

根系分泌物对纳米塑料颗粒团聚效果的影响

徐 源^{1,2}, 任玲芸^{1,2}, 王新莹^{1,2}, 唐中华^{1,2}, 王洪政^{1,2*}

¹东北林业大学化学化工与资源利用学院, 黑龙江 哈尔滨

²东北林业大学, 森林植物生态学教育部重点实验室, 黑龙江 哈尔滨

收稿日期: 2025年4月11日; 录用日期: 2025年5月19日; 发布日期: 2025年5月31日

摘要

微/纳米塑料作为全球性环境污染物, 广泛存在于各类环境介质中。现有研究已证实其对植物的生长发育存在不利影响, 然而植物根系对微/纳米塑料颗粒环境行为的作用却知之甚少。本研究选用携带不同电荷的聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)和蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* var. *mongholicus* (Bunge) P.K. Hsiao)为对象, 通过植物水培实验与人工模拟根系分泌物, 探究根系分泌物对纳米塑料颗粒团聚行为的影响。结果表明, 与1/2霍格兰营养液相比, 水培蒙古黄芪根系的存在显著增大了培养液中浓度为50和100 mg/L的不同电荷PSNPs的平均水合粒径, 且对携带正电荷的PSNPs的影响明显大于未带电及携带负电荷的PSNPs。此外, PSNPs平均水合粒径随培养植物数量的增加而增大。人工模拟根系分泌物中, 糖类对PSNPs团聚的促进作用明显强于有机酸, 且在无菌条件下该促进作用有所减弱。研究结果显示, 植物根系可通过增加分泌物的产生促进PSNPs团聚, 以减轻PSNPs的毒害效应, 其中根系分泌物中的糖类物质起主要作用, 微生物活动也有重要的促进作用。

关键词

纳米塑料, 根系分泌物, 蒙古黄芪, 团聚效果, 官能团

The Influence of Root Exudates on the Aggregation Effect of Nanoplastics Particles

Yuan Xu^{1,2}, Lingyun Ren^{1,2}, Xinying Wang^{1,2}, Zhonghua Tang^{1,2}, Hongzheng Wang^{1,2*}

¹College of Chemistry, Chemical Engineering and Resource Utilization, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

²Key Laboratory of Forest Plant Ecology, Ministry of Education, Northeast Forestry University, Harbin Heilongjiang

Received: Apr. 11th, 2025; accepted: May 19th, 2025; published: May 31st, 2025

*通讯作者。

文章引用: 徐源, 任玲芸, 王新莹, 唐中华, 王洪政. 根系分泌物对纳米塑料颗粒团聚效果的影响[J]. 植物学研究, 2025, 14(3): 208-219. DOI: 10.12677/br.2025.143024

Abstract

As a global environmental pollutant, micro-nanoplastics are widely distributed in various environmental media. Existing studies have determined that micro-nanoplastics in the environment have an adverse impact on the growth and development of plants. However, little is known about the role of plant roots in the environmental behavior of micro-nanoplactic particles. In this study, polystyrene nanoparticles (PSNPs) with different charges and *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus* (Bunge) P.K. Hsiao were used as research objects. Through plant hydroponic experiments and artificial simulation of root exudates, the influence of root exudates on the aggregation behavior of nanoplastics particles was investigated. The results showed that, compared with the 1/2 Hoagland nutrient solution, the presence of the roots of hydroponically cultured *Astragalus membranaceus* significantly increased the average hydrated particle size of PSNPs with different charges at concentrations of 50 and 100 mg/L in the culture solution. Among them, the influence on the positively charged PSNPs was significantly greater than that on the uncharged and negatively charged PSNPs. In addition, as the number of cultured plants increased, the average hydrated particle size of PSNPs also increased. The promotion effect of carbohydrates in the artificially simulated root exudates on the aggregation of PSNPs was significantly higher than that of organic acids, and this promotion effect was partially weakened under aseptic conditions. Our research results indicate that plant roots can promote the aggregation of PSNPs by increasing the production of exudates to reduce the toxic effects of PSNPs. Carbohydrate substances in the root exudates play a major role in this process, and microbial activities also have an important promoting effect.

Keywords

Nanoplastics, Root Exudates, *Astragalus membranaceus* var. *mongolicus*, Aggregation Effect, Functional Groups

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

塑料凭借其多功能性与便捷性已成为现代工业不可或缺的基础材料，广泛应用于生产生活各领域。然而，全球塑料年消费量突破 3.6 亿吨的现状，使得塑料废弃物的环境归趋问题日益严峻[1]。这类高分子聚合物因化学稳定性高、自然降解周期漫长(通常需数百年)，导致其在生态系统中持续富集，引发土壤板结、水体污染及生物链传递等复合型环境风险。尤其值得关注的是，塑料在环境风化过程中产生的微/纳米级次生污染物——微塑料(microplastics, MPs, 粒径 < 5 mm) [2]与纳米塑料(nanoplastics, NPs, 粒径 < 1 μm)，因其尺寸效应与高迁移性，可通过水循环系统扩散至全球范围，甚至穿透生物屏障进入人体组织，对生态系统健康和公共卫生安全构成重大威胁。

微/纳米塑料的环境行为特征与其胶体稳定性密切相关：一方面，颗粒在介质中的持久悬浮状态会提升生物可利用性，研究表明其环境存留时间与生物累积效率呈显著正相关[3]；另一方面，通过团聚-解聚动态过程形成的尺寸变化会显著影响其毒性效应，例如水环境中纳米塑料的聚沉作用可通过降低有效浓度减轻生态风险[4]。影响此类颗粒稳定性的关键参数包括离子强度、有机质组成及表面电荷特性等，其中 Zeta 电位作为表征表面电荷的核心指标，直接决定颗粒间 DLVO 作用力(范德华吸引力与双电层斥

力的平衡关系)[5]。表面官能团修饰可显著改变纳米塑料的生物效应,不同电荷属性的颗粒呈现差异化的生物富集模式。纳米材料的阳离子表面更易与膜磷脂负电区域结合,其表面电荷状态还调控蛋白质等生物大分子的吸附能力,进而影响体内分布与清除效率。带正电微粒通过与脂质双分子层的高亲和力结合促进内吞作用,细胞摄入效率遵循正电>中性>负电的层级特征,阳离子微粒更易被膜系统捕获[6]-[8]。Della Torre 团队[9]的模型研究证实,40 nm 带电荷聚苯乙烯纳米颗粒在海洋无脊椎动物消化道内富集时,阳离子型相较阴离子型对海胆表现出更强的毒害作用。在植物与纳米塑料的互作机制研究中,根系分泌物的作用尤为重要。作为植物与环境交流的关键媒介,根系分泌物不仅参与植物对逆境的应激响应,更直接影响污染物的环境行为。研究表明,水生植物在纳米塑料胁迫下可通过代谢调控增加根系分泌物分泌量以应对环境压力[10]。李连祯等[11][12]在生菜吸收聚苯乙烯(PS)的研究中发现,PS 暴露可诱导根冠分泌大量黏液,并通过荧光标记实验证实该黏液(高度水合糖类物质)能有效捕获根际环境中的 PS 颗粒,促使其吸附于根系表面。然而,植物根系分泌物对纳米塑料团聚行为的具体调控机制仍待深入解析。

基于上述研究背景,本研究选用携带羧基(-COOH)和氨基(-NH₂)官能团的聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)及蒙古黄芪(*Astragalus membranaceus* var. *mongolicus*)为研究对象,测定 PSNPs 暴露后植株根系分泌物分泌量的动态变化。通过构建包含单一糖类、单一酸类及全成分的三类人工根系分泌物体系,多维度解析不同组分对 PSNPs 团聚行为的影响机制。研究聚焦纳米塑料在环境介质中的聚集特性及其迁移转化规律,不仅为阐明其环境行为机制提供理论依据,更为科学评估生态风险及制定污染防控策略奠定基础。

2. 材料与方法

2.1. 实验材料

本研究所用的聚苯乙烯纳米塑料均购自江苏智川科技公司,包含聚苯乙烯微球、带羧基的聚苯乙烯微球、带氨基的聚苯乙烯微球。据厂商产品信息,这三种材料均为标准球形,粒径为 100 nm,单分散于去离子水,固含量 2.5% (25 mg/ml)。为延长贮存时间并增加分散性,储存液含低于 0.5% 的表面活性剂(十二烷基硫酸钠)。

本研究的供试蒙古黄芪种子购于河北省安国市元泰药用植物种子站,存于 4℃~8℃冰箱。

2.2. 实验方法

2.2.1. 黄芪幼苗培养及处理

采用水培方式培养蒙古黄芪幼苗,先选饱满、大小一致的蒙古黄芪种子,用 3% H₂O₂ 溶液浸泡 10 min 灭菌,再用去离子水洗涤 3 次。然后将种子放入蛭石中催芽 2 天。种子萌发后,把蒙古黄芪幼苗移至 1/2 霍格兰营养液培养 3 天。适应水培环境后,选长势相同的幼苗进行暴露实验,培养液是分散在 1/2 营养液中浓度为 50 mg/L、100 mg/L 的 PS、PS-COOH、PS-NH₂ 悬浮液,每次混合液需要充分超声分散,随后将幼苗在室温下培养 7 天,每 2 天换一次培养液,每组处理设三次重复。

2.2.2. 离子强度对 PSNPs 团聚效果的测定

为探究离子强度对 PSNPs 团聚行为的影响,本研究将不同浓度 PSNPs (50 mg/L、100 mg/L) 分别与去离子水、1/2 霍格兰营养液及含有根系分泌物的 1/2 霍格兰营养液混合处理 7 天,系统测定其平均水合粒径与 Zeta 电位变化,每组处理设置三次生物学重复。

为进一步揭示根系分泌物含量对 PSNPs 团聚行为的剂量效应关系,本研究通过调控蒙古黄芪幼苗密度(0、2、4、8 株/组)实现根系分泌物含量的梯度控制。采用 50 mg/L PSNPs 溶液进行 7 天暴露处理,系统测定各处理组中 PSNPs 的平均水合粒径与 Zeta 电位动态变化,每组实验设置三次独立生物学重复。

2.2.3. 根系分泌物的收集和 TOC 含量的测定

液体培养基中的总有机碳(total organic carbon, TOC)被广泛用作衡量植物根系分泌物的一个间接指标[13]，即把总有机碳含量等同于根系分泌物含量。根系分泌物的收集方法参考 Suzuki 等[14]和 Wang 等[15]描述的方法进行收集。在各处理中选取培养后长势均一的 10 株蒙古黄芪，其根系用去离子水进行冲洗后，用 0.2 mmol/L CaSO₄ 溶液浸泡 2 h，以去除根系表面附着的所有离子；再用 30 mg/L 氯霉素溶液浸泡 30 min，防止培养过程中出现染菌情况，之后用无菌的超纯水清洗蒙古黄芪幼苗根系，随后转入装有 200 mL 无菌超纯水的棕色玻璃瓶中，在 25℃恒温培养箱中培养 24 h 后，经过 0.22 μm 的滤膜过滤后，进行冷冻干燥，放入-80℃保存，为后续进行 TOC 测试备用。

根据上述实验收集根系分泌物冻干样品取出，并保证每组质量不得少于 10 mg，进行前置处理后，使用元素分析仪(HZL10001 vario MACRO cube)测量溶液中 TOC 含量，为减少实验误差，每个处理测定 3 个重复。

2.2.4. 人工模拟根系分泌物的配置

为探究根系分泌物组分对聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)团聚行为的影响，本研究参照 Abbasi 团队[16][17]提出的方法配制人工根系分泌物：以 1/2 霍格兰营养液为基质，其中糖类组分包含葡萄糖(2100 ng/mL)、麦芽糖(686 μg/mL)和蔗糖(68.4 μg/mL)，酸类组分由草酸、柠檬酸及苹果酸构成(浓度均为 1000 ng/mL)。通过控制糖类与酸类组分的组合形式，构建全成分人工根系分泌物、单一糖类分泌物和单一酸类分泌物三类体系。实验设置 50 mg/L 与 100 mg/L 两种 PSNPs 悬浮液浓度梯度，分别与上述三类人工根系分泌物混合反应，并于 7 天培养周期后采集样品进行团聚行为测定。

2.2.5. Zeta 电位和平均水合粒径的测定

采用激光粒度仪(S0232710 Nanotrac Wave I)对培养液中不同浓度梯度及不同种类的聚苯乙烯纳米颗粒在培养液中的 Zeta 电位和水合粒径分布进行测定。在测定前，首先对悬浮液进行 100 W × 10 min 的超声分散处理(Uchen, China)，保证其分散良好，然后室温静置 30 min。测量过程中为减少实验误差，对同一样品的粒径分布和 Zeta 电位分别进行 3 次连续测量，最后结果取其平均值。测定反向散射角为 90°，平衡时间为 60 s，温度为 25℃，每个处理 3 个平行。

2.3. 数据分析

本研究中所有处理均设置 3 个平行，研究结果以平均值 ± 标准偏差(Mean ± SD)表示，采用 Microsoft Excel 2003 对数据进行算数处理，然后利用 SPSS 27.0 软件(IBM, USA)对数据进行数学统计分析。处理组间的统计学差异采用 duncan 多重比较检验，并设定当 $P < 0.05$ 时才具有显著的统计学差异。

3. 结果

3.1. 不同离子浓度对 PSNPs 团聚效果的影响

在去离子水中，三种 PSNPs 悬浮液的水合粒径呈单峰分布，且在整个实验周期内水合粒径均值均没有显著变化(图 1(a))，说明分散于去离子水中的三种 PSNPs 在 7 天内的实验周期内依然比较稳定。当介质切换为 1/2 霍格兰营养液时，三种 PSNPs 的平均水合粒径分布发生显著变化。PS-NH₂ 的平均水合粒径分布显示双主峰且最大峰值达 $10^3\text{--}10^4$ nm 区域(5500~6540 nm)，PS 颗粒分布最大峰值在 10^3 nm 左右(1156~1375 nm)，而 PS-COOH 仅出现轻微右移(图 1(b))，反映出不同表面电荷颗粒的团聚倾向差异(PS-NH₂ > PS > PS-COOH)。这说明带有正电荷的 PS-NH₂ 在 1/2 霍格兰营养液中更加容易聚集。

在去离子水环境下的三种颗粒的稳定性依然良好(图 2(a))，相比之下在 1/2 霍格兰营养液环境中三种

颗粒的平均水合粒径均有显著上升($P < 0.05$)，并且其平均水合粒径随着浓度的升高而升高。相较于去离子水环境，团聚效果最显著的是浓度为 100 mg/L 的 PS-NH₂ 处理组，其平均水合粒径增加了 42.1% ($P < 0.01$)；而团聚效果相对较弱的是浓度为 50 mg/L 的 PS-COOH 处理组，其平均水合粒径增加了 17.7% ($P < 0.05$)。相较于去离子水环境，在 1/2 霍格兰营养液中的三种 PSNPs 颗粒的 Zeta 电位的绝对值均有显著的下降($P < 0.05$)，其中，PS-NH₂ 处理组更加趋近于 0 ($P < 0.01$)，表明三种 PSNPs 颗粒在 1/2 霍格兰营养液中会持续团聚(图 2(b))。

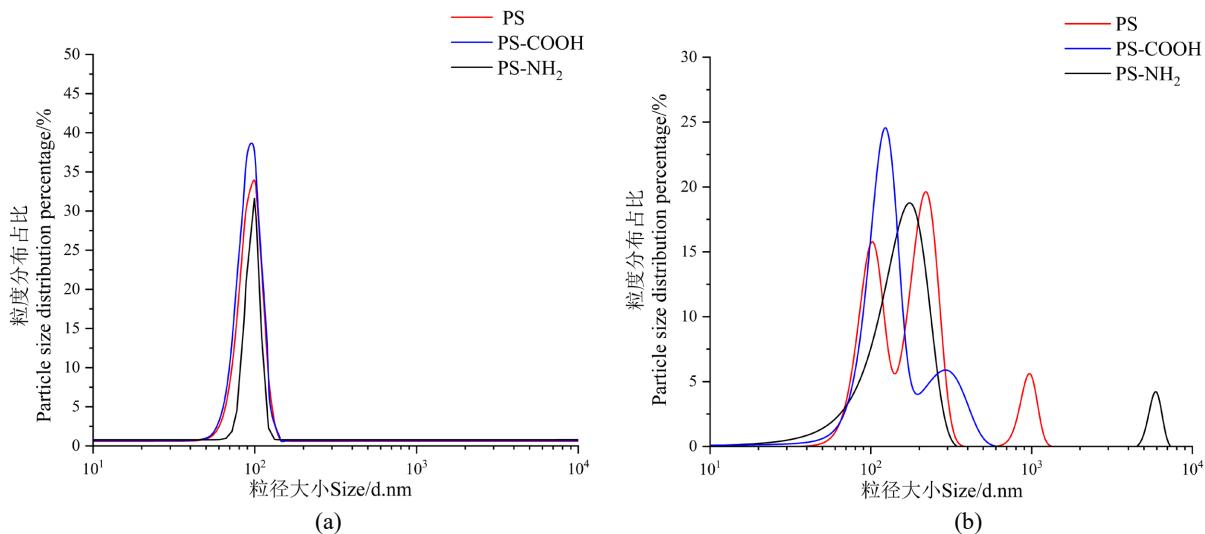
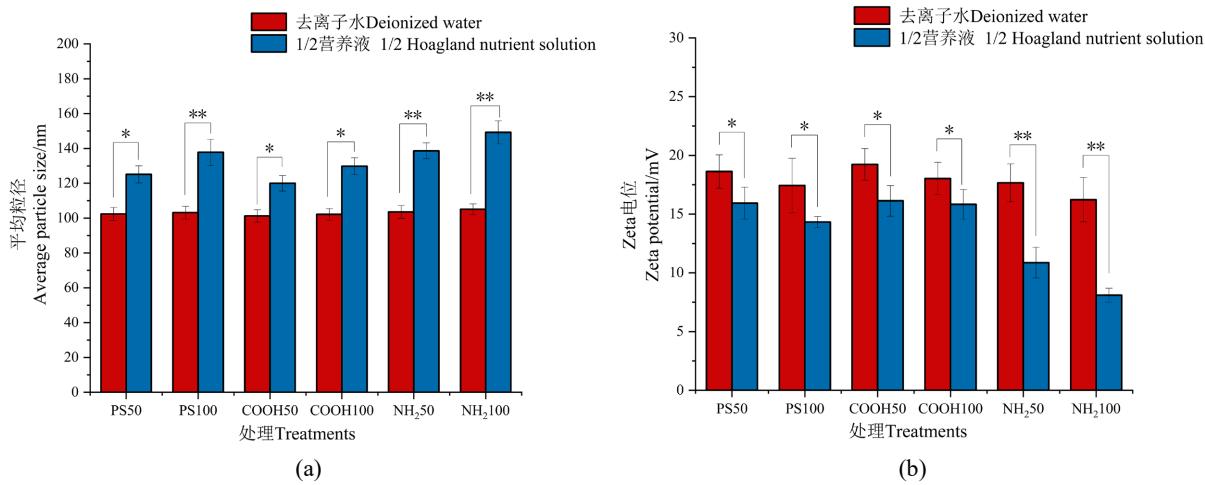


Figure 1. Changes in the particle size distribution of three types of PSNPs particles in deionized water (a) and 1/2 Hoagland nutrient solution (b) over a period of 7 days

图 1. 三种 PSNPs 颗粒在去离子水(a)和 1/2 霍格兰营养液(b)环境下 7 d 粒径分布变化



注：星号表示统计学显著差异(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$)。

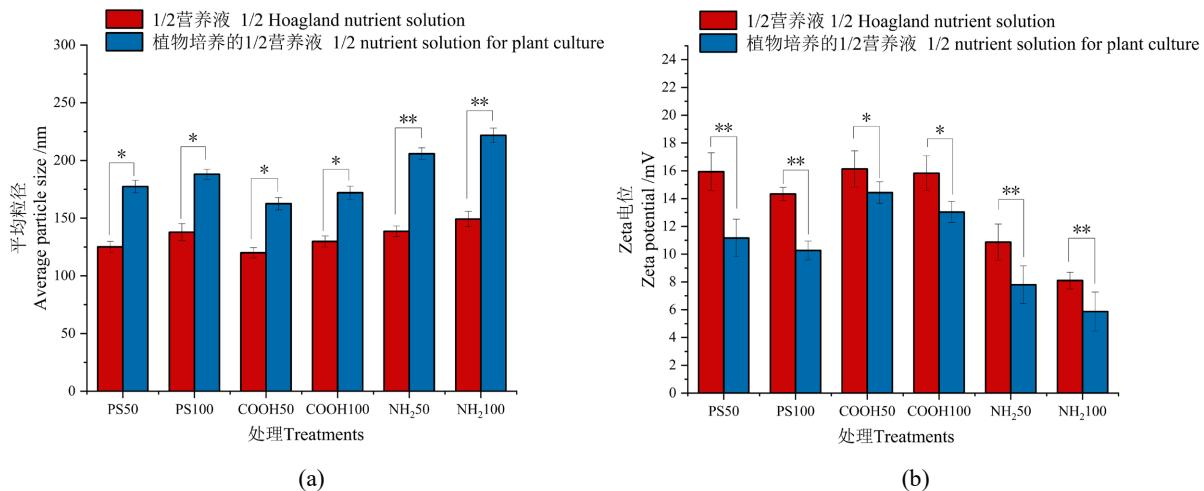
Figure 2. Average hydrated particle size (a) and the absolute value of the Zeta potential (b) of three types of PSNPs particles in deionized water and 1/2 Hoagland nutrient solution for 7 days

图 2. 三种 PSNPs 颗粒在去离子水和 1/2 霍格兰营养液环境下 7 d 平均水合粒径大小(a)及 Zeta 电位绝对值(b)

3.2. 根系分泌物对 PSNPs 团聚效果的影响

在含有根系分泌物的 1/2 霍格兰营养液中，三种 PSNPs 颗粒的团聚效果相较于在 1/2 霍格兰营养液

中的团聚效果更加明显，其平均水合粒径有明显的增加(图 3(a))，Zeta 电位的绝对值也相对更加趋近于 0 (图 3(b))，说明根系分泌物可以促进三种 PSNPs 颗粒的团聚。其中团聚效果最明显的是浓度为 100 mg/L 的 PS-NH₂ 处理组，其平均水合粒径增加了 48.6% ($P < 0.01$)；而团聚效果相对较弱的是浓度为 50 mg/L 的 PS-COOH 处理组，其平均水合粒径增加了 35.4% ($P < 0.05$)。在 Zeta 电位绝对值的测定中，相较于 1/2 霍格兰营养液环境下，PS-NH₂ 及 PS 处理组均有显著的下降($P < 0.01$)，PS-COOH 处理组也有所降低($P < 0.05$)。



注：星号表示统计学显著差异(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$)。

Figure 3. Average hydrated particle size (a) and the absolute value of the Zeta potential (b) of three types of PSNPs particles after being treated with 1/2 Hoagland nutrient solution and *Astragalus membranaceus* seedling culture solution for 7 days
图 3. 三种 PSNPs 颗粒在 1/2 霍格兰营养液与蒙古黄芪幼苗培养液处理 7 d 后的平均水合粒径大小(a)及 Zeta 电位绝对值(b)

3.3. 不同根系分泌物含量对 PSNPs 团聚效果的影响

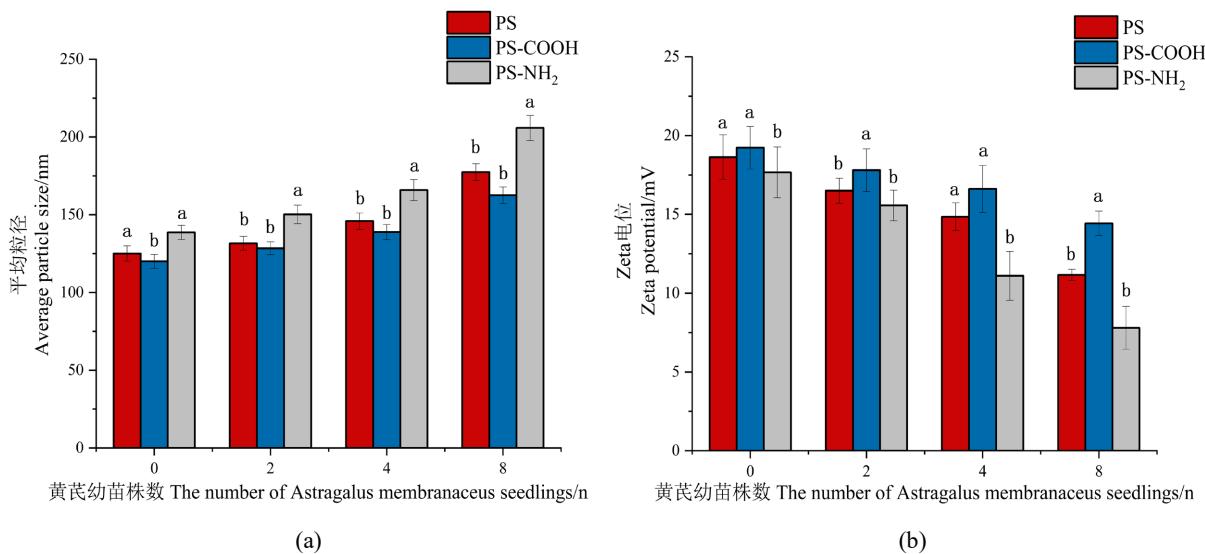
三种 PSNPs 颗粒的团聚效果随单位植株数量的增加而增强，其中 8 株蒙古黄芪幼苗处理组中三种颗粒的团聚效果最明显，平均水合粒径相较于对照组均有增加(PS-NH₂: 48.5%; PS: 41.8%; PS-COOH: 35.4%)。在 Zeta 电位绝对值的测定中也呈现对应趋势，说明三种 PSNPs 颗粒的团聚效果随根系分泌物量的增加而增强(图 4)。

3.4. PSNPs 对蒙古黄芪幼苗根系分泌物分泌量的影响

相较于对照组，三种 PSNPs 材料处理组的 TOC 含量均有显著增加($P < 0.05$)并且高浓度(100 mg/L)处理组 TOC 含量均有显著增加($P < 0.01$)，说明三种 PSNPs 颗粒处理后会增加蒙古黄芪幼苗的根系分泌物分泌量。其中 PS-NH₂ 处理组 TOC 含量显著增加($P < 0.01$)，分析得出，PS-NH₂ 对蒙古黄芪幼苗的胁迫效果最为严重(图 5)。

3.5. 根系分泌物中各物质含量对 PSNPs 团聚效果的影响

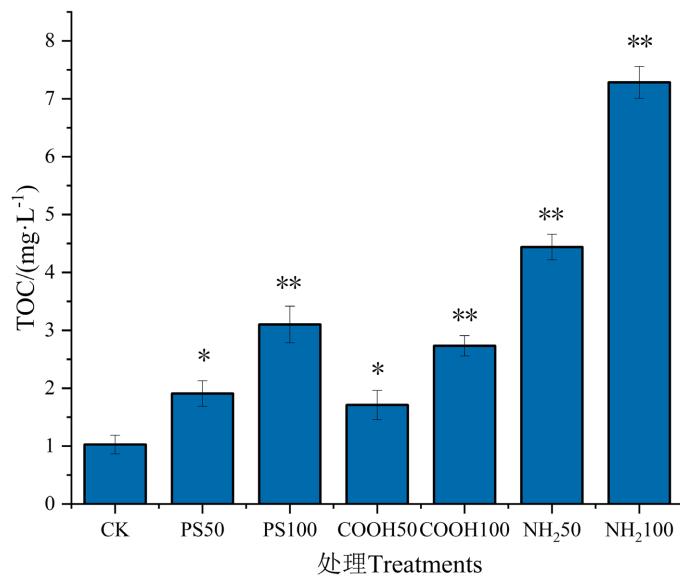
三组人工模拟根系分泌物处理的 PSNPs 颗粒团聚效果为：只含糖类人工根系分泌物 > 全人工根系分泌物 > 只含酸类人工根系分泌物(图 6)，分析得出：根系分泌物中糖类为主要促进 PS 的团聚现象的原因，酸类对 PS 的团聚有一定的缓解作用。



注：不同字母表示不同处理之间存在显著的统计学差异($P < 0.05$)。

Figure 4. Average hydrated particle size (a) and the absolute value of the Zeta potential (b) of three types of PSNPs particles after being treated with different numbers of *Astragalus membranaceus* seedlings

图 4. 三种 PSNPs 颗粒在不同数量蒙古黄芪幼苗处理后平均水合粒径大小(a)及 Zeta 电位绝对值(b)



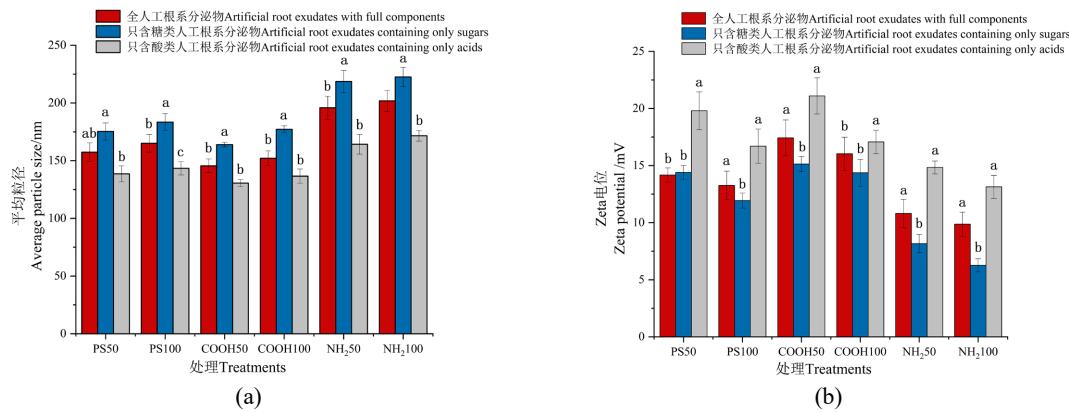
注：星号表示统计学显著差异(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$)。

Figure 5. Content of total organic carbon (TOC, mg/L) in *Astragalus membranaceus* seedlings treated with three types of PSNPs particles

图 5. 三种 PSNPs 颗粒处理蒙古黄芪幼苗的 TOC (mg/L)含量

3.6. 微生物对 PSNPs 团聚效果的影响

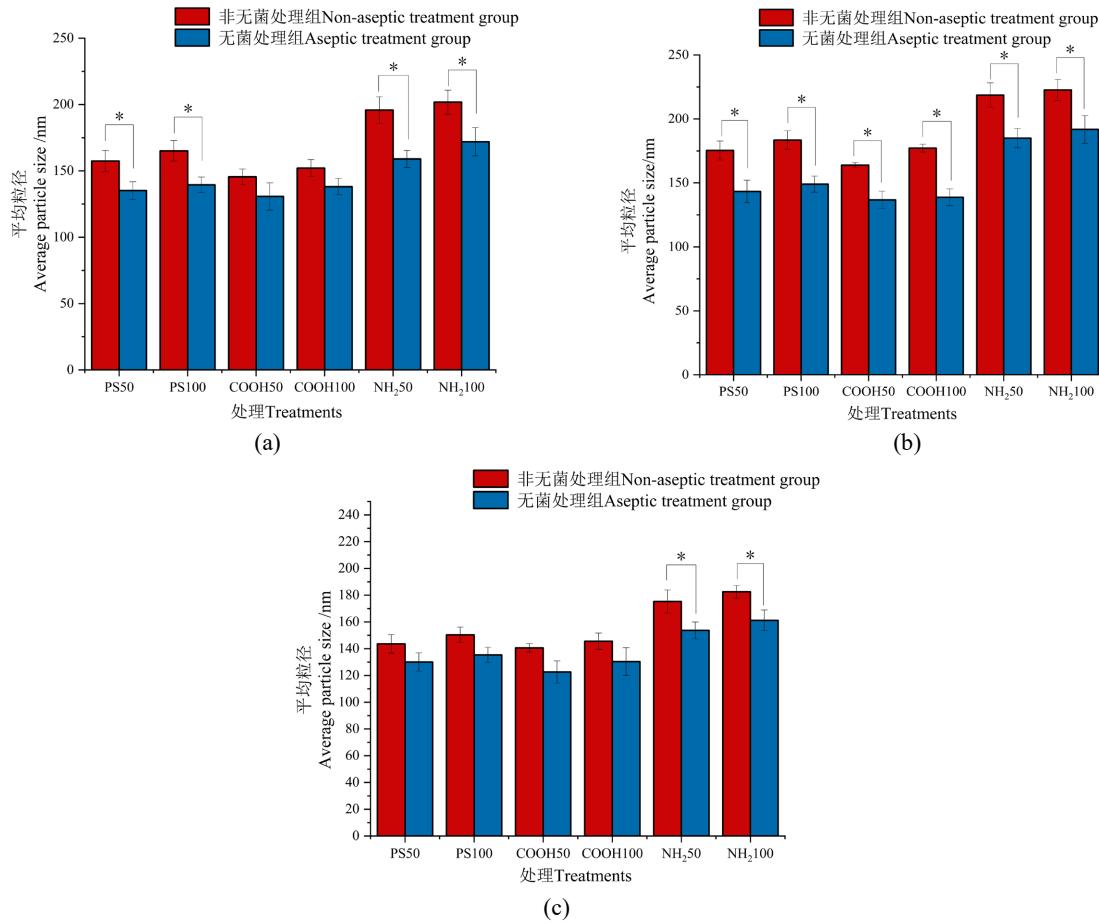
非无菌处理组的三种 PSNPs 平均水合粒径相较于无菌处理组的平均水合粒径均有增加(图 7)，其中只含糖类及全人工根系分泌物处理组均有显著增加($P < 0.05$)。非无菌处理组的 Zeta 电位绝对值明显小于无菌处理组(图 8)，说明非无菌处理中的团聚趋势更强，悬浮液更加不稳定。



注：不同字母表示不同处理之间存在显著的统计学差异($P < 0.05$)。

Figure 6. Average hydrated particle size (a) and the absolute value of the Zeta potential (b) of three types of PSNPs particles after being treated with artificial root exudates of different components

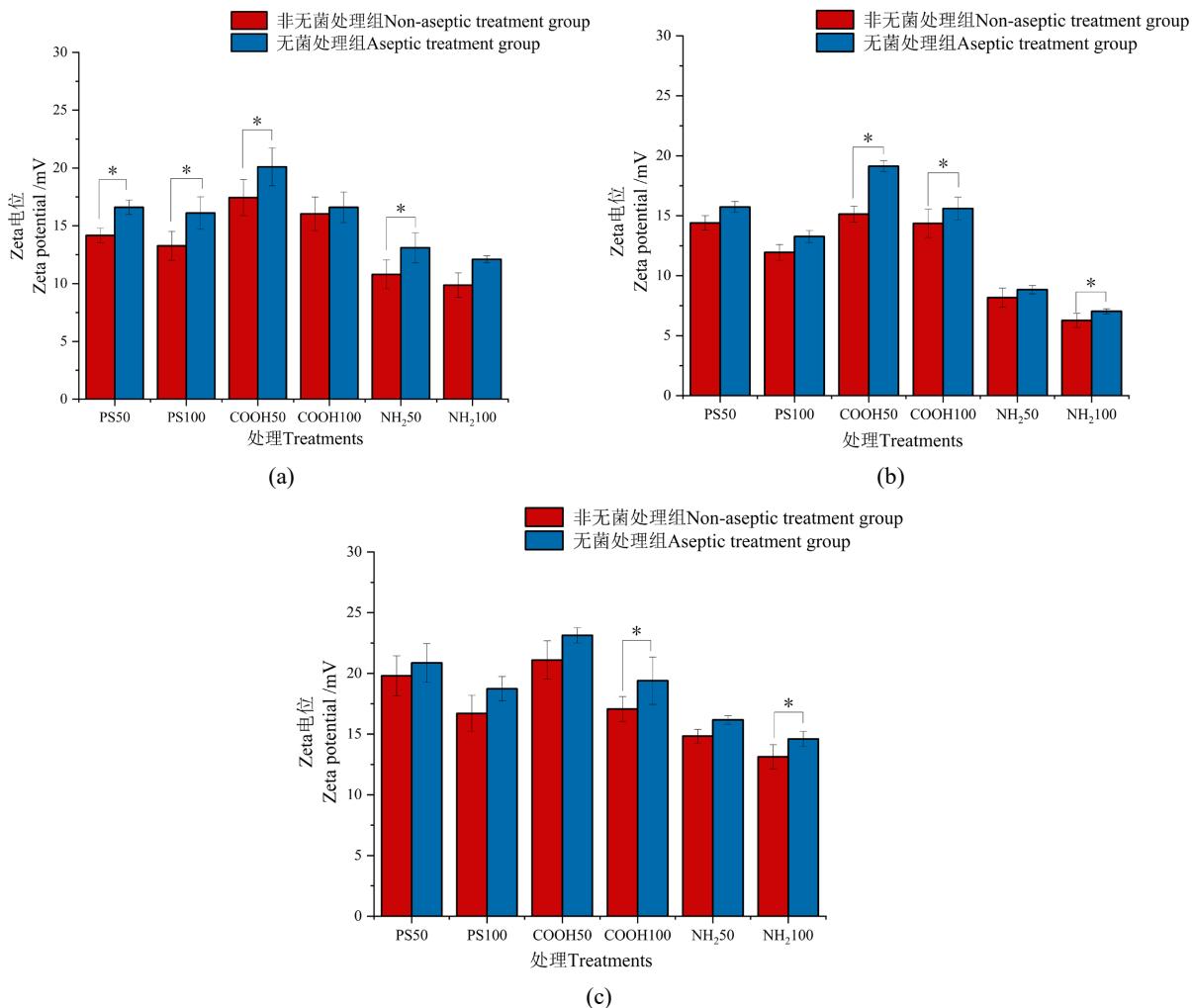
图 6. 三种 PSNPs 颗粒在不同成分人工根系分泌物处理后平均水合粒径大小(a)及 Zeta 电位绝对值(b)



注：星号表示统计学显著差异(* $P < 0.05$; ** $P < 0.01$)。

Figure 7. Average hydrated particle size of three types of PSNPs particles under sterile and non-sterile treatment conditions for artificial root exudates with different components ((a) Full artificial root exudates; (b) Artificial root exudates containing only sugars; (c) Artificial root exudates containing only acids)

图 7. 不同组分人工根系分泌物((a) 全人工根系分泌物; (b) 只含糖类人工根系分泌物; (c) 只含酸类人工根系分泌物)在无菌及非无菌处理条件三种 PSNPs 颗粒平均水合粒径大小



注：星号表示统计学显著差异($*P < 0.05$; $**P < 0.01$)。

Figure 8. Absolute values of the Zeta potential of three types of PSNPs particles for artificial root exudates with different components under sterile and non-sterile treatment conditions ((a) Full artificial root exudates; (b) Artificial root exudates containing only sugars; (c) Artificial root exudates containing only acids)

图 8. 不同组分人工根系分泌物((a) 全人工根系分泌物; (b) 只含糖类人工根系分泌物; 只含酸类人工根系分泌物)在无菌及非无菌处理条件三种 PSNPs 颗粒的 Zeta 电位绝对值

4. 讨论

依据 DLVO 理论, 胶体系统的稳定性由范德华吸引力与双电层斥力的动态平衡决定, 其中 Zeta 电位作为表征颗粒扩散层净电荷的关键参数, 其绝对值趋近于零时会导致悬浮液失稳并引发纳米颗粒聚集[18]。本研究中, 三种纳米塑料在去离子水中均保持稳定分散状态, 而在 1/2 霍格兰营养液中则呈现明显聚集现象。这一现象可能与植物培养液内高浓度阳离子(Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 K^+)及盐离子的电荷屏蔽效应密切相关, 与 Sendra 等[19]在海洋模拟体系中的研究结论形成机制呼应, 即高离子强度介质通过压缩双电层厚度, 显著增强微塑料的聚集动力学。值得注意的是, 纳米颗粒间静电斥力随表面电荷的减少而削弱[20], 根系分泌物及营养液中富含的带负电荷有机配体(如苹果酸、柠檬酸和羧基化草酸)可增强 PS 和 PS-COOH 的静电斥力, 提升其分散稳定性; 而带正电荷的 PS-NH₂ 因与负电性有机酸发生静电吸附, 表面电荷被中和, 导致其稳定性显著降低并形成较大团聚体[21]。

通过检测 TOC 含量发现，三种 PSNPs 处理组的 TOC 含量均显著高于对照组，且与 PSNPs 浓度呈正相关，表明纳米塑料胁迫可诱导蒙古黄芪幼苗增加根系分泌物分泌量。其中 PS-NH₂ 对分泌物释放的促进作用最为显著(PS-NH₂>PS>PS-COOH)，这可能源于植物对正电荷纳米颗粒毒性的应激响应——当缺乏直接应对胁迫的基因网络时，植物通过激活次生代谢途径增强特定化合物的分泌。进一步通过调控培养植株数改变根系分泌物含量的实验表明，PSNPs 团聚程度与分泌物含量呈显著正相关。Sun 等[22]关于拟南芥更易吸收负电荷羧基化 PSNPs 的实验发现，与本研究中正电荷颗粒因聚集加剧而促进分泌物释放的现象相互印证，揭示了电荷特性对颗粒 - 植物互作的关键影响。

依据种类的不同，根系分泌物可分为糖类[23][24]、氨基酸[25][26]、有机酸[27][28]、脂肪酸[29]以及生长因子[30]等几大类。根系分泌物种类繁杂，其中的各个成分具有不同的功能，为解析根系分泌物组分的作用机制，本研究构建了糖类(葡萄糖、麦芽糖、蔗糖)、酸类(草酸、柠檬酸、苹果酸)及全成分三类人工根系分泌物体系。实验表明，仅含糖类的处理组对 PSNPs 团聚的促进作用最为显著，全成分处理组团聚效应强于仅含酸类处理组。结合表面电荷分析，PS 和 PS-COOH 因高负电性在酸类环境中稳定性增强，而 PS-NH₂ 则因羧基中和作用稳定性下降。由此推断，糖类成分是驱动 PSNPs 团聚的主要因子，而有机酸通过电荷调控对团聚产生抑制作用。Yang 等[31]的银纳米颗粒研究中获得平行验证：柠檬酸的添加使 AgNPs 聚集率降低 41%，而葡萄糖促使其聚集率增加 63%，进一步佐证了这一规律。此外，微生物影响的实验显示，非无菌处理组中 PSNPs 平均水合粒径显著增加，其中糖类与全成分体系对团聚的促进效应尤为突出。余光勇[32]关于微生物粘泥吸附作用的研究为此现象提供了合理解释：糖类成分促进微生物增殖及其粘性分泌物分泌，进而通过物理吸附加剧纳米颗粒团聚。

5. 结论

本研究系统探究了表面电荷特性与离子浓度对聚苯乙烯纳米塑料(PSNPs)团聚行为的调控机制。结果表明，PS-NH₂、PS 和 PS-COOH 三种纳米塑料在去离子水中能稳定分散，但在 1/2 霍格兰营养液中呈现显著聚集趋势，团聚强度顺序为 PS-NH₂>PS>PS-COOH。动态监测显示，PSNPs 浓度从 50 mg/L 增至 100 mg/L 时，Zeta 电位绝对值逐渐趋近于零，表明植物培养液中的高浓度阳离子通过双电层压缩和电荷屏蔽效应削弱静电斥力，驱动团聚过程。

根系分泌物的促聚效应呈现剂量依赖性：50 mg/L 暴露下，PS、PS-COOH 及 PS-NH₂ 处理组的根系分泌物总有机碳(TOC)分别较对照组(1.03 mg/L)提升 85.4%、66.0% 和 331.1% ($P < 0.05$)；100 mg/L 时增量进一步扩大至 200.9%、165.0% 和 606.8% ($P < 0.01$)。通过构建糖类与酸类分离的人工根系分泌物体系，发现仅含糖类时 PSNPs 的平均水合粒径增幅为 PS-NH₂ (18.3%)>PS (10.3%)>PS-COOH (7.8%)，表明糖类通过提供微生物增殖基质及粘性载体促进团聚，而酸类组分通过羧基与 PS/PS-COOH 的静电排斥抑制聚集。此外，无菌条件下糖类的促聚效应较非无菌环境降低 63%，揭示微生物活动衍生的胞外聚合物通过物理吸附协同增强团聚效应，与粘泥吸附理论形成机制呼应。

参考文献

- [1] Thompson, R.C., Courtene-Jones, W., Boucher, J., Pahl, S., Raubenheimer, K. and Koelmans, A.A. (2024) Twenty Years of Microplastic Pollution Research—What Have We Learned? *Science*, **386**, eadl2746.
- [2] Thompson, R.C., Olsen, Y., Mitchell, R.P., Davis, A., Rowland, S.J., John, A.W.G., et al. (2004) Lost at Sea: Where Is All the Plastic? *Science*, **304**, 838-838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>
- [3] Wang, Y., Wang, Y., Shao, T., Wang, R., Dong, Z. and Xing, B. (2024) Antibiotics and Microplastics in Manure and Surrounding Soil of Farms in the Loess Plateau: Occurrence and Correlation. *Journal of Hazardous Materials*, **465**, Article ID: 133434. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2024.133434>
- [4] Deng, Y., Zeng, Z., Feng, W., Liu, J. and Yang, F. (2024) Characteristics and Migration Dynamics of Microplastics in

- Agricultural Soils. *Agriculture*, **14**, Article 157. <https://doi.org/10.3390/agriculture14010157>
- [5] Kang, M., Gong, D., Weng, Y., Huang, Y., Chen, Y., Li, F., et al. (2023) Regulatory Mechanisms of Phytotoxicity and Corona Formation on Sprouts by Differently Charged and Sized Polystyrene Micro/Nano-Plastics. *Environmental Science: Nano*, **10**, 1244-1256. <https://doi.org/10.1039/d2en00915c>
- [6] Hoshino, A., Fujioka, K., Oku, T., Suga, M., Sasaki, Y.F., Ohta, T., et al. (2004) Physicochemical Properties and Cellular Toxicity of Nanocrystal Quantum Dots Depend on Their Surface Modification. *Nano Letters*, **4**, 2163-2169. <https://doi.org/10.1021/nl048715d>
- [7] Bergami, E., Pugnalini, S., Vannuccini, M.L., Manfra, L., Falieri, C., Savorelli, F., et al. (2017) Long-Term Toxicity of Surface-Charged Polystyrene Nanoplastics to Marine Planktonic Species *Dunaliella tertiolecta* and *Artemia franciscana*. *Aquatic Toxicology*, **189**, 159-169. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2017.06.008>
- [8] Nolte, T.M., Hartmann, N.B., Kleijn, J.M., Garnæs, J., van de Meent, D., Jan Hendriks, A., et al. (2017) The Toxicity of Plastic Nanoparticles to Green Algae as Influenced by Surface Modification, Medium Hardness and Cellular Adsorption. *Aquatic Toxicology*, **183**, 11-20. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2016.12.005>
- [9] Della Torre, C., Bergami, E., Salvati, A., Falieri, C., Cirino, P., Dawson, K.A., et al. (2014) Accumulation and Embryotoxicity of Polystyrene Nanoparticles at Early Stage of Development of Sea Urchin Embryos *Paracentrotus lividus*. *Environmental Science & Technology*, **48**, 12302-12311. <https://doi.org/10.1021/es502569w>
- [10] Wang, S., AL-Hasni, N.S., Liu, Z. and Liu, A. (2024) Multifaceted Aquatic Environmental Differences between Nanoplastics and Microplastics: Behavior and Fate. *Environment & Health*, **2**, 688-701. <https://doi.org/10.1021/envhealth.4c00013>
- [11] 李连祯, 周倩, 尹娜, 等. 食用蔬菜能吸收和积累微塑料[J]. 科学通报, 2019, 64(9): 928-934.
- [12] 李瑞杰, 李连祯, 张云超, 等. 禾本科作物小麦能吸收和积累聚苯乙烯塑料微球[J]. 科学通报, 2020, 65(20): 2120-2127.
- [13] Rossi, L., Sharifan, H., Zhang, W., Schwab, A.P. and Ma, X. (2018) Mutual Effects Andin Planta Accumulation of Co-Existing Cerium Oxide Nanoparticles and Cadmium in Hydroponically Grown Soybean (*Glycine max* (L.) Merr.). *Environmental Science: Nano*, **5**, 150-157. <https://doi.org/10.1039/c7en00931c>
- [14] Suzuki, K., Okazaki, K., Tawaraya, K., Osaki, M. and Shinano, T. (2009) Gas Chromatography-Mass Spectrometry Associated Global Analysis of Rice Root Exudates under Aseptical Conditions. *Soil Science and Plant Nutrition*, **55**, 505-513. <https://doi.org/10.1111/j.1747-0765.2009.00390.x>
- [15] Wang, J., Ding, Z., Bian, J., Bo, T. and Liu, Y. (2021) Chemotaxis Response of Meloidogyne Incognita to Volatiles and Organic Acids from Root Exudates. *Rhizosphere*, **17**, Article 100320. <https://doi.org/10.1016/j.rhisph.2021.100320>
- [16] Abbasi, S., Moore, F., Keshavarzi, B., Hopke, P.K., Naidu, R., Rahman, M.M., et al. (2020) Pet-Microplastics as a Vector for Heavy Metals in a Simulated Plant Rhizosphere Zone. *Science of the Total Environment*, **744**, Article ID: 140984. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140984>
- [17] Iannucci, A., Fragasso, M., Beleggia, R., Nigro, F. and Papa, R. (2017) Evolution of the Crop Rhizosphere: Impact of Domestication on Root Exudates in Tetraploid Wheat (*Triticum turgidum* L.). *Frontiers in Plant Science*, **8**, Article 2124. <https://doi.org/10.3389/fpls.2017.02124>
- [18] Gong, Y., Bai, Y., Zhao, D. and Wang, Q. (2022) Aggregation of Carboxyl-Modified Polystyrene Nanoplastics in Water with Aluminum Chloride: Structural Characterization and Theoretical Calculation. *Water Research*, **208**, Article ID: 117884. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117884>
- [19] Sendra, M., Staffieri, E., Yeste, M.P., Moreno-Garrido, I., Gatica, J.M., Corsi, I., et al. (2019) Are the Primary Characteristics of Polystyrene Nanoplastics Responsible for Toxicity and Ad/Absorption in the Marine Diatom *Phaeodactylum tricornutum*? *Environmental Pollution*, **249**, 610-619. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2019.03.047>
- [20] Wen, Z., Li, H., Shen, Q., Tang, X., Xiong, C., Li, H., et al. (2019) Tradeoffs among Root Morphology, Exudation and Mycorrhizal Symbioses for Phosphorus-Acquisition Strategies of 16 Crop Species. *New Phytologist*, **223**, 882-895. <https://doi.org/10.1111/nph.15833>
- [21] Chen, J., Ma, R., Shi, Q., Mei, A. and Xu, Z. (2023) Aggregation of Positively Charged Polystyrene Nanoplastics in Soil-Root Systems. *Environmental Chemistry Letters*, **21**, 2483-2488. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01615-0>
- [22] Sun, X., Yuan, X., Jia, Y., Feng, L., Zhu, F., Dong, S., et al. (2020) Differentially Charged Nanoplastics Demonstrate Distinct Accumulation in *Arabidopsis Thaliana*. *Nature Nanotechnology*, **15**, 755-760. <https://doi.org/10.1038/s41565-020-0707-4>
- [23] 宋日, 刘利, 马丽艳, 等. 作物根系分泌物对土壤团聚体大小及其稳定性的影响[J]. 南京农业大学学报, 2009, 32(3): 56-60.
- [24] 潘恒艳, 崔晶晶, 韩卓君, 等. 甜菜根系对根际土壤化学性质的影响[J]. 中国糖料, 2022, 44(2): 12-17.
- [25] Zhou, T., Du, Y., Ahmed, S., Liu, T., Ren, M., Liu, W., et al. (2016) Genotypic Differences in Phosphorus Efficiency and

- the Performance of Physiological Characteristics in Response to Low Phosphorus Stress of Soybean in Southwest of China. *Frontiers in Plant Science*, **7**, Article 1776. <https://doi.org/10.3389/fpls.2016.01776>
- [26] Sao Emani, C., Gallant, J.L., Wiid, I.J. and Baker, B. (2019) The Role of Low Molecular Weight Thiols in Mycobacterium Tuberculosis. *Tuberculosis*, **116**, 44-55. <https://doi.org/10.1016/j.tube.2019.04.003>
- [27] Coskun, D., Britto, D.T., Shi, W. and Kronzucker, H.J. (2017) How Plant Root Exudates Shape the Nitrogen Cycle. *Trends in Plant Science*, **22**, 661-673. <https://doi.org/10.1016/j.tplants.2017.05.004>
- [28] 吕丰娟, 张志华, 汪瑞清, 等. 不同生育期芝麻根系分泌物对连作障碍的响应及其自毒作用[J]. 中国油料作物学报, 2021, 43(6): 1063-1072.
- [29] 杜思垚, 方娅婷, 鲁剑巍. 根系分泌物对作物养分吸收利用的影响研究进展[J]. 华中农业大学学报, 2023, 42(2): 147-157.
- [30] Chen, Y., Bonkowski, M., Shen, Y., Griffiths, B.S., Jiang, Y., Wang, X., et al. (2020) Root Ethylene Mediates Rhizosphere Microbial Community Reconstruction When Chemically Detecting Cyanide Produced by Neighbouring Plants. *Microbiome*, **8**, Article No. 4. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0775-6>
- [31] Yang, J., Duan, H., Wang, X., Zhang, H. and Zhang, Z. (2022) Effects of Rice Root Exudates on Aggregation, Dissolution and Bioaccumulation of Differently-Charged Ag Nanoparticles. *RSC Advances*, **12**, 9435-9444. <https://doi.org/10.1039/d2ra00229a>
- [32] 余光勇. 敞开式循环冷却水中微生物控制方法的探析[J]. 工业水处理, 2008, 28(12): 88-90.