DOI: 10.5846/stxb202207091958

宋振阳,孙志高,师自香,贺攀霏,胡星云,夏星辰,李亚瑾,武慧慧.外源氮输入对闽江河口芦苇湿地土壤磷形态赋存特征的影响.生态学报,2023, 43(14):5902-5915.

Song Z Y, Sun Z G, Shi Z X, He P F, Hu X Y, Xia X C, Li Y J, Wu H H.Effects of exogenous nitrogen enrichment on distribution of phosphorus fractions in soils of *Phragmites australis* marsh in the Min River estuary, China. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14):5902-5915.

外源氮输入对闽江河口芦苇湿地土壤磷形态赋存特征 的影响

宋振阳^{1,2},孙志高^{1,2,3,*},师自香^{1,2},贺攀霏^{1,2},胡星云^{1,2},夏星辰^{1,2},李亚瑾^{1,2},

1 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

2 福建师范大学地理研究所,福州 350007

3 福建师范大学福建省亚热带资源与环境重点实验室,福州 350007

摘要:河口湿地是响应全球气候变化和人类活动最为敏感的生态系统之一,是外源氮的一个重要"汇",其对于生源元素循环过 程可产生深刻的影响。在当前闽江河口区氮负荷增强背景下,探讨外源氮输入对湿地土壤磷形态赋存及其关键转化过程具有 重要意义。为此,选择闽江河口鳝鱼滩的芦苇湿地为研究对象,基于野外原位氮输入模拟试验,研究了不同氮输入水平($N_{N_{t}}$,对 照处理; $N_{L_{t}}$,低氮处理; $N_{M_{t}}$,中氮处理; $N_{H_{t}}$,高氮处理)对湿地土壤磷形态赋存特征的影响。结果表明,外源氮输入不但增加了 湿地土壤的 TP 含量,而且改变了其土层分布特征。除 N_{M} 与 N_{N} 处理下的 TP 含量相当外, N_{L} 和 N_{H} 处理下的全磷(TP)含量相 比 N_{N} 处理分别增加了 3.5%和 4.4%。氮输入整体上增加了湿地土壤的活性磷和闭蓄态磷含量,但降低了中等活性磷含量。相 比 N_{N} 处理分别增加了 3.5%和 4.4%。氮输入整体上增加了湿地土壤的活性磷和闭蓄态磷含量,但降低了中等活性磷含量。相 比 N_{N} 处理不的活性磷含量分别增加了 6.5%和 12.6%,而 N_{L} 、 N_{M} 和 N_{H} 处理下的闭蓄态磷含量分别增加了 3.3%、3.9%和 7.0%。中等活性磷在 N_{M} 处理下的降幅尤为明显,其值相比 N_{N} 处理降低了 6.7%。不同氮处理下湿地土壤以闭 蓄态磷占比最高(51.8%—54.1%),中等活性磷次之(38.1%—41.2%),活性磷最低(7.0%—7.9%)。不同氮处理下的各形态磷 占比以 HCl-P_i、Residual-P、NaOH-P。和 NaOH-P_i较高,Sonic-P。和 NaHCO₃-P_i、次之,而 NaHCO₃-P。、Resin-P 和 Sonic-P_i较低。研究 发现,氮输入主要通过改变土壤养分及酸碱状况来进一步影响土壤中各形态磷的赋存。其中, N_{M} 和 N_{H} 处理下中等活性 磷的显著降低主要与 NaOH-P_i和 Sonic-P。有关。

关键词:氮输入;磷形态;湿地土壤;芦苇湿地;闽江河口

Effects of exogenous nitrogen enrichment on distribution of phosphorus fractions in soils of *Phragmites australis* marsh in the Min River estuary, China

SONG Zhenyang^{1,2}, SUN Zhigao^{1,2,3,*}, SHI Zixiang^{1,2}, HE Panfei^{1,2}, HU Xingyun^{1,2}, XIA Xingchen^{1,2}, LI Yajin^{1,2}, WU Huihui^{1,2}

1 Key Laboratory of Humid Subtropical Eco-geographical Process (Fujian Normal University), Ministry of Education, Fuzhou 350007, China

2 Institute of Geography, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

3 Fujian Provincial Key Laboratory for Subtropical Resources and Environment, Fujian Normal University, Fuzhou 350007, China

Abstract: Estuarine marsh is one of the most sensitive ecosystems that respond to global change and human activities. The

基金项目:国家自然科学基金项目(41971128);福建省"闽江学者奖励计划"项目

收稿日期:2022-07-09; 网络出版日期:2023-03-23

^{*} 通讯作者 Corresponding author.E-mail: zhigaosun@ 163.com

estuarine marsh generally acts as a sink of exogenous nitrogen (N), which might produce significantly influences on the processes of biogenic elements. In the background of enhanced exogenous N import in the Min River estuary, it is significance to explore the effects of N import on the distributions and key transformation processes of phosphorus (P) fractions in marsh soils. In this paper, the effects of exogenous N import levels (N_N , control treatment; N_L , low N treatment; N_{Mt}, medium N treatment; N_{Ht}, high N treatment) on P fractions in soils of Phragmites australis marsh in Shanyutan of the Min River estuary were investigated by in situ N enrichment experiment. Result showed that the exogenous N enrichment not only increased the total phosphorus (TP) contents in soils, but also altered its distributions in soil layers. The TP contents in soils of the N_M and N_N were approximated, but the values in soils of the N_L and N_H, compared with N_{Nt}, increased by 3.5% and 4.4%, respectively. The enrichment of N generally increased the contents of available and non -available P in soils, but reduced the values of moderately available P. Compared with N_{Nt} , the contents of available P in the N_M and N_H increased by 6.5% and 12.6%, while the values of non-available P in the N_L, N_M and N_H increased by 3.3%, 3.9% and 7.0%, respectively. It should be noting that the decline of moderately available P contents in the N_{Mt} was particularly evident and the deceasing amplitude reached 6.7%. The proportions of non-available P in TP in soils of different treatments were the highest (51.8%-54.1%), followed by moderately available P with 38.1%-41.2% and available P with 7.0%-7.9%. Moreover, the proportions of HCl-P_i, Residual-P, NaOH-P_a and NaOH-P_i in TP in soils of different enrichments were much higher, followed by Sonic-P, and NaHCO₃-P, while those for NaHCO₃-P, Resin-P and Sonic-P, were generally lower. This study found that the exogenous N enrichment altered the nutrient and acid-base conditions of soils greatly, which further influenced the distribution and availability of P fractions in soils. The increase of available P contents in the N_{M1} and N_{H1}, was mainly associated with Resin-P and NaHCO₃-P_a, while those of non-available P contents in the N_{Lt}, N_{Mt} and N_{Ht} was primarily related to Residual-P. By comparison, the significant increase of moderately available P contents in the N_{Mt} was mainly dependent on NaOH-P_i and Sonic-P_o.

Key Words: nitrogen enrichment; phosphorus fractions; marsh soil; Phragmites australis marsh; Min River estuary

磷(P)作为湿地土壤中重要的限制性养分,其供给状况不仅影响着植物的初级生产,而且可对湿地生态 系统的结构、功能及稳定产生深刻影响。由于湿地磷循环与碳、氮循环均存在复杂的耦合关系,所以明晰土壤 磷形态赋存特征是进一步研究湿地养分迁移及转化过程的重要基础。河口湿地位于海洋与河流物质输运及 转化的活跃地带,是响应全球气候变化和人类活动最为敏感的生态系统之一。受河口水动力和海洋潮汐的双 重影响,河口湿地氧化-还原环境交替频繁^[1],由此导致土壤中磷赋存形态及其生物地球化学行为发生显著 变化,进而可能对河口及近岸海域的生态环境产生深刻影响^[2]。

国外学者关于河口湿地磷循环的研究开展较早,且已围绕湿地土壤磷形态时空分布^[3]、不同磷赋存形态间相互转化^[4]以及生物作用与磷养分之间关系^[5]等方面开展了许多研究。近年来,国内关于河口湿地磷循环也开展了较多工作,其研究区域已涉及辽河口、黄河口、洋河河口、长江口、珠江口和闽江河口^[6-13]。整体而言,当前研究主要侧重于湿地土壤磷吸附-解吸特征^[11]、植物残体分解磷养分释放^[7]以及植被类型、生境变化^[6]、生物入侵^[12]和人类活动^[13]对土壤磷含量变化影响等方面,但关于外源氮输入背景下土壤磷赋存形态及其转化过程的研究还不多见。

闽江河口湿地是闽江与东海相互作用形成的典型河口湿地生态系统,特殊的地理环境使得其在维持区域 生态安全方面发挥着十分重要的作用。近十年来,高强度的人类活动使得闽江河口湿地一直处于高氮沉降和 高氮养分负荷状态。现有研究显示,该区的氮沉降量介于 3.0—3.5 g Nm⁻² a^{-1[14]},已超过其临界负荷量(2.0— 2.5 g N m⁻² a⁻¹)^[15]。另外,闽江河口近年来的营养盐入海量介于 3.8—6.1×10⁴ t^[16],湿地氮养分负荷接近 21 g N m⁻² a^{-1[16-18]}。可见,受陆源氮输入和氮沉降的共同影响,闽江河口湿地充当着外源氮的一个重要"汇"。 在氮负荷增强的背景下,闽江河口湿地磷赋存形态及其关键转化过程将发生何种变化?尚不明确。芦苇 (Phragmites australis)是闽江河口分布最为广泛的原生植被之一,也是响应氮磷养分较为敏感的典型湿地植被。尽管当前关于闽江河口湿地土壤磷已开展了一些研究,但这些工作主要集中于土壤磷释放风险^[11]以及人类活动^[13]、植被空间扩展^[19]和生物入侵^[12]对土壤全磷或无机磷含量变化的影响方面,而关于野外原位氮输入条件下土壤磷赋存形态(尤其是有机磷形态)的研究还鲜有报道。为此,本研究以闽江河口鳝鱼滩西北部的芦苇湿地为研究对象,基于野外原位氮输入模拟试验,探讨了外源氮输入对芦苇湿地土壤磷形态赋存特征的影响。研究结果有助于明确湿地土壤磷循环关键过程对外源氮输入的响应,并可为该区湿地生态保育提供科学依据。

1 研究区域与研究方法

1.1 研究区概况

闽江河口地处我国中亚热带和南亚热带过渡区,气候温暖湿润,雨热同期,年均气温 19.3 ℃,年降水量超 过 1380 mm。鳝鱼滩是闽江河口最大的一块天然湿地(119°34′12″—119°40′40″E,26°00′36″—26°03′42″N), 总面积 3120 hm²。研究区位于鳝鱼滩西北部,该区潮汐作用强烈,受河流和潮汐的共同作用,水文过程较为 复杂。该区土壤类型为潮土和滨海盐土等,主要植被有芦苇(*P. australis*)、短叶茳芏(*Cyperus malaccensis*)和 互花米草(*Spartina alterniflora*)等。

1.2 研究方法

1.2.1 试验设计

选择鳝鱼滩西北部的芦苇湿地为研究对象,开展野外原位氮输入模拟试验。结合该区现有资料,考虑陆 源氮输入(21.0 gN m⁻² a⁻¹)(主要以 NO₃⁻-N 为主的无机氮)^[17-18]和氮沉降(3.0—3.5 g N m⁻² a⁻¹)^[20]的综合影 响,将湿地氮输入自然背景设定为 25.0 g N m⁻² a⁻¹,并以此设计试验的 4 个氮输入水平,即:N_N为对照处理, 其值为当前氮输入量,实际输氮 0 g N m⁻² a⁻¹,N_L为低氮处理,模拟该区未来较低的氮输入量,实际输氮 12.5 g N m⁻² a⁻¹、N_{Mt}为中氮处理,模拟该区未来较高的氮输入量,实际输氮 25.0 g N m⁻² a⁻¹、N_{Ht}为高氮处理,模拟该 区未来很高的氮输入量,实际输氮 75.0 g N m⁻² a⁻¹。每个处理随机设置 3 个重复样地(1.5 m×2 m)。

综合考虑闽江河口氮沉降和入海营养盐的 NH⁴₄-N 和 NO³₃-N 比例,将输入的 NH⁴₄-N(NH₄Cl)和 NO³₃-N (KNO₃)比例设定为 1:3.3^[16-18, 20]。试验于 2021 年 3 月下旬开始,至 2021 年 9 月结束,共持续 6 个月。试验 进行时,将 NH₄Cl 和 KNO₃以 1:3.3 的比例溶解在 2.5 L 水中,每隔 30 d 左右,在小潮日按照 4 种处理的氮输入 要求以混合水溶液的形式对上述样地进行输氮,对照样地喷洒等量的水。

1.2.2 样品采集与测定

2021年9月,在上述氮输入样地内采集表层(0—5 cm)和亚表层(5—10 cm)土壤样品,共24个。将采集的土壤样品及时带回实验室自然风干,去除根系等杂物,研磨过 100 目筛后装袋待测。取 0.50 g 过筛土,采用 Hedley 连续浸提法测定不同形态磷含量^[21]:(1)加入去离子水和阴离子树脂膜充分震荡,将树脂膜取出洗净 后放入 15 mL 0.5 mol/L HCl 溶液中交换以获得 Resin-P 待测液;(2)向上一步残渣中加入 30 mL 0.5 mol/L NaHCO₃溶液以获得 NaHCO₃-P 浸提液;(3)向上一步的残渣中加入 30 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液以获得 NaOH-P 浸提液;(4)向上一步的残渣中加入 20mL 0.1 mol/L NaOH 溶液,超声震荡 20 min 后,再加入 10 mL 0.1 mol/L NaOH 溶液以获得 Sonic-P 浸提液;(5)向上一步的残渣中加入 30 mL 1 mol/L HCl 溶液以获得 HCl-P 浸提液;(6)将上一步的残渣烘干后,经 H₂SO₄-HClO₄消解以获得 Residual-P 待测液。在上述逐级浸提液中 加入9.0 mol/L H₂SO₄溶液以获得无机磷(P_i)待测液;加入 0.50 gK₂S₂O₈和 9.0 mol/L H₂SO₄溶液,经高压灭菌 后以获得各级全磷(TP)待测液。通过连续流动分析仪(SKALAR-SAN⁺⁺,荷兰)测定不同形态磷含量。各级 有机磷(P_o)含量由各级 TP 含量减去各级无机磷(P_i)含量得到。

根据 Maranguit 等的划分方法,将土壤磷组分分为三部分^[22],即活性磷(Resin-P、NaHCO₃-P_i和 NaHCO₃-P_o);中等活性磷(NaOH-P_i、NaOH-P_o、Sonic-P_i和 Sonic-P_o);闭蓄态磷(HCl-P_i和 Residual-P)。土壤全磷(TP)

含量为上述9种磷组分之和。采用元素分析仪(Elementar Vario MAX,先国)测定土壤全碳(TC)和全氮(TN) 含量;土壤铵态氮(NH₄⁻N)和硝态氮(NO₃⁻N)经2mol/L KCl 溶液浸提后,采用连续流动分析仪测定 (SKALAR-SAN⁺⁺,荷兰);土壤含水量采用烘干法测定;土壤 pH 值采用电位法(水土比51)(Starter 300,USA) 测定;土壤盐度(EC)采用便携式电导仪(2265FS,美国)测定。不同氮输入水平下湿地土壤(0—10cm)理化性 质详见表1。

Table 1	Average contents of	f different ph	osphorus fractio	ns in marsh s	oils (0—10 cm) of different	nitrogen impor	t levels
输氮水平	硝态氮	铵态氮	全碳	全氮	碳氮比	酸碱度	盐度	含水量
Nitrogen import levels	NO ₃ -N	$\rm NH_4^+-N$	TC	TN	C/N	$_{\rm pH}$	EC	Moisture
对照处理 N _{Nt}	$24+05_{2}$	12 6+1 0a	24 5+1 02	2 1+0 19	11.9+0.3%	6 3+0 19	7 7+0 59	31.8+0.09
No N treatment	2.4±0.3a	12.0±1.0a	24.3±1.0a	2.1±0.1a	11.9±0.5a	0.5±0.1a	7.7±0.5a	51.6±0.0a
低氮处理 N _{Lt}	4 6+0 7b	13.7+1.0a	22.9+0.6ab	2.1+0.1ab	11.1+0.0a	5 9+0 1b	8 8+0 6a	36 0+0 0a
Low N treatment		1017 = 1104	220) 2010ab	211201100	111120104	01720115	01020104	201020104
中氮处理 N _{Mt}	8 2+1 3c	13 4+1 02	21 1+0 5b	1 9+0 1b	11.3+0.19	6.1+0.19	8 8+0 42	31.3+0.0%
Medium N treatment	0.2±1.50	13. 4 ±1.0a	21.110.56	1.7±0.10	11.5±0.1a	0.1±0.1a	0.0±0.4a	51.5±0.0a
高氮处理 N _{Ht}	6 2+0 6bd	12 8+0 89	22 6+0 7ab	1 9+0 0b	12 0+0 49	6.2+0.19	7 8+0 49	27.7+0.0%
High N treatment	0.2±0.000	12.0±0.04	22.0±0.7ab	1.720.00	12.0±0.4a	0.2±0.1a	7.0±0.4a	27.7 20.04

表1 不同氮输入水平下湿地土壤(0—10 cm)理化性质

同列不同小写字母表示不同氮处理间差异显著(P<0.05);N_{Nt}:对照处理 No N treatment;N_{Lt}:低氮处理 Low N treatment;N_{Mt}:中氮处理 Medium N treatment;N_{Ht}: 高氮处理 High N treatment

1.2.3 数据处理与分析

运用 Origin 2022 软件对数据进行作图和计算;采用 SPSS 26.0 软件对数据进行单因素方差分析、多因素 方差分析,显著性水平设定为 P=0.05;运用 Canoco 5.0 对数据进行主成分(PCA)分析。

2 结果与分析

2.1 氮输入对湿地土壤活性磷含量的影响

不同氮处理下土壤中的活性磷均以 NaHCO₃-P_i含量最高,而 Resin-P 和 NaHCO₃-P_o含量较低。土层深度 对 3 种活性磷含量均存在极显著影响(P<0.01),而氮输入水平以及氮输入水平×土层深度均对 Resin-P 和 NaHCO₃-P_o含量存在显著或极显著影响(P<0.05 或 P<0.01)(表 2)。不同氮处理下的 NaHCO₃-P_i含量均表现 为表层>亚表层。除 N_{Ht}处理外,其它处理的 Resin-P 含量亦表现为表层>亚表层,但 NaHCO₃-P_o含量正好相反 (图 1)。不同氮处理下两层土壤中 NaHCO₃-P_i含量的变化均不明显(P>0.05),但氮输入提高了两层土壤中的 NaHCO₃-P_o含量(P<0.05),其值均在 N_{Lt}处理最高。与之相比,Resin-P 含量的变化较为复杂。表层土壤的 Resin-P 含量在 N_{Mt}处理下显著增加(P<0.05),其值相比 N_{Nt}处理提高了 78.7%;亚表层土壤的 Resin-P 含量在 N_{Lt}和 N_{Mt}处理下显著降低(P<0.05),其值相比 N_{Nt}处理分别降低了 85.0%和 76.0%。整体而言,相比 N_{Nt}处理, 土壤活性磷含量在 N_{Mt}和 N_{Ht}处理下分别增加了 6.5%和 12.6%,而在 N_{Lt}处理下降低了 0.9%(表 3)。

2.2 氮输入对湿地土壤中等活性磷含量的影响

不同氮处理下土壤中的中等活性磷均以 NaOH-P_i和 NaOH-P_o含量较高,而 Sonic-P_i含量最低。土层深度 对 NaOH-P_i含量存在显著影响(P<0.05),而氮输入水平对 Sonic-P_o含量存在显著影响(P<0.05)(表 2)。不同 氮处理下的 NaOH-P_i含量、N_{HI}处理下的 Sonic-P_i含量以及 N_{NI}处理下的 Sonic-P_o含量均表现为亚表层>表层。 除 N_M处理外,其它处理的 NaOH-P_o含量均表现为表层>亚表层(图 2)。不同氮处理下两层土壤中的 NaOH-P_i 和 NaOH-P_o含量变化均不明显(P>0.05),但氮输入提高了两土层中的 Sonic-P_i含量(P<0.05),其值在 N_{MI}处 理的表层土壤中最高。随着氮输入量的增加,两层土壤中的 Sonic-P_o含量均呈降低趋势。尤其在亚表层土 壤,N_{Li}、N_{MI}和 N_{HI}处理下的 Sonic-P_o含量显著降低(P<0.05)。整体而言,相比 N_{MI}处理,土壤中等活性磷含量 在 N_{LI}处理下增加了 4.5%,而在 N_{MI}和 N_{HI}处理下分别降低了 6.7%和 0.5%(表 3)。





图 1 不同氮输入水平下湿地土壤活性磷含量变化



不同大写字母表示相同氮处理下不同土层间差异显著(P<0.05);不同小写字母表示相同土层不同氮处理间差异显著(P<0.05);N_{Nt}:对照 处理,No N treatment;N_{Lt}:低氮处理,Low N treatment;N_{Mt}:中氮处理,Medium N treatment;N_{Ht}:高氮处理,High N treatment;Resin-P:树脂交换 态磷;NaHCO₃-P_i:NaHCO₃浸提态无机磷;NaHCO₃-Po:NaHCO₃浸提态有机磷

	Table 2 Two	o-factor ANC	OVA fo	r phosphorus f	fractions in ma	rsh soils		
					磷赋存形态 P	hosphorus fracti	ons	
坝目 Itoma	df		Re	sin-P	NaHC	O ₃ -P _i	NaH	CO ₃ -P _o
items		j	F	Р	F	Р	F	Р
氮输入水平 Nitrogen import levels	1	37.	374	0.000 **	1.14	0.363	9.545	0.002 **
土层深度 Soil depth	2	79.	769	0.000 **	25.315	0.000^{*}	14.694	0.002 **
氮输入水平×土层深度 Nitrogen import levels × Soil depth	3	45.	317	0.000 **	0.164	0.919	3.672	0.044 *
					磷赋存形态 P	hosphorus fracti	ons	
坝日 Itoma	df		NaC)H-P _i	NaO	H-P _o	So	nic-P _i
items			F	Р	F	Р	F	Р
氮输入水平 Nitrogen import levels	1	1.0	599	0.207	1.109	0.374	1.134	0.367
土层深度 Soil depth	2	4.5	528	0.049 *	0.369	0.552	0.147	0.707
氮输入水平×土层深度 Nitrogen import levels × Soil depth	3	0.2	275	0.843	0.527	0.527	0.277	0.841
-775 LI			磷赋存形态 Phosphorus fractions					
项目 Items	df		Sonic-P _o		HC	HCl-P _i		idual-P
Items			F	Р	F	Р	F	Р
氮输入水平 Nitrogen import levels	1	4.3	373	0.020*	0.537	0.664	2.054	0.150
土层深度 Soil depth	2	3.2	287	0.089	7.344	0.015 *	0.075	0.788
氮输入水平×土层深度 Nitrogen import levels × Soil depth	3	2.5	577	0.090	2.549	0.092	1.030	0.408

表 2 湿地土壤不同形态磷含量的双因素方差分析

** P<0.01:极显著相关; *P<0.05:显著相关; Resin-P:树脂交换态磷; NaHCO₃-P_i:碳酸氢钠浸提态无机磷; NaHCO₃-P_o:碳酸氢钠浸提态有 机磷; NaOH-P_i:氢氧化钠浸提态无机磷; NaOH-P_o:氢氧化钠浸提态有机磷; Sonic-P_i:超声态无机磷; Sonic-P_o:超声态有机磷; HCl-P_i:盐酸浸提态 磷; Residual-P:残留磷

80



图 2 不同氮输入水平下湿地土壤中等活性磷含量变化

Fig.2 Variations of moderately available phosphorus contents in soils of different nitrogen import levels

NaOH-P_i:氢氧化钠浸提态无机磷;NaOH-P_o:氢氧化钠浸提态有机磷;Sonic-P_j:超声态无机磷;Sonic-P_o:超声态有机磷

磷形态			氮输入水平 N	itrogen import levels	
Phosphorus fractions		N _{Nt}	$\mathbf{N}_{\mathbf{Lt}}$	N _{Mt}	N _{Ht}
活性磷	Resin-P	10.97±0.48ab	4.99±1.53a	11.34±4.02ab	$14.14 \pm 0.70 \mathrm{b}$
Available Phosphorus	NaHCO3-Pi	47.82±4.05a	$49.70 \pm 4.42a$	43.61±3.56a	49.55±3.23a
	NaHCO3-Po	5.75±2.09a	$10.69 \pm 1.64 \mathrm{ab}$	$14.71 \pm 1.55 b$	9.64±1.95ab
	小计 Subtotal	64.54±13.24	65.38 ± 14.05	69.66±10.24	73.60±12.58
中等活性磷	$NaOH-P_i$	148.05±21.65a	153.36±17.42a	103.09±13.60a	110.39±26.60a
Moderately available Phosphorus	NaOH-P _o	151.47±15.62a	163.74±16.82a	184.64±15.12a	196.26±23.72a
	Sonic-P _i	0.71±0.25a	3.48±1.07a	5.20±1.77a	5.12±3.30a
	$Sonic-P_o$	62.72±4.03a	$58.59{\pm}5.96{\rm ab}$	$45.84{\pm}22.40\mathrm{b}$	$49.69{\pm}4.17\mathrm{b}$
	小计 Subtotal	362.96 ± 36.36	379.44±38.58	338.78 ± 38.90	361.45 ± 20.68
闭蓄态磷	HCl-P _i	242.28±11.61a	248.87±19.15a	240.72±15.09a	262.50±20.18a
Non-available Phosphorus	Residual-P	220.23±3.73a	227.75±8.53ab	$240.03{\pm}6.63{\rm b}$	$232.40{\pm}3.66{\rm ab}$
	小计 Subtotal	462.51±11.02	476.62±10.56	480.75±0.34	494.90±15.05
全磷 Total Phosphorus		890.85±37.23	921.81±37.45	889.19±47.88	929.76±45.27

	表 3	不同氮输入水平下湿地土壤(0	—10cm)不同形态磷的	的平均含量(mg/kg))	
Table 3	Average contents	of different phosphorus fraction	s in marsh soils (0-	-10cm) of different	nitrogen imp	ort levels

2.3 氮输入对湿地土壤闭蓄态磷含量的影响

不同氮处理下土壤中的闭蓄态磷均以 HCl-P_i含量较高,而残留磷(Residual-P)含量相对较低。除 N_L处 理外,其它处理的 HCl-P_i含量均表现为亚表层>表层,且土层深度对其存在显著影响(P < 0.05)(表 2)。 Residual-P 含量在 N_{Nt}和 N_{Lt}处理下均表现为表层>亚表层,在 N_{Mt}和 N_{Ht}处理下则相反。尽管不同氮处理下两 层土壤中 HCl-P_i含量的变化均不明显,但 N_{Lt}处理下表层土壤中的 HCl-P_i含量相对较高,而亚表层土壤中的 HCl-P_i含量相对较低。氮输入提高了两层土壤中的 Residual-P 含量,尤其在 N_{Mt}和 N_{Ht}处理下的亚表层土壤, 其值相比 N_{Nt}处理均显著增加(P < 0.05)(图 3)。整体而言,氮输入增加了土壤闭蓄态磷含量,其在 N_{Lt}、N_{Mt}和 N_{Ht}处理下相比 N_{Nt}处理分别增加了 3.3%、3.9%和 7.0%(表 3)。





2.4 氮输入对湿地土壤全磷含量及其组成的影响

不同氮处理下的土壤 TP 含量整体表现为 N_{Ht}>N_{Lt}>N_{Nt}>N_{Mt}(表 3),除 N_{Mt}与 N_{Nt}处理的 TP 含量相当外, N_{Li}和 N_{Ht}处理的 TP 含量相比 N_{Nt}处理分别增加了 3.5%和 4.4%。另外,除 N_{Lt}处理外,其它处理的 TP 含量均 表现为亚表层>表层(图 4)。表层土壤中的 TP 含量在 N_{Lt}处理下最高,在 N_{Mt}处理下最低;而亚表层土壤中的 TP 含量在 N_{Ht}处理下最高,在 N_{Lt}处理下最低。不同氮处理下,土壤中闭蓄态磷的占比最高(51.8%—54.1%), 中等活性磷(38.1%—41.2%)次之,而活性磷最低(7.0%—7.9%)。其中,活性磷占比在 N_{Ht}处理下最高,中等 活性磷占比在 N_{Lt}处理下最高,而闭蓄态磷占比则在 N_{Mt}处理下最高。不同氮处理下,土壤中各形态磷占 TP





Fig.4 Variations of phosphorus fractions contents and the proportions of phosphorus fractions of different nitrogen import levels

5909

的比例整体以 HCl-P_i、Residual-P、NaOH-P_o和 NaOH-P_i较高, Sonic-P_o和 NaHCO₃-P_i次之, 而 NaHCO₃-P_i、Resin-P和 Sonic-P_i较低(图 4)。相对于表层土壤, 氮输入提高了亚表层土壤中 NaHCO₃-P_o、NaOH-P_i和 HCl-P_i的占比, 其中 HCl-P_i占比的增加最而明显, 增幅介于 2.4%—9.8%; 然而, 氮输入却降低了亚表层土壤中 Resin-P、NaHCO₃-P_i、NaOH-P_o、Sonic-P_o和 Residual-P的占比, 其中 NaOH-P_o占比的降低最为明显, 降幅介于 0.9%—6.5%。 **2.5** 氮输入对湿地土壤磷形态变化的主成分分析

为明确不同氮输入条件下影响湿地土壤不同形态磷含量变化的主要因素,采用主成分分析对影响其赋存的相关因子进行筛选(图5)。结果显示,N_{Nt}处理下提取的两个主成分(PCA1、PCA2)的累计贡献率达87.8%。 其中,PCA1的贡献率为51.9%,可看作是土壤氮养分(NO₃-N)和碳氮比(C/N)的代表;PCA2的贡献率为 35.9%,可看作是土壤磷养分(TP)的代表。Resin-P 与 PCA1存在较强的相关性,而 NaOH-P_i与 PCA2存在较强的相关性。N_L处理下,PCA1和 PCA2的累积贡献率达93.8%。其中,PCA1的贡献率为65.6%,代表了土壤





Fig.5 Principal component analysis for phosphorus fractions and environmental factors in marsh soils of different nitrogen import levels TC:全碳;TN:全氮;C/N:碳氮比;TP:全磷;NO₃⁻-N:硝态氮;NH₄⁺-N:铵态氮;pH:酸碱度;EC:电导率;Moisture:含水量

氮养分(NO_3^-N)和盐分(EC); PCA2 的贡献率为 28.2%, 主要代表了土壤氮养分(NH_4^+-N)。NaHCO₃-P_o和 Sonic-P_i与 PCA1 存在较强的相关性, 而 NaOH-P_o与 PCA2 存在较强的相关性。N_M处理下, PCA1 和 PCA2 的累 积贡献率达 96.2%。其中, PCA1 的贡献率为 69.2%, 可看作是土壤氮养分(NO_3^-N)的代表, PCA2 的贡献率为 27.0%, 主要代表了土壤氮磷养分(NH_4^+-N 、TP)和盐分(EC)条件。Sonic-P_i与 PCA1 存在较强的相关性, 而 HCl-P_i与 PCA2 存在较强的相关性。N_H处理下, PCA1 和 PCA2 的累积贡献率达 99.0%。其中, PCA1 的贡献率为 94.6%, 代表了土壤氮养分(NO_3^-N 、 NH_4^+-N 、TN); PCA2 的贡献率为 4.4%, 主要代表了土壤盐分(EC)和碳氮比 (C/N)。Sonic-P_o、HCl-P_i和 Residual-P 与 PCA1 存在较强的相关性, 而 Sonic-P_i与 PCA2 存在较强的相关性。

3 讨论

3.1 氮输入对湿地土壤 TP 含量分布特征的影响

本研究表明,经过6个月的持续输氮,不同氮处理下湿地土壤TP含量的变化并不明显(P>0.05)。实际 上,现有大部分研究也得到类似结论,即短期氮添加(<3 年)对土壤 TP 含量并无显著影响。然而,少数研究 发现长期氮添加对土壤 TP 含量可产生不同影响。Herbert 在卡尔岛潮汐沼泽的研究中发现,持续 10 年 (1次/年)的氮输入并未对湿地土壤 TP 含量产生显著影响。李宏林对青海海北高寒湿地的研究却发现,持 续3年(1次/年)的氮输入显著降低了蒿草湿地土壤的TP含量(表4)。与已有大多数研究相比,本研究的输 氮时间较短,加之输氮方式为多次持续输入,使得不同处理下每次输氮对地表残体磷分解释放的促进作用较 弱,由此导致土壤 TP 含量的变化并不明显。另外,湿地土壤 P 主要通过岩石风化等作用释放出来参与循环, 仅存在磷化氢(PH₃)气态化合物,整体属于沉积型循环,加之湿地土壤质地粘重,对 P 的吸附能力强,故 P 的 垂直淋溶作用并不明显^[31],而这也是导致不同氮处理下土壤 TP 含量变化不明显的重要原因之一。值得注意 的是,尽管不同氮处理下土壤 TP 含量的变化并不显著,但 N_M处理下的 TP 含量与 N_M相当,而 N_L和 N_H处理 下的 TP 含量相比 N_№处理均呈增加趋势(表 3)。已有研究表明,在氮限制的湿地环境中,一定量的氮输入可 对残体分解产生促进作用,但过高的氮输入可使得这种促进作用减弱^[32]。另外,少量可用性氮的增加可提高 微生物活性,加速残体分解以及 P 养分的归还;但过高的可利用性氮含量又可能会降低微生物活性,抑制残 体分解,导致残体中 P 固持能力的增加,不利于 P 养分的归还^[33-34]。本研究中,导致 N_{LI}处理下的 TP 含量高 于 N_N处理的原因可能与较低的氮输入促进了地表残体分解,进而导致 P 养分归还增加有关。另有研究表 明,一定范围内的氮添加会促进植物生长,加快植物对土壤中养分的吸收;但过高浓度的氮添加则会导致植物 体内养分失衡,进而抑制了植物对土壤中其他营养元素的吸收^[35-37]。本研究中,导致 N_m处理下的 TP 含量 与 N_N处理相差不大的原因极有可能与 N_M处理下地表残体分解释放到土壤中的 P 养分与该处理下植物对土 壤 P 养分的吸收相当有关。随着氮输入量的进一步增加(N_m处理),尽管其对地表残体分解及 P 养分归还的 促进作用可能在减弱,但 N_H处理下芦苇对 P 养分的吸收极有可能受到抑制,由此使得其对 P 的吸收量要低 于 N_m处理,从而导致该处理下土壤中的 TP 含量相对较高。虽然 N_m处理下的残体分解可能受到一定的抑 制,导致其释放到土壤中的养分量降低,但此时土壤中的 P 养分依然处于输入状态。上述原因导致 N_m处理 下的土壤 TP 含量要比 N_№处理高。

本研究还表明,氦输入改变了 TP 含量的土层分布特征,除 N_u处理外,其它处理的 TP 含量均表现为亚表 层>表层。本研究中,芦苇处于生长高峰期,其主要通过分布于表层和亚表层土壤中的根系来大量吸收土壤 中的 P 养分。尽管此间地表残体分解归还的 P 养分亦可能较高,但由于分布于表层的根系对 P 养分的吸收 量可能更高,由此导致表层土壤的 TP 含量相对较低。另有研究发现,当土壤中积累了大量 P 养分时,在降雨 或灌溉量较大时,P 养分会发生淋溶作用^[37-39]。由于本研究的时间为 9 月,降水充沛,故表层土壤中的部分 P 养分也可能被垂直淋溶至亚表层土壤,由此导致亚表层土壤的 TP 含量要高于表层土壤。另外,导致 N_u处 理下表层土壤的 TP 含量高于亚表层土壤的原因还在于,该处理对地表残体分解的促进作用可能更为明显, 由此导致地表残体的 P 养分归还量高于植物根系对表层土壤 P 养分的吸收量。

	Table 4	Comparison for	r the effects ofnitr	ogen enrich	ment on tota	ohospho	rus contents in soils of	different marshes		
研究区域	。 「 」 「 」 「 」 「 」 「 」 」 「 」 」 」 「 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」 」	植被类型	输氮类型 Nitrogen	输氮水 Nitrog	平/(gNm ⁻² gen import le ⁻	: a ⁻¹) vels	输氮时间 Nitrogen import	输氯方式及频次 Nitrogen import	影。	参考文献
Study regions	头坐 Marsnes	v egetations	import types	$\rm N_{L}$	$N_{\rm Mt}$	$\rm N_{\rm Ht}$	periods	patterns and frequency	LITECIS	References
闽江口 Min River estuary	盐沼	芦苇	$\rm NH_4NO_3$	12.5	25	75	2021.04—2021.09	持续输氮(1 次/月)	0	本研究
鄱阳湖 Poyang lake	湖泊湿地	灰化苔草	$CO(NH_2)_2$	5	10	20	2018.02-2018.03		0	[23]
黄河口 Yellow River estuary	盐沼	碱蓬		6	12	18	2014.04—2014.10		0	[]
巴音布鲁克草原 Bayinbruck grassland	高寒湿地	大穂苔草		×		16	2018.10-2019.10		0	[24]
蓝海 Mer Bleue peatland	泥炭沼泽	NA	$\rm NH_4 NO_3$	1.6	3.2	6.4	2000-2005	持续输氮(5次/年)	0	[25]
黄河口 Yellow River estuary	盐沼	芦苇	$CO(NH_2)_2$	5	20	50	2017-2018	单次输氮(1次/年)	0	[26]
三江平原 Sanjiang plain	淡水湿地	小叶章	$\rm NH_4 NO_3$	4	8		2009-2016		0	[27]
瓜纳-托洛马托-马坦萨斯国家河口研究保护区 GTM NERR	盐沼	红树林				142	20122018		0	[28]
卡尔岛 Carr's Island	潮汐沼泽	ND	$CO(NH_2)_2$			50	20042014		0	[29]
青藏高原 Qinghai-Tibetan plateau	高寒湿地	唐 本		5	10		2018-2021		I	[30]
ND:无数据,No Data;0:无显差	皆影响;-:显著降	低								

表 4 氮输入对湿地土壤全磷含量影响的相关对比

http://www.ecologica.cn

14 期

5911

3.2 氮输入对湿地土壤不同磷形态赋存特征的影响

本研究表明,氮输入对不同形态磷含量均产生了不同程度的影响,原因主要与氦输入背景下植物体内氮 含量升高导致氮磷养分失衡,进而促使植物通过增加对土壤中 P 养分的吸收来平衡体内的高氮含量有关^[37]。 尽管不同氮处理下土壤活性磷含量占 TP 的比例均最低(7.0%—7.9%),但其包含的 3 种磷形态(Resin-P、 NaHCO₃-P_i和 NaHCO₃-P_o)却是土壤中有效性最高的 P 组分。本研究中,氦输入整体上提高了土壤活性磷含 量,其在 N_M和 N_H处理下相比 N_M处理分别增加了 6.5%和 12.9%。NaHCO₃态提取磷(NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o)作为土壤中生物有效磷的主要组分,可在 Resin-P 被植物优先吸收利用后,及时转化以补充植物对 P 养分 的生长需求。本研究中,表层和亚表层土壤中 NaHCO₃-P_i含量在 N_M和 N_H处理下均呈先降低后增加的趋势, 而 NaHCO₃-P_o含量在这两个处理下却呈相反变化(图 2)。其中,NaHCO₃-P_o含量变化的原因可能是氮输入改 变了植物对 P 养分的吸收状况。而 N_H处理下 NaHCO₃-P_i、NaHCO₃-P_o含量呈现的相反变化可能有机磷的矿 化有关。有研究显示,在氮添加条件下,植物可从土壤中吸收更多的无机磷,而氮输入可通过加速有机磷的矿 化来补充无机磷的缺失。尤其是在输氮水平较高时,氮输入可促进土壤微生物和植物根系释放更多的磷酸 酶,导致土壤 P 素加速矿化为植物可利用 P^[40]。李银等的研究亦表明,土壤有效磷含量在低氮添加条件下最 高,而在中高氮添加条件下呈降低趋势^[41]。Yang 等的研究还发现,氮输入可加快土壤有机磷的矿化过程,进 而补充土壤中无机磷的不足^[42]。

本研究还表明,不同氮处理下土壤中等活性磷(NaOH-P_i,NaOH-P_o,Sonic-P_i和 Sonic-P_o)占 TP 的比例均 较高(38.1%—41.2%),且N_L处理的中等活性磷含量明显高于N_N处理,而N_M和N_H处理(尤其是N_M)的中等 活性磷含量却低于 N_N处理(表3)。已有研究表明,氮输入可在一定程度上促进了中等活性磷向活性磷的转 化,从而导致中等活性磷含量的降低^[43]。在中等活性磷中,NaOH 提取态磷(NaOH-P₁,NaOH-P₂)是一种易与 土壤中铁、铝化合物结合的 P 组分^[43]。本研究中,不同氮处理下 NaOH 提取态磷含量的占比均较高 (32.4%—34.0%),原因与闽江河口地处亚热带,土壤风化强度大,土壤中的铁、铝及其氧化物的含量较高,进 而导致其含量较高有关^[2]。值得注意的是,与 N_M处理相比, N_L处理下的 NaOH-P_i含量有所增加, 而 N_M和 N_H 处理下的 NaOH-P;含量却骤然下降(表3)。Nu处理下 NaOH-P;含量的增加,一方面与该处理较低的氮输入促 进了地表残体分解及 P 养分释放有关,另一方面也与该处理的氮输入促进了矿化过程中 NaOH-P,向 NaOH-P, 的转化有关。与之相比, N_m和 N_m处理下 NaOH-P_i含量的骤然下降可能与本研究的芦苇处于生长高峰期, 对 P 养分需求量较大,加之较高的氮输入也会导致植物对土壤中无机磷的吸收增加有关。NaOH-P_作为土壤有 效磷的潜在 P 源,虽然不能直接被植物吸收利用,但当植物对 P 养分的需求增加时,其可通过一系列生物、物 理和化学过程转化为植物吸收利用的形态释放到土壤中^[43]。本研究中, NaOH-P。是中等活性磷中含量最高 的 P 组分,其含量整体随氮输入量的增加而升高(表 3)。由于 NaOH-P。是一种可与土壤中腐殖质酸结合的有 机磷,故其与土壤中的微生物存在密切联系。氮添加往往可使得土壤中的微生物生长处于碳限制状态,而持 续氮输入可导致微生物活性下降,进而对 NaOH-P。的矿化过程产生抑制。另外,外源氮输入可导致土壤 pH 降低,使得土壤中的铁铝化合物加快与磷吸附,抑制有机磷矿化的过程^[44]。本研究的湿地土壤为酸性土壤, 在氮输入条件下,其土壤 pH(5.90—6.22)相比对照处理(6.26±0.05)存在一定的降低(表1),而这极有可能对 NaOH-P。向无机磷的转化产生抑制,由此导致其含量相对较高。另外,本研究中氮输入处理下土壤 pH 的下降 亦可导致 Fe³⁺和 Al³⁺的流动性增强,使得其从矿物中加速释放并与活性磷酸盐络合形成沉淀。Turner 等和 DeForest 等的研究均得到类似结论,即土壤无机磷与金属氧化物和金属离子的流动性密切相关^[45-46]。这一 机制也解释了前述 N_m和 N_m处理下 NaOH-P_i含量骤然下降的原因。Sonic-P(Sonic-P_i、Sonic-P_o)主要存在于 土壤矿物或团聚体内,不易被植物直接吸收利用^[43]。其中,Sonic-P,又称土壤团聚体内磷,主要吸附于铁 (Fe)、铝(Al)化合物中^[12]。在本研究中, N_{II}、N_M和 N_H处理下的 Sonic-P_i含量相比 N_N处理均大幅增加, 这可 能与土壤中氮硫磷的耦合作用机制以及 Fe 含量变化有关。前述主成分分析表明, Sonic-P, 与土壤氮养分 (NO₅-N)存在较强的相关性(图 5)。已有研究显示,湿地土壤氮转化过程以及硫氧化-还原过程在氮输入背

景下均会发生显著改变,由此可能直接或间接影响到 P 的迁移与转化^[47-49]。当土壤中的 NO₃ 在微生物作用 下发生异养反硝化期间,可伴随发生低价态 S 氧化形成 SO₄²⁻,导致 FeS₂等稳定金属硫化物中 Fe²⁺的释 放^[47-49];在异养反硝化过程中,NO₂的还原需要大量 Fe²⁺参与^[50],同时 Fe²⁺也会被氧化形成 Fe³⁺,进而导致土 壤中 Fe³⁺含量增加。另有研究显示,氮输入可在一定程度上促进湿地土壤反硝化作用的进行^[51-52]。本研究 中,不同氮处理下土壤中 Sonic-P_i含量的升高可能与氮输入增加了土壤中的 NO₃ 含量以及同步促进反硝化作 用的进行有关,因为其同步导致了土壤 Fe³⁺含量的增加。还有研究发现,氮输入会增加土壤中无定型铁的含 量,而这可促进无机磷的吸附,导致吸附在其表面的无机磷含量增加^[43]。相对于 N_{Ni}处理,其他处理下的 Sonic-P_o含量均呈降低趋势,这可能与氮输入促进了 Sonic-P_o的矿化,从而导致其含量降低有关。虽然 Sonic-P_i不能直接被植物利用,但当活性无机磷被植物大量吸收后,Sonic-P_i作为潜在 P 库可其进行补充^[12]。本研 究中,Sonic-P_i含量的增加以及 Sonic-P_o含量的降低在一定程度上反映了二者之间的转化关系,因为 Sonic-P_i 含量的增加也极有可能与氮输入促进了 Sonic-P_o的矿化过程有关。

本研究亦表明,不同氮处理下土壤中的闭蓄态磷(HCl-P_i、Residual-P)占TP的比例均最高(51.8%— 54.1%),而其包含的两种磷形态均是稳定性较强的P组分,且均不易被植物吸收利用。HCl-P_i为磷石灰型 磷,是一种可与Ca元素结合的无机磷^[7],其在不同氮处理下的含量占比均最高(图4)。由于本研究区频繁受 到潮汐的周期性影响,加之海水中富含大量的Ca²⁺、Mg²⁺离子,由此导致其含量占比较高。本研究中,随着氮 输入量的增加,虽然两种闭蓄态磷含量的变化并不显著(P>0.05),但其可通过解吸、风化和矿化等过程转化 为植物可利用态P,从而发挥着潜在P库的作用^[19]。

4 结论

(1)氮输入不但增加了湿地土壤的 TP 含量,而且亦改变了其土层分布特征。除 N_{M} 与 N_{N} 处理下的 TP 含量相当外, N_{L} 和 N_{H} 处理下的 TP 含量相比 N_{N} 处理分别增加了 3.5%和 4.4%。

(2)氮输入整体上增加了湿地土壤的活性磷和闭蓄态磷含量,但降低了中等活性磷含量。相比 N_M处理, N_M和 N_H处理的活性磷含量分别增加了 6.5%和 12.6%,而 N_L、N_M和 N_H处理的闭蓄态磷含量分别增加了 3.3%、3.9%和 7.0%。中等活性磷在 N_M处理下的降幅尤为明显,其值相比 N_M处理降低了 6.7%。

(3)不同氮处理下湿地土壤以闭蓄态磷占比最高(51.8%—54.1%),中等活性磷次之(38.1%—41.2%), 活性磷最低(7.0—7.9%)。不同处理下各形态磷占比以 HCl-P_i、Residual-P、NaOH-P_o和 NaOH-P_i较高, Sonic-P_o和 NaHCO₃-P_i次之, NaHCO₃-P_o、Resin-P 和 Sonic-P_i较低。

(4)氮输入主要通过改变土壤养分及酸碱状况来进一步影响土壤中各形态磷的赋存。其中,中高氮处理 下活性磷含量的增加主要与 Resin-P 和 NaHCO₃-P_o有关,不同氮处理下闭蓄态磷含量的增加主要与 Residual-P 有关,而中氮处理下中等活性磷的显著降低主要与 NaOH-P_i和 Sonic-P_o有关。

参考文献(References):

- [1] 孙志高,胡星云,师自香,厉彦哲,王晓颖,张鹏飞,童晓雨.闽江河口不同湿地近地气层中H₂S浓度日变化特征.环境科学学报,2022, 42(2):366-373.
- [2] 胡敏杰, 邹芳芳, 仝川, 章文龙, 高灯州. 闽江河口短叶茳芏沼泽湿地沉积物磷的赋存形态和空间分布. 环境科学学报, 2014, 34(11): 2815-2822.
- [3] González-Alcaraz M N, Egea C, Jiménez-Cárceles F J, Párraga I, María-Cervantes A, Delgado M J, Álvarez-Rogel J. Storage of organic carbon, nitrogen and phosphorus in the soil-plant system of *Phragmites australis* stands from a eutrophicated Mediterranean salt marsh. Geoderma, 2012, 185-186, 61-72.
- [4] Ehrenfeld J G. Effects of exotic plant invasions on soil nutrient cycling processes. Ecosystems, 2003, 6(6): 503-523.
- [5] Andrieux-Loyer F, Philippon X, Bally G, Kérouel R, Youenou A, Grand J. Phosphorus dynamics and bioavailability in sediments of the Penzé Estuary (NW France): in relation to annual P-fluxes and occurrences of Alexandrium Minutum. Biogeochemistry, 2008, 88(3): 213-231.

[6]	刘玥,杨继松,于洋,李晓,赵心怡,于君宝,吕振波.辽河口不同类型湿地土壤碳氮磷生态化学计量学特征.生态学杂志,2020,39
[7]	① → 1 → 1 → 2 → 2 → 2 → 2 → 2 → 2 → 2 → 2
[8]	沙梦乔,柴娜,赵洪涛,刘春井,丁文超,谢文霞.互花米草入侵对胶州湾湿地土壤磷赋存形态的影响.环境科学,2021,42(11):
	5414-5423.
[9]	安明梅, 王益鸣, 郑爱榕. 长江口柱状沉积物中磷的存在形态及其分布特征研究. 海洋环境科学, 2018, 37(3): 369-376.
[10]	Wang L L, Ye M, Li Q S, Zou H, Zhou Y S. Phosphorus speciation in wetland sediments of Zhujiang (pearl) river estuary, China. Chinese
[11]	Geographical Science, 2015, 25(5): 574-565. 之嫔而 真仁樹 刘嘻嘻 工士蒂 陈蒂 前日成 五花来黄利得对闹江口浪地上撞涨形太及移放团阶的影响 水土但持受报 2016 20
	女观丽, 同为州, 利哨哨, 工芯泙, 陈亩, 盲外篮. 生化不早入技对四位口碰地上集阱形态及样成风险的影响. 小上床持子报, 2010, 30 (6): 214-219.
[12]	厉彦哲,孙志高,毛立,陈冰冰,胡星云,王晓颖,师自香.闽江河口互花米草不同入侵年限湿地土壤磷赋存形态.应用生态学报,2022, 22(4) 1002 1011
[13]	35(4):1005-1011. 工维本 的从成 轴表棋 众川 人米干扰对闽江河口湿地土壤碟 复 磁什太化学计量学性征的影响 环接科学 2010 31(10)
[13]	工地可,自然盈, 计存候,工川,八天干扰对两江仍口徑地工模碳、氮、磷土芯化于灯重于行值的影响, 外境科子, 2010, 51(10):
[14]	2411-2410. Vu C. R. Lie, V. L. He, N. D. Zhu, I. Y. Chen, Z. Wang, O. F. Dige, S. L. Liu, Y. L. He, H. L. Cue, Y. R. Wen, Z. Li, D. Ding, C. A. Coulding, K.
[14]	Stabilization of atmospheric pitragon denotition in Chine over the past decade Nature Cosscience, 2010, 12(6), 424,420
[15]	Stabilization of autospheric introgen deposition in China over the past decade. Nature Geoscience, 2019, 12(0): 424-429.
[16]	改善, 师百劳, 谢汨尔, 两千千. 用德志达强定于宫上秦时航仍阵神须仍停曲行页间. 师强将手, 2002, 25(2): 7-12.
[17]	「中国時代信息書: 「中国時代主意学院会社版, 2016, (2012-2017), http://www.minus.org.cn/
[1/]	the Min River Ectuary China Watlands 2018
[18]	報告 新聞 Hive Estuary, China: wetlands, 2010. 郑小宏
[10]	水疗法:两正百酉或氮磷百尔盖百重的变化及莆百尔花将血:百百酉或,2010,27(1); 42-40. 张鹏飞 孙士喜 陈冰冰 何法 王化 命琳蒂 李晓 王木 闹江口莒莘与钜叶芸芊穴间扩展对湿地土壤透赋左形太的影响 先太学报
[1)]	1000 40(21).7553.7566
[20]	李叠遠 黄广化 高人 马红亭 音伟 陈什东 杨短木 林捷 郑联瑞 福州 建阪和武夷山大气氛/疏湿沉降蛙征分析 亚执带资源与
[20]	环境学报, 2015, 10(3), 33-40.
[21]	Hedley M L. Stewart I W B. Chauhan B S. Changes in inorganic and organic soil phosphorus fractions induced by cultivation practices and by
[=-]	laboratory Incubations1. Soil Science Society of America Journal. 1982. 46(5) · 970-976.
[22]	Maranguit D. Guillaume T. Kuzvakov Y. Land-use change affects phosphorus fractions in highly weathered tropical soils. CATENA, 2017, 149.
	385-393.
[23]	文旻, 胡启武, 阳文静, 吴琴, 尧波. 氮、磷添加对鄱阳湖典型苔草湿地土壤养分和植物生物量的影响. 生态学杂志, 2021, 40(6):
	1669-1676.
[24]	胡洋, 丛孟菲, 陈末, 侯天钰, 愚广灵, 买迪努尔・阿不来孜, 朱新萍, 贾宏涛. 氮添加对巴音布鲁克高寒湿地土壤无机磷形态的影响.
	水土保持学报, 2022, 36(3): 252-258.
[25]	Pinsonneault A J, Moore T R, Roulet N T. Effects of long-term fertilization on peat stoichiometry and associated microbial enzyme activity in an
	ombrotrophic bog. Biogeochemistry, 2016, 129(1-2): 149-164.
[26]	赵连军. 氮添加对黄河三角洲高潮滩芦苇生长的影响[D]. 烟台: 鲁东大学, 2021.
[27]	张荣涛. 三江平原湿地植物和微生物多样性对氮沉降的响应及对温室气体排放影响[D]. 哈尔滨:哈尔滨师范大学, 2020.
[28]	Simpson L T, Lovelock C E, Cherry J A, Feller I C. Short-lived effects of nutrient enrichment on Avicennia germinans decomposition in a saltmarsh-
	mangrove ecotone. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2020, 235: 106598.
[29]	Herbert E R, Schubauer-Berigan J P, Craft C B. Effects of 10 yr of nitrogen and phosphorus fertilization on carbon and nutrient cycling in a tidal
	freshwater marsh. Limnology and Oceanography, 2020, N/A: 1-19.
[30]	李宏林, 胡竞格, 肖锋, 梁德飞, 周华坤. 生长季封育和氮添加对退化高寒沼泽湿地土壤水分状况的影响. 草地学报, 2021, 29(11): 2523-2529.
[31]	屈凡柱.黄河三角洲滨海芦苇湿地磷的生物地球化学过程[D].烟台:中国科学院大学,2014.
[32]	李小玲,周建山,牟利,王涵,卜贵军,吴林.模拟氮沉降对鄂西南亚高山湿地泥炭藓(Sphagnum)调落物分解的影响.应用与环境生物
	学报, 2021, 27(4): 916-922.
[33]	Block C E, Knoepp J D, Fraterrigo J M. Interactive effects of disturbance and nitrogen availability on phosphorus dynamics of southern Appalachian
	forests. Biogeochemistry, 2012, 112(1-3): 329-342.

[34] 王丽霞,郭宏宇,霍玉珠,庞金玲,王欢欢,马成仓,王银华. 增温和增氮对天津滨海湿地芦苇凋落物分解微生物群落组成和多样性的

影响. 天津师范大学学报: 自然科学版, 2022, 42(1): 37-44.

- [35] 赵静. 模拟氮沉降对长白山苔原带灌草混合群落优势种生长特征的影响[D]. 长春:东北师范大学, 2021.
- [36] Chen G T, Tu L H, Peng Y, Hu H L, Hu T X, Xu Z F, Liu L, Tang Y. Effect of nitrogen additions on root morphology and chemistry in a subtropical bamboo forest. Plant and Soil, 2016, 412(1-2): 441-451.
- [37] 习斌, 翟丽梅, 刘申, 刘宏斌, 杨波, 任天志. 有机无机肥配施对玉米产量及土壤氮磷淋溶的影响. 植物营养与肥料学报, 2015, 21(2): 326-335.
- [38] 项大力,杨学云,孙本华,张树兰,古巧珍.灌溉水平对土壤磷素淋失的影响.植物营养与肥料学报,2010,16(1):112-117.
- [39] Mayor J R, Wright S J, Schuur E A G, Brooks M E, Turner B L. Stable nitrogen isotope patterns of trees and soils altered by long-term nitrogen and phosphorus addition to a lowland tropical rainforest. Biogeochemistry, 2014, 119(1-3): 293-306.
- [40] Mirabello M J, Yavitt J B, Garcia M, Harms K E, Turner B L, Wright S J. Soil phosphorus responses to chronic nutrient fertilisation and seasonal drought in a humid lowland forest, Panama. Soil Research, 2013, 51(3): 215-221.
- [41] 李银,曾曙才,黄文娟. 模拟氮沉降对鼎湖山森林土壤酸性磷酸单酯酶活性和有效磷含量的影响. 应用生态学报, 2011, 22(3): 631-636.
- [42] Yang K, Zhu J J, Gu J C, Yu L Z, Wang Z Q. Changes in soil phosphorus fractions after 9 years of continuous nitrogen addition in a *Larix gmelinii* plantation. Annals of Forest Science, 2015, 72(4): 435-442.
- [43] 范跃新. 氮沉降对中亚热带米槠天然林土壤磷组分的影响及其调控机理[D]. 福州: 福建师范大学, 2019.
- [44] 陈美领,陈浩,毛庆功,朱晓敏,莫江明. 氮沉降对森林土壤磷循环的影响. 生态学报, 2016, 36(16): 4965-4976.
- [45] Turner B L, Mahieu N, Condron L M. The phosphorus composition of temperate pasture soils determined by NaOH-EDTA extraction and solution ³¹ P NMR spectroscopy. Organic Geochemistry, 2003, 34(8): 1199-1210.
- [46] DeForest J L, Scott L G. Available organic soil phosphorus has an important influence on microbial community composition. Soil Science Society of America Journal, 2010, 74(6): 2059-2066.
- [47] 毛立, 孙志高, 陈冰冰, 胡星云, 武慧慧. 湿地土壤硫氧化-还原过程及其与其他元素的耦合作用研究进展. 应用生态学报, 2022, 33 (2): 560-568.
- [48] Wu S J, Zhao Y P, Chen Y Y, Dong X M, Wang M Y, Wang G X. Sulfur cycling in freshwater sediments: a cryptic driving force of iron deposition and phosphorus mobilization. Science of the Total Environment, 2019, 657(MAR.20), 1294-1303.
- [49] Guan L C, Xia Z Y, Jin L L, Xu Y W, He Y. Influence of sulfate reduction on fraction and regeneration of phosphorus at sediment-water interface of urban malodorous river. Environmental Science and Pollution Research, 2020, 28(9), 11540-11548.
- [50] 高灯州. 长江口潮滩湿地土壤氧化亚氮排放及其影响机制[D]. 上海: 华东师范大学, 2020.
- [51] 刘晴晴,曾从盛,张林海,高灯州. 氮输入条件下闽江河口沼泽土壤的反硝化速率. 湿地科学, 2016, 14(3): 361-367.
- [52] 牟晓杰, 刘兴土, 仝川, 孙志高. 闽江河口短叶茳芏湿地 CH4和 N20 排放对氮输入的短期响应. 环境科学, 2012, 33(7): 2482-2489.