

DOI: 10.20103/j.stxb.202308301871

许佳宁, 李玲玉, 谢文霞, 张嘉乐, 丁文超. 外源氮输入对黄河三角洲盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 通量特征的影响. 生态学报, 2024, 44(10): 4388-4399.

Xu J N, Li L Y, Xie W X, Zhang J L, Ding W C. Effects of exogenous nitrogen input on CHCl_3 and CHBr_3 flux characteristics of *Suaeda glauca* in the Yellow River Delta. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(10): 4388-4399.

外源氮输入对黄河三角洲盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 通量特征的影响

许佳宁, 李玲玉, 谢文霞*, 张嘉乐, 丁文超

青岛大学环境科学与工程学院, 青岛 266071

摘要: 氯仿(CHCl_3)和溴仿(CHBr_3)是两种重要的挥发性卤代烃(Volatile halohydrocarbon, VHCs), 可通过光化学作用, 引起臭氧层破坏和温室效应, 影响全球气候变化。以黄河三角洲湿地的优势物种—盐地碱蓬(*Suaeda glauca*)为研究对象, 采用室内盆栽培养来探究不同浓度氮输入水平(CK, 对照, $6.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 1.5N0, 低氮处理, $9.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 3.0N0, 高氮处理, $18.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)对盐地碱蓬以及盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 通量特征的影响。结果表明, 不同氮梯度下盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 排放通量均呈现出先降后升的趋势, 低浓度 1.5N0 下可以促进盐地碱蓬 CHCl_3 的释放, 高浓度 3.0N0 则抑制; 盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 气体通量的峰值分别出现在枯萎期与苗期, 其主要原因是不同氮梯度刺激了气体消耗与产生之间的平衡以及植物各生长期生长因子的改变。由相关性分析可知, 盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量受多种因子相互作用, 植物根长与 CHBr_3 排放之间存在显著相关性, 根部越长, CHBr_3 的排放通量越低。不同氮梯度下盆栽微生态系统内 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量的变化趋势不同, CHCl_3 通量为先升后降, CHBr_3 为先降后升, 气体通量的最高值与最低值出现在植物不同生长时期, 盆栽微生态系统气体排放通量主要受土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 、 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 、以及植物凋落物等交互作用的影响。

关键词: 外源氮输入; 挥发性卤代烃; 盐地碱蓬; 盆栽微生态系统; 通量特征

Effects of exogenous nitrogen input on CHCl_3 and CHBr_3 flux characteristics of *Suaeda glauca* in the Yellow River Delta

XU Jianing, LI Lingyu, XIE Wenxia*, ZHANG Jiale, DING Wenchao

College of Environmental Science and Engineering, Qingdao University, Qingdao 266071, China

Abstract: Chloroform (CHCl_3) and bromoform (CHBr_3), two important volatile halogenated hydrocarbons (VHCs), are trace greenhouse gases and ozone-destroying substances that play an important role in global climate change. In this paper, *Suaeda glauca*, a dominant species in the Yellow River Delta, was subjected to pot experiments to investigate the effects of different nitrogen additions (CK, control, $6.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 1.5N0, low nitrogen treatment, $9.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$; 3.0N0, high nitrogen treatment, $18.0 \text{ g N m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) on its and its microecological CHCl_3 and CHBr_3 flux characteristics. The results showed that CHCl_3 and CHBr_3 fluxes decreased first and then increased at different nitrogen gradients. CHCl_3 release was promoted at low concentration of 1.5N0, but inhibited at high concentration of 3.0N0. The peaks of gas fluxes of CHCl_3 and CHBr_3 in *Suaeda glauca* appeared during its withering and seedling stages, respectively. The main reason was that nitrogen addition stimulated the balance between gas consumption and production, as well as changed in growth factors during

基金项目: 山东省自然科学基金面上项目 (ZR2020MD073); 崂山实验室科技创新项目 (LSKJ202203206); 国家重点研发项目子课题 (2022YFC3104202); 福建省海洋物理与地质过程重点实验室开放基金 (KLMPG-23-06)

收稿日期: 2023-08-30; **网络出版日期:** 2024-02-28

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: xwx080312@163.com

different growth stages of plants. According to the correlation analysis, the CHCl_3 flux of *Suaeda glauca* was affected by the interaction of many factors. There was a significant correlation between the root length of the plant and the CHBr_3 . The longer the root, the lower the CHBr_3 . There were different change trends of CHCl_3 and CHBr_3 in the potted micro-ecosystem under different nitrogen gradients. CHCl_3 increased first and then decreased, while CHBr_3 decreased first and then increased. The highest and lowest values of gas fluxes appeared in different growing plants period. The gas flux of the potted micro-ecosystem was mainly affected by the interaction of soil $\text{NH}_4^+\text{-N}$, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ and plant litter.

Key Words: exogenous nitrogen input; volatile halohydrocarbons; *Suaeda glauca*; potted micro-ecosystem; flux characteristics

当前,全球气候变化对生态环境和人类健康构成严重威胁。挥发性卤代烃(Volatile halohydrocarbon, VHCs)作为大气中一类重要的温室气体和主要的臭氧层破坏者,对全球气候变化产生重要影响^[1]。氯仿(CHCl_3)和溴仿(CHBr_3)是 VHCs 中简单的一类化合物,在太阳光的照射下, CHCl_3 和 CHBr_3 可发生光化学反应产生 Cl、Br 自由基,自由基可以消耗大气中的 OH、 O_3 ,造成臭氧层破坏^[2]。此外,这些卤素自由基还能通过与多种温室气体的化学反应,造成大气中 CH_4 、 N_2O 等浓度的改变,对全球气候变化产生直接或间接的影响^[3]。 CHCl_3 和 CHBr_3 的主要来源包括人为源和自然源,自然源主要包括海洋^[4]、盐沼^[5]、陆生植物^[6]、真菌^[7]、以及藻类^[8-9]等,自 1987 年的《关于消耗臭氧层物质的蒙特利尔议定书》及其修正案实施以来,人为源逐渐被淘汰,而 CHCl_3 也成为继 CH_3Cl 后大气中第二大天然氯的来源,同时含 Br 的 VHCs 所导致的臭氧损失占短寿命挥发性卤代的 87%^[10]。

滨海湿地是一种介于陆地生态系统与海洋生态系统之间的特殊生态系统^[11],是重要的生态过渡带和缓冲带^[12]。滨海湿地具有很高的初级生产力以及丰富的有机质含量,同时海水中富含的卤素离子会随着潮流被带入湿地^[13]。丰富的有机碳以及较高的游离卤素和生物活性能够为 CHCl_3 和 CHBr_3 的合成和相互转化提供物质基础^[14]。另外,盐生植物是影响滨海湿地部分 VHCs 释放的重要影响因子^[6,15],相关研究已经证明,盐沼植物具有生产甲基卤化物的内在能力。目前,瓣鳞花科、十字花科和藜木科等盐生植被均被证实具有较强的卤甲烷生成能力。盐地碱蓬(*Suaeda glauca*)是一种在海滨和荒地等含盐碱土中广泛分布的一年生盐生草本植物^[16],是黄河三角洲滨海湿地的典型植物群落优势种,其分布面积占到黄河三角洲湿地总面积比例的 27.9%^[17-18]。

氮元素是组成蛋白质和叶绿素的主要成分^[19],在生态系统碳循环过程中扮演着非常重要的角色^[20]。由于人类活动的影响,大量的活性氮通过干湿沉降的方式进入滨海湿地中,这些外源氮的输入可能会改变土壤有机质等理化性质,一些有机质在被电子受体氧化时可以被卤素离子烷基化,产生甲基卤化物^[21],同时这些氮素可能影响盐生植被生长,改变植物生物量,这些都是可能影响 VHCs 排放的潜在因素。被称为“三大滨海蓝碳生态系统”之一的滨海盐沼,能够捕获和储存大量的碳,具有极高的固碳效率。当前,在响应国家“碳达峰,碳中和”的背景下,关于外源氮输入水平与植物 CH_4 、 CO_2 等排放方面的研究已经受到广泛关注,但研究对象多集中在嵩草等草甸植物^[22-24]、短叶荇菜^[25-26]、芦苇^[27]等,鲜有研究探讨氮输入水平对滨海盐沼典型植被盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 排放的影响。

黄河三角洲盐沼位于高氮沉降区的华北平原,其大气氮沉降平均值是全国平均值的 3 倍多,约为 $28.0 \text{ kg N hm}^{-2} \text{ a}^{-1}$ ^[28],在黄河河口与渤海的相互作用下,承接来自于大气和地面氮源的双重影响,同时其含量丰富的底物有较大产生 VHCs 的潜力。盐地碱蓬作为黄河口湿地分布最为广泛的盐生植被,其分布面积在黄河三角洲湿地总面积的占比较大。因此,本试验选取黄河三角洲入湾口典型植被盐地碱蓬为研究对象,通过室内盆栽—静态箱法研究外源氮输入水平对典型盐沼植物盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 通量特征的影响,该研究可进一步了解滨海湿地盐沼植物对环境的影响,可为合理预测全球 VHCs 变化提供一定的基础数据和理论依据,并

在应对气候变化方面发挥积极的作用。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河三角洲 (37° 34'—38° 09' N, 118° 31'—119° 18' E) 位于我国鲁西北平原东缘黄河入海口处, 北临渤海湾, 南靠莱州湾, 属北温带半湿润大陆性季风气候, 年均温 11.7—12.6 °C, 年均降水量 530—630 mm, 年均蒸发量 750—2400 mm, 光照充足、四季分明。黄河口湿地在黄河河口与渤海相互作用下形成, 承接大量的外源氮输入, 是最具特殊性的河口湿地之一。土壤类型主要为隐域性潮土和盐土, 主要植被类型以盐生植物和水生植物为主, 优势植物为芦苇、怪柳、盐地碱蓬以及互花米草。

1.2 样品采集

室内培养预试验以及盐地碱蓬盆栽培养试验所用土样均取自黄河口湿地北岸区域。沿着自海向陆方向, 设置盐地碱蓬采样区。利用洛阳铲在采样区内采集 0—20 cm 深度的盐地碱蓬土壤样品。试验于青岛大学环境科学与工程学院湿地生态与环境研究中心实验室内进行。将土壤进行 20 d 左右的预培养待用。

1.3 盐地碱蓬培育

2022 年 2 月至 3 月进行材料的准备工作, 4 月开始盐地碱蓬的培育预试验。前期进行出芽培育, 出芽之后的盐地碱蓬幼苗需在一周内转移到花盆中。花盆直径为 24 cm, 高为 22 cm, 底为 17 cm。经过前期的出芽培育、幼苗移盆, 待盐地碱蓬幼苗在花盆内生长到株高 10 cm 左右时, 将大棵株或过密的植株拔出, 使得花盆内的盐地碱蓬长势均衡, 株数适宜。

综合考虑黄河三角洲氮输入水平、陆源氮输入水平 (2.5—3.5 g N m⁻² a⁻¹) 以及大气氮沉降 (3.0—4.5 g N m⁻² a⁻¹) 的综合影响^[29], 设置三个不同的施氮水平: 对照 CK (6.0 g N m⁻² a⁻¹)、低氮处理 1.5N0 (9.0 g N m⁻² a⁻¹)、高氮处理 3.0N0 (18.0 g N m⁻² a⁻¹), 选择尿素 (CH₄N₂O) 为氮素, 每种处理各设置三个平行, 同时设置相同浓度氮处理条件但无盐地碱蓬种植的土壤盆。从 2022 年 5 月开始至盐地碱蓬的生长后期 8 月, 在每月中旬施加氮, 将各花盆每次所需的氮素溶解在 200 mL 的水中, 均匀喷撒在盐地碱蓬根部与土壤相接处。分别在盐地碱蓬的苗期 (6 月 20 号)、生长期 (8 月 10 号)、结实初期 (9 月 15 号)、结实后期 (10 月 16 号) 以及枯萎期 (11 月 25 号) 进行气体样品的采集, 同时采集对照土壤盆的气体样品, 利用两组数据得到盐地碱蓬 CHCl₃ 和 CHBr₃ 排放通量。试验为期 7 个月, 过程中定期记录盐地碱蓬株高、根长, 整株鲜重, 叶、茎、根以及整株干重等生长指标。

1.4 气体采集

本试验通过静态箱法对盐地碱蓬进行了气体样品的采集。采样装置由采气罩和底座两部分组成, 其中采气罩由高 30 cm, 内径为 32 cm, 厚为 5 mm 的有机玻璃桶制成, 箱体顶部设有 0.5 cm 孔径的电源接线孔, 箱内顶部安有一个搅拌小风扇, 用于均匀箱内的空气, 箱体侧面设有取气孔, 距离顶部 10 cm。

1.5 样品分析

根据标准对样品土壤进行分析: pH、盐度 (电位法)、Cl⁻ (硝酸银滴定法)、NH₄⁺-N (靛酚蓝比色法)、NO₃⁻-N (紫外分光光度法)、土壤有机碳 SOC (低温外加重铬酸钾氧化-比色法)、溶解性有机碳 DOC (焦磷酸钠测定)。采用吹扫-捕集气相色谱法测定 VHCs, 使用气-质联用仪 (GC-MS; 安捷伦 7890A-5975C) 对采集的气体样品进行测定。同时随机选取 3 株盐地碱蓬, 洗净擦干后记录株高、根长、鲜重等指标, 之后在 70 °C 条件下烘干 72 h 后记录干重。

1.6 数据处理及分析

CHCl₃ 和 CHBr₃ 排放通量采用下式进行计算:

$$F = \frac{\rho_0 V}{M A} \frac{273}{273 + T} \frac{dc}{dt} \quad (1)$$

式中: F 为气体排放通量 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), ρ_0 为标准状态下气体密度 ($\text{CHCl}_3 = 2.254 \text{ kg/m}^3$, $\text{CHBr}_3 = 4.238 \text{ kg/m}^3$), V 和 A 分别代表静态箱体的容积 (m^3) 和截面面积 (m^2), T 为箱内温度, dc/dt 为单位时间箱体内容度浓度的变化率, 使用线性拟合气体摩尔浓度随采样时间的变化, 相关系数的平方至少大于 0.9。

盐地碱蓬湿地的排放通量采用下式计算:

$$F_a' = F_{SA,a} - F_{BF,a} \quad (2)$$

式中: F_a' 表示盐地碱蓬的排放通量 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); $F_{SA,a}$ 为盐地碱蓬盆栽微生态系统排放通量 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); $F_{BF,a}$ 为无盐地碱蓬种植的土壤对照组排放通量 ($\text{mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), a 代表不同盐地碱蓬生长期。

运用 Pearson 相关性分析来检测气体通量和环境因素间的相关性, 运用 Origin pro 2021 对数据进行绘图并进行统计分析。

2 结果与分析

2.1 盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量及生长阶段特征

图 1 所示, 在三组不同梯度的氮处理组中, 对照组 CK 盐地碱蓬 CHCl_3 通量范围为 $-1.89 \sim 5.52 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 平均值为 $0.87 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$; 低氮处理 1.5N0 组 CHCl_3 通量范围为 $-0.05 \sim 4.26 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 平均值为 $1.00 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$; 高氮处理 3.0N0 组 CHCl_3 通量范围为 $-1.81 \sim 5.17 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 平均值为 $0.40 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ (三组处理中异常值未显示)。 CHCl_3 的排放通量在低氮 1.5N0 组中最高, 高氮 3.0N0 中最低, 可知低浓度外源氮的添加可促进 CHCl_3 的释放, 但当氮浓度过高时, 则会起抑制作用, 但不同氮处理下 CHCl_3 排放通量变化不显著 ($P > 0.05$)。

通过对不同氮处理组盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量的测定可知, 盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量具有明显的生长期变化。从图 1 中可知, 不同氮处理组盐地碱蓬的 CHCl_3 排放通量最高值均在枯萎期观测到。最低值出现时期略有不同, 高氮处理 3.0N0 组及低氮处理 1.5N0 组的盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量最低值在结实后期观测到, 而对照 CK 组的盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量最低值在结实初期观测到。三组处理中 CHCl_3 排放通量均呈现出不同程度的先降后升的趋势, 枯萎期气体通量变化与其他时期差异显著 ($P < 0.05$)。

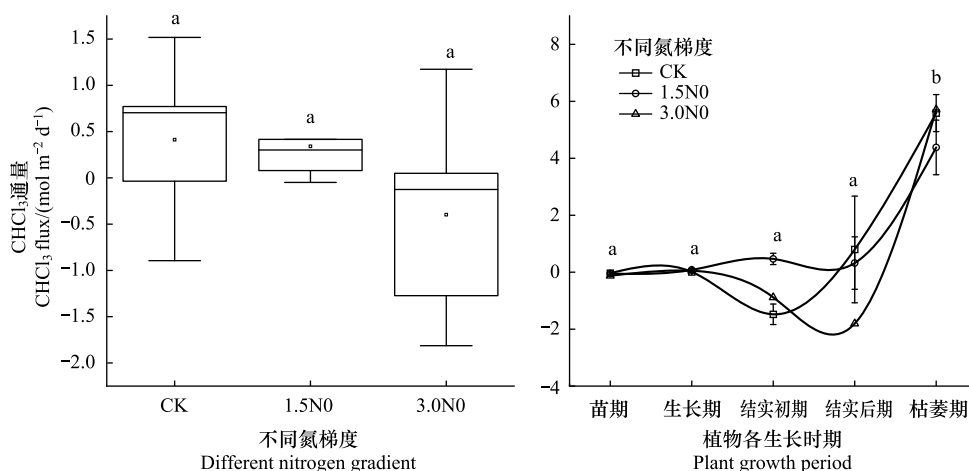


图 1 不同氮处理组盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量及生长阶段变化

Fig.1 CHCl_3 emission flux and growth stage changes of *Suaeda glauca* in different nitrogen treatment groups

箱线图中箱体表示 25%—75% 数据范围, 上下线表示 1.5 倍数据范围, 实线表示中位线, 空心方点代表平均值, 实心方点代表异常值; 各图中相同字母代表差异不显著 ($P > 0.05$), 不同字母代表差异显著 ($P < 0.05$)

如图 2 所示对照组 CK 盐地碱蓬 CHBr_3 通量范围为 $0.0052 \sim 0.0179 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$, 平均值为 $0.0118 \text{ mol m}^{-2}$

d^{-1} ; 低氮处理 1.5N0 组 CHBr_3 通量范围为 $-0.0087 \sim 0.0237 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $0.0040 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 高氮处理 3.0N0 组 CHCl_3 通量范围为 $-0.0057 \sim 0.0276 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $0.0101 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。 CHBr_3 的排放通量整体低于 CHCl_3 , 与 CK 相比, 外源氮的输入会抑制 CHBr_3 的排放, 两种梯度下抑制效果都较为显著, 且在低氮浓度时更为显著。

通过对不同氮处理组盐地碱蓬 CHBr_3 排放通量的测定可知, 盐地碱蓬 CHBr_3 排放通量具有明显的生长期变化。由图 2 可知, 不同处理组盐地碱蓬 CHBr_3 排放的峰值出现的生长时期有所不同, 中氮处理 1.5N0 组 CHBr_3 的最高值在苗期观测到, 其他处理组最高值则在枯萎期观测到, 高氮 3.0N0 处理组以及 CK 组气体排放通量的最低值出现在生长期, 中氮处理 1.5N0 组的最低值出现在结实后期。与 CHCl_3 不同, 不同处理组盐地碱蓬 CHBr_3 通量在整个植物生长期均呈“W”字型的变化趋势, 三组处理中苗期 CHBr_3 排放通量均高于枯萎期, 但是生长期和结实后期 CHBr_3 排放通量却低于枯萎期, 苗期气体通量与其他时期相比差异最为显著 ($P < 0.05$)。

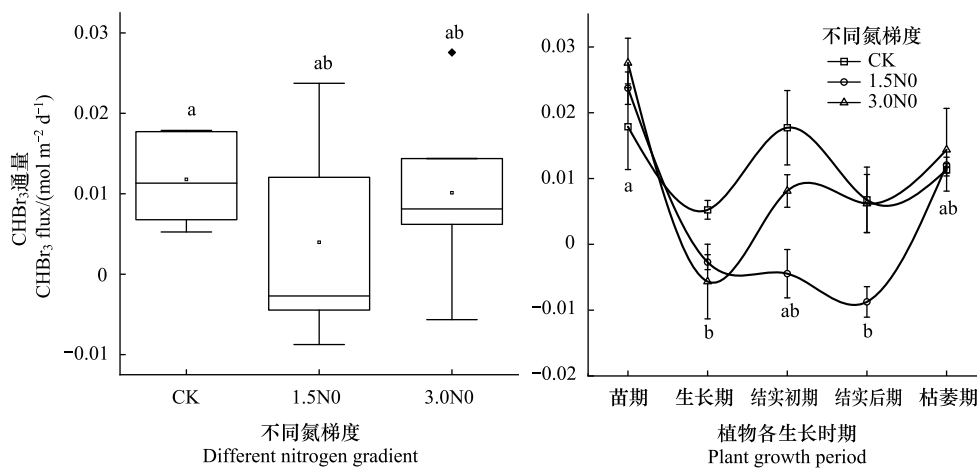


图 2 不同氮处理组盐地碱蓬 CHBr_3 排放通量及生长阶段变化

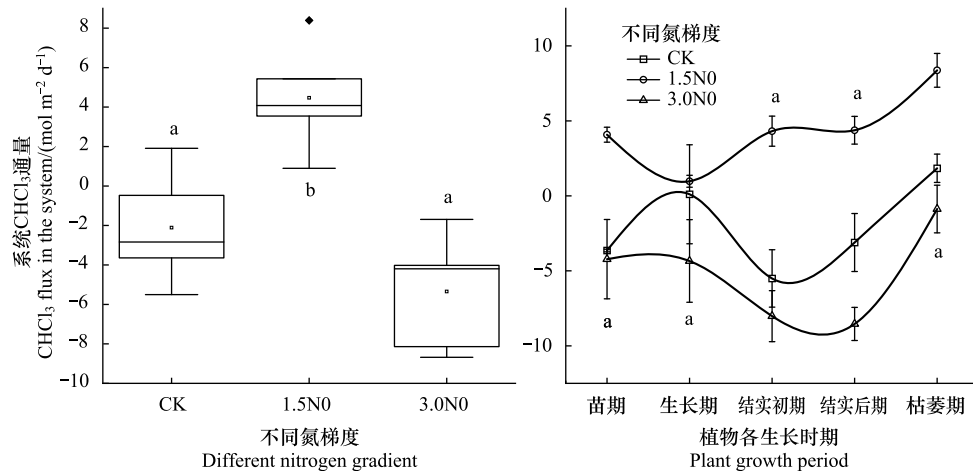
Fig.2 CHBr_3 emission flux and growth stage changes of *Suaeda glauca* in different nitrogen treatment groups

2.2 盐地碱蓬盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量及生长阶段特征

图 3 所示, 在整个采样期间, 对照组 CK 盆栽微生态系统 CHCl_3 通量范围为 $-5.50 \sim 1.91 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $-2.11 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 低氮处理 1.5N0 组 CHCl_3 通量范围为 $0.90 \sim 8.39 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $4.47 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 高氮处理 3.0N0 组 CHCl_3 通量范围为 $-8.68 \sim -1.69 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $-5.34 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, CK 与高氮时表现为吸收, 低氮时 CHCl_3 整体表现为释放。外源氮的输入可以改变 CHCl_3 的排放模式, 当氮浓度较低时, 盆栽微生态系统的源汇特征发生变化, CK 处理组由 CHCl_3 的“汇”变为“源”, 且影响效果较为显著 ($P < 0.05$), 随着氮浓度的升高, 系统又由“源”变为“汇”, 且高浓度的氮输入水平可以增强系统对 CHCl_3 排放的抑制作用。

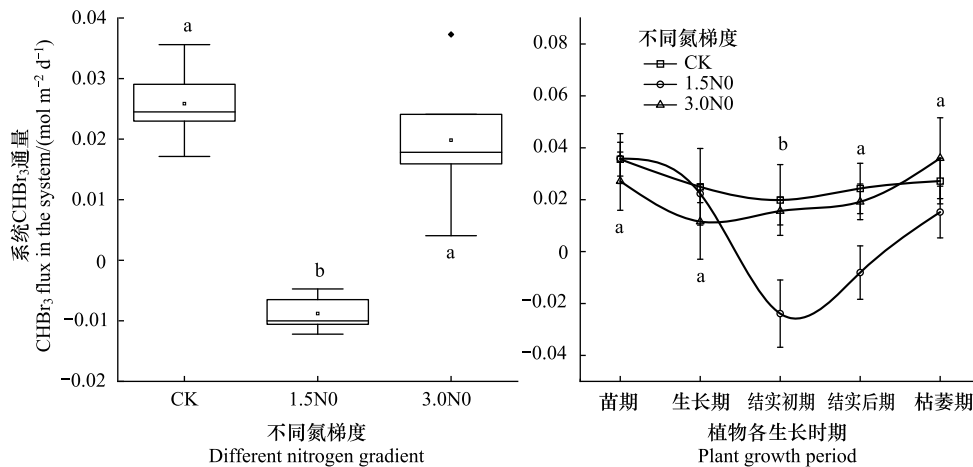
通过对不同氮处理组盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量的测定可知 (图 3), 盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量具有明显的生长期的变化。整个采样期间, 不同氮处理组盆栽微生态系统的 CHCl_3 排放通量最高值均在枯萎期观测到; 最低值出现时期各不相同, 对照组 CK 盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量最低值在结实初期观测到, 低氮处理 1.5N0 组 CHCl_3 排放通量最低值在生长期观测到, 高氮处理 3.0N0 组 CHCl_3 排放通量最低值在结实后期观测到。整体上, 对照组 CK 和高氮处理 3.0N0 组均呈现出先升后降的趋势, 而低氮处理 1.5N0 组整体呈先降后升的趋势, 各时期系统气体排放通量之间差异不大 ($P > 0.05$)。

图 4 所示, 在整个采样期间, 对照组 CK 盆栽微生态系统 CHBr_3 通量范围为 $0.0171 \sim 0.0356 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $0.0259 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 低氮处理 1.5N0 组 CHBr_3 通量范围为 $-0.0122 \sim 0.0100 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $-0.0048 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$; 高氮处理 3.0N0 组 CHBr_3 通量范围为 $0.0041 \sim 0.0373 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$, 平均值为 $0.0198 \text{ mol m}^{-2} \text{ d}^{-1}$ 。低氮时 CHBr_3 整体表现为吸收, CK 和高氮时表现为释放。表明外源氮的输入可以改变 CHBr_3 的排

图3 不同氮处理组盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量及生长阶段变化Fig.3 CHCl_3 emission flux and growth stage changes of potted micro-ecosystem in different nitrogen treatment groups

放模式, CHBr_3 排放通量则会随着低浓度外源氮的输入而降低, 系统由 CHBr_3 的“源”变为“汇”; 当外源氮浓度升高时, 又重新变为 CHBr_3 的“源”, 但此时排放通量仍低于 CK 组, 因此外源氮的输入总体上会抑制 CHBr_3 的排放, 且这种抑制效果会随着氮浓度的升高而逐渐减弱 ($P < 0.05$)。

在植物生长期 (图 4), 低氮处理 1.5N0 组以及对照 CK 处理组盆栽微生态系统的 CHBr_3 排放通量最高值均在苗期观测到, 高氮处理 3.0N0 组的 CHBr_3 排放通量最高值在枯萎期观测到, 最高值各不相同; 对照 CK 和低氮处理 1.5N0 处理组盆栽微生态系统 CHBr_3 排放通量最低值在结实初期观测到, 高氮处理 3.0N0 组 CHBr_3 排放通量最低值在生长期观测到。整体上, 三组不同氮浓度处理组均呈现出先降低后升高的趋势, 植物生长的结实初期系统的气体通量显著差异与其他时期 ($P < 0.05$)。

图4 不同氮处理组盆栽微生态系统 CHBr_3 排放通量及生长阶段变化Fig.4 CHBr_3 emission flux and growth stage changes of potted micro-ecosystem in different nitrogen treatment groups

2.3 盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量与植物生长因子主成分分析

由盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量与植物生长因子主成分分析可知 (图 5), 1.5N0 下所提取的两个主成分为 PC1 和 PC2, 其总贡献率为 96.5%。其中, PC1 贡献率为 78.3%, 可看作 RL、RDW、WPDW、LDW、SDW 的代表, PC2 贡献率为 18.2%, 主要代表了 SH; 3.0N0 下所提取的两个主成分为 PC1 和 PC2 的总贡献率为 94.7%, 其中 PC1 贡献率为 80.1%, 可看作 RL、RDW、S/R、WPDW、LDW 的代表, PC2 贡献率为 14.6%, 可看作 SH 的代表。可知不同处理组盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量主要与植物各部分生物量之间关系密切。对于 CHBr_3 而言,

1.5N0下所提取的两个主成分为PC1和PC2,其总贡献率为90.8%,PC1贡献率为80.6%,可看作RL、WPDW、LDW、SDW的代表,PC2贡献率为10.2%,主要代表了SH;3.0N0下所提取的两个主成分为PC1和PC2的总贡献率为93.9%,其中PC1贡献率为80.7%,可看作RDW、S/R、WPDW、WPFW、LDW的代表,PC2贡献率为13.2%,可看作RL的代表,可知RL以及LDW、RDW、S/R、WPDW是影响植物 CHBr_3 通量的重要因素。

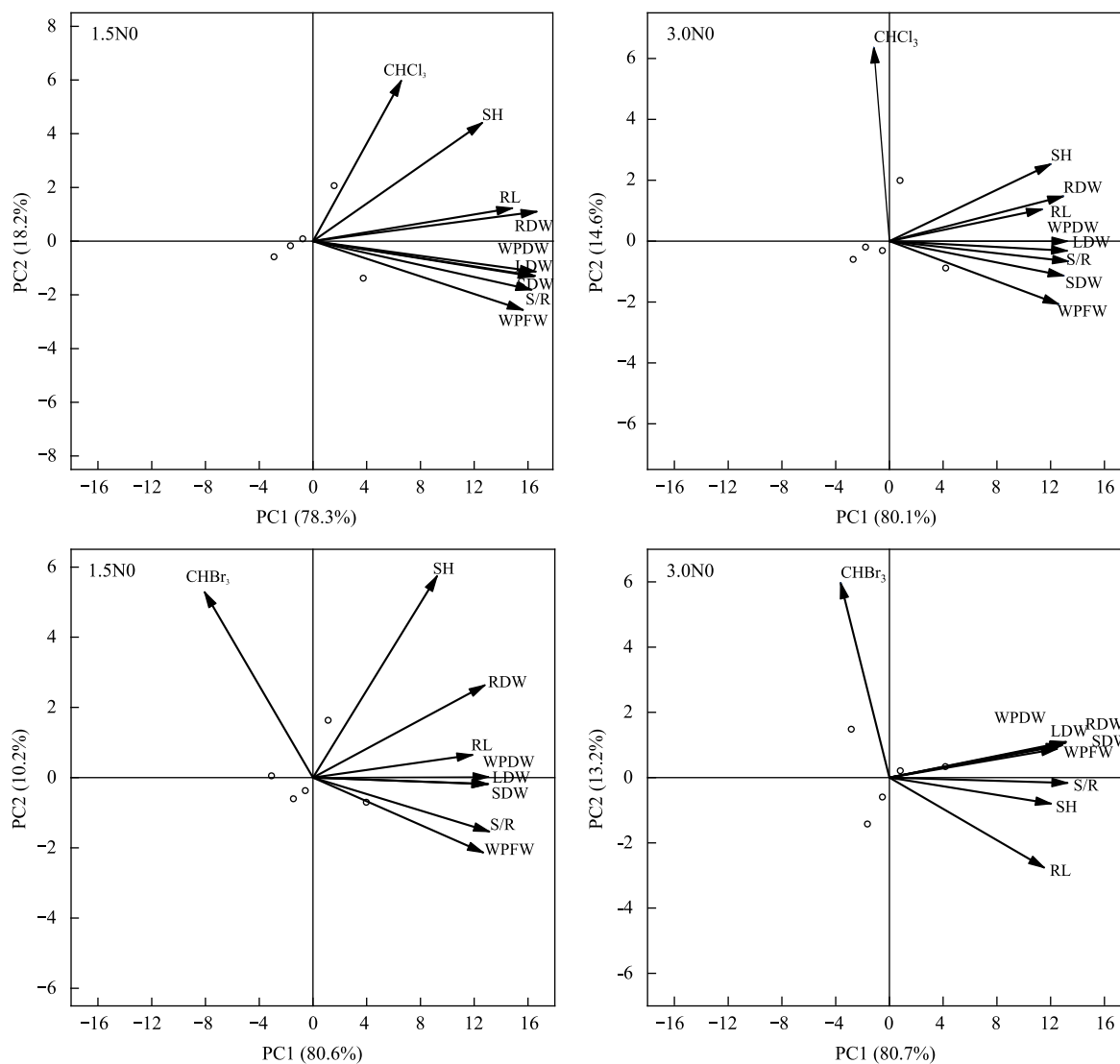


图5 盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 通量与植物生长因子之间的主成分分析

Fig.5 Principal component analysis between CHCl_3 , CHBr_3 fluxes of *Suaeda glauca* and plant growth factors

WPFW:整株鲜重 Whole plant fresh weight;LDW:叶干重 Leaf dry weight;SDW:茎干重 Stem dry weight;RDW:根干重 Root dry weight;WPDW:整株干重 Whole plant dry weight;S/R:地上部/地下部干重;SH:地上部株高 Stem height;RL:根长 Root length

2.4 盐地碱蓬盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量与土壤理化因子主成分分析

氮输入水平条件下盐地碱蓬盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量与土壤理化因子主成分分析可知(图6),1.5N0下所提取的两个主成分为PC1和PC2,其总贡献率为88.8%。其中,PC1贡献率为56.0%,可看作盐度、 Cl^- 和DOC的代表,PC2贡献率为32.8%,主要代表了 NH_4^+-N 和 NO_3^--N ;3.0N0下所提取的两个主成分PC1和PC2的总贡献率为74.8%,其中PC1贡献率为40.8%,可看作盐度、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 的代表,PC2贡献率为34.0%,可看作DOC的代表。可知盐度、DOC、 NH_4^+-N 和 NO_3^--N 是影响盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量的重要因素;对于 CHBr_3 ,1.5N0下所提取的两个主成分为PC1和PC2,其总贡献率为83.3%,PC1贡献率为

50.4%,可看作盐度、 Cl^- 和 DOC 的代表,PC2 贡献率为 32.9%,其主要代表了 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$;3.0N0 下所提取的两个主成分 PC1 和 PC2 的总贡献率为 72.8%,其中 PC1 贡献率为 39.3%,可看作 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的代表,PC2 贡献率为 33.5%,可看作 DOC 的代表,综上,土壤 DOC、 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是影响盐地碱蓬盆栽微生态系统 CHBr_3 排放通量的主要因素。

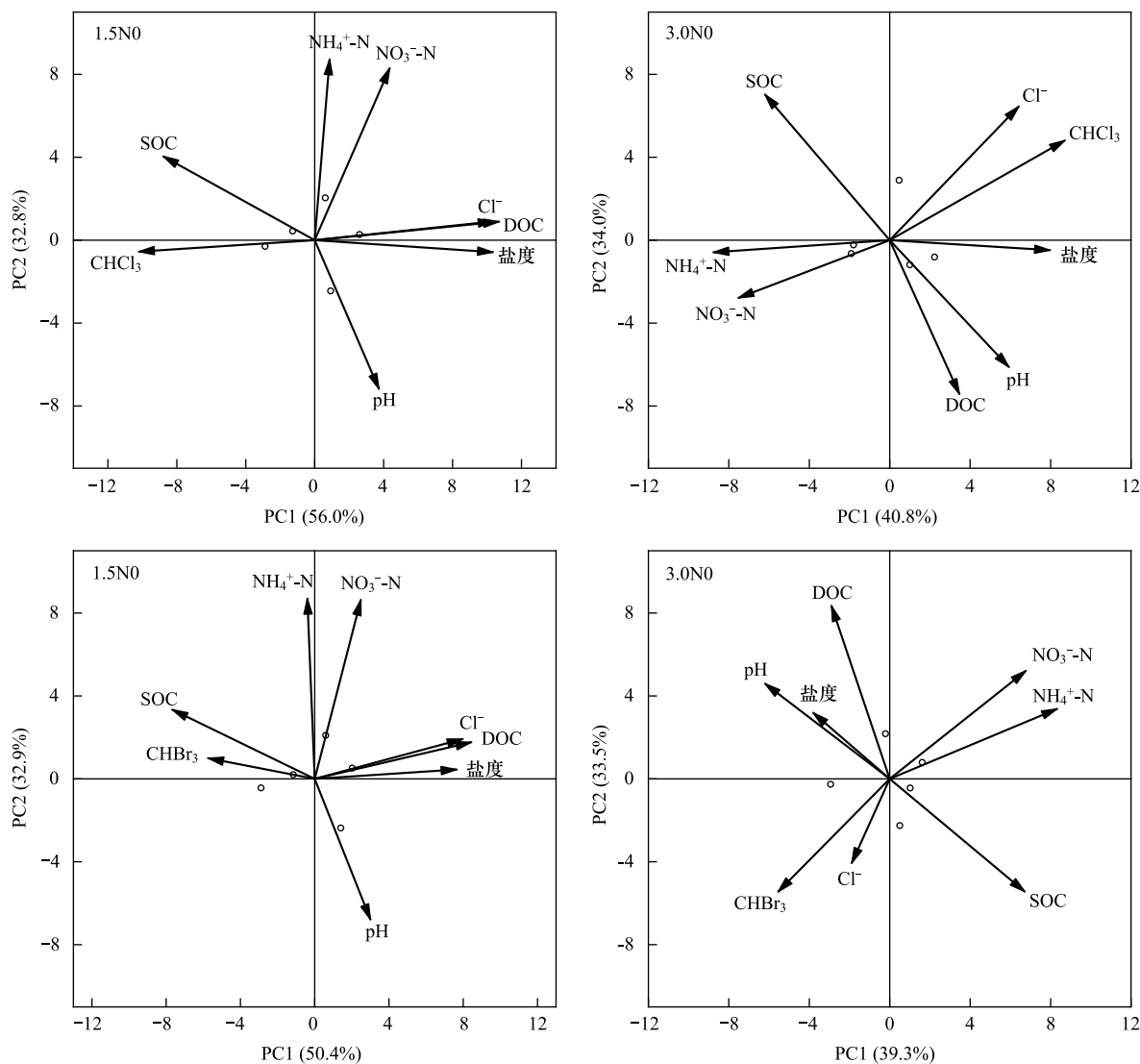


图 6 盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 通量与土壤理化因子之间的主成分分析

Fig.6 Principal component analysis between CHCl_3 , CHBr_3 fluxes and soil physical and chemical factors in potted micro-ecosystem

pH:酸碱性 Potential of hydrogen;DOC:溶解性有机碳 Dissolved organic carbon;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮 Nitrate nitrogen; Cl^- :氯离子 Chloridion

3 讨论

3.1 不同氮梯度对盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 通量特征的影响

盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量会随外源氮浓度的增加而增加,但当氮浓度过高时,气体通量则会降低。施氮肥不仅可以提高植物生物量^[30],还可以影响气体产生和氧化过程^[31]。 CHCl_3 通量变化的原因可能是高氮导致 CHCl_3 的产生量低于 CHCl_3 氧化的消耗量,最终导致其通量降低。Zhang 等人^[30] 通过外源氮模拟试验发现,不同浓度氮添加下沼泽湿地典型植物 CH_4 排放量有所不同,高氮水平下气体排放量低于中氮和低氮水平,

这与本研究的结果相似。氮输入水平可能会直接刺激气体产生,或通过对植物的影响间接刺激气体的产生,导致气体的排放与植物的生长阶段有紧密的联系^[30],陈冰冰等人^[32]研究了不同梯度外源氮输入水平对河口湿地碱蓬残体分解的影响,发现不同浓度的外源氮均可以促进碱蓬残体的分解,植物枯萎期会产生大量植物残体,而植物的枯枝落叶是潜在的挥发性有机物的来源,其自然状态下的腐败可以导致有机氯的形成^[33–34],盐地碱蓬 CHCl_3 排放通量具有明显的生长期变化,气体峰值出现在植物生长的枯萎期,这与上述的分析结果一致。在外源氮输入水平下,盐地碱蓬各部分生物量会随着氮浓度增加而出现不同程度的增加,在以往研究中,氯代烷烃的排放量与植物生物量成正比^[35],但在本研究,盐地碱蓬 CHCl_3 通量与植物生物量的关系并不符合该规律,本文推测可能是因为外源氮的激发效应影响了植物与环境因子之间关系所导致的。

与 CHCl_3 不同的是, CHBr_3 的排放通量的峰值出现在盐地碱蓬的苗期。原因可能是幼苗期大量的氮输入水平影响了植物生长趋势及其环境因子,张丽华等人^[36]通过施加氮肥观测到泥沼湿地植物 N_2O 排放通量会在植物幼苗期出现峰值,这与本研究的结果相似。但有关氮输入水平下植物各生长期 CHBr_3 的排放机制还需进一步研究。

根长是影响盐地碱蓬 CHBr_3 排放的主要因素(图 5),由相关性分析可知(表 1), CHBr_3 排放通量与盐地碱蓬根长之间呈显著负相关($R = -0.54, P < 0.05$),一方面,植物生长过程中,根际分泌物和枯枝落叶可以充当底物或以植物植株作为气体传输中介影响气体的排放^[37]。另一方面,植物可以将卤代烃气体输送至富含微生物的根际,植物通过微生物提供的能量和碳源反作用于微生物,提高微生物群落丰度,促进卤代烃的厌氧分解^[38],盐地碱蓬的根部越长,微生物群落丰度越高,降解能力越强,从而导致气体通量的降低。值得注意的是,在主成分分析当中(图 5),植物各部分生物量与不同处理组盐地碱蓬 CHCl_3 和 CHBr_3 排放通量关系密切,但两者之间相关性并不显著,Rhew 等研究结果可知^[35],植物生物量产生影响必须与其他环境因子共同作用,因此本研究中植物生物量与气体通量之间相关性不显著的原因可能是 CHCl_3 、 CHBr_3 排放受多因素交互作用的影响。

表 1 盐地碱蓬 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量与植物生长因子相关性分析

Table 1 Correlation analysis of *Suaeda glauca* CHCl_3 , CHBr_3 emission fluxes and plant growth factors

植物生长因子 Plant growth factors	整株鲜重 WPFW	叶干重 LDW	茎干重 SDW	根干重 RDW	整株干重 WPDW	地上部/ 地下部干重 S/R	地上部 株高 SH	根长 RL
氯仿 CHCl_3	-0.13	0.10	0.02	0.37	0.09	-0.03	0.48	0.17
溴仿 CHBr_3	-0.28	-0.28	-0.26	-0.23	-0.27	-0.41	-0.23	-0.54 *

WPFW: 整株鲜重 Whole plant fresh weight; LDW: 叶干重 Leaf dry weight; SDW: 茎干重 Stem dry weight; RDW: 根干重 Root dry weight; WPDW: 整株干重 Whole plant dry weight; S/R: 地上部/地下部干重; SH: 地上部株高 Stem height; RL: 根长 Root length; * 代表 $P < 0.05$, 为显著相关

3.2 不同氮梯度对盐地碱蓬盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 通量特征的影响

不同梯度下氮输入水平对盆栽微生态系统 CHCl_3 排放通量的影响不同,低氮输入水平会促进 CHCl_3 的排放,高氮输入水平则会起抑制作用,外源氮输入会改变土壤的理化性质(表 2),马慧燕等人^[39]研究了氮沉降下不同植物盆栽微生态系统中挥发性有机物的排放情况,试验结果中植物对于挥发性有机物的排放主要起促进作用,分析后可知土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是影响气体排放的一个重要因素。张丽华等人^[34]研究发现高氮处理的 CH_4 排放通量低于低氮和中氮处理,原因是多余氮可以促进 CH_4 的氧化,同时当氮浓度超过一定阈值后,系统不再是简单的 CH_4 释放过程, CH_4 的产生和氧化受到多种因素的影响,土壤中 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量增加, $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 仅在高浓度的氮输入下会抑制 CH_4 的排放^[40],且大量的氮输入可以改变土壤结构,使土壤中的有机质在较短的时间内消耗过快,从而减少气体的排放^[41]。在本研究中,随着外源氮浓度增加,土壤 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 的含量升高,DOC 含量降低,从而导致 CHCl_3 排放通量明显降低,这与上述的分析结果一致;盆栽微生态系统中 CHCl_3 的排放通量均出现在植物生长的枯萎期,原因是枯萎期产生的大量植物残体会以较快速度腐化形成腐殖酸进入土壤,腐殖酸是产生卤仿的主要前体,可形成 CHCl_3 等含卤有机物^[42],同时氮添加可能对成熟期植

物的微生物群落产生影响,已有研究表明土壤真菌可以通过氯化作用形成有机氯^[43],进而影响气体的排放。不同梯度外源氮输入水平下盆栽微生态系统 CHBr_3 的排放通量呈下降趋势,可能的原因是施氮条件下,土壤中氮的利用率提高,促进更多的碳分配到植物生长中^[44],从而使气体的消耗量大于产生量。

表 2 不同氮处理下盐地碱蓬盆栽土壤理化性质(平均值±标准误差)

Table 2 Physicochemical properties of potted soil for *Suaeda glauca* under different nitrogen treatments (Mean±SD)

氮浓度 Nitrogen concentration	pH	SAL/ (g/kg)	DOC/ (mg/kg)	SOC/ (g/kg)	$\text{NH}_4^+\text{-N}$ / (mg/kg)	$\text{NO}_3^-\text{-N}$ / (mg/kg)	Cl^- / (g/kg)
对照 Control group	8.12±0.23a	1.85±0.61a	265.83±35.77a	17.73±3.23a	5.26±1.71a	17.53±7.07a	0.97±0.13a
低氮 1.5N0 Low nitrogen	8.10±0.29ab	1.57±0.60a	255.19±42.07a	17.15±4.52a	8.01±1.66ab	18.72±8.98b	0.71±0.34a
高氮 3.0N0 High nitrogen	8.18±0.23a	1.81±0.84a	237.59±22.01ab	21.21±8.74a	10.08±2.50b	23.42±8.75b	0.81±0.18a

pH:酸碱度 Potential of hydrogen;SAL:盐度 Salinity;DOC:溶解性有机碳 Dissolved organic carbon;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon; $\text{NH}_4^+\text{-N}$:铵态氮 Ammonium nitrogen; $\text{NO}_3^-\text{-N}$:硝态氮 Nitrate nitrogen; Cl^- :氯离子 Chloridion;同列相同字母代表不存在显著差异($P>0.05$)

土壤 $\text{NH}_4^+\text{-N}$ 和 $\text{NO}_3^-\text{-N}$ 是影响盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 排放的主要因素(图 6),但两者之间的相关性并不显著(图 7),由结构方程模型可知,外源氮的输入主要影响了土壤各理化性质之间的关系,单一的土壤

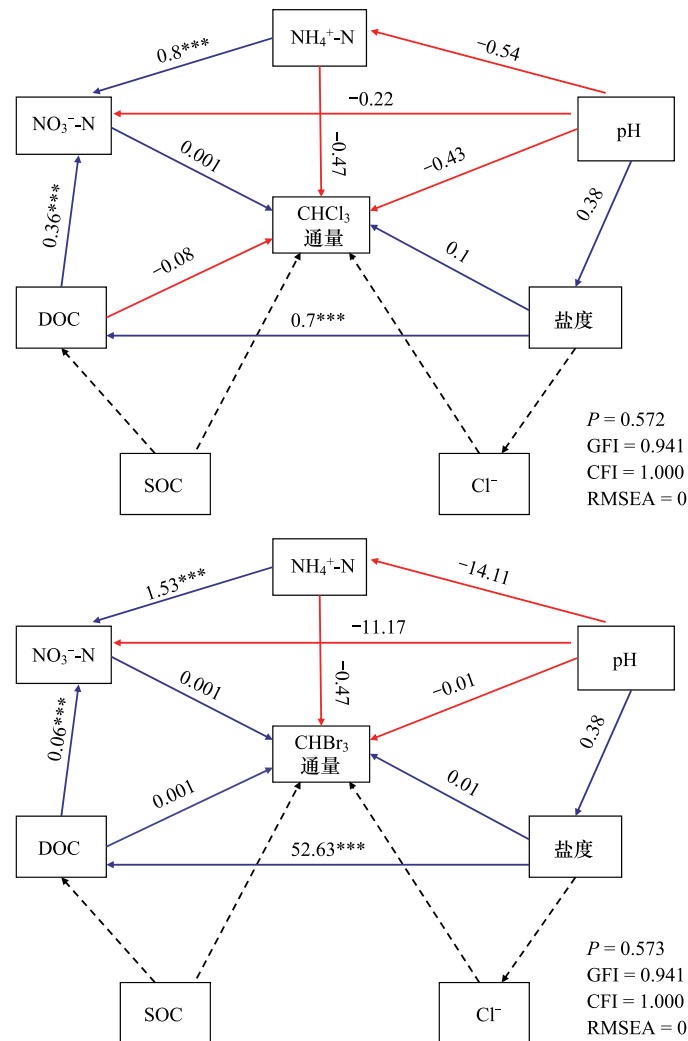


图 7 盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 通量与土壤理化性质结构方程模型

Fig.7 Structural equation model of CHCl_3 , CHBr_3 fluxes and soil physical and chemical properties in potted micro-ecosystem

P:卡方检验;GFI:拟合优度指数 Goodness-of-fit index;CFI:比较拟合指数 Comparative fit index;RMSEA:近似误差均方根 Root-mean-square error of approximation 蓝色箭头代表正相关,红色箭头代表负相关,黑色虚线箭头代表无意义路径;*代表显著水平,*为 $P<0.05$,**为 $P<0.01$,***为 $P<0.001$

因子与气体排放通量之间并无显著相关性,这种现象可能是由于盐地碱蓬生长状况、环境温度等条件的差异造成的。

4 结论

本研究对模拟氮输入背景下的盐沼植物碱蓬以及盆栽微生态系统 CHCl_3 、 CHBr_3 排放通量进行了研究,研究发现:

低浓度外源氮可以促进 CHCl_3 的排放且盐地碱蓬不同生长期 CHCl_3 通量呈先降后升的趋势,最高值均出现在枯萎期;外源氮对于 CHBr_3 的排放主要起抑制作用,与 CHCl_3 不同,盐地碱蓬苗期 CHBr_3 的通量达到峰值。

对于盆栽微生态系统而言, CHCl_3 通量的变化特征与植物相似,而 CHBr_3 则不同,外源氮主要抑制系统 CHBr_3 的排放且不同氮浓度下 CHBr_3 通量均呈现先降后升的趋势。外源氮输入改变了土壤理化性质,促进了植物凋落物的分解,从而对气体的排放产生影响;本研究认为盆栽微生态系统气体排放通量主要受土壤 NH_4^+ -N、 NO_3^- -N、以及植物凋落物等交互作用的影响。未来黄河三角洲氮输入的背景下,盐地碱蓬以及土壤的 CHCl_3 与 CHBr_3 的排放模式可能会发生改变,不同的氮输入量所产生的影响不同,从而间接影响滨海生态系统碳汇和大气环境。

参考文献 (References):

- [1] 何真,倪洁,杨桂朋. 海洋中挥发性卤代烃的研究进展. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2020, 50(3): 27-36.
- [2] Molina M J, Rowland F S. Stratospheric sink for chlorofluoromethanes: chlorine atom-catalysed destruction of ozone. *Nature*, 1974, 249(5460): 810-812.
- [3] Reifenhäuser W, Heumann K G. Bromo- and bromochloromethanes in the Antarctic atmosphere and the south polar sea. *Chemosphere*, 1992, 24(9): 1293-1300.
- [4] Fuhlbrügge S, Quack B, Tegtmeier S, Atlas E, Hepach H, Shi Q, Raimund S, Krüger K. The contribution of oceanic halocarbons to marine and free tropospheric air over the tropical West Pacific. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2016, 16(12): 7569-7585.
- [5] Rhew R C, Whelan M E, Min D H. Large methyl halide emissions from south Texas salt marshes. *Biogeosciences*, 2014, 11(22): 6427-6434.
- [6] Manley S L, Wang N Y, Walser M L, Cicerone R J. Coastal salt marshes as global methyl halide sources from determinations of intrinsic production by marsh plants. *Global Biogeochemical Cycles*, 2006, 20(3): GB3015.
- [7] Watling R, Harper D B. Chloromethane production by wood-rotting fungi and an estimate of the global flux to the atmosphere. *Mycological Research*, 1998, 102(7): 769-787.
- [8] Gschwend P M, Macfarlane J K, Newman K A. Volatile halogenated organic compounds released to seawater from temperate marine macroalgae. *Science*, 1985, 227(4690): 1033-1035.
- [9] Abe M, Nagai T, Kurihara M, Hashimoto S. Effect of temperature on the methyl chloride production rate in a marine phytoplankton, *Phaeodactylum tricornutum*. *Journal of Atmospheric Chemistry*, 2017, 74(2): 157-169.
- [10] Hossaini R, Chipperfield M P, Montzka S A, Rap A, Dhomse S, Feng W. Efficiency of short-lived halogens at influencing climate through depletion of stratospheric ozone. *Nature Geoscience*, 2015, 8(3): 186-190.
- [11] 周聪,饶旭东,薛梦琪,张耀鸿,高霄鹏,贾仲君. 围垦年限及施氮对滨海湿地 CH_4 好氧氧化过程的影响. *土壤*, 2023, 55(1): 72-78.
- [12] 柴娜,谢文霞,李萍,王志强. 胶州湾盐沼 CH_3I 通量的季节特征及其影响因素. *环境科学学报*, 2019, 39(6): 2006-2012.
- [13] Hirota M, Senga Y, Seike Y, Nohara S, Kunii H. Fluxes of carbon dioxide, methane and nitrous oxide in two contrastive fringing zones of coastal lagoon, Lake Nakaumi, Japan. *Chemosphere*, 2007, 68(3): 597-603.
- [14] 李雪,董杰,韩广轩,张奇奇,谢宝华,李培广,赵明亮,陈克龙,宋维民. 黄河三角洲典型滨海盐沼湿地土壤 CO_2 和 CH_4 排放对水盐变化的响应. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 434-446.
- [15] Yang W Z, Cao J, Wu Y, Kong F L, Li L Y. Review on plant terpenoid emissions worldwide and in China. *Science of the Total Environment*, 2021, 787: 147454.
- [16] 杨佳,李锡成,王趁义,滕丽华,赵欣园. 利用海蓬子和碱蓬修复滨海湿地污染研究进展. *湿地科学*, 2015, 13(4): 518-522.
- [17] 李征,韩琳,刘玉虹,安树青,冷欣. 滨海盐地碱蓬不同生长阶段叶片 C、N、P 化学计量特征. *植物生态学报*, 2012, 36(10): 1054-1061.
- [18] 谢旭,李晓文,白军红,智烈慧. 黄河三角洲湿地中 4 种典型植物地上生物量随地表高程的变化规律. *湿地科学*, 2021, 19(2): 226-231.
- [19] 敖小蔓. 氮、磷添加对呼伦贝尔草甸草原碳循环关键过程的影响[D]. 呼和浩特: 内蒙古大学, 2021.

- [20] 李隽永. 模拟氮输入对黄河三角洲盐沼湿地碳循环关键过程的影响[D]. 烟台: 中国科学院大学, 2021.
- [21] Keppler F, Eiden R, Niedan V, Pracht J, Schöler H F. Halocarbons produced by natural oxidation processes during degradation of organic matter. *Nature*, 2000, 403(6767): 298-301.
- [22] 方华军, 程淑兰, 于贵瑞, 王永生, 徐敏杰, 党旭升, 李林森, 王磊. 大气氮沉降对森林土壤甲烷吸收和氧化亚氮排放的影响及其微生物学机制. *生态学报*, 2014, 34(17): 4799-4806.
- [23] Sievering H, Rusch D, Marquez L. Nitric acid, particulate nitrate and ammonium in the continental free troposphere: Nitrogen deposition to an alpine tundra ecosystem. *Atmospheric Environment*, 1996, 30(14): 2527-2537.
- [24] 刘琳, 朱霞, 孙庚, 罗鹏, 王蓓. 模拟增温与施肥对高寒草甸土壤酶活性的影响. *草业科学*, 2011, 28(8): 1405-1410.
- [25] 牟晓杰, 刘兴土, 全川, 孙志高. 闽江河口短叶茳芰湿地 CH_4 和 N_2O 排放对氮输入的短期响应. *环境科学*, 2012, 33(7): 2482-2489.
- [26] 张美颖, 曾从盛, 胡伟芳, 张林海. 氮硫输入对短叶茳芰枯落物温室气体产生的影响. *亚热带资源与环境学报*, 2018, 13(4): 25-33.
- [27] 全川, 曾从盛, 王维奇, 闫宗平, 杨红玉. 闽江河口芦苇潮汐湿地甲烷通量及主要影响因子. *环境科学学报*, 2009, 29(1): 207-216.
- [28] 张颖, 刘学军, 张福锁, 巨晓棠, 邹国元, 胡克林. 华北平原大气氮素沉降的时空变异. *生态学报*, 2006, 26(6): 1633-1639.
- [29] 俞琳莺. 黄河口潮间带碱蓬湿地磷循环关键过程对外源氮输入的响应[D]. 福州: 福建师范大学, 2020.
- [30] Zhang L H, Song C C, Wang D X, Wang Y Y, Xu X F. The variation of methane emission from freshwater marshes and response to the exogenous N in Sanjiang Plain Northeast China. *Atmospheric Environment*, 2007, 41(19): 4063-4072.
- [31] Xu Z J, Zheng X H, Wang Y S, Han S H, Huang Y, Zhu J G, Butterbach-Bahl K. Effects of elevated CO_2 and N fertilization on CH_4 emissions from paddy rice fields. *Global Biogeochemical Cycles*, 2004, 18(3): GB3009.
- [32] 陈冰冰, 孙志高, 孙文广, 胡星云. 外源氮持续输入对相应氮梯度下碱蓬残体分解及硫养分释放的影响. *生态学报*, 2019, 39(8): 2872-2882.
- [33] Myneni S C B. Formation of stable chlorinated hydrocarbons in weathering plant material. *Science*, 2002, 295(5557): 1039-1041.
- [34] Isidorov V, Jdanova M. Volatile organic compounds from leaves litter. *Chemosphere*, 2002, 48(9): 975-979.
- [35] Rhew R C, Miller B R, Weiss R F. Natural methyl bromide and methyl chloride emissions from coastal salt marshes. *Nature*, 2000, 403(6767): 292-295.
- [36] 张丽华, 宋长春, 王德宣, 王毅勇, 顾江新. 外源氮对沼泽湿地 CH_4 和 N_2O 通量的影响. *生态学报*, 2007, 27(4): 1442-1449.
- [37] Singh S N, Kulshreshtha K, Agnihotri S. Seasonal dynamics of methane emission from wetlands. *Chemosphere-Global Change Science*, 2000, 2(1): 39-46.
- [38] 王进欣. 苏北盐沼痕量气体通量变化及影响因素[D]. 南京: 南京大学, 2006.
- [39] 马慧燕, 伍乾辉, 付彦, 杨宗德, 何禾. 几种海南岛热带雨林优势种植物挥发性有机物排放对模拟氮沉降的短期响应. *生态学报*, 2023, 43(3): 1073-1089.
- [40] Bodelier P L E, Laanbroek H J. Nitrogen as a regulatory factor of methane oxidation in soils and sediments. *FEMS Microbiology Ecology*, 2004, 47(3): 265-277.
- [41] 孙彦坤, 杨帆, 张立友, 高见, 李维海, 陈晶, 田宝星. 温度、氮输入对洪河湿地 CO_2 通量的影响. *东北农业大学学报*, 2013, 44(2): 71-76.
- [42] Naturally occurring organohalogen compounds; a comprehensive survey. *Fortschr Chem Org Naturst*, 1996, 68: 1-423.
- [43] Johansson E, Krantz-Rülcker C, Zhang B X, Öberg G. Chlorination and biodegradation of lignin. *Soil Biology and Biochemistry*, 2000, 32(7): 1029-1032.
- [44] Huang X R, Lai J M, Liu Y F, Zheng L L, Fang X, Song W, Yi Z G. Biogenic volatile organic compound emissions from *Pinus massoniana* and *Schima superba* seedlings: Their responses to foliar and soil application of nitrogen. *Science of the Total Environment*, 2020, 705: 135761.