

## Microbial Ecology | 广西大学生命科学与技术学院博士研究生揭示互花米草入侵的亚热带海洋红树林湿地生态系统多磷酸盐积累和硫循环的微生物转化整合机制

红树林生态系统位于陆地和海洋环境的过渡地带，在维持海岸和海洋生物方面发挥着重要作用。虾塘和废水等人类活动导致磷在红树林生态系统中过多积累，引起海洋和海岸系统的富营养化。此外，外来互花米草的迅速扩张改变红树林生境环境。微生物可通过在细胞中积累磷酸盐来去除磷。已有研究报道硫氧化菌可利用胞内硫池作为能量源，促进磷的吸收和释放。然而，硫代谢协同磷去除在互花米草入侵的红树林生态系统中尚未得到很好的阐明。

近日，广西大学生命科学与技术学院 2018 级博士研究生莫淑名以第一作者身份在国际生态学学术期刊 **Microbial Ecology**（国际 JCR 分区一区，中科院分区小区“MARINE & FRESHWATER BIOLOGY”一区，Top 期刊）在线发表了题为“Integration of Microbial Transformation Mechanism of Polyphosphate Accumulation and Sulfur Cycle in Subtropical Marine Mangrove Ecosystems with *Spartina alterniflora* Invasion”的研究论文（*Microbial Ecology*. 2022. DOI: 10.1007/s00248-022-01979-w），蒋承建教授为通讯作者身份。该研究重点揭示了互花米草入侵对硫代谢协同磷去除的影响机制。



图 1 沉积物地理图

在亚热带北部湾海洋红树林湿地系统中设点（ $21^{\circ}29'25.74''N$ ,  $109^{\circ}45'49.43''E$ ；图 1），一共采集了 36 个样品。在采集的海洋红树林湿地沉积物中，红海榄为本地优势红树植物物种(MS)，互花米草为入侵物种(HS)，而非红树林是在距离红树林约 100 m 没有红树植物的地点(NS)。在每个采样点(深度 0–100 cm)，采用不锈钢扇形土集（长 100 m，内径 10 cm）器在  $5\text{ m} \times 5\text{ m}$  面积内随机采集 3 个重复。将沉积物岩心平均切片为 0–10、10–25、25–50 和 50–100 cm。提取样品宏基因组 DNA 后，进行宏基因组测序及关键功能基因丰度分析。

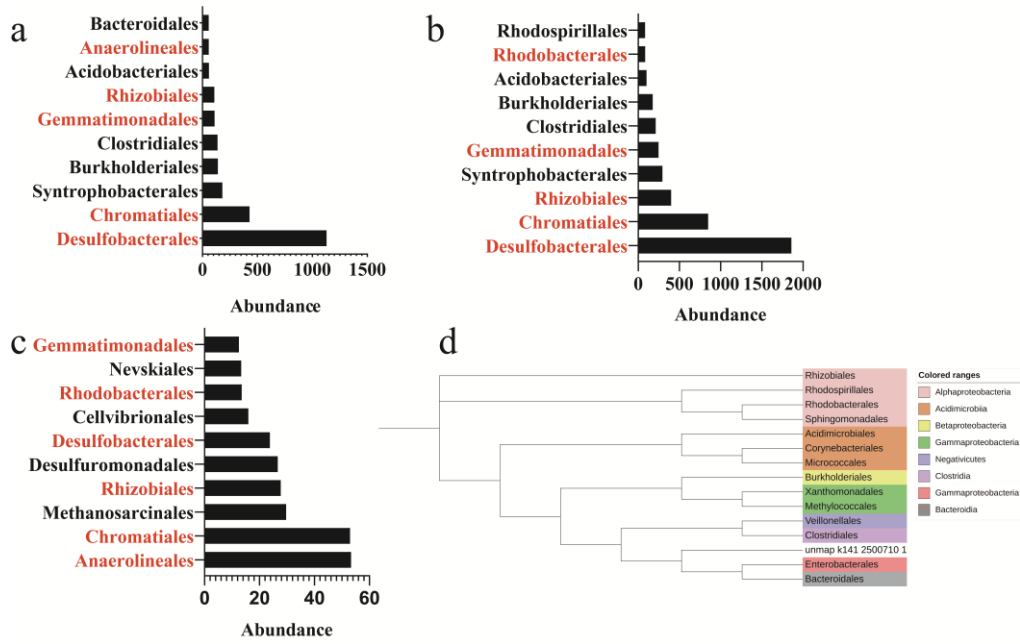


图 2. 展示丰度最高的 10 个目水平分类。(a) 硫酸盐还原所涉及分类。(b) 硫氧化涉及分类。(c) Poly-P 的积累所涉及分类。A 和 B/C 的相同目水平用红色标注。(d) 沉积物中 *ppk* 基因基于 Maximum-likelihood phylogeny 的分析。

本研究发现在前 6 个高丰度目水平中观察到磷和硫循环的协同生物转化，这表明红树林生态系统与硫和磷细菌的代谢密切相关(图 2)。Desulfobacteriales 是红树林生态系统中磷和硫循环共同生物转化的主要微生物群落，且互花米草样品中其丰度高于非互花米草样品。在山口红树林生态系统中也检测到其他相互作用微生物，如 Anaerolineales、Gemmatimonadales、Chromatiales、Desulfuromonadales 和 Rhizobiales(图 2)。Ppk 蛋白参与了 Poly-P 的积累。共现性分析也表明，硫基因、磷基因和微生物群落之间存在较强的相关性 ( $|r| > 0.8$ )，且相关性极显著 ( $P < 0.01$ )。Desulfobacteriales、Sulfuromonadales、Desulfuromonadales、Gemmatimonadales、Chromatiales 与 *ppk* 基因呈显著正相关，*ppk* 又与 *dsrA/B*、*sqr* 基因等呈显著正相关。磷与硫基因的相关性共 2278 个。这些结果表明红树林沉积物中硫循环与磷去除的具有强相关性。

表 1. 北部湾亚热带红树林沉积物关键功能基因的 qPCR 结果。

Samples	MAS	HAS	NAS	MBS	HBS	NBS	MCS	HCS	NCS	MDS	HDS	NDS
16S rRNA (10 <sup>8</sup> copies/g soil)	17.96 ±6.35	25.31 ±8.11	13.96 ±1.30	4.96 ±0.56	8.79 ±1.06	6.23 ±0.26	2.89 ±0.93	3.48 ±0.37	1.45 ±0.29	0.55 ±0.12	1.83 ±0.33	0.45 ±0.24
<i>ppk</i> (10 <sup>4</sup> copies/g soil)	3.6 ±1.05	3.64 ±0.75	2.10 ±0.78	1.12 ±0.45	1.34 ±0.06	0.99 ±0.37	0.69 ±0.09	0.99 ±0.02	0.86 ±0.03	0.85 ±0.36	0.94 ±0.14	0.55 ±0.17
<i>aprA</i> (10 <sup>7</sup> copies/g soil)	101.18 ±48.99	165.26 ±41.77	95.33 ±18.18	32.42 ±9.66	62.38 ±6.26	49.34 ±0.92	11.57 ±.37	21.16 ±3.33	7.88 ±1.97	2.28 ±0.66	7.66 ±1.85	2.69 ±1.32
<i>dsrB</i> (10 <sup>7</sup> copies/g soil)	28.70 ±11.44	47.40 ±9.02	23.60 ±4.78	11.33 ±2.65	21.33 ±3.48	14.14 ±1.16	3.79 ±0.96	6.51 ±0.95	1.96 ±0.58	0.63 ±0.29	2.13 ±0.64	0.61 ±0.28
<i>aprA</i> (10 <sup>-1</sup> copies/16S rRNA)	5.68 ±1.82	6.71 ±0.61	6.80 ±0.98	6.41 ±1.18	7.12 ±0.23	7.92 ±0.21	4.18 ±0.79	6.08 ±0.72	5.40 ±0.52	4.09 ±0.56	4.17 ±0.47	6.08 ±0.74
<i>dsrB</i> (10 <sup>-1</sup> copies/16S rRNA)	1.69 ±0.66	1.97 ±0.35	1.68 ±0.25	2.26 ±0.29	2.42 ±0.17	2.27 ±0.09	1.37 ±0.34	1.88 ±0.24	1.34 ±0.24	1.20 ±0.51	1.14 ±0.13	1.45 ±0.44

† All results are reported as means ± standard deviation. All the groups have three replicates. HS (S. alterniflora samples), MS (R. stylosa samples), NS (non-mangrove samples), A (0–10 cm), B (10–25 cm), C (25–50 cm), and D (50–100 cm).

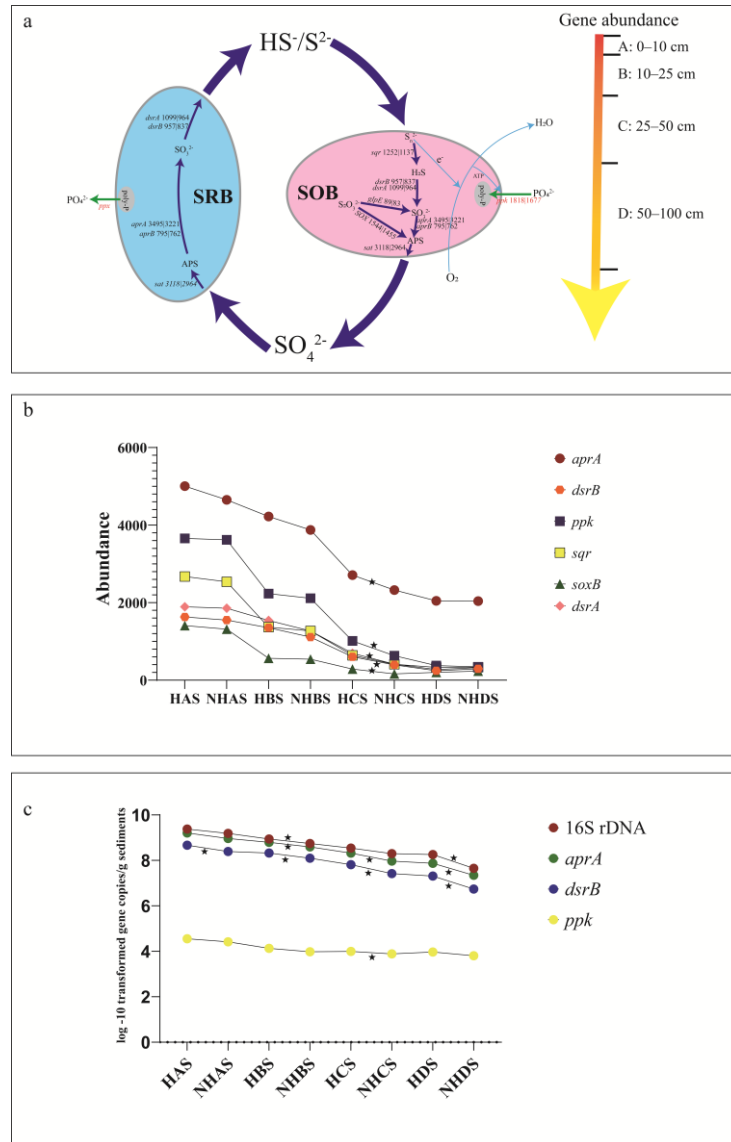


图 3. (a)红树林生态系统硫循环和聚磷代谢协同作用的生态模型。基因丰度(左边)为互花米草样本的平均丰度。基因丰度(右边)是非互花米草样本的平均丰度。最右边的梯度箭头显示基因的丰度随深度而变化。红色表示丰度高,黄色表示丰度低。(b)从宏基因组中获得四个深度的关键基因丰度及显著性分析。(c)4个关键基因的 qPCR 结果显著性分析。在相同深度上的显著差异用五角星标记 (Permutational Student's *t*-test)。HS (*S. alterniflora* 样品)、NHS (non- *S. alterniflora* 样品)、A (0–10 cm)、B (10–25 cm)、C (25–50 cm)和 D (50–100 cm)。

Poly-S 对 Poly-P 积累之间的关系具有重要意义。Poly-S 可以在厌氧条件下调节细胞内质子并提供细胞生物能,从而促进磷的去除。根据宏基因组数据,我们提出了红树林生态系统中磷和硫协同生物转化的生态模型(图 3)。该模型突出了该系统中主要的微生物群落(SRB 和 SOB)。本研究发现硫酸盐还原、硫氧化和 Poly-P 的积累随深度增加而减少(图 3)。qPCR 结果显示,16S rRNA、*dsrB*、*aprA* 和 *ppk* 基因丰度分别为  $0.45\text{--}25.31 \times 10^8$ 、 $0.61\text{--}28.70 \times 10^7$ 、 $2.28\text{--}165.26 \times 10^7$  和  $0.32\text{--}4.67 \times 10^4$  copies/g 沉积物(表 1)。宏基因组和 qPCR 数据差异分析表明,发现互花米草的入侵提高硫酸盐还原、硫氧化和 Poly-P 积累的活性(图 3)。由

此可见，在外来入侵植物环境中，Poly-P 具有较高的积累活性，有利于除磷。高 polyphosphate kinase 活性可以使磷被重复利用，减轻磷污染，并保证海洋红树林湿地系统的高生产力。

这是课题组继 2021 年在国际权威环境微生物学期刊“**Science of the Total Environment**”（国际 JCR 分区一区，中科院分区小区“ENVIRONMENTAL SCIENCES”一区，Top 期刊）发表“*Desulfobacteriales stimulates nitrate reduction in the mangrove ecosystem of a subtropical gulf*”相关成果后的重要进展。相关亚热带海洋红树林湿地微生物的研究，陆续得到了国家自然科学基金、中央引导广西地方科技发展资金项目、广西壮族自治区杰出青年基金和广西北部湾海洋生物多样性保护重点实验室等项目的资助。