

李 威, 恽 焱, 张银龙. 5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻生理生化特性的影响[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 465-469.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.130

5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻生理生化特性的影响

李 威^{1,2}, 恽 焱³, 张银龙^{1,2}

(1. 南京林业大学江苏省南方现代林业协同创新中心, 江苏南京 210037; 2. 南京林业大学生物与环境学院, 江苏南京 210037;
3. 江苏省镇江市计量检定测试中心, 江苏镇江 212132)

摘要:在前期获得 5 氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻种子萌发的急性毒性数据的基础上, 研究 5-氟尿嘧啶(2.5~100 mg/kg)对小麦、白菜和水稻幼苗叶片中叶绿素、可溶性蛋白和主要抗氧化酶活性的影响。结果表明, 短时间暴露时(7 d), 5-氟尿嘧啶对 3 种作物幼苗叶片中叶绿素和可溶性蛋白含量表现为低浓度促进高浓度抑制, 超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化物酶(POD)和过氧化氢酶(CAT)活性也受到不同程度的诱导, 对 5-氟尿嘧啶表现出一定的抗性; 长时间暴露时(21 d), 3 种作物幼苗叶片中叶绿素和可溶性蛋白含量下降, 与 5-氟尿嘧啶浓度表现出明显的剂量-效应关系, SOD、POD 和 CAT 活性也不同程度地受到了抑制, 抗氧化防御功能降低。本研究结果可为环境中 5-氟尿嘧啶的生态风险评估提供基础数据。

关键词:5-氟尿嘧啶; 生理生化; 叶绿素; 可溶性蛋白; 抗氧化酶

中图分类号: X820.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0465-04

随着现代环境分析技术水平的提高, 药品类污染物在环境中的频繁检出引起了科学工作者对其生态风险的广泛关注^[1-2]。5-氟尿嘧啶(5-fluorouracil)是一种常用的抗癌药, 主要用于乳腺癌和消化系统癌等癌症的治疗。5-氟尿嘧啶经注射或口服进入人体后, 60%~90%可被人体代谢排出, 剩余 10%~40%则以母体化合物的形式进入医院废水或市政废水中^[3]。根据资料预测, 污水处理厂出水中 5-氟尿嘧啶的浓度可达到 23 mg/L^[4]。而且, 随着门诊病人的增多, 水环境中的抗癌药浓度有升高的趋势^[5], 因此 5-氟尿嘧啶的生态毒性效应逐渐受到重视。

已有不少学者研究了 5-氟尿嘧啶对不同的生物的生态毒性效应。如 Zoukova 等研究发现, 5-氟尿嘧啶对恶臭假单胞菌生长(*Pseudomonas putida*)的 EC₅₀值为 0.027 mg/L, 对近头状伪蹄形藻(*Pseudokirchneriella subcapitata*)的 EC₅₀值为 0.11 mg/L, 对绿藻(*Desmodesmus subspicatus*)的 EC₅₀值为 48 mg/L, 对大型蚤的 EC₅₀值为 36 mg/L^[6-7]。Deyoung 等发现 5-氟尿嘧啶对黑头呆鱼(*Pimephales promelas*)生长的 EC₅₀值为 400 mg/L^[8]。恽焱等研究发现 5-氟尿嘧啶对小麦(*Triticum aestivum*)、白菜(*Brassica pekinensis*)和水稻(*Oryza sativa*)种子的根伸长半数抑制浓度分别为 212.80、102.53、13.30 mg/L^[9]。

现有的生态毒性数据表明, 5-氟尿嘧啶不太可能引起急性毒性效应, 但是生物长期暴露于低浓度的抗癌药胁迫中, 是否会引起生理生化等方面的影响还未可知。因此, 本试验以

小麦、白菜和水稻为受试生物, 通过研究低浓度 5-氟尿嘧啶长期胁迫对小麦、白菜、水稻的叶绿素和抗氧化酶系统的影响, 为 5-氟尿嘧啶的生态风险评价提供基础数据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验药品 5-氟尿嘧啶纯度为 99%, 购于北京百灵威科技有限公司。

供试种子为小麦(*Triticum aestivum*), 偃展 4110; 白菜(*Brassica pekinensis*), 青杂改良三号; 水稻(*Oryza sativa*), 抗优 818。供试种子均购自南京金盛达种子公司。

供试土壤采自南京林业大学北大山 0~20 cm 表土(修耕地, 未受人为污染, 属于清洁土壤), pH 值为 7.23, 有机质含量为 2.86%, 总氮、总磷、总钾的含量分别为 1.36、0.02、3.20 mg/kg。

1.2 幼苗生理生态毒性试验

称取 200 g 风干土壤于 95 mm×60 mm×70 mm(上口直径×下底直径×高)的塑料花盆中(盆底铺 1 层滤纸), 采用土壤染毒法将配制好的 5-氟尿嘧啶溶液按水土比 1:5 投加到土壤中, 置于恒温光照培养箱中, (25±1)℃下暗平衡 48 h。选取饱满、均匀的小麦、白菜和水稻种子, 灭菌消毒后用镊子播种于土壤中, 每盆 15 粒种子, 调节水土比 1:5, 置于恒温光照培养箱中培养, 光—暗周期为 12 h—12 h, 恒温(25±1)℃, 早晚各浇水 1 次。5-氟尿嘧啶试验浓度为 2.5、5.0、10.0、50.0、100.0 mg/kg, 同时设置空白对照, 每个处理 3 组平行, 在培养的 7、14、21 d 分别采样进行分析测定。

1.3 生理生化指标测定方法

叶绿素(Chlorophyll, Chl)的测定采用 95%乙醇浸提法^[10]。称取 0.05 g 作物幼苗叶片剪碎至刻度试管中, 加入 10 mL 95%乙醇, 使叶片完全浸入, 加盖放在暗处浸提至叶片完全变白时用分光光度计分别在 665、649 nm 测定浸提液的

收稿日期: 2015-10-16

基金项目: 江苏高校优势学科建设工程资助项目(编号: PAPD); 南京林业大学高层次人才基金项目(编号: 163010675)。

作者简介: 李 威(1982—), 女, 河南安阳人, 博士, 讲师, 主要从事新型污染物的环境归趋与生态风险研究。E-mail: uwlwei@163.com。
通信作者: 张银龙, 博士, 教授, 主要从事城市生态环境研究。
E-mail: ecoenvylz@163.com。

吸光度,根据公式(1)和(2)分别计算叶绿素 a 和叶绿素 b 的浓度 (mg/g)。

$$\text{叶绿素 a 浓度}(C_a) = 13.95D_{665\text{ nm}} - 6.88D_{649\text{ nm}}; \quad (1)$$

$$\text{叶绿素 b 浓度}(C_b) = 24.96D_{649\text{ nm}} - 7.32D_{665\text{ nm}} \quad (2)$$

称取 0.1 g 作物幼苗的叶片在预冷的磷酸缓冲溶液 (50 mmol/L $\text{NaH}_2\text{PO}_4 \cdot \text{Na}_2\text{HPO}_4$, pH 值 7.8, 加 1% 聚乙烯吡咯烷酮) 中匀浆, 4 ℃ 下 13 000 r/min 离心 30 min, 上清液即为提取液^[11]。可溶性蛋白 (SP) 含量测定采用考马斯亮蓝染色法^[12]; 超氧化物歧化酶 (SOD) 活性测定采用氮蓝四唑 (NBT) 光化学还原反应法^[10]; 过氧化物酶 (POD) 活性测定采用愈创木酚法^[10]; 过氧化氢酶 (CAT) 活性采用紫外吸收法^[13]。

1.4 数据分析与处理

采用 SPSS 16.0 和 Excel 对试验数据进行统计分析并作图, 试验结果采用平均值 \pm 标准差表示。对试验数据进行 LSD 多重比较, 统计显著性水平为 $P < 0.05$ 。

2 结果与分析

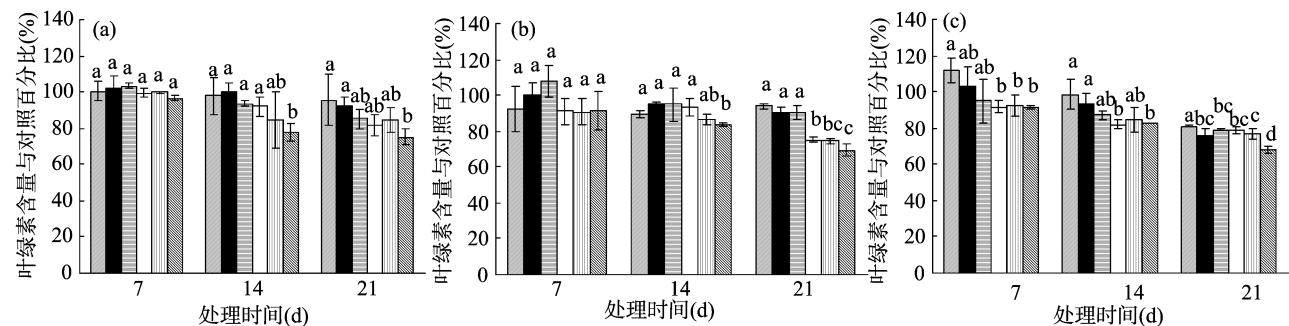
2.1 5-氟尿嘧啶对 3 种作物幼苗叶片中叶绿素含量的影响

不同浓度 5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻的叶绿素含量的影响见图 1。暴露 7 d 时, 3 种作物叶片中叶绿素含量下降不明显, 与对照组百分比均大于 90%, 且在个别低浓度出现了一定的促进作用, 如 5-氟尿嘧啶浓度为 10 mg/kg 时, 小麦和白菜叶绿素含量分别高出对照组 3.5%、7.8%。小麦和白菜各 5-氟尿嘧啶处理组间在 7 d 时无显著性差异, 但水稻组间有显著性差异 ($P < 0.05$)。随着暴露时间的延长, 小麦、白菜和水稻叶片中叶绿素含量随 5-氟尿嘧啶浓度的升高而

显著下降。暴露 14 d 时, 高浓度处理组与低浓度处理组间有显著性差异, 当 5-氟尿嘧啶浓度为 5 mg/kg 和 100 mg/kg 时, 小麦叶片叶绿素含量抑制率分别为 0.3% 和 21.9%, 白菜叶片叶绿素含量抑制率分别为 4.7% 和 16.7%, 水稻叶片叶绿素含量的抑制率分别为 6.7% 和 17.5%。暴露 21 d 后, 5-氟尿嘧啶对叶绿素的抑制效应更加显著, 小麦、白菜和水稻在 100 mg/kg 处理下分别低于对照组 25.0%、30.5%、32.0%, 各处理组间均有显著差异, 5-氟尿嘧啶对作物叶片叶绿素含量表现明显的剂量-效应关系。

2.2 5-氟尿嘧啶对 3 种作物幼苗叶片中可溶性蛋白含量的影响

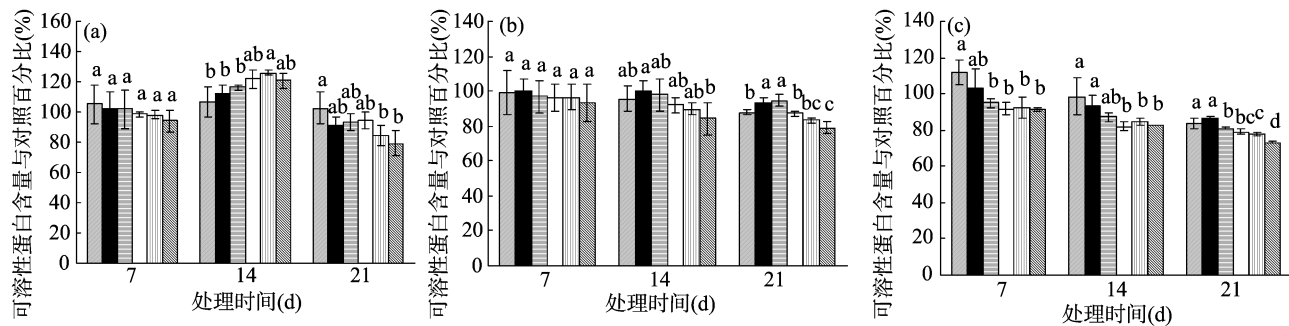
5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻叶片可溶性蛋白含量的影响见图 2。暴露 7 d 时, 不同浓度的 5-氟尿嘧啶对小麦和白菜可溶性蛋白含量没有明显影响, 各处理组间均无显著性差异; 低浓度的 5-氟尿嘧啶促进了水稻可溶性蛋白含量增加, 高浓度的 5-氟尿嘧啶则明显抑制了可溶性蛋白含量增加, 低浓度处理组与高浓度处理组有显著性差异, 5-氟尿嘧啶浓度为 5 mg/kg 和 100 mg/kg 时, 水稻叶片中可溶性蛋白的含量分别为对照组的 103.2% 和 91.1%。暴露时间延长到 14 d 时, 5-氟尿嘧啶各处理组都促进了小麦叶片中可溶性蛋白的含量, 而对白菜叶片中的可溶性蛋白则表现为抑制作用, 组间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。随着暴露时间延长至 21 d 时, 5-氟尿嘧啶对 3 种作物幼苗叶片中的可溶性蛋白合成均有抑制作用, 处理组间有显著性差异 ($P < 0.05$); 当 5-氟尿嘧啶处理浓度为 100 mg/kg 时, 对小麦、白菜和水稻可溶性蛋白含量的抑制率分别为 20.9%、20.8%、26.8%。



不同小写字母表示组间差异显著 ($P < 0.05$)。下图同

■ 2.5 mg/kg ■ 5 mg/kg ■ 10 mg/kg □ 20 mg/kg ■ 50 mg/kg ■ 100 mg/kg

图1 5-氟尿嘧啶对小麦(a)、白菜(b)和水稻(c)叶片中叶绿素含量的影响



■ 2.5 mg/kg ■ 5 mg/kg ■ 10 mg/kg □ 20 mg/kg ■ 50 mg/kg ■ 100 mg/kg

图2 5-氟尿嘧啶对小麦(a)、白菜(b)和水稻(c)叶片中可溶性蛋白含量的影响

2.3 5-氟尿嘧啶对 3 种作物幼苗抗氧化酶活性的影响

5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻 3 种作物幼苗叶片中 SOD 活性的影响如图 3 所示。在暴露时间 7、14 d 时,小麦叶片中 SOD 的含量随 5-氟尿嘧啶浓度增加而有升高的趋势;暴露 21 d 时,小麦叶片中 SOD 的含量则表现为先升高后降低的趋势,处理组间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。对于同一暴露浓度而言,小麦叶片中 SOD 含量随暴露时间的延长而降低,如在 5-氟尿嘧啶浓度为 50 mg/kg 时,暴露 7、14、21 d 后,小麦叶片中 SOD 活性与对照组的百分比分别为 117.2%、

98.6%、77.5%。白菜和水稻叶片中 SOD 活性表现出了与小麦不同的变化规律。暴露 7 d 时,低浓度的 5-氟尿嘧啶促进了白菜和水稻叶片中的 SOD 活性,而高浓度的 5-氟尿嘧啶则抑制了其活性,各处理组间具有显著性差异 ($P < 0.05$)。暴露 14、21 d 后,白菜和水稻叶片的 SOD 活性抑制率总体表现为随 5-氟尿嘧啶浓度增加而增加,如 10、100 mg/kg 的 5-氟尿嘧啶暴露 21 d 后,白菜叶片中 SOD 活性抑制率分别为 24.4%、33.6%;水稻叶片中 SOD 活性抑制率分别为 11.6%、34.9%。

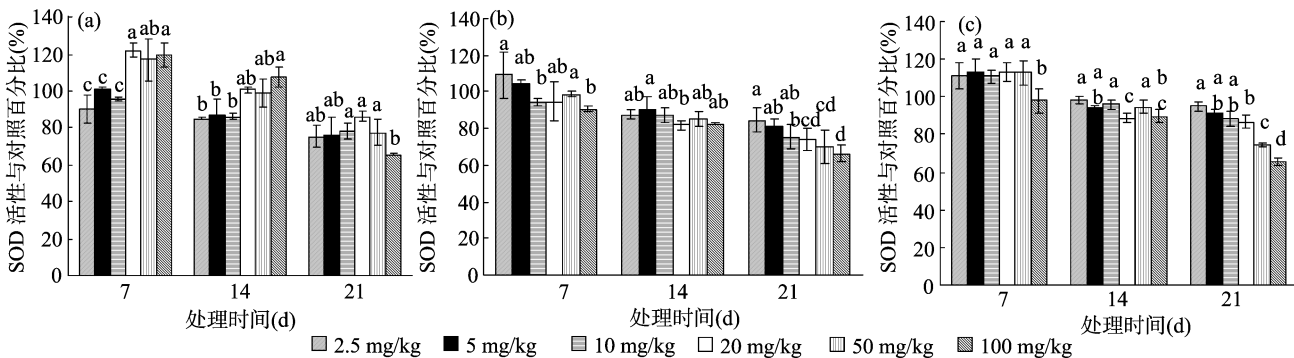


图3 5-氟尿嘧啶对小麦(a)、白菜(b)和水稻(c)叶片中超氧化物歧化酶 (SOD) 活性的影响

5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻幼苗叶片中 POD 活性的影响见图 4。在不同暴露时间下,小麦叶片的 POD 活性均随着 5-氟尿嘧啶浓度的升高先上升后下降,变化接近于“钟形”,且组间有显著性差异 ($P < 0.05$)。白菜叶片中 POD 活性则随着 5-氟尿嘧啶的浓度升高和暴露时间的延长而降低,且组间具有显著性差异 ($P < 0.05$),当 5-氟尿嘧啶浓度

从 2.5 mg/kg 增加到 100 mg/kg,白菜叶片中 POD 活性抑制率在暴露 14 d 时从 5.7% 增加到 17.3%,暴露 21 d 时由 29.5% 增加到 34.5%。水稻暴露 7 d 时,POD 的活性变化与小麦类似,即随 5-氟尿嘧啶浓度的升高先上升后下降,后随时间延长,其 POD 活性与 5-氟尿嘧啶浓度表现出负相关,组间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。

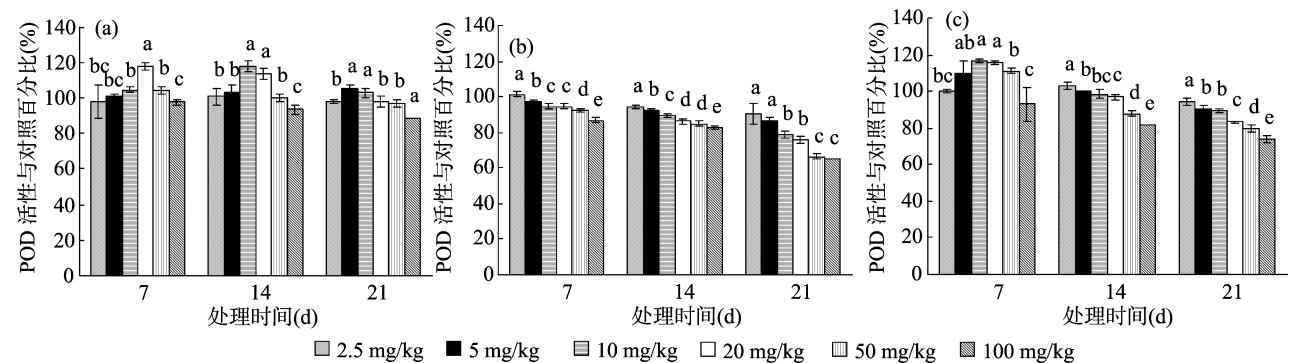


图4 5-氟尿嘧啶对小麦(a)、白菜(b)和水稻(c)叶片中过氧化物酶 (POD) 的影响

5-氟尿嘧啶对小麦、白菜和水稻幼苗叶片中 CAT 活性的影响如图 5 所示。小麦暴露 7、14 d 时,除 100 mg/kg 5-氟尿嘧啶处理组外,CAT 活性与对照组相近,受 5-氟尿嘧啶影响不大。但暴露 21 d 时,小麦叶片中 CAT 活性则与 5-氟尿嘧啶浓度之间呈现显著的负相关关系,其抑制率由 5-氟尿嘧啶处理浓度为 2.5 mg/kg 的 1.5% 增加至 100 mg/kg 时的 32.4%,增加了 30.9 个百分点。白菜暴露 7 d 时,5-氟尿嘧啶对其叶片中 CAT 活性无显著影响。当暴露时间延长到 14、21 d 时,白菜叶片中 CAT 活性的抑制率随 5-氟尿嘧啶浓度升高逐渐减低,且组间存在显著性差异 ($P < 0.05$)。水稻叶片中 CAT 活性随 5-氟尿嘧啶浓度升高和暴露时间延长表现为降低的趋势,当 5-氟尿嘧啶浓度为 5 mg/kg 时,暴露 7、14、

21 d 后,水稻叶片中 CAT 活性的抑制率分别为 8.7%、10.4%、24.5%;当 5-氟尿嘧啶浓度为 100 mg/kg 时,水稻叶片中 CAT 活性的抑制率分别为 25.9%、29.0%、38.7%。

3 讨论与结论

叶绿素含量是反映光合强度的重要指标,可以作为判断植物光合生理能力、反映环境胁迫状况的依据^[14]。在本研究中,低浓度的 5-氟尿嘧啶 (< 10 mg/kg) 短时间暴露时对 3 种作物叶片的叶绿素含量有一定的激活作用,但高浓度的 5-氟尿嘧啶和较长的暴露时间都使得作物叶片中的叶绿素含量降低,说明 5-氟尿嘧啶影响了小麦、白菜和水稻的光合作用过程。这可能是因为污染物的胁迫下,捕光叶绿素

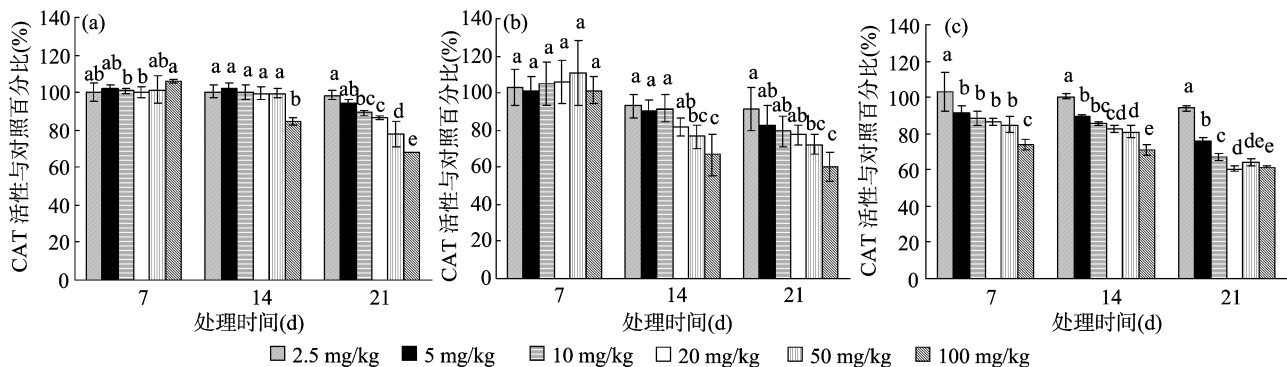


图5 5-氟尿嘧啶对小麦(a)、白菜(b)和水稻(c)叶片中过氧化氢酶 (CAT) 的影响

a/叶绿素 b 结合蛋白 (Chl a/b - Pro) 合成的转录过程受到抑制,而且初期形成的叶绿素单体也被光氧化分解,导致光捕获化合物的形成受到影响,从而影响叶绿素的积累^[15-16]。

可溶性蛋白含量是植物体内代谢过程中蛋白质损伤的重要指标,其变化可以反映细胞的蛋白质合成、变性降解等多方面的信息^[17]。当植物适应其生长环境进入旺盛的生长期后,各种代谢活动旺盛,可溶性蛋白的合成能力也有所增强。但是在有机物、重金属以及寒旱等胁迫下,植物体内的可溶性蛋白含量可能会下降^[13,18]。本研究中,短时间低浓度的 5-氟尿嘧啶暴露可以诱导小麦、白菜和水稻幼苗中可溶性蛋白的合成,但是高浓度的 5-氟尿嘧啶暴露则抑制了 3 种作物叶片中可溶性蛋白的合成,特别是高浓度 5-氟尿嘧啶 (≥ 20 mg/kg) 处理 21 d 时,3 种作物幼苗叶片中可溶性蛋白含量显著下降。

有机物、重金属污染以及干旱等不利环境条件或导致植物体内 H_2O_2 和 O_2^- 等活性氧物质的增多,植物的抗氧化防御体系则能去除或降低活性氧物质的含量^[19]。SOD、POD 和 CAT 是生物体抗氧化防御系统中典型的抗氧化酶,它们的活性变化间接指示了机体内的氧化胁迫强度。SOD 能将 O_2^- 转化成 O_2 和 H_2O_2 ,抑制高活性 $\cdot OH$ 等自由基的形成,防止活性氧物质积累对植物体的危害。在本研究中,低浓度的 5-氟尿嘧啶短时间暴露时,小麦、白菜和水稻叶片中 SOD 活性有升高现象,可能是由于植物体内活性氧物质积累,激活本身存在的 SOD 酶或者通过诱导酶蛋白编码基因的表达而激活机体本身合成新的 SOD^[20]。POD 和 CAT 是消除 H_2O_2 的重要酶类,它们可以协同作用将 SOD 歧化自由基的产物 H_2O_2 转化为 H_2O 和 O_2 ^[17]。在暴露时间较短时,作物叶片中的 POD 和 CAT 的活性也受到一定程度的诱导,这与 SOD 诱导产生 H_2O_2 的量下降存在一定关系。抗氧化酶活性的启动说明 3 种作物都具有一定的抵抗氧化胁迫的能力。随着暴露时间延长,小麦、白菜和水稻叶片中 SOD、POD 和 CAT 活性主要呈现下降趋势,说明 5-氟尿嘧啶胁迫超过了植物细胞的耐受限度,抗氧化酶活性受到抑制,自身的抗氧化防御功能降低。

参考文献:

- [1] Fent K, Weston A A, Caminada D. Ecotoxicology of human pharmaceuticals [J]. Aquatic Toxicology, 2006, 76(2): 122-159.
- [2] Santos L H M L M, Araújo A N, Fachini A, et al. Ecotoxicological as-

pects related to the presence of pharmaceuticals in the aquatic environment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2010, 175 (1/2/3): 45-95.

- [3] Straub J O. Combined environmental risk assessment for 5-fluorouracil and capecitabine in Europe [J]. Integrated Environmental Assessment and Management, 2009, 6 (S1): 540-566.
- [4] Johnson A C, Jurgens M D, Williams R J, et al. Do cytotoxic chemotherapy drugs discharged into rivers pose a risk to the environment and human health? An overview and UK case study [J]. Journal of Hydrology, 2008, 348(1/2): 167-175
- [5] Besse J P, Latour J F, Garric J. Anticancer drugs in surface waters what can we say about the occurrence and environmental significance of cytotoxic, cytostatic and endocrine therapy drugs? [J]. Environmental International, 2012, 39(1): 73-86.
- [6] Zounkova R, Odraska P, Dolezalova L, et al. Ecotoxicity and genotoxicity assessment of cytostatic pharmaceuticals [J]. Environmental Toxicology and Chemistry, 2007, 26(10): 2208-2214.
- [7] Zounkova R, Kovalova L, Blaha L, et al. Ecotoxicity and genotoxicity assessment of cytotoxic antineoplastic drugs and their metabolites [J]. Chemosphere, 2010, 81(2): 253-260.
- [8] Deyoung D J, Bantle J A, Hull M A, et al. Differences in sensitivity to developmental toxicants as seen in *Xenopus* and *Pimephales* embryos [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 1996, 56(1): 143-150.
- [9] 恽 辉, 李 威, 张银龙, 等. 5-氟尿嘧啶与镉单一及复合污染对三种作物种子萌发的影响 [J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(6): 1075-1081.
- [10] 刘家尧, 刘 新. 植物生理学实验教程 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2010: 13-15.
- [11] Polle A, Eiblemeier M, Sheppard L, et al. Responses of antioxidative enzymes to elevated CO_2 in leaves of beech (*Fagus sylvatica* L.) seedlings grown under a range of nutrient regimes [J]. Plant Cell Environment, 1997, 20: 1317-1321.
- [12] Bradford M M. A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding [J]. Analytical Biochemistry, 1976, 72: 248-254.
- [13] Wu X Y, Von Tiedemann A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone [J]. Environment Pollution, 2002, 116: 37-47.
- [14] 刘碧云, 周培疆, 李佳洁, 等. 丙体六六六对斜生栅藻生长及光合色素和膜脂过氧化影响的研究 [J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 204-207

李学平, 邹美玲, 任加云. 退化滨海湿地沉积物中磷形态含量特征及影响因素[J]. 江苏农业科学, 2016, 44(9): 469–471.
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2016.09.131

退化滨海湿地沉积物中磷形态含量特征及影响因素

李学平, 邹美玲, 任加云

(滨州学院资源环境系, 山东滨州 256600)

摘要:研究黄河三角洲退化滨海湿地沉积物中磷形态含量特征及温度、pH 值、上覆水理化性质对湿地沉积物磷形态含量的影响。结果表明, 退化滨海湿地沉积物中不同形态磷中铁结合磷(Fe-P)含量最大, 达 971.7 mg/kg, 闭蓄态磷(O-P)含量最小, 为 195.6 mg/kg。Fe-P、铝结合磷(Al-P)、钙结合磷(Ca-P)、O-P 平均含量分别 683.7、401.0、331.6、288.0 mg/kg。当温度 < 20 ℃ 时, Fe-P 含量随温度升高而增大, 当温度 > 20 ℃ 时, Fe-P 含量随温度升高而下降; Al-P 含量随温度升高逐渐增大; O-P 含量随温度的升高先下降后增大。Fe-P 含量随着 pH 值的增大逐渐降低, pH 值 > 9 时, pH 值对 Fe-P 含量的影响不大; Al-P、Ca-P 含量均随 pH 值的升高先减小后增大。另外, 有机质与 O-P 含量存在正相关关系($r=0.895$), 溶氧量与 Al-P 含量存在正相关关系($r=0.940$)。

关键词:沉积物; 磷; 含量; 退化滨海湿地; 形态特征; 影响因素

中图分类号: X171.4; S156.4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1002-1302(2016)09-0469-03

湿地的运行由于受污染物负荷、自身内部结构等因素的影响, 对磷的拦截去除效果并不稳定^[1-2], 而且不同湿地类型沉积物磷形态的分布特征也不同。对南四湖微山湖区沉积物磷形态进行研究发现, 闭蓄态磷(O-P, 396.79 mg/kg)的含量最高, 并随着土层深度增大逐渐降低; 相反, 铝结合磷(Al-P)含量仅有 4.08 mg/kg, 且随着土层深度增大而增大^[3]。对九龙江口滨海湿地的研究结果表明, 生物可利用磷含量占总磷(TP)含量的 59.46%^[4]。同一湿地(如天鹅湖)不同区域沉积物中总磷和各形态磷的含量差异也较大, 外源污染和沉积物颗粒组成是影响其分布的主要因子, 其中无机磷含量占总磷含量的 42.24%~82.04%^[5]。黄河三角洲季节性泛洪湿地在 60~80 cm 土层, 春季 TP 含量(959.9 g/m²)明显低于秋季(1 124.6 g/m²), 随着土层加深, TP 含量下降, 但在土层 40~80 cm 之间有 1~2 个磷积累量高峰^[6]。影响沉积物中磷释放的因素包括内在和外在 2 类因素, 内在因素

包括磷的含量和组合形态、氧化还原电位、沉积物组成等; 外在因素包括 pH 值、上覆水的性质、磷的浓度、温度、溶氧量、生物作用、扰动等^[7]。

黄河三角洲地区现有盐碱类湿地 15 万 hm², 部分湿地土壤退化和盐碱化严重, 导致湿地蓄洪防旱和净化水质功能大大下降。目前, 对于退化滨海盐碱化湿地磷形态特征了解甚少。因此, 研究退化滨海盐碱化湿地沉积物中磷形态含量特征, 并分析外在因子对沉积物磷形态的影响, 这对退化湿地的修复具有重要的指导意义。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于黄河三角洲腹地的滨州沾化县北约 10 km 处的重度退化滨海盐碱芦苇湿地(图 1), 试验地面积为 1 hm², 水溶性总盐含量 0.9%~2.4%, pH 值平均为 7.9, 该区域属东亚温暖带潮湿大陆季风性气候, 年平均气温 12.5 ℃, 年平均降水量约 584 mm, 年蒸发量 1 800~2 000 mm。目前, 该试验区挺水植物主要为芦苇。

1.2 样品的预处理

所研究的湿地位于滨州市, 沉积物样品均取底泥表面 5~10 cm 部分, 装入塑料袋后带回实验室, 将采集的泥样在自然条件下风干, 采用四分法取样研磨并通过 100 目的尼龙

收稿日期: 2015-05-25

基金项目: 山东省重点研发计划(编号: 2015GNC111018); 山东省滨州市科技发展规划(编号: 2013ZC1002); 服务滨州项目(编号: BZXYFB20110510)。

作者简介: 李学平(1978—), 女, 山东临沂人, 博士, 副教授, 从事湿地生态系统和盐碱地改良与利用研究。E-mail: lixueping2008@163.com。

[15] Horvth G, Droppa M, Oravec Z. Formation of the photosynthetic apparatus during greening of cadmium poisoned barley leaves [J]. *Planta*, 1996, 199: 238–243.

[16] Alberte R S, Friedman A L, Gustafson D L, et al. Light-harvesting systems of brown algae and diatoms. isolation and characterization of chlorophyll a/c and chlorophyll a fucoxanthin pigment-protein complexes [J]. *Biochimica et Biophysica Acta*, 1981, 635(2): 304–316.

[17] 肖明月, 安婧, 纪占华, 等. 六种常见抗生素对小白菜种子萌发及生理特性的影响[J]. *生态学杂志*, 2014, 33(10): 2775–

2781.

[18] Liao X R, Chen J, Zhou Y F. Effect of salicylic acid on the isozymes of peroxidase and catalase in cells of wheat callus [J]. *Journal of Triticeae Crops*, 2000, 20(2): 66–68.

[19] 安婧, 周启星, 刘维涛. 土霉素对小麦种子发芽与幼苗生长发育的生态毒性[J]. *环境科学*, 2009, 30(10): 3022–3027.

[20] 林仁漳, 杜文超, 王晓蓉, 等. 土壤外源 Cd 对小麦幼苗生长自由基代谢及抗氧化酶活性的影响[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(1): 23–29.