

石油对翅碱蓬生长及生理特性的影响

何 洁^{1,2}, 贺 鑫^{1,2}, 高钰婷^{1,2}, 王 斌³, 周一兵^{3*}

(1.大连海洋大学海洋环境工程学院, 辽宁 大连 116023; 2.大连海洋大学近岸海洋环境科学与技术辽宁省高校重点实验室, 辽宁 大连 116023; 3.大连海洋大学生命与科学技术学院, 辽宁 大连 116023)

摘 要 通过盆栽试验,测定不同石油浓度下翅碱蓬的生长生理指标及土壤中石油含量的变化,研究石油对翅碱蓬萌发、生长、生理特性和抗氧化酶系统的影响及翅碱蓬对土壤中石油的降解。结果表明,随着石油含量的升高,翅碱蓬种子发芽率、苗高、苗重和苗中叶绿素、粗蛋白含量逐渐下降,电导率上升,石油浓度在 $5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 以上,影响显著。石油对翅碱蓬糖的合成有明显抑制作用。当石油浓度为 $1\,000\sim5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,翅碱蓬抗氧化酶能够快速、长效地提高活性来抵御逆境,使其不受到伤害或减轻伤害,可溶性蛋白保持在高水平;当石油浓度达到 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,抗氧化酶系统迅速作出反应,酶活性急剧提高,但因毒性超出了其可以承受的范围,而无法维持较长时间,随后会降至对照组以下,同时可溶性蛋白也急剧下降,仅为对照组的 9%。石油浓度为 $1\,000\sim5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,石油去除率在 63.53%~83.21%,达到 $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时,则下降到 40.14%。

关键词 翅碱蓬 石油污染 生理指标 抗氧化酶系统

中图分类号 X173 **文献标志码** A **文章编号** 1672-2043(2011)04-0650-06

The Influence of Oil Concentration in Soil on Growth and Physiological Characteristics of *Suaeda heteroptera*

HE Jie^{1,2}, HE Xin^{1,2}, GAO Yu-ting^{1,2}, WANG Bin³, ZHOU Yi-bing^{3*}

(1. School of Marine Environmental Engineering, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 2. Liaoning Province Key Laboratory of Nearshore Marine Environmental Science and Technology, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China; 3. School of life Science and Technology, Dalian Ocean University, Dalian 116023, China)

Abstract The aim of this paper was to determine some growth and physiological indexes of *Suaeda heteroptera* at different oil concentration and variation of oil concentration of soil, and study the effects of oil on germination, growth, physiological characteristic and the antioxidant system of *Suaeda heteroptera* and the removal of oil in soil by the experiment. The results indicated that with the concentration of oil increasing, the germination rates of the seed, the heights and weights of the plant, the contents of chlorophyll and crude protein in the plants decreased gradually, and the data of electrical conductivity increased, the harms of *Suaeda heteroptera* were significant in the concentration of oil over $5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ or more. The synthesis of soluble sugar of *Suaeda heteroptera* was remarkable restrained by oil. The antioxidant enzymes could improve activity rapidly and long-term to against adversity rapid in the concentration of oil $1\,000\sim5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, it could make *Suaeda heteroptera* to avoid or reduce the damages, and make the contents of soluble protein keep a high level. The antioxidant enzymes activity was increased sharply, but no lasting longer owing to oil toxicity beyond the scope of *Suaeda heteroptera*'s affordable in the concentration of oil $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, the enzymes activity would decrease below the control groups soon, meanwhile the contents of soluble protein sharply dropped to only 9% of the control groups. The removal rates of oil were 63.53%~83.21% in the concentration of oil $1\,000\sim5\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, but it was only 40.14% in $10\,000\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$.

Keywords *Suaeda heteroptera*; oil contamination; physiological indexes; antioxidant enzymes

近年来,海洋河口地区石油污染加剧,石油类污

染物进入土壤后会破坏土壤结构^[1]。特别是其中的多环芳烃,因其有致癌、致突变、致畸等活性并能通过食物链在动植物体内逐级富集和放大,进而对河口环境中的生物及对人类健康造成严重的威胁,导致河口及其滨岸带生态系统最终发生衰变和退化。对河口海岸带生态环境的保护和治理已刻不容缓。

翅碱蓬是沿岸滩涂的优势种,以具有抗逆性、容

收稿日期 2010-10-24

基金项目 国家“863”计划项目(2006AA10Z410);国家海洋局公益项目(200805069) 辽宁省教育厅项目(2009A167)

作者简介 何 洁(1966—),女,博士,副教授,主要从事环境生物修复研究。E-mail hejie@dlou.edu.cn

*通讯作者 周一兵 E-mail yzbzhou@dlou.edu.cn

易繁殖、种植寿命长、能忍耐 3% 的盐度等特点^[2-6]而引起许多学者的关注^[7-8],并对其进行石油污染海岸带的修复进行了研究。许崇彦等^[9]研究了翅碱蓬对石油烃污染的天津渤海湾河口海岸带的修复效果发现,翅碱蓬对石油烃污染的盐碱土壤具有一定的修复作用。王建华等研究证实^[10-13],抗氧化酶系统的活性在一定程度上能够揭示出污染物对生物毒性机制^[14-15]。

本文研究了土壤中不同石油浓度对翅碱蓬的发芽率、苗高、苗重、叶绿素含量、糖含量、伤害率、粗蛋白的含量、抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性、可溶性蛋白含量变化规律的影响及翅碱蓬对污染土壤中石油的去除,为其应用于石油污染的植物修复提供依据。

1 材料和方法

1.1 材料

翅碱蓬 翅碱蓬种子购于山东省东营市农业科学研究所。土壤为取自旅顺龙王堂海滩的泥土。石油取自辽河油田。海水为取自黑石礁的沙滤海水。淡水为自来水。

1.2 方法

1.2.1 试验方法

依照田敏等对盘锦市典型区域土壤中石油烃的污染状况调查与分析^[16],设定 5 组石油污染量,拌入土壤,并封于袋中平衡 3 个月,使土壤中的石油量达到设定值,见表 1。每组有 3 个平行,每个花盆中装入 2.5 kg 处理好的土壤,翅碱蓬种子用清水泡种 24 h 后,每盆均匀播种 100 颗。培养条件为:每日光照 14 h,光强 8 800 lx,盐度为 1%~1.6%,白天温度 22 ℃,夜晚温度 18 ℃,相对湿度 75%。第 5、10、15、20、30 d 时测定发芽率、苗高、苗重、叶绿素含量、糖含量、粗蛋白的含量、抗氧化酶(SOD、CAT、POD)活性和可溶性蛋白质含量。第 10、20、30、40、50 d 时测定土壤中石油含量。

1.2.2 测定方法

1.2.2.1 发芽率

按照发芽情况记录,与对照组比较。

1.2.2.2 苗高和苗重

用刻度尺测苗的高度,用分析天平测苗的重量,

表 1 土壤中石油量设定值

Table 1 The oil concentration in soil

	对照组	A	B	C	D
加入石油量/mg·kg ⁻¹	0	1 000	3 000	5 000	10 000

每盆取其全部植株。测量后记录并计算。

1.2.2.3 叶绿素、糖类、电导率、粗蛋白和酶活性

分光光度计法测叶绿素 (GB/T 22182—2008), 蒽酮法测可溶性糖 (GB/T 601—2007), 电导仪法测电导率 (GB/T 11007—2008), 凯氏法测定粗蛋白 (GB/T 6432—1994)。

SOD 活性采用化学比色法,按南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定,单位为 U·mg⁻¹prot。CAT 活性采用可见分光光度法,按南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定,单位为 U·mg⁻¹prot。POD 活性按南京建成生物工程研究所购买的试剂盒测定,单位为 U·min⁻¹·g⁻¹。可溶性蛋白含量采用考马斯亮蓝法测定。

1.2.2.4 石油烃的测定

采用紫外分光光度法 (GB 17378.4—1998)。

2 结果与分析

2.1 土壤石油浓度对翅碱蓬生长的影响

从表 2 可以看出,当石油浓度为 1 000、3 000 mg·kg⁻¹ 时,对翅碱蓬种子的萌发影响不大,发芽率与对照组接近,30 d 苗高和平均苗重也接近对照组。而后随着处理浓度的增高,对种子发芽率表现为明显的抑制作用,当浓度达到 10 000 mg·kg⁻¹ 时,发芽率为对照的 54.9%,30 d 苗高和苗重分别为对照组的 69.7%和 57.2%。

2.2 土壤石油浓度对翅碱蓬几个生理指标的影响

从表 3 可以看出,在石油污染土壤中的翅碱蓬的叶绿素含量均低于对照组,并随着石油浓度的上升逐渐下降,说明石油对翅碱蓬的生长有抑制作用。翅碱蓬的电导率均高于对照组,并随着石油浓度的上升逐渐上升,说明越高浓度的石油对翅碱蓬的损害越大。粗蛋白质含量均低于对照组,并随着石油浓度的上升逐渐下降,表明石油对翅碱蓬体内的粗蛋白质的合成有抑制作用。糖含量均低于对照组,随着石油浓度的上升而上升,表明石油对翅碱蓬体内的糖的合成有抑制作用,但是高浓度的石油比低浓度的石油更有利于

表 2 土壤石油浓度对翅碱蓬生长的影响

Table 2 The influence of oil concentrations in soil on the growth of *Suaeda heteroptera*

石油量/mg·kg ⁻¹	0	1 000	3 000	5 000	10 000
发芽率/%	91	86	84	72	50
30 d 时苗高/cm	6.6	67	5.8	5.1	4.6
30 d 平均重量/g	0.120 1	0.116 5	0.099 1	0.084 8	0.068 7

表 3 土壤石油浓度对翅碱蓬几个生理指标的影响

Table 3 The influence of oil concentrations in soil on the physiological indexes of *Suaeda heteroptera*

石油量/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	0	1 000	3 000	5 000	10 000
叶绿素/ $\text{mg} \cdot \text{g}^{-1}$	0.625	0.624	0.544	0.504	0.211
电导率/%	0.182	0.206	0.271	0.336	0.596
粗蛋白质含量/%	38.52	36.24	32.99	29.74	22.37
每百克含糖量/ μg	172.3	88.6	90.5	95.4	98.2

翅碱蓬糖的合成。

2.3 土壤石油浓度对翅碱蓬幼苗抗氧化酶系统和可溶性蛋白含量的影响

2.3.1 石油对翅碱蓬幼苗 SOD 活性的影响

石油对翅碱蓬 SOD 活性的影响如图 1 所示。对照组的翅碱蓬 SOD 活性较稳定。石油浓度为 1 000、3 000、5 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SOD 活性均稍高于对照组, 并且都是在试验前期出现峰值, 在试验中期后恢复到对照组 SOD 水平, 说明翅碱蓬 SOD 能对低浓度石油产生快速的反应, 并在短时间内消除不良影响。当石油浓度达到 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, SOD 活性在 5~10 d 急剧上升, 数值为对照组 SOD 活性的 5.67 倍, 而后快速下降到接近失活的水平。翅碱蓬 SOD 酶活性能及时且大幅度地提高, 但保持相对高活性的时间较短, 不能完全抵御石油带来的不良影响。

2.3.2 石油胁迫对翅碱蓬幼苗 CAT 活性的影响

图 2 为不同土壤石油浓度下翅碱蓬 CAT 活性的变化, 其规律与 SOD 变化规律相似。

2.3.3 石油对翅碱蓬幼苗 POD 活性的影响

POD 可分解细胞内的脂质过氧化物, 减少细胞内过氧化物的积累。图 3 显示对照组 POD 活性呈现平稳的变化趋势, 且 5 d POD 活性高于其他组, 说明 POD 的反应较 SOD 有一定的滞后性, 符合两者在抵

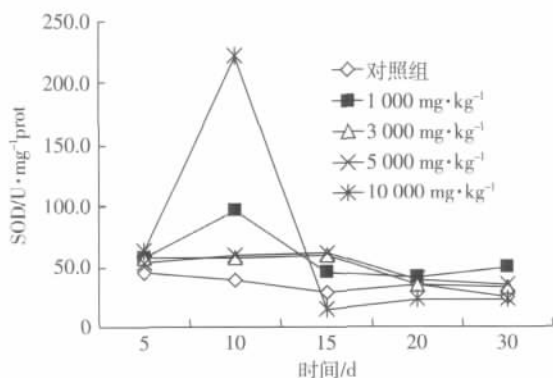


图 1 石油对翅碱蓬 SOD 活性的影响

Figure 1 The influence of oil on the activity of SOD

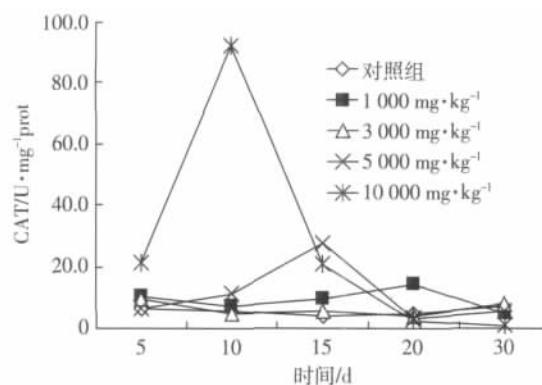


图 2 石油对翅碱蓬 CAT 活性的影响

Figure 2 The influence of oil on the activity of CAT

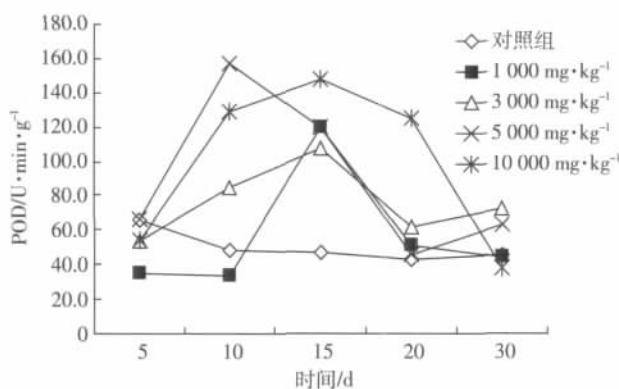


图 3 石油对翅碱蓬 POD 活性的影响

Figure 3 The influence of oil on the activity of POD

御逆境时的作用机理。石油浓度为 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时 POD 活性变化为抛物线类型, 由对照组水平上升后又恢复到对照组水平。和图 1、图 2 中 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组相比较可以看出, 在石油浓度为 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, 翅碱蓬体内 3 种酶通过活性提高来抵御伤害, 30 d 左右能恢复到正常环境下的水平, 说明此时 1 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石油对植物的伤害力已经变得很小。石油浓度为 3 000、5 000、10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时, POD 活性变化均为先上升再下降, 30 d 时 3 000、5 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 组 POD 活性高于对照组, 而 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石油组低于对照组。与图 1、图 2 中相应组一起分析, 说明 10~20 d 时翅碱蓬体内过氧化物大量累积, 翅碱蓬通过大幅度提高抗氧化酶活性来减少伤害, 恢复到对照组水平, 但由于 10 000 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石油的毒害超出了其可以承受的范围, 所以 30 d 时 3 种酶的活性均下降到对照组以下, 翅碱蓬受到很大程度的伤害。

2.3.4 石油对翅碱蓬可溶性蛋白含量的影响

图 4 显示对照组可溶性蛋白质含量的变化为先上升后下降再到稳定。石油浓度为 1 000、3 000、5 000

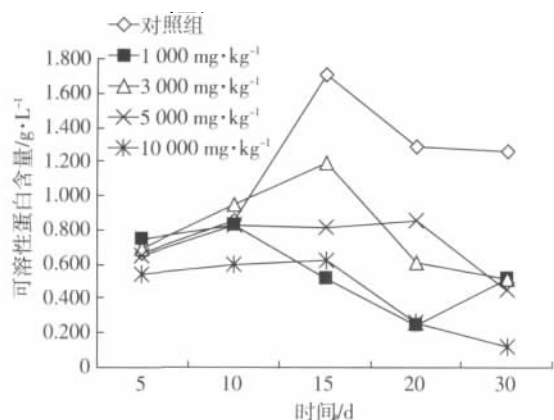


图4 石油对可溶性蛋白含量的影响

Figure 4 The influence of oil on the activity of soluble protein

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时可溶性蛋白质含量变化趋势是在 5~10 d 比较平稳,和对照组相接近,在 10~30 d 逐渐下降,30 d 时下降到对照组的 30%。这个下降过程和 SOD、CAT、POD 3 种酶活性在相对应时间内的波动总体上升有关系。石油浓度为 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时可溶性蛋白含量试验前期相对稳定,中后期迅速下降,30 d 时仅为对照组的 9%。与图 1、图 2、图 3 中 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 石油组综合来看,3 种酶活性下降到接近失活,同时可溶性蛋白的含量更是急剧下降,这说明翅碱蓬受到了很严重的伤害,光合作用等机能出现问题。

2.4 翅碱蓬对土壤中石油降解的影响

图 5 显示,土壤中石油含量随着时间逐步降低。初始浓度分别为 $1\,000$ 、 $3\,000$ 、 $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 试验组,在前 20 d 石油含量变化不大,说明在此期间翅碱蓬幼苗对土壤中石油的吸收作用有限,降解效果不明显。第 20 d 以后,土壤中石油的浓度有明显降低,50 d 时石油降解率分别为 63.53%、83.21%和 74.89%。初

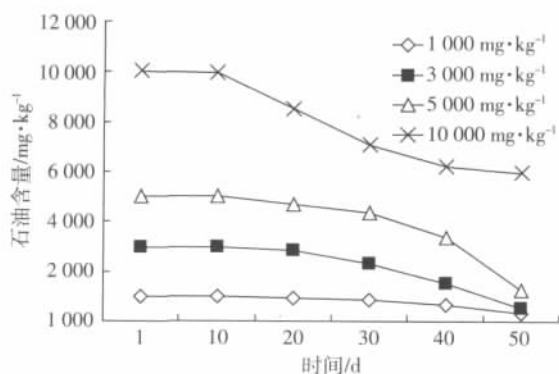


图5 翅碱蓬作用下土壤中石油含量的变化

Figure 5 The change of oil amount in soil under effect of *Suaeda heteroptera*

始浓度为 $10\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 试验组,开始时石油含量即有明显的下降,第 30 d 后下降速度减缓,50 d 时石油降解率为 40.14%。

3 讨论

3.1 土壤石油浓度与翅碱蓬生长指标的关系

试验结果表明,低浓度石油 ($1\,000$ ~ $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$) 处理几乎对翅碱蓬种子发芽率没有影响,而高浓度石油处理对翅碱蓬种子的萌发具有显著的抑制作用。张涛等^[17]发表了不同浓度土壤石油污染对碱蓬、翅碱蓬幼苗生长的影响:土壤石油浓度为 500 ~ $5\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,对碱蓬幼苗株高的生长有一定的促进作用,在 $15\,000$ ~ $30\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时有显著的抑制作用,这与本试验结果相似。但张丽辉等^[18]研究表明,土壤石油污染在 $1\,000$ ~ $3\,000 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时,抑制碱蓬和翅碱蓬的出芽,这可能是与石油种类和土壤类型有关,种子萌动初期,膜保持一定的透性有利于种子的吸胀,电解质最初的外渗属于被动扩散,但随后的萌发过程依赖膜的完整性。在低浓度石油胁迫下,石油毒害只是轻微的伤害膜的完整性,但超过某一高浓度可能引起种子内保护酶系统活性降低,导致体内活性氧积累,从而启动膜脂过氧化,使膜透性增高,电解质流失。这可能是高浓度石油引起翅碱蓬种子活力降低、萌发过程受阻的重要原因。

植株的高和重是植物生长情况的最直接的表现。土壤中石油浓度越高,翅碱蓬植株的高和重就越低,说明翅碱蓬的生长受到了抑制。许端平等^[19]曾研究石油烃类污染物对高粱、玉米生长的影响,土壤中石油类污染物浓度较高时,石油烃对高粱的生长有明显的抑制作用,石油对翅碱蓬生长的影响与此相似。

3.2 土壤石油浓度与翅碱蓬几个生理指标的关系

试验表明,随着石油浓度含量的升高,苗中的叶绿素和生命力在逐渐降低,粗蛋白含量、可溶性糖含量逐渐下降,电导率上升,受到的伤害加重。这可能是因为当土壤中石油的浓度较低时,翅碱蓬将石油烃中的碳、氢、氧、氮等通过木质化作用而转化成生长所需的物质,促进植物的生长。当土壤中石油的浓度较高时,一方面,石油烃中分子量高的组分易粘附在植物表面,影响植物的呼吸与蒸腾作用;另一方面,石油中多环芳烃等组分能够进入植物体内,对植物具有一定的毒害作用,抑制植物的生长。高粱、玉米受石油污染影响时其叶片中叶绿素含量与土壤中石油含量呈现一定的相关性^[19],即在一定的石油浓度范围内,土壤

中的石油能增加叶片中叶绿素含量,当土壤石油含量较高时,叶片中叶绿素含量降低,与本文翅碱蓬受石油影响相似;白骨壤被石油处理 3 个月后,相对电导率都极显著高于对照组,即伤害率显著升高^[20]。伤害程度与细胞膜结构破坏的程度、细胞内电解质外渗,与石油处理的浓度、持续的时间有关。

3.3 土壤石油浓度与翅碱蓬抗氧化酶系统的关系

SOD 能催化超氧阴离子自由基的歧化作用而生成分子氧和 H_2O_2 , H_2O_2 又在 CAT 和 POD 的作用下形成 H_2O , 保护膜结构的完整性,减少活性氧对机体的毒害作用。因此,SOD、CAT 和 POD 是细胞内消除活性氧的保护酶。植物体在正常的情况下,体内自由基的形成和消除自由基的酶处于平衡状态,但当植物处于逆境时,两者就不平衡。

本试验翅碱蓬在石油浓度为 $1\ 000\sim5\ 000\ mg\cdot kg^{-1}$ 时,体内 SOD、CAT 和 POD 能够快速提高活性来抵御逆境,并能长时间保持在一个相对较高的水平,同时翅碱蓬体内的可溶性蛋白质含量也在试验过程中保持相对较高且稳定的水平。这与陈庆华等^[21]报道的黄瓜胚轴在低浓度镍胁迫下体内保护酶系统中 SOD、CAT 和 POD 活性随浓度增加而增加的结果相似,说明翅碱蓬可以通过自身抗氧化酶系统的调节来抵御低浓度石油的危害。而当石油浓度达到 $10\ 000\ mg\cdot kg^{-1}$ 时,抗氧化酶系统迅速作出反应,酶活性急剧提高,图 2 中在第 10 d 时 CAT 活性就提高到对照组的 17 倍。但是接下来酶活性和可溶性蛋白质含量的迅速下降说明翅碱蓬的自身调节已经不能完全消除石油带来的危害,植物本身受到了一定程度的伤害。李春荣等^[22]研究表明,低浓度石油对黄豆幼苗 SOD 活性影响甚小,高浓度石油使 SOD 活性降低,翅碱蓬有相似规律。

翅碱蓬在不同石油浓度胁迫下抗氧化酶系统的反应:污染浓度较低时,翅碱蓬的生命活力强,同时土壤中石油含量下降快、去除率高;而污染浓度较高时,翅碱蓬虽可以保持一段时间的强生命力,但随着时间的延长,翅碱蓬无法完全抵御石油的毒害,生命力急剧下降,同时土壤石油含量下降速度减缓、去除率低。

根据田敏等^[16]对盘锦市典型区域土壤中石油烃的污染状况调查与分析,盘锦市工业园区、油田矿区土壤中石油浓度范围为 $14.42\sim3\ 407\ mg\cdot kg^{-1}$, 均属低浓度石油污染,只有重污染企业的土壤石油污染达到

$9\ 382\ mg\cdot kg^{-1}$,才是高浓度石油污染。所以翅碱蓬适合于盘锦市土壤石油污染的生物修复。

4 结论

翅碱蓬较适用于低浓度石油污染土壤的植物修复。翅碱蓬种子萌发和生长受影响很小,体内 SOD、CAT 和 POD 能够快速提高活性来抵御逆境,并能长时间地保持在一个相对较高的水平,抵御石油毒害,保持高发芽率和较强的生命力,完成其生态价值和经济价值,提高土壤中石油含量的下降速度和降解率。

翅碱蓬对高浓度石油污染毒害有一定的抵抗能力,抗氧化酶系统迅速作出反应,酶活性急剧提高,但是无法维持较长时间,能够保持 50%的发芽率,抵御一部分石油胁迫带来的伤害。可以通过短期内多次播种来快速、大量的降低土壤中的石油含量。

参考文献:

- [1] 丁克强,孙铁珩,李培军. 石油污染土壤的生物修复技术[J]. 生态学杂志, 2000, 19 (2): 50-55.
DING Ke-qiang, SUN Tie-heng, LI Pei-jun. Bioremediation of the soil contaminated by petroleum hydrocarbons[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2000, 19 (2): 50-55.
- [2] 段德玉,刘小京,李存桢,等. N 素营养对 NaCl 胁迫下盐地碱蓬幼苗生长及渗透调节物质变化的影响[J]. 草业学报, 2005, 14 (1): 63-68.
DUAN De-yu, LIU Xiao-jing, LI Cun-zhen, et al. The effects of nitrogen on the growth and solutes of Halophyte *Suaeda salsa* seedlings under the stress of NaCl[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2005, 14 (1): 63-68.
- [3] 赵可夫,李法增,樊守金,等. 中国的盐生植物[J]. 植物学通报, 1999, 16 (3): 201-207.
ZHAO Ke-fu, LI Fa-zeng, FAN Shou-jin, et al. Halophytes in China[J]. *Chinese Bulletin of Botany*, 1999, 16 (3): 201-207.
- [4] 赵可夫. 植物盐耐受生理[M]. 北京: 北京科技出版社, 1993.
- [5] 赵可夫,李法增. 中国盐生植物[M]. 北京: 科学出版社, 1999.
- [6] Breckle S W. How do halophytes overcome salinity? [J]. *Biology of Salt Tolerant Plants*, 1995, 199-213.
- [7] Gaoy Z, Zhu L Z. Phytoremediation and its models for organic contaminated soils[J]. *Journal of Environmental Science*, 2003, 15: 302-310.
- [8] Reilley K A, Banks M K, Schwab A P. Dissipation of polycyclic aromatic hydrocarbons in the rhizosphere[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1996, 25: 212-218.
- [9] 许崇彦,刘宪斌. 翅碱蓬对石油烃污染的海岸带修复的初步研究[J]. 安全与环境学报, 2007, 7 (1): 37-39.
XU Chong-yan, LIU Xian-bin. Remedial effect of *Suaeda salsa* (L.) Pall. planting on the oil-polluted coastal zones[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7 (1): 37-39.
- [10] 桂枝,高建明. 盐胁迫对 6 个苜蓿品种脯氨酸含量和超氧化物歧化酶活性的影响[J]. 天津农学院学报, 2007, 14 (4): 18-21.

- GUI Zhi, GAO Jian-ming. Influence of 6 alfalfa varieties on free proline content and SOD activity in salt stress[J]. *Journal of Tianjin Agricultural University*, 2007, 14 (4) :18-21.
- [11] Bowler C, Montagu M V, Inze D. Superoxide dismutase and stress tolerance[J]. *Annu Rev Plant Physiol Plant Mol Biol*, 1992, 43 :83-116.
- [12] 张欣. 超氧化物歧化酶(SOD)及其研究进展[J]. *内蒙古石油化工*, 2010, 16 :14-15.
- ZHANG Xin. Research advances on superoxide dismutase (SOD) [J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*, 2010, 16 :14-15.
- [13] 林庆斌, 廖升荣, 熊亚红. 超氧化物歧化酶(SOD)的研究和应用进展[J]. *化学世界*, 2006, 6 :378-381.
- LIN Qing-bin, LIAO Sheng-rong, XIONG Ya-hong. Progress in the study and application of superoxide dismutases[J]. *Chemical World*, 2006, 6 :378-381.
- [14] 徐建明, 李才生, 毛善国. 锌对水稻幼苗生长及体内SOD、POD活性的影响[J]. *安徽农业科学*, 2008, 36 (3) :877-878.
- XU Jian-ming, LI Cai-sheng, MAO Shan-guo. Effect of zinc on rice seedlings growth and activity of SOD and POD[J]. *Journal of Anhui Agricultural Science*, 2008, 36 (3) :877-878.
- [15] 吴素玲, 张卫明, 孙晓明. 刺梨SOD活力测定研究[J]. *食品科学*, 2005, 26 (11) :58-61.
- WU Su-ling, ZHANG Wei-ming, SUN Xiao-ming. Studies on determination of SOD activity in *rosa roxburghii* tratt [J]. *Food Science*, 2005, 26 (11) :58-61.
- [16] 田敏, 张昌楠. 盘锦市典型区域土壤中石油烃的污染状况调查与分析[J]. *现代农业科技*, 2008, 20 :352-354.
- [17] 张涛, 张启鸣. 土壤石油污染对两种藜科植物幼苗生长的影响[J]. *大连教育学院学报*, 2009, 25 (1) :46-48.
- ZHANG Tao, ZHANG Qi-ming. Effects of oil pollution in soil on the seedling growth of two kinds of chenopodiaceae plant[J]. *Journal of Dalian Education University*, 2009, 25 (1) :46-48.
- [18] 张丽辉, 刘爽, 赵骥民. 土壤石油污染对2种藜科植物种子发芽率的影响[J]. *安徽农业科学*, 2007, 35 (34) :10995-10996.
- ZHANG Li-hui, LIU Shuang, ZHAO Ji-min. Effects of petroleum contaminated soil on seed germination rate of 2 kinds of chenopodiaceae plants[J]. *Journal of Anhui Agri Sci*, 2007, 35 (34) :10995-10996.
- [19] 许端平, 王波. 土壤中石油烃类污染物对高粱玉米生长的影响研究[J]. *矿业快报*, 2006, 452 :28-30.
- XU Duan-ping, WANG Bo. Effect of petroleum hydrocarbon in soil on growth of sorghum and corn[J]. *Express Information of Mining Industry*, 2006, 452 :28-30.
- [20] 王雪峰, 陈桂珠, 许夏玲, 等. 白骨壤对石油污染的生理生态响应[J]. *生态学报*, 2005, 25 (5) :1095-1100.
- WANG Xue-feng, CHEN Gui-zhu, XU Xia-ling, et al. Physiological responses of *avicennia marina* to oil treatment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2005, 25 (5) :1095-1100.
- [21] 陈庆华. 不同浓度镍胁迫对黄瓜种子萌发及其生理生化特性的影响[J]. *中国农学通报*, 2009, 14 :91-94.
- CHEN Qing-hua. Cucumber seed germination and physiological and biochemical characteristics responded to different concentrations of nickel stress[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2009, 14 :91-94.
- [22] 李春荣, 王文科, 曹玉清, 等. 石油污染土壤对黄豆生长的生态毒性效应[J]. *安全与环境学报*, 2007, 7 (4) :28-30.
- LI Chun-rong, WANG Wen-ke, CAO Yu-qing, et al. Effects of petroleum polluted soil on the soybean growth[J]. *Journal of Safety and Environment*, 2007, 7 (4) :28-30.