

黄河三角洲石油污染对湿地芦苇和碱蓬幼苗生长影响的模拟研究

于君宝¹, 阚兴艳^{1,2}, 王雪宏^{1,2}, 韩广轩¹, 管 博¹, 谢文军³, 林乾新⁴

(1. 中国科学院烟台海岸带研究所, 中国科学院海岸带环境过程重点实验室, 山东省海岸带环境过程重点实验室, 山东 烟台 264003; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049; 3. 滨州学院, 山东省黄河三角洲生态环境重点实验室, 山东 滨州 256600; 4. Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA)

摘要: 黄河三角洲湿地是中国最具代表性的滨海湿地之一, 也是中国第二大油田——胜利油田的产油区, 石油污染已成为本区湿地生态系统退化的重要因子。在温室条件下模拟研究了该区滨海湿地土壤中2种不同浓度(0.5%、2.0%)石油污染对黄河三角洲地区典型物种芦苇(*Phragmites australis*)和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)幼苗生长的影响。结果表明, 随着石油浓度的增高, 芦苇和盐地碱蓬株高的受抑制程度不断增强, 随着时间的推移, 石油污染对芦苇分蘖的抑制作用减弱, 而对盐地碱蓬幼苗的分枝数抑制作用加大。随石油浓度的增加, 盐地碱蓬幼苗叶片中可溶性蛋白质含量先升高后降低, 丙二醛含量和过氧化物酶活力先降低后升高, 过氧化氢酶活力显著降低; 芦苇幼苗则对石油污染表现出相对较强的耐受性。不同石油污染条件下芦苇幼苗叶片叶绿素含量表现出先下降后升高的变化趋势。从整体上来看, 石油烃类污染对盐地碱蓬幼苗的抑制作用要高于芦苇幼苗, 也说明在处理石油烃类污染物中芦苇比碱蓬更具有优势。

关键词: 黄河三角洲湿地; 石油污染; 芦苇; 盐地碱蓬; 模拟研究

中图分类号: X142; X171.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-0690(2012)10-1254-08

黄河三角洲滨海湿地不仅是东北亚内陆鸟类迁徙的重要中转站, 也是多种生物觅食、栖息和孵化的重要场所, 同时该地区地下埋藏着丰富的石油天然气资源, 与之相连的近海石油随着黄河淤积造陆也变为陆上油区, 大大方便了勘探开发^[1]。因此, 随着近年来该地区石油的大规模开采、运输和加工, 污染、井喷、输油管道泄漏等事故频发^[2-3], 造成土壤污染和植被破坏, 从而影响黄河三角洲生态系统的安全。石油是由上千种化学性质不同的物质组成的复杂混合物, 主要包括饱和烃、芳香烃类化合物、沥青质、树脂类等^[4], 当其进入土壤后, 会对土壤、植物、微生物等产生直接或间接的危害。如引起土壤板结化, 损害植物根部, 阻碍根的呼吸与水分吸收, 甚至引起根系腐烂^[5,6]; 改变土

壤有机质的碳氮比和碳磷比^[7]; 易被植物吸收的石油有害化合物通过食物链危害人体健康^[8]; 造成土壤微生物群落、区系的变化^[7]; 通过渗透作用污染浅层地下水和通过挥发、扩散作用造成空气质量下降^[9]等。

对进入环境中的石油烃类污染物进行降解、修复是人们近年来关注的热点。同传统物理、化学方法相比, 植物修复是一种潜在的、洁净的、有效的且成本相对较低的修复技术^[10,11]。植物修复首先要保证植物的生长速率和较高的生物量, 其次是对特定污染物有耐受性^[10,12,13]。然而, 许多植物对污染物反应很敏感, 不能达到理想的修复效果^[14]。目前用作石油烃污染土壤修复的植物种类主要是苜蓿(*Richardia scabra*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、

收稿日期: 2011-09-15; **修订日期:** 2011-11-23

基金项目: 中国科学院-国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划、山东省自然科学基金项目(JQ201114)、中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-223; KZCX2-YW-359)、中国科学院百人计划项目和十二五”国家科技支撑计划项目(2011BAC02B01)。

作者简介: 于君宝(1970-), 吉林长春人, 博士, 研究员, 主要从事湿地生物地球化学与生态修复研究。E-mail: Junbao.yu@gmail.com

羊茅(*Festuca ovina*)和高羊茅(*Festuca elata*)等非盐生植物^[12,15-17]。由于滨海土壤多为盐碱土壤,非盐生植物一般不适于在盐碱环境中生长。国内学者在研究利用翅碱蓬修复天津渤海湾河口海岸带石油烃污染时,发现翅碱蓬(盐地碱蓬)在石油烃污染的盐碱土中生长良好,并且降低了盐碱土中的石油烃含量^[18]。依此推测,黄河三角洲地区典型耐盐植物芦苇(*Phragmites australis*)、碱蓬等在修复石油烃污染的盐碱土壤方面应具有很大优势。本研究选取黄河三角洲地区盐碱土壤和该地区典型植物芦苇和盐地碱蓬(*Suaeda salsa*)作为研究对象,通过在温室盆栽模拟试验中监测植株幼苗的生理生态响应,研究这两种植物对土壤石油污染物的耐受性及修复潜力,以期为黄河三角洲地区土壤石油污染的植物生态修复提供可行的修复植物品种及修复借鉴依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验土壤于2010年5月采自黄河三角洲未受石油污染的滨海湿地土壤,土壤中全氮含量为1.12 g/kg,有效钾含量151.90 mg/kg,有效磷含量11.4 mg/kg,有效钠含量652.87 g/kg,总含盐量2.22 g/kg。试验用原油采自胜利油田某生产油井,供试植物选择黄河三角洲代表性植物芦苇和盐地碱蓬。

1.2 试验设计

1.2.1 土壤和原油污染处理

将采集到的土壤过筛,除去其中植物根系等杂物,混合均匀,装盆。试验用盆分两种型号,种植芦苇用盆为30 cm×27 cm,每盆装土15 kg,种植盐地碱蓬用盆为20 cm×22 cm,每盆装土6 kg。由于本试验所用原油粘度较大,所以采用将预先准确称重的原油用有机溶剂(石油醚)溶解后再与土样混匀的方法。土样和原油混匀后放置15 d,期间搅拌5次,除去易挥发有机溶剂。原油添加量设置0.5%(5×10³ mg/kg,低污染浓度)和2.0%(20×10³ mg/kg,高污染浓度)^[19] 2个浓度梯度以及1个空白无油对照,原油添加量按干土质量(土壤含水量13.9%)计算。

1.2.2 植物种植和生长指标测定

将含油土样放置15 d达到稳定状态后种植植物,每个石油污染水平(0%、0.5%、2.0%)下分别设

置芦苇、盐地碱蓬2个处理,每个处理4个重复。芦苇的种植选取具有相同芽数的根茎。盐地碱蓬采用种子播种方式(每盆0.5 g),出苗后开始间苗,最后每盆保留30颗。在第30天和第45天时分别测定两种植物幼苗株高、芦苇分蘖数、盐地碱蓬叶片数、分枝数。第30天时测定叶片可溶性蛋白质含量、过氧化氢酶、过氧化物酶活力、丙二醛含量。第50天时测定幼苗叶片叶绿素含量及叶绿素a/b的值。

株高用直尺测量;叶片过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶活性(POD)、蛋白质含量用试剂盒测定(南京建成生物工程研究所生产),其中CAT活性以每毫克组织蛋白每秒钟分解1 μmol的H₂O₂的量为一个活力单位,POD活性以在37℃条件下,每毫克组织蛋白每分钟催化产生1 μg的底物的酶量为一个酶活力单位;丙二醛(MDA)含量用试剂盒测定,以每毫升反应液中MDA的毫摩尔数表示。叶绿素含量用丙酮-乙醇混合液浸提法测定^[20],即用95%乙醇与80%丙酮(1:1)混合液或单独使用其中之一,将叶片完全浸泡到液体中(10 ml),加盖置于暗处24 h以上,当叶色完全变白,用分光光度法分别测量浸提液在波长645 nm和663 nm处的吸光值,计算叶绿素含量及叶绿素a/b值。

2 结果分析

2.1 土壤石油污染对芦苇、盐地碱蓬幼苗形态的影响

在芦苇根茎种植30 d和45 d时,分别测量芦苇幼苗的株高,并对芦苇幼苗分蘖数进行计数。如表1所示,第30天时,芦苇幼苗在高浓度污染条件下的分蘖数显著少于低浓度污染(0.5%)处理组和空白无油对照组中的幼苗分蘖数,说明在芦苇根茎分蘖初期高浓度石油污染限制了芦苇的分蘖。同时,低、高两种浓度污染水平下芦苇幼苗株高都显著低于无污染对照组,分别为对照的67%和66%。但两个浓度处理之间幼苗株高无显著差异。第45天时,两种污染水平下芦苇幼苗分蘖数都和对照没有显著差异,说明随着时间的推移,石油污染对芦苇分蘖的抑制作用减弱。而芦苇幼苗株高差异显著性和第30天时类似,分别为对照的79%和74%,表明低、高两种浓度石油污染都对芦苇幼苗株高有明显的抑制作用,并且这种抑制作用随时间推移有减弱趋势。

表1 不同石油污染处理对芦苇幼苗株高、分蘖数的影响

Table 1 Effect of different petroleum contamination treatments on *Phragmites australis* seedling height and tillering number

试验处理	30 d		45 d	
	株高(cm)	分蘖数	株高(cm)	分蘖数(个)
对照组	15.20±2.944	6.0±0.816	28.81±1.643	8.3±0.957
低污染组	10.24±2.292*	7.0±1.414	22.69±3.439*	8.3±0.957
高污染组	10.06±2.278	5.3±0.957*	21.24±3.497	7.8±1.893

注:表中数据为:平均值±标准差($n=4$),*表示差异显著($p<0.05$)。

不同浓度石油处理对盐地碱蓬株高和叶片数影响显著(表2),并且抑制作用随石油浓度增加而显著增加。第30天时,0.5%和2.0%石油浓度处理下盐地碱蓬株高分别是对照的48%和37%。低、高两种浓度处理下盐地碱蓬叶片数分别是对照的44%和31%。第45天时,低、高两种石油浓度处理的幼苗株高与对照组仍然有极显著差异,分别仅为对照的38%和23%。分枝数分别仅是对照的39%和3.5%,差异达到极显著水平,表明随天数增加石油污染对盐地碱蓬幼苗的抑制作用加大。

2.2 对芦苇、盐地碱蓬幼苗叶片中可溶性蛋白质含量和丙二醛(MDA)含量影响

2.2.1 对幼苗叶片中可溶性蛋白质含量的影响

如图1a所示,芦苇幼苗叶片中可溶性蛋白含量随石油浓度增加没有明显的变化趋势。单因素方差分析显示两种石油污染水平处理条件下芦苇幼

苗叶片中可溶性蛋白质含量和空白对照之间没有显著差异($p>0.05$)。表明芦苇幼苗对两种浓度石油污染有较强的耐受性。盐地碱蓬幼苗叶片中可溶性蛋白质含量随石油浓度的增加先升高后降低,并且各石油浓度处理之间差异显著($p<0.05$)。表明低浓度石油污染可能增加盐地碱蓬叶片中可溶性蛋白质含量,而随着污染程度增加,蛋白含量下降。

2.2.2 对幼苗叶片中丙二醛(MDA)含量的影响

芦苇幼苗叶片中MDA含量随污染程度增加,变化趋势不明显(图1b),MDA含量在2种不同污染浓度处理和对照之间以及两种不同石油浓度处理之间没有显著差异($p>0.05$)。说明2种浓度石油污染对芦苇幼苗生长的胁迫作用不明显。盐地碱蓬幼苗叶片中丙二醛含量随石油浓度增加先降低后升高(图1b),高污染浓度(2.0%)MDA含量迅速增加,说明污染胁迫对盐地碱蓬幼苗生长影响

表2 不同石油污染处理对盐地碱蓬幼苗株高、叶片、分枝数的影响

Table 2 Effect of different petroleum contamination treatments on *Suaeda salsa* seedling height, leaves and branches

试验处理	30 d		45 d	
	株高(cm)	叶片数(片)	株高(cm)	分枝数(个)
对照组	8.11±0.318	21.0±3.741	25.60±0.835	8.5±1.000
低污染组	3.88±0.128**	9.2±0.500**	9.82±0.371**	3.3±0.500**
高污染组	2.89±0.159**	6.5±1.00	5.84±0.343**	0.5±0.577**

注:表中数据为平均值±标准差($n=4$),**表示差异极显著($p=0.01$)。

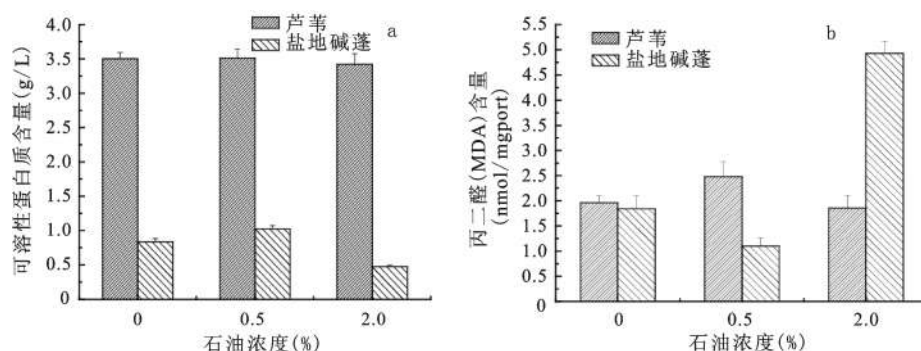


图1 石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗叶片中可溶性蛋白质(a)和丙二醛(MDA)含量(b)的影响

Fig.1 Effect of different petroleum contamination on the soluble protein content (a) and MDA content (b) in *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* seedling leaves

较大,造成丙二醛在植物体内的积累。

2.3 对芦苇、盐地碱蓬幼苗叶片中酶活性的影响

2.3.1 过氧化氢酶(CAT)活力

不同石油污染下过氧化氢酶活力变化如图2a所示,芦苇幼苗叶片中CAT活力在空白和低、高两种石油污染浓度处理下差异不显著($p>0.05$)。表明芦苇幼苗能够较好的适应这两种不同程度的污染胁迫。盐地碱蓬幼苗叶片CAT活力随石油浓度增加而降低,且各浓度处理之间差异显著($p<0.05$)。这可能是由于植株因分解有毒物质而消耗了大量的酶,使得过氧化氢酶活性下降。

2.3.2 过氧化物酶(POD)活力

不同石油污染下过氧化物酶活力变化如图2b所示,随着石油污染浓度增加,芦苇幼苗叶片中过氧化物酶活力有增加趋势,高石油污染浓度(2.0%)下叶片中过氧化物酶活力显著高于低石油污染浓度(0.5%)处理的叶片POD活力($p<0.05$),但2种污染水平下芦苇幼苗叶片过氧化物酶活力都和空白对照中的无显著差异($p>0.05$)。盐地碱蓬叶片中POD活力随石油浓度的增加先下降后升高。石油浓度为0.5%时POD活力达到最低水平,显著($p<0.05$)低于对照和石油浓度为2%的处理。高浓度(2.0%)处理时,盐地碱蓬叶片中POD活力又上升

到和空白对照无显著差异($p>0.05$)的水平。

2.4 对芦苇、盐地碱蓬幼苗叶片中叶绿素含量及叶绿素a/b值的影响

不同浓度石油处理对芦苇叶片叶绿素含量的影响如表3所示,叶绿素a、叶绿素b及叶绿素总量均随石油浓度增加先降低后升高,且低、高两种石油浓度处理均极显著($p<0.01$)低于对照组含量,而两种浓度处理之间差异不显著($p>0.05$)。低、高两种石油浓度处理下叶绿素a含量分别是对照处理含量的60.4%和64.8%,叶绿素b含量分别是对照组的58.3%和63.5%。叶绿素a/b值随石油浓度增加呈现明显的升高趋势。

不同浓度石油处理对盐地碱蓬幼苗叶片叶绿素含量的影响如表4所示,叶绿素a含量在低污染水平(0.5%)处理下和对照无显著差异($p>0.05$),但在高浓度下含量急剧下降,和对照达到极显著差异水平($p<0.01$)。叶绿素b含量随石油浓度增加显著下降,且各处理之间差异达到极显著水平($p<0.01$),低、高两种浓度下叶绿素b含量分别是对照的86.9%和57.1%。叶绿素总量也随石油浓度增加而下降,低、高两种浓度处理显著或极显著低于对照组含量。不同的是盐地碱蓬幼苗叶片中叶绿素a/b值在不同处理之间没有显著差异($p>0.05$)。

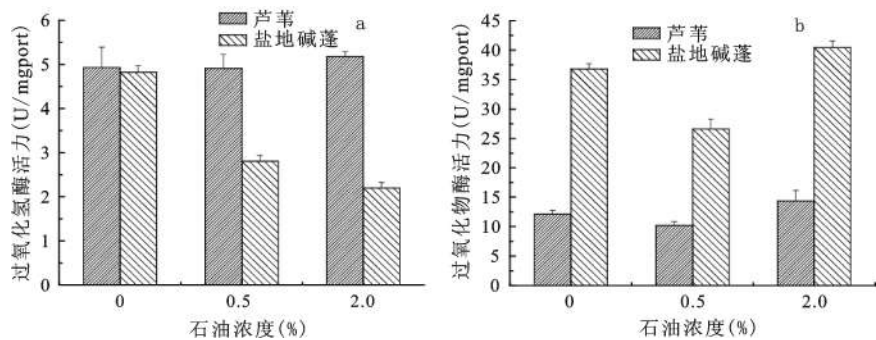


图2 石油污染对芦苇、盐地碱蓬幼苗叶片中过氧化氢酶(CAT)活力(a)和过氧化物酶(POD)活力(b)的影响
Fig.2 Effect of different petroleum contamination on CAT activity (a) and POD activity (b) in seedling leaves of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa*

表3 石油污染对芦苇叶片叶绿素含量的影响(mg/g, 鲜质量)

Table 3 Effect of different petroleum contamination on chlorophyll content (mg/g, fresh weight) in *Phragmites australis* seedling leaves

试验处理	叶绿素总量	叶绿素a	叶绿素b	叶绿素a/b
对照组	4.566±0.609	3.506±0.462	1.061±0.148	3.307±0.053
低污染组	2.760±0.396**	2.141±0.299**	0.619±0.097**	3.466±0.064**
高污染组	2.966±0.568	2.292±0.437	0.674±0.130	3.399±0.025

注:表中数据为平均值±标准差(n=4),*表示差异显著($p<0.05$),**表示差异极显著($p<0.01$)。

表4 石油污染对盐地碱蓬叶片叶绿素含量(mg/g, 鲜质量)的影响

Table 4 Effect of different petroleum contamination on chlorophyll content (mg/g, fresh weight) in *Suaeda salsa* seedling leaves

试验处理	叶绿素总量	叶绿素 a	叶绿素 b	叶绿素 a/b
对照组	0.637±0.027	0.463±0.029	0.175±0.009	2.659±0.241
低污染组	0.586±0.036*	0.434±0.028	0.152±0.008**	2.849±0.471
高污染组	0.362±0.030**	0.262±0.026**	0.100±0.006**	2.705±0.193

注:表中数据为平均值±标准差(n=4),*表示差异显著($p < 0.05$),**表示差异极显著($p < 0.01$)。

3 讨 论

3.1 石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗生长的影响

关于石油污染对芦苇、盐地碱蓬幼苗生长影响的研究尚未见报道,但有研究发现低浓度污染污染物在一定程度上可促进植物生长,而高浓度污染物抑制植物生长^[21~25]。本试验中低浓度石油污染对芦苇和盐地碱蓬幼苗的生长不但没有促进作用,反而显著的抑制幼苗生长,其中对芦苇的抑制作用明显小于对盐地碱蓬的抑制作用。不同浓度石油处理下芦苇分蘖数随时间变化逐渐达到空白对照水平。这与人关于落地原油对芦苇发芽率影响的试验研究结果较为一致^[26]。

3.2 石油污染对叶片中可溶性蛋白质和丙二醛含量的影响

一般植物在受到逆境或污染胁迫时,植物组织中的可溶性蛋白质含量会发生相应的变化,但变化趋势不尽相同。如低浓度的Cd能使烟叶蛋白质含量下降,其后随Cd浓度增加反而上升;但是Pb污染的结果恰恰相反^[25]。盐分胁迫一般会增加植物叶片中可溶性蛋白质含量,植物需要更多的蛋白质参与渗透调节。本研究中盐地碱蓬在低石油浓度下叶片中可溶性蛋白质含量升高可能是对污染胁迫的一种适应,而高石油浓度处理下,蛋白质含量显著下降可能是蛋白质合成系统受到破坏而使含量下降。芦苇幼苗叶片中可溶性蛋白质含量随石油浓度变化无明显变化趋势,说明石油污染对其胁迫作用较小。除了自身生理抗性差异之外,芦苇和盐地碱蓬对石油烃毒性的差异性反应可能是与主导繁殖方式(营养繁殖和种子繁殖)有关。盐地碱蓬的种子小,子叶中贮存的养分很少,幼苗出土后高度依赖于光合作用,所以对污染物胁迫高度敏感;而芦苇主要依赖于地下茎繁殖,幼苗阶段自身储备养分较充足,抵御逆境的能力也较强。

植物组织或器官衰老或遭受逆境胁迫时,往

往发生膜脂过氧化作用。膜脂过氧化作用的产物多种多样,主要包括一些醛类和烃类,其中丙二醛是最常见的主要产物之一。丙二醛产生数量的多少能够代表膜脂过氧化程度,也可以间接反应植物组织的抗氧化能力的强弱。植物在逆境胁迫下,丙二醛含量往往会增加,并随胁迫作用的加大含量升高^[27~29]。盐地碱蓬幼苗在低浓度污染处理下MDA含量最低,这和盐地碱蓬幼苗POD活力变化趋势一致,即POD活力低时,作为膜脂过氧化作用产物的MDA含量就低。而高浓度石油处理下盐地碱蓬叶片内MDA含量急剧增加,污染胁迫的毒害作用加强。

3.3 石油污染对叶片中CAT活力和POD活力的影响

CAT普遍存在于植物组织中,能够保护植物体免受过氧化氢积累的危害,其活性的高低亦可反映植物抗性的强弱,酶活性降低是植物对逆境的一种适应性表现^[30]。许多研究发现植物在受到逆境或污染胁迫时,如:石油、重金属污染、CAT活力随逆境或污染胁迫强度增加会出现不同程度的下降^[21, 31]。本试验中盐地碱蓬幼苗叶片中CAT活力对不同浓度石油污染胁迫反应与大多数研究一致。但芦苇幼苗叶片中CAT活力随石油浓度增加无明显变化,这主要与芦苇对污染胁迫具有耐受性或能够较快速的适应胁迫环境相关。而这种耐受性和敏感性的差异也可能与各自的主导繁殖方式有关,营养繁殖为主的芦苇抵抗逆境的能力要比依赖种子繁殖的盐地碱蓬强。

POD在植株体内具有多种生理功能,对环境变化反应灵敏,其数值大小往往与植物的生长成负相关,其活性的上升是植物对逆境的适应性反应^[32]。研究表明植物在受到污染或逆境胁迫(如石油、重金属污染、盐分胁迫)时,POD会有增加趋势^[27, 31, 33]。本试验研究发现芦苇幼苗在高污染浓度(2.0%)下POD活力显著高于低污染浓度(0.5%)处理,说明高浓度石油污染对芦苇幼苗有一定的毒害作用,植株通过增加酶活性来适应污染胁迫环境。而盐

地碱蓬幼苗叶片POD活力随石油浓度增加先下降后升高,在低浓度污染水平下POD活力显著低于对照处理。这主要是由于低浓度石油污染没有造成盐地碱蓬幼苗体内大量有毒过氧化物的积累,从而使POD活力保持在较低水平。

3.4 石油污染对叶片中叶绿素含量及叶绿素a/b值的影响

当植物受到逆境胁迫时,植物叶片中叶绿素含量会降低,而叶绿素a/b值会升高,不过对于耐性较强的植物来说,叶绿素含量降低以及叶绿素a/b值升高速率比较平稳^[14]。本试验中芦苇幼苗叶片叶绿素含量先下降后升高的变化趋势恰恰反映了芦苇对石油污染胁迫的适应过程,这与秋茄(*Kandelia candel*)幼苗叶片叶绿素含量随着PCBs浓度变化的研究结果相近^[24]。石油污染对盐地碱蓬幼苗叶片叶绿素含量的影响较为复杂,叶绿素a、b、a+b含量随浓度增加只呈现单一的下降趋势,但叶绿素a/b值在各浓度处理之间却没有明显的变化趋势。说明石油污染对盐地碱蓬幼苗生长有一定的胁迫作用,但胁迫作用程度以及植株对胁迫的耐受性和适应性不确定。

从整体上来看,石油烃类污染对盐地碱蓬幼苗的抑制作用要高于芦苇幼苗,也说明在处理石油烃类污染物中芦苇比碱蓬更具有优势,但由于芦苇和盐地碱蓬生长在滨海湿地不同的盐分水平的生境中,二者还不可简单替代。同一些普通非盐生植物相比^[12,15],芦苇和碱蓬在耐受石油烃毒害和降解石油等有机污染物方面表现出的优势不大,但这些植物大都不能适应滨海湿地特殊的生存环境,因此芦苇和盐地碱蓬在修复滨海湿地和高盐区域石油烃类污染物方面具有较广阔的应用前景。

4 结 论

1) 两种不同浓度石油污染对芦苇、盐地碱蓬幼苗株高以及盐地碱蓬叶片和分枝数都有显著的抑制作用,而对芦苇幼苗分蘖数抑制作用较弱,整体上石油污染对芦苇形态指标的抑制作用要弱于对盐地碱蓬的抑制作用。

2) 芦苇幼苗叶片中可溶性蛋白质含量、CAT活性、MDA含量随石油浓度增加无明显变化,而POD活性随石油浓度增加而升高。盐地碱蓬叶片中可溶性蛋白质含量随石油浓度增加先升高后降低,POD活性、MDA含量先降低后升高,而CAT活

性随石油浓度的增加而显著下降。

3) 芦苇幼苗叶片中叶绿素a、叶绿素b及叶绿素总量均随石油浓度增加先降低后升高,叶绿素a/b值随石油浓度增加呈现明显的升高趋势。盐地碱蓬叶片中叶绿素a、叶绿素b含量及叶绿素总量随石油浓度增加显著或极显著下降,而叶绿素a/b值在不同处理之间没有显著差异。

致谢: 本研究得到“中国科学院黄河三角洲滨海湿地生态试验站”的大力支持,感谢夏传海博士对于试验工作的帮助和支持。

参考文献:

- [1] 陶思明. 黄河三角洲湿地生态与石油生产: 保护、冲突和协调发展 [J]. 环境保护, 2000, 6: 26~28.
- [2] 余 萃, 廖先清, 刘子国, 等. 石油污染土壤的微生物修复研究进展 [J]. 湖北农业科技, 2009, 48 (5): 1260~1263.
- [3] 徐东霞, 章光新. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策 [J]. 湿地科学, 2007, 5 (3): 282~288.
- [4] 沈德中. 污染环境生物修复 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2002.
- [5] 李海明, 马 杰, 顾晓明, 等. 渤海滩涂湿地沉积物胶体对石油污染物的吸附特征 [J]. 湿地科学, 2008, 6 (2): 218~222.
- [6] 张海荣, 李培军, 孙铁珩, 等. 四种石油污染土壤生物修复技术研究 [J]. 农业环境保护, 2001, 20 (2): 78~80.
- [7] 陆秀君, 郭书海, 孙 清, 等. 石油污染土壤的修复技术研究现状及展望 [J]. 沈阳农业大学学报, 2003, 34 (1): 63~67.
- [8] 蔺 昕, 李培军, 台培东, 等. 石油污染土壤植物-微生物修复研究进展 [J]. 生态学杂志, 2006, 25 (1): 93~100.
- [9] 詹 研. 中国土壤石油污染的危害及治理对策 [J]. 环境污染与防治, 2008, 30 (3): 91~94.
- [10] Salt D E, Blaylock M, Kumar N P B A, et al. Phytoremediation - a novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants [J]. Bio-Technology, 1995, 13 (5): 468~474.
- [11] 宋晓林, 吕宪国. 中国退化河口湿地生态恢复研究进展 [J]. 湿地科学, 2009, 7 (4): 379~384.
- [12] Wang Y X, Oyaizu H. Evaluation of the phytoremediation potential of four plant species for dibenzofuran-contaminated soil [J]. Journal of Hazardous Materials, 2009, 168 (2-3): 760~764.
- [13] Lin Q X, Mendelssohn I A, Suidan M T, et al. The dose-response relationship between No. 2 fuel oil and the growth of the salt marsh grass, *Spartina alterniflora* [J]. Marine Pollution Bulletin, 2002, 44 (9): 897~902.
- [14] Huang X D, El-Alawi Y, Penrose D M, et al. Responses of three grass species to creosote during phytoremediation [J]. Environmental Pollution, 2004, 130 (3): 453~463.
- [15] Kaimi E, Mukaidani T, Miyoshi S, et al. Ryegrass enhancement of biodegradation in diesel-contaminated soil [J]. Environmental and Experimental Botany, 2006, 55 (1-2): 110~119.

- [16] Tang J C, Wang R G, Niu X W, et al. Enhancement of soil petroleum remediation by using a combination of ryegrass (*Lolium perenne*) and different microorganisms [J]. *Soil & Tillage Research*, 2010, **110** (1): 87-93.
- [17] Palmroth M R T, Pichtel J, Puhakka J A. Phytoremediation of subarctic soil contaminated with diesel fuel [J]. *Bioresource Technology*, 2002, **84** (3): 221-228.
- [18] 徐崇彦, 刘宪斌, 刘占广, 等. 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.
- [19] Zhang Z N, Zhou Q X, Peng S W, et al. Remediation of petroleum contaminated soils by joint action of *Pharbitis nil* L. and its microbial community [J]. *Science of the Total Environment*, 2010, **408** (22): 5600-5605.
- [20] 张宪政. 植物叶绿素含量测定—丙酮乙醇混合液法 [J]. *辽宁农业科学*, 1986, (3): 26-28.
- [21] 王雪峰, 陈桂珠, 徐夏玲. 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.
- [22] 李 玫, 陈桂珠. 含油废水对秋茄幼苗的几个生理生态指标的影响 [J]. *生态学报*, 2000, **20** (3): 528-532.
- [23] Lin Q X, Mendelssohn I A. Potential of restoration and phytoremediation with *Juncus roemerianus* for diesel-contaminated coastal wetlands [J]. *Ecological Engineering*, 2009, **35** (1): 85-91.
- [24] 刘亚云, 孙红斌, 陈桂珠, 等. 秋茄(*Kandelia candel*)幼苗对多氯联苯污染的生理生态响应 [J]. *生态学报*, 2007, **27** (2): 746-754.
- [25] 李秀珍, 李 彬. 重金属对植物生长发育及品质的影响 [J]. *安徽农业科学*, 2008, **36** (14): 5742-5746.
- [26] 籍国东, 孙铁珩, 隋 欣, 等. 落地原油对芦苇湿地生态工程净化系统影响 [J]. *生态学报*, 2002, **22** (5): 649-654.
- [27] 王学征, 韩文灏, 于广建. 盐分胁迫对番茄幼苗生理生化指标影响的研究 [J]. *北方园艺*, 2004, (3): 48-49.
- [28] 肖 强, 郑海雷, 陈 瑶, 等. 盐度对互花米草生长及脯氨酸、可溶性糖和蛋白质含量的影响 [J]. *生态学杂志*, 2005, **24** (4): 373-376.
- [29] 陈明林, 王友保. 水分胁迫下外来种铜锤草和本地种酢浆草的生理指标比较研究 [J]. *草业科学*, 2008, **17** (6): 52-59.
- [30] 刘祖祺, 张石诚. 植物抗性生理学 [M]. 北京: 中国农业出版社, 1994.
- [31] 张凤琴, 王友绍, 董俊德, 等. 重金属污水对木榄幼苗几种保护酶及膜脂质过氧化作用的影响 [J]. *热带海洋学报*, 2006, **25** (2): 66-70.
- [32] 吴家燕, 夏增禄, 巴 音, 等. 土壤重金属污染的酶学诊断——紫色土中的的镉、铜、铅、砷对水稻根系过氧化物酶的影响 [J]. *环境科学学报*, 1990, **10** (1): 73-77.
- [33] 郑福丽, 江丽华, 刘兆辉, 等. 石油污染物对油菜产量及生理指标的影响 [J]. *中国农学通报*, 2009, **25** (19): 279-282.

Simulative Study on Effects of Petroleum Contamination on Seedling Growth of *Phragmites australis* and *Suaeda salsa* in Coastal Wetland of Yellow River Delta

YU Jun-bao¹, KAN Xing-yan^{1,2}, WANG Xue-hong^{1,2}, HAN Guang-xuan¹,
GUAN Bo¹, XIE Wen-jun³, LIN Qian-xin⁴

(1. Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Shandong Provincial Key Laboratory of Coastal Zone Environmental Processes, Yantai Institute of Coastal Zone Research, Chinese Academy of Sciences, Yantai, Shandong 264003, P. R. China; 2. Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3. Shandong Provincial Key Laboratory of Ecology and Environment of Yellow River Delta, Binzhou University, Binzhou 256603, China; 4. Department of Oceanography and Coastal Sciences, Louisiana State University, Baton Rouge, LA 70803, USA)

Abstract: The Yellow River Delta is a typical and representative coastal wetland in China. As the Shengli Oil Field, which is the second largest oil field in China, locates in the region, the crude oil contamination has become a key reason which causes deterioration of coastal wetland ecological system in this area. A simulative study was conducted to explain the effects of different concentration of petroleum (0.5%、2.0%) contaminated

wetland soils on growth of reed (*Phragmites australis*) and seepweed (*Suaeda salsa*) seedling in the greenhouse. The soil samples without oil pollution were collected in coastal wetlands in the Yellow River Delta of soils in May 2010. The soil oil pollution levels was controlled by three oil concentration (0%, 0.5%, 2.0%) in the simulative experiment in greenhouse, four replicates for each treatment. The crude oil in experiments collected from the Shengli Oil Field production wells. The typical representative plants of reed and seepweed in coastal wetlands in the Yellow River Delta were cultivated in the different soil treatments, respectively. The reed was planted with root with same buds and the seepweed seed was sowed (0.5 g per pot). During experiment period, the seedling height of both reed and seepweed, tillering number of reed, leaf number and branch number of seepweed were recorded. The soluble protein content, Catalase activity (CAT) activities, peroxidase activity (POD) activities, malondialdehyde (MDA) content, Chlorophyll (Chl) content of seedling leaves were determined, then the ratio of chl-a/ chl-b was calculated. The results showed that, with increasing petroleum concentration, the inhibitory effects of petroleum for plant height of reed and seepweed were increased. The inhibitory effects of petroleum contamination on reed tillering number were weakened with time, while that functions on seepweed branch number were strengthened. With increasing oil concentration in soils, the soluble protein content in seedling leaves of seepweed was decline after increase, while the opposite regulars were observed for MDA content and POD activities, and the CAT activities was decreased obviously. Compared to seepweed seedling, the reed seedling appeared high oil contamination tolerance. The Chl content in reed seedling leaves shows a trend of increase after decline with time under different condition of oil contamination. In generally, the inhibitory effects of soil oil contamination for seepweed seedling were higher than that for reed seedling. It indicated that the reed was much more suitable for restoration of oil contaminated soil than seepweed. Our results suggested that both reed and seepweed with high salt-tolerance properties could be extensively applied in soil restoration of oil contamination regions in the coastal wetland of Yellow River Delta.

Key words: wetland of Yellow River Delta; petroleum contamination; *Phragmites australis*; *Suaeda salsa*; simulative study