

石油污染胁迫下碱蓬 (*Suaeda glauca*) 和翅碱蓬 (*Suaeda salsa*) 萌发生长的响应特征*

马艺文^{1,2} 齐月² 李俊生^{2**} 付刚^{2,3} 赵彩云² 朱金方² 夏江宝⁴

¹中国人民大学环境学院 北京 100872

²中国环境科学研究院 北京 100012

³北京师范大学水科学研究院 北京 100875

⁴滨州学院黄河三角洲生态环境重点实验室 滨州 256600

摘要 为了解石油污染对黄河三角洲滨海湿地翅碱蓬和碱蓬萌发生长的影响, 通过盆栽控制实验, 研究5个浓度梯度 (0、2 500、5 000、7 500、10 000 mg/kg) 石油污染下2种碱蓬萌发和幼苗生长的响应特征. 结果显示: (1) 不同浓度石油污染对2种碱蓬种子萌发率、萌发势的影响不显著 ($P > 0.05$), 但均显著缩短了2种碱蓬的种子平均萌发时间, 提高了种子的萌发指数 (翅碱蓬 $P < 0.05$; 碱蓬 $P < 0.01$); (2) 在石油浓度为10 000 mg/kg条件下2种碱蓬的发芽势差异极显著 ($P < 0.01$), 而其他浓度梯度条件下各项萌发指标的种间差异不显著 ($P > 0.05$); (3) 石油污染胁迫对2种碱蓬的株高、叶片数和子叶长皆有显著抑制作用, 石油浓度梯度越高、植物生长时间越长, 这种抑制作用越明显, 且石油污染胁迫对翅碱蓬的抑制程度高于碱蓬. 本研究表明10 000 mg/kg浓度梯度下的石油污染可促进2种碱蓬种子的萌发, 显著抑制2种碱蓬幼苗的生长; 结果可为滨海盐碱地油田石油污染土壤的植物修复提供参考依据. (图7 表2 参47)

关键词 石油污染胁迫; 碱蓬; 翅碱蓬; 种子萌发; 幼苗生长

CLC Q143

Effects of petroleum pollution on germination and seedling growth: *Suaeda salsa* vs. *Suaeda glauca**

MA Yiwen^{1,2}, QI Yue², LI Junsheng^{2**}, FU Gang^{2,3}, ZHAO Caiyun², ZHU Jinfang² & XIA Jiangbao⁴

¹ School of Environment & Natural Resources, Renmin University of China, Beijing, 100872, China

² Chinese Research Academy of Environmental Sciences, Beijing, 100012, China

³ College of Water Sciences, Beijing Normal University, Beijing, 100875, China

⁴ Key Laboratory of Eco-Environmental Science for Yellow River Delta, Binzhou, 256600, China

Abstract To study the effects of petroleum pollution on *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca*, the seed germination and seedling growth of two species were compared under five concentrations of petroleum, using pot experiments. The results showed that: 1) The effects of petroleum pollution with different concentrations on seed germination percentage and germination potential of the two *Suaeda* species were not significant ($P > 0.05$). However, the mean germination time of the two *Suaeda* species seeds was significantly shortened, and the germination index of the seeds increased (*S. salsa*: $P < 0.05$; *S. glauca*: $P < 0.01$); 2) At a petroleum concentration lower than 10 000 mg/kg, the difference of germination potential between *S. salsa* and *S. glauca* was highly significant ($P < 0.01$). Under other concentrations, there was no significant difference between the germination index of both species ($P > 0.05$); 3) Petroleum pollution significantly inhibited the height of the plants, the number of leaves, and the length of the cotyledon in both *Suaeda* species. The higher the gradient of petroleum concentration and the longer the growth time, the more obvious the inhibiting effect. The degree of inhibition caused by petroleum pollution was more prominent for *S. salsa* than for *S. glauca*. Our results showed that an oil pollution concentration lower than 10 000 mg/kg could promote the seedling germination of both *Suaeda* species, and at the same time significantly inhibit the seedling growth.

Keywords petroleum pollution stress; *Suaeda glauca*; *Suaeda salsa*; germination; seedling growth

收稿日期 Received: 2018-12-05 接受日期 Accepted: 2019-01-11

*国家重点研发计划项目 (2017YFC0506203, 2016YFC1201100) 资助 Supported by the National Key Research and Development Program of China (2017YFC0506203, 2016YFC1201100)

**通讯作者 Corresponding author (E-mail: lijsh@creas.org.cn)

石油是应用最广泛的能源之一,有“黑色的金子”和“工业的血液”之称^[1],但石油中含有多种难降解的烃类和2 000多种毒性大且疑有“三致”(致畸、致癌、致突变)效应的有机物质。石油进入土壤后,会改变土壤结构及理化性质^[2-3],危害生活在其中的土壤动物且对生长在其上的植物生长发育产生不利影响^[4-6],导致粮食减产^[1, 3];此外,石油中某些污染物会被植物吸收,从而进入食物链并通过食物链逐级积累和放大,并最终严重危害人类健康^[1, 7-10],对生态系统造成严重威胁^[3]。

黄河三角洲湿地是我国温暖带保存最完整、最广阔和最年轻的湿地生态系统,有着丰富的生物资源和石油天然气资源,曾是我国第二大石油生产基地。常年的石油生产、运输和使用等过程以及溢漏事故,严重威胁着油井周围的环境^[9, 12-13],其生态环境风险得到社会及学者越来越广泛的重视^[11]。翅碱蓬(*Suaeda glauca*)和碱蓬(*Suaeda salsa*)是广泛分布于黄河三角洲滨海湿地的一年生草本植物^[14],皆为藜科碱蓬属,具有较强的耐盐碱性^[15-16],可明显改良盐碱土壤,增加土壤有机质含量^[18],在当地群落演替中有着不可替代的地位^[19],成为“红海滩”独特的景观^[20]。翅碱蓬主要生长在潮间带滩涂湿地,而碱蓬则生长在靠近陆域的生境中。研究表明,翅碱蓬和碱蓬对石油污染具有一定耐受性和修复效果^[7, 21-23]。在石油污染胁迫下,如何影响2种碱蓬的生长发育和生理代谢,一直是学者关注的问题^[8, 22-26]。但是,在石油污染下,对比分析两种碱蓬属植物的萌发和幼苗生长的响应特征却鲜见报道。

我们采用控制实验的方法,研究不同石油浓度梯度下黄河三角洲滨海湿地翅碱蓬和碱蓬的萌发生长特征,分析比较2种碱蓬种子萌发及幼苗生长对石油污染的响应及耐受性,旨在为滨海盐碱地油田石油污染土壤的植物修复及未来开发利用提供参考依据。

1 材料与方法

1.1 供试材料

供试2种碱蓬种子均于2017年11月初采于黄河三角洲滨海湿地的胜利油田,翅碱蓬和碱蓬种子分别采自海港附近的潮间带(118.805703°E, 38.082727°N)和岸上的盐碱湿地(118.810287°E, 38.107261°N)的采油机附近。潮间带上植物生境单一,只有翅碱蓬一种植物分布;而岸上盐碱湿地生境较为复杂,除碱蓬外还有芦苇分布。供试盆栽土壤取自黄河三角洲未经原油污染的洁净土壤,有机碳含量为4.56 g/kg, pH为8.36,可溶性盐含量为0.3 g/kg,铝盒法测定土壤含水率为19.73%。供试原油来自胜利油田某一采油机,原油中饱和烷烃质量分数约为89.86%,芳香烃的质量约占总质量的4.93%^[25]。

1.2 试验处理

盆栽控制实验设置在山东省黄河三角洲生态环境重点实验室温室。所用花盆尺寸为上口内直径29 cm,底部直径18 cm,高23 cm。剔除供试土壤中的石子和根等杂物,取12 kg湿重的土装于花盆中,按比例准确称取定量石油溶于石油醚中,与土壤进行掺拌,将花盆土配置成石油质量分数(石油质量/土壤质量)分别为0 mg/kg(T0)、2 500 mg/kg(T1)、5 000 mg/kg(T2)、7 500 mg/kg(T3)和10 000 mg/kg(T4)。为

保证石油与土壤充分混匀,同时使土壤中石油醚充分挥发,种植前15天每隔1天搅拌一次。

将两种野外采集的种子风干后,经春化处理,在培养箱内进行萌发预实验,实验得到供试翅碱蓬和碱蓬种子的平均萌发率分别为94.5%和91.5%。挑选饱满一致、无破损的完整种子,每盆播种40粒,每种处理设置4个重复,播种时间为2018年5月18日。每天浇水1次,使土壤保持湿润。自播种后每日计数萌发数至第8天、第20天和第30天测量株高和计数萌发数,此后每周测株高1次。

1.3 测定指标

测定指标包括萌发指标和生长指标。所使用的萌发指标有萌发率^[27-28]、平均萌发时间^[28-29]、萌发指数^[30-31]和发芽势^[23, 30];生长指标有幼苗株高、叶片数和幼苗子叶长。萌发指标计算公式如下:

$$GP = (n/N) \times 100\%$$

式中,GR为萌发百分率, n 为正常发芽的种子数, N 为供试种子总数。

$$MGT = \sum G_t / D / \sum G_t$$

式中,MGT为平均萌发时间, G_t 为第 t 天的萌发种子数, D_t 为与 G_t 相对应的发芽天数, $\sum G_t$ 为观测时间内的最终发芽数, t 为观测天数($t = 1, 2, 3, \dots, 8$)。

$$GI = \sum (G_t / D_t)$$

式中,GI为萌发指数, G_t 为第 t 天的发芽数, D_t 为与 G_t 相对应的发芽天数, t 为观测天数($t = 1, 2, 3, \dots, 8$)。

$$GP = a/N$$

式中,GP为发芽势, a 为种子发芽达到高峰时的发芽数, N 为供试种子总数。

自播种后每日计数萌发数至第8天、第20天和第30天测量株高和计数萌发数,此后每周测株高1次。

1.4 数据统计与分析

使用Microsoft Office Excel 2013对数据进行录入、整理和初处理,使用SPSS 19.0以浓度和种子来源为因子进行双因素分析,对种子各项萌发指标进双因素方差分析;对相同浓度下两种源之间的差异以及同种源内不同浓度间的差异分别进行 T 检验和ANOVA单因素方差分析;使用Origin 2017进行作图。满足方差齐性时(显著性 $P > 0.05$)使用最小显著差异LSD法多重比较,方差不齐性(显著性 < 0.05)则使用Tamhane's T^2 方法进行比较检验。以 $P < 0.05$ 表示差异显著性, $P < 0.01$ 表示差异极显著。

2 结果与讨论

2.1 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子萌发的影响

2.1.1 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子萌发百分率的影响 如图1所示,不同石油浓度梯度对2种碱蓬萌发率的影响皆差异不显著($P > 0.05$),且2种碱蓬间种子萌发百分率的差异也不显著($P > 0.05$),但受石油污染胁迫的2种碱蓬种子的萌发百分率皆高于对照组,相对发芽率 > 1 ,表明两种碱蓬具有一定的石油耐受性与较强适应性。在0-10 000 mg/kg浓度梯度范围内,石油污染可以促进翅碱蓬和碱蓬种子的萌发率,且石油的不同浓度梯度对萌发率的影响差异不明显,这与之前的相关研究结果^[22-23]相一致。

在张丽辉等的研究^[22]中,碱蓬和翅碱蓬在土壤中石油浓

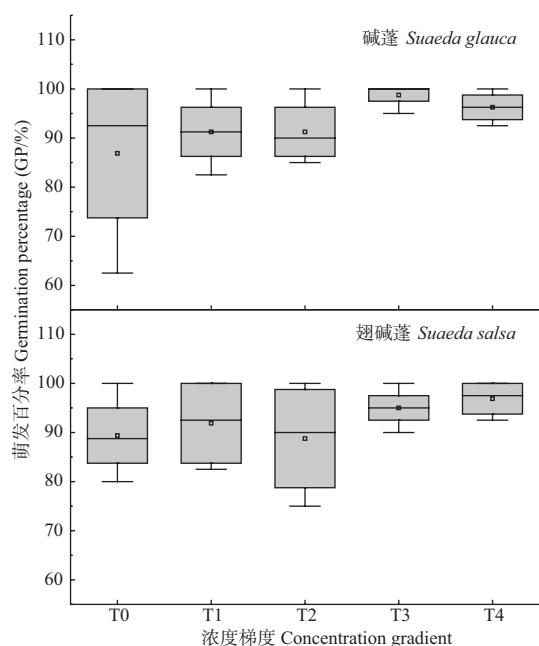


图1 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬种子的萌发百分率. T0、T1、T2、T3和T4分别代表石油质量分数(石油质量/土壤质量)为0、2 500、5 000、7 500和10 000 mg/kg. 箱型图中的横线从上到下依次代表最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值, 空心点代表平均值.

Fig. 1 Germination percentage of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* seeds under the petroleum pollution stress. T0, T1, T2, T3 and T4 represent 0, 2 500, 5 000, 7 500 and 10 000 mg/kg of oil mass fraction (oil quality/soil quality), respectively. The horizontal lines in the box diagram represent the maximum, the upper quartile, the median, the lower quartile and the minimum in turn, and the hollow points represent the average value.

度为500 mg/kg时, 萌发率高于对照组, 在浓度为1 000-30 000 mg/kg时相对发芽率随着石油浓度增加而降低, 与本研究结果不同, 这可能是由于研究中所使用的种子来源不一样. 在本研究中, 所设定浓度范围内供试翅碱蓬和碱蓬的萌发率分别高于88.75%和91.25%, 对比前人研究结果^[22-23], 本研究所采集使用的碱蓬和翅碱蓬种子具有更高的种子萌发率, 这可能与供试种子采自采油井附近因而具备更好的石油污染抗性和适应性有关; 石油污染影响下, 相比较吉林省长岭县马场的翅碱蓬和碱蓬种子^[22], 本研究所使用的来自黄河三角洲的翅碱蓬和碱蓬在种子在萌发过程中表现出更好的抗逆性. 在何洁等的研究^[24]中, 未掺加石油时翅碱蓬的萌发率与本研究结果差异不大, 但在石油影响下翅碱蓬的萌发率低于对照组且呈梯度下降, 这与本研究结果差异较大. 而采用同样供试原油的研究结果^[23]与本文一致, 综合考虑造成结果差异的原因, 可能与供试石油不同有关.

2.1.2 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子萌发指数的影响

如图2所示, 本研究发现, 2种碱蓬种子的萌发指数均显著高于对照组 ($P < 0.01$), 但不同的石油污染浓度下, 2种碱蓬种子的萌发指数不存在显著差异 ($P > 0.05$). 石油浓度在T2 (5 000 mg/kg) 条件下, 2种碱蓬种子的萌发指数均最高, 并随着石油污染浓度的升高而降低, 这与碱蓬对镉胁迫的响应^[31]类似.

2.1.3 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子平均萌发时间的影响

如图3所示, 不同石油污染浓度梯度下, 2种碱蓬的

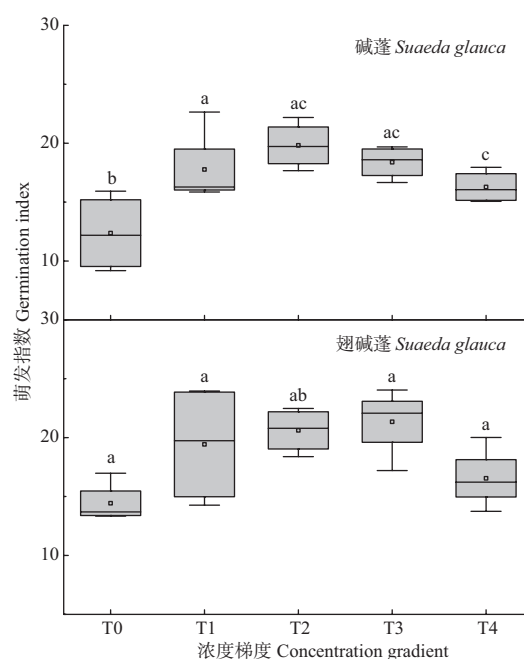


图2 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬种子的萌发指数. T0、T1、T2、T3和T4分别代表石油质量分数(石油质量/土壤质量)为0、2 500、5 000、7 500和10 000 mg/kg. 箱型图中的横线从上到下依次代表最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值, 空心点代表平均值; 小写字母a、b、c表示 $\alpha = 0.05$ 时不同浓度梯度间的差异显著性.

Fig. 2 Germination index of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* seeds under the petroleum pollution. T0, T1, T2, T3 and T4 represent 0, 2 500, 5 000, 7 500 and 10 000 mg/kg of oil mass fraction (oil quality/soil quality), respectively. The horizontal lines in the box diagram represent the maximum, the upper quartile, the median, the lower quartile and the minimum in turn, and the hollow points represent the average value; the lowercase letters a, b, and c indicate the significant difference between different concentration gradients when $\alpha = 0.05$.

种子萌发平均时间差异显著(翅碱蓬 $P < 0.05$; 碱蓬 $P < 0.01$). 实验组2种碱蓬种子的平均萌发时间皆低于对照组, 石油浓度在5 000 mg/kg时, 碱蓬的平均萌发时间最短, 在7 500 mg/kg条件下, 翅碱蓬的平均萌发时间最短, 但相同浓度下2种碱蓬种子的平均萌发时间在种间没有显著差异 ($P > 0.05$). 杨丽珍的研究中, 高粱、花生和冬小麦均出现了萌发时间随着土壤中石油污染浓度的加大而缩短的现象^[33]. 种子萌发的3个必要条件是水、温度和氧气^[34], 水分是种子萌发期最重要的限制因子^[22]. 结合栽培期间所观察的现象分析, 这可能是因为石油污染并没有在种子萌发之前入侵种子表皮伤害种子胚芽, 而限制种子萌发的主要原因是表层土壤水分^[35]. 添加了石油后的土壤结构及理化性质改变, 土壤保水能力更强, 使得石油处理组的种子能够保持长期处于地表土湿度较高的环境下, 湿度环境加速了种子萌发, 缩短了种子的萌发时间. 通过比较两种类型种子在T0对照组的平均萌发时间可以得出, 碱蓬种子的平均萌发时间高于翅碱蓬, 但差异不显著 ($P > 0.05$).

2.1.4 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子发芽势的影响

如图4所示, 不同石油污染浓度梯度下, 实验组碱蓬的发芽势皆高于T0对照组, 碱蓬种子的发芽势普遍高于翅碱蓬. 碱蓬的发芽势随石油浓度梯度的升高而提高, 翅碱蓬的

表1 翅碱蓬和碱蓬种子萌发特性的来源因子与浓度因子的双因素方差分析
Table 1 Two-way analysis of source factors and concentration factors on seed germination characteristics of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca*

因子 Factor	种子萌发特性 Characteristics of seeds germination			
	萌发百分率 Germination percentage	平均萌发时间 Mean germination time	萌发指数 Germination index	发芽势 Germination energy
来源 Source	39.198***	0.325	3.059	9.924**
浓度 Concentration	2.096	9.631***	8.206***	0.851
交互作用 Interaction effect	0.237	1.808	0.288	0.407

表中为F值。 **差异显著 ($P < 0.01$) ; ***差异极显著 ($P < 0.001$) 。
The data in the table are F values. ** significant difference ($P < 0.01$); *** very significant difference ($P < 0.001$).

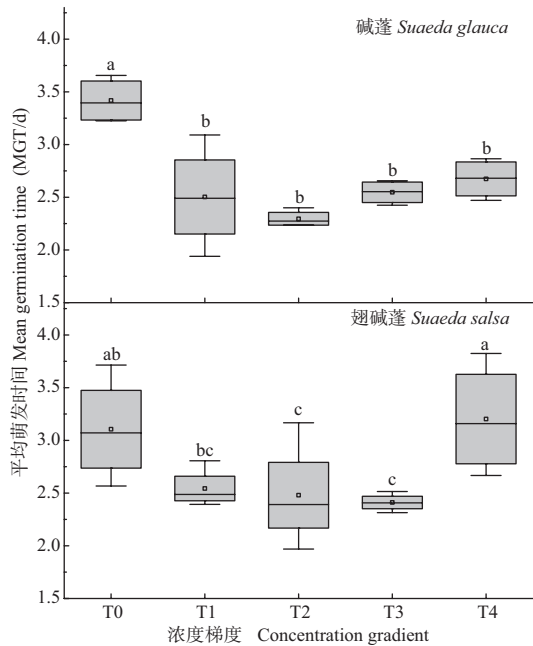


图3 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬种子的平均萌发时间。 T0、T1、T2、T3和T4分别代表石油质量分数(石油质量/土壤质量)为0、2 500、5 000、7 500和10 000 mg/kg。 箱型图中的横线从上到下依次代表最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值, 空心点代表平均值; 小写字母a、b、c表示 $\alpha = 0.05$ 时不同浓度梯度间的差异显著性。
Fig. 3 Mean germination time of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* seeds under the petroleum pollution stress. T0, T1, T2, T3 and T4 represent 0, 2 500, 5 000, 7 500 and 10 000 mg/kg of oil mass fraction (oil quality/soil quality), respectively. The horizontal lines in the box diagram represent the maximum, the upper quartile, the median, the lower quartile and the minimum in turn, and the hollow points represent the average value; the lowercase letters a, b, and c indicate the significant difference between different concentration gradients when $\alpha = 0.05$.

发芽势则变化不明显。 石油污染浓度梯度低于10 000 mg/kg时, 2种碱蓬之间种子的发芽势差异不显著 ($P > 0.05$) , 直至10 000 mg/kg的浓度梯度时表现出极显著差异 ($P < 0.01$) 。

发芽势反映了种子萌发的整齐程度^[31]和种子的优劣, 种子发芽势高, 表示种子活力强、发芽整齐、增产潜力大^[37]。 有研究指出, 石油对碱蓬种子发芽率影响不甚明显, 但对发芽势影响较大^[22]。 而本研究结果表明, 低浓度石油胁迫对2种碱蓬的萌发率和发芽势影响都不显著, 这与赵丽君等的石油污染胁迫实验中苜蓿种子萌发的响应^[38]一致, 说明本研究的供试种子具有更好的石油抗性。

2.1.5 来源因子与浓度因子对翅碱蓬和碱蓬种子萌发特性的双因素方差分析 由表1可以看出, 种子来源对种子萌发百

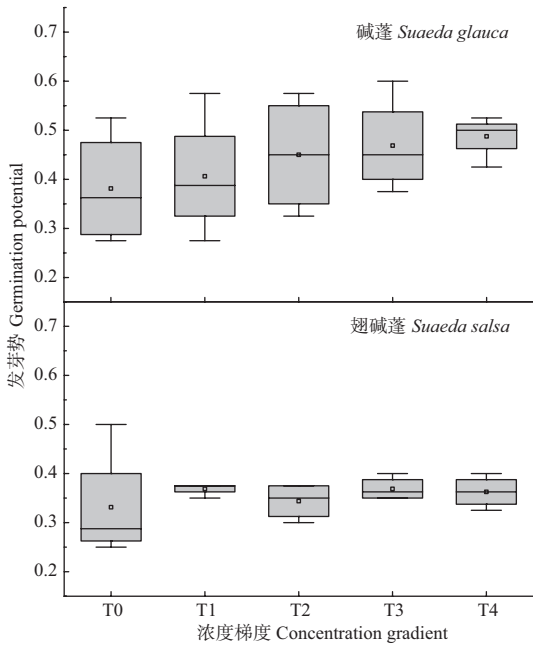


图4 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬种子的发芽势。 T0、T1、T2、T3和T4分别代表石油质量分数(石油质量/土壤质量)为0、2 500、5 000、7 500和10 000 mg/kg。 箱型图中的横线从上到下依次代表最大值、上四分位数、中位数、下四分位数、最小值, 空心点代表平均值。
Fig. 4 Germination potential of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* seeds under the petroleum pollution stress. T0, T1, T2, T3 and T4 represent 0, 2 500, 5 000, 7 500 and 10 000 mg/kg of oil mass fraction (oil quality/soil quality), respectively. The horizontal lines in the box diagram represent the maximum, the upper quartile, the median, the lower quartile and the minimum in turn, and the hollow points represent the average value.

分率和发芽势影响极显著, 而对平均萌发时间和萌发指数的影响不显著 ($P > 0.05$) ; 土壤中的石油浓度对平均萌发时间和萌发指数影响极显著 ($P < 0.001$) , 而对萌发百分率和发芽势影响不显著 ($P > 0.05$) ; 种子来源和土壤中石油浓度的交互作用对萌发百分率、平均萌发时间、萌发指数和发芽势均无显著影响 ($P > 0.05$) 。

2.2 不同浓度的石油对翅碱蓬和碱蓬种子幼苗生长状况的影响

2.2.1 不同浓度的石油对两种碱蓬株高的影响 如图5所示, 相比对照组, 所观测的各个时期内 4个石油污染浓度梯度对碱蓬和翅碱蓬种子的株高皆表现出极显著抑制 ($P < 0.01$) 。 张涛等发现, 土壤石油污染浓度在500-5 000 mg/kg时, 碱蓬的株高皆高于对照组, 任何浓度的土壤石油污染都会抑制翅碱蓬幼苗株高的生长^[25]。 本研究结果与该研究中翅碱蓬

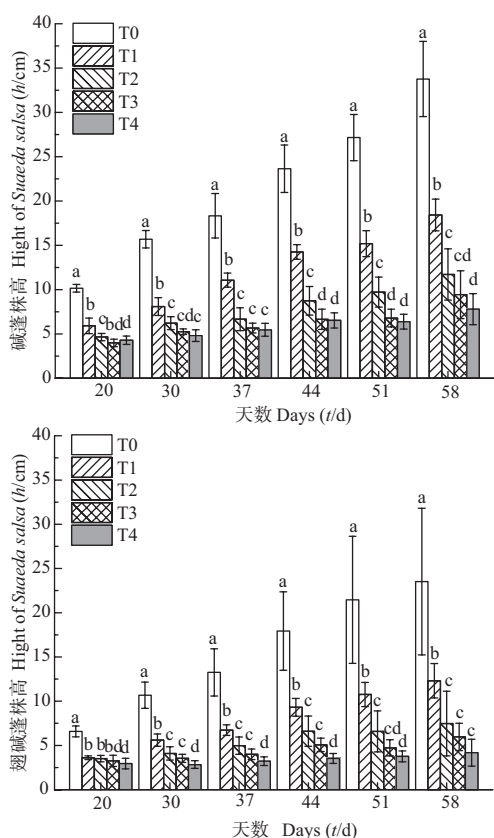


图5 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬的株高. 条形图中字母a、b、c、d表示 $\alpha = 0.05$ 时不同浓度梯度间的差异显著性. 图标以平均值 $\pm$ 标准差表示.
Fig. 5 Height of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* seeds under the petroleum pollution stress. In the bar chart, the letters a, b, c and d are used to indicate the significant difference between different concentration gradients when $\alpha = 0.05$. The icons are expressed as mean + standard deviation.

的表现一致, 但并未体现出碱蓬株高受石油的促进作用的现象, 究其原因可能与种子来源等不同有关. 说明在石油影响下, 吉林省长岭县马场的碱蓬幼苗^[25]具有更好的抗逆性. 30 d 时翅碱蓬的株高与何洁等的研究结果^[24]相比较, 未掺拌石油时高度一致, 但在石油浓度为5 000 mg/kg和10 000 mg/kg时, 本研究中的翅碱蓬幼苗高度皆显著低于何洁等的研究结果, 综合考虑排除种子来源、盐度、土壤理化和培养条件不同的因素, 推测造成差异的主要原因可能与供试石油来源的成分

不同有关.

相同石油浓度梯度下, 两种碱蓬种子的幼苗株高差异极显著 ($P < 0.01$). 由表2可见, 各时期各浓度下石油对翅碱蓬的抑制程度高于碱蓬, 且2种碱蓬的株高受到的抑制程度随着石油浓度梯度的增大而增大. 刘继朝等的研究^[39]也表明, 随石油污染水平的增加, 向日葵、狗牙根、高丹草、棉花、紫花苜蓿、高羊茅等9种供试植物的株高呈下降趋势. 低浓度下, 随着生长时间的增长, 石油对两种碱蓬的抑制也越来越大, 这种现象随着石油浓度提高而愈明显. 这可能是石油进入土壤后, 影响土壤的通透性, 阻碍植物根系的呼吸与吸收, 引起根系腐烂从而影响植物生长的缘故^[10].

2.2.2 不同浓度的石油对两种碱蓬幼苗叶片数的影响 如图6所示, 第20天时石油处理组2种碱蓬的叶片数皆低于对照组, 随着石油浓度的增加2种碱蓬幼苗的叶片数逐渐降低, 石油对翅碱蓬和碱蓬幼苗叶片数的抑制作用极显著 ($P < 0.01$). 对照组翅碱蓬和碱蓬株高差异不显著, 但实验组中2种碱蓬差异显著, 且翅碱蓬幼苗出现了明显的生长滞后. 第30天时石油污染胁迫下2种碱蓬叶片数差异显著 ($P < 0.05$), 土壤石油污染浓度 $> 2\ 500\ \text{mg/kg}$ 时差异极显著 ($P < 0.001$). 相同处理下, 碱蓬的叶片数皆高于翅碱蓬, 表明在相同石油浓度胁迫下, 碱蓬具有更好的适应和耐受能力.

种子萌发是幼苗建立和植物种群维持与发展的先决条件^[40], 而幼苗的生长是植物存活的基础^[41], 株高和叶片数是植物面对胁迫响应的直观生长指标之一, 面对生长胁迫, 植物往往会表现出直观的差异. 彭国坤等的研究^[42]表明, 在0-10%的石油质量分数下, 玉米的叶片数随着石油浓度的增加而逐渐减少, 玉米株高与石油质量分数呈显著相关. 岳冰冰等的研究^[43]表明, 在0-7 500 mg/kg的石油污染下, 随着石油处理质量分数的增加, 紫花苜蓿的生长受到明显抑制, 株高、叶片数等与对照比较明显降低. 依据本研究结果, 0-10 000 mg/kg浓度梯度的石油土壤污染显著抑制2种碱蓬幼苗的株高和叶片数, 且这种抑制作用随着石油浓度梯度的增加而增加, 这与前人的研究结果^[9, 42-43]一致.

2.2.3 不同浓度的石油对两种碱蓬幼苗子叶长的影响 子叶在种子中是储藏营养的器官^[44-45]. 在真叶出现前, 子叶几乎就是光合作用的主要区域, 是种子萌发过程中的能量来源^[46]. 有研究指出, 碱蓬幼苗生长解除对子叶依赖的时间是第15天^[47]. 本实验研究结果 (图7) 表明, 对照组2种碱蓬幼苗

表2 不同浓度梯度石油对翅碱蓬和碱蓬株高的相对抑制率
Table 2 Relative inhibition rate of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* by petroleum pollution of different concentrations

物种 Species	处理 Treatment	相对抑制率 Relative inhibition rate					
		20 d	30 d	37 d	44 d	51 d	58 d
翅碱蓬 <i>Suaeda salsa</i>	T0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	T1	1.815	1.802	1.724	1.540	1.525	1.743
	T2	1.889	2.827	2.687	2.578	3.127	3.517
	T3	2.118	3.431	3.585	3.666	4.750	4.667
	T4	2.443	4.538	4.687	5.691	6.212	7.088
碱蓬 <i>Suaeda glauca</i>	T0	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
	T1	0.714	0.937	0.656	0.658	0.788	0.833
	T2	1.181	1.524	1.748	1.702	1.791	1.882
	T3	1.545	1.984	2.227	2.551	2.995	2.576
	T4	1.367	2.258	2.355	2.619	3.250	3.329

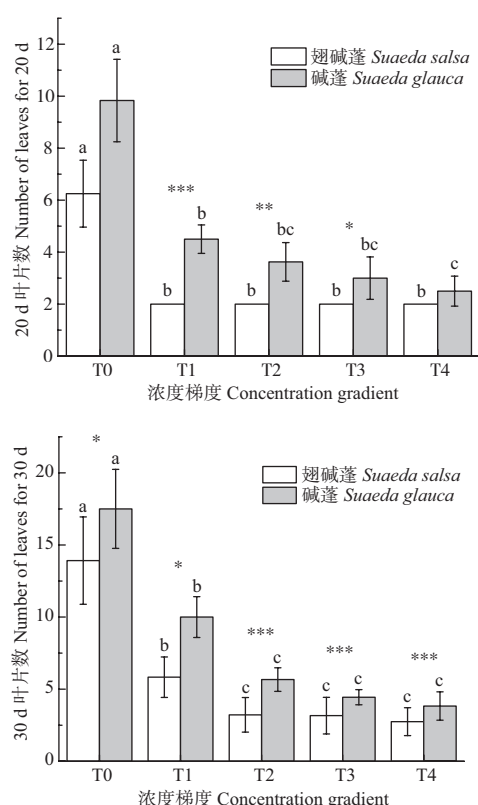


图6 石油污染胁迫20 d和30 d翅碱蓬和碱蓬的叶片数. 条形图中字母a、b、c表示 $\alpha = 0.05$ 时不同浓度梯度间的差异显著性, 用下划线区分不同种子类型; 相同浓度下两种源间的差异显著性用*表示: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. 图标以平均值 $\pm$ 标准差表示.

Fig. 6 Number of leaves of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* under the petroleum pollution stress for 20 d and 30 d. In the bar chart, the letters a, b, and c indicate the significant difference between different concentration gradients when $\alpha = 0.05$, and the underline is used to distinguish different seed types. The significant difference between the two sources at the same concentration is expressed by *, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. The icons are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

的子叶长差异不显著 ($P > 0.05$), 实验组的子叶长皆低于对照组. 不同石油污染浓度梯度下, 翅碱蓬幼苗子叶长差异不显著 ($P > 0.05$), 碱蓬幼苗子叶长差异极显著 ($P > 0.01$), 且碱蓬幼苗的子叶长随石油浓度的增加而减小. 说明面对不同浓度梯度的石油胁迫, 2种碱蓬表现出的胁迫响应不同, 其中碱蓬幼苗表现的受胁迫响应规律性更明显.

3 结论

本研究所采集的翅碱蓬和碱蓬种子对石油污染胁迫具有较好的适应性, 一定浓度梯度的石油可以促进翅碱蓬和碱蓬的萌发. 2种碱蓬的萌发指数和平均萌发时间对石油污染响应显著, 0-10 000 mg/kg的石油浓度可以显著提高2种碱蓬的萌发指数, 缩短碱蓬的平均萌发时间, 而低于10 000 mg/kg的石油污染浓度梯度可以显著缩短翅碱蓬的平均萌发时间. 面对石油胁迫, 供试的2种碱蓬中的碱蓬具有更好的种子活力、抗逆性和适应性.

石油会对翅碱蓬和碱蓬的幼苗生长造成明显胁迫, 且随浓度梯度的增高, 石油对幼苗株高、叶片数和子叶长的抑制

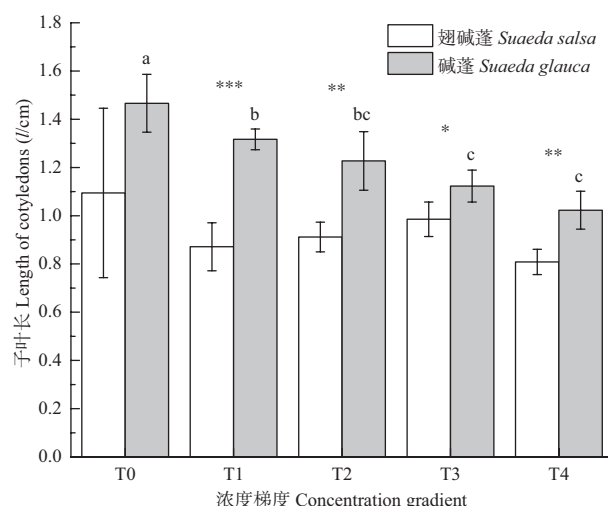


图7 石油污染胁迫下翅碱蓬和碱蓬幼苗的子叶长. 条形图中字母a、b、c表示 $\alpha = 0.05$ 时不同浓度梯度间的差异显著性, 用下划线区分不同种子类型; 相同浓度下两种源间的差异显著性用*表示: * $P < 0.05$, ** $P < 0.01$, *** $P < 0.001$. 图标以平均值 $\pm$ 标准差表示.

Fig. 7 Length of cotyledons of *Suaeda salsa* and *Suaeda glauca* under the petroleum pollution stress. In the bar chart, the letters a, b, and c indicate the significant difference between different concentration gradients when $\alpha = 0.05$, and the underline is used to distinguish different seed types. The significant difference between the two sources at the same concentration is expressed by *, * $P < 0.05$; ** $P < 0.01$; *** $P < 0.001$. The icons are expressed as mean $\pm$ standard deviation.

作用逐渐增大. 翅碱蓬幼苗株高和叶片数对石油污染胁迫的响应程度高于碱蓬, 而碱蓬幼苗子叶对石油污染胁迫的响应程度更高.

参考文献 [References]

- 李俊生, 肖能文, 李兴春, 李广贺, 郑润涛, 邓祥征, 于宏兵. 陆地石油开采生态风险评估的技术研究[M]. 北京: 中国环境出版社, 2013 [Li JS, Xiao NW, Li XC, Li GH, Zheng YR, Deng XZ, Yu HB. Technological Study on Ecological Risk Assessment of Terrestrial Petroleum Exploitation [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 2013]
- 王传远, 杨翠云, 孙志高, 杨玉玮, 瞿成利, 王允周. 黄河三角洲生态区土壤石油污染及其与理化性质的关系[J]. 水土保持学报, 2010, **24** (2): 214-217 [Wang CY, Yang CY, Sun ZG, Yang YW, Qu CL, Wang YZ. Contamination characteristics and its relationship with physico-chemical properties of oil polluted soils in the Yellow River Delta Swamp [J]. *J Soil Water Conserv*, 2010, **24** (2): 214-217]
- 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 KQ, Sun TH, Li PJ. Bioremediation of the soil contaminated by petroleum hydrocarbons [J]. *Chin J Ecol*, 2000, **19** (2): 50-55]
- Tang JC, Wang M, Wang F, Sun Q, Zhou QX. Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil [J]. *J Environ Sci*, 2011, **23** (5): 845-851
- Inckot RC, de Oliveira santos G, de Souza LZ, Cleusa B. Germination and development of *Mimosa pilulifera* in petroleum-contaminated soil and bioremediated soil [J]. *Flora*, 2011, **206**: 261-266
- Thanh HT, Einiv M G, Amram E, Gidon W. Germination, physiological and biochemical responses of acacia seedlings (*Acacia raddiana* and

- Acacia trtilis*) to petroleum contaminated soils [J]. *Environ Pollut*, 2018, **234**: 642-655
- 7 许崇彦, 刘宪斌, 刘占广, 王娟, 姜中鹏, 曹佳莲. 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 CY, Liu XB, Liu ZG, Wang J, Jiang ZP, Cao JL. Remedial effect of *Suaeda salsa* (L.) Pall. planting on the oil-polluted coastal zones[J]. *J Saf Environ*, 2007, **7** (1): 37-39]
 - 8 高乃媛, 刘宪斌, 赵兴茹. 石油烃对翅碱蓬生理特性的影响及植物-微生物联合降解[J]. 环境工程学报, 2013, **7** (4): 1578-1582 [Gao NY, Liu XB, Zhao XR. Influence of oil in soil on growth and physiological indexes of *Suaeda heteroptera* and plant-microbial remediation [J]. *Chin J Environ Eng*, 2013, **7** (4): 1578-1582]
 - 9 于君宝, 阚兴艳, 王雪宏, 韩广轩, 管博, 谢文军, 林乾新. 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[J]. 地理科学, 2012, **32** (10): 1254-1261 [Yu JB, Kan XY, Wang XH, Han GX, Guan B, Xie WJ, Lin QX. Simulative study on effects of petroleum contamination on seedling Growth of phragmites australis and *Suaeda salsa* in coastal wetland of Yellow River Delta[J]. *Sci Geogr Sin*, 2012, **32** (10): 1254-1261]
 - 10 齐永强, 王红旗. 微生物处理土壤石油污染的研究进展[J]. 上海环境科学, 2002, **21** (3): 177-180, 188 [Qi Y, Wang HQ. Study progress on bioremediation of soil oil pollution [J]. *Shanghai Environ Sci*, 2002, **21** (3): 177-180, 188]
 - 11 孙志高, 牟晓杰, 陈小兵, 王玲玲, 宋红丽, 姜欢欢. 黄河三角洲湿地保护与恢复的现状、问题与建议[J]. 湿地科学, 2011, **9** (2): 107-115 [Sun ZG, Mou XJ, Chen XB, Wang LL, Song Actualities, problems and suggestions of wetland protection and restoration in the Yellow River Delta [J]. *Wetland Sci*, 2011, **9** (2): 107-115]
 - 12 陈凯, 肖能文, 王备新, 李俊生. 黄河三角洲石油生产对东营湿地底栖动物群落结构和水质生物评价的影响[J]. 生态学报, 2012, **32** (6): 1970-1978 [Chen K, Xiao NW, Wang BX, Li JS. The effects of petroleum exploitation on water quality bio-assessment and benthic macro-invertebrate communities in the Yellow River Delta wetland, Dongying [J]. *Acta Ecol Sin*, 2012, **32** (6): 1970-1978]
 - 13 朱艳红. 黄河三角洲地区颗粒态多环芳烃 (PAHs) 污染特征和来源[D]. 济南: 山东大学, 2014 [Zhu YH. Characteristics and sources of particulate polycyclic aromatic hydrocarbon (PAHs) in the Yellow River Delta [D]. Jinan: Shandong University, 2014]
 - 14 中国科学院中国植物志编委会. 中国植物志[M]. 北京: 科学出版社, 1979: 134 [Editorial Committee of Flora of China, Chinese Academy of Sciences. Flora of China [M]. Beijing: Sciences Press, 1979: 134]
 - 15 彭斌, 许伟, 邵荣, 封功能, 石文艳. 不同生境种源盐地碱蓬幼苗生长发育对盐胁迫的响应和适应[J]. 草业学报, 2016, **25** (4): 81-90 [Peng B, Xu W, Shao R, Feng GN, Shi WY. Growth of *Suaeda salsa* tin response to salt stress in different habitats[J]. *Acta Pratacult Sin*, 2016, **25** (4): 81-90]
 - 16 李芊芊, 罗柳青, 陈洋芳, 王文卿. 高盐污水处理人工湿地中耐盐植物的筛选[J]. 应用与环境生物学报, 2017, **23** (5): 873-878 [Li QQ, Luo LQ, Chen YQ, Wang WQ. Selection of salt-tolerant plants for high-salinity wastewater treatment by constructed wetlands [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2017, **23** (5): 873-878]
 - 17 史功伟, 宋杰, 高奔, 杨青, 范海, 王宝山, 赵可夫. 不同生境盐地碱蓬出苗及幼苗抗盐性比较[J]. 生态学报, 2009, **29** (1): 138-143 [Shi GW, Song J, Gao B, Yang Q, Fan H, Wang BS, Zhao KF. The comparison on seedling emergence and salt tolerance of *Suaeda salsa* L. from different habitats [J]. *Acta Ecol Sin*, 2009, **29** (1): 138-143]
 - 18 赵可夫, 范海, 江行玉, 宋杰. 盐生植物在盐渍土壤改良中的作用[J]. 应用与环境生物学报, 2002, **8** (1): 31-35 [Zhao KF, Fan H, Jiang XY, Song J. Improvement and utilization of saline soil by planting halophytes [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2002, **8** (1): 31-35]
 - 19 刘志杰. 黄河三角洲滨海湿地环境区域分异及演化研究[D]. 青岛: 中国海洋大学, 2013 [Liu ZJ. Study on the regional differentiation and evolution of coastal wetland in Yellow River Delta [D]. Qingdao: Ocean University of China, 2013]
 - 20 赵阳国, 白洁, 高会旺. 辽河口湿地生态修复理论与方法[M]. 北京: 海洋出版社, 2016 [Zhao YG, Bai J, Gao HW. Theory and Method of Wetland Ecological Restoration in Liaohe Estuary [M]. Beijing: China Ocean Press, 2016]
 - 21 陶宇, 蔡富才, 赵欢, 杨大佐, 李婧琳, 矫志伟, 蓝元山, 周一兵. 沙蚕对翅碱蓬-降油细菌系统降解菲效果的影响[J]. 应用环境生物学报, 2016, **22** (5): 891-896 [Tao Y, Bai J, Gao HW, Yang DZ, Li JL, Jiao ZW, Lan YS, Zhou YB. Effect of *Perinereis aibuhitensis* on the degradation of phenanthrene in *Suaeda heteroptera* and oil-degradation bacteria system [J]. *Chin J Appl Environ Biol*, 2016, **22** (5): 891-896]
 - 22 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 LH, Liu S, Zhao JM. Effects of petroleum contaminated soil on seed germination rate of 2 kinds of Chenopodiaceae plants [J]. *J Anhui Agric Sci*, 2007, **35** (34): 10995-10996]
 - 23 王传远, 左进城, 苗凤萍, 杨翠云, 宋忠国. 黄河三角洲生态区土壤石油污染及其对碱蓬萌发的生态影响[J]. 生态环境学报, 2010, **19** (4): 782-785 [Wang CY, Zuo JC, Miao FP, Yang CY, Song ZG. Oil pollution of soil and its ecological impact on seed germinate of *Salsola glauca* Bunge in the Yellow River Delta Swamp, China [J]. *Ecol Environ*, 2010, **19** (4): 782-785]
 - 24 何洁, 贺鑫, 高钰婷, 王斌, 周一兵. 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. 2011, **30** (4): 650-655 [He J, He X, Gao YT, Wang B, Zhou YB. The influence of oil concentration in soil on growth and physiological characteristics of *Suaeda heteroptera* [J]. *Agro-Environ Prot*, 2011, **30** (4): 650-655]
 - 25 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): 46-49 [Zhang T, Zhang QM. Effects of oil pollution in soil on the seedling growth of two kinds of chenopodiaceae plant [J]. *J Dalian Educ Univ*, 2009, **25** (1): 46-49]
 - 26 邢磊, 王以斌, 张秀芳, 张琪. GC-MS在石油组分指纹信息分析中的应用[J]. 石油与天然气化工, 2015, **44** (6): 111-115 [Xing L, Wang YB, Zhang XF, Zhang Q. Application of GC-MS in the fingerprint information analysis of crude oil components [J]. *Chem Eng Oil Gas*, 2015, **44** (6): 111-115]
 - 27 Scott SJ, Jones RA, Williams WA. Review of data analysis methods for seed germination [J]. *Crop Sci*, 1984, **24** (6): 1192-1199
 - 28 Zhu JJ, Kang HZ, Tan H, Xu ML. Effects of drought stresses induced by

- polyethylene glycol on germination of *Pinus sylvestris* var. *mongolica* seeds from natural and plantation forests on sandy land [J]. *Res Environ Sci*, 2006, **11**: 319-328
- 29 Demir I, Ermis S, Mavi K, Matthews, S. Mean germination time of pepper seed lots (*Capsicum annuum* L.) predicts size and uniformity of seedlings in germination tests and transplant modules [J]. *Seed Sci Technol*, 2008, **36** (1): 21-30
 - 30 张利霞, 常青山, 侯小改, 赵威, 洪亚平, 戴攀峰, 李晓鹏, 张耀. 不同钠盐胁迫对夏枯草种子萌发特性的影响[J]. 草业学报, 2015, **24** (3): 177-186 [Zhang LX, Chang QS, Hou XG, Zhao W, Hong YP, Dai PF, Li XP, Zhang Y. Effects of sodium salt stress on seed germination of *Prunella vulgaris* [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2015, **24** (3): 177-186]
 - 31 孙艳茹, 石屹, 陈国军, 闫慧峰. PEG模拟干旱胁迫下8种绿肥作物萌发特性与抗旱性评价[J]. 草业学报, 2015, **24** (3): 89-98 [Sun YR, Shi Y, Chen GJ, Yan HF. Evaluation of the germination characteristics and drought resistance of green manure crops under PEG stress [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2015, **24** (3): 89-98]
 - 32 王新新, 吴亮, 朱生凤, 赵林, 安伟, 陈宇. 镉胁迫对碱蓬种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 农业环境科学学报, 2013, **32** (2): 238-243 [Wang XX, Wu L, Zhu SF, Zhao L, An W, Chen Y. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of *Suaeda glauca* [J]. *J Agro-Environ Sci*, 2013, **32** (2): 238-243]
 - 33 杨丽珍. 石油污染土壤的田间作物修复研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2010 [Yang LZ. Research on phytoremediation of petroleum-contaminated soil by field crops [D]. Nanchang: Nanchang University, 2010]
 - 34 Bewley JD, Bradford KJ, Henk H, Hiroyuki N. Seeds Physiology of Development, Germination and Dormancy [M]. Berlin: Springer, 2013
 - 35 李小利, 刘国彬, 薛蕙, 许明祥. 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 [Li XL, Liu GB, Xue S, Xu MX. Effects of crude oil on growth of plant seedling and soil respiration in loess hilly region of North Shaanxi [J]. *J Soil Water Conser*, 2007, **21** (3): 95-98, 127]
 - 36 卢艳敏, 苏长青, 李会芬. 不同盐胁迫对白三叶种子萌发及幼苗生长的影响[J]. 草业学报, 2013, **22** (4): 123-129 [Lu YM, Su CQ, Li HF. Effects of different salts stress on seed germination and seedling growth of *Trifolium repens* [J]. *Acta Pratacult Sin*, 2013, **22** (4): 123-129]
 - 37 钱春荣, 王俊河, 冯延江, 王麟, 于洋, 宫秀杰. 不同浸种时间对水稻种子发芽势和发芽率的影响[J]. 中国农学通报, 2008, **24** (9): 183-185 [Qian CR, Wang JH, Feng YJ, Wang L, Yu Y, Gong XJ. Effect of different seed soaking time on germinative energy and germinative percentage of rice seed [J]. *Chin Agric Sci Bull*, 2008, **24** (9): 183-185]
 - 38 赵丽君, 张凤杰, 曲艳平, 刘璐, 李帅国, 顾瑞婷, 钱芮. 石油污染胁迫对苜蓿种子萌发的影响[J]. 天津农业科学, 2017, **23** (9): 82-85 [Zhao LJ, Zhang FJ, Qu YP, Liu L, Li SG, Gu RT, Qian R. Effects of oil pollution stress on seed germination of *Medicago sativa* [J]. *Tianjin Agric Sci*, 2017, **23** (9): 82-85]
 - 39 刘继朝, 张燕平, 邹树增. 土壤石油污染对植物种子萌发和幼苗生长的影响[J]. 水土保持通报, 2009, **23** (3): 123-126 [Liu JC, Zhang, YP and Zou SZ. Effects of Oil-contaminated soil on the germination and growth of plant seedling [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 2009, **23** (3): 123-126]
 - 40 Sánchez-Linares L1, Gavilanes-Ruiz M, Díaz-Pontones D, Guzmán-Chávez F, Calzada-Alejo V, Zurita-Villegas V, Luna-Loaiza V, Moreno-Sánchez R, Bernal-Lugo I, Sánchez-Nieto S. Early carbon mobilization and radicle protrusion in maize germination [J]. *Res Environ Sci*, 2012, **63** (12): 4513-4526
 - 41 齐月, 关潇, 闫冰, 杜乐山, 付刚, 乔梦萍, 李俊生. 除草剂对苘麻子代萌发和幼苗生长的延迟影响[J]. 中国环境科学, 2016, **36** (8): 2480-2486 [Qi Y, Guan X, Yan B, Du LS, FU G, Qiao MP, Li JS. Seed germination and seedling growth of seed from velvetleaf treated by herbicides [J]. *China Environ Sci*, 2016, **36** (8): 2480-2486]
 - 42 彭昆国, 杨丽珍, 荣亮, 张柱, 弓晓峰. 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 [Peng KG, Yang LZ, Rong L, Zhang Z, Gong XF. Responses of seed germination and seedling growth of plants to petroleum-contaminated soil [J]. *Environ Pollut Control*, 2012, **34** (7): 19-23]
 - 43 岳冰冰, 李鑫, 任芳菲, 孟凡娟, 孙广玉. 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 [Yue BB, Li X, Ren FF, Meng FJ, Sun GY. Effects of petroleum contamination on some of physiological indexes of alfalfa [J]. *Pratacult Sci*, 2011, **28** (2): 236-240]
 - 44 Irwin A, Umgar. Halophyte seed germination [J]. *Bot Rev*, 1978, **44**: 233-264
 - 45 Song J, Feng G, Tian C, Zhang F. Strategies for Adaptation of *Suaeda physophora*, *Haloxylon ammodendron* and *Haloxylon persicum* to a saline environment during seed-germination stage [J]. *Ann Bot*, 2005, **96**: 399-405
 - 46 吴玲, 张新时. 松嫩平原农牧交错区牧草资源特点及畜牧业发展[J]. 生态学报, 2006, **26** (2): 601-609 [Wu L, Zhang XS. Characters of forage resources and the development of pastoral industry in the farming-pastoral zone of the Songnen Plain [J]. *Acta Ecol Sin*, 2006, **26** (2): 601-609]
 - 47 秦峰梅. 黄花苜蓿种子耐盐性及杂草植物子叶生长与光合作用研究[D]. 长春: 东北师范大学, 2007 [Qin FM. The study on the salt tolerance of *Medicago falcata* cultivars and cotyledon growth and photosynthesis of weed species [D]. Changchun: Dongbei Normal University, 2007]