

陈淑玲, 谭芸, 闫宁, 等. 2010. 表面活性剂对茭白生长影响及土壤残留分析[J]. 环境科学学报, 30(9): 1854 - 1861

Chen S L, Tan Y, Yan N, et al. 2010. Effects of surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS) on the growth of *Zizania latifolia* Turcz. and the residual LAS content in soil[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 30(9): 1854 - 1861

表面活性剂对茭白生长影响及土壤残留分析

陈淑玲¹, 谭芸², 闫宁¹, 李建波¹, 寿森炎^{1,*}

1. 浙江大学农业与生物技术学院园艺系, 杭州 310029

2. 浙江大学生命科学学院, 杭州 310029

收稿日期: 2009-12-23

修回日期: 2010-03-15

录用日期: 2010-04-29

摘要: 采用土壤的试验方法, 研究了在不同浓度阴离子表面活性剂——直链烷基苯磺酸钠(LAS)处理后, 单季茭“美人茭”的生长、茭白叶片中叶绿素含量和抗氧化酶系统活性的变化情况, 以及 LAS 在茭白叶片和土壤中的相对残留量。结果表明, 10 mg·L⁻¹、100 mg·L⁻¹ LAS 处理浓度对茭白的生长状态没有显著影响; 1000 mg·L⁻¹ LAS 处理浓度下美人茭株高和最大叶宽均分别低于对照 25.5% ($p < 0.05$) 和 27.0% ($p < 0.05$), 处理过程中叶绿素总含量大幅下降。10 mg·L⁻¹、100 mg·L⁻¹ LAS 处理浓度下美人茭的抗坏血酸过氧化物酶(APX)和过氧化氢酶(CAT)活性显著提高, 1000 mg·L⁻¹ LAS 处理浓度下美人茭的过氧化物酶(POD)活性受到严重的抑制。丙二醛(MDA)含量呈先上升后下降的趋势, 并随着 LAS 处理浓度的升高而升高。茭白叶片中 LAS 残留量先下降后上升, 10 mg·L⁻¹ 处理浓度下美人茭叶片中 LAS 含量低; 10 和 100 mg·L⁻¹ 处理浓度下土壤中 LAS 含量基本在 0.1 ~ 0.5 mg·L⁻¹ 之间, 1000 mg·L⁻¹ 处理浓度下土壤中 LAS 含量持续上升, 达到 2.0 ~ 3.0 mg·L⁻¹, 且 LAS 含量在第 28d 比第 7d 时高 54.0% ($p < 0.05$)。与单纯的土壤环境相比, 茭白-土壤系统能够更有效地降低土壤中 LAS 含量。

关键词: 表面活性剂(LAS); 茭白; 抗氧化酶; LAS 残留量

文章编号: 0253-2468(2010)09-1854-08

中图分类号: X171.5

文献标识码: A

Effects of surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS) on the growth of *Zizania latifolia* Turcz. and the residual LAS content in soil

CHEN Shuling¹, TAN Yun², YAN Ning¹, LI Jianbo¹, SHOU Senyan^{1,*}

1. Department of Horticulture, College of Agriculture and Biotechnology, Zhejiang University, Hangzhou 310029

2. College of Life Sciences, Zhejiang University, Hangzhou 310029

Received 23 December 2009;

received in revised form 15 March 2010;

accepted 29 April 2010

Abstract: The effect of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) treatment on the growth of *Zizania latifolia* Turcz. “cv. Meirenjiao” was investigated. The changes of the chlorophyll content and antioxidant enzyme activity during the growth period and the residual LAS in the leaves and the soil were determined. The results showed that 10 mg·L⁻¹ and 100 mg·L⁻¹ LAS treatments had no significant effect on the growth of the plants, while 1000 mg·L⁻¹ LAS treatment reduced the height of the plant by 25.5% ($p < 0.05$) and the maximum width of the leaves by 27.0% ($p < 0.05$). The 10 mg·L⁻¹ and 100 mg·L⁻¹ LAS treatments significantly promoted the activities of ascorbic acid peroxidase (APX) and catalase (CAT), while peroxidase (POD) activity was significantly inhibited under 1000 mg·L⁻¹ LAS treatment. Malondialdehyde (MDA) content rose with increasing LAS concentration in the early stage after LAS treatment, but decreased later in all treatments. The residual LAS content in the leaves increased in the early stage after LAS treatment, and then dropped. The plants treated with 10 mg·L⁻¹ LAS had the lowest LAS content in the leaves. The residual LAS content of the soil ranged from 0.1 ~ 0.5 mg·L⁻¹ under 10 mg·L⁻¹ and 100 mg·L⁻¹ LAS treatments. Under 1000 mg·L⁻¹ LAS treatment, the residual LAS content of the soil kept rising, and ranged from 2.0 ~ 3.0 mg·L⁻¹; the residue of LAS in soil was 54.0% higher on the 28th day than that on the 7th day. Compared to the soil alone, the plant-soil system can degrade LAS more effectively.

Keywords: linear alkylbenzene sulfonate (LAS); *Zizania latifolia* Turcz.; antioxidant; the residual LAS content

1 引言 (Introduction)

目前, 绝大部分表面活性剂使用后未经妥善处

理即排放到河流、海洋等自然水体中, 造成水体污染并出现泡沫现象, 这不仅影响了自然水体景观的美感, 而且还直接威胁到水生动植物的生存状况。

基金项目: 国家科技支撑计划项目 (No. 2008BADA6B06); 浙江省科技厅资助项目 (No. 991102062)

Supported by the National Key Technology R&D Program (No. 2008BADA6B06) and the Science and Technology Agency Funded Project of Zhejiang Province (No. 991102062)

作者简介: 陈淑玲 (1985—), 女, E-mail: elaine615@zju.edu.cn; * 通讯作者 (责任作者), E-mail: syshou@zju.edu.cn

Biography: CHEN Shuling (1985—), female, E-mail: elaine615@zju.edu.cn; * Corresponding author, E-mail: syshou@zju.edu.cn

表面活性剂的有氧生物降解要消耗大量氧气,致使水中溶氧量明显降低,水质恶化.研究表明,阴离子表面活性剂对水生植物的生长有抑制作用(张永等,2004;Lipnitskaya *et al.*,1993).同时,表面活性剂等有机污染物能够经由生物链进入动物体或人体,可导致生物体生化指标变化,致使生物疾病产生,甚至会使生物体细胞产生突变(Voltkun *et al.*,1998).植物对环境保护具有十分重要的作用,是防治环境污染的一条重要途径.目前,越来越多的专家与学者开始关注水体污染的水生生物处理法,尤其是大型水生植物处理法,它不仅能起到净化水体的作用,还能改善生态环境,促进退化水生生态系的恢复,同时能创造一定的经济价值.因此,进行这方面的研究意义重大(高吉喜等,1997).

十二烷基苯磺酸钠(Linear Alkylbenzene Sulfonate, LAS)是世界上使用最为普遍的阴离子表面活性剂之一,也是合成洗涤剂中的主要成分之一,几乎涉及家庭生活、工农业生产等各个方面(Matthijs *et al.*,1996).研究表明,LAS会显著影响土壤粘粒的分散度,减弱土壤的渗滤作用,改变土壤的氧化还原能力和酶活力等性质,已成为环境中最具代表性的有机污染物(郭伟等,2004).茭白是一种水质净化效果良好的大型挺水植物(孙瑞莲等,2009),但以往的研究多关注于茭白等水生植物对氮磷(姜翠玲等,2005)等的吸收转运,有关茭白对表面活性剂的吸附研究较少.因此,本文以茭白品种中的美人茭为材料,研究不同LAS处理浓度下茭白的生长情况和生理生化表现,并对茭白叶片中抗氧化酶类在细胞内的活性氧清除水平动态变化进行研究,初步探讨LAS在茭白-土壤系统中相对残留量的变化过程.以期研究茭白对LAS污染的吸附和降解作用机制,以及制定表面活性剂污水处理要求提供参考.

2 材料与方 法 (Materials and methods)

2.1 供试土壤与试验材料处理

试验土壤取自浙江大学农场的茭白田,阴干粉碎后过2mm尼龙筛,每桶(15L)装18kg.土壤有效氮、磷、钾含量分别为90、69、86mg·kg⁻¹,有机质含量为2.5%,LAS含量为0.

选择单季茭品种美人茭为供试植物,采用土培方式,每桶种植3墩,每个处理设3次重复.LAS设3个浓度,分别为10、100、1000mg·L⁻¹,以不进行

LAS处理为对照(CK).同时,对LAS浓度为1000mg·L⁻¹的土壤设空白对照(未种植茭白而施加1000mg·L⁻¹LAS),每桶施加500mL LAS处理液,后期管理针对茭白生长需要进行相同的水分灌溉.6月定植,正常生长1个月后,于7月上旬进行处理,之后每7d测定1次抗氧化酶活性和MDA含量,以及叶片和土壤中LAS含量变化,连续4次,于处理后28d时测量各茭白的株高和最大叶宽.

2.2 测定方法

2.2.1 叶绿素的测定 叶绿素的测定采用丙酮溶液浸提法(韩锦峰,1990).称取待测样品0.1g,在研钵中研碎,加蒸馏水1mL,加碳酸钙以及石英砂,磨成匀浆,用蒸馏水定容至2mL,摇动;然后用移液管吸取0.5mL,置于大试管中,加入丙酮2mL,振摇,使叶绿素溶于丙酮中,静置片刻,离心,取上清液作测定用.以80%丙酮水溶液为参照,于663nm和645nm波长下分别测定叶绿素丙酮溶液的吸光度.

2.2.2 过氧化物酶(POD)活性测定 取待测样品0.2g,加入2mL 50mmol·L⁻¹(含0.2mmol·L⁻¹乙二胺四乙酸(EDTA))pH=7.8的磷酸缓冲液(PBS),再加入2%(体积分数)的聚乙烯吡咯烷酮(PVP)研磨,12000g离心20min;然后取上清液100μL,加入25mmol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH=7.0,含0.1mmol·L⁻¹EDTA)1700μL,20mmol·L⁻¹H₂O₂100μL、1%(体积分数)的愈创木酚100μL,25℃下反应,按kinetics程序测定OD₄₇₀的动力学变化(王学奎,2000).

2.2.3 过氧化氢酶(CAT)活性测定 CAT活性测定方法参照文献(刘萍等,2007),提取步骤同POD,然后取上清液100μL,加入25mmol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH=7.0,含0.1mmol·L⁻¹EDTA)1700μL、100mmol·L⁻¹H₂O₂200μL,25℃下反应,以水或缓冲液调零,用岛津紫外可见分光光度计(SHIMADZUUV-2401PC)按kinetics程序测定OD₂₄₀的动力学变化.

2.2.4 抗坏血酸过氧化物酶(APX)测定 APX活性测定方法参照文献(刘萍等,2007),提取步骤同POD,然后取上清液100μL,加入25mmol·L⁻¹磷酸缓冲液(pH=7.0,含0.1mmol·L⁻¹EDTA)1700μL、5mmol·L⁻¹抗坏血酸(ASA)100μL,20mmol·L⁻¹H₂O₂100μL,25℃下反应,以水或缓冲液调零,按kinetics程序测定OD₂₉₀的动力学变化.

2.2.5 丙二醛(MDA)含量测定 MDA活性测定

方法参照文献(刘萍等,2007),提取步骤同 POD,然后取上清液 1mL,加 3mL 含 2% 硫代巴比妥酸(TBA)的 20% 三氯乙酸(TCA)溶液,95℃ 水浴中保温 30min,立即置于冰浴中冷却,1500g 离心 10min,测 OD₅₃₂ 和 OD₆₀₀.

2.2.6 直链(十二)烷基苯磺酸钠(LAS)含量测定
叶片中 LAS 含量的测定:取第二节位的茭白叶片,去除茎脉,用蒸馏水冲洗干净并擦干,称取 5g 叶片,将其剪碎后研成匀浆,抽滤后用蒸馏水定容至 50mL,采用亚甲兰分光光度法进行测定.土壤中 LAS 含量的测定:取 20g 土壤(湿土),用蒸馏水浸洗、振荡 12h 之后,取其上清液,定容至 25mL,测定 LAS 含量(即定容后的 LAS 浓度(mg·L⁻¹)),方法同上.

2.3 数据处理

数据采用 SAS 软件进行 Duncan's 多重检验和统计分析.

3 结果(Results)

3.1 LAS 浓度对茭白生长的影响

不同浓度 LAS 对美人茭株高和最大叶宽的影响如图 1 所示.由图 1a 可以看出,28d 后,1000

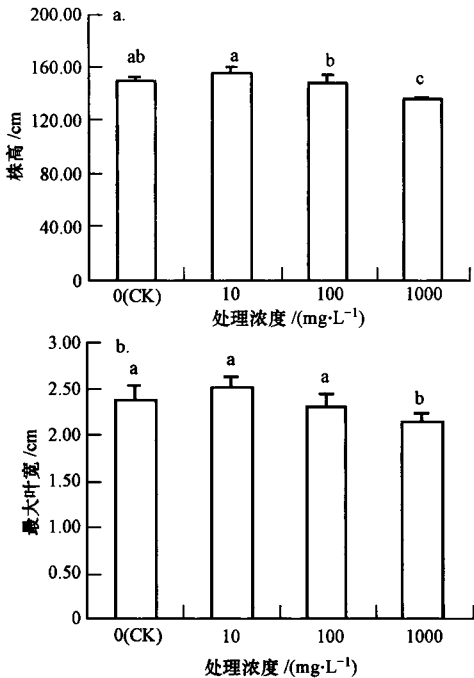


图 1 不同浓度 LAS 对美人茭株高(a)和最大叶宽(b)的影响(图中不同英文字母表示差异显著, p < 0.05)

Fig.1 Effects of LAS concentrations on the plant height (a) and the maximum leaf width (b) of *Zizania latifolia* Turcz. (Different letters in the chart indicate significant differences at the p < 0.05 level)

mg·L⁻¹ LAS 处理浓度下美人茭株高显著低于对照,较对照下降 25.5%.不同 LAS 处理浓度对美人茭最大叶宽的影响与株高表现出相似的规律(图 1b),LAS 处理浓度为 1000 mg·L⁻¹时,美人茭的最大叶宽与对照相比减少了 27.0%;而 10 mg·L⁻¹和 100 mg·L⁻¹ LAS 处理浓度对美人茭株高和最大叶宽无显著影响,但均比对照大.

3.2 LAS 浓度对茭白叶绿素含量的影响

从叶绿素含量的变化情况来看(表 1),LAS 处理浓度为 10 mg·L⁻¹和 100 mg·L⁻¹时,美人茭叶片的叶绿素含量与对照相比没有明显差异,但 10 mg·L⁻¹处理浓度下 3 个时段的叶绿素含量均较对照有小幅增加;28d 后,100mg·L⁻¹处理浓度组美人茭叶片叶绿素含量显著下降,分别较对照和 10 mg·L⁻¹处理浓度组下降 29.0% (p < 0.05), 38.5% (p < 0.05). 处理浓度为 1000mg·L⁻¹时,叶绿素总含量与对照相比有显著差异,并大幅下降,且在第 14、21、28d 时分别比对照降低了 64.5% (p < 0.05)、59.1% (p < 0.05)、42.3% (p < 0.05),植物外观形态表现为生长缓慢,叶片失绿.由此可见,不同 LAS 处理浓度对对美人茭叶片叶绿素含量的影响差异较大,10 mg·L⁻¹处理浓度叶绿素含量影响甚微,相对较高的处理浓度下,随着处理时间的增加叶绿素含量降低的幅度加大,1000mg·L⁻¹处理浓度对叶绿素含量有明显的降低作用.

表 1 不同浓度 LAS 对美人茭叶绿素含量的影响

Table 1 Effects of different concentrations of LAS on the chlorophyll content of 'Meirenjiao'

时间 /d	LAS 浓度 / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 a 含量 / (mg·L ⁻¹)	叶绿素 b 含量 / (mg·L ⁻¹)	叶绿素总含量 / (mg·L ⁻¹)
14	CK	5.02 ± 0.10 ^a	1.59 ± 0.04 ^a	6.62 ± 0.14 ^a
	10	5.58 ± 0.18 ^a	1.80 ± 0.06 ^a	7.38 ± 0.24 ^a
	100	5.12 ± 0.12 ^a	1.63 ± 0.04 ^a	6.75 ± 0.16 ^a
	1000	1.78 ± 0.08 ^b	0.57 ± 0.03 ^b	2.35 ± 0.13 ^b
21	CK	3.50 ± 0.06 ^a	1.10 ± 0.04 ^a	4.60 ± 0.10 ^a
	10	3.42 ± 0.13 ^a	1.12 ± 0.08 ^a	4.54 ± 0.21 ^a
	100	3.05 ± 0.10 ^{ab}	0.97 ± 0.05 ^a	4.01 ± 0.15 ^a
	1000	1.43 ± 0.19 ^c	0.44 ± 0.06 ^b	1.88 ± 0.24 ^b
28	CK	3.22 ± 0.08 ^{ab}	0.98 ± 0.06 ^{ab}	4.21 ± 0.14 ^{ab}
	10	3.72 ± 0.11 ^a	1.15 ± 0.04 ^a	4.87 ± 0.15 ^a
	100	2.24 ± 0.13 ^c	0.75 ± 0.05 ^b	2.99 ± 0.18 ^c
	1000	1.58 ± 0.11 ^c	0.81 ± 0.05 ^b	2.40 ± 0.16 ^{bc}

注:表中值为平均值 ± 标准差,数据后不同英文字母表示差异显著(p < 0.05).

3.3 抗氧化酶活性变化

3.3.1 抗坏血酸过氧化物酶 (APX) 活性变化 如图 2 所示,对照组美人茭的 APX 活性变化平缓;10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ LAS 处理浓度组的美人茭 APX 活性先增加后降低,至 21d 时出现峰值,较对照高出 54.4% ($p < 0.01$);100 和 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理浓度组的 APX 活性先降低后增加.10 和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理浓度组的 APX 活性均高于对照,1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理浓度组的 APX 活性低于对照,且活性受到抑制,21d 时较对照低 31.1% ($p < 0.05$).

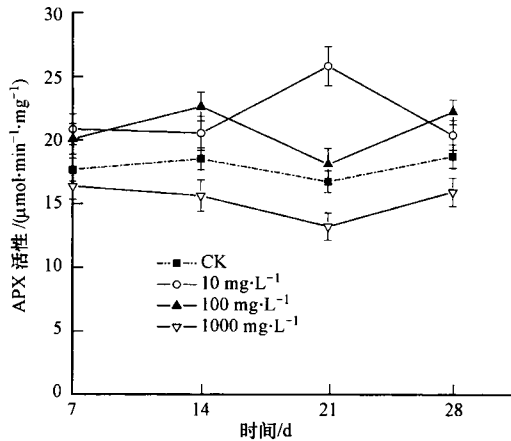


图 2 不同浓度 LAS 对美人茭 APX 活性的影响

Fig. 2 Effects of different concentrations of LAS on APX activities in *Zizania latifolia* Turcz.

3.3.2 过氧化氢酶 (CAT) 活性变化 如图 3 所示, LAS 处理浓度为 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人茭 CAT 活性先增加后降低,处理 14d 时出现峰值,比对照提高 48.3% ($p < 0.01$);LAS 处理浓度为 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,

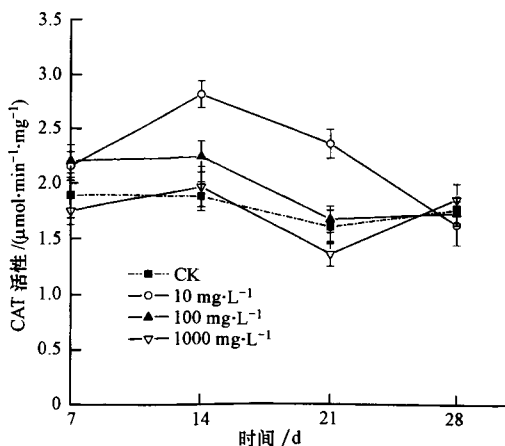


图 3 不同浓度 LAS 对美人茭 CAT 活性的影响

Fig. 3 Effects of different concentrations of LAS on the CAT activities in *Zizania latifolia* Turcz.

美人茭 CAT 活性在处理前期略有上升,处理 14d 时较对照高出 18.4% ($p < 0.05$);LAS 处理浓度为 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人茭 CAT 活性在 14d 前与对照相近,14d 后明显降低,21d 时的 CAT 活性比对照降低 15.0% ($p < 0.05$). 总体而言,不同 LAS 处理浓度下美人茭 CAT 活性在 28d 时恢复到与对照相近的水平.

3.3.3 过氧化物酶 (POD) 活性变化 由图 4 可知,1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ LAS 处理浓度对美人茭 POD 活性影响最大,7d 时 POD 活性高出对照 28.7% ($p < 0.05$),7d 后 POD 活性迅速降低,21d 时 POD 活性开始低于对照水平,28d 时 POD 活性达到最小值,较对照降低了 29.8% ($p < 0.05$). LAS 处理浓度为 10 和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人茭 POD 活性在 21d 前逐渐降低,21d 时达到最小值,之后活性有所上升. 对照组 POD 活性同样呈逐渐下降的趋势,这可能与环境温度、日照强度和时间的变化有关.

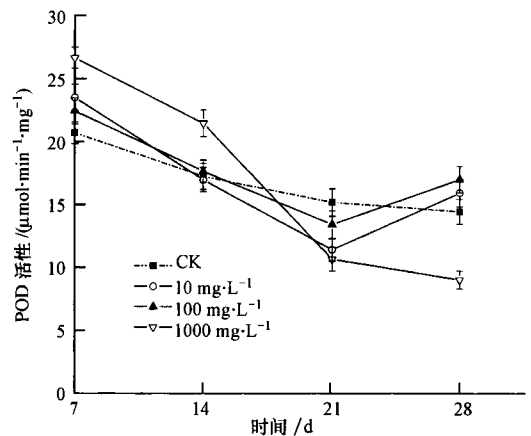


图 4 不同浓度 LAS 对美人茭 POD 活性的影响

Fig. 4 Effects of different concentrations of LAS on the POD activities in *Zizania latifolia* Turcz.

3.3.4 丙二醛 (MDA) 含量变化 由图 5 可知,不同 LAS 处理浓度下美人茭 MDA 含量变化趋势基本相同,均呈现先增加后下降的趋势. 在 14d 前美人茭 MDA 含量较对照均有所提高,并于 14d 时达到最大值,其中,LAS 处理浓度为 1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时的美人茭 MDA 含量最大,较对照增加了 70.2% ($p < 0.05$),之后 MDA 含量下降但始终高于对照. LAS 处理浓度为 10 和 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人茭 MDA 含量在第 14d 时达到最大值,之后迅速减少并在 21d 后低于对照. 由图 4 还可知,不同 LAS 处理浓度组美人茭中 MDA 的含量表现为:1000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组 > 100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组 > 10 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组.

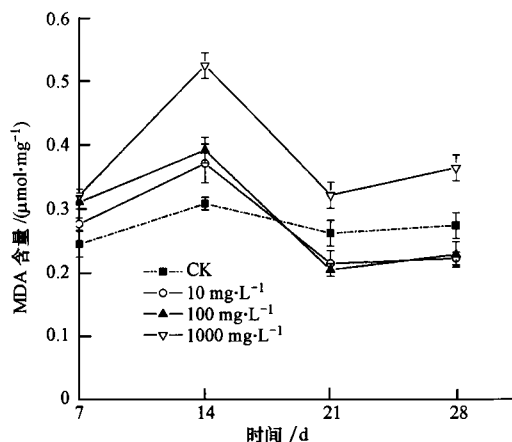


图5 不同浓度LAS对美人蕉MDA含量的影响

Fig. 5 Effects of different concentrations of LAS on MDA contents in *Zizania latifolia* Turcz.

表2 美人蕉叶片和土壤中LAS含量变化

Table 2 LAS concentrations in the leaves and the soil of *Zizania latifolia* Turcz. at different periods

LAS 浓度/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	时间/ d	叶片中 LAS 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对残留量	土壤中 LAS 含量/ ($\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$)	相对残留量
10	7	0.138 ± 0.008^b	100.0%	0.226 ± 0.018^d	100.0%
	14	0.111 ± 0.009^c	80.2%	0.357 ± 0.014^b	158.4%
	21	0.130 ± 0.015^{bc}	94.2%	0.390 ± 0.009^a	173.0%
	28	0.192 ± 0.014^a	139.0%	0.329 ± 0.019^c	145.9%
100	7	0.279 ± 0.015^a	100.0%	0.363 ± 0.013^c	100.0%
	14	0.245 ± 0.012^b	87.8%	0.460 ± 0.025^b	126.7%
	21	0.211 ± 0.008^c	75.6%	0.526 ± 0.033^a	145.1%
	28	0.257 ± 0.016^{ab}	92.0%	0.423 ± 0.030^b	116.6%
1000	7	0.327 ± 0.015^{bc}	100.0%	2.125 ± 0.181^c	100.0%
	14	0.317 ± 0.014^c	97.0%	2.654 ± 0.106^b	124.9%
	21	0.359 ± 0.019^b	110.0%	2.843 ± 0.116^{ab}	133.8%
	28	0.468 ± 0.019^a	143.2%	3.272 ± 0.174^a	154.0%

注:表中值为平均值 \pm 标准差,数据后不同英文字母表示差异显著($p < 0.05$).

$\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的土壤中,LAS含量在第21d时达到最大值,分别较第7d时高73.0%和45.1% ($p < 0.05$). LAS处理浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的土壤中,LAS含量在第28d时比第7天高54.0% ($p < 0.05$). 土壤中LAS含量随着处理浓度的升高而升高.

如图6所示,土壤空白对照中LAS含量始终显著高于种有美人蕉的土壤,在第7、14、21和28d时分别比后者高3.28、1.78、1.12、0.63倍. 空白对照中LAS含量逐渐下降,但下降趋势逐渐减缓;美人蕉土壤的LAS含量有所增加,但增加趋势减缓. 说明美人蕉对LAS有吸附降解作用,土壤对LAS也有降解作用,但随着LAS胁迫时间的延长,降解作用有所减弱. 这可能是由于土壤中的微生物参与对LAS的降解,但高浓度LAS胁迫对微生物的毒害作用增强,导致土壤降解作用减弱(李昊翔等,2006).

3.4 叶片和土壤中LAS含量变化

表2结果表明,3种处理浓度下美人蕉叶片中LAS含量呈先下降后上升趋势. LAS处理浓度为 $10 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人蕉叶片中LAS相对含量最低,第28d时较第7d时增加了39.0% ($p < 0.05$). LAS处理浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人蕉叶片中LAS含量在第14d后上升,并在28d时达到最大值,比第7d时提高了43.2% ($p < 0.05$). 美人蕉叶片中LAS含量随着处理浓度的升高而升高.

土壤中的LAS含量与叶片中LAS含量变化趋势相反,即LAS处理浓度为10和 $100 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的土壤中,LAS含量随时间的增加呈先上升后下降的趋势,LAS处理浓度为 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的土壤中,LAS含量一直呈上升趋势. LAS处理浓度为10和100

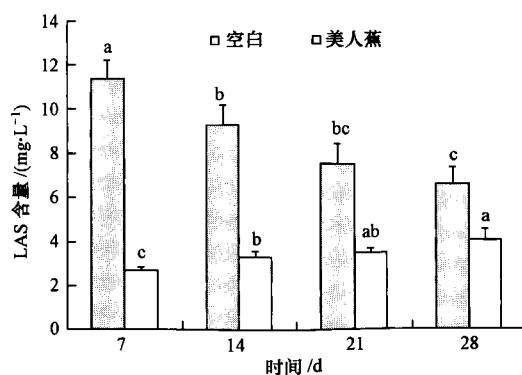


图6 $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 下不同时期土壤中LAS含量(图中不同英文字母表示差异显著, $p < 0.05$)

Fig. 6 LAS concentrations of the soil at different periods under $1000 \text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ LAS (Different letters in the chart indicate significant differences at the $p < 0.05$ level)

4 讨论(Discussion)

研究发现,高浓度 LAS 对植物生长和产量都有明显的负面影响,这可能是由于高浓度 LAS 阻碍了植物从土壤中吸收养分(Jia *et al.*, 2005). LAS 的 3 种浓度胁迫对美人茭生长及叶绿素含量的影响有差异,低浓度 LAS ($10 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 $0.278 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以土壤干重计)处理下,美人茭的生长与叶绿素含量均没有受到抑制(图 1、表 1);相对较高浓度 LAS ($100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 $2.778 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以土壤干重计)虽对美人茭的生长没有影响,但在长期胁迫后对叶绿素含量有显著的负面影响(图 1、表 1);高浓度 LAS ($1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$, 即 $27.778 \mu\text{g} \cdot \text{g}^{-1}$, 以土壤干重计)对美人茭的生长状态有明显的抑制作用(图 1、表 1),这与其他研究结果一致(多立安等,1999).对 LAS 抑制美人茭生长的浓度下限还需要做进一步研究.

为弥补水源的严重不足,利用污水进行灌溉的现象在我国已较为普遍(师荣光等,2006).茭白在我国长江流域及以南地区栽植面积大,且它的需水量大,在实际生产中,可以先稀释表面活性剂污水,用低浓度污水浇灌茭白,达到生物修复与茭白收益的双重目的.

LAS 会对生物体造成伤害,虽然目前对其伤害机理还不明了,但相关研究认为,LAS 会增加生物体细胞壁或细胞膜透性,使细胞内物质流失及细胞外有毒物质进入(Kristian *et al.*, 2001),这会引起生物体内抗氧化系统作出应激反应和植物体内 MDA 含量上升,MDA 是膜系统受伤害的重要标志之一,其值越高,膜系统受害的强度就越大.刘红玉等(2001)研究了 LAS 对水生植物生理生化特性影响,结果发现,CAT、POD 活性变化与细胞受伤程度直接相关.本试验中,低浓度 LAS 处理下 (10 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),美人茭 APX 和 CAT 活性显著增加(图 2、图 3),表明美人茭在低浓度 LAS 胁迫下,植物组织中的应急系统被激活,APX 和 CAT 活性升高以清除自由基伤害并提高植株的抗性,这与植物的生长状态表现一致;高浓度 LAS 处理 ($1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$)使植物体内产生的过氧化物过多,超出抗氧化酶的保护范围,体内的 MDA 含量明显上升(图 5),脂膜过氧化严重,细胞受损,导致植物生长状态受抑制. POD 活性在受到高浓度 LAS 胁迫下变化显著(图 4),说明高浓度 LAS 可能使膜结构改变而激发植株 POD 活性,试验后期由于植物细胞受到伤害使植物生理

机能整体下降,抑制抗氧化保护酶的活性.抗氧化酶活性和 MDA 含量变化可以有效地表征植物的受伤程度,因此,可以作为一种标示 LAS 胁迫对植物伤害程度的生理生化指标.

美人茭叶片中 LAS 残留量变化结果表明(表 2),美人茭植株对 LAS 有一定的吸收降解功能,LAS 被美人茭吸附后,一部分被降解,另一部分残留在体内.在施用低浓度 (10 和 $100 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$) LAS 时,土壤中 LAS 含量基本在 $0.1 \sim 0.5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 之间,在处理后的 21d 内叶片中 LAS 含量也有降低;当 LAS 浓度较高时 ($1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$),种植美人茭土壤的 LAS 含量达到 $2.0 \sim 3.0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$,叶片和土壤中的含量在 14d 后迅速积累上升.这表明美人茭对低浓度 LAS 具有一定的降解和修复能力,且作用持续时间相对较长,一般可达到 20d;过高浓度的 LAS 对植物造成组织机理上的损伤较大,使其修复功能降低,达到了植物最大的生物修复极限,使土壤中的 LAS 含量保持在土壤的最大吸收水平上.

LAS 为阴离子表面活性剂,具有临界束胶浓度 (CMC),当土壤中的 LAS 含量超过其 CMC 值时,LAS 就会缔合形成胶束,促进其它有机物溶解(陈宝梁等,2007),参与竞争根部附着 LAS 的位点,从而影响 LAS 的溶解,导致 LAS 残留于土壤中无法被美人茭吸附.在 LAS 处理浓度为 $1000 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ 时,可能因为土壤中 LAS 含量超过其 CMC 值而导致美人茭无法有效吸附环境中的 LAS,美人茭对 LAS 的吸附能力减弱,原来附着于根际的 LAS 成为游离离子回到土壤中,使得 LAS 在土壤中的残留量增加.试验结果(图 1b)表明,茭白与土壤协作起到生物修复的作用,通过美人茭的生命代谢活动减少了土壤环境中有毒有害物的浓度,并且美人茭可以提供土壤微生物生长所需的碳源和能源,同时可将大气中的氧气经叶、茎传输到根部,并扩散到周围的缺氧基质中,形成氧化的微环境,从而刺激好氧微生物对 LAS 的分解作用.因此,茭白-土壤系统中土壤的 LAS 浓度比土壤空白对照中有显著的减少.

综上所述,茭白-土壤系统可以有效治理轻度的 LAS 污染,因此,用表面活性剂含量在一定范围内的污水灌溉茭白,不仅具有经济效益,而且对减轻生态环境压力具有重要意义.我国在《土壤环境质量标准》中没有规定 LAS 含量的限值,因此,本文对完善《土壤环境质量标准》具有参考价值.

5 结论(Conclusions)

1) LAS 处理浓度为 $10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,其对美人茛的生长特性没有影响;当 LAS 浓度为 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,处理 28d 后,美人茛叶绿素含量明显降低;LAS 浓度为 $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,美人茛生长状态明显受到抑制.因此,利用含 LAS 污水浇灌茛白时,LAS 浓度要控制在一定范围,且在相对高浓度时要先进行稀释.

2) 当受到 LAS 胁迫时,美人茛体内的保护酶会作出应激反应,缓解 LAS 对其产生的伤害. LAS 浓度为 10 、 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,APX 活性均高于对照,在 14d 时,两种处理浓度下美人茛 CAT 活性分别高于对照 48.3% ($p < 0.05$)、 18.4% ($p < 0.05$);LAS 浓度为 $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,APX、CAT、POD 活性均受到抑制.

3) 不同 LAS 处理浓度下美人茛中 MDA 的含量表现为: $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组 $> 100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组 $> 10\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 处理组.因此,美人茛叶片中 MDA 含量可以有效地表征不同浓度 LAS 对美人茛的伤害程度.

4) 美人茛对 LAS 具有降解吸附作用,当 LAS 浓度较低时,美人茛的这种降解吸附作用持续时间较长. LAS 浓度为 10 、 $100\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,土壤中 LAS 含量基本在 $0.1 \sim 0.5\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 之间,叶片中的 LAS 含量也有降低. LAS 浓度为 $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,叶片和土壤中的 LAS 含量在 14d 后迅速积累上升. LAS 浓度为 $1000\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,茛白-土壤系统中土壤的 LAS 残留量明显低于土壤空白对照.

责任作者简介:寿森炎(1948—),男,教授,主要从事蔬菜生长发育与调控研究. E-mail: syshou@zju.edu.cn.

参考文献(References):

陈宝梁,李菱,朱利中. 2007. SDBS 在潮土/膨润土上的吸附行为及影响因素[J]. 浙江大学学报(理学版),34(2):214—218

Chen B L, Li L, Zhu L Z. 2007. Sorption behavior of sodium dodecylbenzene sulfonate (SDBS) on bentonite/soil and their influential factors [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 34(2):214—218 (in Chinese)

多立安,赵树兰. 1999. LAS 递进胁迫下草坪草初期生长效应的研究[J]. 草业学报,12:71—76

Duo L A, Zhao S L. 1999. Early stage growth of turfgrasses under increasing stress of linear alkylbenzene sulfonate [J]. Acta Pratacultural Science, 12:71—76 (in Chinese)

高吉喜,杜娟. 1997. 水生植物对面源污水净化效率研究[J]. 环境科学,17(3):247—251

Gao J X, Du J. 1997. Study of removing ability of macrophytes to N, P in

run off [J]. China Environmental Science, 17(3):247—251 (in Chinese)

郭伟,李培军. 2004. 阴离子表面活性剂(LAS)环境行为与环境效应[J]. 安全与环境学报,4(6):37—42

Guo W, Li P J. 2004. Environmental behavior and effect of anionic surfactant (LAS) [J]. Journal of Safety and Environment, 4(6):37—42 (in Chinese)

韩锦峰. 1990. 植物生理生化[M]. 北京:高等教育出版社. 300—302

Han J F. 1990. Plant Physiology and Biochemistry [M]. Beijing: Higher Education Press. 300—302 (in Chinese)

姜翠玲,范晓秋,章亦兵. 2005. 非点源污染物在沟渠湿地中的累积和植物吸收净化[J]. 应用生态学报,16(7):1351—1354

Jiang C L, Fan X Q, Zhang Y B. 2005. Accumulation of non-point source pollutants in ditch wetland and their uptake and purification by plants [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 16(7):1351—1354 (in Chinese)

Jia L Q, Ou Z Q, Ouyang Z Y. 2005. Ecological behavior of linear alkylbenzene sulfonate (LAS) in soil-plant systems [J]. Pedosphere, 15(2):216—224

刘红玉,周朴华,杨仁斌. 2001. 阴离子型表面活性剂(LAS)对水生植物生理生化特性的影响[J]. 农业环境保护,20(5):341—344

Liu H Y, Zhou P H, Yang R B. 2001. Effect of anionic surfactant linear alkyl benzene sulfonate (LAS) on physiological and biochemical characteristics of aquatic plants [J]. Agro-environmental Protection, 20(5):341—344 (in Chinese)

Kristian K B, Martin H, Peter R, et al. 2001. Toxic effect of linear alkylbenzene sulfonate on metabolic activity, growth rate, and microcolony formation of Nitrosomonas and Nitrosospira strains [J]. Appl Environ Microbiol, 67(6):2489—2498

李昊翔,蒋小龙,陈峰,等. 2006. 钝顶螺旋藻对阴离子表面活性剂(LAS)的富集与降解[J]. 浙江大学学报(理学版),33(4):434—438

Li H X, Jiang X L, Chen F, et al. 2006. Accumulation and degradation of anionic surfactant linear alkylbenzene sulfonate (LAS) by Spirulina platensis [J]. Journal of Zhejiang University (Science Edition), 33(4):434—438 (in Chinese)

刘萍,李明军. 2007. 植物生理学实验技术[M]. 北京:科学出版社. 119—129

Liu P, Li M J. 2007. Plant Physiology Experimental Techniques [M]. Beijing: Science Press. 119—129 (in Chinese)

Lipnitskaya G P, Parshikova T Y. 1993. Change in strength of binding in the chlorophyll protein-lipid complex of algae in the presence of surfactants [J]. Hydrobiol Journal, 29(7):70—78

Mathijs E, Holt M S, Kiewiet A, et al. 1996. Fate of surfactants in activated sludge waste water treatment plants [J]. Chimica Oggi-Chemistry Today, 14(5):9—10

师荣光,王德荣,赵玉杰,等. 2006. 城市再生水用于农田灌溉的水质控制指标[J]. 中国给水排水,22(18):100—104

Shi R L, Wang D R, Zhao Y J, et al. 2006. Water quality control indexes of reclaimed municipal Waste water for farmland irrigation [J]. China Water and Waste Water, 22(18):100—104 (in Chinese)

- 孙瑞莲,张建,王文兴. 2009. 8 种挺水植物对污染水体的净化效果比较[J]. 山东大学学报(理学版), 44(1):12—17
- Sun R L, Zhang J, Wang W X. 2009. Effect on polluted water purification by eight emergent plants [J]. Journal of Shandong University(Natural Science), 44(1):12—17 (in Chinese)
- 王学奎. 2006. 植物生理生化试验原理与技术[M]. 北京:高等教育出版社. 167—168
- Wang X K. 2006. Principles of Plant Physiological and Biochemical Tests and Technology[M]. Beijing: Higher Education Press. 167—168 (in Chinese)
- Voltkun V, Zhitkovich A, Costa M. 1998. Cr(Ⅲ)-mediated crosslink of glutathione or amino acid to the DNA phosphate backbone are mutagenic in human cells [J]. Nucleic Acids Research, 26: 2024—2030
- 张永,廖柏寒,曾敏,等. 2004. 表面活性剂 LAS 与重金属 Cd 复合污染对黄豆生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 23(6): 1071—1072
- Zhang Y, Liao B H, Zeng M, *et al.* 2004. Complex effects of LAS and Cd on growth of soybean [J]. Journal of Agro-environmental Science, 23(6):1071—1072 (in Chinese)