

焦德志,曹 瑞,姜秋旭,等. 石油污染对芦苇幼苗生长及生理特性的影响[J]. 江苏农业科学,2019,47(7):239-242.  
doi:10.15889/j.issn.1002-1302.2019.07.057

# 石油污染对芦苇幼苗生长及生理特性的影响

焦德志,曹 瑞,姜秋旭,闫秋月

(齐齐哈尔大学生命科学与农林学院,黑龙江齐齐哈尔 161006)

**摘要:**为了解石油污染对芦苇(*Phragmites australis*)幼苗株高以及生理生化指标的影响,以扎龙湿地芦苇为研究材料,采用盆栽方法,混入不同质量分数的石油(0、3、6、12 g/kg),统计芦苇幼苗株高生长状况,研究叶片可溶性蛋白、脯氨酸、可溶性糖、丙二醛、叶绿素含量指标的变化,以期对扎龙湿地面临石油污染的评估提供一定理论依据。结果表明,随着石油质量分数的增高,芦苇幼苗高度的受抑制程度增大,随着污染时间的延长,处理组受到的抑制作用加强。随着石油污染时间的延长,出苗后 47 d 时,芦苇叶片可溶性蛋白和叶绿素含量降低,脯氨酸、丙二醛含量升高。由研究结果可知,石油污染会破坏芦苇的渗透势调节系统,加剧质膜过氧化程度,影响叶绿素的合成,同时也说明芦苇对不同程度的石油污染具有一定的耐受能力。

**关键词:**扎龙湿地;芦苇;石油污染;生理指标

**中图分类号:**S564+.201;X171.4

**文献标志码:**A

**文章编号:**1002-1302(2019)07-0239-04

如今,石油已经成为人类最主要的能源之一,它的重要性随着全球对能源的需求的增加而不断增长。然而在石油开采、炼制、贮运和使用过程中,大量石油的泄露会造成环境退化<sup>[1]</sup>。石油污染不仅对陆地生态系统的组成、结构、功能和服务产生较大影响,而且石油污染物能够通过食物链进入人体,构成对人类健康的威胁,石油中的多环芳烃和苯系物具有致癌、致突变、致畸变等毒性,具有较大的社会危害<sup>[2]</sup>。

收稿日期:2017-12-05

基金项目:国家自然科学基金(编号:31472134,31672471);齐齐哈尔大学研究生创新项目(编号:YJSCX2016-012X)。

作者简介:焦德志(1970—),男,黑龙江克山人,博士,教授,硕士生导师,主要从事植物生态学研究。E-mail:jdz\_13909@163.com。

对柑橘图像进行背景分割,分割采用 OTSU 自动化阈值分割,通过分析和试验验证,利用 V 分量图结合形态学处理的方法能有效地提取柑橘缺陷部分。

运用检测圆形度的方法来区分柑橘的果梗与缺陷,只涉及 1 个参量,计算较为简便,同时区分效果较好;根据缺陷总像素与柑橘总像素的比值来判断表面完好的柑橘准确率为 100%,判断表面有缺陷的柑橘准确率为 92%,该方法具有较高的准确率,能有效地识别柑橘表面的缺陷。

## 参考文献:

- [1] 应义斌,饶秀勤,赵 匀,等. 机器视觉技术在农产品品质自动识别中的应用(I)[J]. 农业工程学报,2000,16(1):103-108.
- [2] Leemans V, Magein H, Destain M F. Defects segmentation on 'Golden Delicious' apples by using colour machine vision[J]. Computers and Electronics in Agriculture,1998,20(2):117-130.
- [3] Whitelock D P,Brusewitz G H,Stone M L. Apple shape and rolling orientation[J]. Applied Engineering in Agriculture,2006,22(1):87-94.
- [4] Blasco J, Aleixos N, Molto E. Computer vision detection of peel

defects in citrus by means of a region oriented segmentation algorithm[J]. Journal of Food Engineering,2007,81(3):535-543.

[5] 应义斌. 机器视觉技术在黄花梨尺寸和果面缺陷检测中的应用[J]. 农业工程学报,1999(1):197.

[6] 冯 斌,汪懋华. 计算机视觉技术识别水果缺陷的一种新方法[J]. 中国农业大学学报,2002,7(4):73-76.

[7] 朱伟华,曹其新. 基于模糊彩色聚类方法的西红柿缺陷分割研究[J]. 农业工程学报,2003,19(3):133-136.

[8] 赵杰文,刘少鹏,邹小波,等. 基于支持向量机的缺陷红枣机器视觉识别[J]. 农业机械学报,2008(3):113-115,147.

[9] 刘 静,黄勇平,章程辉. 视觉系统开发模块在芒果果面缺陷检测中的应用[J]. 食品与机械,2009,25(2):82-85.

[10] 李江波,饶秀勤,应义斌. 基于照度-反射模型的脐橙表面缺陷检测[J]. 农业工程学报,2011,27(7):338-342.

[11] 冯 斌. 计算机视觉信息处理方法与水果分级检测技术研究[D]. 北京:中国农业大学,2002.

[12] 朱 伟,赵春光,欧乐庆,等. OpenCV 图像处理编程实例[M]. 北京:电子工业出版社,2016.

[13] 陈兵旗,孙 明. 实用数字图像处理与分析[M]. 北京:中国农业大学出版社,2007.

地的 2/3 区域边界与大庆油田采油井和油田化工企业相邻<sup>[7]</sup>,石油开采和运输过程中泄露和排放的污染物等都会造成严重的石油污染,因此,扎龙湿地也将面临石油污染的严重威胁。芦苇在保护区中既可形成大面积优势种群落,也可形成亚优势种或者共生种群落,在维持湿地生态系统的结构和稳定上发挥着重要的作用。以扎龙湿地芦苇为研究对象,通过盆栽的方法模拟研究不同浓度石油处理芦苇的生长和生理变化,不仅有助于完善环境污染生态效应的理论和方法体系,更加有助于准确地评价石油污染对扎龙湿地所造成的潜在生态风险,为大庆油田石油开采过程中的污染控制与生态环境管理提供参考<sup>[8-9]</sup>,为扎龙湿地的科学管理及其生物修复提供一定的理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用石油为产自大庆油田的原油,芦苇幼苗及其原位土壤于 2017 年 6 月 20 日在扎龙湿地保护区核心区(124°9'1"E,47°17'18"N)采集。

1.2 试验设计

1.2.1 模拟石油污染 试验采取混油法,设置 4 个石油质量分数:0 g/kg (CK),3 g/kg (T<sub>1</sub>),6 g/kg (T<sub>2</sub>),12 g/kg (T<sub>3</sub>)。处理方法:2017 年 6 月 29 日将采集的土壤过 2 mm 筛,分别取上述浓度梯度所需石油于烧杯中,用适量石油醚溶解石油后与土壤进行搅拌、混匀,装入直径为 30 cm 的桶,土质量为 16.5 kg,加入 1 000 mL 水后,置于齐齐哈尔大学生命科学楼下阳光充足处 24 h,使其达到吸附平衡。每盆种植芦苇根茎

5 条,每个处理组设置 3 次重复。待根茎萌发出苗后 20、29、38、47 d,分别测量芦苇幼苗高度,在 20、47 d 时测定芦苇相同叶位叶片的生理指标。

1.2.2 测定方法 芦苇株高测定采用直接测量法;叶绿素质量分数测定采用乙醇浸泡法;脯氨酸质量分数测定采用酸性茚三酮法;丙二醛(MDA)浓度测定采用硫代巴比妥酸法;可溶性糖浓度测定采用蒽酮法;可溶性蛋白质质量分数测定采取考马斯亮蓝法。

1.2.3 数据处理 数据结果用 GraphPad Prism 6.0 和 SPSS 20.0 进行统计分析,各处理的比较采用最小显著差数法,在  $\alpha=0.05$  水平上比较差异的显著性。

2 结果与分析

2.1 土壤石油污染对芦苇幼苗株高的影响

由表 1 可知,芦苇根茎出苗后 20、29、38、47 d,不同浓度石油处理下的芦苇幼苗株高均显著低于对照组。出苗后 20 d,与对照组相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 组的芦苇株高分别降低了 7.08%、11.25%、59.17%;出苗后 29 d,与对照组相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 组的芦苇株高分别降低了 7.92%、15.57%、48.81%;出苗后 38 d,与对照组相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 组的芦苇株高分别降低了 8.19%、17.86%、46.64%;出苗后 47 d,与对照组相比,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub> 组的芦苇株高分别降低了 9.34%、18.86%、47.07%。表明随着石油浓度增加,对芦苇株高的抑制作用越强,当处理时间延长后,T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub> 组受到的抑制作用加强,T<sub>3</sub> 组受到的抑制作用减小。

表 1 不同质量分数石油污染不同出苗时间对芦苇幼苗株高的影响

处理组	株高 (cm)			
	20 d	29 d	38 d	47 d
CK	24.0 ± 0.7aD	37.9 ± 0.7aC	47.6 ± 0.4aB	54.6 ± 0.8aA
T <sub>1</sub>	22.3 ± 0.3bD	34.9 ± 0.6bC	43.7 ± 0.8bB	49.5 ± 0.6bA
T <sub>2</sub>	21.3 ± 1.4cD	32.0 ± 0.9cC	39.1 ± 1.3cB	44.3 ± 0.5cA
T <sub>3</sub>	9.8 ± 0.5dD	19.4 ± 0.9dC	25.4 ± 1.4dB	28.9 ± 0.5dA

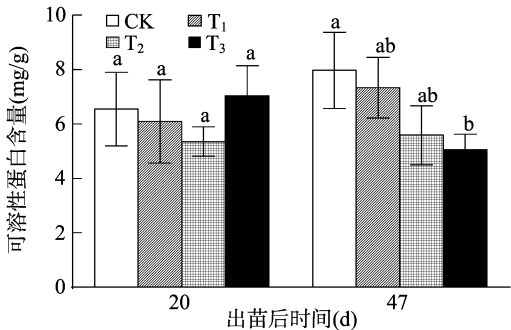
注:同列数据后不同小写字母表示不同处理浓度之间差异显著( $P<0.05$ );不同大写字母表示不同处理时间之间差异显著( $P<0.05$ )。

2.2 土壤石油污染对芦苇叶片可溶性蛋白含量的影响

如图 1 所示,不同质量分数石油处理后,出苗后 20 d 时,各处理组之间无显著差异。出苗后 47 d 时,对照的可溶性蛋白含量最高,石油处理 T<sub>1</sub>、处理 T<sub>2</sub>、处理 T<sub>3</sub> 与对照相比,芦苇叶片可溶性蛋白含量分别下降了 8%、30%、36%,其中处理 T<sub>3</sub> 芦苇叶片可溶性蛋白含量显著低于对照( $P<0.05$ );出苗后 47 d 时,对照、处理 T<sub>1</sub>、处理 T<sub>2</sub> 的可溶性蛋白含量与 20 d 相比均有一定增加,而处理 T<sub>3</sub> 含量下降。由此表明,在石油污染 20 d 时,芦苇中的可溶性蛋白可能还没有起到调节作用,各处理组可溶性蛋白含量与对照相比均没有显著变化。随着处理时间延长,芦苇可溶性蛋白含量不但没有增加,反而显著低于同期对照组。

2.3 土壤石油污染对芦苇叶片可溶性糖浓度的影响

如图 2 所示,不同质量分数石油处理后,出苗后 20 d 时,芦苇叶片可溶性糖含量随着石油质量分数的增加呈先升高后降低的趋势,3 个处理与对照相比分别上升了 10.10%、48.42%、34.01%。出苗后 47 d 时,3 个处理的可溶性糖含量均显著高于对照且随着石油含量的增大,呈现先上升后降低



不同小写字母表示相同处理时间下,不同处理浓度之间有显著性差异( $P<0.05$ )。下同

图1 不同浓度石油处理对芦苇叶片可溶性蛋白含量的影响

的趋势,其中 T<sub>2</sub> 处理可溶性糖含量最高,与对照相比上升了 86.12%。石油污染会导致芦苇可溶性糖含量上升,随着石油质量分数的增大,可溶性糖含量增加,但当石油质量分数超过 6 g/kg 时,芦苇叶片可溶性糖合成受阻,这可能是由于石油对芦苇细胞的胁迫程度超过了可溶性糖调节的阈值,使其无法发挥调节作用。

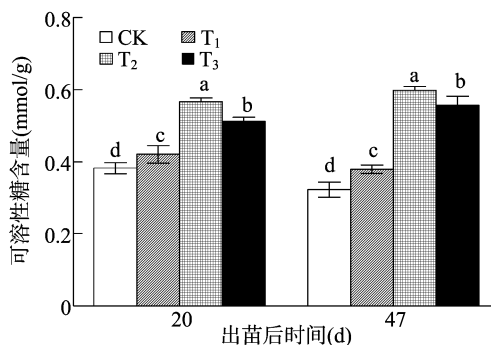


图2 不同浓度石油处理对芦苇叶片可溶性糖含量的影响

#### 2.4 土壤石油污染对芦苇叶片脯氨酸含量的影响

由图 3 可见,出苗后 20 d 时,随着石油质量分数的增加,芦苇叶片脯氨酸含量呈上升趋势,3 个处理与对照相比分别上升了 44%、38%、49%,其中处理 T<sub>3</sub> 脯氨酸含量最高,处理 T<sub>1</sub> 与处理 T<sub>2</sub> 之间没有显著差异。出苗后 47 d 时,3 个石油处理脯氨酸含量相比于对照分别上升了 41%、42%、56%。随着处理时间的增加,各组脯氨酸含量均有上升。说明石油污染会导致芦苇叶片脯氨酸积累,随着石油质量分数的升高,芦苇脯氨酸的积累量逐渐增多。

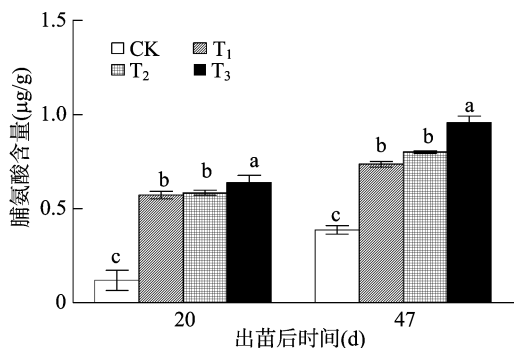


图3 不同浓度石油处理对芦苇叶片脯氨酸含量的影响

#### 2.5 土壤石油污染对芦苇叶片丙二醛含量的影响

植物丙二醛的含量可以作为反映植物受到逆境胁迫伤害程度的重要指标之一。由图 4 可知,出苗后 20 d 时,3 个处理的 MDA 含量随着石油质量分数的升高均呈上升趋势,与对照相比分别上升了 15.07%、18.79%、41.78%。其中处理 T<sub>1</sub>、处理 T<sub>2</sub> 之间没有显著差异,而处理 T<sub>3</sub> 的 MDA 含量显著高于其他 3 个处理( $P < 0.05$ )。在出苗后 47 d 时,3 个处理的 MDA 含量依旧高于对照,分别上升了 6.47%、9.95%、31.28%。相比于出苗后 20 d 时,对照的 MDA 含量上升,处理 T<sub>1</sub>、处理 T<sub>2</sub>、处理 T<sub>3</sub> 的 MDA 含量下降。说明石油污染能加剧芦苇膜脂过氧化,导致 MDA 积累,但在污染后期由于芦苇多个调节机制的响应,使 MDA 积累速度减缓。

#### 2.6 土壤石油污染对芦苇叶片叶绿素含量的影响

叶绿素含量的多少能表现植物光合作用的水平,可以作为逆境下植物受害程度的评判指标之一。经统计分析和多重比较可知,在出苗后 20 d 时,处理 T<sub>3</sub> 的叶绿素含量显著高于其他 3 个处理( $P < 0.05$ ),对照、处理 T<sub>1</sub>、处理 T<sub>2</sub> 之间没有显著差异。在出苗后 47 d 时,3 个处理的叶绿素含量显著低于对照( $P < 0.05$ ),分别下降了 12%、47%、55%,处理 T<sub>2</sub> 和处理 T<sub>3</sub> 之间没有显著差异(图 5)。说明在短时间污染下,芦苇

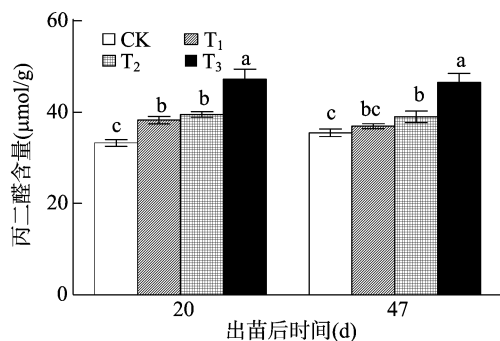


图4 不同浓度石油处理对芦苇叶片丙二醛含量的影响

可通过自身的补偿效应增加叶绿素的合成,抵抗石油危害。当延长处理时间后,芦苇自身的补偿效应无法起到调节作用,导致芦苇叶绿素合成受损,引起叶绿素含量下降。

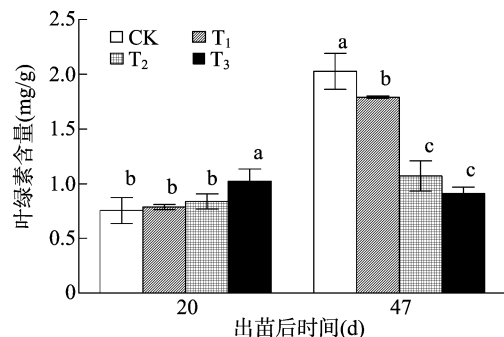


图5 不同浓度石油处理对芦苇叶片叶绿素含量的影响

### 3 讨论

石油的成分较为复杂,其中烷烃最易被植物吸收并会在植物体内造成直接伤害<sup>[10-11]</sup>。树脂和沥青质会黏附在植物根部,阻碍根系的吸收和呼吸功能。石油污染还会导致土壤空隙被堵塞,降低了土壤的透水、透气性,还会使土壤板结,阻碍植物的生长<sup>[12]</sup>。

株高能直观表现植物长势的好坏。有研究发现,石油污染会影响植物根系在土壤中吸收营养,或引起芦苇生理脱水,抑制细胞代谢活动<sup>[13]</sup>。也有研究表明,石油污染会导致盐角草、盐地碱蓬等植物的株高降低,石油浓度过高时,甚至能使植物叶片枯黄,最终使植物死亡<sup>[14]</sup>。本研究发现,随着石油含量的升高,对芦苇生长抑制作用增强,而随着污染时间的延长抑制作用略有减弱。这说明石油污染能阻碍芦苇生长发育,但芦苇可以适应并减缓石油污染带来的伤害。

可溶性糖、可溶性蛋白、脯氨酸在植物渗透势调节过程中起到重要作用,是植物在逆境条件下保持自身水分平衡和正常生理生化反应的重要机制之一<sup>[15]</sup>,能有效抵御活性氧对细胞的伤害,但当胁迫程度超过植物的承受能力时,会导致其含量下降<sup>[16-18]</sup>。石油污染植物也会产生上述低温、盐碱、干旱胁迫的结果<sup>[19-20]</sup>,说明石油污染能引起植物生理干旱,促使植物启动渗透势调节机制缓解胁迫<sup>[21]</sup>。本试验结果表明,芦苇脯氨酸在石油污染下显著比对照高,且随着污染时间的增加脯氨酸含量逐渐升高,说明脯氨酸在缓解芦苇石油胁迫方面起到了重要作用;可溶性蛋白质量分数在石油污染前期无显著差异,当污染时间延长后,处理组含量均显著低于对照,

说明可溶性蛋白在芦苇受到石油胁迫前期,可能由于胁迫程度较低而未能起到调节渗透势的作用,但随着污染时间的增加,芦苇反而大量消耗可溶性蛋白,使各处理组含量均低于对照,这可能是由于石油污染已经破坏了芦苇渗透势调节系统,阻碍了可溶性蛋白的合成;可溶性糖含量呈先上升后下降的趋势,说明芦苇在低浓度石油污染下能大量合成可溶性糖,超过可溶性糖的调控阈值后,会导致其含量降低。

丙二醛作为细胞膜脂过氧化产物之一,可以评判植物受到胁迫的程度。有研究发现,玉米在受到石油污染时会导致叶片 MDA 含量升高<sup>[22]</sup>,也有相关研究表明,石油中烷烃、芳香烃等有毒物质会引起植物中毒反应,导致活性氧代谢紊乱而大量积累超过植物所能承受的阈值,最终导致对细胞膜产生损伤<sup>[23]</sup>。本试验结果显示,随着石油质量分数的升高,芦苇叶片丙二醛含量逐渐增加,说明石油污染损伤了芦苇细胞膜,破坏了细胞结构。

叶绿素是植物进行光合作用的必备物质,叶绿素的含量与植物的光合作用强度息息相关。有研究表明,石油中的大量有毒物质,例如多环芳香烃、烷烃等会引起植物体内  $H_2O_2$ 、 $O_2 \cdot$  等活性氧大量积累,对细胞膜系统产生破坏,导致叶绿体被破坏,叶绿素分解<sup>[24]</sup>。本试验结果显示,在出苗后 20 d 时,处理  $T_3$  芦苇叶绿素含量显著高于对照,处理  $T_1$ 、处理  $T_2$  与对照相比无显著差异。随着污染时间的延长,3 个处理的叶绿素含量均显著低于对照,呈下降趋势。说明在污染前期,可能因为芦苇幼苗还在生长旺期,石油未能对芦苇幼苗叶绿素合成产生影响,随着污染时间的延长,芦苇幼苗叶片叶绿素合成系统受到了破坏,致使叶绿素分解,含量下降。

综上所述,石油污染对芦苇的生理生化响应影响重大,石油污染可以破坏芦苇的细胞膜结构以及光合色素合成,影响芦苇的正常生长发育,但芦苇可通过渗透势调节等机制抵御石油污染带来的伤害,保持存活状态,说明芦苇具有很好的抗逆性。因此,芦苇抗逆的分子调控机制和相关信号通路还需要进一步研究。

#### 4 结论

向土壤中添加不同质量分数的石油会对芦苇生长产生抑制作用,并且随着石油质量分数的升高,抑制作用不断增强。但随着污染时间的延长,处理组受到的抑制作用加强。

不同石油质量分数会影响芦苇叶片中渗透势调节物质的含量。可溶性糖含量随着石油浓度升高呈先上升后下降的趋势;可溶性蛋白含量在污染前期无明显变化,污染时间为 47 d 时,随着石油质量分数的升高而下降;脯氨酸含量在出苗后 20、47 d 均随着石油质量分数的升高而上升。

石油污染会加剧芦苇叶片细胞膜脂过氧化程度,芦苇叶片丙二醛含量随着石油质量分数的升高而升高。

在石油污染处理芦苇出苗后 20 d 时,芦苇叶绿素含量变化不明显。但在出苗后 47 d 时,随着石油质量分数的增加,叶绿素含量呈下降趋势。

#### 参考文献:

[1] Abousnina R M, Manalo A, Shiau J, et al. Effects of light crude oil contamination on the physical and mechanical properties of fine sand

[J]. Soil & Sediment Contamination, 2015, 24(8): 833–845.

[2] Zamani J, Hajabbasi M A, Alaie E A, et al. The effect of Piriformospora indica on the root development of maize (*Zea mays* L.) and remediation of petroleum contaminated soil [J]. International Journal of Phytoremediation, 2016, 18(3): 278–287.

[3] 马强, 张旭红, 林爱军, 等. 土壤石油烃污染的植物毒性及植物-微生物联合降解[J]. 环境工程学报, 2009, 3(3): 544–548.

[4] 彭昆国, 杨丽珍, 荣亮, 等. 土壤石油污染对植物种子萌发和幼苗生长的响应[J]. 环境污染与防治, 2012, 34(7): 19–23.

[5] 王月明, 李红梅, 董建恩, 等. 石油污染物对小白菜生物量、生理指标的影响[J]. 山东农业科学, 2008(6): 78–80.

[6] 岳冰冰, 李鑫, 任芳菲, 等. 石油污染对紫花苜蓿部分生理指标的影响[J]. 草业科学, 2011, 28(2): 236–240.

[7] 王秋菊. 扎龙湿地多介质环境中多环芳烃的残留规律研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学, 2012: 7–8.

[8] 殷志强, 秦小光, 刘嘉麒, 等. 扎龙湿地的形成背景及其生态环境意义[J]. 地理科学进展, 2006, 25(3): 32–38, 138–139.

[9] 沃晓棠, 孙彦坤. 扎龙湿地土地利用与土地覆盖变化分析[J]. 东北农业大学学报, 2010, 41(1): 56–60.

[10] 李小利, 刘国彬, 薛蕙, 等. 土壤石油污染对植物苗期生长和土壤呼吸的影响[J]. 水土保持学报, 2007, 21(3): 95–98, 127.

[11] 马秋莎, 刘硕, 王继富, 等. 石油污染湿地中链烷烃的微生物降解研究进展[J]. 湿地科学, 2014, 12(2): 243–250.

[12] 魏准, 田应兵, 杜显元, 等. 石油污染对土壤物理性质的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版), 2016, 13(9): 59–62.

[13] Odjegba V J, Sadiq A O. Effects of spent engine oil on the growth parameters, chlorophyll and protein levels of *Amaranthus hybridus* L [J]. The Environmentalist, 2002, 22(1): 23–28.

[14] 黄建, 田长彦, 卞卫国, 等. 4 种盐生植物生长对土壤石油污染的响应[J]. 干旱区研究, 2014, 31(1): 100–104.

[15] 彭立新, 李德全, 束怀瑞. 植物在渗透胁迫下的渗透调节作用[J]. 天津农业科学, 2002, 8(1): 40–43.

[16] 成铁龙, 李焕勇, 武海雯, 等. 盐胁迫下 4 种耐盐植物渗透调节物质积累的比较[J]. 林业科学研究, 2015, 28(6): 826–832.

[17] 邓凤飞, 杨双龙, 龚明. 渗透胁迫对小桐子幼苗脯氨酸积累及其代谢途径的影响[J]. 西部林业科学, 2016, 1(1): 31–36.

[18] 李文明, 魏一粟, 钱燕萍, 等. 5 种酢浆草属植物对低温胁迫的生理响应及抗寒性评价[J]. 东北林业大学学报, 2017, 7(7): 28–33.

[19] 何洁, 贺鑫, 高钰婷, 等. 石油对翅碱蓬生长及生理特性的影响[J]. 农业环境科学学报, 30(4): 650–655.

[20] 雒晓芳, 陈丽华, 王冬梅, 等. 不同石油浓度对两种作物生理生化影响[J]. 生物技术通报, 2016, 32(10): 135–140.

[21] Wojtera – Kwiczor J, Zukowska W, Graj W A, et al. Rhizoremediation of diesel – contaminated soil with two rapeseed varieties and petroleum degraders reveals different responses of the plant defense mechanisms [J]. International Journal of Phytoremediation, 2014, 16(7/8): 770–789.

[22] 弓晓峰, 荣亮, 杨丽珍, 等. 石油污染土壤对玉米生长的影响及其生态毒性研究[J]. 环境科学与技术, 2011, 34(10): 71–75.

[23] 薛鑫, 张芊, 吴金霞. 植物体内活性氧的研究及其在植物抗逆方面的应用[J]. 生物技术通报, 2013(10): 6–11.

[24] 李文婉, 李小利, 张晓, 等. 甜高粱/紫花苜蓿对石油污染土壤的光合适应性研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2015, 45(3): 327–333.