植物资源与环境学报，2026，**35**(5)：95-102
Journal of Plant Resources and Environment

聚苯乙烯微塑料对狐尾藻生长、生理及根际和沉积物细菌群落的影响

汪州繁[1a,1b]，周之栋[2]，薛建辉[1a,1b,2,①]

〔1. 南京林业大学：a. 生态与环境学院，b. 南方现代林业协同创新中心，江苏 南京 210037；
2. 江苏省中国科学院植物研究所(南京中山植物园) 江苏省植物分类与资源保护利用重点实验室，江苏 南京 210014〕

摘要：通过温室控制实验，分析质量分数 0.0%(CK)、0.5%、1.0%、2.5%(按沉积物干质量计)聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)对狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* Linn.)生长性状、叶片叶绿素含量和抗氧化系统及根际和沉积物细菌群落的影响。结果显示：PS-MPs 总体显著抑制($p<0.05$)狐尾藻株高、根长、单株干质量、叶绿素含量，且抑制程度随质量分数升高而增强。PS-MPs 对狐尾藻叶片抗氧化酶活性具有低促高抑作用：与 CK 组相比，质量分数 0.5%PS-MPs 处理组超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性分别升高 7.52%、11.43%和 12.36%，质量分数 2.5%PS-MPs 处理组分别下降 16.30%、16.14%和 35.44%。丙二醛含量随 PS-MPs 质量分数升高而递增，表明细胞膜脂过氧化损伤加剧。添加 PS-MPs 改变了狐尾藻根际细菌群落结构，但对沉积物细菌群落结构影响较小。与 CK 组相比，PS-MPs 处理组狐尾藻根际细菌群落中放线菌门(Actinomycetota)占比减小，而假单胞菌门(Pseudomonadota)占比增大，且成为最优势门。综上，PS-MPs 通过改变狐尾藻生理特性，显著抑制其生长；同时，PS-MPs 对狐尾藻根际细菌群落结构的影响，可能间接干扰狐尾藻的生理代谢。

关键词：聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)；狐尾藻；生长；叶绿素含量；抗氧化酶活性；细菌群落

中图分类号：Q948.8；X171.5　　**文献标志码：**A　　**文章编号：**1674-7895(2026)05-0095-08
DOI：10.3969/j.issn.1674-7895.2026.05.09

Effects of polystyrene microplastics on growth and physiology of *Myriophyllum verticillatum* and bacterial communities in rhizosphere and sediment

WANG Zhoufan[1a,1b], ZHOU Zhidong[2], XUE Jianhui[1a,1b,2,①] [1. Nanjing Forestry University: a. College of Ecology and Environment, b. Co-Innovation Center of Sustainable Forestry in Southern China, Nanjing 210037, China; 2. Jiangsu Provincial Key Laboratory for Plant Taxonomy, Resource Conservation and Utilization, Institute of Botany, Jiangsu Province and Chinese Academy of Sciences (Nanjing Botanical Garden Mem. Sun Yat-Sen), Nanjing 210014, China], *J. Plant Resour. & Environ.*, 2026, **35**(5): 95-102

Abstract: The effects of polystyrene microplastics (PS-MPs) with mass fractions of 0.0% (CK), 0.5%, 1.0%, and 2.5% (based on dry mass of sediment) on the growth traits, leaf chlorophyll contents, and antioxidant system of *Myriophyllum verticillatum* Linn., as well as rhizosphere and sediment bacterial communities were analyzed by a greenhouse control experiment. The results show that PS-MPs significantly inhibit ($p<0.05$) plant height, root length, dry mass per plant, and chlorophyll content of *M. verticillatum* in general, and the inhibitory effect intensifies with the increase of mass fractions. PS-MPs have the effect of low mass fraction promotion and high mass fraction inhibition on the antioxidant enzyme activities of *M. verticillatum* leaves: compared with the CK group, the activities of superoxide

收稿日期：2026-03-10
基金项目：国家自然科学基金青年科学基金项目(32301440)
作者简介：汪州繁(1997—)，男，安徽黄山人，硕士研究生，主要从事水环境中微塑料与沉水植物互作方面的研究。
①通信作者 E-mail：jhxue@njfu.edu.cn
引用格式：汪州繁，周之栋，薛建辉. 聚苯乙烯微塑料对狐尾藻生长、生理及根际和沉积物细菌群落的影响[J]. 植物资源与环境学报，2026，35(5)：95-102.

dismutase, peroxidase, and catalase in the 0.5% (mass fraction) PS-MPs treatment group increase by 7.52%, 11.43%, and 12.36%, respectively, while those in the 2.5% (mass fraction) PS-MPs treatment group decrease by 16.30%, 16.14%, and 35.44%, respectively. Malondialdehyde content increases with the increase of mass fractions of PS-MPs, indicating aggravated membrane lipid peroxidation damage. The addition of PS-MPs alters the rhizosphere bacterial community structure of *M. verticillatum*, but exerts minor effects on sediment bacterial community structure. Compared with the CK group, the proportion of Actinomycetota in the rhizosphere bacterial community of *M. verticillatum* decreases in PS-MPs treatment groups, whereas the proportion of Pseudomonadota increases and becomes the most dominant phylum. In conclusion, PS-MPs significantly inhibit the growth of *M. verticillatum* by changing its physiological characteristics; meanwhile, the effects of PS-MPs on bacterial community structures of *M. verticillatum* rhizosphere may indirectly interfere with the physiological metabolism of *M. verticillatum*.

Key words: polystyrene microplastics (PS-MPs); *Myriophyllum verticillatum* Linn.; growth; chlorophyll content; antioxidant enzyme activity; bacterial community

自1950年以来,全球塑料产量呈快速增长趋势,至2023年产量已达4.14×10^8 t[1],预计到2050年将超过1.1×10^9 t[2]。然而,全球塑料回收率不足10%[3]。大部分塑料废弃物通过填埋、焚烧或直接丢弃等途径进入环境,并在物理磨损、光氧化及生物降解等作用下形成粒径小于5 mm的微塑料[4],成为持久性环境污染物。微塑料比表面积大、疏水性强,能够吸附并富集重金属[5-7]和有机污染物[8-10],增加了其潜在的生态风险。因此,微塑料在淡水生态系统中的赋存状态及生态环境效应已成为研究热点。其中,聚苯乙烯微塑料(PS-MPs)因其苯环结构稳定而难以被微生物降解,可在水体和沉积物中长期滞留,是备受关注的污染物之一。

在水生环境中,PS-MPs表面可被微生物定殖并形成生物膜,改变其理化性质[11],使其外观、气味等与食物相似,导致水生生物误食[12]。被摄食的PS-MPs经食物链传递与累积,威胁水生生态系统的结构与功能。沉水植物及沉积物微生物系统作为水生生态系统的关键组分,同样可能受到PS-MPs污染的影响。

PS-MPs可诱导沉水植物产生氧化应激,进而抑制其生长及生理功能。张晨等[13]的研究结果表明:PS-MPs胁迫可显著降低黑藻〔*Hydrilla verticillata* (Linn. f.) Royle〕的株高、生物量及光合参数,并抑制光系统Ⅱ反应中心的活性。曹芷夕等[14]发现,随PS-MPs质量浓度的增加,金鱼藻(*Ceratophyllum demersum* Linn.)的抗氧化酶呈不同的响应趋势,超氧化物歧化酶活性持续升高,过氧化物酶活性逐渐下降,过氧化氢酶活性先升高后降低。除对沉水植物的直接影响,PS-MPs还通过改变沉积物环境,引发微生物群落结构与功能紊乱,间接影响沉水植物。Li等[15]研究认为,PS-MPs的添加导致沉积物酸碱度(pH)降低、碳氮含量和含水量升高,改变细菌群落的多样性与结构稳定性以及根际微环境的氧化还原状态与养分有效性,进而影响根系的养分吸收与呼吸代谢。

沉水植物狐尾藻(*Myriophyllum verticillatum* Linn.)对水体中铅、锌等重金属具有较强的富集与固定能力[16-18],且对富营养化水体中氮、磷的去除具有较好效果[19-21],在生态修复中具有重要价值。然而,目前,PS-MPs污染对狐尾藻生长和生理代谢以及根际和沉积物中微生物群落组成的影响缺乏系统性探讨。鉴于此,本研究通过人工模拟淡水生境控制实验,研究不同质量分数PS-MPs对狐尾藻生长和生理指标的影响,并结合细菌群落高通量测序分析,系统揭示PS-MPs对狐尾藻生长与生理代谢的影响机制,以期为评估水体微塑料污染对沉水植物的生态效应提供参考依据。

1 材料和方法

1.1 材料

供试PS-MPs(无羧基,粒径100 μm,密度约1.05 g·cm^{-3})购自无锡瑞格生物科技有限公司。狐尾藻(3个月苗龄)购自宿迁禾辰水生植物有限公司。实验用水为经孔径0.45 μm微孔滤膜过滤的自来水。

2025年5月,采用五点取样法,于江苏省宿迁市沭阳县新沂河(北纬34°08′13.3″、东经118°47′52.9″)采集表层底泥(0~10 cm)约200 kg。样品充分混匀后,于室温、通风阴凉处风干,过60目不锈钢筛,剔除

底栖动植物残体，作为实验用沉积物备用。沉积物中可溶性总氮含量 36.40 mg · kg^{-1}、可溶性有机氮含量 28.30 mg · kg^{-1}、硝态氮含量 5.16 mg · kg^{-1}、铵态氮含量 2.85 mg · kg^{-1}、总有机碳含量 10.44 g · kg^{-1}，pH 8.41。

选取生长状况良好、无病虫害的狐尾藻，用去离子水冲洗 3 次。剪取长度约 11 cm 的顶端枝条，移植至铺有厚度 4 cm 沉积物的预培养箱（长 70 cm、宽 50 cm、高 40 cm）中，然后加入体积分数 10% Hoagland 营养液至深度 20 cm。在温室大棚内预培养 7 d，待新生根长度达 2 cm 以上，备用。

1.2　方法

1.2.1　*处理方法*　采用单因子完全随机区组设计，结合已有研究的污染浓度[22-24]，基于沉积物干质量，设置 PS-MPs 质量分数 0.0%（CK）、0.5%、1.0% 和 2.5% 4 个处理。将 PS-MPs 与沉积物按比例混匀，每培养杯装 150 g，静置 24 h。选取长势基本一致的狐尾藻，用去离子水洗净后移植至培养杯，每杯 1 株。将培养杯置于培养桶（内径 27.5 cm、高 38.0 cm）内，每桶 9 个培养杯，沿桶壁缓慢注入 15 L 过滤自来水（水深 27 cm）。每处理 3 个培养桶，共计 108 株。实验于 2025 年 5 月 21 日至 6 月 29 日在江苏省中国科学院植物研究所实验基地的温室大棚（北纬 32°03′、东经 118°49′）进行，每 2 d 补充过滤自来水维持水位。处理 40 d 采集样品，测定狐尾藻生长和生理指标，并分析狐尾藻根际和沉积物细菌群落组成与结构。

1.2.2　*生长指标测量*　使用直尺（精度 0.1 cm）测量每株狐尾藻的株高和根长。从各处理组中随机选取 3 株狐尾藻，用去离子水清洗干净，105 ℃下杀青 30 min 后，于 65 ℃烘干至恒质量，用电子天平（精度 0.01 g）称量干质量，每株称量 3 次，计算平均值作为单株干质量。

1.2.3　*生理指标测定*　实验结束后，每处理组中随机选取 3 株狐尾藻植株，采集植株顶端向下第 2 或第 3 层健康、完整的叶片 5 或 6 枚用于生理指标测定。采用乙醇提取法[25]134-137测定叶绿素含量；采用氮蓝四唑法[25]167-169测定超氧化物歧化酶活性；采用愈创木酚法[25]164-165测定过氧化物酶活性；采用高锰酸钾滴定法[25]165-167测定过氧化氢酶活性；采用硫代巴比妥酸法[25]260-261测定丙二醛含量。

1.2.4　*狐尾藻根际和沉积物细菌检测*　实验结束时，采用五点取样法采集沉积物样品，将样品保存于无菌密封袋中，于-80 ℃保存，用于后续 DNA 提取。轻轻拔起并抖落根部非紧密附着的土壤，剪取约 15 g 带有根际土壤的根系，置于装有 25 mL 无菌生理盐水（质量体积分数 0.86% NaCl）的离心管中。将离心管置于冰上，以每 5 min 振荡混匀 10 次的频率，持续处理 30 min。随后移除根系，将离心管在 4 ℃、4 000 r · min^{-1}条件下离心 30 min。弃上清液，收集沉淀物于无菌离心管中，于-80 ℃保存，用于后续 DNA 提取。DNA 提取及高通量测序交由上海美吉生物医药科技有限公司完成。使用引物 338F（5′-ACTCCTACGGGAGGCAGCAG-3′）和 806R（5′-GGACTACHVGGGTWTCTAAT-3′）对细菌 16S rRNA 基因的 V3-V4 区进行扩增，并在 Illumina NextSeq2000 平台（美国 Illumina 公司）上进行测序，以分析根际和沉积物细菌的群落结构。

1.3　数据处理和分析

利用 EXCEL 2021 软件对数据进行统计处理。利用 SPSS 24.0 软件对数据进行正态性检验和方差齐性检验，然后进行单因素方差分析（$\alpha=0.05$），采用沃勒-邓肯多重比较检验分析组间显著性，并进行 Pearson 相关性分析。利用 QIIME（2020.2.0）软件，计算得到 Bray-Curtis 距离矩阵，然后采用非加权组平均法（UPGMA），利用 R 3.3.1 软件进行层次聚类分析并绘制树状图，可视化细菌群落结构，并计算细菌群落的 α 多样性指数。

2　结果和分析

2.1　PS-MPs 对狐尾藻生长性状和叶片叶绿素含量的影响

结果（表 1）显示：PS-MPs 处理抑制狐尾藻的生长并降低其叶片叶绿素含量。质量分数 0.5%、1.0%、2.5% PS-MPs 处理组狐尾藻的株高、根长和单株干质量均显著低于（$p<0.05$）质量分数 0.0% PS-MPs（CK）组，其中，质量分数 2.5% PS-MPs 处理组 3 个生长指标降至最低，分别较 CK 组降低 9.45%、35.30% 和 39.43%。各处理组的叶绿素 *a* 含量均显著低于 CK 组，其中，质量分数 2.5% PS-MPs 处理组最低，较 CK 组降低 24.69%；叶绿素 *b* 含量也有不同程度的下降，其中质量分数 2.5% PS-MPs 处理组与 CK 组差异达显著水平。

表1 不同质量分数PS-MPs处理对狐尾藻生长性状和叶片叶绿素含量的影响($\bar{X}\pm SD$)[1)]
Table 1 Effects of different mass fractions of PS-MPs treatments on growth traits and chlorophyll content in leaves of *Myriophyllum verticillatum* Linn. ($\bar{X}\pm SD$)[1)]

PS-MPs质量分数/% Mass fraction of PS-MPs	株高/cm Plant height	根长/cm Root length	单株干质量/mg Dry mass per plant	叶绿素 *a* 含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll *a* content	叶绿素 *b* 含量/(mg·g^{-1}) Chlorophyll *b* content
0.0	29.30±0.72a	23.60±1.11a	58.33±2.52a	0.81±0.04a	0.36±0.02a
0.5	28.17±0.25b	21.07±1.10b	52.33±3.06b	0.72±0.03b	0.34±0.03a
1.0	27.27±0.50bc	17.73±0.50c	44.67±3.51c	0.66±0.02bc	0.31±0.07ab
2.5	26.53±0.35c	15.27±0.21d	35.33±1.53d	0.61±0.06c	0.25±0.04b

[1)] 同列中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($p<0.05$).

2.2 PS-MPs对狐尾藻叶片抗氧化系统的影响

结果(表2)显示:随着PS-MPs质量分数升高,狐尾藻叶片抗氧化酶活性均呈先上升后下降的趋势。与质量分数0.0% PS-MPs(CK)组相比,质量分数0.5%PS-MPs处理组的超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶活性显著升高($p<0.05$),分别较CK组升高7.52%、11.43%和12.36%;而质量分数1.0%和2.5%PS-MPs处理组3种酶活性均显著降低,且在质量分数2.5%PS-MPs处理组降至最低,分别较CK组降低16.30%、16.14%和35.44%。丙二醛含量随PS-MPs质量分数的升高而显著上升,质量分数0.5%、1.0%和2.5% PS-MPs处理组分别较CK组升高15.24%、41.03%和67.29%。

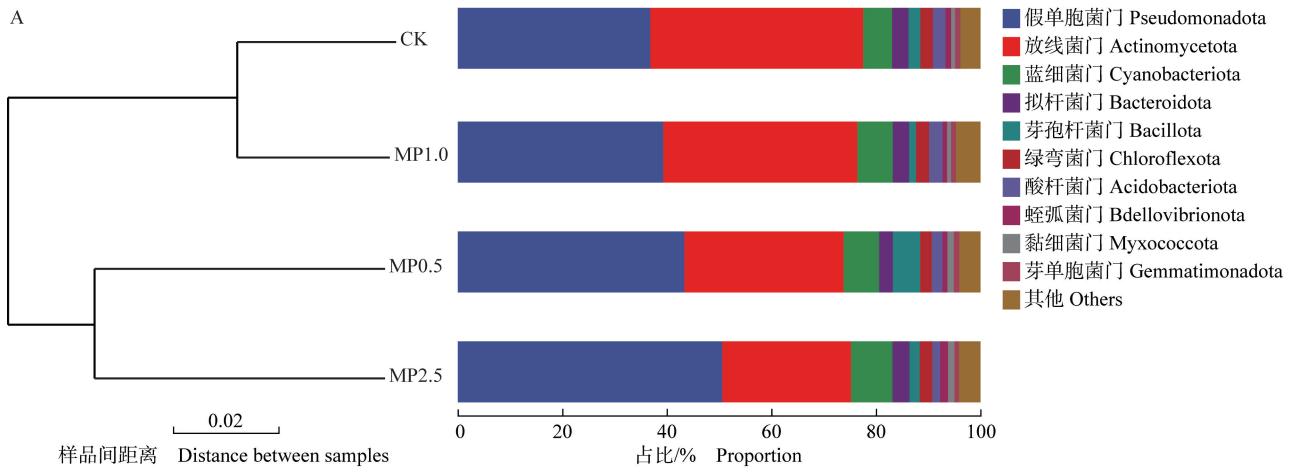
2.3 PS-MPs对狐尾藻根际和沉积物细菌群落的影响

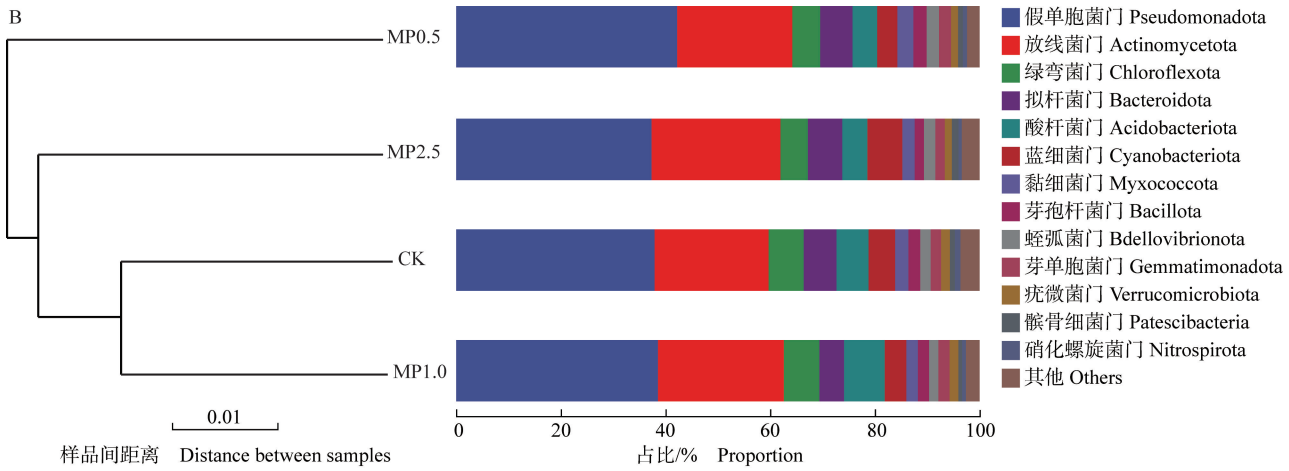
结果(图1)表明:添加不同质量分数PS-MPs改变了狐尾藻根际细菌群落结构,但对沉积物细菌群落结构的影响较小。在狐尾藻根际细菌群落中,各处理组中放线菌门(Actinomycetota)占比总体随PS-MPs质量分数升高而减小;假单胞菌门(Pseudomonadota)占比均大于质量分数0.0%PS-MPs(CK)组,取代放线菌门成为最优势门。在沉积物细菌群落中,放线菌

表2 不同质量分数PS-MPs处理对狐尾藻叶片抗氧化系统的影响($\bar{X}\pm SD$)[1)]
Table 2 Effects of different mass fractions of PS-MPs treatments on the antioxidant system of leaves of *Myriophyllum verticillatum* Linn. ($\bar{X}\pm SD$)[1)]

PS-MPs质量分数/% Mass fraction of PS-MPs	A_{SOD}/(U·g^{-1})	A_{POD}/(U·g^{-1})	A_{CAT}/(U·g^{-1})	w_{MDA}/(nmol·g^{-1})
0.0	201.07±0.47b	182.20±0.26b	55.03±0.31b	8.53±0.21d
0.5	216.20±0.30a	203.03±0.21a	61.83±0.59a	9.83±0.15c
1.0	186.70±0.40c	164.60±0.26c	48.20±0.66c	12.03±0.57b
2.5	168.30±0.46d	152.80±0.82d	35.53±0.31d	14.27±0.35a

[1)] A_{SOD}:超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity; A_{POD}:过氧化物酶活性 Peroxidase activity; A_{CAT}:过氧化氢酶活性 Catalase activity; w_{MDA}:丙二醛含量 Malondialdehyde content. 同列中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$) Different lowercases in the same column indicate the significant differences ($p<0.05$).





CK：质量分数 0.0%PS-MPs Mass fraction of 0.0% PS-MPs；MP0.5：质量分数 0.5%PS-MPs Mass fraction of 0.5% PS-MPs；MP1.0：质量分数 1.0% PS-MPs Mass fraction of 1.0% PS-MPs；MP2.5：质量分数 2.5%PS-MPs Mass fraction of 2.5% PS-MPs.

图 1　不同质量分数 PS-MPs 处理对狐尾藻根际(A)和沉积物(B)细菌群落结构的影响

Fig. 1　Effects of different mass fractions of PS-MPs treatments on the bacterial community structure of rhizosphere of *Myriophyllum verticillatum* Linn. (A) and sediment (B)

门占比随 PS-MPs 质量分数升高呈增大趋势。

由表 3 可见：在狐尾藻根际细菌群落中，各处理组的 Sobs 指数、Shannon 指数、Chao 指数、Ace 指数与 CK 组相比均无显著差异。随 PS-MPs 质量分数升高，狐尾藻根际细菌群落的 Sobs 指数、Chao 指数和 Ace 指数呈先降低后升高再降低的趋势，但均低于 CK 组；而 Shannon 指数呈先升高后降低再升高的趋势。质量分数 0.5%、1.0%、2.5%PS-MPs 处理组沉积物细菌群落的 Sobs 指数、Shannon 指数、Chao 指数、Ace 指数均低于 CK 组。在沉积物细菌群落中，随 PS-MPs 质量分数升高，4 个指数呈现先降低后升高的趋势，其中，仅质量分数 0.5%PS-MPs 处理组的 Sobs 指数、Chao 指数、Ace 指数显著低于($p<0.05$) CK 组。

2.4　PS-MPs 质量分数与狐尾藻生长、生理指标间的相关性分析

结果(表 4)显示：PS-MPs 质量分数与狐尾藻生长指标(株高、根长和单株干质量)、叶绿素 *a* 含量、抗氧化酶(超氧化物歧化酶、过氧化物酶和过氧化氢酶)活性呈极显著负相关($p<0.01$)，与叶绿素 *b* 含量呈显著负相关($p<0.05$)，与丙二醛含量呈极显著正相关。

表 3　不同质量分数 PS-MPs 处理对狐尾藻根际和沉积物细菌群落 *α* 多样性指数的影响($\bar{X}\pm SD$)[1)]

Table 3　Effects of different mass fractions of PS-MPs treatments on *α*-diversity indices of bacterial communities of rhizosphere of *Myriophyllum verticillatum* Linn. and sediment ($\bar{X}\pm SD$)[1)]

PS-MPs 质量分数/% Mass fraction of PS-MPs	Sobs 指数 Sobs index	Shannon 指数 Shannon index	Chao 指数 Chao index	Ace 指数 Ace index
狐尾藻根际细菌群落 *M. verticillatum* rhizosphere bacterial community				
0.0	1 792.0±440.5a	4.73±0.15a	2 101.3±639.6a	2 136.2±692.3a
0.5	1 150.3±359.1a	4.90±0.75a	1 248.3±441.0a	1 240.0±448.9a
1.0	1 627.7±438.8a	4.59±0.86a	1 978.7±696.7a	2 005.4±740.5a
2.5	1 112.3±814.1a	4.98±0.41a	1 307.4±1 101.3a	1 321.7±1 131.3a
沉积物细菌群落 Sediment bacterial community				
0.0	2 963.7±72.8a	6.07±0.16a	3 628.1±98.5a	3 699.0±92.4a
0.5	2 650.3±93.1b	5.87±0.19a	3 242.2±143.9b	3 341.0±118.8b
1.0	2 752.7±6.8ab	5.80±0.13a	3 379.4±12.9ab	3 467.0±44.3ab
2.5	2 781.0±200.4ab	5.82±0.31a	3 462.0±180.4ab	3 566.1±146.9ab

[1)] 同一细菌群落同列中不同小写字母表示差异显著($p<0.05$) Different lowercases in the same column of the same bacterial community indicate the significant differences ($p<0.05$).

表4 PS-MPs质量分数与狐尾藻生长、生理指标间的相关性
Table 4 Correlations between mass fractions of PS-MPs and growth and physiological indices of *Myriophyllum verticillatum* Linn.

指标 Index	相关系数[1)] Correlation coefficient[1)]
株高 Plant height	-0.950 **
根长 Root length	-0.972 **
单株干质量 Dry mass per plant	-0.923 **
叶绿素 *a* 含量 Chlorophyll *a* content	-0.919 **
叶绿素 *b* 含量 Chlorophyll *b* content	-0.681 *
超氧化物歧化酶活性 Superoxide dismutase activity	-0.777 **
过氧化物酶活性 Peroxidase activity	-0.720 **
过氧化氢酶活性 Catalase activity	-0.741 **
丙二醛含量 Malondialdehyde content	0.979 **

[1)] *：$p<0.05$；**：$p<0.01$.

3 讨 论

3.1 PS-MPs对狐尾藻生长及叶片叶绿素含量的作用机制

PS-MPs处理显著抑制($p<0.05$)狐尾藻的生长，表现为株高、根长和单株干质量随着PS-MPs质量分数升高而下降，且与PS-MPs质量分数呈极显著负相关($p<0.01$)。根系直接接触PS-MPs，PS-MPs可吸附于根表或团聚于根际，其粗糙表面易对根系造成机械损伤[26]。PS-MPs还会堵塞根表皮细胞间隙及水分吸收通道，干扰根系对水分吸收，引发生理干旱。物理损伤与生理胁迫的叠加使木质部导管数量显著降低[27]，限制植株上部的水分和养分供给，最终导致狐尾藻生长受阻。李佳依等[28]的研究发现，高浓度聚乙烯微塑料(PE-MPs)会促进苦草〔*Vallisneria natans* (Lour.) H. Hara〕根长增加，这与本研究结果不同。这种差异可能一方面与物种特异性有关，狐尾藻根系纤细，而苦草根系粗壮，能在胁迫下通过根系伸长寻求资源，适应环境；另一方面聚合物类型也不同。未来研究需在统一实验体系中比较不同物种与聚合物类型，以明确主因。

叶绿素 *a* 与叶绿素 *b* 作为光合作用的关键色素，其含量变化可反映植物光合能力的强弱。随着PS-MPs质量分数升高，狐尾藻叶片叶绿素 *a* 和叶绿素 *b* 含量呈下降趋势。这可能因为PS-MPs颗粒附着于叶片表面产生遮蔽效应，抑制光合色素合成[29]；PS-MPs诱导的活性氧(ROS)积累破坏叶绿体膜结构，导致叶绿素含量下降[30-31]。与狐尾藻叶片叶绿素 *a* 含量在各质量分数PS-MPs处理下均较质量分数0.0% PS-MPs(CK)组显著下降不同，叶绿素 *b* 含量在质量分数0.5%和1.0%PS-MPs处理下虽降低但与CK组无显著差异，这与张晨等[13]关于黑藻在PS-MPs胁迫下叶绿素 *b* 含量下降不显著的研究结果相符。这可能是因为叶绿素 *b* 的合成与转化途径所受干扰有限，其生理功能仍维持稳定[32]。叶绿素 *b* 含量在质量分数2.5%PS-MPs处理下较CK组显著下降，这可能因为质量分数2.5%PS-MPs超过狐尾藻的耐受能力。光合色素含量的持续降低，减弱了光合作用，从而限制有机物的合成与能量供应，导致植物根长、株高及单株干质量的增长受到抑制。

3.2 PS-MPs对狐尾藻抗氧化系统的作用机制

随着PS-MPs质量分数升高，狐尾藻叶片抗氧化酶活性呈先升高后降低的趋势。低质量分数的PS-MPs能激活狐尾藻抗氧化系统，应对自身所受到的胁迫。这与陆灿等[33]研究中低质量浓度PS-MPs激活黑藻的抗氧化酶活性一致。随着PS-MPs质量分数升高，ROS生成速率超过抗氧化系统的清除能力，造成酶系统的损伤或失活，导致酶活性下降。此外，高浓度微塑料还可能限制植物对锰、铁等微量元素(抗氧化酶辅基的重要组成部分)的吸收[34]，进一步削弱其抗氧化能力，加剧氧化损伤。与抗氧化酶活性变化趋势相反，丙二醛含量随PS-MPs质量分数升高呈显著上升($P<0.05$)趋势。说明随着PS-MPs质量分数升高，狐尾藻细胞膜脂过氧化和膜结构损伤加重，抗氧化系统已无法完全清除过量ROS。

3.3 PS-MPs对狐尾藻根际和沉积物细菌群落结构的作用机制

植物根际和沉积物微生物是生态系统物质循环与能量流动的核心，其群落结构易受外源污染物影响。PS-MPs对狐尾藻根际和沉积物细菌群落的影响存在明显差异。狐尾藻根际细菌群落随PS-MPs质量分数升高发生改变；而添加PS-MPs对沉积物细菌群落扰动较小，整体较为稳定。

狐尾藻根际细菌群落中，PS-MPs明显促进假单胞菌门生长，使其取代放线菌门成为最优势类群。其原因可能在于，PS-MPs改变了根系分泌物总量、氧化还原电位等根际微环境特征[35-36]，为假单胞菌门的增殖提供了适宜条件。假单胞菌门具备较强的有机物降解能力，广泛参与土壤氮素转化过程，与硝化、反硝化作用密切相关[37]。该门多数类群可驱动反硝

化过程，其大量富集可能加速根际有效态硝酸盐向气态氮转化，导致植物可直接吸收利用的氮素流失。放线菌门在有机质降解与养分矿化中发挥关键作用[38]，其占比下降会削弱根际有机养分的矿化效率。氮素流失加剧与养分供给不足共同造成狐尾藻根系营养胁迫，这与本研究中 PS-MPs 抑制狐尾藻根系生长，且根长与 PS-MPs 质量分数呈极显著负相关相印证。根系为获取养分需消耗更多能量，加剧植株上部碳分配紧张，最终导致单株干质量显著降低。此外，放线菌群落能诱导植物系统抗性(ISR)[39]，其占比下降，意味着狐尾藻可获得的细菌信号诱导减弱，使其应对微塑料胁迫的抗氧化系统启动不足。这可能是在质量分数 1.0%和 2.5%PS-MPs 处理下，狐尾藻抗氧化酶系统由“激活”转为“抑制”的内在原因。沉积物中，放线菌门占比随 PS-MPs 质量分数升高呈上升趋势，说明该类群对微塑料具有较强耐受性，甚至可将微塑料作为附着基质或碳源实现增殖[40]。Ren 等[41]研究也发现，微塑料可提高放线菌门丰度，表明放线菌门在微塑料污染的沉积物生境中具有竞争优势。

4　结　　论

PS-MPs 污染对狐尾藻具有显著的“浓度”效应，表现为植株生长、生理特性以及根际和沉积物细菌群落结构的改变。PS-MPs 对狐尾藻叶片抗氧化酶活性具有“低促高抑”作用，在低浓度 PS-MPs 处理下，表现出一定的生理调节能力，但在质量分数 2.5% PS-MPs 处理下，抗氧化系统的动态平衡被打破并伴随膜脂过氧化损伤。PS-MPs 对狐尾藻根际和沉积物细菌群落结构的影响存在差异，尤其体现在放线菌门和假单胞菌门的响应上，PS-MPs 可能通过重塑狐尾藻根际细菌群落结构，间接干扰狐尾藻的生理代谢。因此，在利用狐尾藻进行水体生态修复时，微塑料污染物可能会削弱其生长优势与修复潜力。未来研究应结合宏基因组学与代谢组学技术，进一步从功能基因和信号分子层面揭示微塑料对植物-微生物互作系统的深层影响机制。

参考文献：

[1] Plastics Europe. Plastics: the fast facts 2024[R]. Brussels: Plastics Europe, 2024.

[2] Masry M, Rossignol S, Gardette J-L, et al. Characteristics, fate, and impact of marine plastic debris exposed to sunlight: a review [J]. Marine Pollution Bulletin, 2021, 171: 112701.

[3] Geyer R, Jambeck J R, Law K L. Production, use, and fate of all plastics ever made[J]. Science Advances, 2017, 3(7): e1700782.

[4] Liu Jianfu, Zheng Liang. Microplastic migration and transformation pathways and exposure health risks[J]. Environmental Pollution, 2025, 368: 125700.

[5] Brennecke D, Duarte B, Paiva F, et al. Microplastics as vector for heavy metal contamination from the marine environment [J]. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2016, 178: 189-195.

[6] Wang Fayuan, Yang Weiwei, Cheng Peng, et al. Adsorption characteristics of cadmium onto microplastics from aqueous solutions [J]. Chemosphere, 2019, 235: 1073-1080.

[7] Zhou Yanfei, Yang Yuyi, Liu Guihua, et al. Adsorption mechanism of cadmium on microplastics and their desorption behavior in sediment and gut environments: the roles of water pH, lead ions, natural organic matter and phenanthrene [J]. Water Research, 2020, 184: 116209.

[8] Zhang Jinghua, Chen Huangbo, He Huan, et al. Adsorption behavior and mechanism of 9-Nitroanthracene on typical microplastics in aqueous solutions[J]. Chemosphere, 2020, 245: 125628.

[9] Hüffer T, Hofmann T. Sorption of non-polar organic compounds by micro-sized plastic particles in aqueous solution[J]. Environmental Pollution, 2016, 214: 194-201.

[10] Lee H, Shim W J, Kwon J-H. Sorption capacity of plastic debris for hydrophobic organic chemicals [J]. Science of the Total Environment, 2014, 470/471: 1545-1552.

[11] Râpă M, Darie-Niță R N, Matei E, et al. Insights into anthropogenic micro- and nanoplastic accumulation in drinking water sources and their potential effects on human health [J]. Polymers, 2023, 15(11): 2425.

[12] Pfaller J B, Goforth K M, Gil M A, et al. Odors from marine plastic debris elicit foraging behavior in sea turtles[J]. Current Biology, 2020, 30(5): R213-R214.

[13] 张　晨，简敏菲，陈宇蒙，等. 聚苯乙烯微塑料对黑藻生长及生理生化特征的影响[J]. 应用生态学报，2021，32(1)：317-325.

[14] 曹芷夕，姜晓业，王炫博，等. 微塑料对金鱼藻和黑藻生长及生理特征的影响[J]. 环境科学，2025，46(11)：6930-6939.

[15] Li Xiaowei, Qin Hongjie, Tang Na, et al. Microplastics enhance the invasion of exotic submerged macrophytes by mediating plant functional traits, sediment properties, and microbial communities [J]. Journal of Hazardous Materials, 2024, 469: 134032.

[16] 李金辉，丁　薇，翁贵英，等. 明湖国家湿地公园 10 种水生植物的重金属富集特征[J]. 水生态学杂志，2020，41(1)：86-91.

[17] 吴晓梅，叶美锋，余建英，等. 狐尾藻对重金属锌的富集及体内分布特征[J]. 福建农业学报，2025，40(2)：198-207.

[18] 李一丹，万鹰昕，宋艳艳，等. 沉水植物在复合重金属污染底

泥中的生理特性及富集效应[J]. 有色金属(冶炼部分), 2023(1): 75-81.

[19] 周淑贤, 傅明辉. 四种水生植物对富营养化水体中氮和磷的去除[J]. 广东化工, 2024, 51(19): 23-25.

[20] 李先瑞, 杨国建, 洪 波, 等. 狐尾藻对富营养化水体的治理效果分析[J]. 中国资源综合利用, 2022, 40(11): 189-191.

[21] 伏桂仙, 曹伟张, 陶 俊, 等. 12种水生植物对富营养化水体的净化效果[J]. 环境科学与技术, 2021, 44(增刊2): 308-315.

[22] Zhang Shuwu, Pei Lei, Zhao Yanxin, et al. Effects of microplastics and nitrogen deposition on soil multifunctionality, particularly C and N cycling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 451: 131152.

[23] Zhou Yanfei, He Gang, Bhagwat G, et al. Nanoplastics alter ecosystem multifunctionality and may increase global warming potential[J]. Global Change Biology, 2023, 29(14): 3895-3909.

[24] Zhou Zhidong, Hua Jianfeng, Xue Jianhui, et al. Polyethylene microplastic and soil nitrogen dynamics: unraveling the links between functional genes, microbial communities, and transformation processes[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 458: 131857.

[25] 李合生. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2000.

[26] Kalčíková G, Gotvajn A Z, Kladnik A, et al. Impact of polyethylene microbeads on the floating freshwater plant duckweed *Lemna minor*[J]. Environmental Pollution, 2017, 230: 1108-1115.

[27] Liu Yiyang, Xu Fangji, Ding Liping, et al. Microplastics reduce nitrogen uptake in peanut plants by damaging root cells and impairing soil nitrogen cycling[J]. Journal of Hazardous Materials, 2023, 443: 130384.

[28] 李佳依, 鲁 仙, 赵志淼, 等. 水-苦草-沉积物系统对聚乙烯微塑料的响应[J]. 环境科学, 2024, 45(8): 4610-4618.

[29] 赵永乐, 张 妍. 水体中微塑料和抗生素相互作用及复合毒性的研究进展[J]. 华东师范大学学报(自然科学版), 2026(1): 25-42.

[30] 张晓宇, 王 椰, 张功领, 等. 镍胁迫对紫花苜蓿种子萌发及生长生理的影响[J]. 北方园艺, 2021(17): 59-65.

[31] Moinuddin M, Gulzar S, Hameed A, et al. Differences in photosynthetic syndromes of four halophytic marsh grasses in Pakistan[J]. Photosynthesis Research, 2017, 131: 51-64.

[32] 张 晨. 模拟水环境中沉水植物对聚苯乙烯微塑料和镉胁迫的响应[D]. 南昌: 江西师范大学, 2022: 29-30.

[33] 陆 灿, 姜翠玲, 冯亚坤, 等. 两种沉水植物对聚乳酸微塑料胁迫的生长和生理响应[J]. 环境科学学报, 2024, 44(11): 378-385.

[34] Wang Congcong, Luo Qing, Zhang Jieliu, et al. Toxic effects of microplastics and nanoplastics on plants: a global meta-analysis[J]. Environmental Pollution, 2023, 337: 122593.

[35] 李瑞杰, 杨 杰, 涂 晨, 等. 微塑料对小麦根系钾、钙、镉元素吸收及根系分泌物释放的影响[J]. 中国无机分析化学, 2025, 15(7): 907-916.

[36] Mu Li, Gao Ziwei, Wang Mengyuan, et al. The combined toxic effects of polystyrene microplastics and arsenate on lettuce under hydroponic conditions[J]. Toxics, 2025, 13(2): 86.

[37] 韩志杰, 崔育倩, 夏娜娜, 等. 改性玄武岩纤维强化人工湿地处理抗生素废水[J]. 中国环境科学, 2025, 45(12): 6914-6923.

[38] 徐志伟, 陈学梅, 魏云林, 等. 基于宏基因组分析纳帕海高原湿地微生物及其碳氮代谢多样性[J]. 生物工程学报, 2021, 37(9): 3276-3292.

[39] 林 辉, 邹 烨, 黄 欣, 等. 太子参灰霉病拮抗放线菌的分离与鉴定[J]. 亚热带农业研究, 2025, 21(2): 136-143.

[40] 徐文卿, 刘雨森, 胡 敏, 等. 微塑料对砷污染土壤中微生物群落和砷形态转化的影响[J]. 分析测试学报, 2024, 43(8): 1220-1226.

[41] Ren Xinwei, Tang Jingchun, Liu Xiaomei, et al. Effects of microplastics on greenhouse gas emissions and the microbial community in fertilized soil[J]. Environmental Pollution, 2020, 256: 113347.

(责任编辑: 张明霞)