

萝卜对土壤中全氟辛酸赋存形态影响及吸收特征

吕雪艳, 李政宇, 杜文超, 郭红岩, 于志国, 吴吉春, 孙媛媛

引用本文:

吕雪艳, 李政宇, 杜文超, 郭红岩, 于志国, 吴吉春, 孙媛媛. 萝卜对土壤中全氟辛酸赋存形态影响及吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 464–471.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1003>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

施锰微肥对镉污染土壤中玉米生长及镉吸收分配的影响

胡艳美, 吕金朔, 孙维兵, 张兴, 陈璐, 郭大维, 党秀丽

农业环境科学学报. 2021, 40(8): 1635–1643 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-0106>

生物炭施用对棕壤重金属镉赋存形态及油菜吸收镉的影响

王风, 王梦露, 许堃, 董旭, 虞娜, 张玉龙, 党秀丽

农业环境科学学报. 2017, 36(5): 907–914 <https://doi.org/10.11654/jaes.2016-1599>

猪场粪水施用对设施白菜及土壤重金属的影响

程娟, 刘沐衡, 肖能武, 杨柳, 杜会英, 杜连柱, 张克强

农业环境科学学报. 2021, 40(11): 2559–2567 <https://doi.org/10.11654/jaes.2021-1030>

应用HYDRUS-1D模型模拟分析PFCs在土壤中的迁移特征

郇托娅, 郑跃军, 王金生

农业环境科学学报. 2018, 37(10): 2175–2182 <https://doi.org/10.11654/jaes.2017-1637>

蚯蚓粪对镉在土壤-水稻系统中迁移转化影响

张晓绪, 张嘉伟, 孙星星, 徐轶群, 许健, 朱靖

农业环境科学学报. 2020, 39(8): 1723–1733 <https://doi.org/10.11654/jaes.2020-0110>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

吕雪艳, 李政宇, 杜文超, 等. 萝卜对土壤中全氟辛酸赋存形态影响及吸收特征[J]. 农业环境科学学报, 2022, 41(3): 464–471.

LÜ X Y, LI Z Y, DU W C, et al. Effects of radishes on the speciation and absorption of perfluorooctanoic acid in soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2022, 41(3): 464–471.



开放科学 OSID

萝卜对土壤中全氟辛酸赋存形态影响及吸收特征

吕雪艳¹, 李政宇², 杜文超³, 郭红岩⁴, 于志国¹, 吴吉春⁵, 孙媛媛^{5*}

(1. 南京信息工程大学水文与水资源工程学院, 南京 210044; 2. 南京大学环境规划设计研究院集团股份公司, 南京 210000; 3. 南京师范大学环境学院, 南京 210023; 4. 南京大学环境学院, 南京 210023; 5. 南京大学地球科学与工程学院, 南京 210023)

摘要:为探讨植物种植对土壤中全氟辛酸(Perfluorooctanoic acid, PFOA)赋存形态影响及吸收特征,以根系发达的萝卜为代表性植物,通过盆栽试验,探究了不同浓度PFOA污染土壤中萝卜的生长、对PFOA的吸收利用及土壤中PFOA形态分布的变化。结果表明:萝卜的种植会显著改变土壤中PFOA的赋存形态,且存在浓度差异。与无种植组相比,种植萝卜显著提高了低浓度土壤中的PFOA有机结合态比例(12%)、降低了残渣态比例(10.5%);显著降低了高浓度土壤中PFOA的可脱附态比例(4.9%)。萝卜可从土壤中富集PFOA,且地上部(茎、叶)富集能力显著高于地下部。低浓度(0.2 mg·kg⁻¹)PFOA暴露显著降低萝卜生物量,但高浓度(5 mg·kg⁻¹)并未对生物量产生显著影响。研究表明,萝卜种植可以改变污染土壤中PFOA的形态分布,进而影响PFOA对人类健康及环境的潜在风险。

关键词:全氟辛酸;萝卜;土壤;赋存形态;吸收

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2022)03-0464-08 doi:10.11654/jaes.2021-1003

Effects of radishes on the speciation and absorption of perfluorooctanoic acid in soil

LÜ Xueyan¹, LI Zhengyu², DU Wenchao³, GUO Hongyan⁴, YU Zhiguo¹, WU Jichun⁵, SUN Yuanyuan^{5*}

(1. School of Hydrology and Water Resources, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 2. Academy of Environmental Planning & Design, Co., Ltd., Nanjing University, Nanjing 210000, China; 3. School of Environment, Nanjing Normal University, Nanjing 210023, China; 4. School of Environment, Nanjing University, Nanjing 210023, China; 5. School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing 210023, China)

Abstract: To understand the effects of radishes on the speciation and absorption of perfluorooctanoic acid (PFOA) in soil, a radish with a strong root system was chosen as a representative plant to study the growth and PFOA uptake of the radish, as well as the changes to the fraction distribution of PFOA in the soil under different concentrations of PFOA exposure in potted experiments. The results showed that radish planting significantly changed the speciation of PFOA in the soil, and this effects varied according to concentration. Compared with unplanted soil, radish planting significantly increased the non-desorbing fraction (12%) and reduced the residual fraction (10.5%) of PFOA in soil at low-PFOA exposure (0.2 mg·kg⁻¹), but remarkably reduced the desorbing fraction (4.9%) of PFOA in soil at high-PFOA exposure (5 mg·kg⁻¹). Radishes could uptake PFOA from the soil, and the concentrations of PFOA in the above ground part of the plant (stem and leaf) were significantly higher than those below ground. Low-PFOA exposure (0.2 mg·kg⁻¹) caused a decrease in radish biomass, while high-PFOA exposure (5 mg·kg⁻¹) had no significant effect on radish biomass. The results suggest that radish planting can change the fraction distribution of PFOA in the soil, and then influence its potential risks to human health and the environment.

Keywords: perfluorooctanoic acid; radish; soil; speciation; adsorption

收稿日期: 2021-09-01 录用日期: 2022-01-25

作者简介: 吕雪艳(1989—), 女, 山东烟台人, 博士研究生, 从事土壤-地下水污染物迁移转化研究。E-mail: xylyu@nuist.edu.cn

*通信作者: 孙媛媛 E-mail: sunyy@nju.edu.cn

基金项目: 国家自然科学基金项目(42077109, 42007114, 42077116); 江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20200817)

Project supported: The National Natural Science Foundation of China (42077109, 42007114, 42077116); The Natural Science Foundation of Jiangsu Province (BK20200817)

全氟及多氟化合物(Per- and polyfluoroalkyl substances, PFAS)具备疏水疏油、热/化学稳定性和高表面活性等特点,被广泛应用于工业生产和日常生活等多个领域^[1-2]。长达60 a的生产和使用导致大量PFAS进入多种环境介质,如土壤、地下水和沉积物等^[3-6],成为近年来备受关注的一类新污染物^[7]。土壤是PFAS最重要的环境储蓄库之一^[8],施用污泥、农药下渗和大气干湿沉降等是其进入土壤的主要途径^[9-11],污染场地土壤中PFAS浓度甚至高达 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 数量等级^[12-13]。作为持久性有机污染物(POPs),PFAS具有环境持久性、生物累积性和高毒性等特征^[14-15],土壤PFAS污染对人类健康的潜在风险已成为目前全球关注的热点。

土壤有机污染物可划分为3种赋存形态:可脱附态、有机结合态和残渣态^[16-17],可脱附态、有机结合态污染物分别具有较高和中等的生物可利用性,而残渣态污染物很难或几乎不能被植物根系吸收,生物可利用性极低^[17]。因此,土壤中有机污染物的赋存形态决定其生物可利用性,进而影响其对周围环境和生物的环境风险^[18]。已有研究指出,植物根际显著改变土壤中有机污染物的形态分布,改变其生物有效性^[19]。部分学者虽然已对土壤PFAS污染的环境风险开展研究,但多数研究仅关注PFAS的植物毒性^[17,20],发现PFAS可以显著抑制植物生物量、降低净光合速率、改变根和叶的代谢通路^[10,17,21-26]。但是,关于植物能否改变土壤-植物系统中PFAS的赋存形态并影响PFAS的生物可利用性还未见报道。而国内外多项研究指出,有机污染物环境风险的精准评估必须基于土壤中有机污染物的生物可利用性而非总浓度^[18,27-28]。因此,考虑植物对土壤中PFAS生物可利用性的影响,对于准确评估PFAS在土壤-植物系统中的环境风险具有重要意义。

基于此,本研究以土壤中检出频率和浓度较高的全氟辛酸(PFOA)作为代表性PFAS^[29-30],选择根系较发达的萝卜为代表性植物,探究萝卜对土壤中PFOA赋存形态影响及吸收特征。采用连续提取法分析土壤中PFOA赋存形态,揭示萝卜对土壤中PFOA赋存形态的改变,通过测定萝卜的生物量和光合指标,评估PFOA对萝卜的毒性作用。

1 材料与方法

1.1 PFOA

放射性标记PFOA-[1-¹⁴C](¹⁴C-PFOA)购自美国

放射性化学公司,放射性为 $2.035\text{ GBq}\cdot\text{mmol}^{-1}$,放射化学纯度99%。未标记PFOA(CAS 335-67-1,96%分析纯)购自德国克曼公司。

1.2 植物培养

供试土壤采自江苏省南京市六合试验基地(0~20 cm),土壤风干、敲碎、过2 mm筛后密封保存备用。本课题组前期发表文章已对土壤理化性质进行表征^[21],土壤pH为6.43,有机碳含量为 $10.3\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,总氮、总磷和总钾分别为 $1.1\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $9.17\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。

参考实际工业污染土壤PFOA污染水平^[12,31],将土壤PFOA浓度设为 $0.2\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ (以干质量计)。用 $50\text{ }\mu\text{Ci }^{14}\text{C-PFOA}$ 和未标记PFOA储备溶液($10\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$)配制PFOA原液,水浴超声混匀。将风干土壤和一定量PFOA原液充分混合并老化10个月,分析老化后土壤放射性¹⁴C-化合物浓度为 $0.20\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $4.67\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。实验共设置5个处理:包括3个种植萝卜组(土壤中PFOA浓度分别为 $0\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记为空白、PFOA 0.2-有种植和PFOA 5-有种植),和2个无种植组(土壤中PFOA浓度分别 0.2 和 $5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别记为PFOA 0.2-无种植和PFOA 5-无种植),每个处理设4个重复。

供试萝卜(*Raphanus sativus* L.)品种为扬花萝卜,购自绿领种业有限公司(江苏南京)。将种子播种于上述不同处理组土壤中并温室培养,培养盆尺寸为 $10.5\text{ cm}\times 15\text{ cm}\times 11.5\text{ cm}$,培养期间不添加任何肥料。控制温室昼/夜温度为 $28\text{ }^{\circ}\text{C}/20\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为60%,光照为 $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$ 。土壤湿度保持在60%~70%之间,实验期间无渗滤液产生。

1.3 光合参数

收获前一周测定植物的光合参数。测定萝卜顶部第三片叶片的叶绿素含量,取 0.1 g 叶片置于研钵内,加入少量石英砂充分研磨变白,无水乙醇冲洗研钵、研棒及残渣至离心管中,摇匀后置于 $4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱,避光条件下待乙醇将叶绿素提取完全后, $4\text{ }000\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 离心10 min后取上清液,采用分光光度计(Shimadzu,日本)在663 nm和645 nm波长下测定并计算叶绿素a和叶绿素b含量。

通过Li-6800便携式光合仪(Li-COR,美国)测定同一叶片的暗反应参数(F_v/F_m)和气体交换参数,包括净光合速率(Photosynthetic rate, P_n)、气孔导度(Transpiration rate, G_s)、胞间 CO_2 浓度(Intercellular CO_2 concentration, C_i)和蒸腾速率(Transpiration rate, Tr)。测定条件为光强 $200\text{ }\mu\text{mol}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{s}^{-1}$,气体流动速

率 $700 \mu\text{mol} \cdot \text{s}^{-1}$, CO_2 浓度 $400 \mu\text{mol} \cdot \text{mol}^{-1}$, 相对湿度 60%。

1.4 生物量和 ^{14}C 放射性活度测定

种子发芽 60 d 后收获萝卜, 依次用自来水和超纯水冲洗植株, 每盆植株目数为 6 株, 生长状态无明显差别, 将植株分为地上部(茎和叶)和地下部, 冷冻干燥至恒质量, 称其生物量(地上部+地下部)。收获后的土壤充分混匀后取样并冷冻干燥以备分析。根据 ^{14}C -化合物的放射量计算土壤和植物中 PFOA 浓度, 分别取一定量研磨后植物(分为地上部和地下部)和土壤样品置于生物氧化仪(Sample Oxidizer, Model 307, PerkinElmer, 美国)中, 高温燃烧生成 $^{14}\text{CO}_2$ (800~900 $^{\circ}\text{C}$), 经碱性闪烁液(xysolve C-400, Zinsser Analytic, 德国)吸收后用液体闪烁计数器(LS6500, Beckman Coulter, Brea, 加拿大)测定其 ^{14}C 放射量, PFOA 回收率为 79.0%~82.0%。

1.5 土壤中 PFOA 赋存形态测定

根据 SABATE 等^[16]和 XIANG 等^[17]的方法, 分析土壤中 PFOA 赋存形态。准确称取 1 g 冻干土壤于 50 mL 聚丙烯离心管, 加入 10 mL 含有 75 $\text{mmol} \cdot \text{L}^{-1}$ 2-羟丙基- β -环糊精(HPCD)和 0.04 $\text{g} \cdot \text{mL}^{-1}$ 叠氮化钠(NaN_3)的提取剂混合物。25 $^{\circ}\text{C}$ 条件下避光振荡, 摇床转速设置为 150 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 依次在 20、60、120、180 h 和 240 h 时取出, 3 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 离心 20 min 后取上清液, 将所有上清液混匀, 通过 LSC 测量其放射性, 即土壤中可脱附态 PFOA, 回收率为 78.3%~80.3%。将上述提取后土壤风干, 准确称取 0.5 g 干燥土壤于 50 mL 聚丙烯离心管, 加入 7.5 mL 甲醇并超声 10 min, 25 $^{\circ}\text{C}$ 、4 000 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 条件下离心 10 min 后取上清液, 重复提取 3 次后, 测定所有上清液的放射性, 即土壤中有机结合态 PFOA, 回收率为 93.7%~95.2%。土壤中 PFOA 总量测定同 1.4 燃烧法, 残渣态 PFOA 为总量与可脱附态、有机结合态 PFOA 浓度间的差值, 即残渣态=总量-可脱附态-有机结合态。

1.6 数据分析

数据结果以平均值 $\pm$ 标准偏差表示。采用 Excel 2019 和 SPSS 25.0 对数据进行计算、统计与处理。通过 Duncan 多重比较法进行单因素方差分析(显著水平 $P < 0.05$)。

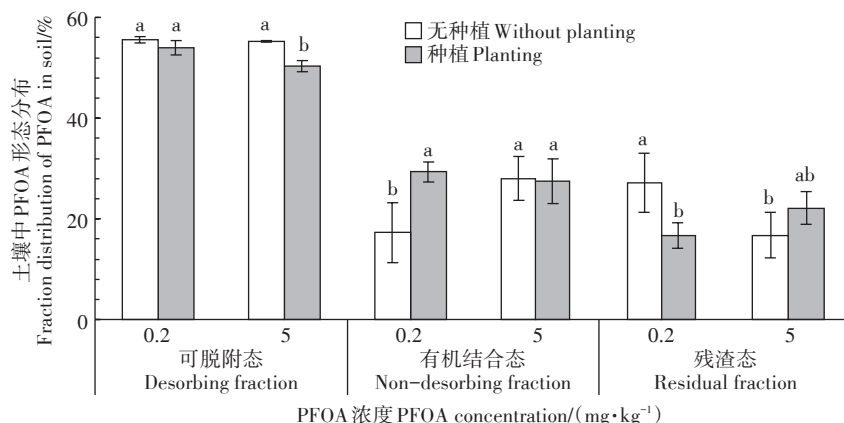
2 结果与讨论

2.1 种植萝卜对土壤中 PFOA 赋存形态的影响

无种植和种植萝卜土壤中 PFOA 的赋存形态分

布如图 1 所示。低浓度 PFOA 胁迫下 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$), 种植组土壤中可脱附态、有机结合态和残渣态 PFOA 的百分含量分别为 54.0%、29.3% 和 16.7%, 与无种植组相比(可脱附态: 55.5%, 有机结合态: 17.3%, 残渣态: 27.2%), 有机结合态 PFOA 增加 12 个百分点, 残渣态 PFOA 下降 10.5 个百分点, 可脱附态 PFOA 则无显著变化。可脱附态和有机结合态的有机污染物分别具有较高和中等的生物可利用性, 而残渣态生物可利用性极低^[17]。因此, 种植萝卜可能提高低浓度 PFOA 污染土壤中 PFOA 的生物可利用性。前期研究证实植物根系分泌物是影响土壤中有有机污染物[包括 PFOA、PFOS (Perfluorooctanesulfonate) 等]赋存形态的重要因素^[19, 32-33]。因此, 种植萝卜使土壤中残渣态 PFOA 含量下降可能是由于萝卜根系分泌物导致残渣态 PFOA 发生解吸, 相关机制如下: (1) 根系分泌物通过竞争 PFOA 所占据的有效吸附位点或区域, 减弱 PFOA 与土壤间吸附作用, 促使 PFOA 溶解至土壤溶液^[19, 34]; (2) 根系分泌物, 尤其是低分子量有机酸 (Low-molecular-weight organic acid, LMWOA), 能够溶解土壤中金属离子、Fe/Al 氧化物和有机质^[26, 35-36], 提高土壤中多价阳离子、 Fe^{3+} 、 Al^{3+} 和溶解性有机质的含量^[33]。其中, LMWOA 能够阻断金属离子桥键的形成, 抑制“土壤-多价阳离子-PFOA”三相络合物的形成, 并通过对 Fe/Al 氧化物的溶解作用以降低土壤与 PFOA 间静电引力, 进而促进 PFOA 发生解吸^[26, 37]。另外, 疏水作用是控制 PFOA 吸附行为的重要机制^[37-38], 由于 LMWOA 促使土壤释放有机质, 导致土壤与 PFOA 间疏水作用减弱, 同样有利于 PFOA 解吸^[26, 33]。

高浓度 ($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) PFOA 胁迫下, 种植组土壤中可脱附态、有机结合态和残渣态 PFOA 的百分含量分别为 50.3%、27.5% 和 22.2%, 与无种植组相比(可脱附态: 55.2%, 有机结合态: 28.0%, 残渣态: 16.8%), 土壤可脱附态 PFOA 下降 4.9 个百分点, 有机结合态和残渣态 PFOA 无显著变化(图 1)。与低浓度 ($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) PFOA 相比, 高浓度 PFOA 胁迫下种植萝卜对 PFOA 形态分布影响较小, 说明萝卜对 PFOA 形态分布的影响具有很强的浓度效应。研究表明, 有机污染物胁迫浓度能够影响植物根系分泌物的成分组成及含量^[39-41], 如王姣龙等^[42]发现高浓度萘使紫玉兰根系分泌物中检测的物质种类减少; 王大娟等^[39]发现较低浓度多氯代有机污染物(PCOPs)胁迫促进植物可溶性总糖、有机酸和氨基酸的分泌, 而较高浓度 PCOPs 胁迫抑制植物根系分泌可溶性总糖、有机酸和氨基



误差线代表标准差($n=3$)。不同字母表示同一形态不同处理间存在显著性差异($P<0.05$)

The error bars represent standard deviations ($n=3$). Different letters indicate significant differences among different treatments for a same fraction ($P<0.05$)

图1 不同PFOA浓度土壤中PFOA的形态分布

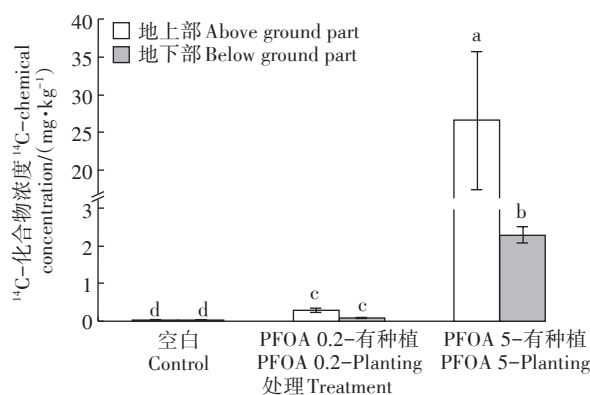
Figure 1 Fraction distribution of PFOA in soil under different concentrations of PFOA exposure

酸。因此,推测不同浓度PFOA胁迫下萝卜根系分泌物可能在数量和成分上存在差异。土壤-植物体系中PFOA形态分布变化可能是土壤性质、PFOA浓度和植物根系耦合作用影响的结果,鉴于土壤性质和根系分泌物种类的复杂性,其中的生化和分子机制还需进一步研究和证明。

2.2 萝卜对土壤中PFOA的吸收作用

采用放射性示踪剂(即测定 ^{14}C -化合物的放射性活度)检测PFOA在萝卜植株中的吸收和转运特征。萝卜对土壤中PFOA的吸收作用如图2所示,萝卜地上部和地下部均检出 ^{14}C -化合物,0.2 mg·kg⁻¹和5 mg·kg⁻¹ PFOA胁迫下,地上部 ^{14}C -化合物浓度分别为0.29 mg·kg⁻¹和26.56 mg·kg⁻¹,显著高于地下部浓度(0.08 mg·kg⁻¹和2.29 mg·kg⁻¹),表明萝卜可从土壤中富集PFOA。0.2 mg·kg⁻¹ PFOA污染土壤中萝卜地下部富集系数(RCF ,根放射量/土壤放射量)、地上部富集系数(SCF ,茎叶放射量/土壤放射量)和地上部的转运系数(TF ,茎叶放射量/根放射量)分别为0.41、1.45和3.56;5 mg·kg⁻¹ PFOA污染土壤中萝卜的 RCF 、 SCF 和 TF 分别为0.49、5.69和11.59。由于萝卜地下部同时具有根和茎的特征,缺乏可食用茎和地上茎之间的典型屏障(凯氏带),因此,萝卜地下部的结果更加趋近茎的趋势,而非根的趋势^[10];另外,蒸腾作用是植物吸收、转运PFAS的主要动力,多数PFAS(除大于9的长碳链外)可被植物根系吸收后随蒸腾流转运至地上部发生累积^[10,43-44],这可能是萝卜地上部PFOA浓度远高于地下根部的重要原因。与此类似,BLAINE等^[10]在探究不同类型植物对土壤中PFAS的吸收转运

作用时,发现萝卜地上部PFOA浓度高出地下部5~10倍,其 RCF 和 SCF 值分别为 0.85 ± 0.17 和 7.60 ± 1.52 。另外,5 mg·kg⁻¹ PFOA胁迫下萝卜地上部和地下部的PFOA浓度(26.56 mg·kg⁻¹和2.29 mg·kg⁻¹)均远高于0.2 mg·kg⁻¹ PFOA胁迫下相应萝卜部位的浓度(0.29 mg·kg⁻¹和0.08 mg·kg⁻¹),表明高浓度PFOA土壤中萝卜对PFOA的累积作用更强,这与PFAS在生菜、黄瓜和小麦等植物中的累积规律一致^[20,21,45-47],但是目前关于不同剂量PFAS下植物富集能力差异的相关机制尚不清楚。与已有文献对比发现植物对PFOA的富集能力在种属间显著差异,如XIANG等^[17]研究了20



误差线代表标准差($n=3$)。不同字母表示差异显著($P<0.05$)。下同

The error bars represent standard deviations ($n=3$). Different letters indicate significant differences ($P<0.05$). The same below

图2 不同PFOA浓度处理土壤栽培萝卜地上部(茎、叶)和地下部 ^{14}C -化合物浓度

Figure 2 Concentration of ^{14}C -chemical in below (stem and leaf) and above ground of radish plants grown in soil treated with different concentrations of PFOA

个品种生菜对PFOA的吸收和转运作用,发现在两种PFOA浓度胁迫下($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),生菜的 RCF 和 SCF 高达 17.7 ± 1.54 和 6.5 ± 0.05 ;DU等^[21]发现黄瓜中PFOA的 RCF 值高达 $11.3 \sim 17.4$ 。BLAINE等^[10]报道了芹菜对PFOA的 RCF 和 SCF 值为 1.42 ± 0.37 和 0.71 ± 0.21 ,西红柿为 0.96 ± 0.10 和 2.42 ± 0.50 ,豌豆为 0.79 ± 0.22 和 0.52 ± 0.04 ,ZHANG等^[25]发现小麦对PFOA的 RCF 值较小,仅为 0.021 。这可能与植物根系生理及比表面积、生长期间的总水分蒸腾有关^[10]。

2.3 土壤中PFOA对萝卜生长的影响

不同浓度PFOA($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫下萝卜生物量(干质量)如图3A所示。与空白组相比,低浓度PFOA胁迫使萝卜生物量显著降低,高浓度PFOA胁迫下无显著差异。实验PFOA浓度范围内,萝卜生长未表现出明显的受害症状,表明萝卜对PFOA污染具有较强的耐受能力。XIANG等^[17]研究了多个品种生菜对土壤中PFOA污染的吸收和转运规律,发现PFOA对生菜生物量的影响因生菜品种而异,如部分品种的生物量呈现低浓度PFOA促进而高浓度无显著影响的规律,部分品种的生物量几乎不受PFOA胁迫影响,还有少部分长叶生菜品种的生物量变化与本实验结果相似,即随PFOA浓度的升高呈现先降低后增加的趋势, $0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOA胁迫下生菜生物量最小, $1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOA胁迫下生菜生物量与对照组无显著差异,但相应的机制还尚不清楚。PFOA在植物地上部的积累会影响叶片的叶绿素含量和光合作用,进而影响植物生长。本研究通过分析不同实验条件下叶绿素及光合参数的变化发现,与空白组相比,低浓度PFOA胁迫对叶绿素含量(图3B)、净光合速率(图4A)、细胞间 CO_2 浓度(图4B)、叶片蒸腾速率

(图4C)和气孔导度(图4D)均无显著影响,但显著抑制了暗反应参数(图4E);高浓度PFOA胁迫对所有测定的光合参数均无显著性影响(图4),这与高浓度胁迫下萝卜生物量与空白组无显著差异一致。具体的微观机制还有待进一步探索和研究。

在PFOA污染土壤上种植作物或进行植物修复时,需同时考虑植物对PFOA的富集能力及其对PFOA的耐受能力。PFOA污染土壤更适合种植耐受能力强且可食用部分对PFOA富集能力差的作物,本研究中萝卜地下部为可食用部分,对PFOA的富集能力较差(RCF 为 $0.41 \sim 0.49$),且对PFOA具有一定耐受能力,较适合种植于PFOA污染土壤。

3 结论

(1)低浓度全氟辛酸(PFOA)胁迫下,萝卜使土壤中有机关态PFOA显著增加、残渣态PFOA显著下降,而高浓度PFOA胁迫下萝卜使土壤中可脱附态PFOA显著降低。

(2)萝卜可从土壤中富集PFOA,且地上部的富集能力远大于地下部,其地下部和地上部富集系数分别为 $0.41 \sim 0.49$ 和 $1.45 \sim 5.69$ 。

(3)低浓度PFOA($0.2 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫降低了萝卜生物量,高浓度PFOA($5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)胁迫未影响萝卜生物量。

参考文献:

- [1] LINDSTROM A B, STRYNAR M J, LIBELO E L. Polyfluorinated compounds: Past, present, and future[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19): 7954–7961.
- [2] MOODY C A, FIELD J A. Perfluorinated surfactants and the environmental implications of their use in fire-fighting foams[J]. *Environmen-*

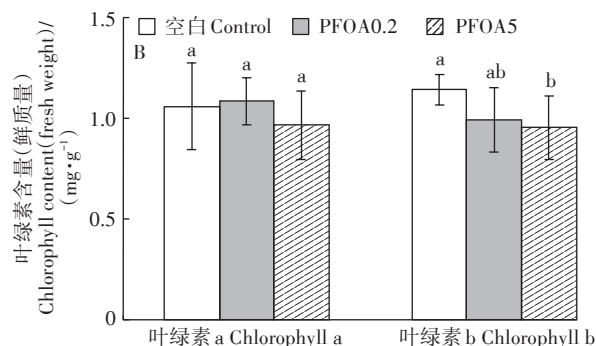
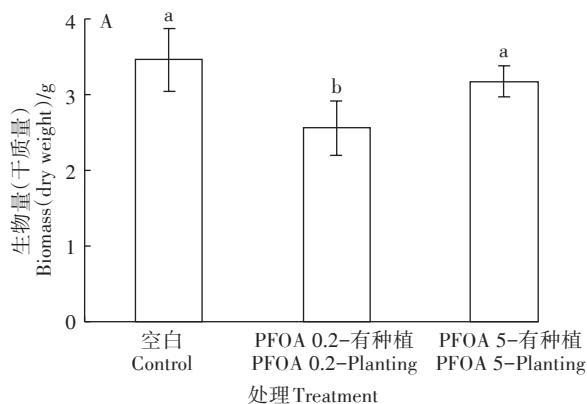


图3 不同PFOA浓度处理土壤栽培萝卜的生物量及叶片中叶绿素含量

Figure 3 Biomass of radish plants and chlorophyll in radish leaves under different concentrations of PFOA exposure

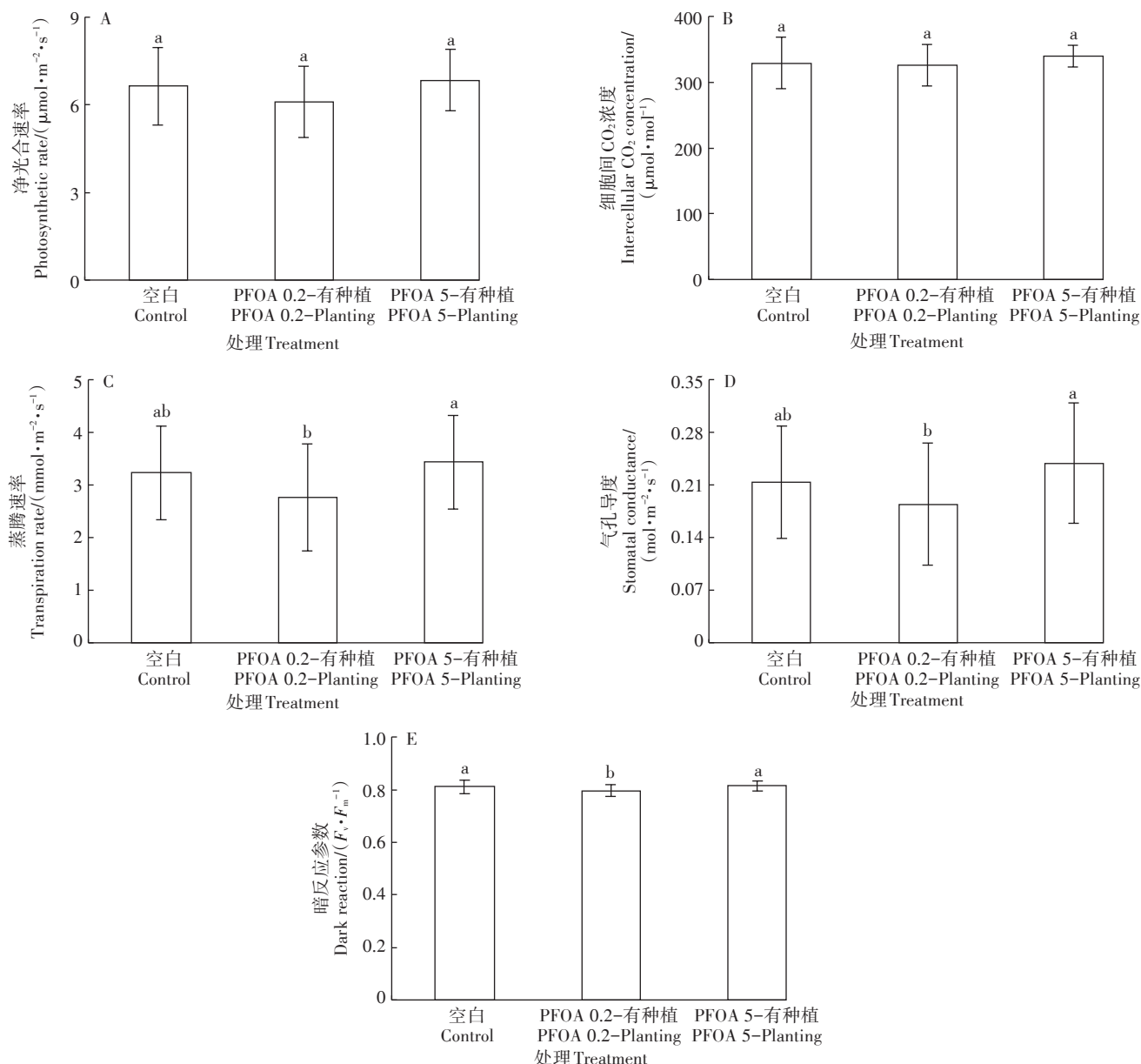


图4 不同PFOA浓度处理土壤栽培的萝卜叶片净光合速率、细胞间 CO_2 浓度、蒸腾速率、气孔导度、暗反应参数

Figure 4 Photosynthetic rate, intercellular CO_2 concentration, transpiration rate, stomatal conductance, dark reaction in radish leaves exposed to different concentrations of PFOA

tal Science & Technology, 2000, 34(18):3864-3870.

- [3] LI F, ZHANG C, QU Y, et al. Quantitative characterization of short- and long-chain perfluorinated acids in solid matrices in Shanghai, China[J]. *Science of the Total Environment*, 2010, 408(3):617-623.
- [4] ZHU H, KANNAN K. Distribution and partitioning of perfluoroalkyl carboxylic acids in surface soil, plants, and earthworms at a contaminated site[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 647:954-961.
- [5] 谭冬飞, 张艳伟, 王璐, 等. 海南省部分区域农田地下水中全氟烷基酸类浓度水平和潜在污染源分析[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(2):350-357. TAN D F, ZHANG Y W, WANG L, et al. Distribution and potential PFAA pollution sources in farmland groundwater from Hainan Province[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(2):

350-357.

- [6] 郑海, 胡国成, 许振成, 等. 东江流域表层沉积物中全氟辛酸和全氟辛烷磺酸含量水平研究[J]. 农业环境科学学报, 2013, 32(5):778-782. ZHENG H, HU G C, XU Z C, et al. Contamination characteristics of perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in surface sediments from Dongjiang River, South China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2013, 32(5):778-782.
- [7] LIU Z, LU Y, SONG X, et al. Multiple crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl substances around a mega fluorochemical industrial park, China: Implication for planting optimization and food safety[J]. *Environment International*, 2019, 127:671-684.
- [8] WANG W, RHODES G, GE J, et al. Uptake and accumulation of per-

- and polyfluoroalkyl substances in plants[J]. *Chemosphere*, 2020, 261: 127584.
- [9] SHIGEI M, AHRENS L, HAZAYMEH A, et al. Per- and polyfluoroalkyl substances in water and soil in wastewater-irrigated farmland in Jordan[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 716: 137057.
- [10] BLAINE A C, RICH C D, SEDLACKO E M, et al. Perfluoroalkyl acid distribution in various plant compartments of edible crops grown in biosolids-amended soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(14): 7858-7865.
- [11] LIU Z, LU Y, WANG P, et al. Pollution pathways and release estimation of perfluorooctane sulfonate (PFOS) and perfluorooctanoic acid (PFOA) in central and eastern China[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 580: 1247-1256.
- [12] LIU Z, LU Y, SHI Y, et al. Crop bioaccumulation and human exposure of perfluoroalkyl acids through multi-media transport from a mega fluorochemical industrial park, China[J]. *Environment International*, 2017, 106: 37-47.
- [13] TIAN Y, YAO Y, CHANG S, et al. Occurrence and phase distribution of neutral and ionizable per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) in the atmosphere and plant leaves around landfills: A case study in Tianjin, China[J]. *Environmental Science & Technology*, 2018, 52(3): 1301-1310.
- [14] BANGMA J, EAVES L A, OLDENBURG K, et al. Identifying risk factors for levels of per- and polyfluoroalkyl substances (PFAS) in the placenta in a high-risk pregnancy cohort in North Carolina[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(13): 8158-8166.
- [15] STEENLAND K, FLETCHER T, SAVITZ D A. Epidemiologic evidence on the health effects of perfluorooctanoic acid (PFOA)[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2010, 118(8): 1100-1108.
- [16] SABATE J, VINAS M, SOLANAS A M. Bioavailability assessment and environmental fate of polycyclic aromatic hydrocarbons in biosolids-contaminated soil[J]. *Chemosphere*, 2006, 63(10): 1648-1659.
- [17] XIANG L, CHEN L, YU L Y, et al. Genotypic variation and mechanism in uptake and translocation of perfluorooctanoic acid (PFOA) in lettuce (*Lactuca sativa* L.) cultivars grown in PFOA-polluted soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 636: 999-1008.
- [18] WU X, ZHU L. Evaluating bioavailability of organic pollutants in soils by sequential ultrasonic extraction procedure[J]. *Chemosphere*, 2016, 156: 21-29.
- [19] CHENG Y, DING J, LIANG X, et al. Fractions transformation and dissipation mechanism of dechlorane plus in the rhizosphere of the soil-plant system[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(11): 6610-6620.
- [20] LI P, XIAO Z, SUN J, et al. Metabolic regulations in lettuce root under combined exposure to perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate in hydroponic media[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 726: 138382.
- [21] DU W, LIU X, ZHAO L, et al. Response of cucumber (*Cucumis sativus*) to perfluorooctanoic acid in photosynthesis and metabolomics[J]. *Science of the Total Environment*, 2020, 724: 138257.
- [22] KNIGHT E R, BRAUNIG J, JANIK L J, et al. An investigation into the long-term binding and uptake of PFOS, PFOA and PFHxS in soil-plant systems[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2021, 404(Pt B): 124065.
- [23] GHISI R, VAMERALI T, MANZETTI S. Accumulation of perfluorinated alkyl substances (PFAS) in agricultural plants: A review[J]. *Environmental Research*, 2019, 169: 326-341.
- [24] BLAINE A C, RICH C D, HUNDAL L S, et al. Uptake of perfluoroalkyl acids into edible crops via land applied biosolids: Field and greenhouse studies[J]. *Environmental Science & Technology*, 2013, 47(24): 14062-14069.
- [25] ZHANG L, SUN H, WANG Q, et al. Uptake mechanisms of perfluoroalkyl acids with different carbon chain lengths (C2-C8) by wheat (*Triticum aestivum* L.) [J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 654: 19-27.
- [26] XIANG L, CHEN X T, YU P F, et al. Oxalic acid in root exudates enhances accumulation of perfluorooctanoic acid in lettuce[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(20): 13046-13055.
- [27] ORTEGA-CALVO J J, HARMSSEN J, PARSONS J R, et al. From bioavailability science to regulation of organic chemicals[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(17): 10255-10264.
- [28] WU X, WANG W, ZHU L. Enhanced organic contaminants accumulation in crops: Mechanisms, interactions with engineered nanomaterials in soil[J]. *Environmental Pollution*, 2018, 240: 51-59.
- [29] JIN H, ZHANG Y, ZHU L, et al. Isomer profiles of perfluoroalkyl substances in water and soil surrounding a Chinese fluorochemical manufacturing park[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 49(8): 4946-4954.
- [30] LI J, HE J, NIU Z, et al. Legacy per- and polyfluoroalkyl substances (PFASs) and alternatives (short-chain analogues, F-53B, GenX and FC-98) in residential soils of China: Present implications of replacing legacy PFASs[J]. *Environment International*, 2020, 135: 105419.
- [31] ADAMSON D T, NICKERSON A, KULKARNI P R, et al. Mass-based, field-scale demonstration of PFAS retention within AFFF-associated source areas[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(24): 15768-15777.
- [32] YEE D, WEINBERGER P, KHAN S U. Release of soil-bound prometryne residues under different soil pH and nitrogen fertilizer regimes [J]. *Weed Science*, 1985, 33: 882-887.
- [33] YU P F, LI Y W, ZOU L J, et al. Variety-selective rhizospheric activation, uptake, and subcellular distribution of perfluorooctanesulfonate (PFOS) in lettuce (*Lactuca sativa* L.) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2021, 55(13): 8730-8741.
- [34] ORAM L L, STRAWN D G, MÖLLER G. Chemical speciation and bioavailability of selenium in the rhizosphere of *Symphyotrichum eatonii* from reclaimed mine soils[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(3): 870-875.
- [35] TANG J, ZHANG Y, ZHA Y, et al. Oxalate enhances desorption of perfluorooctane sulfonate from soils and sediments[J]. *Water, Air, & Soil Pollution*, 2017, 228(12): 462.
- [36] GAO Y, WANG N, LI H, et al. Low-molecular-weight organic acids

- influence the sorption of phenanthrene by different soil particle size fractions[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2015, 44(1):219-227.
- [37] LYU X, LIU X, SUN Y, et al. Transport and retention of perfluorooctanoic acid (PFOA) in natural soils: Importance of soil organic matter and mineral contents, and solution ionic strength[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2019, 225:103477.
- [38] HIGGINS C P, LUTHY R G. Sorption of perfluorinated surfactants on sediments[J]. *Environmental Science & Technology*, 2006, 40(23):7251-7256.
- [39] 王大娟, 贾晓珊, 陈娴. 多氯代有机污染物胁迫下植物某些根系分泌物的变化[J]. 中山大学学报(自然科学版), 2007, 46(1):110-113. WAN D J, JIA X S, CHEN X. Effects of PCOPs on som root exudates of plants[J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 2007, 46(1):110-113.
- [40] 胡芳雨, 孟凡波, 张闻, 等. 黑麦草根分泌氨基酸组分对PAHs胁迫的响应[J]. 农业环境科学学报, 2020, 39(9):1937-1945. HU F Y, MENG F B, ZHANG W, et al. Response of amino acids in ryegrass root exudates to polycyclic aromatic hydrocarbon stress[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2020, 39(9):1937-1945.
- [41] 谢晓梅, 廖敏, 杨静. 苣对黑麦草根系几种低分子量有机分泌物的影响[J]. 生态学报, 2011, 31(24):7564-7570. XIE X M, LIAO M, YANG J. Effects of pyrene on low molecule weight organic compounds in the root exudates of ryegrass (*Lolium perenne* L.) [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2011, 31(24):7564-7570.
- [42] 王姣龙, 李际平, 湛小勇, 等. 苣胁迫下紫玉兰根系活性及根系分泌物的响应[J]. 中南林业科技大学学报, 2017, 37(2):50-56. WANG J L, LI J P, CHEN X Y, et al. Response of polycyclic aromatic hydrocarbon pyrene on root exudate components and root activity of *Magnolia liliiflora* Desr[J]. *Journal of Central South University of Forestry & Technology*, 2017, 37(2):50-56.
- [43] FELIZETER S, MCLACHLAN M S, DE VOOGT P. Uptake of perfluorinated alkyl acids by hydroponically grown lettuce (*Lactuca sativa*) [J]. *Environmental Science & Technology*, 2012, 46(21):11735-11743.
- [44] 赵立杰, 周萌, 任新豪, 等. 全氟辛烷磺酸和全氟辛烷羧酸在天津大黄堡湿地地区鱼体和蔬菜中的分布研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(12):2321-2327. ZHAO L J, ZHOU M, REN X H, et al. Distribution of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid in different tissues of fishes and vegetables from Dahuangpi wetland nature reserve, Tianjin, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2321-2327.
- [45] STAHL T, HEYN J, THIELE H, et al. Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plants [J]. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 2009, 57(2):289-298.
- [46] WEN B, LI L, ZHANG H, et al. Field study on the uptake and translocation of perfluoroalkyl acids (PFAAs) by wheat (*Triticum aestivum* L.) grown in biosolids-amended soils[J]. *Environment Pollution*, 2014, 184:547-554.
- [47] LI P, OYANG X, XIE X, et al. Perfluorooctanoic acid and perfluorooctane sulfonate co-exposure induced changes of metabolites and defense pathways in lettuce leaves[J]. *Environment Pollution*, 2020, 256:113512.