05$)。沉积物净氮矿化和硝化速率的最大值出现在 LSJ3,分别为 0.176 ± 0.113 和 $0.043\pm0.018\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$,而净氮矿化和硝化速率的最小值出现在 LSJ7,分别为 -0.190 ± 0.077 和 $-0.022\pm0.090\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。

湿地沉积物净氮矿化速率出现正值表明氮矿化过程比较活跃,而 LSJ7、LSJ8 等监测点为负值,可能原因是:(1)微生物的固持作用氧化含碳底物的过程中消耗 $\text{NH}_4^+\text{-N}$,使得矿化所需 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 供应量减少^[32];(2)沉积物中部分 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 参与硝化-反硝化作用而被还原为 N_2 和 N_2O ,从而导致 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 损失^[28]。湿地中 LSJ2、LSJ3 及 LSJ5 监测点的沉积物净氮硝化速率为正值,表明沉积物中的氮在微生物作用下转化为 $\text{NO}_3^-\text{-N}$,但硝化速率较小,而其余五个监测点在不同培养期的硝化速率为负值,主要与罗时江河口湿地沉积物常年淹水,为强还原环境,利于反硝化作用的发生,而抑制硝化反应^[33,34]有关。此外,沉积物中的硝酸盐通过反硝化作用形成 N_2O 或 N_2 ,形成 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 流失^[35],也会导致硝化速率为负值。

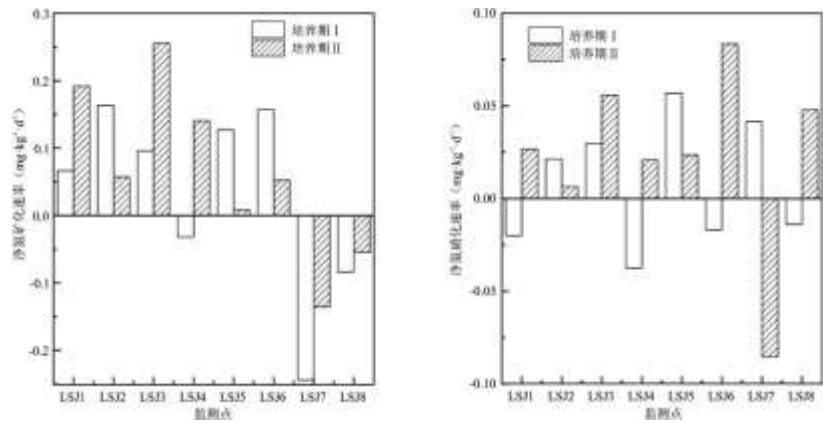


图 3 罗时江河口湿地沉积物净矿化和硝化速率空间分布

表 2 不同生态系统的土壤净氮矿化和硝化速率研究情况对比

生态系统类型	研究区域	土壤类型	培养方法	培养时间(d)	净矿化速率 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	净硝化速率 ($\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$)	参考文献
湿地	三江平原河口湿地	沼泽土	I	25~236	-0.224~0.337	-0.126~0.098	[1]
湿地	黄河口湿地	潮滩土	I	25~48	-0.155~0.328	-0.059~0.113	[5]
湿地	珠江三角洲广州市番禺区	潮滩土	II	0~40	-2.080~2.420(农村)- 9.320~7.830(城市)	-3.360~2.010(村)- 6.620~2.420(城市)	[28]
草地(矿区恢复)	山西省平朔安太堡露天煤矿复垦区	煤矿复垦区土	III	0~28	0.370~3.620	—	[29]
农田	浙江省宁波市洋	水稻土	IV	2~100	0.210~0.940	—	[30]

	沙山水稻种植区						
Wetland	Suaeda salsa salt marshes in the Yellow River Delta Nature Reserve	marshsoil	I	32~42	-0.230~0.080(STFwetland)-0.140~0.040(TFwetland)-0.140~0.240(SFwetland)	—	[26]
Forest	Fu-shan Experimental Forest WSI in northern Taiwan.	forestsoil	I	30	4.000~13.800(0horizon) 0.060~2.800(10~20cmdepth)	2.200~11.600(0horizon) 0.020~2.800(10~20cmdepth)	[31]
湿地	罗时江河口湿地	—	I	28~30	-0.244~0.256	-0.085~0.084	本研究

2.3 沉积物净氮矿化、硝化速率与沉积物理化指标的相关性分析

将 8 个监测点沉积物的基本理化指标与净氮矿化和硝化速率进行 Pearson 相关性分析(表 3), 结果表明: 罗时江河口湿地沉积物净氮矿化速率与含水率显著负相关($P<0.05$), 硝化速率与培养前沉积物 $\text{NO}_3^- \text{-N}$ 浓度呈极显著的正相关关系($P<0.01$), 与培养前的 $\text{NH}_4^+ \text{-N}$ 浓度显著负相关($P<0.05$)。净矿化和硝化速率与 T、pH、ORP、TN、OM 含量无显著相关性($P>0.05$)。

表 3 矿化、硝化速率与沉积物理化指标相关性分析

相关系数	净矿化速率	净硝化速率	T	pH	ORP	OM	ρ (TN)	ρ ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)	ρ ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)	含水率
净矿化速率	1									
净硝化速率	0.092	1								
T	-0.100	-0.157	1							
pH	0.326	-0.207	0.334	1						
ORP	-0.104	-0.384	0.122	-0.300	1					
OM	-0.166	-0.050	0.097	-0.035	0.603*	1				
ρ (TN)	-0.314	-0.136	0.396	0.581*	0.201	0.410	1			
ρ ($\text{NO}_3^- \text{-N}$)	0.042	0.697**	0.362	0.211	-0.250	-0.045	0.186	1		
ρ ($\text{NH}_4^+ \text{-N}$)	-0.324	-0.567*	-0.256	-0.171	0.190	-0.041	-0.098	-0.484	1	
含水率	-0.578*	0.208	-0.128	-0.365	0.304	0.416	0.416	-0.082	0.148	1

净氮矿化速率与含水率显著负相关,表明含水率较高或较低对净矿化速率影响显著,与黄河口湿地土壤氮矿化^[6]、烟田土壤氮矿化^[36]的结论一致。沉积物 NO_3^- -N 含量较高对硝化速率有明显的促进作用, NO_3^- -N 含量较高加快了反硝化作用的进行,使得剩余 NO_3^- -N 浓度降低,从而推动硝化反应的进行,硝化速率与 NO_3^- -N 含量存在着显著的正相关关系^[37]。硝化速率受 NH_4^+ -N 浓度的限制, NH_4^+ -N 为硝化作用提供了反应底物,并通过抑制硝化细菌生长而影响硝化反应进行^[10]。周才平等^[38]研究表明, $T>25^\circ\text{C}$ 时净氮矿化和硝化速率会随 T 升高而降低。本研究中沉积物 T 平均值为 22.97°C ,因此 T 对净氮矿化和硝化速率不会产生显著的抑制作用。矿化过程中随着 NH_4^+ -N 的不断累积,沉积物 pH 有所上升,因此,矿化速率与 pH 呈正相关性关系,但未达到显著性水平。汪峰等^[39]的研究与本研究结果均显示 ORP 与硝化速率无显著相关关系。

3 结论

(1) 罗时江河口湿地 8 个监测点的沉积物 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N 和 TN 含量具有明显的动态变化特征。 NH_4^+ -N 含量沿进水口到出水口方向呈递减趋势,冬季 NH_4^+ -N 含量显著高于春夏秋冬(P>0.05)。 NO_3^- -N 含量从西部向东部递减, NO_3^- -N 含量春季显著高于夏秋冬(P<0.01)。

(2) 罗时江河口湿地沉积物净氮矿化和硝化速率的变化范围分别为 $-0.244\sim 0.256$ 和 $-0.085\sim 0.084\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$, 平均值分别为 0.048 和 $0.015\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}\cdot\text{d}^{-1}$ 。湿地进水口 LSJ7、LSJ8 两个培养期的净氮矿化速率和 LSJ8 培养期 II 的硝化速率显著低于其他监测点(P<0.05),而培养期 I 的硝化速率在湿地中部较高。硝化速率低于净氮矿化速率。培养后 NH_4^+ -N 含量占 NH_4^+ -N 和 NO_3^- -N 含量的 55.37%,表明沉积物中无机氮以 NH_4^+ -N 形式存在为主。

(3) 罗时江河口湿地沉积物净氮矿化速率与含水率显著负相关(P<0.05),硝化速率与培养前的 NO_3^- -N 含量呈极显著的正相关关系(P<0.01),与 NH_4^+ -N 含量显著负相关(P<0.05)。净氮矿化和硝化速率与 T 、 pH 、 ORP 、 TN 和 OM 含量无显著相关性(P>0.05)。

参考文献:

- [1] 孙志高, 刘景双. 三江平原典型小叶章湿地土壤氮素净矿化与硝化作用研究[J]. 应用生态学报, 2007, 18(8):1771-1777.
- [2] 冯靖仪. 稻田作物生产的碳足迹及化肥减施的温室气体减排潜力研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- [3] 赵丹. 城市地表硬化的复合生态效应及生态化改造方法[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(5):213-217.
- [4] 王书锦, 刘云根, 张超, 等. 洱海流域入湖河口湿地沉积物氮、磷、有机质分布及污染风险评价[J]. 湖泊科学, 2017, 29(1):69-77.
- [5] 牟晓杰, 孙志高, 刘兴土. 黄河口典型潮滩湿地土壤净氮矿化与硝化作用[J]. 中国环境科学, 2015, 35(5):1466-1473.
- [6] 王玉萍, 王立立, 李取生, 等. 珠江河口湿地沉积物硝化作用强度及影响因素研究[J]. 生态科学, 2012, 31(3):330-334.
- [7] 林贤彪. 闽江口湿地沉积物硝化作用及其环境影响因子探讨[D]. 福州: 福建师范大学, 2014.
- [8] 谢蓉蓉, 李家兵, 张党玉, 等. 闽江河口湿地沉积物氮矿化对盐度响应研究[J]. 中国环境科学, 2017, 37(6):2248-2254.
- [9] 陈春涛. 2009 年夏秋季辽河口芦苇湿地沉积物硝化作用及影响因素研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2010.

-
- [10]王飞飞. 红树林沉积物的硝化和反硝化过程研究[D]. 厦门: 厦门大学, 2012.
- [11]王哲, 谢杰, 方达, 等. 洱海北部 2 种典型种植制度下农田氮污染负荷研究[J]. 生态与农村环境学报, 2013, 29 (5): 625-629.
- [12]唐林森, 陈进, 黄薇, 等. 湖泊等封闭及半封闭性水体水华治理方法[J]. 长江科学院院报, 2007, 24(6): 38-41.
- [13]封吉猛, 王欣泽, 林燕, 等. 洱海流域北部入湖河流污染特征分析[J]. 净水技术, 2013, 32(5): 11-15.
- [14]储昭升, 高思佳, 庞燕, 等. 洱海流域山水林田湖草各要素特征、存在问题及生态保护修复措施[J]. 环境工程技术学报, 2019, 9(5): 507-514.
- [15]叶春, 金相灿, 王临清, 等. 洱海湖滨带生态修复设计原则与工程模式[J]. 中国环境科学, 2004, 24(6): 717-721.
- [16]梁启斌, 侯磊, 李能发, 等. 洱海北部表流人工湿地氮截留的长效性及影响因子[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(7): 1585-1593.
- [17]李如忠, 丁丰. 巢湖主要入湖河口湿地植被生态学特征分析——以派河和十五里河为例[J]. 安徽建筑工业学院学报(自然科学版), 2009, 17(1): 80-84.
- [18]王书锦, 刘云根, 梁启斌, 等. 罗时江河口湿地沉积物全氮分布及其污染风险评价[J]. 湿地科学, 2016, 14(3): 408-414.
- [19]苏云华, 杨桐. 秋季河口湿地植物收割对氮、磷污染物去除能力影响浅析——以罗时江河口湿地为例[J]. 环境科学导刊, 2018, 37(4): 30-33.
- [20]袁海英, 梁启斌, 侯磊, 等. 洱海入湖河口湿地沉积物氨氮释放潜力研究[J]. 生态与农村环境学报, 2020, 36(6): 762-769.
- [21]吕兴菊, 窦嘉顺, 杨四坤, 等. 洱海流域湿地生态系统建设案例分析——以罗时江河口河口湿地为例[C]//中国科学技术学会. 湖泊河口湿地与绿色发展——第五届中国湖泊论坛论文集. 吉林: 吉林人民出版社, 2015: 163-167.
- [22]汤秋香, 任天志, 雷宝坤, 等. 洱海北部地区不同轮作农田氮、磷流失特性研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 608-615.
- [23]朱兆良, 孙波. 中国农业面源污染控制对策研究[J]. 环境保护, 2008(8): 4-6.
- [24]吕俊芳, 王书锦, 刘云根, 等. 罗时江河口湿地水质季节变化特征及评价[J]. 环境工程, 2016, 34(S1): 845-849, 877.
- [25]方运霆, 莫江明, Per Gundersen, 等. 森林土壤氮素转换及其对氮沉降的响应[J]. 生态学报, 2004, 24(7): 1523-1531.
- [26]JIA J, BAI J H, GAO H F, et al. In situ soil net nitrogen mineralization in coastal salt marshes (Suaeda salsa) with different flooding periods in a Chinese estuary[J]. Ecological Indicators, 2017, 73: 559-565.
- [27]肖瑞晗, 满秀玲, 丁令智. 大兴安岭北部天然针叶林土壤氮矿化特征[J]. 生态学报, 2019, 39(8): 2762-2771.

-
- [28]胡星云,白军红,温晓君,等.重金属镉添加对珠江河口农村和城市河流湿地土壤氮矿化过程的影响[J].农业环境科学学报,2019,38(3):618-626.
- [29]江山,刘焕焕,张菁,等.安太堡煤矿区不同复垦年限和复垦模式土壤氮矿化及硝化特征[J].中国生态农业学报(中英文),2019,27(2):286-295.
- [30]曹竞雄,韦梦,陈孟次,等.温度对厌氧条件下不同 pH 水稻土氮素矿化的影响[J].中国生态农业学报,2014,22(10):1182-1189.
- [31]JEFFREY S O,HEN B K,MING K W,et al.Net nitrogen mineralization and nitrification rates in forest soil in northeastern Taiwan[J].Soil Science and Plant Nutrition,2010,176(1):519-530.
- [32]刘聪,李守中,王从容,等.凋落物添加对亚热带水土流失区人工林土壤氮矿化的影响[J].福建师范大学学报(自然科学版),2018,34(4):103-110.
- [33]REDDY K R,DELAUNE R D. Biogeochemistry of Wetlands:Science and Applications[M]. BocaRaton, FL:CRC Press, 2008: 68.
- [34]刘刚,闻岳,周琪.人工湿地反硝化碳源补充研究进展[J].水处理技术,2010,36(4):1-5.
- [35]白洁,陈春涛,赵阳国,等.辽河口湿地沉积物硝化细菌及硝化作用研究[J].环境科学,2010,31(12):3011-3017.
- [36]吴元华,王永,石屹,等.冬牧 70 黑麦秸秆还田对烟田土壤氮素矿化的影响[J].江苏农业科学,2016,44(5):506-509.
- [37]孙启元,李家兵,赖月婷,等.不同盐度对闽江河口沉积物硝化作用的影响[J].应用生态学报,2018,29(4):1313-1320.
- [38]周才平,欧阳华,宋明华.中国森林生态系统氮循环特征与生产力间的相互关系[J].应用生态学报,2005,16(2):203-206.
- [39]汪峰,姚红燕,陈若霞,等.慈溪 1000 年时间序列农田土壤氮矿化和硝化的变化[J].土壤学报,2019,56(5):1161-1170.