



土壤石油污染对 9 个玉米(*Zea mays* L.)品种 种子萌发及幼苗生长的影响

罗巧¹,段磊¹,赵显林¹,杨婷¹,李亚鑫¹,贾汉忠²,周建利¹

(1.长江大学农学院,湖北荆州 434025;2.西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要 为了解土壤石油污染对不同品种玉米种子萌发及生长的影响,通过人工模拟原油污染土壤,研究 4 个浓度梯度(0、50、100、150 g/kg)的土壤石油污染下 9 个玉米品种(5 个饲料玉米品种和 4 个甜玉米品种)的种子萌发和幼苗生长的响应特征。结果表明:随着土壤石油污染浓度的递增,9 个玉米品种的种子萌发指标(发芽率和发芽指数)和幼苗生长指标(苗高、根长、地上部生物量和根质量)均呈现显著下降的趋势;在各种浓度的土壤石油污染胁迫下,饲料玉米的耐受性均强于甜玉米;在土壤石油污染浓度为 50 g/kg 条件下,‘先优 666’品种的种子萌发性状和幼苗生长性状在 9 个玉米品种中均最优,而‘中科 11’品种则在土壤石油污染浓度为 100 g/kg 和 150 g/kg 条件下其种子萌发性状和幼苗生长性状均最优。综合分析,‘先优 666’和‘中科 11’玉米品种分别具有修复低浓度和中高浓度石油污染土壤的潜力。

关键词 玉米;石油污染;土壤;种子萌发

中图分类号 X53

文献标志码 A

文章编号 1004-1389(2021)12-1777-10

石油是现代生活生产和生活必不可少的能源和物质基础,但在开采、运输和加工过程中,由于石油的泄漏等问题会造成环境的污染;据统计,全球每年可产生将近 800 万 t 的石油污染物,这些污染物以不同的方式进入土壤,从而引起土壤石油污染^[1-3]。石油污染土壤的修复技术包括物理修复、化学修复和生物修复^[2,4],其中生物修复又包括微生物修复和植物修复,而植物修复技术的机理是利用根际微生物降解石油污染物^[5],其具有自然美观、成本低、无二次污染的优势而受到关注。

植物修复技术的关键是筛选出合适的修复植物(耐性强、生长快、生物量大、根系发达等)。前人已从野生植物^[3,6]、花卉^[7]、牧草和绿肥^[8-10]以及农作物^[11-14]等植物中进行了筛选,已经筛选出一些有一定修复效果的植物。石油污染土壤会降低种子萌发、影响植物生长和各种作物的产量,有研究表明,石油污染对谷物、豆类和其他作物的地上部和地下部生物量均有负面影响,引起作物根结构的变化,造成根长度、根密度和根表面积以及

根重的减小^[15-22]。前人的研究发现包括玉米在内的禾本科作物对石油污染土壤具有一定的修复效果^[14,23]。玉米为 1 a 生禾本科植物,其生长快、生物量大、根系发达,具有修复石油污染土壤的巨大潜力。但是玉米的品种多样,不同品种玉米对石油污染土壤的响应特征如何尚需进一步研究。因此,本研究通过人工模拟石油污染土壤的试验,探讨 9 个玉米品种对石油污染土壤的响应,以期筛选出对石油污染具有较强耐性的玉米品种。

1 材料与方 法

1.1 供试材料

供试土壤采自长江大学西校区教学科研实习基地的水稻土,其基本理化性质为 pH 7.72,有机质 15.73 g/kg,全氮 1.69 g/kg,全磷 1.04 g/kg,全钾 16.92 g/kg,碱解氮 54.58 mg/kg,有效磷 11.72 mg/kg,速效钾 122.80 mg/kg。供试原油由中石化江汉油田荆州采油厂提供。供试玉米均购自于种业公司,其基本信息见表 1。

收稿日期:2021-07-07 修回日期:2021-08-20

基金项目:国家重点研发计划(2019YFC1804101)。

第一作者:罗巧,女,硕士研究生,从事石油污染土壤修复研究。E-mail:1277859973@qq.com

通信作者:周建利,男,博士,副教授,主要从事污染土壤环境修复研究。E-mail:zhj11233@163.com

表 1 玉米种子基本信息
Table 1 Basic information of maize seeds

玉米类型 Maize type	玉米品种 Maize cultivars	采购公司 Purchasing company
饲料玉米 Forage maize	先优 666 Xianyou 666	河北先优种业有限公司 Hebei Xianyou Seed Industry Co.,Ltd
	联创 808 Lianchuang 808	北京联创种业有限公司 Beijing Lianchuang Seed Industry Co.,Ltd
	郑单 958 Zhengdan 958	河南金博士种业有限公司 Henan Jinboshi Seed Industry Co.,Ltd
	万盛 68 Wansheng 68	河北万盛种业有限公司 Hebei Wansheng Seed Industry Co.,Ltd
	中科 11 Zhongke 11	北京联创种业有限公司 Beijing Lianchuang Seed Industry Co.,Ltd
甜玉米 Sweet maize	京科甜 608 Jingketian 608	北京华奥农科玉育种开发有限公司 Beijing Huaao Nongkeyu Breeding Development Co.,Ltd
	红甜糯 144 Hongtiannuo 144	河北大禹种业有限公司 Hebei Dayu Seed Industry Co.,Ltd
	科白糯 8 号 Kebainuo 8	四川种都高科种业有限公司 Sichuan Zhongdu Gaoke Seed Industry Co.,Ltd
	金甜 60 Jintian 60	河北大禹种业有限公司 Hebei Dayu Seed Industry Co.,Ltd

1.2 试验方法

将风干后的土壤过 2 mm 筛,然后每 kg(以烘干土计)土壤拌入 0、50、100、150 g 原油(所有处理的原油均为同一批次),充分搅拌(人工手搓以达到混合均匀),静置 7 d,使土壤颗粒与石油充分接触。

称取 80 g 各种浓度的石油污染土壤,平铺于培养皿(直径 90 mm)中,同一玉米品种每个石油污染浓度设置 3 次重复。认真挑选颗粒大小一致且饱满、无虫蛀的玉米种子。种子播种前用体积分数为 4% 次氯酸钠溶液浸泡 20 min 进行消毒后^[2,24-25],每个培养皿播 20 粒,播种深度为 1 cm 左右。播后浇足水分,置于恒温光照培养箱中 25 °C 下培养,光照时间为 12 h/d。每天定时观察,加水保持土壤湿润,记录每天种子发芽数,3 d 内无新增发芽种子则为发芽结束时间^[2-3],最后确定所有处理的培养时间均为 9 d。发芽结束后测定幼苗的苗高、根长、地上部生物量、根质量和根系表面积。

1.3 测定指标

测定指标包括萌发指标和生长指标^[26-27]。萌发指标分别为发芽率、发芽指数和相对发芽率;生长指标分别为幼苗苗高、根长、地上部生物量、根质量和根系表面积。萌发指标的计算公式如下:

$$Gr = \sum Gt / T \times 100\%$$

式中,Gr 为发芽率;Gt 为在时间 t 时的发芽数(个);T 为供试种子总数(个)。

$$Gi = \sum (Gt / Dt)$$

式中,Gi 为发芽指数;Gt 为在时间 t 时的发芽数(个);Dt 为相应的发芽时间(d)。

相对发芽率 = 处理组发芽率 / 对照组发芽率 × 100%

试验结束后,用自来水将整株植物冲洗干净,用剪刀分取为地上部和地下部(根部),然后用 MICROTEK 根系扫描仪(型号: MRS-9600TFU2L)测定植株根长和根系表面积,用直尺测定植株苗高、用电子天平测定植株鲜质量(包括地上部生物量和根质量)。

1.4 数据处理

采用 Excel 2010 和 DPSv 14.10 进行数据处理和方差分析,采用 Duncan's 法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同土壤石油污染浓度对玉米种子萌发的影响

某一植物能否修复石油污染土壤的前提是该种子在石油污染胁迫下是否具有较强的萌发能力^[2]。发芽率是各处理组发芽数与供试种子总数的比值。在不同石油污染浓度的处理下不同品种玉米种子的发芽率情况如表 2 所示,在 50 g/kg 石油污染浓度下,9 个玉米品种的种子发芽率与对照(0 g/kg)相比其差异均不显著,说明低浓度的土壤石油污染对 9 个玉米品种的种子萌发无显著影响;随着土壤石油污染浓度的升高,9 个玉米

品种的种子发芽率均呈现显著下降的趋势,表明高浓度的土壤石油污染对玉米种子的萌发产生显著的抑制作用;但在较高的石油污染浓度(100 g/kg)下,‘联创 808’‘郑单 958’‘中科 11’和‘京科甜 608’4 个玉米品种的种子发芽率与较低浓度(0 g/kg 和 50 g/kg)的处理均无显著差异,表明这 4 个玉米品种的种子对高浓度的石油污染具有较强的耐性。

从表 2 可知,玉米种子发芽率受到种子自身条件和石油污染浓度的双重影响。在没有添加石油的条件下(0 g/kg 处理),9 个玉米品种的种子发芽率为 66.7%~100%;而‘红甜糯 144’和‘金甜 60’品种的种子发芽率较低,分别为 73.3%和 66.7%,则显著低于其他品种。可见 9 个玉米品种的种子在没有石油污染的条件下其发芽率就存在差异。通过计算各种子的相对发芽率[假定对照(0 g/kg)的发芽率为 100%,各处理的发芽率

与对照发芽率的百分比即为相对发芽率]^[23]消除这种差异,从而更准确的比较各玉米种子对土壤石油污染的耐受性^[2-3]。由表 2 可知,在 50 g/kg 石油污染浓度处理下,‘万盛 68’(饲料玉米)的相对发芽率显著高于‘金甜 60’(甜玉米);100 g/kg 石油污染浓度下,‘联创 808’和‘中科 11’(2 种饲料玉米)的相对发芽率显著高于‘红甜糯 144’和‘科白糯 8 号’(2 种甜玉米);而在 150 g/kg 石油污染浓度下,‘郑单 958’和‘万盛 68’(2 种饲料玉米)的相对发芽率显著高于‘红甜糯 144’‘科白糯 8 号’和‘金甜 60’3 种甜玉米。由此可见,在各种石油污染浓度下,饲料玉米的相对发芽率均高于甜玉米,且石油污染浓度越高其表现越明显。在最高的石油污染浓度(150 g/kg)下,饲料玉米种子的真实发芽率仍然高达 65%~78.3%,而甜玉米仅为 8.3%~48.3%,表明饲料玉米种子具有更强的忍耐土壤石油污染的能力。

表 2 不同石油污染浓度处理玉米种子发芽率和相对发芽率

Table 2 Germination rate and relative germination rate of maize seeds under different petroleum hydrocarbon concentrations

玉米品种 Maize cultivars	石油污染浓度/(g/kg) Petroleum concentration							
	发芽率/% Germination rate				相对发芽率/% Relative germination rate			
	0	50	100	150	50	100	150	
饲料玉米 Forage maize	先优 666 Xianyou 666	100.0±0.0 aA	100.0±0.0 a	50.0±39.7 b	66.7±12.6 ab	100.0±0.0 AB	50.0±39.7 C	66.7±12.6 ABC
	联创 808 Lianchuang 808	98.3±2.9 aA	95.0±0.0 a	95.0±5.0 a	66.7±5.8 b	96.6±0.0 AB	96.6±5.1 A	67.8±5.9 ABC
	郑单 958 Zhengdan 958	100.0±0.0 aA	100.0±0.0 a	83.3±17.6 ab	78.3±5.8 b	100.0±0.0 AB	83.3±17.6 ABC	78.3±5.8 A
	万盛 68 Wansheng 68	90.0±10.0 abA	95.0±8.7 a	66.7±14.4 b	65.0±20.0 b	105.6±9.6 A	74.1±16.0 ABC	72.2±22.2 AB
	中科 11 Zhongke 11	100.0±0.0 aA	98.3±2.9 a	95.0±5.0 a	68.3±14.4 b	98.3±2.9 AB	95.0±5.0 A	68.3±14.4 ABC
甜玉米 Sweet maize	京科甜 608 Jingketian 608	95.0±5.0 aA	95.0±0.0 a	83.3±7.6 ab	48.3±16.1 b	100.0±0.0 AB	87.7±8.0 AB	50.9±16.9 BC
	红甜糯 144 Hongtiannuo144	73.3±10.4 aB	70.0±13.2 a	38.3±12.6 b	8.3±2.9 b	95.5±18.0 AB	52.3±17.2 BC	11.4±3.9 D
	科白糯 8 号 Kebainuo 8	95.0±5.0 aA	83.3±17.6 a	45.0±18.0 b	45.0±5.0 b	87.7±18.5 AB	47.4±19.0 C	47.4±5.3 C
	金甜 60 Jintian 60	66.7±17.6 aB	56.7±7.6 ab	41.7±15.3 bc	31.7±5.8 c	85.0±11.5 B	62.5±22.9 ABC	47.5±8.7 C

注:数值为“平均值±标准差”(n=3)。同行数据后不同小写字母或同列数据后不同大写字母表示处理间差异显著(P<0.05),下同。

Note: The data are “mean±SD” (n=3). Different lowercase letters within the same rows or different uppercase letters within the same columns indicate significant difference between treatments(P<0.05), and the same below.

发芽指数是植物种子的活力指标,发芽指数越高,活力就越高。由表 3 可以看出,随着石油污染浓度的递增,9 个玉米品种的种子发芽指数均呈现显著下降的趋势。表明在土壤石油污染胁迫下玉米种子的活力水平受到抑制,且随着石油污染浓度的增加,其种子活力水平持续下降。但是在土壤石油污染浓度为 50 g/kg 条件下,‘先优 666’‘万盛 68’和‘科白糯 8 号’的种子发芽指数与对照(0 g/kg)均无显著差异,表明‘先优 666’‘万盛 68’和‘科白糯 8 号’这 3 个玉米品种能够忍耐浓度为 50 g/kg 的土壤石油污染胁迫对种子

萌发的影响。

由表 3 可知,在 100 g/kg 的石油污染浓度下,饲料玉米品种‘先优 666’的种子发芽指数与 4 个甜玉米品种无显著差异;而饲料玉米品种‘万盛 68’的种子发芽指数与甜玉米品种‘京科甜 608’无显著差异,但显著高于其他 3 个甜玉米品种;其他 3 个饲料玉米品种‘联创 808’‘郑单 958’和‘中科 11’的种子发芽指数则显著高于 4 个甜玉米品种。而在石油污染浓度为 0、50 和 150 g/kg 条件下,5 个饲料玉米品种的种子发芽指数均显著高于 4 个甜玉米品种。由此可见在各种石油污染浓

度下饲料玉米的种子活力强于甜玉米。从 5 个饲料玉米品种来看,在石油添加量为 0 g/kg 处理下,‘中科 11’品种的种子发芽指数显著高于其他 4 种饲料玉米;在 50 g/kg 石油污染浓度下,5 个饲料玉米的种子发芽指数均无显著差异;在 100

g/kg 和 150 g/kg 石油污染浓度下,‘联创 808’‘郑单 958’和‘中科 11’品种的种子发芽指数均无显著差异,且均处在最高水平。由此表明,‘联创 808’‘郑单 958’和‘中科 11’这 3 个饲料玉米品种在高浓度的石油胁迫下仍具有较高的种子活力。

表 3 不同石油污染浓度处理下玉米种子发芽指数

Table 3 Germination index of maize seeds under different petroleum hydrocarbon concentrations

玉米品种 Maize cultivars	石油污染浓度/(g/kg) Petroleum concentration				
	0	50	100	150	
饲料玉米 Forage maize	先优 666 Xianyou 666	8.23±1.36 aB	6.36±0.94 aA	1.86±1.72 bCD	2.10±0.49 bB
	联创 808 Lianchuang 808	7.45±0.60 aB	5.59±0.33 bA	4.87±0.68 bA	2.29±0.23 cAB
	郑单 958 Zhengdan 958	8.39±0.35 aB	6.17±0.05 bA	4.41±1.26 cAB	2.92±0.29 dA
	万盛 68 Wansheng 68	5.79±0.65 aC	6.13±1.31 aA	3.05±0.63 bBC	2.09±0.64 bB
	中科 11 Zhongke 11	10.08±0.22 aA	6.22±0.63 bA	5.03±0.43 cA	2.81±0.61 dA
甜玉米 Sweet maize	京科甜 608 Jingketian 608	4.38±0.26 aD	3.32±0.17 bB	2.07±0.19 cCD	0.70±0.23 dC
	红甜糯 144 Hongtiannuo 144	2.33±0.35 aE	1.28±0.47 bC	0.55±0.25 cD	0.09±0.06 cC
	科白糯 8 号 Kebainuo 8	4.39±0.39 aD	3.37±1.27 aB	0.95±0.48 bD	0.71±0.09 bC
	金甜 60 Jintian 60	2.12±0.76 aE	1.29±0.26 bC	0.82±0.10 bcD	0.34±0.08 cC

2.2 不同土壤石油污染浓度对玉米幼苗生长性状的影响

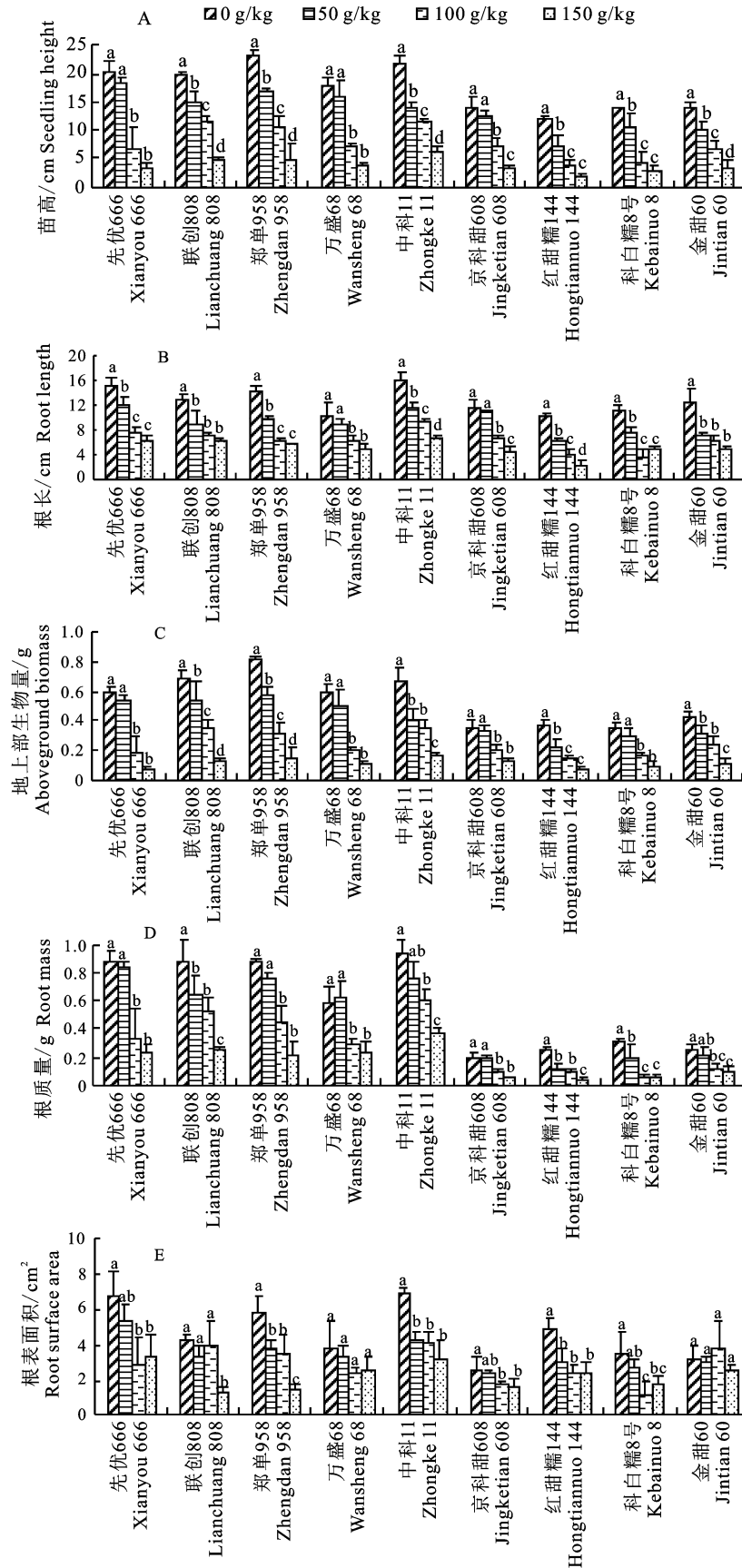
从图 1 可以发现,随着石油污染浓度的升高,9 个玉米品种的苗高、根长、地上部生物量和根质量 4 个生长指标均呈现显著下降的趋势(图 1-A、B、C、D);除了‘联创 808’‘万盛 68’‘科白糯 8 号’和‘金甜 60’以外其他 5 个玉米品种根系表面积也均随着石油污染浓度的升高而呈现显著减小的趋势(图 1-E)。在较低的石油污染浓度(50 g/kg)处理下,除了‘红甜糯 144’以外其他 8 个玉米品种的 1 个或多个生长指标与对照(0 g/kg)无显著差异(图 1-A、B、C、D、E);但是在较高的石油污染浓度(100 g/kg 和 150 g/kg)处理下,9 个玉米品种的苗高、根长、地上部生物量和根质量等 4 个生长指标均显著低于对照(见图 1-A、B、C、D)。表明供试的 9 个玉米品种中有 8 个品种对低浓度(50 g/kg)的土壤石油污染具有程度不同的耐性,而较高的土壤石油污染浓度(100 g/kg 和 150 g/kg)则显著抑制 9 个玉米品种幼苗的生长。

2.3 同一土壤石油污染浓度下不同玉米幼苗生长性状的比较

植物生长性状(苗高、根长和生物量等)是修复石油污染土壤的重要指标,一般认为,同一时期内植物生长性状愈良好,则修复效果愈好^[10]。

由图 2-A、B、C、D、E 可知,在同一石油污染浓度(包括对照 0 g/kg)处理下,9 个玉米品种的

苗高、根长、地上部生物量、根质量和根系表面积等 5 项生长指标均呈现出显著差异的现象。在各种石油污染浓度下,5 个饲料玉米品种(‘先优 666’‘联创 808’‘郑单 958’‘万盛 68’和‘中科 11’)的根质量均显著高于 4 个甜玉米(‘京科甜 608’‘红甜糯 144’‘科白糯 8 号’和‘金甜 60’)(图 2-D),玉米的其他生长指标均是饲料玉米最高而甜玉米最低(图 2-A、B、C、E),表明在各种土壤石油污染浓度(包括对照 0 g/kg)下,饲料玉米的生长性状均优于甜玉米。从 5 个饲料玉米品种来看(图 2),在没有添加石油(0 g/kg)的条件下,‘中科 11’‘郑单 958’和‘先优 666’分别有 3 项(根长、根质量和根系表面积)、2 项(苗高和地上部生物量)和 1 项(根系表面积)生长指标处于最高水平,另外分别有 1 项(苗高)、2 项(根质量和根系表面积)和 2 项(根长和根质量)生长指标处于次高水平。在石油污染浓度为 50 g/kg 处理下,‘先优 666’和‘郑单 958’品种分别有 4 项(除地上部生物量外)和 1 项(地上部生物量)生长指标处于最高水平,另外分别有 1 项(地上部生物量)和 2 项(苗高和根质量)生长指标处于次高水平;而中科 11 品种有 3 项(根长、根质量和根系表面积)生长指标处于次高水平,但有 2 项(苗高和地上部生物量)生长指标处于最低水平(5 个饲料玉米品种最低)。在石油污染浓度为 100 g/kg 处理下,‘中科 11’和‘联创 808’分别有 5 项和 4 项(除根长

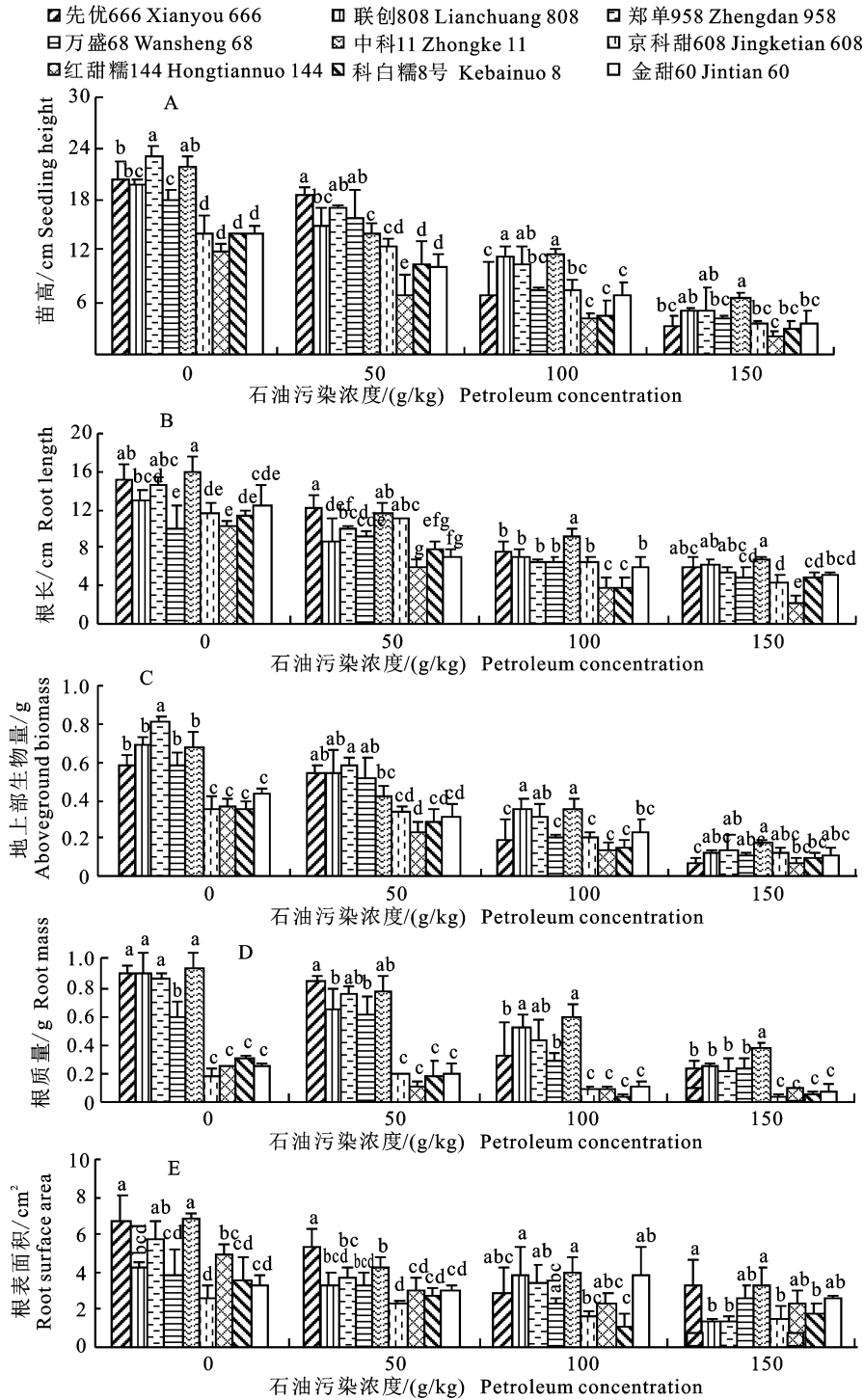


同一玉米品种不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letters after the same maize cultivar indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图 1 不同石油污染浓度处理下玉米幼苗生长指标

Fig. 1 Growth indexes of maize seedlings under different petroleum hydrocarbon concentrations



同一石油污染浓度不同小写字母表示处理间差异显著 ($P < 0.05$)

Different lowercase letter after the same petroleum concentration indicate significant difference between treatments ($P < 0.05$)

图2 同一石油污染浓度处理下不同玉米生长指标的比较

Fig. 2 Comparison of different maize growth indexes under same petroleum concentration

外)生长指标处于最高水平,‘郑单 958’有 4 项(除根长外)生长指标处于次高水平。在石油污染浓度为 150 g/kg 处理下,‘中科 11’的 5 项生长指标均处于最高水平。由此可见,在没有添加石油

的条件下,生长性状最优的饲料玉米品种是‘中科 11’,其次是‘郑单 958’和‘先优 666’;在浓度为 50 g/kg 的石油污染胁迫下,生长性状最优的饲料玉米品种为‘先优 666’,其次是‘郑单 958’;而

在浓度为 100~150 g/kg 的石油污染胁迫下,生长性状最优的饲料玉米品种均为‘中科 11’。

3 讨论

本研究发现不同品种的玉米在低浓度(50 g/kg)的石油污染条件下,种子的发芽率均与对照(0 g/kg)没有显著差异,这与李小利等^[28]的研究结果一致,这可能是由于低浓度的石油污染物在种子萌发前无法穿透表皮损伤种子,所以对种子萌发率没有影响。本研究还发现在高浓度(150 g/kg)的石油污染胁迫下,大多数玉米品种的种子发芽率与对照(0 g/kg)均存在显著差异。这是因为种子周围的土壤中含有大量的石油烃,其形成油膜包裹种子,使种子无法正常呼吸和吸收水分,从而影响种子的萌发^[28]。而肖易等^[23]研究发现在石油污染浓度为 40~60 g/kg 条件下,玉米的种子发芽率为 81.67%~85%,说明玉米种子在石油污染胁迫下仍具有较强的萌发能力。本研究发现在石油污染浓度为 50 g/kg 条件下,5 个饲料玉米品种的种子发芽率为 95%~100%;而石油污染浓度为 150 g/kg 条件下,5 个饲料玉米品种的种子发芽率仍然高达 65.0%~78.3%(相对发芽率为 66.7%~78.3%)。李先梅等^[10]的研究发现,墨西哥玉米草和苏丹草在土壤石油污染浓度为 60 g/kg 时,其种子发芽率分别为 52.5%和 57.5%(相对发芽率分别为 65.6%和 63.3%),均高于黑麦草和紫花苜蓿。由此可见,本研究的 5 个饲料玉米品种在高浓度的石油污染胁迫下仍然具有较强的耐性。

生物量是植物修复石油污染土壤的重要指标,植物生长形成的生物量愈大,意味着该植物修复石油污染的潜力愈强^[29]。本研究发现随着石油污染浓度的上升,玉米的生物量均呈现下降趋势。Tran 等^[30]研究发现在所有石油污染土壤处理中,金合欢的萌发能力显著下降,且随着土壤含油率的增加,幼苗的生长参数、地上和地下部干物质量均显著降低。而本试验结果表明在低浓度(50 g/kg)石油污染条件下对玉米幼苗的生长未产生抑制作用,而中高浓度(100~150 g/kg)石油污染则对玉米幼苗的生长产生了显著的抑制作用。在生态系统中,植物和土壤是两个紧密联系的子系统,它们相互影响^[31],当土壤受到石油污染时,土壤中石油烃会在植物根系表面包裹形成油膜,破坏土壤的物理结构,使植物无法从受污染

的土壤中吸收和储存水分和造成生理干旱,从而抑制植物的生长^[32]。在石油污染土壤中,石油主要通过两种途径抑制植物的生长:第一,石油烃组分中分子量较高的部分会包裹在土壤颗粒及植物根系的表面,不仅会降低土壤的透气性和亲水性,还会使植物的呼吸和蒸腾作用受到抑制,从而使植物生长受阻;第二,石油烃组分中分子量较小的部分一般具有高脂溶性,脂溶性物质可以穿过植物的细胞膜,从而对植物产生毒害作用,抑制植物的生长^[33]。

4 结论

(1) 随着土壤石油污染浓度的递增,供试的 9 个玉米品种的种子萌发指标和幼苗生长指标均呈现显著下降的趋势;而较高的土壤石油污染浓度(100 g/kg 和 150 g/kg)则显著抑制 9 个玉米品种幼苗的生长。

(2) 在各种浓度的土壤石油污染胁迫下,饲料玉米的种子萌发性状和幼苗生长性状均优于甜玉米。在最高浓度(150 g/kg)土壤石油污染的胁迫下,饲料玉米种子的真实发芽率仍然高达 65%~78.3%,而甜玉米仅为 8.3%~48.3%,表明饲料玉米种子具有更强的忍耐土壤石油污染的能力。

(3) 在较低的土壤石油污染浓度(50 g/kg)胁迫下,供试的 9 个玉米品种中‘先优 666’品种的耐性最强,其种子萌发性状和幼苗生长性状均最优;而在较高的土壤石油污染浓度(100 g/kg 和 150 g/kg)胁迫下,‘中科 11’玉米品种则具有最强的耐性。因此,‘先优 666’和‘中科 11’玉米品种可分别作为修复低浓度和中高浓度石油污染土壤的候选植物。

参考文献 Reference:

- [1] 黄 艺,汪 杰,陈慧苑,等. 中国主要产油区土壤石油污染及其毒性评估[M]. 北京:科学出版社,2018:1-5.
HUANG Y, WANG J, CHEN H Y, *et al.* Soil Oil Pollution and Toxicity Assessment in Major Oil Producing Areas of China[M]. Beijing: Science Press, 2018: 1-5.
- [2] 祁迎春,王 建,王 宏,等. 陕北 7 种杂草种子对石油污染的耐受性研究[J]. 环境科技, 2014, 27(3): 5-9, 14.
QI Y CH, WANG J, WANG H, *et al.* Responses of seed germination of 7 weed plants to petroleum contamination [J]. *Environmental Science and Technology*, 2014, 27(3): 5-9, 14.
- [3] 祁迎春,王 建,同延安,等. 陕北石油污染土壤植物修复品

- 种的筛选[J]. 生态科学, 2015, 34(1): 148-153.
- QI Y CH, WANG J, TONG Y A, *et al.* Screening of weed plants for phytoremediation of petroleum-contaminated soils[J]. *Ecological Science*, 2015, 34(1): 148-153.
- [4] 李 佳, 曹兴涛, 隋 红, 等. 石油污染土壤修复技术研究现状与展望[J]. 石油学报(石油加工), 2017, 33(5): 811-833.
- LI J, CAO X T, SUI H, *et al.* Overview of remediation technologies for petroleum-contaminated soils[J]. *Acta Petrolei Sinica (Petroleum Processing Section)*, 2017, 33(5): 811-833.
- [5] 王珍珍, 刘晓艳, 张新颖, 等. 长江口油污湿地植物根际微生态环境特征[J]. 环境科学学报, 2011, 31(5): 1026-1032.
- WANG ZH ZH, LIU X Y, ZHANG X Y, *et al.* Micro-environmental characteristics of plant rhizospheres in an oil-contaminated wetland at the Yangtze estuary[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(5): 1026-1032.
- [6] 王 靖, 张忠智, 苏幼明, 等. 石油污染土壤植物修复根际效应研究[J]. 石油化工高等学校学报, 2008, 21(2): 36-40.
- WANG J, ZHANG ZH ZH, SU Y M, *et al.* The rhizosphere effect in phytoremediation of the petroleum polluted soil[J]. *Journal of Petrochemical Universities*, 2008, 21(2): 36-40.
- [7] 彭胜巍, 周启星, 张 浩, 等. 8 种花卉植物种子萌发对石油烃污染土壤的响应[J]. 环境科学学报, 2009, 29(4): 786-790.
- PENG SH W, ZHOU Q X, ZHANG H, *et al.* Responses of seed germination of 8 ornamental plants to petroleum contamination[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2009, 29(4): 786-790.
- [8] 张松林, 董庆士, 周喜滨, 等. 人为石油污染土壤紫花苜蓿田间修复试验[J]. 兰州大学学报(自然科学版), 2008, 44(1): 47-50.
- ZHANG S L, DONG Q SH, ZHOU X B, *et al.* Field medicago Sativa L. phytoremediation on the artificial oil-polluted soil[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2008, 44(1): 47-50.
- [9] 陈 立, 张发旺, 刘少玉, 等. 中原油田石油污染土壤原位生物修复技术实验研究[J]. 环境工程学报, 2011, 5(10): 2385-2390.
- CHEN L, ZHANG F W, LIU SH Y, *et al.* Experimental study on in-situ bioremediation technique for oil contaminated soil in Zhongyuan oil field[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2011, 5(10): 2385-2390.
- [10] 李先梅, 肖 易, 吴芸紫, 等. 华北油田石油污染土壤的修复植物筛选[J]. 环境科学与技术, 2015, 38(6): 14-19.
- LI X M, XIAO Y, WU Y Z, *et al.* Screening of remediation plant for petroleum contaminated soils in Huabei Oilfield[J]. *Environmental Science & Technology*, 2015, 38(6): 14-19.
- [11] 山宝琴, 张永涛, 曹巧玲, 等. 6 种陕北适生豆科植物生长对原油污染土壤的响应[J]. 环境科学, 2014, 35(3): 1125-1130.
- SHAN B Q, ZHANG Y T, CAO Q L, *et al.* Growth responses of six leguminous plants adaptable in northern Shaanxi to petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1125-1130.
- [12] 李春荣, 王文科, 曹玉清. 石油污染土壤的生物修复研究[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(2): 234-238.
- LI CH R, WANG W K, CAO Y Q. Bioremediation of petroleum-contaminated soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(2): 234-238.
- [13] 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.
- GONG X F, RONG L, YANG L ZH, *et al.* Effect and ecotoxicity of maize growth in petroleum contaminated soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2011, 34(10): 71-75.
- [14] 许端平, 董天骄, 吕俊佳. 典型禾本科植物对石油污染土壤的修复作用[J]. 环境工程学报, 2012, 6(4): 1398-1402.
- XU D P, DONG T J, LÜ J J. Remediation of petroleum contaminated soil by typical gramineous plants[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2012, 6(4): 1398-1402.
- [15] AGBOGIDI O M, ESHEGBEYI O F. Performance of dactyodes edulis (Don. G. Lam H. J.) seeds and seedlings in a crude oil contaminated soil[J]. *Journal of Sustainable Forestry*, 2006, 22(3): 1-13.
- [16] JONG E D. The effect of a crude oil spill on cereals[J]. *Environmental Pollution*, 1980, 22(3): 187-196.
- [17] MERKL N, SCHULTZE-KRAFT R, INFANTE C. Phytoremediation in the tropics-the effect of crude oil on the growth of tropical plants[J]. *Bioremediation Journal*, 2004, 8(3/4): 177-184.
- [18] ISSOUFI I, RHYKERD R L, SMICIKLAS K D. Seedling growth of agronomic crops in crude oil contaminated soil[J]. *Journal of Agronomy and Crop Science*, 2006, 192(4): 310-317.
- [19] KISIC I, MESIC S, BASIC F, *et al.* The effect of drilling fluids and crude oil on some chemical characteristics of soil and crops[J]. *Geoderma*, 2009, 149(3): 209-216.
- [20] MERKL N, SCHULTZE-KRAFT R, INFANTE C. Phytoremediation in the tropics-influence of heavy crude oil on root morphological characteristics of graminoids[J]. *Environmental Pollution*, 2005, 138(1): 86-91.
- [21] EKUNDAYO E O, EMEDE T O, OSAYANDE D I. Effects of crude oil spillage on growth and yield of maize (*Zea mays* L.) in soils of midwestern Nigeria[J]. *Plant Foods for Human Nutrition*, 2001, 56(4): 313-324.
- [22] TANG J CH, WANG M, WANG F, *et al.* Eco-toxicity of petroleum hydrocarbon contaminated soil[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2011, 23(5): 845-851.
- [23] 肖 易, 李先梅, 韦政伟, 等. 华北油田土壤石油污染对玉米和小麦生长的影响[J]. 长江大学学报(自然科学版),

- 2014,11(17):43-46.
- XIAO Y,LI X M,WEI ZH W,*et al.* Effect of petroleum pollutant in soil on growth of maize and wheat in Huabei Oilfield[J]. *Journal of Yangtze University(Natural Science Edition)*,2014,11(17):43-46.
- [24] 鞠世杰,刘 昊,郑 剑,等.石油污染对植物种子发芽和早期生长的影响[J].北方农业学报,2016,44(6):59-62.
- JU SH J,LIU H,ZHENG J,*et al.* Effect of petroleum pollution on seed germination and early growth of several plants[J]. *Journal of Northern Agriculture*,2016,44(6):59-62.
- [25] 唐 琳,刘建国,马欣荣.两种灭菌方法对番茄种子灭菌效果的评价[J].种子,2008,27(9):17-18.
- TANG L,LIU J G,MA X R. Evaluation the efficiency of sterilizing tomato seeds with two sterilants [J]. *Seed*,2008,27(9):17-18.
- [26] 马艺文,齐 月,李俊生,等.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[J].应用与环境生物学报,2019,25(2):313-320.
- MA Y W,QI Y,LI J SH,*et al.* Effects of petroleum pollution on germination and seedling growth:*Suaeda salsa* vs. *Suaeda glauca*[J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*,2019,25(2):313-320.
- [27] 王友保.土壤污染生态修复实验技术[M].北京:科学出版社,2018:11.
- WANG Y B. Experimental Technology of Ecological Remediation of Soil Pollution[M]. Beijing: Science Press,2018:11.
- [28] 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.
- LI X L,LIU G B,XUE SH,*et al.* Effects of crude oil on growth of plant seedling and soil respiration in loess hilly region of North Shaanxi[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*,2007,21(3):95-98,127.
- [29] 庞 喆.陕北 5 种杂草种子对石油污染的耐受性研究[J].农村经济与科技,2020,31(21):48-50.
- PANG ZH. Tolerance of five weed seeds to petroleum pollution in Northern Shaanxi[J]. *Rural Economy and Science and Technology*,2020,31(21):48-50.
- [30] TRAN T H,GATI E M,ESHEL A,*et al.* Germination, physiological and biochemical responses of acacia seedlings (*Acacia raddiana* and *Acacia tortilis*) to petroleum contaminated soils[J]. *Environmental Pollution*,2018(234):642-655.
- [31] 董书瑶,张风杰,隋小文,等.石油污染对土壤速效养分的影响[J].绿色科技,2020(14):145-147.
- DONG SH Y,ZHANG F J,SUI X W,*et al.* Effects of petroleum pollution on soil available nutrients[J]. *Journal of Green Science and Technology*,2020(14):145-147.
- [32] 张学佳,纪 巍,康志军,等.石油类污染物对土壤生态环境的危害[J].化工科技,2008,16(6):60-65.
- ZHANG X J,JI W,KANG ZH J,*et al.* Hazard analysis of petroleum pollutants in soil[J]. *Science & Technology in Chemical Industry*,2008,16(6):60-65.
- [33] 刘 健,李妍丽,柯 林.玉米和黄豆对酸性土壤中石油的去除效果[J].生态与农村环境学报,2012,28(3):300-304.
- LIU J,LI Y L,KE L. Effects of maize and soybean phytoremediating petroleum polluted acid soil[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*,2012,28(3):300-304.

Effect of Soil Petroleum Pollution on Seed Germination and Seedling Growth of Nine Maize Cultivars(*Zea mays* L.)

LUO Qiao¹, DUAN Lei¹, ZHAO Xianlin¹, YANG Ting¹,
LI Yaxin¹, JIA Hanzhong² and ZHOU Jianli¹

(1. College of Agriculture, Yangtze University, Jingzhou Hubei 434025 China;

2. College of Natural Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling Shaanxi 712100, China)

Abstract To understand the effect of soil oil contamination on the germination and growth of different maize cultivars, soil contaminated by crude oil was artificially simulated to investigate the response characteristics of seed germination and seedling growth of 9 maize cultivars (5 forage maize cultivars and 4 sweet maize cultivars) at four concentrations (0, 50, 100 and 150 g/kg). The results indicated that the seed germination index and seedling growth index (seedling height, root length, aboveground biomass and root mass) decreased significantly under the treatment of different pollution concentrations. Meanwhile, forage maize showed stronger tolerance to the oil contamination compared with sweet maize. Optimal seed germination rate and seedling growth of ‘Xianyou 666’ were observed with the oil concentration of 50 g/kg, and ‘Zhongke 11’ was observed with the oil concentration of 100 and 150 g/kg. Therefore, ‘Xianyou 666’ and ‘Zhongke 11’ have the potential to remediate low-concentration and medium-high-concentration oil-contaminated soils, respectively.

Key words Maize; Oil pollution; Soil; Seed germination

Received 2021-07-07

Returned 2021-08-20

Foundation item National Key R&D Program(No. 2019YFC1804101).

First author LUO Qiao, female, master student. Research area: remediation of oil contaminated soil. E-mail: 1277859973@qq.com

Corresponding author ZHOU Jianli, male, Ph. D, associate professor. Research area: remediation of contaminated soil environment. E-mail: zhjl1233@163.com

(责任编辑: 成敏 Responsible editor: CHENG Min)