

秦莉, 安毅, 韩建华, 等. PFOS 对小油菜生长发育的毒性效应及机制[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(12): 2401–2406.

QIN Li, AN Yi, HAN Jian-hua, et al. Toxic effects and mechanisms of PFOS on the growth of rape (*Brassica campestris* L.) [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(12): 2401–2406.

PFOS 对小油菜生长发育的毒性效应及机制

秦莉¹, 安毅¹, 韩建华², 陈丽³, 王伟¹, 潘炯⁴, 陈庚妮⁴, 端正花^{4*}

(1. 农业部环境保护科研监测所, 天津 300191; 2. 天津市农业环境保护管理监测站, 天津 300061; 3. 重庆市农业生态与资源保护站, 重庆 401121; 4. 天津理工大学环境科学与安全工程学院, 天津 300384)

摘要:为探讨全氟辛烷磺酸(PFOS)对小油菜的毒性效应,采用室内盆栽种植的方法,研究了PFOS对小油菜发芽和生长发育的影响,并结合土壤酶活性变化探讨了其毒性机理。结果表明:PFOS暴露浓度与小油菜的发芽率和茎叶增长率表现为非单调剂量-效应关系。50 mg·kg⁻¹暴露时小油菜发芽和茎叶的增长率分别为9.24%($P=0.001$)和47.97%($P<0.001$);小油菜发芽和茎叶生长的抑制浓度分别为100 mg·kg⁻¹和250 mg·kg⁻¹;随着暴露进一步增大,小油菜发芽和茎叶增长的抑制率无显著变化。土壤蔗糖酶和碱性蛋白酶活性在PFOS暴露下也表现为低浓度刺激表达、高浓度抑制表达效应,这与PFOS暴露下小油菜的生长规律具有一定的正相关性。因此,PFOS对小油菜的毒性不仅与其对小油菜的直接损伤有关,还与其对小油菜种植土壤肥力的影响有关。

关键词:PFOS; 小油菜; 生长发育; 土壤酶活性; 毒性机制

中图分类号:X171.5 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)12-2401-06 doi:10.11654/jaes.2017-0705

Toxic effects and mechanisms of PFOS on the growth of rape (*Brassica campestris* L.)

QIN Li¹, AN Yi¹, HAN Jian-hua², CHEN Li³, WANG Wei¹, PAN Jiong⁴, CHEN Geng-ni⁴, DUAN Zheng-hua^{4*}

(1. Agro-Environmental Protection Institute, Ministry of Agriculture, Tianjin 300191, China; 2. Tianjin Agro-Environment Monitoring Station, Tianjin 300061, China; 3. Chongqing Agricultural Ecology and Resource Protection Station, Chongqing 401121, China; 4. School of Environmental Science and Safety Engineering, Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China)

Abstract: To determine the toxic effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on rape (*Brassica campestris* L.), the effects and mechanisms of PFOS on rape germination and growth, combined with changes of soil enzyme activities were studied using potted plants. The results showed a non-monotonic dose-response relationship between PFOS exposure concentrations and rape germination rates and stem length. At < 50 mg·kg⁻¹ PFOS concentrations, the germination rates and stem length increased by 9.24% ($P=0.001$) and 47.97% ($P<0.001$), respectively. Concentrations that inhibited rape germination and stem growth were 100 mg·kg⁻¹ and 250 mg·kg⁻¹ PFOS, respectively. However, with increased PFOS concentrations, rape germination and stem growth did not change significantly. Soil sucrose and alkaline protease activities increased with low PFOS doses and were inhibited by high PFOS doses, and were positively correlated with rape growth. Therefore, PFOS toxicity directly affected rape germination and growth, and influenced the planting soil fertility.

Keywords: PFOS; rape; growth; soil enzyme activity; toxicity

收稿日期: 2017-05-15 录用日期: 2017-09-12

作者简介: 秦莉(1973—),女,新疆石河子人,博士,副研究员,主要从事环境监测与污染控制、废弃物处理与利用及农业环境管理方面的研究。

E-mail: ql-tj@163.com

* 通信作者: 端正花 E-mail: duanzhenghua@mail.nankai.edu.cn

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项“农产品产地重金属污染安全评估技术与设备研制”(201403014); 中国农业科学院创新工程项目(2016-cxgc-lyj); 天津理工大学校级教学基金项目(YB17-30)

Project supported: Special Fund for Agro-scientific Research in the Public Interest for "The Technology in Safety Assessment and Equipment Development of Agricultural Producing Area Polluted by Heavy Metals" (201403014); Innovation Project of Chinese Academy of Agriculture Sciences (2016-cxgc-lyj); Teaching Fund Project of Tianjin University of Technology (YB17-30)

近年来,随着经济的发展,各类农药、工业添加剂的广泛使用,使得大量污染物通过大气沉降、地表径流不断转移到土壤中^[1]。由于其具有持久性、生物蓄积性、半挥发性和长距离迁移性^[2],能稳定存在于土壤中,造成了严重的土壤污染,给动植物和人类带来巨大的生态威胁。新型污染物全氟化合物(Perfluorinated compounds, PFCs)被大规模使用在生产领域,导致这类物质广泛进入全球环境。PFCs甚至在北极地区的生物体及环境介质中有检出^[3]。据 Pan 等^[4]报道,全氟化合物的代表物质全氟辛烷磺酸(Perfluorooctane sulfonate, PFOS, $C_8F_{17}SO_3H$)在长江河口底泥中高达 $536 \mu g \cdot kg^{-1}$ 。目前底泥肥料化也导致了种植土壤中 PFOS 的大面积污染^[5]。Sepulvado 等^[6]发现美国芝加哥某生物固体改良土壤中的 PFOS 浓度范围在 $2 \sim 484 \mu g \cdot kg^{-1}$ 。Meng 等^[7]调查发现 PFOS 为中国北部沿海地区 PFCs 的主要污染物。

一方面,PFOS 在生物的生殖、发育、神经、免疫、遗传等方面具有毒性^[8-9]。课题组前期研究也发现, $0.5 \mu g \cdot L^{-1}$ PFOS 暴露 2 d 即可抑制人体正常肝细胞增殖^[10]。另一方面,PFOS 还能提高细胞膜对疏水性配体的渗透性能,从而使 PFOS 在生物个体中具有较高的生物蓄积速度^[11-12]。据报道,PFOS 在生物体内的蓄积水平是二恶英等的数百至数千倍^[13-14]。因此,土壤环境中广泛存在的 PFOS 可能会通过土壤-植物系统的迁移转化,最终对人体健康造成威胁。目前 PFOS 的研究主要集中于几种模式生物的毒性效应上,针对土壤的毒理学试验十分匮乏。作为人类可食用蔬菜的常见代表小油菜,由于品种齐全、育种和培养技术简单成熟、生长周期短,已被广泛应用于外源化合物在土壤-植物系统中的迁移转化及毒性效应影响研究^[15-17]。本研究拟在温室盆栽条件下,探讨不同浓度下土壤中 PFOS 对小油菜萌发、生长的影响,并结合土壤酶活性的变化,探讨土壤中 PFOS 对小油菜的毒性机理,以期为农业生产中早期预报 PFOS 对作物的毒害效应,为环境监测中 PFOS 污染的评价提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 材料

选用上海青小油菜(*Brassica campestris* L.)作为供试植物,种子购自中国农业科学院蔬菜花卉研究所。PFOS 和二甲基亚砜(DMSO)购自 Sigma-Aldrich 公司。塑料花盆和营养土购自天津市某花卉市场。花盆尺寸为 $45 \text{ cm} \times 20 \text{ cm} \times 30 \text{ cm}$ 。土壤蔗糖酶(S-SC)、

碱性蛋白酶(S-ALPT)、碱性磷酸酶(S-AKP)试剂盒均购自苏州科铭生物有限公司。

1.2 方法

采用温室盆栽试验,每盆准确称取营养土 7 kg。试验前土壤各理化性状见表 1。称取一定量的 PFOS 粉末,加入 2 mL DMSO 助溶到 1 L 纯净水中,均匀搅拌到营养土中。根据 PFOS 土壤环境暴露浓度和预实验结果($50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOS 以下无毒性效应表征),试验共设置 6 个暴露组,即空白对照组、试剂对照组和 50、100、250、500 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOS 组。土壤老化 1 个月后,每盆直接播种蔬菜种子 50 粒。每组设 3 个平行。

表 1 供试土壤理化性状

Table 1 Physical and chemical properties of soil samples

pH	有机质/ $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	孔隙度	含水率	CEC/ $\text{cmol} \cdot \text{kg}^{-1}$
8.21	20.70	0.05	0.57	15.71

蔬菜生长所需光照全部为自然太阳光,温室温度保持在 $20 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 左右。每隔 3 d 浇灌纯净水 1 L。

1.3 观察指标

(1)发芽率:肉眼观察,发芽数以露白为准。计算方法为发芽率=前 10 d 内出芽种子总数/供试种子总数 $\times 100\%$,取 3 盆平均值,并计算标准误差值。

(2)生长状况:在蔬菜出芽 20 d 后,每盆随机计数 10 棵蔬菜,测定其苗长,取 3 盆的平均值,计算标准误差值。

(3)土壤酶活测定:在蔬菜出芽 20 d 后,在每盆土层中按照梅花点采样法采集土样,混合均匀后风干,过 10 目筛后置于 $4 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 冰箱中保存。土壤 S-SC、S-ALPT、S-AKP 的酶活性均依照苏州科铭生物有限公司提供的试剂盒说明书进行测定,取 3 盆的平均值,并计算标准误差值。

1.4 统计分析

每个实验组设 3 个平行样。采用 SPSS 13.0 软件,组内进行 Student-*t* 检验,并用标准误差 SD 表示。组间用 One-way ANOVA 检验。

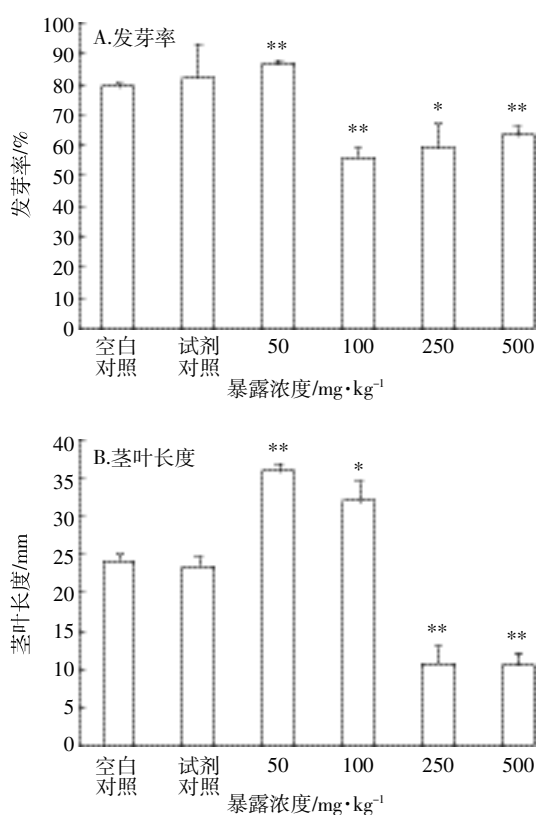
2 结果

2.1 PFOS 对小油菜生长发育的影响

如图 1A 所示,在小油菜的发芽率这个指标上,试剂对照组无毒性效应($P > 0.05$),而 PFOS 暴露组表现为低浓度刺激发芽、高浓度抑制发芽。 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOS 暴露时与空白对照组表现出极显著差异($P =$

0.001), 发芽增长率约为 9.24%; 100 mg·kg⁻¹ 暴露浓度开始小油菜发芽受到极显著抑制 ($P=0.004$), 抑制率约为 29.42%。250 mg·kg⁻¹ 和 500 mg·kg⁻¹ 组的发芽率相对空白组也显著降低, 但是与 100 mg·kg⁻¹ 组均无显著差异 ($P=0.547$ 和 $P=0.717$)。

小油菜发育 20 d 后, 从每组小油菜中各随机抽取 1 棵, 拍照见图 2。由图 2 可见, 随着 PFOS 暴露浓度的升高, 叶片面积和植株高度相对空白对照组, 表现出显著的低浓度刺激生长、叶片相对茂盛, 高浓度抑制生长、叶片相对瘦小发黄的现象。如图 1B 的统计数据所示, 在小油菜的生长发育这个指标上, 试剂对照组无毒性效应 ($P>0.05$), 50 mg·kg⁻¹ PFOS 暴露时茎叶增长率约为 47.97% ($P<0.01$), 与空白对照组存在极显著差异; 100 mg·kg⁻¹ PFOS 暴露时茎叶增长率反而略微降低, 约为 36.41% ($P=0.027$); 250 mg·kg⁻¹ 浓度暴露开始, PFOS 极显著抑制小油菜茎叶的生长 ($P=0.006$), 抑制率约为 55.64%。500 mg·kg⁻¹ 组的茎叶增长也相对空白组极显著降低 ($P<0.01$), 但与 250 mg·kg⁻¹ 组相比无显著差异 ($P=0.915$)。



** 表示处理间有极显著差异 ($P<0.01$),
* 表示处理间有显著差异 ($P<0.05$). 下同

图 1 PFOS 对小油菜生长发育的影响

Figure 1 Influences of PFOS on the growth of rapeseeds



50 mg·kg⁻¹ 100 mg·kg⁻¹ 空白对照 试剂对照 500 mg·kg⁻¹

图 2 PFOS 影响小油菜生长发育的特征

Figure 2 Characters of the growth of rapeseeds induced by PFOS

2.2 PFOS 对种植土壤酶活性的影响

本研究进一步以土壤蔗糖酶(S-SC)、碱性蛋白酶(S-ALPT)和碱性磷酸酶(S-AKP)这 3 种土壤肥力的重要指标酶为研究对象, 分析了 PFOS 对土壤肥力的影响, 从而探讨 PFOS 对小油菜发育影响的低浓度刺激、高浓度抑制机理。

S-SC 的活性测定结果如图 3A 所示。溶剂对照组蔗糖酶活与空白对照组无显著差异 ($P>0.05$)。当 PFOS 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, S-SC 活性显著提高, 与空白对照组表现出极显著差异 ($P<0.01$), 酶活性增长率约为 28.08%; 从 100 mg·kg⁻¹ 开始, S-SC 活性显著下降, 也与空白对照组表现出显著差异 ($P=0.015$), 抑制率达 57.81%。随着暴露浓度进一步增大, 酶活性抑制率与 100 mg·kg⁻¹ 暴露组无显著差异 ($P>0.05$), 说明 100 mg·kg⁻¹ PFOS 即能达到对土壤 S-SC 活性的抑制极限。总体来看, PFOS 对土壤 S-SC 的作用表现为显著的低浓度刺激、高浓度抑制效应。

S-ALPT 活性测定结果如图 3B 所示, 可以看到 50 mg·kg⁻¹ 的 PFOS 即可极显著刺激该酶的活性 ($P=0.006$); 而暴露浓度增大到 100 mg·kg⁻¹ 和 250 mg·kg⁻¹ 时, PFOS 对 S-ALPT 酶活性的刺激作用反而不如 50 mg·kg⁻¹ 时显著 ($P=0.017$ 和 $P=0.027$); 当 PFOS 浓度达 500 mg·kg⁻¹ 时, S-ALPT 酶活性受到显著抑制 ($P=0.038$), 抑制率为 21.55%。总体来看, PFOS 对土壤 S-ALPT 的作用也表现为显著的低浓度刺激、高浓度抑制效应。

S-AKP 酶活性变化如图 3C 所示。当 PFOS 浓度为 50 mg·kg⁻¹ 时, 土壤 S-AKP 活性相对空白对照即显著降低 ($P=0.021$), 酶活抑制率为 7.40%。但是随着暴露浓度增高, 剂量-酶活抑制效应关系不显著。

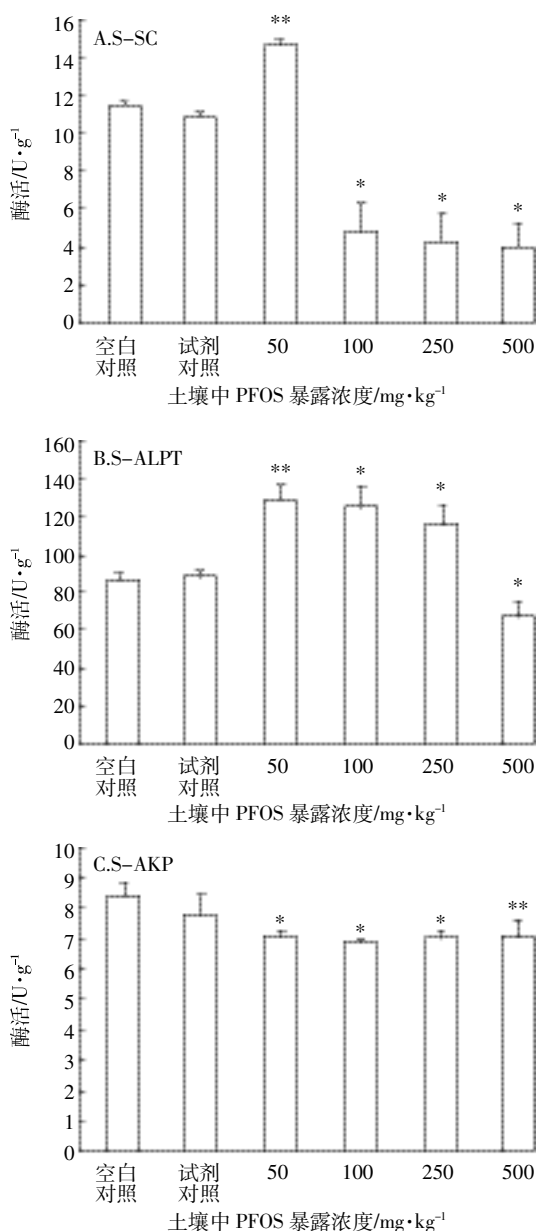


图3 PFOS对土壤酶活性的影响

Figure 3 The influence of PFOS on the activities of solid enzymes

3 讨论

3.1 PFOS对植物的毒性作用规律

PFOS主要通过土壤孔隙水被植物根部吸收,再通过植物的蒸腾作用经木质部或韧皮部汁液转移到植物根茎部位^[18],从而对植物茎叶产生毒性效应。高浓度PFOS能够抑制植物生长已经形成了共识。Stahl等^[19]发现3 d短期暴露中,25 mg·kg⁻¹ PFOS可使黑麦草叶片发黄、燕麦出现坏死现象。吕振娥等^[20]发现PFOS对小麦的根伸长指标最为敏感,EC₅₀值达352 mg·kg⁻¹。Zhao等^[21]研究了PFOS对油菜品种(*Brassica*

chinensis)的根伸长量的影响,结果显示EC₅₀范围从95~200 mg·kg⁻¹不等。因此PFOS对作物的急性毒性相对较小。本实验中PFOS对小油菜的50%生长抑制浓度约为250 mg·kg⁻¹,这与前人的研究结论相一致。

本研究除了发现土壤中高浓度(500 mg·kg⁻¹) PFOS显著抑制小油菜的发芽和生长,还得到了PFOS在低浓度(50 mg·kg⁻¹和100 mg·kg⁻¹)下分别刺激小油菜发芽和生长的结果。即PFOS也会对植物产生类似重金属的毒物兴奋作用。Qu等^[22]也发现低浓度PFOS能够刺激小麦萌芽。Zhao等^[5]发现低浓度PFOS能够增加小麦的总生物量。究其机理,孔潇潇等^[23]发现金鱼藻的光合作用对PFOS的生理响应表现为双重效应,即低浓度胁迫下光合作用受到促进,高浓度胁迫下光合作用受到抑制。植物的发育与其光合作用能力的强弱有显著关系。因此,推断PFOS对小油菜的这种低浓度毒性兴奋、高浓度抑制发育的效应与PFOS对小油菜光合作用的影响有一定的相关性。另外,Qu等^[22]研究发现0.1~10 mg·L⁻¹ PFOS能够刺激小麦根和茎叶中SOD酶和POD酶的表达,而当PFOS浓度达到200 mg·L⁻¹时则会破坏植物的抗氧化系统,抑制这些抗氧化酶的表达,这可能也决定了PFOS对小油菜的双重毒性效应。

本文以小油菜的发芽率和茎叶长度作为PFOS的毒性效应观察指标。总体来说,这两个指标都表现出低浓度刺激效应和高浓度抑制效应。但是对于这两个观察指标体现毒性效应的浓度表现出不一致。具体的区别表现在50 mg·kg⁻¹促进油菜发芽、100 mg·kg⁻¹抑制油菜发芽,而在茎叶长度这个指标上表现为50 mg·kg⁻¹促进油菜生长,100 mg·kg⁻¹也促进油菜生长,但是促进的程度略微降低。造成这个差异的原因可能是:小油菜种子直接暴露于PFOS污染土壤中,受到的侵害更加直接;而小油菜在PFOS土壤的生长关系到更多复杂的过程,暴露土壤中酶的变化、根系对PFOS的转移、油菜对PFOS的蓄积从而造成毒性效应等过程,在这些综合作用下,有可能造成茎叶生长与发芽率表现出不同的规律。

3.2 PFOS对植物的毒性作用机制

土壤酶作为各类有机污染物在土壤中代谢降解过程的主要参与者,其活性直接反映了土壤中进行的各种生物化学过程的强度和方向。因此土壤酶活性被广泛用于各类土壤毒理学研究以反映污染物的污染程度和生态风险。

本研究发现,在不同浓度PFOS暴露下,小油菜

的发芽率和茎叶生长量指标变化趋势与土壤蔗糖酶和土壤碱性蛋白酶的活性变化趋势具有一致性,即低浓度 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以下 PFOS 暴露时这两种土壤酶活性增强,小油菜发芽率和茎叶生长量增大;高浓度 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ PFOS 暴露时这两种土壤酶活性减弱,小油菜发芽率和茎叶生长量降低。这与某些典型有机污染物对土壤酶的毒性效应类似。但是,不同的土壤酶对于 PFOS 毒性表现出不同的响应,这是由土壤酶自身的敏感性所决定的。从实验结果来看,蔗糖酶在这 3 种酶中对于 PFOS 的毒性表现最为敏感,它的活性变化与小油菜的发芽和茎叶生长的变化趋势基本一致。碱性蛋白酶对于 PFOS 毒性的敏感性其次,所以表现为 $50 \sim 250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 PFOS 均提升了该酶活性,仅 PFOS 为 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时碱性蛋白酶活受到显著抑制。但是总的变化趋势与前人的结果相一致。闫颖等^[24]发现多菌灵和吡虫啉这两种农药在浓度低于 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时对土壤酶有激活作用,而浓度高于 $500 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时抑制土壤酶活性。

研究发现 PFOS 浓度为 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,土壤碱性磷酸酶活性相对空白对照即明显降低。而田海霞等^[25]得出碱性磷酸酶对 PFOS 的同类物质——PFOA 不敏感,表明 PFOS 对土壤肥力的影响更大。这也进一步证实了动物实验中 PFOS 毒性比 PFOA 高^[10]的结论。另外,PFOS 还能促进土壤过氧化氢酶、抑制尿酶的表达^[21]。

土壤酶活性的变化与外源化合物改变土壤中有关真菌膜的结构和渗透性有关^[26]。PFOS 在土壤-微生物-植物系统中的毒性作用过程非常复杂,植物的生理发育指标和土壤酶活性的变化只是其中的一个方面。还有许多研究需要进一步开展,比如解析 PFOS 在土壤-微生物-植物系统中的形态转化、生物有效性及分子机理等,从而为寻求典型环境污染物的生物标志物和风险评估方法,建立其基于食品限量标准和生态系统健康的土壤安全阈值提供依据。

4 结论

(1)PFOS 对小油菜的发芽和生长表现为非单调剂量-效应关系。最低有效应浓度 $50 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 暴露时刺激小油菜的发芽和茎叶生长。小油菜发芽和茎叶生长的抑制浓度分别为 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $250 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,随着暴露浓度进一步增大,小油菜发芽和茎叶增长的抑制率无显著变化。

(2)土壤蔗糖酶在研究的 3 种酶中对于 PFOS 的

毒性表现最为敏感,它的活性变化与小油菜的发芽和茎叶生长的变化趋势基本一致。碱性蛋白酶活性在 PFOS 暴露下也表现为低浓度刺激表达、高浓度抑制表达效应。这与 PFOS 暴露下小油菜的生长规律具有一定的相关性。

参考文献:

- [1] 刘冲,刘晓文,吴文成,等.生物炭及炭基对油菜生长及吸收重金属的影响[J].中国环境科学,2016,36(10):3064-3070.
LIU Chong, LIU Xiao-wen, WU Wen-cheng, et al. Effects of biochar and biochar based fertilizer on growth of *Lactuca sativa* L.[J]. *China Environment Science*, 2016, 36(10):3064-3070
- [2] 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 Li-jie, ZHOU Meng, REN Xin-hao, et al. Distribution of perfluorooctane sulfonate and perfluorooctanoic acid in different tissues of fishes and vegetables from Dahuangpu wetland nature reserve, Tianjin City, China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2012, 31(12):2321-2327.
- [3] Wang T, Vestergren R, Herzke D, et al. Levels, isomer profiles, and estimated riverine mass discharges of perfluoroalkyl acids and fluorinated alternatives at the mouths of Chinese rivers[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(21):11584-11592.
- [4] Pan G, You C. Sediment water distribution of perfluorooctane sulfonate (PFOS) in Yangtze River estuary[J]. *Environmental Pollution*, 2010, 158:1363-1367
- [5] Zhao S Y, Fan Z Y, Sun L H, et al. Interaction effects on uptake and toxicity of perfluoroalkyl substances and cadmium in wheat (*Triticum aestivum* L.) and rapeseed (*Brassica campestris* L.) from co-contaminated soil[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2017, 137(20):194-201.
- [6] Sepulvado J, Blaine A, Hundal L, et al. Occurrence and fate of perfluorochemicals in soil following the land application of municipal biosolids [J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 45(19):8106-8112.
- [7] Meng J, Wang T Y, Wang P, et al. Are levels of perfluoroalkyl substances in soil related to urbanization in rapidly developing coastal areas in North China[J]. *Environmental Pollution*, 2015, 199(1):102-109.
- [8] Lee J W, Lee J W, Shin Y J, et al. Multi-generational xenoestrogenic effects of perfluoroalkyl acids (PFAAs) mixture on *Oryzias latipes* using a flow-through exposure system[J]. *Chemosphere*, 2016, 169:212-223.
- [9] 周启星,胡献刚. PFOS/PFOA 环境污染行为与毒性效应及机理研究进展[J].环境科学,2007,28(10):2153-2162.
ZHOU Qi-xing, HU Xian-gang. Researching progresses in environmental pollution behavior, toxic effects and mechanisms of PFOS/PFOA[J]. *Chinese Journal of Environmental Science*, 2007, 28(10):2153-2162.
- [10] 端正花,王勋功,王华,等.全氟辛烷羧酸(PFOA)与全氟辛烷磺酸(PFOS)的细胞毒性效应[J].生态毒理学报,2014,9(2):23-30.
DUAN Zheng-hua, WANG Xun-gong, WANG Hua, et al. The cytotoxic effect of PFOA and PFOS[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2014, 9

- (2);23-30.
- [11] 韩建, 方展强. 水环境 PFOS 和 PFOA 的污染现状及毒理效应研究进展[J]. 水生态学杂志, 2010, 3(2):99-105.
HAN Jian, FANG Zhan-qiang. Researching progress on PFOS and PFOA: Environmental pollution and toxicology effects[J]. *Journal of Hydroecology*, 2010, 3(2):99-105.
- [12] Krman A, Ericson I, Bert V B, et al. Exposure of perfluorinated chemicals through lactation, levels of matched human milk and serum and a temporal trend, 1996—2004, in Sweden[J]. *Environmental Health Perspectives*, 2007, 115(2):226-230.
- [13] 张亚辉, 曹莹, 周腾耀, 等. 我国环境中 PFOS 的预测无效应浓度[J]. 中国环境科学, 2013, 33(9):1670-1677.
ZHANG Ya-hui, CAO Ying, ZHOU Teng-yao, et al. Predicted non-effect concentrations for PFOS of environment in China[J]. *China Environmental Science*, 2013, 33(9):1670-1677.
- [14] Qiang L W, Chen M, Zhu L Y, et al. Facilitated bioaccumulation of perfluorooctanesulfonate in common carp (*Cyprinus carpio*) by graphene oxide and remission mechanism of fulvic acid[J]. *Environmental Science & Technology*, 2016, 50(21):11627-11636.
- [15] 于会丽, 林治安, 李燕婷, 等. 喷施小分子有机物对小油菜生长发育和养分吸收的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(6):1560-1568.
YU Hui-li, LIN Zhi-an, LI Yan-ting, et al. Effects of spraying low molecular organic compounds on growth and nutrients uptake of rape (*Brassica Chinensis* L.)[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(6):1560-1568.
- [16] 宋正国, 徐明岗, 丁永祯, 等. 共存阳离子(Ca, Zn, K)对土壤镉有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(3):485-489.
SONG Zheng-guo, XU Ming-gang, DING Yong-zhen, et al. Effect of coexistence cations (Ca, Zn, K) on cadmium bioavailability in lateritic red soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(3):485-489.
- [17] 陈苗苗, 徐明岗, 周世伟, 等. 不同磷酸盐对污染土壤中镉生物有效性的影响[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(2):255-262.
CHEN Miao-miao, XU Ming-gang, ZHOU Shi-wei, et al. Effect of different phosphate on bio-availability of cadmium in contaminated soils[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(2):255-262.
- [18] Lechner M, Knapp H. Carryover of perfluorooctanoic acid (PFOA) and perfluorooctane sulfonate (PFOS) from soil to plant and distribution to the different plant compartments studied in cultures of carrots (*Daucus carota* ssp. *Sativus*), potatoes (*Solanum tuberosum*), and cucumbers (*Cucumis Sativus*) [J]. *Journal of Agriculture and Food Chemistry*, 2011, 59(20):11011-11018.
- [19] 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.
- [20] 吕振娥, 苏玉红, 乔敏. 全氟辛烷磺酸短期暴露对不同作物苗期生长的影响[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(5):695-701.
LÜ Zhen-e, SU Yu-hong, QIAO Min. Influence of short-term exposure of PFOS on seeding growth of different plants[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2013, 8(5):695-701.
- [21] Zhao H, Chen C, Zhang X, et al. Phytotoxicity of PFOS and PFOA to *Brassica chinensis* in different Chinese soils[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2011, 74(5):1343-1347.
- [22] Qu B C, Zhao H X, Zhou J T. Toxic effects of perfluorooctane sulfonate (PFOS) on wheat (*Triticum aestivum* L.) plant[J]. *Chemosphere*, 2010, 79:555-560.
- [23] 孔潇潇, 王铁宇, 张晓军, 等. 全氟化合物对水生植物的生态效应研究 II: 金鱼藻对水中 PFOS 的生物富集及生理响应[J]. 生态毒理学报, 2015, 10(2):445-453.
KONG Xiao-xiao, WANG Tie-yu, ZHANG Xiao-jun, et al. Ecological effects on aquatic plants induced by perfluorinated compounds II: Bioaccumulation and physiological response of ceratophyllum demersum in PFOS polluted water[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2015, 10(2):445-453.
- [24] 闫颖, 袁星, 樊宏娜. 五种农药对土壤转化酶活性的影响[J]. 中国环境科学, 2004, 24(5):588-591.
YAN Ying, YUAN Xing, FAN Hong-na. Influence of five pesticides on invertase activity in soil[J]. *China Environmental Science*, 2004, 24(5):588-591.
- [25] 田海霞, 和文祥, 孔龙, 等. 全氟辛酸铵盐(PFOA)对土壤酶活性影响的初步研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(5):936-941.
TIAN Hai-xia, HE Wen-xiang, KONG Long, et al. The effect of perfluorooctanoic acid ammonium salt on soil enzyme activities[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(5):936-941.
- [26] Shen G Q, Lu Y T, Hong J B. Combined effect of heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons on urease activity in soil[J]. *Environmental Safety*, 2006, 63(3):474-480.