

田莉莉, 马丽雅, 万 群, 等. 老化处理对纳米塑料在作物中的积累、转运及亚细胞分布的影响[J]. 江苏农业学报, 2026, 42(6): 1092-1103.

doi: 10.3969/j.issn.1000-4440.2026.06.002

# 老化处理对纳米塑料在作物中的积累、转运及亚细胞分布的影响

田莉莉<sup>1</sup>, 马丽雅<sup>1</sup>, 万 群<sup>1</sup>, 程金金<sup>1</sup>, 王 亚<sup>1</sup>, 季 荣<sup>2</sup>, 余向阳<sup>1</sup>

(1.江苏省农业科学院农产品质量与安全营养研究所, 省部共建国家重点实验室培育基地-江苏省食品安全重点实验室, 江苏 南京 210014; 2.南京大学环境学院, 水污染控制与资源绿色循环全国重点实验室, 江苏 南京 210023)

**摘要:** 纳米塑料在农田土壤-作物系统中的环境行为及生物效应备受关注。老化纳米塑料的理化性质会发生改变, 进而影响其在作物体内的归趋, 但影响机制尚不明确。本研究通过紫外光加速老化处理制备具有环境特征的聚苯乙烯(PS)纳米塑料, 并利用<sup>14</sup>C同位素示踪技术, 系统对比了原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在水稻幼苗和青菜中的积累、转运及亚细胞分布的差异。结果表明, 原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料均主要积累于根部, 向地上部的转运系数较低; 但与原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理相比, 老化处理促进了<sup>14</sup>C-PS纳米塑料从根部向茎叶的转运, 且在水培条件下促进效应更明显。亚细胞分布结果表明, 原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料主要积累于根部细胞壁(>98.0%), 而老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在细胞器和可溶性组分中的占比明显增加, 表明老化处理改变了<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在细胞层面的分布特征。抑制剂试验结果表明, 原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在作物体内的积累不受抑制剂的显著影响, 而老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在作物体内的积累则表现出明显的能量依赖性, 并且受到水通道蛋白调控。本研究结果可以为评估老化纳米塑料的环境风险与食品安全风险提供科学依据。

**关键词:** 微塑料; 纳米塑料; 光老化; 积累; 转运; 亚细胞分布; 聚苯乙烯

**中图分类号:** X592      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-4440(2026)06-1092-12

## Effects of aging treatment on the accumulation, translocation, and subcellular distribution of nanoplastics in crops

TIAN Lili<sup>1</sup>, MA Liya<sup>1</sup>, WAN Qun<sup>1</sup>, CHENG Jinjin<sup>1</sup>, WANG Ya<sup>1</sup>, JI Rong<sup>2</sup>, YU Xiangyang<sup>1</sup>

(1. *Jiangsu Key Laboratory for Food Quality and Safety-State Key Laboratory Cultivation Base of Ministry of Science and Technology, Institute of Food Safety and Nutrition, Jiangsu Academy of Agricultural Sciences, Nanjing 210014, China*; 2. *State Key Laboratory of Water Pollution Control and Green Resource Recycling, School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China*)

**Abstract:** The environmental behavior and biological effects of nanoplastics (NPs) in soil-crop systems have attracted significant attention. The aging can significantly alter the physicochemical properties of nanoplastics, thereby influencing their fate in crops; however, the underlying mechanisms remain unclear. In this study, polystyrene (PS) nanoplastics with

environmentally relevant characteristics were prepared through ultraviolet (UV)-accelerated aging, and the differences in the accumulation, translocation, and subcellular distribution of pristine and photo-aged PS-NPs were systematically compared in rice seedlings and pak choi using <sup>14</sup>C isotopic tracing technology. The results revealed that both PS-NPs primarily accumulated in the roots, with low translocation factors to aboveground tissues. Compared

收稿日期: 2026-03-07

基金项目: 江苏省自然科学基金项目(BK20230755); 国家自然科学基金项目(32402421)

作者简介: 田莉莉(1988-), 女, 河南周口人, 博士, 副研究员, 主要从事新污染物环境行为与效应研究。(E-mail) tianlili@jaas.ac.cn

通讯作者: 余向阳, (E-mail) yuxy@jaas.ac.cn

with pristine  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs, aging treatment enhanced the translocation of  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs from roots to shoots, and this promoting effect was more pronounced under hydroponic conditions. Subcellular distribution analysis revealed that pristine  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs mainly accumulated in the root cell walls (>98.0%), whereas aged  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs exhibited a significantly increased proportion in the organelles and soluble fractions, indicating that aging altered the subcellular distribution patterns of  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs. Inhibitor assay results demonstrated that the accumulation of pristine PS-NPs was insensitive to the inhibitors, whereas the accumulation of aged  $^{14}\text{C}$ -PS-NPs exhibited significant energy dependence and was regulated by aquaporins. The results of this study can provide a scientific basis for assessing the environmental risks and food safety risks of aged nanoplastics.

**Key words:** microplastics; nanoplastics; photo-aging; accumulation; translocation; subcellular distribution; polystyrene

微塑料(MPs)通常是指环境中尺寸小于5 mm的塑料碎片或颗粒,其污染问题已经成为与全球气候变化、臭氧耗竭等并列的全球重大环境问题,也是国内外研究的热点<sup>[1-2]</sup>。随着老化过程的持续,微塑料会进一步裂解成为粒径小于1  $\mu\text{m}$ 的纳米塑料(NPs)。纳米塑料粒径更小,容易进入生物体,产生更大危害。土壤作为污染物重要的汇,其中的纳米塑料不仅会影响土壤健康和植物生长<sup>[3]</sup>,还会被植物吸收并传输到地上部分<sup>[4-5]</sup>,进而可能通过饮食途径给人体带来未知的健康风险。因此,土壤-植物系统中纳米塑料的环境归趋与污染问题亟待阐明<sup>[6-7]</sup>。

纳米塑料进入环境后,在紫外光、水分和氧气的共同作用下会发生老化。光老化过程会诱导纳米塑料表面氧化,形成羟基、羰基和羧基等含氧官能团,显著改变其表面电荷、亲水性和分散性<sup>[8]</sup>。已有研究发现老化过程促进纳米塑料在饱和土壤介质中的迁移<sup>[9]</sup>。紫外光引起的老化还会改变纳米塑料在不同离子强度水体中的稳定性,从而影响纳米塑料的迁移和潜在危害<sup>[10]</sup>。Vroom等<sup>[11]</sup>研究发现老化会促进浮游生物对微塑料的摄食,可能增加微塑料沿食物链传递的风险。然而,目前关于老化如何影响植物吸收、转运纳米塑料及其在植物体内的亚细胞分布规律的研究仍十分有限。若不考虑老化作用的影响,将造成对纳米塑料环境风险的低估,因此老化对纳米塑料在土壤-植物中迁移与转运的影响不容忽视<sup>[12-13]</sup>。

植物根系是吸收土壤中污染物的主要部位,对不同类型污染物的吸收机制不同。小分子有机污染物和离子型污染物可以通过水通道和离子通道进入根细胞<sup>[14]</sup>,而大分子颗粒物会吸附在根表面,能否进入根细胞内与颗粒物自身的大小和性质相关<sup>[15]</sup>。一般认为纳米颗粒的吸收机制是一种主动运输,包括一些细胞过程,如信号传递、物质循环和原生质膜

调控。当纳米塑料的粒径大于植物根细胞壁的孔径(3.5~5.0 nm)以及胞间连丝之间的大小(50.0~60.0 nm)时,它可能通过根表面产生的破损或者在新生侧根凯氏带未形成时进入根尖组织<sup>[4]</sup>,还可能通过胞吞作用进入植物细胞。了解纳米塑料进入植物细胞后在亚细胞组分(细胞壁、细胞器、可溶性组分)中的分布特征是揭示纳米塑料在细胞内归趋和毒性机制的重要基础。目前,关于老化过程如何影响纳米塑料在植物体内的吸收动力学及亚细胞分布的系统性研究十分有限。

目前研究中采用的纳米塑料多数是商业购买的标准化纳米塑料,与真实环境中纳米塑料的性质有所不同,但是由于缺乏有效的分离、收集方法,环境中存在的纳米塑料尚无法直接用于研究,在实验室制备老化纳米塑料是获取具有环境特征的纳米塑料的一种有效途径<sup>[16]</sup>。制备具有环境特征的老化纳米塑料,可为土壤-植物系统中老化纳米塑料迁移、转运的定量研究提供可靠的技术保障。

本研究拟通过紫外光照射得到具有环境特征的老化纳米塑料,并采用 $^{14}\text{C}$ 同位素示踪技术进行标记,制备 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料,以青菜和水稻为受试作物,系统研究土培和水培条件下原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料及老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的积累、转运规律以及亚细胞分布特征,进一步通过抑制剂试验,探讨老化处理对作物吸收纳米塑料机制的影响,建立土壤-植物系统中纳米塑料的定量检测方法,以期完善纳米塑料在土壤-植物系统中的归趋分析以及全面评价纳米塑料的环境风险提供支撑。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验材料

原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯纳米塑料和老化 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯纳米塑料均在南京大学环境学院水污染控制与资

源绿色循环全国重点实验室自行合成<sup>[17]</sup>,放射性比活度为 2 300 Bq/mg。二氯甲烷、次氯酸钠、乙醇等常规化学试剂均购自南京化学试剂股份有限公司。Yoshida 营养液和 Hoagland 营养液干粉均购自北京酷来搏科技有限公司。闪烁液购自 Meridian Biotechnologies 公司。

采集江苏省农业科学院院内的表层土(0~20 cm),风干后过 2 mm 筛,混匀备用。土壤有机碳总含量为(21.50±0.70) g/kg,全氮含量为(1.64±0.06) g/kg,全磷含量为(1.39±0.09) g/kg,全钾含量为(12.80±0.70) g/kg,土壤 pH 值为7.01±0.02。

### 1.2 老化纳米塑料的制备与表征分析

采用紫外光加速老化处理模拟纳米塑料的环境老化过程,将<sup>14</sup>C-PS纳米塑料水溶液加入石英管中,然后置于人工加速老化箱(100 W 紫外灯)中老化 7 d。对老化后的溶液进行超滤,以去除小分子杂质,获得老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料。

取少量老化前后的<sup>14</sup>C-PS纳米塑料,制成水悬浮液,采用透射电子显微镜(购自日本电子株式会社)观察其表面形貌,并用 Image J 软件统计<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的平均粒径。采用 X 射线电子能谱仪(购自 UIVAC-PHI 公司)测定<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的表面元素和官能团组成,真空系统压力为 $1\times 10^{-6}$  Pa。

采用 Zeta 电位分析仪(购自 Malvern Instruments 公司)测定原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料在去离子水中的表面电荷。利用接触角测定仪(购自 KRUSS 公司),通过粉末压片-座滴法测定原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料样品的静态水接触角,每个样品测定 3 次,取平均值±标准差。测定温度为(20±1)℃。

### 1.3 供试作物及其培养条件

青菜[*Brassica rapa* var. *chinensis* (L.) Kitam.]种子经 3%次氯酸钠消毒后播于湿润蛭石育苗穴盘(1 穴 3 粒),置于温室中培养。生长光源为发光二极管(LED)白光,光照度(10 400±400) lx,光周期 16 h/8 h(光/暗),温度 25℃。发芽 3 d 后移栽至新盘(1 穴 1 株),添加 Hoagland 营养液(pH 值为5.8~6.0)继续培养 14 d 备用。

水稻(*Oryza sativa* L.)种子依次使用 70%乙醇和 10%过氧化氢进行表面消毒,去离子水冲洗干净后置于湿润滤纸培养皿 30℃避光催芽。发芽 3 d 后移入 50%的 Yoshida 营养液中培养[(30±2)℃或(25±2)

℃,14 h/10 h 光/暗循环,光照度32 000 lx],7 d 后转入 Yoshida 营养液中继续培养 14 d 备用。

### 1.4 纳米塑料在作物体内的积累、转运试验

1.4.1 土培条件下纳米塑料在作物体内的积累、转运 设置原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组,<sup>14</sup>C-聚苯乙烯纳米塑料的含量为 20 mg/kg,每个处理组设 3 个重复。将纳米塑料与 50 g 土壤混匀后置于 100 mL 玻璃烧杯中,移入苗龄 14 d 的青菜或 21 d 的水稻幼苗,加入 18 mL 去离子水(土壤含水量为田间最大持水量的 60%)。培养 21 d,这期间每天补充水分以维持土壤含水量。分别于第 7 d、第 14 d、第 21 d 取样。取样时,将植株根系用去离子水反复清洗并进行 3 次超声处理(每次 5 min),再用二氯甲烷清洗以去除根系表面吸附的纳米塑料。作物样品分为根和茎叶,称质量后待测。

1.4.2 水培条件下纳米塑料在作物体内的积累、转运 设置原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组,<sup>14</sup>C-聚苯乙烯纳米塑料的含量为 10 mg/L,每组 3 个重复。将<sup>14</sup>C-PS纳米塑料加入 50 mL Yoshida 营养液中,超声分散 30 min 后移入苗龄 21 d 的水稻幼苗,玻璃管用锡纸包裹避光。分别在培养第 7 d、第 14 d、第 21 d 时取样。取样时,根表面依次用去离子水和二氯甲烷清洗 3 次,分离根和茎叶后称质量,冷冻干燥后通过生物氧化燃烧仪测定各个样品中的纳米塑料含量。

### 1.5 亚细胞分布试验

水稻培养条件与方法 1.4.2 一致,21 d 培养结束后取样分析。采用差速离心法分离水稻根部的细胞壁、细胞器和可溶性组分。取 0.1 g 新鲜的水稻根样品,加入 1 mL 预冷萃取缓冲液[50 mmol/L三羟甲基氨基甲烷盐酸盐(Tris-HCl)(pH 7.5)、250 mmol/L蔗糖、5 mmol/L抗坏血酸、1 mmol/L二硫苏糖醇],冰浴匀浆。匀浆液于 4℃、300 g 离心 1 min,沉淀为细胞壁。上清液于 4℃、20 000 g 离心 45 min,沉淀为细胞器,上清液为可溶性组分(含细胞质基质和液泡)。各组分经冷冻干燥处理后测定纳米塑料的含量。

### 1.6 抑制剂试验

为探究作物吸收原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料与老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的机制差异,分别采用 10 μmol/L 2,4-二硝基苯酚(2,4-DNP)和 10 μmol/L 质膜 H<sup>+</sup>-

腺苷三磷酸(ATP)酶抑制剂钒酸钠( $\text{Na}_3\text{VO}_4$ )作为能量代谢抑制剂,采用  $1\ \mu\text{mol/L}$  的硝酸银( $\text{AgNO}_3$ )作为水通道蛋白抑制剂。设置抑制剂处理组和不加抑制剂的空白对照组, $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量  $10\ \text{mg/L}$ ,每组设 3 个重复。将原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料和老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料分别加入含  $200\ \text{mL}$  Yoshida 营养液的烧杯中,超声分散后移入 14 d 苗龄的水稻幼苗。培养 2 d 后对水稻根进行取样,经清洗、干燥后测定根中纳米塑料的含量。

### 1.7 纳米塑料的含量测定

按照 1:3 的体积比将液相样品与闪烁液混合均匀,然后使用液体闪烁计数仪(购自 Beckman-Coulter 公司)进行测定,测定时间为 2 min。固相样品使用生物氧化燃烧仪(购自 Zinsser Analytic 公司)高温充分燃烧成为 $^{14}\text{CO}_2$ ,用碱性闪烁液(购自 Zinsser Analytic 公司)吸收后,采用液体闪烁计数仪进行测定。

### 1.8 富集系数和转运系数的计算

作物根中纳米塑料的含量为  $C_{\text{root}}$ ,茎叶中纳米塑料的含量为  $C_{\text{shoot+leave}}$ ,土壤中纳米塑料的含量为

$C_{\text{soil}}$ ,纳米塑料的根富集系数( $RCF$ )、茎叶富集系数( $LCF$ )和转运系数( $TF$ )的计算公式如下:

$$RCF = C_{\text{root}} / C_{\text{soil}} \quad (1)$$

$$LCF = C_{\text{shoot+leave}} / C_{\text{soil}} \quad (2)$$

$$TF = C_{\text{shoot+leave}} / C_{\text{root}} \quad (3)$$

## 1.9 数据分析与统计

使用 IBM SPSS 19.0 软件进行单因素方差分析(ANOVA),使用 GraphPad Prism 9.0 软件进行数据处理与绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 老化纳米塑料的表征

2.1.1 表面形貌 老化对 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的表面形貌产生了一定的影响。通过透射电子显微镜(TEM)观察(图 1)发现,原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料为表面光滑、粒径均匀的球体(图 1A),平均粒径为  $(224 \pm 10)\ \text{nm}$ 。经紫外光加速老化处理后, $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的形态未发生明显变化,但表面出现少量小碎片(图 1B),老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的平均粒径为  $(212 \pm 28)\ \text{nm}$ ,小于原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料。

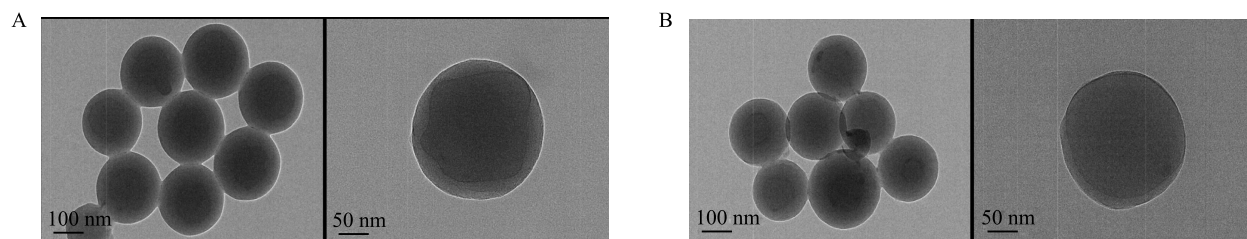


图 1 原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料(A)和老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料(B)表面形貌的透射电子显微镜图

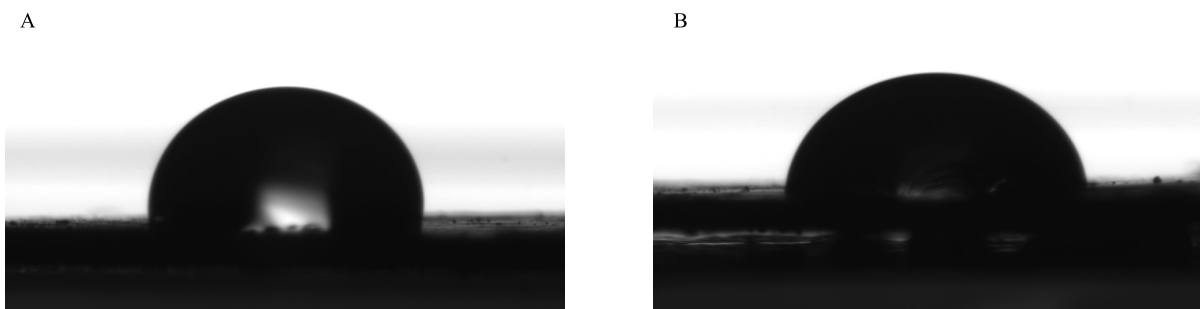
Fig.1 Transmission electron microscopy images of the surface morphology of pristine  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics (A) and photo-aged  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastics (B)

2.1.2 表面理化性质 通过 X 射线电子能谱仪检测 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料表面的元素变化,与原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料相比,老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料表面氧元素含量从 6.7% 增加至 25.1%,碳氧比从 13.9 减少至 3.0。原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料中主要以碳基  $\text{C}-\text{C}/\text{C}-\text{H}$  ( $284.8\ \text{eV}$ ) 组成,但老化后出现碳羟基  $\text{C}-\text{O}$  ( $286.3\ \text{eV}$ )、羰基  $\text{C}=\text{O}$  ( $287.6\ \text{eV}$ ) 和羧基  $\text{O}-\text{C}=\text{O}$  ( $288.8\ \text{eV}$ ) 含氧基团。氧元素含量变化及含氧官能团的出现均可说明紫外光老化处理使纳米塑料表面发生了氧化反应。

Zeta 电位分析仪测定结果显示,原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳

米塑料的 Zeta 电位为  $(-33.5 \pm 1.7)\ \text{mV}$ ,老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的 Zeta 电位降低至  $(-44.9 \pm 1.3)\ \text{mV}$ ,表明老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料表面电负性增强,这可能会减小纳米塑料与带负电荷的细胞壁之间的静电吸附,从而促进作物吸收。对纳米塑料的静态水接触角进行测定后发现,原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的水接触角为  $93.1^\circ \pm 2.6^\circ$ (图 2A),疏水性较强,但老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的水接触角减小为  $80.2^\circ \pm 2.3^\circ$ (图 2B)。由此可见,老化处理增强了 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的亲水性,这可能会降低颗粒间的团聚性,使 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料在水相溶液中分散并提高稳定性,从而有利

于 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料在作物体内转运。



A:原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的水接触角;B:老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的水接触角。PS:聚苯乙烯。

图2 原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料和老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料水接触角的表征图

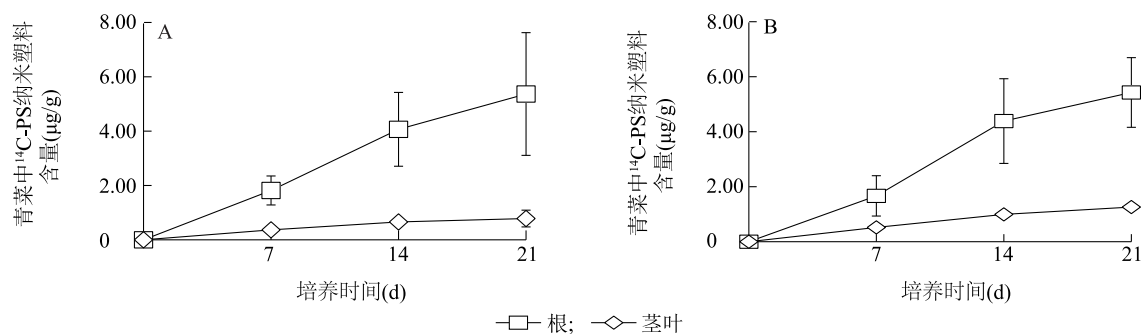
Fig.2 Characterization of water contact angles of pristine and photo-aged  $^{14}\text{C}$ -polystyrene nanoplastics

## 2.2 青菜对土壤中纳米塑料的吸收、转运规律

土培条件下,青菜根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量随培养时间延长呈现增加趋势,而茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量始终维持在较低水平(图3)。培养21 d时,原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组青菜根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量为 $(5.40 \pm 2.30) \mu\text{g/g}$ ,茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量为 $(0.79 \pm 0.30) \mu\text{g/g}$ (图3A)。培养21 d时,老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组青菜根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量为 $(5.40 \pm 1.30) \mu\text{g/g}$ ,茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量为 $(1.30 \pm 0.21) \mu\text{g/g}$ (图3B)。原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组和老化

$^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组中,青菜根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量均显著高于茎叶( $P < 0.05$ ),表明根是青菜积累纳米塑料的主要部位。

培养21 d时,与原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料相比,老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料在青菜根中的含量无显著变化,但在青菜茎叶中的含量增加了65%,虽然统计学上未达到显著性差异,但呈现了明显的上升趋势。表明老化处理可能促进了纳米塑料从青菜根部向地上部分的转运,这可能与老化后纳米塑料表面的亲水性增强、表面负电荷增加等理化性质的改变相关。



A:原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料处理;B:老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理。

图3 原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料处理和老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理下青菜根、茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量

Fig.3 Concentrations of  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics in the roots and shoots of pak choi under treatments with pristine  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastics and photo-aged  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastics

为进一步量化青菜从土壤中吸收、转运纳米塑料的能力,本研究计算了根富集系数(RCF)、茎叶富集系数(LCF)和转运系数(TF)。表1显示,在原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料处理组和老化 $^{14}\text{C}$ -PS

纳米塑料处理组中,RCF和LCF均表现出随培养时间的延长而增加的趋势。统计分析结果显示,培养第14 d的RCF和LCF均显著高于第7 d( $P < 0.05$ ),但第21 d的RCF和LCF与第14 d相比均无

显著差异。这一动态变化结果表明:青菜对纳米塑料的富集能力先随培养时间的延长而增强,但随后趋于稳定。 $TF$  在  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料暴露初期 (7 ~ 14 d) 无显著性变化,但随着培养时间的延长而出现显著降低 ( $P<0.05$ ),这可能与根部纳米塑料积累量逐渐饱和、内皮层屏障随根系发育逐渐完善相关。

表 1 土培条件下  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料在青菜中的富集情况和转运系数

Table 1 Accumulation and translocation factors of  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics in pak choi under soil culture

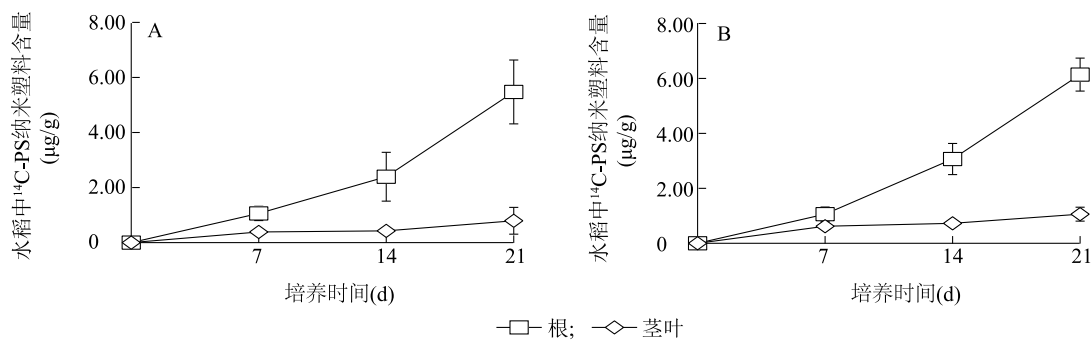
| 处理组                         | 培养时间 (d) | $RCF$                   | $LCF$                    | $TF$                     |
|-----------------------------|----------|-------------------------|--------------------------|--------------------------|
| 原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料 | 7        | $0.091\pm0.027\text{b}$ | $0.019\pm0.007\text{c}$  | $0.201\pm0.027\text{b}$  |
|                             | 14       | $0.203\pm0.068\text{a}$ | $0.033\pm0.004\text{b}$  | $0.173\pm0.047\text{bc}$ |
|                             | 21       | $0.268\pm0.113\text{a}$ | $0.039\pm0.015\text{ab}$ | $0.122\pm0.053\text{c}$  |
| 老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料 | 7        | $0.084\pm0.037\text{b}$ | $0.034\pm0.007\text{b}$  | $0.431\pm0.091\text{a}$  |
|                             | 14       | $0.219\pm0.077\text{a}$ | $0.055\pm0.006\text{a}$  | $0.273\pm0.076\text{ab}$ |
|                             | 21       | $0.271\pm0.063\text{a}$ | $0.062\pm0.011\text{a}$  | $0.231\pm0.014\text{b}$  |

$RCF$ :根富集系数; $LCF$ :茎叶富集系数; $TF$ :转运系数。PS:聚苯乙烯。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

### 2.3 水稻对土壤中纳米塑料的吸收、转运规律

土培条件下,原始  $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料处理组和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量均随培养时间的延长而增加,而茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量始终较低,这与青菜对土壤中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的吸收规律一致。培养 21 d 时,原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量为  $(5.48\pm1.16)\text{ }\mu\text{g/g}$ ,茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量为  $(0.79\pm0.49)\text{ }\mu\text{g/g}$

(图 4A);老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量为  $(6.14\pm0.60)\text{ }\mu\text{g/g}$ ,茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量为  $(1.06\pm0.26)\text{ }\mu\text{g/g}$ (图 4B)。在原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中,水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量均显著高于茎叶 ( $P<0.05$ ),但在水稻相同部位,原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组与老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组间的  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量无显著差异。



A:原始  $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料处理;B:老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理。

图 4 原始  $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理下水稻根、茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量

Fig.4 Concentrations of  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics in rice roots and shoots under treatments with pristine and photo-aged  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastics

表 2 显示,原始  $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料处理组和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中水稻的  $RCF$  均随培养时间的延长而增加, $LCF$  在培养初期 (7 ~ 14 d) 无显著增加,但培养时间延长到 21 d 时  $LCF$

显著增加 ( $P<0.05$ ), $TF$  则随着培养时间的延长而显著降低 ( $P<0.05$ )。这一动态变化结果表明,水稻根系是吸收土壤中纳米塑料的主要部位,其向地上部的转运可能存在滞后效应,根部积累持续

增加,但向地上部转运效率下降,因此 *TF* 随培养时间的延长而逐渐降低。培养 21 d 时,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中 *TF* 较原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑

料处理组提高了 90%,表明老化纳米塑料在水稻中的转运能力优于原始纳米塑料。

表 2 土培条件下  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料在水稻中的富集情况和转运系数

Table 2 Accumulation and translocation factors of  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics in rice under soil culture

| 处理组                         | 培养时间(d) | <i>RCF</i>   | <i>LCF</i>   | <i>TF</i>    |
|-----------------------------|---------|--------------|--------------|--------------|
| 原始 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料 | 7       | 0.053±0.013c | 0.019±0.007c | 0.360±0.040b |
|                             | 14      | 0.120±0.045b | 0.020±0.005c | 0.170±0.030d |
|                             | 21      | 0.274±0.058a | 0.040±0.024a | 0.090±0.020e |
| 老化 $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料 | 7       | 0.053±0.013c | 0.031±0.005b | 0.600±0.090a |
|                             | 14      | 0.153±0.029b | 0.037±0.002b | 0.246±0.042c |
|                             | 21      | 0.307±0.030a | 0.053±0.013a | 0.171±0.024d |

*RCF*:根富集系数;*LCF*:茎叶富集系数;*TF*:转运系数。PS:聚苯乙烯。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P<0.05$ )。

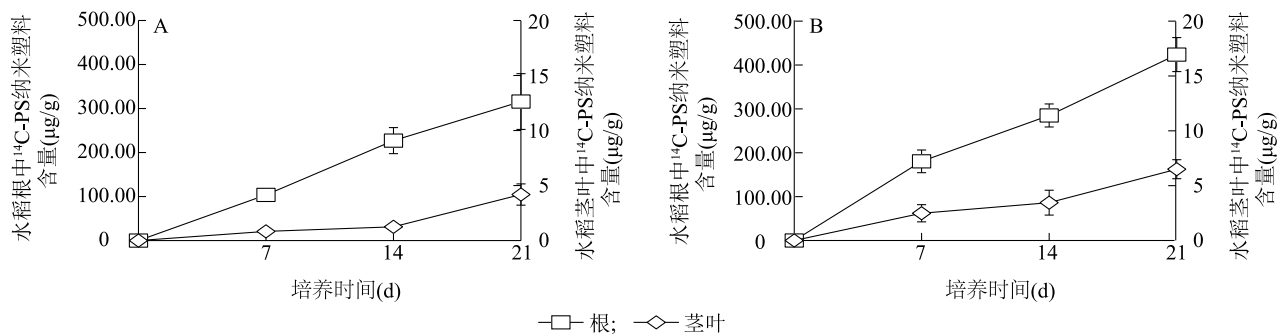
对比青菜和水稻 2 种作物在土培条件下对  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的吸收、转运规律发现,二者共同特征主要包括三方面:第一,纳米塑料主要积累于根,根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的含量显著高于茎叶( $P<0.05$ ),根是吸收和积累  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的主要部位;第二,根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量随培养时间的延长而增加,而茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量始终维持在较低水平;第三,与原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组相比,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中 2 种作物根部和茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量均无显著变化( $P>0.05$ )。这可能是因为土壤颗粒对  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的吸附和固定作用降低了其生物有效性,从而削弱了水稻、青菜根系对原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的吸收、转运差异。

#### 2.4 水培条件下纳米塑料在水稻中的积累、转运规律

水培条件下,水稻根和茎叶中的  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量均随培养时间延长而增加(图 5)。培养 21 d 时,原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量为(321.40±88.70)  $\mu\text{g/g}$ ,茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量为(3.80±0.99)  $\mu\text{g/g}$ ,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量为(424.10±38.80)  $\mu\text{g/g}$ ,茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量为(6.51±0.87)  $\mu\text{g/g}$ ,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中水稻根和茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量显著高于原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组( $P<0.05$ ),根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量增加 32.0%,茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量增加 71.3%。表明水培条件下老化处理可以促进纳米塑料在水稻体内的积累、转运。

表 3 显示,水培条件下原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料和老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料在水稻中的 *RCF* 和 *LCF* 随培养时间的延长呈增加趋势,原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中 *TF* 随培养时间延长先降低后增加,而老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组中 *TF* 随培养时间延长无显著性变化。老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组纳米塑料的 *TF* 在培养 7 d 和 14 d 时较原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组显著升高( $P<0.05$ ),但到培养第 21 d 时与原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组之间无显著性差异。从这一结果可以看出,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的 *TF* 在暴露初期即达到较高水平,且在培养周期内保持稳定,而原始  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料在培养第 21 d 时的 *TF* 与老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组培养第 7 d 时的数值相当,表明在水培条件下老化处理显著提高了纳米塑料的转运能力。

培养 21 d 时,与土培条件相比,水培条件下水稻根和茎叶中的  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量均极显著增加( $P<0.01$ )。以老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料处理组为例,水培条件下水稻根中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量约为土培条件下的 69 倍,水培条件下水稻茎叶中  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料含量约为土培条件下的 6 倍。这一差异可归因于土壤基质的吸附和固定作用降低了土培条件下纳米塑料的生物有效性。此外,水培条件下老化处理对水稻根和茎叶吸收  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的促进效应高于土培条件,这进一步印证了土壤基质对纳米塑料老化效应的缓冲作用。结合纳米塑料表征结果,老化  $^{14}\text{C}$ -PS 纳米塑料的亲水性增强和表面负电荷增加是其积累、转运效率提升的关键驱动因素。



A; 原始<sup>14</sup>C-聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料处理; B; 老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料处理。PS: 聚苯乙烯。  
图 5 水培条件下原始<sup>14</sup>C-聚苯乙烯 (PS) 纳米塑料处理组和老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料处理组水稻根和茎叶中<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料的含量  
Fig.5 Concentrations of <sup>14</sup>C-polystyrene (PS) nanoplastics in the roots and shoots of rice treated with pristine and photo-aged <sup>14</sup>C-PS nanoplastics under hydroponic conditions

表 3 水培条件下<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料在水稻中的富集系数和转运系数  
Table 3 Accumulation factors and translocation factors of <sup>14</sup>C-polystyrene (PS) nanoplastics in rice under hydroponic conditions

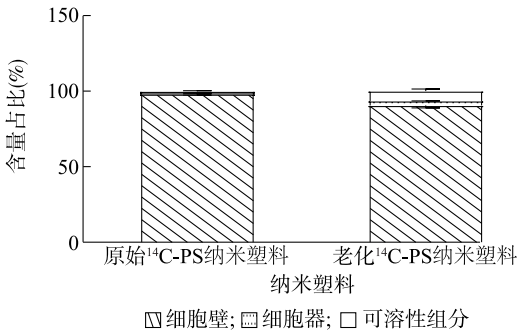
| 处理组                        | 培养时间 (d) | RCF       | LCF          | TF               |
|----------------------------|----------|-----------|--------------|------------------|
| 原始 <sup>14</sup> C-PS 纳米塑料 | 7        | 10.4±0.7d | 0.056±0.026d | 0.008 1±0.001 4b |
|                            | 14       | 22.7±3.0b | 0.089±0.060d | 0.005 5±0.000 7c |
|                            | 21       | 31.6±6.3a | 0.261±0.044b | 0.014 5±0.005 7a |
| 老化 <sup>14</sup> C-PS 纳米塑料 | 7        | 18.1±2.6c | 0.151±0.009c | 0.014 2±0.005 9a |
|                            | 14       | 28.5±2.6b | 0.249±0.183b | 0.010 6±0.003 8a |
|                            | 21       | 42.4±3.9a | 0.429±0.170a | 0.015 3±0.000 8a |

RCF: 根富集系数; LCF: 茎叶富集系数; TF: 转运系数。PS: 聚苯乙烯。同一列数据后不同小写字母表示不同处理间差异显著 ( $P<0.05$ )。

2.5 纳米塑料在水稻根中的亚细胞分布

了解纳米塑料在作物体内的亚细胞分布是揭示其在细胞内归趋和毒性机制的重要基础。本研究通过差速离心法分离水稻根的细胞壁、细胞器和可溶性组分,分析原始<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料在水稻根中的亚细胞分布特征。定量分析结果 (图 6) 表明,原始<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料均主要定位于细胞壁,细胞壁中原始<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料、老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料含量的占比分别为  $98.10\% \pm 0.73\%$  和  $90.55\% \pm 1.60\%$ ,证明细胞壁是纳米塑料滞留的关键屏障。细胞器中老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料含量的占比为  $3.07\% \pm 0.11\%$ ,可溶性组分中老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料含量的占比为  $6.38\% \pm 1.50\%$ ,显著高于原始<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料在细胞器和可溶性组分中的占比 ( $P<0.05$ ),这表明老化处理使纳米塑料跨越细胞屏障、进入细胞内部的能力增强。

老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料亚细胞分布模式的变化可归因于其表面理化性质的改变。X 射线电子能谱仪和静态水接触角表征结果表明,老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑



PS: 聚苯乙烯。  
图 6 原始<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料在水稻根中的亚细胞分布  
Fig.6 Subcellular distribution of pristine and photo-aged <sup>14</sup>C-polystyrene (PS) nanoplastics in rice roots

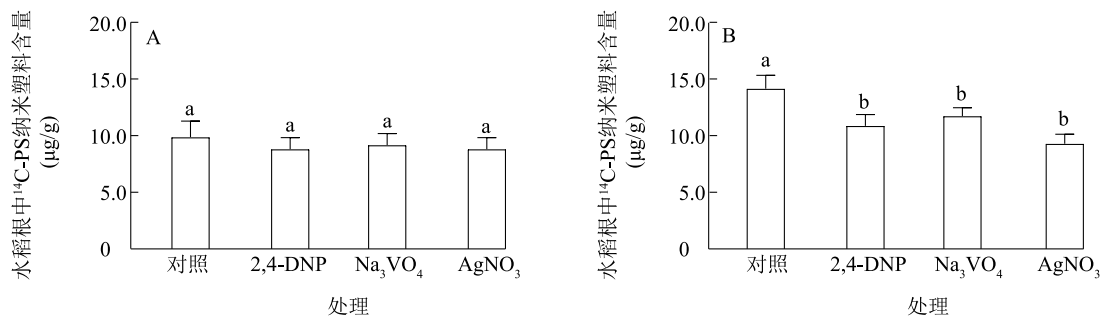
料表面含氧官能团的增加,亲水性增强,表面负电荷增加,这些变化可以通过增强纳米塑料与细胞壁之间的静电斥力、降低细胞壁截留效率,促进跨膜转运等机制,提高老化<sup>14</sup>C-PS 纳米塑料向细胞内的渗透能力,这一发现具有重要的毒理学意义。原始

$^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料被细胞壁截留,对细胞的直接毒性风险降低,而老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料进入细胞内部的比例增加,在细胞器中可能干扰线粒体能量代谢,在可溶性组分中的累积可能影响细胞代谢稳态,从而增强了纳米塑料的毒性效应。

## 2.6 老化处理对作物体内纳米塑料积累机制的影响

为探究作物吸收原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料和老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的机制差异,我们添加能量代谢抑制剂和水通道蛋白抑制剂进行进一步处理,结果(图7)表明,在原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组中,3种抑制剂的加入对水稻根中的纳米塑料含量均未产生显著影响,但在老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组中,抑制剂2,4-二硝基苯酚加入后水稻根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料含量为 $(10.8 \pm 1.0) \mu\text{g/g}$ ,显著低于空白对照组( $P < 0.05$ )。抑制剂 $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 加入后,根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑

料含量为 $(11.7 \pm 0.7) \mu\text{g/g}$ ,也显著低于空白对照( $P < 0.05$ )。这说明原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组中水稻根对纳米塑料的吸收情况不受能量代谢抑制剂的显著影响,纳米塑料可能主要通过被动扩散或者质外体途径进入水稻根中,而老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组中水稻根对纳米塑料的吸收情况受到能量代谢抑制剂的显著影响,表明作物吸收纳米塑料的过程还可能涉及能量依赖途径。在水通道蛋白抑制剂 $\text{AgNO}_3$ 影响下,老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组水稻根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料含量为 $(9.3 \pm 0.8) \mu\text{g/g}$ ,显著低于对照,说明纳米塑料在作物体内的积累可能受到水通道蛋白影响。老化处理使 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的亲水性基团数量增加,这可能使 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料更容易被水通道蛋白识别并发生转运,进而增加根中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量。



A: 原始 $^{14}\text{C}$ -聚苯乙烯(PS)纳米塑料处理; B: 老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理。图中不同小写字母表示不同处理间差异显著( $P < 0.05$ )。PS: 聚苯乙烯; 2,4-DNP: 2,4-二硝基苯酚;  $\text{Na}_3\text{VO}_4$ : 钒酸钠;  $\text{AgNO}_3$ : 硝酸银; 对照: 纯水。

图7 不同抑制剂对原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组(A)和老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组(B)中水稻根部 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料含量的影响

Fig.7 Effects of different inhibitors on the concentrations of  $^{14}\text{C}$ -polystyrene (PS) nanoplastics in rice roots under pristine  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastic treatment (A) and photo-aged  $^{14}\text{C}$ -PS nanoplastic treatment (B)

## 3 讨论

### 3.1 老化处理对作物吸收、转运纳米塑料的影响机制

纳米塑料尺寸较小,在复杂环境和生物介质中对纳米塑料进行稳定、可靠的定量追踪检测极具技术挑战<sup>[18]</sup>。本研究借助 $^{14}\text{C}$ 同位素示踪技术,通过土培和水培体系,明确了老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料在青菜和水稻中的积累和转运规律。土培条件下,老化处理对2种作物根部 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量均无显著影响,但明显增加了茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料的含量,促进了 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料向地上部的转运。对比

青菜和水稻发现,二者吸收、转运纳米塑料的规律一致,可能是土培条件下土壤颗粒对纳米塑料的吸附、固定作用削弱了2种作物之间的物种差异。水培条件下,老化 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组水稻根和茎叶中 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料含量均显著高于原始 $^{14}\text{C}$ -PS纳米塑料处理组。对比2种培养体系的差异发现,土培条件下,土壤颗粒与有机质之间的吸附、固定作用降低了纳米塑料的生物有效性,而水培条件下,无基质的吸附与截留,纳米塑料更均匀地分散在溶液中,与水稻根系表面充分接触<sup>[19]</sup>,因此老化处理对纳米塑料在水稻中积累的促进效应更强。

作物对纳米塑料的吸收、转运受到多种因素的

影响<sup>[20]</sup>。结合本研究中老化纳米塑料材料的表征结果,老化处理对作物吸收、转运纳米塑料的调控作用可归因于以下三个方面:第一,老化纳米塑料表面化学性质改变,原始纳米塑料表面光滑、元素单一,主要以范德瓦耳斯力与根发生吸附作用,纳米塑料老化后其表面增加大量含氧官能团,且出现小颗粒碎片;第二,老化纳米塑料亲水性改变,老化后<sup>14</sup>C-PS纳米塑料水接触角由 93.1°降至 80.2°,亲水性增强;第三,老化纳米塑料表面电荷改变,Zeta 电位分析仪测定结果显示,老化后电位从-33.5 mV降至-44.9 mV,表面负电荷增加。亲水性的增强使纳米塑料在木质部水相中的稳定性提高,减少了被木质部细胞壁吸附的可能,并更易随蒸腾流发生长距离运输;表面负电荷的增加可以降低纳米塑料与细胞壁/细胞膜之间的静电作用,促进其跨越细胞屏障进入中柱。这些理化性质的协同改变共同导致了老化纳米塑料在作物茎叶中含量的增加。本研究结果与 Sun 等<sup>[5]</sup>发现带正电荷的纳米塑料更易于吸附在根表面,而带负电荷的纳米塑料可以进入细胞壁和细胞膜并向上转运的研究结果一致。

### 3.2 老化处理对纳米塑料在作物亚细胞中分布的影响

污染物被植物吸收后,在细胞内的亚细胞分布特征会显著影响后续的转运<sup>[21]</sup>。细胞壁是保护原生质体免受污染物毒性的主要屏障;细胞器质量占比较低,但脂质含量最高;可溶性组分的绝对质量最高,占细胞质量的 80%以上。污染物进入植物细胞后,由于性质差异导致其与亚细胞组分之间的相互作用方式不同,呈现不同的亚细胞分布特征<sup>[22-24]</sup>。因此,明确纳米塑料的亚细胞分布特征是揭示纳米塑料在植物细胞内归趋的重要基础。本研究结果表明,细胞壁作为植物细胞屏障,截留了大部分的原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料和老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料,但老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料表面亲水性增加,降低了与细胞壁组分的静电吸附,表面产生的物质还可能向胞内渗透,因此提高了纳米塑料在细胞器和可溶性组分中的占比。这与 Zhu 等<sup>[25]</sup>发现纳米塑料在细胞中的积累同时受粒径和表面官能团调控的结果一致。

### 3.3 老化处理对作物吸收纳米塑料机制的影响

纳米塑料进入植物体内的方式有很多种。李连祯等<sup>[26]</sup>报道了可食用蔬菜吸收、传输和积累纳米塑料的研究结果,通过激光扫描共聚焦荧光显微镜和

扫描电子显微镜观察发现,200 nm 的 PS 微球可以被生菜根部大量吸收和富集,并能从根部迁移到地上部分,累积在蔬菜的茎叶中。Li 等<sup>[4]</sup>进一步研究了植物在不同培养条件下对纳米塑料的吸收、转运,发现侧根生长时产生的根尖破损是小粒径纳米塑料进入植物根部的重要途径,并且可以通过蒸腾拉力作用从根部转运到地上部分,而粒径较大的塑料颗粒则不能被植物吸收。最新的研究结果表明,植物叶片吸收是空气源纳米塑料进入植物体的重要途径,并可以实现从叶片到根的逆向传输<sup>[27]</sup>。Clark 等<sup>[28]</sup>也证明了纳米塑料能够跨过凯氏带,通过根系吸收并转运到萝卜的可食用部分。总之,植物体吸收纳米塑料是一个复杂的过程,可能涉及质外体途径、共质体途径、内吞作用和蒸腾拉力等协同作用<sup>[6]</sup>。

2,4-DNP 是一种解偶联抑制剂,通过抑制 ATP 的合成来抑制能量的吸收过程。 $\text{Na}_3\text{VO}_4$ 主要通过抑制电子传递系统和细胞色素氧化酶从而抑制细胞产生能量,通过抑制质膜  $\text{H}^+$ -ATP 酶来抑制根细胞中能量的产生<sup>[21]</sup>。如果水稻吸收纳米塑料的过程需要能量,那抑制剂的加入可能会减少纳米塑料的积累量。本研究结果表明,抑制剂对原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组水稻根中<sup>14</sup>C-PS纳米塑料含量的影响不显著,说明原始<sup>14</sup>C-PS纳米塑料可能主要通过被动扩散或质外体途径进入根部;而抑制剂对老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组水稻根中<sup>14</sup>C-PS纳米塑料含量的影响显著,表明老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的积累过程可能涉及能量依赖性途径(如内吞作用)。老化纳米塑料表面产生的官能团可与细胞膜表面的受体蛋白结合,提高内吞效率,从而增加纳米塑料的积累<sup>[18]</sup>。有研究结果表明, $\text{Ag}^+$ 可通过与水通道蛋白保守基序附近半胱氨酸的巯基结合,阻塞通道收缩区,从而抑制水通道蛋白活性<sup>[21]</sup>。本研究结果表明, $\text{AgNO}_3$ 抑制剂处理显著降低了老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料处理组水稻根中<sup>14</sup>C-PS纳米塑料含量,表明水通道蛋白可能参与了老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的积累过程。老化<sup>14</sup>C-PS纳米塑料亲水性基团的增加,使其被水通道蛋白识别为底物并发生转运,进而增加了根和茎叶中<sup>14</sup>C-PS纳米塑料的含量。需要说明的是,这一结果是基于抑制剂试验的间接证据,未来需通过更多直接方法(如使用荧光标记纳米塑料和质外体示踪剂定位等)进一步验证植物吸收老化纳米

塑料与原始纳米塑料的机制差异。

## 4 结论

本研究发现,老化处理可以改变纳米塑料的表面官能团与元素组成,进而改变其亲水性和表面电荷,促进纳米塑料在植物中积累、转运,且水培条件下的促进效果强于土培条件。在亚细胞水平上,老化处理改变了纳米塑料在细胞中的分布比例,增加了细胞器和可溶性组分中纳米塑料含量的占比,但未破坏细胞壁的屏障功能。老化纳米塑料在水稻根部的积累涉及能量代谢依赖途径和水通道蛋白的协同作用,老化处理主要通过调控纳米塑料的表面理化性质(含氧官能团、亲水性和表面电荷)影响其积累、转运规律。本研究发现老化纳米塑料在作物中具有更高的积累量和转运效率,且作物对老化纳米塑料的吸收机制由被动途径转变为能量依赖的主动途径,这一发现为老化纳米塑料的生态风险与食品安全风险评估提供了关键科学依据。未来研究还可从以下两个方面展开:一是开展长期田间试验,结合土壤中复合污染条件,进一步探究老化纳米塑料在农田系统中的归趋规律;二是深化分子机制研究,借助蛋白组学、转录组学等技术,明确调控植物吸收老化纳米塑料的关键基因和通道蛋白,为纳米塑料污染的防治提供更全面的支撑。

## 参考文献:

- [1] ROCHMAN C M, HOELLEIN T. The global odyssey of plastic pollution[J]. *Science*, 2020, 368(6496): 1184-1185.
- [2] 骆永明,周倩,章海波,等. 重视土壤中微塑料污染研究防范生态与食物链风险[J]. *中国科学院院刊*, 2018, 33(10): 1021-1030.
- [3] RILLIG M C, LEHMANN A, DE SOUZA MACHADO A A, et al. Microplastic effects on plants[J]. *New Phytologist*, 2019, 223(3): 1066-1070.
- [4] LI L Z, LUO Y M, LI R J, et al. Effective uptake of submicrometre plastics by crop plants via a crack-entry mode[J]. *Nature Sustainability*, 2020, 3(11): 929-937.
- [5] SUN X D, YUAN X Z, JIA Y B, et al. Differentially charged nanoplastics demonstrate distinct accumulation in *Arabidopsis thaliana*[J]. *Nature Nanotechnology*, 2020, 15(9): 755-760.
- [6] 刘晓飞,张宇,梁栋,等. 纳米塑料在陆生植物中的迁移机制及毒性效应研究进展[J]. *环境科学*, 2025, 46(8): 5295-5302.
- [7] TIAN L L, CHENG J J, JI R, et al. Microplastics in agricultural soils: sources, effects, and their fate[J]. *Current Opinion in Environmental Science & Health*, 2022, 25: 100311.
- [8] LI H J, BAI L H, LIANG S J, et al. The wheel of time; the environmental dance of aged micro- and nanoplastics and their biological resonance[J]. *Eco-Environment & Health*, 2025, 4(1): 100138.
- [9] LIU J, ZHANG T, TIAN L L, et al. Aging significantly affects mobility and contaminant-mobilizing ability of nanoplastics in saturated loamy sand[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 53(10): 5805-5815.
- [10] REN Z F, GUI X Y, WEI Y Q, et al. Chemical and photo-initiated aging enhances transport risk of microplastics in saturated soils: key factors, mechanisms, and modeling[J]. *Water Research*, 2021, 202: 117407.
- [11] VROOM R J E, KOELMANS A A, BESSELING E, et al. Aging of microplastics promotes their ingestion by marine zooplankton[J]. *Environmental Pollution*, 2017, 231: 987-996.
- [12] ALIM I O S, CLAVEAU-MALLET D, KURUSU R S, et al. Weathering pathways and protocols for environmentally relevant microplastics and nanoplastics: what are we missing? [J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 423: 126955.
- [13] 马思睿,李舒行,郭学涛. 微塑料的老化特性、机制及其对污染物吸附影响的研究进展[J]. *中国环境科学*, 2020, 40(9): 3992-4003.
- [14] JU C, ZHANG H C, WU R L, et al. Upward translocation of acetochlor and atrazine in wheat plants depends on their distribution in roots[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 703: 135636.
- [15] ZHAO J, REN W T, DAI Y H, et al. Uptake, distribution, and transformation of CuO NPs in a floating plant *Eichhornia crassipes* and related stomatal responses[J]. *Environmental Science & Technology*, 2017, 51(13): 7686-7695.
- [16] BINDA G, KALCIKOVA G, ALLAN I J, et al. Microplastic aging processes: environmental relevance and analytical implications[J]. *TrAC Trends in Analytical Chemistry*, 2024, 172: 117566.
- [17] TIAN L L, CHEN Q Q, JIANG W, et al. A carbon-14 radiotracer-based study on the phototransformation of polystyrene nanoplastics in water versus in air[J]. *Environmental Science: Nano*, 2019, 6(9): 2907-2917.
- [18] YU Z F, XU X L, GUO L, et al. Uptake and transport of micro/nanoplastics in terrestrial plants: detection, mechanisms, and influencing factors[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 907: 168155.
- [19] LIU Y Y, GUO R, ZHANG S W, et al. Uptake and translocation of nano/microplastics by rice seedlings: evidence from a hydroponic experiment[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2022, 421: 126700.
- [20] 刘亚萱,刘慧,王为木,等. 微塑料在土壤和作物体内的迁移转运机制及影响因素研究进展[J]. *植物营养与肥料学报*, 2025, 31(9): 1862-1876.
- [21] YU P F, LI Y W, ZOU L J, et al. Variety-selective rhizospheric activation, uptake, and subcellular distribution of perfluorooctane-

- sulfonate (PFOS) in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. Environmental Science & Technology, 2021, 55(13): 8730-8741.
- [22] SUN K, HABTESELASSIE M Y, LIU J, et al. Subcellular distribution and biotransformation of phenanthrene in pakchoi after inoculation with endophytic *Pseudomonas* sp. as probed using HRMS coupled with isotope-labeling [J]. Environmental Pollution, 2018, 237: 858-867.
- [23] XIN J L, HUANG B F. Subcellular distribution and chemical forms of cadmium in two hot pepper cultivars differing in cadmium accumulation [J]. Journal of Agricultural and Food Chemistry, 2014, 62(2): 508-515.
- [24] WANG W F, WAN Q, LI Y X, et al. Uptake, translocation and subcellular distribution of pesticides in Chinese cabbage (*Brassica rapa* var. *chinensis*) [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2019, 183: 109488.
- [25] ZHU J H, WANG J, CHEN R N, et al. Cellular process of polystyrene nanoparticles entry into wheat roots [J]. Environmental Science & Technology, 2022, 56(10): 6436-6444.
- [26] 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.
- [27] LI Y, ZHANG J J, XU L, et al. Leaf absorption contributes to accumulation of microplastics in plants [J]. Nature, 2025, 641(8063): 666-673.
- [28] CLARK N J, FISCHER A C, CARNE D, et al. Determining the accumulation potential of nanoplastics in crops: an investigation of <sup>14</sup>C-labelled polystyrene nanoplastic into radishes [J]. Environmental Research, 2025, 284: 122687.

(责任编辑:王妮)