



农业资源与环境学报

中文核心期刊
中国科技核心期刊

JOURNAL OF AGRICULTURAL RESOURCES AND ENVIRONMENT

欢迎投稿 <http://www.aed.org.cn>

重金属Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发及生长的影响

李柯, 施宠, 王文全, 李阳

引用本文:

李柯, 施宠, 王文全, 等. 重金属Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发及生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 280–286.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13254/j.jare.2019.0051>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

模拟酸雨与镉复合胁迫对玉米幼苗生理状况的影响

陈佳月, 姜洪进, 解静芳, 李萌, 贾真真, 石晶

农业资源与环境学报. 2018, 35(6): 575–582 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2018.0031>

含Pb、Cd细颗粒物暴露对水稻、马铃薯早期生长的影响

杨帆, 杨和行, 王樱芝, 刘亚楠, 杨希晨

农业资源与环境学报. 2017, 34(5): 466–472 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0147>

铅胁迫对紫穗槐光合作用及生理生化特征的影响

周美利, 沈广爽, 赵瑞瑞, 高张莹, 陈国平, 石福臣

农业资源与环境学报. 2017, 34(3): 286–292 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2016.0301>

不同农作措施对少花蒺藜草(*Cenchrus pauciflorus* Benth)种子库及其繁殖能力的影响

张衍雷, 张瑞海, 付卫东, 宋振, 倪汉文, 张国良

农业资源与环境学报. 2015(3): 312–320 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2015.0040>

大型真菌重金属富集能力与机制研究进展

陈苗苗, 郑鑫, 李小方

农业资源与环境学报. 2017, 34(6): 499–508 <https://doi.org/10.13254/j.jare.2017.0170>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

李 柯, 施 宠, 王文全, 等. 重金属 Pb 胁迫下内生真菌感染对德兰臭草种子萌发及生长的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(2): 280–286.
LI Ke, SHI Chong, WANG Wen-quan, et al. Seed germination and growth effects of endophyte infection on *Melica transsilvanica* under Pb stress[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2020, 37(2): 280–286.

重金属 Pb 胁迫下内生真菌感染对德兰臭草种子萌发及生长的影响

李 柯, 施 宠, 王文全*, 李 阳

(新疆农业大学草业与环境科学学院, 乌鲁木齐 830052)

摘 要:为探讨内生真菌感染对 Pb 胁迫下植株生长生理及植株内 Pb 含量的影响,以德兰臭草染菌(Endophyte infected, E+)与不染菌(Endophyte free, E-)的种子为实验材料,设置不同浓度的 Pb 溶液对德兰臭草种子进行胁迫萌发试验,研究重金属 Pb 胁迫下内生真菌感染对宿主种子萌发及生长的影响。结果表明:5 mg·L⁻¹的 Pb 溶液能促进种子萌发,显著增加幼苗根长和干质量、鲜质量($P<0.05$)。随着胁迫浓度的增加,Pb 对德兰臭草种子的萌发、生长指标抑制程度逐渐加大。内生真菌感染能够缓解相同浓度下 Pb 胁迫对宿主的抑制程度,尤其当 Pb 胁迫浓度大于 800 mg·L⁻¹,E+种子的萌发率和发芽势均显著高于 E-种子($P<0.05$)。同时,内生真菌感染降低了德兰臭草幼苗中 Pb 含量,在大于 800 mg·L⁻¹的高浓度胁迫下,E+幼苗与 E-幼苗 Pb 含量差异显著($P<0.05$)。研究表明,内生真菌的感染有效缓解了 Pb 对德兰臭草种子萌发和生长的毒害作用,证实了共生微生物能增强宿主德兰臭草对重金属 Pb 的耐受性。

关键词:德兰臭草;内生真菌;种子萌发;铅胁迫

中图分类号:X53

文献标志码:A

文章编号:2095-6819(2020)02-0280-07

doi: 10.13254/j.jare.2019.0051

Seed germination and growth effects of endophyte infection on *Melica transsilvanica* under Pb stress

LI Ke, SHI Chong, WANG Wen-quan*, LI Yang

(College of Pratacultural and Environmental Sciences, Xinjiang Agricultural University, Urumqi 830052, China)

Abstract: *Melica transsilvanica* infected with (E+) or free from *Epichloë* sp. (E-) was studied using different concentrations of Pb to analyze the effect of Pb stress on seed germination, and to determine the effect of endophyte infection. The result showed that 5 mg·L⁻¹ Pb could promote seed germination, significantly improving root length, dry weight, and fresh weight of the seedlings ($P<0.05$). With increasing concentration of Pb, the germination and growth index of *Melica transsilvanica* seeds increased. *Epichloë guerini* infection alleviated the degree of host inhibition by Pb, especially when the Pb concentration was more than 800 mg·L⁻¹. Germination percentage and germination potential were significantly higher in E+ seedlings than in E- seedlings ($P<0.05$). Simultaneously, the presence of the fungus in the plant led to a decrease in the total Pb content. In conclusion, endophyte infection had a beneficial effect on Pb stress in the host *Melica transsilvanica*.

Keywords: *Melica transsilvanica*; endophyte; seed germination; Pb stress

收稿日期:2019-01-24 录用日期:2019-03-14

作者简介:李 柯(1993—),女,河南开封人,硕士研究生,研究方向为环境污染控制与修复。E-mail: 1182758431@qq.com

*通信作者:王文全 E-mail: wwq6804@163.com

基金项目:新疆维吾尔自治区自然科学基金面上项目(2016D01A041)

Project supported: Natural Science Foundation of Xinjiang Uygur Autonomous Region (2016D01A041)

随着我国工农业的快速发展,重金属污染问题日益严重^[1]。铅(Pb)是一种污染范围广、生物毒性大、容易被植物吸收的污染物,有研究表明,Pb可以抑制植物种子的萌发,对幼苗的生长造成一定程度的影响^[2]。

采用植物和菌根真菌共生体的方法来修复土壤重金属污染,已被多次证实是行之有效的办法^[3-4]。与菌根菌类似,内生真菌具有高度的特异性,可在寄主植物中度过近乎全部的生活周期并且不使寄主表现出任何症状^[5]。内生真菌也可以与植物形成共生体。有研究表明,禾草内生真菌赋予宿主植物很强的竞争能力,可以提高植物的抗旱性^[6-7]、抗盐碱性^[8]等。也有研究表明,内生真菌侵染能改善宿主对Al^[9]、Zn^[10]和Cu^[11]的耐受性,进而可以促进宿主对土壤重金属污染的修复能力^[12]。

德兰臭草(*Melica transsilvanica*)是禾本科臭草属多年生草本植物,植株较高大,在我国仅产自新疆北疆地区,生于海拔800~2000 m的落叶阔叶林下或干旱灌丛中及向阳干山坡上^[13]。近几年在新疆乌鲁木齐、石河子等地采样时,发现大量德兰臭草生长在公路两旁。将采集到的种子及植株用苯胺蓝染色后,发现该禾草带有内生真菌*E.guerinii*^[14],且带菌率普遍在90%以上^[15]。目前,关于内生真菌和植物的共生体增强宿主植物重金属耐性方面的相关研究报道较少,近年才受到学者的关注。

本研究通过比较德兰臭草带菌种子与不带菌种子在不同浓度重金属Pb的胁迫下,种子萌发、生物量以及幼苗对重金属的吸附量等指标,研究在重金属Pb胁迫下内生真菌对宿主植物的影响,为新疆地区重金属污染土壤修复提供基础资料和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验材料为德兰臭草种子,2016年采于新疆乌鲁木齐县小渠子乡围栏内(43°34'23.52"N、87°05'04.92"E、海拔1387 m)。选取颗粒饱满、大小均匀的种子,采用高温干热的方法获得德兰臭草不带菌(E-)种子^[16]。将带菌(E+)种子和E-种子先用2%的次氯酸钠溶液清洗8 min,蒸馏水冲洗3~5遍,再用75%的乙醇清洗5 min,蒸馏水清洗数遍。采用滤纸发芽床进行种子萌发试验。分别向每个培养皿中加入10 mL不同浓度的Pb(NO₃)₂溶液,以加蒸馏水作为对照,逐日观察种子发芽数(以胚芽长度达到种子一半为种子发芽的判断标准)。

1.2 Pb胁迫处理

采用双因素完全随机区组设计,对德兰臭草种子进行重金属Pb胁迫试验。因素之一是Pb²⁺浓度,设11个浓度水平,分别为0、5、100、300、800、1200、1500、2000、2500、3000、3500 mg·L⁻¹;因素之二是内生真菌侵染状况:E+和E-。每个处理设置三个重复,每个培养皿中放置50粒种子。试验持续15 d。

1.3 测定指标与方法

萌发率、发芽势、萌发指数、活力指数按照以下公式计算:

$$\text{萌发率} = (\text{15 d 发芽的种子数} / \text{种子的总数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽势} = (\text{前5 d 发芽的种子数} / \text{种子的总数}) \times 100\%$$

$$\text{发芽指数} GI = \sum G_i / D_i$$

式中: G_i 为不同时间发芽数; D_i 为相应发芽天数。

$$\text{活力指数} VI = GI \times S$$

式中: S 为种苗的鲜质量。

重金属胁迫处理结束后,用直尺测量幼苗的芽长、根长;用分析天平称量每个样本的鲜质量、干质量。

Pb含量的测定:石墨炉原子吸收法(TAS-990)。将样本用去离子水洗净、晾干,105℃杀青30 min,70℃烘干至质量恒定,准确称量植物样品1 g于消煮管中,加硝酸/高氯酸(4:1)混合溶液10 mL,浸泡过夜,在LWY-84B控温式远红外消煮炉上将溶液消解至无色透明,冷却至室温,用0.5 mol·L⁻¹的硝酸多次洗涤消煮管,洗液合并于10 mL容量瓶中并定容至刻度,上机测定。

1.4 数据分析

采用SPSS 19.0对所测数据进行统计分析,用平均值±标准误差表示测定结果。采用单因素方差分析检验带菌与不带菌种子间和Pb胁迫处理间的差异,采用双因素方差分析检验内生真菌侵染与Pb胁迫之间的交互作用,用Duncan法对同一指标测得的数据进行多重比较。采用Excel 2003进行作图。

2 结果与分析

2.1 Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发的影响

如表1所示,不同浓度的Pb胁迫溶液对德兰臭草种子的萌发指标均具有极显著的影响($P < 0.01$);内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发率、发芽势无显著影响($P > 0.05$),对发芽指数、活力指数具有极显著的影响。

表1 内生真菌侵染和重金属Pb胁迫对德兰臭草影响的双因素方差分析

Table 1 Two-way ANOVA of the influence of endophyte infection and Pb stress on *Melica transsilvanica*

变量 Variable	内生真菌侵染 Endophyte infection		铅胁迫 Pb stress		交互作用 Interaction	
	F	Sig.	F	Sig.	F	Sig.
萌发率 Germination percentage	1.44	NS	1245.75	**	28.92	**
发芽势 Germination potential	2.93	NS	24.52	**	1.39	NS
发芽指数 Germination index	12.41	**	435.47	**	19.14	**
活力指数 Vitality index	60.23	**	588.42	**	67.20	**
芽长 Bud length	214.27	**	462.86	**	59.67	**
根长 Root length	150.11	**	705.40	**	127.28	**
鲜质量 Fresh weight	71.31	**	1657.84	**	48.90	**
干质量 Dry weight	0.76	**	787.58	**	87.06	**
Pb含量 Pb content	524.31	**	890.13	**	84.24	**

注: NS表示影响不显著($P>0.05$); *表示影响显著($P<0.05$); **表示影响极显著($P<0.01$)。

Note: NS indicates no significant influence; * indicates the significant influence ($P<0.05$); ** indicates the extremely significant influence ($P<0.01$).

响($P<0.01$); Pb胁迫与内生真菌侵染的交互作用对种子发芽势无显著影响($P>0.05$), 对其他萌发指标均具有极显著的影响($P<0.01$)。

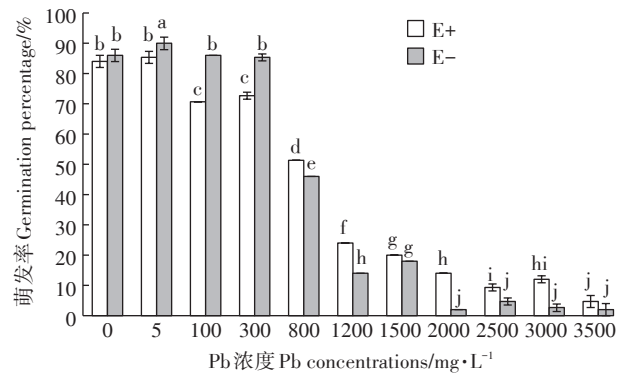
2.1.1 对种子萌发率的影响

Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发率的影响, 如图1所示。5 mg·L⁻¹的胁迫浓度对种子萌发有促进作用, 其他浓度的Pb胁迫对德兰臭草种子的萌发率均具抑制作用, 抑制程度随着Pb浓度的升高而逐渐增强。当Pb胁迫浓度在5、100、300 mg·L⁻¹时, 种子萌发率与对照相近。

在5 mg·L⁻¹胁迫下, E+种子萌发率与对照的差异不显著, E-种子萌发率显著高于E+ ($P<0.05$)。在100、300 mg·L⁻¹胁迫下, E-种子与对照相比差异不显著, 但显著高出相同浓度下E+种子萌发率15个百分点和12个百分点 ($P<0.05$)。当Pb胁迫浓度高于300 mg·L⁻¹时, 萌发率急剧下降, Pb胁迫浓度是800 mg·L⁻¹时, E+种子萌发率为51%, E-萌发率为46%, 可以近似地认为该浓度是德兰臭草在Pb胁迫下的半效应浓度; 当Pb胁迫浓度为800~3500 mg·L⁻¹时, E+种子萌发率均高于E-种子, 尤其在胁迫浓度为800、1200、2000、2500、3000 mg·L⁻¹时, 差异达显著水平 ($P<0.05$)。

2.1.2 对种子发芽势的影响

如图2所示, 随着Pb胁迫浓度增加, 德兰臭草种子的发芽势呈降低趋势, 均显著低于对照 ($P<0.05$)。Pb胁迫浓度为5、100 mg·L⁻¹时, E+的发芽势高于E-, 但不具有显著差异 ($P>0.05$)。胁迫浓度为300~3000 mg·L⁻¹时, E+发芽势显著高于E- ($P<0.05$)。



不同字母表示差异显著 ($P<0.05$)。下同

Different letters indicate significant difference ($P<0.05$). The same below

图1 不同浓度Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子萌发率的影响

Figure 1 Effect of endophyte infection on germination percentage of *M.transsilvanica* seed under different Pb concentrations

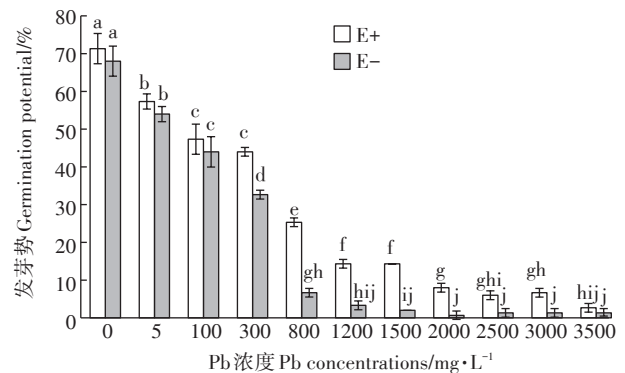


图2 不同浓度Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子发芽势的影响

Figure 2 Effect of endophyte infection on germination potential of *M.transsilvanica* seed under different Pb concentrations

2.1.3 对种子发芽指数的影响

德兰臭草种子的发芽指数随Pb胁迫浓度的增加而逐渐降低,均显著低于对照($P<0.05$),如图3所示。胁迫浓度为100~3000 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+种子发芽指数显著高于E- ($P<0.05$)。3500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫浓度下,E+、E-的发芽指数分别为1.22、0.71,二者差异不显著($P>0.05$)。

2.1.4 对种子活力指数的影响

如图4所示,Pb胁迫浓度为5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,种子的活力指数显著高于对照($P<0.05$)。德兰臭草种子的活力指数随Pb胁迫浓度的增加而逐渐降低,均显著低于对照($P<0.05$)。100~1500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫浓度下,E+的活力指数显著高于E- ($P<0.05$)。2000~3500 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 胁迫浓度下,E+的活力指数高于E-,但二者不具有显著差异($P>0.05$)。

2.2 Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草幼苗生长指标的影响

重金属Pb胁迫、内生真菌侵染均极显著影响德兰臭草幼苗的根长、芽长,且重金属Pb胁迫和内生真菌侵染之间的交互作用对根长、芽长也具有极显著的影响($P<0.01$,表1)。

随着Pb胁迫浓度的增加,德兰臭草芽长呈降低趋势,根长呈先升高后降低的趋势(表2)。当Pb浓度为5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+幼苗芽长显著低于对照($P<0.05$)。当Pb胁迫浓度大于100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+植株的芽长均显著大于相同浓度下E-植株($P<0.05$)。Pb胁迫浓度为100、300、800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E-芽长分别显著低于E+芽长66%、84%、66%。

Pb浓度为5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,幼苗根长显著高于对照

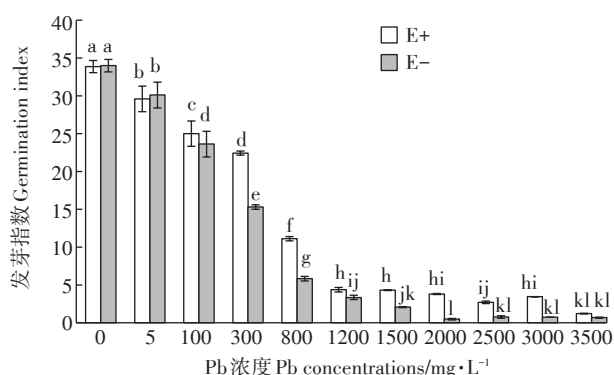


图3 不同浓度Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子发芽指数的影响

Figure 3 Effect of endophyte infection on germination index of *M. transsilvanica* seed under different Pb concentrations

($P<0.05$), E+与E-差异不显著;Pb浓度为100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+根长显著高于对照,且E+根长显著高于E- ($P<0.05$);当胁迫浓度为100、300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+植株根长显著高于E-植株($P<0.05$)。Pb胁迫对德兰臭草胚根生长的抑制作用大于对胚芽生长的抑制作用,胚根在Pb胁迫浓度大于1200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不再生长。

2.3 Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草幼苗生物量的影响

重金属Pb胁迫、内生真菌侵染均极显著影响德兰臭草幼苗的干质量、鲜质量,且重金属Pb胁迫和内生真菌侵染之间的交互作用对幼苗干质量、鲜质量也具有极显著的影响($P<0.01$,表1)。

随着Pb胁迫浓度的增加,德兰臭草种子的鲜质量、干质量均呈先增加后减小的趋势,如表2所示。Pb胁迫浓度为5、100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,幼苗干质量、鲜质量均高于对照,浓度为5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,幼苗干质量、鲜质量显著高于对照($P<0.05$)。Pb胁迫浓度为100~1200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+鲜质量显著高于相同浓度E-幼苗的鲜质量($P<0.05$);Pb胁迫浓度为5~300 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$,E-干质量显著大于相同浓度下E+的干质量($P<0.05$),Pb胁迫浓度在800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+与E-干质量差异不显著($P>0.05$),而Pb浓度在1200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+干质量显著大于E- ($P<0.05$)。

2.4 不同Pb处理下内生真菌侵染对德兰臭草幼苗中Pb含量的影响

重金属Pb胁迫、内生真菌侵染均极显著影响德兰臭草幼苗中Pb含量,且重金属Pb胁迫和内生真菌侵染之间交互作用对Pb含量也具有极显著影响($P<0.01$,表1)。

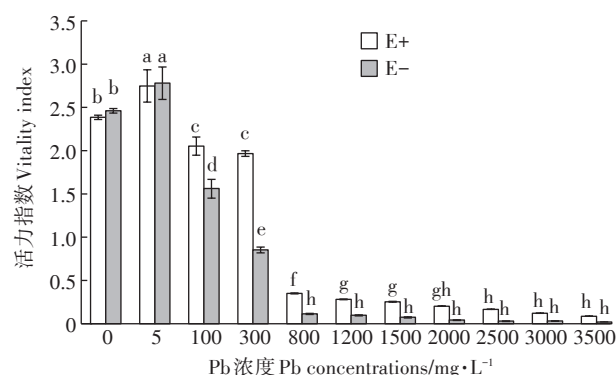


图4 不同浓度Pb胁迫下内生真菌侵染对德兰臭草种子活力指数的影响

Figure 4 Effect of endophyte infection on vitality index of *M. transsilvanica* seed under different Pb concentrations

表2 Pb胁迫和内生真菌侵染对德兰臭草幼苗生长指标的影响

Table 2 Effects of Pb stress and endophyte infection on growth index of *M. transsilvanica* seedling

Pb浓度 Pb concentrations/mg·L ⁻¹	幼苗 Seedling	芽长 Bud Length/cm	根长 Root length/cm	鲜质量 Fresh weight/g	干质量 Dry weight/g
0	E+	4.88±0.63a	1.02±0.10c	0.675±0.024d	0.173±0.006c
	E-	4.31±0.26ab	0.94±0.05c	0.651±0.042d	0.171±0.014c
5	E+	4.23±0.27b	1.18±0.09b	0.929±0.041a	0.204±0.008b
	E-	4.60±0.52ab	1.16±0.07b	0.924±0.050a	0.226±0.004a
100	E+	4.42±0.31ab	1.52±0.14a	0.821±0.017c	0.178±0.017c
	E-	1.51±0.06d	0.42±0.06d	0.661±0.007d	0.208±0.007b
300	E+	3.86±0.04c	1.02±0.11c	0.876±0.003b	0.160±0.001d
	E-	0.62±0.19e	0.30±0.04e	0.557±0.026e	0.215±0.009ab
800	E+	0.53±0.03e	0.22±0.08e	0.289±0.066f	0.118±0.012e
	E-	0.18±0.01f	0.12±0.01e	0.196±0.001g	0.119±0.003e
1200	E+	0.16±0.01f	0.15±0.02e	0.125±0.005h	0.125±0.004e
	E-	0.13±0.01g	0.10±0.02e	0.062±0.011k	0.073±0.006f
1500	E+	0.20±0.04f	—	0.082±0.007j	0.042±0.011h
	E-	0.10±0.00g	—	0.091±0.003i	0.059±0.003g

注:同列不同小写字母表示差异显著($P<0.05$)。下同。

Note: Different small letters in the same column indicate significant difference ($P<0.05$). The same below.

表3 不同Pb处理下内生真菌侵染对德兰臭草幼苗中Pb含量的影响($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)Table 3 Effects of endophyte infection on Pb content of *M. transsilvanica* seedling under different Pb concentrations($\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}$)

幼苗 Seedling	0	5	100	300	800	1200	1500	2000	2500	3000	3500
E+	12.50a	112.72a	1 122.38a	1 619.16b	1 259.55a	2 052.98b	2 068.94b	2 767.48b	4 241.55b	5 690.63b	6 032.32b
E-	13.34a	125.53a	1 244.47a	1 867.43a	1 286.31a	2 533.64a	3 652.65a	5 902.63a	6 926.75a	7 558.26a	10 900.22a

德兰臭草幼苗中Pb含量见表3。随着Pb胁迫浓度的增加,植株体内Pb含量呈不断上升的趋势。同一Pb胁迫浓度下,E-幼苗中Pb含量均高于E+植株,Pb胁迫浓度为0、5、100、800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+与E-幼苗中Pb含量差异不显著($P>0.05$),其余高浓度胁迫下,E+植株内的Pb含量均显著低于E-植株($P<0.05$)。

3 讨论

种子萌发期和幼苗期是植物对外界环境因子的敏感期,直接影响植物的生长和发育^[17]。当外源重金属Pb进入环境后会被植物根系吸收,随后转运到植物地上部分,从而影响植物的正常生长^[18]。Pb胁迫对种子发芽率、发芽势的影响呈“高抑低促”的现象^[19]。Pb能够在低浓度促进黑麦草(*Lolium perenne*)、醉马草(*Achnatherum inebrians*)种子的萌发和幼苗生长,而在高浓度条件下作用相反^[20-21]。郭婷婷^[22]在黑麦草对Pb污染土壤修复能力的实验研究中,也得到了类似的结论。本研究也得出一致的结论,5 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Pb溶液能促进德兰臭草种子萌发,提高种子萌发率,显著提高种子活力,促进幼苗根长和生物量($P<0.05$)。当

Pb胁迫浓度大于100 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,种子萌发受到抑制。这可能是因为高浓度胁迫可通过破坏胚乳蛋白的水解而抑制种子萌发^[23]。

从胚芽和胚根的生长来看,重金属Pb胁迫对德兰臭草种子胚根和胚芽的生长具有显著的抑制作用,且对胚根生长的抑制作用大于对胚芽的影响,胚根在胁迫浓度大于1200 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时不再生长。有研究表明,可能是种子萌发初期,胚根最先突破种皮吸水,使得胚根的重金属积累大于胚芽,受胁迫影响更大^[24]。研究表明,内生真菌能够提高宿主植物对重金属Cu^[1]、Zn^[25]、Al^[26]的耐受性,从而有效缓解重金属毒害对植物种子萌发的影响。本研究结果也表明,内生真菌侵染能够有效缓解Pb溶液对德兰臭草种子各项萌发、生长指标的抑制程度,尤其当Pb溶液浓度大于800 $\text{mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+种子的萌发率和发芽势都显著高于E-种子($P<0.05$)。分析其原因,种子萌发时的营养都来自于种子胚乳,而胚乳中的营养是有限的,种子中内生真菌可促进宿主植物自身对外界的不利条件作出及时反应,通过促进根的生长使植株能够伸向远方,避免或减少与重金属的接触与吸附,以保证德兰

臭草在重金属胁迫下能够更好地生长^[23]。本研究相同Pb胁迫浓度下E+植株根长高于E-植株($P<0.05$)也证实了这一点。

研究表明内生真菌的侵染可有效缓解Cd毒害对披碱草(*Elymus dahuricus*)、醉马草种子萌发和幼苗生长的影响^[27-28]。同时,本研究也发现内生真菌侵染可以降低德兰臭草幼苗中Pb含量,尤其当Pb溶液浓度大于 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,E+幼苗中Pb含量显著低于E-幼苗($P<0.05$)。这可能是因为内生真菌促进德兰臭草胚根分泌了大量的酚类物质,酚类物质可以与Pb螯合,减少Pb在宿主地下部分的积累,从而使宿主的Pb含量有所降低^[29-30]。Malinowski等^[11]研究发现内生真菌侵染会导致高羊茅植物根系分泌物中酚类物质含量增加,酚类物质螯合重金属,使重金属的生物活性降低。该学者还发现高羊茅根系分泌物会使Al、Cu等重金属的毒性显著降低^[31],因此也可以进一步解释内生真菌侵染能够有效缓解Pb胁迫对德兰臭草各项种子萌发、生长指标的抑制程度。

4 结论

(1) $5\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 的Pb溶液能促进种子萌发,显著增加幼苗根长和生物量。

(2) 内生真菌侵染能够缓解Pb胁迫对宿主的各项萌发、生长指标的抑制程度,尤其当Pb溶液浓度大于 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,缓解效果更为显著。

(3) 当Pb溶液浓度大于 $800\text{ mg}\cdot\text{L}^{-1}$ 时,内生真菌侵染显著降低了德兰臭草幼苗中Pb含量。

参考文献:

- [1] 姜敏,曹理想,张仁铎. 重金属抗性内生真菌与其宿主植物重金属抗性关系初探[J]. 农业环境科学学报, 2007, 26(6):2038-2042.
JIANG Min, CAO Li-xiang, ZHANG Ren-duo. The relationship of heavy metal resistant endophyte and the heavy metal resistance ability of their host plants[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2007, 26(6):2038-2042.
- [2] 周秋峰,于沐,赵建国,等. 重金属胁迫对小麦生长发育及相关生理指标的影响[J]. 中国农学通报, 2017, 33(33):1-8.
ZHOU Qiu-feng, YU Mu, ZHAO Jian-guo, et al. Heavy metal stress on growth and development and physiological indexes of wheat[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2017, 33(33):1-8.
- [3] Rahman M H, Saiga S. Endophytic fungi (*Neotyphodium coenophialum*) affect the growth and mineral uptake, transport and efficiency ratios in tall fescue (*Festuca arundinacea*)[J]. *Plant and Soil*, 2005, 272: 163-171.
- [4] 祖艳群,卢鑫,湛方栋,等. 丛枝菌根真菌在土壤重金属污染植物修复中的作用及机理研究进展[J]. 植物生理学报, 2015, 51(10): 1538-1548.
ZU Yan-qun, LU Xin, ZHAN Fang-dong, et al. A review on roles and mechanisms of Arbuscular mycorrhizal fungi in phytoremediation of heavy metals-polluted soils[J]. *Plant Physiology Journal*, 2015, 51(10): 1538-1548.
- [5] 王志伟,纪燕玲,陈永敢,等. 禾本科植物内生真菌资源及其物种多样性[J]. 生态学报, 2010, 30(17):4771-4781.
WANG Zhi-wei, JI Yan-ling, CHEN Yong-gan, et al. Endophytic fungi resources and species diversity in grass family[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(17):4771-4781.
- [6] 刘静,周景乐,陈振江,等. 内生真菌发酵液浸种对于旱胁迫下黑麦草种子萌发的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(4):839-847.
LIU Jing, ZHOU Jing-le, CHEN Zhen-jiang, et al. Effect of seed soaking with *Epichloë* fermentation broth on germination characteristics in perennial ryegrass under drought stress[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(4): 839-847.
- [7] 王晓瑜,郭艳娥,冯希,等. AM真菌与禾草内生真菌对黑麦草抗旱性的影响[J]. 草业科学, 2018, 35(2):380-390.
WANG Xiao-yu, GUO Yan-e, FENG Xi, et al. Effect of Arbuscular mycorrhiza and a grass endophyte on the drought tolerance of perennial ryegrass[J]. *Pratacultural Science*, 2018, 35(2):380-390.
- [8] 贾婷婷,常伟,范晓旭,等. 盐胁迫下AM真菌对沙枣苗木光合与叶绿素荧光特性的影响[J]. 生态学报, 2018, 38(4):1337-1347.
JIA Ting-ting, CHANG Wei, FAN Xiao-xu, et al. Effects of arbuscular mycorrhizal fungi on photosynthetic and chlorophyll fluorescence characteristics in *Elaeagnus angustifolia* seedlings under salt stress[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2018, 38(4):1337-1347.
- [9] Malinowski D P, Blesky D P. Adaptation of endophyte-infected cool-season grasses to environment stresses: Mechanisms of drought and mineral stress tolerance[J]. *Crop Science*, 2000, 40:923-940.
- [10] Monnet F, Vaillant N, Hitmi A, et al. Endophytic *Neotyphodium lolii* induced tolerance to Zn stress in *Lolium perenne*[J]. *Plant Physiology*, 2001, 113:557-563.
- [11] Malinowski D P, Blesky D P, Lewis G C. Abiotic stresses in endophyte grasses[M]//Craig A R, Charles P W, Donald E S. *Neo-typhodium* in cool-season grasses: Current research and application. Oxford: Blackwell Scientific Publications, 2005:187-200.
- [12] Alkorta I, Becerril H A, Amezcua I. Recent findings on the phytoremediation of soils contaminated with environmentally toxic heavy metals and metalloids such as zinc, cadmium, lead, and arsenic[J]. *Reviews in Environmental Science and Biotechnology*, 2004, 3(1):71-90.
- [13] 张晶晶,安沙舟. 内生真菌对德兰臭草幼苗抗盐性的影响[J]. 中国草地学报, 2017, 39(3):115-120.
ZHANG Jing-jing, AN Sha-zhou. Effects of endophytic fungi on salt resistance of *Melica transsilvanica* seedlings[J]. *Chinese Journal of Grassland*, 2017, 39(3):115-120.
- [14] Moon C D, Guillaumin J J, Ravel C, et al. New neotyphodium endophyte species from the grass tribes stipeae and meliceae[J]. *Mycologia*, 2007, 99(6):895-905.

- [15] 施 宠, 张蕊思, 黄长福, 等. 微波处理构建不感染内生真菌德兰臭草种群的方法探讨[J]. 草地学报, 2016, 24(5): 1016-1021.
SHI Chong, ZHANG Rui-si, HUANG Chang-fu, et al. Using microwave treatment to construct endophyte-free *Melica transsilvanica* population[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(5): 1016-1021.
- [16] 施 宠, 鲁 益, 黄长福, 等. 70 °C干热处理德兰臭草种子内生真菌的研究[J]. 草地学报, 2016, 24(6): 1318-1322.
SHI Chong, LU Yi, HUANG Chang-fu, et al. Using 70 °C dry treatment to make endophyte-free seeds of *Melica transsilvanica*[J]. *Acta Agrestia Sinica*, 2016, 24(6): 1318-1322.
- [17] 熊春晖, 卢永恩, 欧阳波, 等. 重金属铅镉胁迫对芋生长发育和产量的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 560-567.
XIONG Chun-hui, LU Yong-en, OUYANG Bo, et al. Effects of Pb or Cd stress on the development, growth and yield of taro[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2016, 33(6): 560-567.
- [18] 李慧芳, 王 瑜, 袁庆华, 等. 铅胁迫对禾本科牧草生长、生理及Pb²⁺富集转运的影响[J]. 草业学报, 2015, 24(9): 163-172.
LI Hui-fang, WANG Yu, YUAN Qing-hua, et al. Effects of lead stress on growth, physiology and lead ion accumulation and transportation in gramineous forages[J]. *Acta Prataculturae Sinica*, 2015, 24(9): 163-172.
- [19] 张文娟, 李 悦, 陈忠林, 等. 重金属胁迫对高羊茅和黑麦草种子萌发及幼苗生理特性的影响[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(6): 1-4.
ZHANG Wen-juan, LI Yue, CHEN Zhong-lin, et al. Effects of heavy metals stress on seed germination and seedling physiological characteristics of *Festuca arundinacea* L. and *Lolium perenne* L.[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2017, 45(6): 1-4.
- [20] 多立安, 高玉葆, 赵树兰. 重金属递进胁迫对黑麦草初期生长的影响[J]. 植物研究, 2006(1): 118-123.
DUO Li-an, GAO Yu-bao, ZHAO Shu-lan. Effect of heavy metal progressive stress on early growth of ryegrass[J]. *Bulletin of Botanical Research*, 2006(1): 118-123.
- [21] David E S, Michael B, Nanda P B A K, et al. Phytoremediation: A novel strategy for the removal of toxic metals from the environment using plants[J]. *Biotechnology*, 1995, 13: 468-475.
- [22] 郭婷婷. 黑麦对汞铅污染土壤修复能力的实验研究[D]. 西安: 长安大学, 2009.
GUO Ting-ting. The experiment study of restoration capability on rye to the Hg, Pb polluted soil[D]. Xi'an: Chang'an University, 2009.
- [23] 张刘东. 重金属镉、铅、汞在土壤中的吸附与运移特性实验研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2007.
ZHANG Liu-dong. Experimental study on adsorption and migration characteristics of Cd, Pb and Hg in soil[D]. Beijing: China Agricultural University, 2007.
- [24] 谢琳森. 哈茨木霉对镉胁迫下两种草坪草生长及生理特性的影响[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2018.
XIE Lin-miao. Effects of *Trichoderma harzianum* on the growth and physiological characteristics of two turfgrasses under cadmium stress [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2018.
- [25] 李 川, 任安芝, 高玉葆. 内生真菌感染对宿主植物高羊茅锌耐受性的影响[J]. 生态学报, 2010, 30(7): 1684-1690.
LI Chuan, REN An-zhi, GAO YU-bao. Effect of endophyte infection on Zn resistance of tall fescue[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2010, 30(7): 1684-1690.
- [26] Zaurov D E, Bonos S, Murphy J A, et al. Endophyte infection can contribute to aluminum tolerance in fine fescues[J]. *Crop Science*, 2001, 41: 1981-1984.
- [27] Zhang X X, Li C J, Nan Z B. Effects of cadmium stress on seed germination and seedling growth of *Elymus dahuricus* infected with the *Neotyphodium* endophyte[J]. *Science China Life Sciences*, 2012, 55(9): 793-799.
- [28] 张兴旭. 醉马草-内生真菌共生体对胁迫的响应及其次生代谢产物的活性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2012.
ZHANG Xing-xu. Response of endophytic fungus symbiont to stress and its secondary metabolites activity[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2012.
- [29] Schmöger M E V, Oven M, Grill E. Detoxification of arsenic by phytochelatins in plants[J]. *Plant Physiology*, 2000, 122: 793-801.
- [30] 张兴旭, 南志标, 李春杰. 内生真菌提高禾草耐重金属胁迫的研究进展[J]. 草业科学, 2014, 31(8): 1466-1474.
ZHANG Xing-xu, NAN Zhi-biao, LI Chun-jie. Research progress of improved resistance of the grass to the heavy metal stress by endophyte[J]. *Pratacultural Science*, 2014, 31(8): 1466-1474.
- [31] Malinowski D P, Zuo H, Belesky D P, et al. Evidence for copper binding by extracellular root exudates of tall fescue but not perennial ryegrass infected with *Neotyphodium* spp. endophytes[J]. *Plant and Soil*, 2004, 267: 1-12.