

外源乙烯及氯化钴对磷胁迫下杉木幼苗根系生长的影响

张慧^{1, 2}, 王讷敏^{1, 2}, 陈敏^{1, 2}, 马祥庆^{1, 2}, 吴鹏飞^{1, 2, *}

摘要: 本文通过研究不同浓度乙烯利对低磷环境下杉木幼苗根系形态以及生理指标的影响, 为揭示杉木幼苗适应养分胁迫环境内在机制提供参考依据。采用沙培法, 分别在供磷和不供磷环境下添加不同浓度的乙烯利(0g/kg、0.01g/kg、0.1g/kg、0.2g/kg、0.4g/kg) 氯化钴浓度为(0g/kg、0.01g/kg、0.05g/kg、0.1g/kg、0.2g/kg) 进行试验。结果表明: 1) 不同添加剂对杉木幼苗的根长、根表面积和根体积之间达到显著差异 ($p < 0.05$)。供磷环境和磷胁迫下添加浓度 0.01g/kg 乙烯利对杉木幼苗根系根长、根表面积、根体积达到最大值, 且与 0.04g/kg 之间达到显著差异; 低磷胁迫下, 添加浓度 0.01g/kg 氯化钴对杉木幼苗根系根长 ($445.60 \pm 87.42 \text{cm}$)、根表面积 ($109.64 \pm 23.54 \text{cm}^2$)、根体积 ($2.17 \pm 0.54 \text{cm}^3$) 达到最大值, 且与 0.2g/kg 之间达到极显著差异 ($p < 0.01$), 与不添加抑制剂之间达到显著差异。2) 供磷处理下, 随着乙烯利浓度的增加, SOD 酶的活性被抑制, POD 酶的活性增强; 而低磷胁迫条件下, 添加 0.01g/kg 的氯化钴均促进了 SOD 和 POD 的增加; 不同浓度的氯化钴和乙烯利对 MDA 含量的变化未达到显著差异 ($p > 0.05$)。总的来说, 外源乙烯利可以诱导内源乙烯的产生, 但高浓度的外源乙烯利则抑制杉木根系生长; 低浓度乙烯拮抗剂氯化钴解除了乙烯对低磷环境下对杉木根系的抑制, 促进根系的生长。

关键词: 杉木; 外源乙烯利; 抗氧化酶; 根系形态

中图分类号: S718.5

Effects of exogenous Ethylene and Cobalt chloride on root growth of Chinese fir seedling under low phosphorus stress

Abstract: By studying the effects of different concentrations of ethephon on the root morphology and physiological effects of Chinese fir seedlings under a low-phosphorus environment, it provides a reference for revealing the internal mechanism of Chinese fir seedlings adapting to a nutrient-stress environment. The different concentrations of ethephon (0 g / kg, 0.01 g / kg, 0.1g / kg, 0.2g / kg, 0.4 g / kg) and Cobalt chloride (0 g / kg, 0.01 g / kg, 0.05 g / kg, 0.1 g / kg, 0.2 g / kg) were used under normal and low-phosphorus environments respectively. The results showed that: 1) There was significant correlation between different additives on the root length, root surface area and root volume of Chinese fir ($p < 0.05$). The root length, root surface area and root volume reached a maximum when ethephon concentration was 0.01 g / kg under normal and low-phosphorus environments, and significantly different from 0.04 g / kg; The root length ($445.60 \pm 87.42 \text{cm}$), root surface area ($109.64 \pm 23.54 \text{cm}^2$), and root volume ($2.17 \pm 0.54 \text{cm}^3$) reached a maximum when Cobalt chloride concentration was 0.01 g / kg, and very significant difference between 0.2 g / kg ($p < 0.01$). Under normal phosphorus environments, with the increase of ethephon concentration, the activity of SOD showed a decreasing trend, and the activity of POD showed a increasing trend; while the addition of 0.01 g / kg cobalt chloride promotes both SOD and POD under low-phosphorus environments; There was no significant correlation between different concentrations of additives on the MDA content ($p > 0.05$). Overall, exogenous ethephon induced endogenous ethylene production, but high concentrations of exogenous ethephon inhibited the growth of roots; The low concentration of cobalt chloride relieved the inhibition of ethylene on the root system under the low phosphorus environment, and promoted the growth of root.

Key words: Chinese fir; Exogenous ethephon; Antioxidant enzymes; Root morphology

植物在发育过程中会遭受各种生物和非生物胁迫,在遇到逆境胁迫时,植物体内的激素水平会发生变化以启动和调节某些与逆境适应相关的生理生化过程来协调植物的生长发育,从而诱导抗逆性的形成。作为激素调控网络中的一部分,乙烯的信号传输由于其易扩散性和灵敏性使其在多种逆境胁迫中均具有重要地位,是植物体内的一种快速响应因子。除了参与植物的生长发育外,许多逆境胁迫都可以诱导植物体内乙烯的增加,因此乙烯在植物抵抗逆境胁迫过程中的作用也成为人们研究的热点。大量研究表明,乙烯在植物的耐盐性、耐寒性、抗旱性和抗病性中都发挥着重要作用。但是,关于乙烯的产生到底仅是植物受害后的症状,还是植物在逆境中调节相关的生理生化过程的一种适应现象?目前还未能有统一的定论,因此乙烯对植物抗逆性调控的相关机制有待于进一步揭示。

杉木(*Cunninghamia lanceolata*)是南方重要的优质造林树种,但由于杉木人工林受到土壤有效磷含量的影响,其生产及可持续经营被大大限制。在长期进化过程中,磷高效利用基因型杉木通过形态、生理及代谢方面产生一系列的适应性变化对低磷胁迫作出响应:不仅低磷环境可以促使植物的根系形态发生变化,同时植物体内产生内源激素的应激变化也能够调节植物根系形态。其中,乙烯在根系发育,包括侧根、不定根的形成,根干细胞微环境的建立以及根毛的发育调控中均发挥着重要作用。磷缺乏诱导的乙烯产生或对乙烯敏感性的改变已被证明参与调节根系结构,在营养不足的条件下,提高乙烯敏感性和/或产量可以增加根系伸长,使植物能够在更多营养丰富的地区觅食,磷胁迫诱导的根系向地性改变、通气组织形成和根毛发育等多种适应性变化也受乙烯的调控,可见,乙烯作为信号分子参与根系形态和结构的重塑,对植物在磷胁迫下有效磷的空间获取和快速恢复起着重要作用。此外,乙烯由衰老组织向新生组织磷素资源的再利用以及增加根际土壤有效磷化学有效性等过程中同样发挥作用,在乙烯敏感突变体体中发现和磷饥饿诱导相关的基因表达以及酸性磷酸酶活性增强。

近年来,有关磷胁迫下植物内源激素与植物生长发育的关系屡见不鲜,针对外源添加剂调节植物体内激素的研究大多集中于农作物和拟南芥,而研究磷胁迫下乙烯释放量调节杉木根系生长的变化,对研究植物适应低磷环境响应机制具有重要的意义。由于激素常以低促高抑的规律作用于植物,而目前的研究未考虑到不同浓度乙烯对杉木抗逆性的具体的调控机制及复杂作用,乙烯在杉木响应磷胁迫中的作用机制仍然需要深入探索。低磷条件下,乙烯作为植物适应逆境的重要信号物质,它的改变与磷高效利用杉木体内各适应性反应之间是否密切相关?以此提出假设:(1)施加乙烯时,低浓度乙烯可以对磷胁迫下杉木形态及生理有促进效果;(2)施加氯化钴,可抑制乙烯的合成,但低浓度氯化钴可以促进杉木根系的生长,而高浓度氯化钴则抑制杉木生长。

因此,本文选择同一家系杉木幼苗为试验材料,采用室内盆栽模拟试验,设置正常供磷(对照)和不供磷处理,并在不同供磷水平条件下,分别添加5个不同浓度的乙烯利和氯化钴处理,通过测定分别不同处理下杉木幼苗根系长度、表面积和体积等形态指标,以及比根长和根系内抗氧化酶活性的变化特征,分别不同形态生理指标与杉木耐低磷的能力关系,为揭示乙烯在杉木对低磷环境生理响应策略中的作用机制提供理论依据。

1 材料与方 法

1.1 试验设计

试验于2017年7月-8月在福建农林大学温室大棚进行。供试材料为福建省漳平五一国有林场1.5代杉木种子园培育的杉木幼苗32号家系。根据课题组研究得出32号家系为根系增生型且根系表型变化差异显著。采用盆口内径18cm、底部内径9cm、高22cm的圆形花盆在福建农林大学温室大棚内进行沙培试验。以洗净后过2mm孔径的河沙为培养基质,有效磷含量为痕量,每盆河沙质量为4.5kg。根据Hoagland营养液中 KH_2PO_4 的含量,设计2种不同供磷水平:供磷($1\text{mmol}\cdot\text{KH}_2\text{PO}_4$, P_1)和不供磷($0\text{mmol}\cdot\text{KH}_2\text{PO}_4$, P_0)。用KCl平衡不同供磷处理间 K^+ 的差异,每个处理5个重复。

这是由于每个供磷水平下分别添加乙烯利和氯化钴,乙烯利作为一种植物调节剂,是乙烯合成和信号

转导的前体, 可通过整合植物信息, 导致一系列基因的抑制或激活, 进而使植物在形态上产生差异^[15,16]。与之相比较, 氯化钴能够促进生长素和细胞分裂素形成, 并通过直接抑制乙烯的合成从而降低乙烯发挥效应作用, 一定程度上解除乙烯对植物生长分化的影响, 因此在植物生长发育及抗逆生理等方面具有一定的作用^[17]。因此, 本试验参考高彬等^[18]利用外源乙烯及氯化钴处理大豆的浓度梯度, 分别设 5 个浓度水平, 即 Ethephon (0g/kg、0.01g/kg、0.1g/kg、0.2g/kg、0.4g/kg), CoCl_2 (0g/kg、0.01g/kg、0.05g/kg、0.1g/kg、0.2g/kg), 于 2017 年 7 月 21 日将参试苗木植于盆中, 缓苗 7d 后开始试验处理。试验期间为保证杉木幼苗对其他营养元素的需求, 每隔 4d 浇 1 次营养液, 每次 200ml。

1.2 测定方法

参试苗木培养 16 天后, 进行收获, 将植株沿测量地径处剪断, 分为地上地下部分, 108℃ 杀青, 80℃ 烘干至恒重, 准确称量地上地下部的生物量, 采用钒钼黄法分别测定植株地上部分和地下部分的磷含量^[19]。

1.2.1 生长指标

胁迫处理收获的幼苗测定杉木幼苗的根系形态指标。将收获幼苗新鲜生长 (判断新鲜白色根系为新生根系) 的根系增量进行扫描。采用加拿大数字化扫描仪 (STD1600 Epson, USA) 对根系形态进行扫描, 并运用 WinRHIZO (version4.0b, Rengent Instrument Inc, Canada) 根系分析系统软件对根长、表面积、根体积指标进行定量分析。同时, 对杉木幼苗的根系进行比根长的计算。比根长 (cm/g): 根长 (cm)/干质量 (g); 根组织密度 (g/cm³): 根干质量 (g)/根体积 (cm³)。

1.2.2 杉木幼苗根系生理指标测定

准确称取 0.1g 超纯水清洗过的鲜根尖, 研磨成匀浆待测。选用南京建成生物工程研究所提供的超氧化物歧化酶 (Superoxide dismutase, SOD)、过氧化物酶 (Peroxidase, POD) 试剂盒、丙二醛 (MDA) 试剂盒分别测定杉木幼苗的根系 SOD 活性、POD 活性、MDA 含量。

1.2.3 分析方法

采用 Microsoft Excel 2007 进行数据处理, SPSS20.0 软件对正常供磷下不同添加剂和添加剂浓度、低磷胁迫不同添加剂和添加剂浓度对杉木幼苗根系形态指标进行双因素方差分析。若两个因素无显著交互作用 ($p>0.05$), 则进行单因素方差分析 (one-way ANOVA) 和 LSD 多重比较, 对处理间数据进行差异显著性分析 ($p=0.05$), 所有数据用平均值±标准误表示。文中相关图表均用 Origin9.0 绘制。

2 结果与分析

2.1 供磷水平及添加剂浓度对杉木幼苗各测定指标的双因素影响分析

由表 1 所示, 添加乙烯利时, 供磷水平及添加剂浓度这 2 个因素的交互作用对杉木幼苗的根组织密度和 SOD 活性分别存在显著 ($p<0.05$) 和极显著作用 ($p<0.01$)。从单个因素来看, 供磷水平对杉木根长、根表面积根体积的影响达显著水平, 对根组织密度的影响极显著; 而不同乙烯利浓度对杉木根长、根表面积根体积的影响达显著水平, 对根组织密度和 POD 活性的影响极显著。添加氯化钴时, 供磷水平及添加剂浓度这 2 个因素的交互作用对杉木幼苗的根组织密度和 SOD 活性均存在极显著影响; 不同供磷水平对杉木比根长、POD 酶活性和 MDA 未起到显著作用 ($p>0.05$), 不同氯化钴浓度对杉木比根长和 MDA 酶活性未达到显著作用 ($p>0.05$)

表 1 供磷水平及添加剂浓度对杉木幼苗各测定指标的双因素影响分析

Table1 Two-factor analysis of the phosphorus supply level and additive concentration on the determination indexes of Chinese fir seedlings

因素	F 值 <i>F value</i>									
	根长	根表 面积	根 体积	根平均 直径	比 根长	根组织 密度	过氧化 物酶 POD	超氧化 物歧化酶 SOD	丙 二醛 MDA	
添加乙 烯	不同供磷水平	6.030	5.66	5.1	4.573*	6.8	14.051	0.520	0.411	0.0
	(a)	*	0*	96*		98	**		41	
添加 Coc12	不同添加剂浓度	3.702	3.45	3.2	3.596*	2.0	4.703*	13.878	2.461	1.9
	(b)	*	7*	30*		03	*	**	01	
添加 Coc2	a*b	0.807	0.66	0.5	0.986	1.4	3.62*	6.213*	0.695	0.3
			8	7		24		*	66	
添加 Coc12	不同供磷水平	10.34	10.7	9.9	1.75	1.7	30.672	0.102	5.785*	2.2
	(a)	7**	01**	82**		06	**		69	
添加 Coc2	不同添加剂浓度	8.367	8.14	7.3	1.805	1.6	34.790	3.330*	5.866*	0.7
	(b)	**	6**	29**		43	**	*	88	
添加 Coc12	a*b	0.794	0.95	1.0	0.537	1.5	15.723	10.782	1.816	1.7
			5	54		93	**	**	46	

2.2 不同浓度的乙烯与氯化钴对低磷胁迫杉木幼苗根系形态的影响

供磷环境中，添加 0.01g/kg 的乙烯利处理下的根长、根表面积以、根体积及根平均直径与 0.2g/kg、0.4g/kg 处理下三个指标均存在显著差异 ($p < 0.05$)，且 0.01g/kg 的乙烯利处理的根平均直径有 0.73cm，与 0.4g/kg 之间存在显著差异，均与低磷胁迫下氯化钴处理的规律一致。此外，供磷与不供磷环境下乙烯利浓度为 0.01g/kg 时杉木幼苗的根组织密度显著低于 0.4g/kg 时。

供磷环境中，氯化钴处理对杉木幼苗的各项根系指标未存在显著差异水平；低磷胁迫下氯化钴浓度为 0.01g/kg 时，跟 0.1g/kg 与 0.2g/kg 处理下的根长、根表面积以及根体积之间存在显著差异 ($p < 0.05$)，且 0.01g/kg 的氯化钴处理下根表面积跟对照组也存在显著差异。供磷与不供磷环境下 0.1g/kg 与 0.2g/kg 氯化钴处理下的根组织密度与对照组和 0.01g/kg 处理有显著差异。

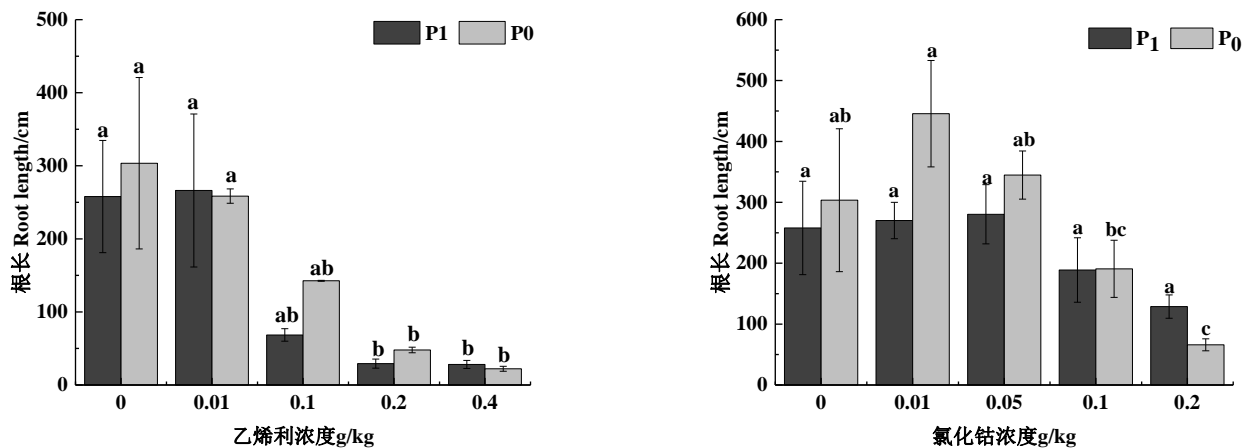


图 1 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根长的影响

Fig. 1 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root length of Chinese fir seedlings

注：相同小写字母表示不同处理条件下各测定指标的差异未达显著水平 ($p>0.05$)。下同。

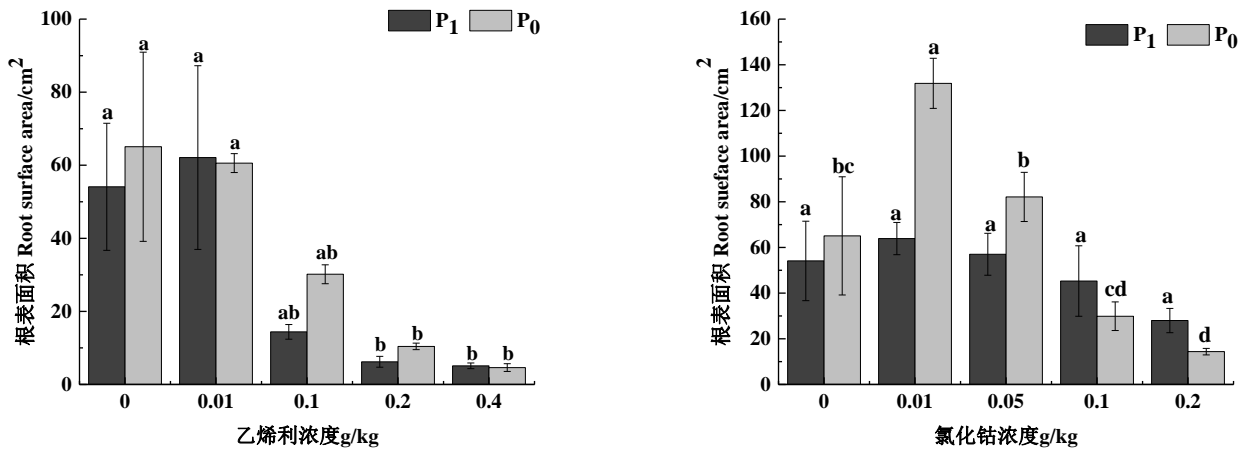


图 2 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根表面积的影响

Fig.2 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root surface area of Chinese fir seedlings

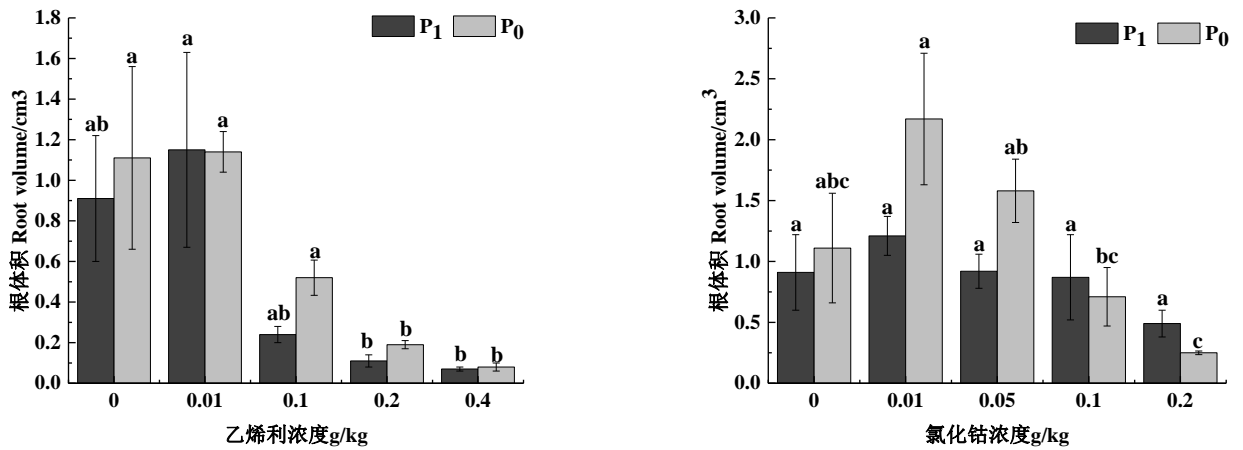


图 3 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根体积的影响

Fig.3 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root volume of Chinese fir seedlings

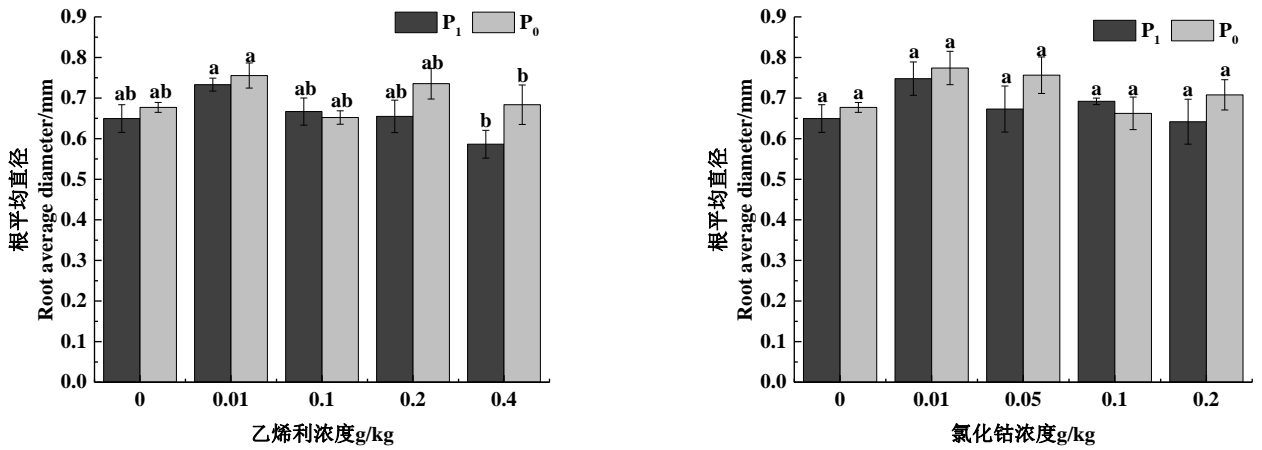


图 4 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根平均直径的影响

Fig.4 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root average diameter of Chinese fir seedlings

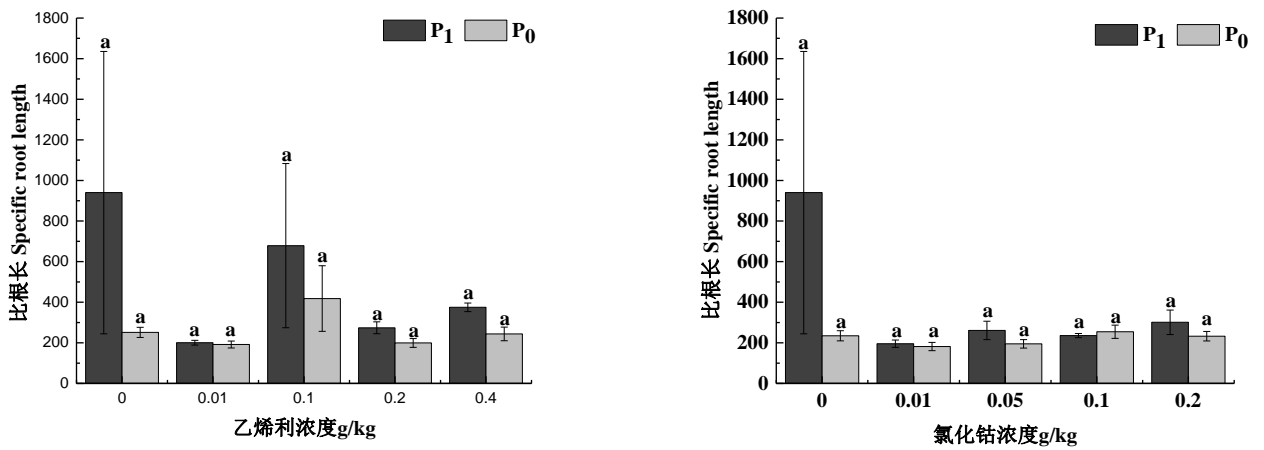


图 5 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼比根长的影响

Fig.5 effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root specific root length of Chinese fir seedlings

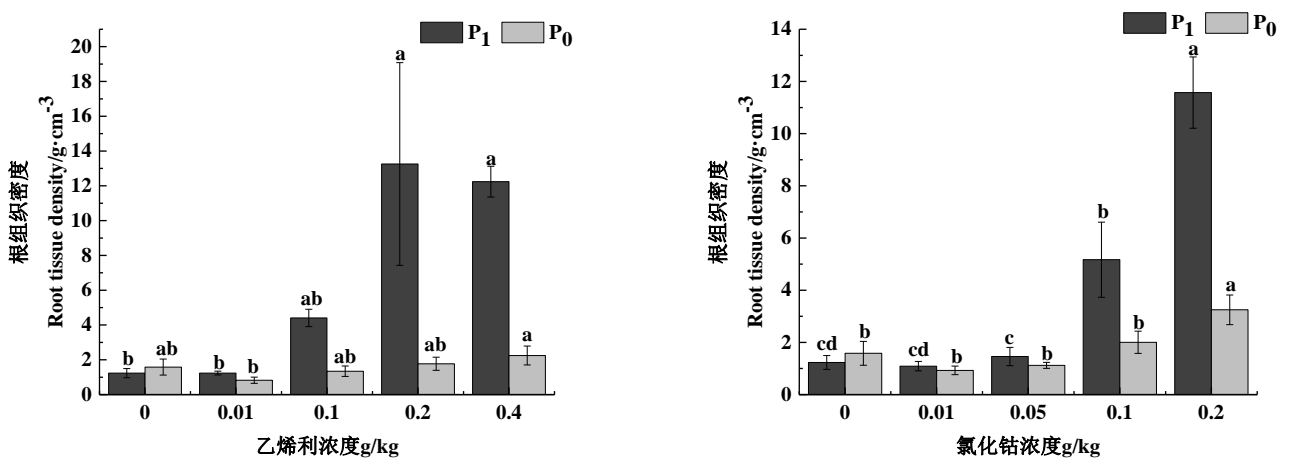


图 6 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根组织密度的影响

Fig.6 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root tissue density of Chinese fir seedlings

2.3 不同浓度的乙烯利与氯化钴对低磷胁迫杉木幼苗根系保护酶活性的影响

由图 7 可知, 对供磷处理来讲, 添加 0.01g/kg 的乙烯利 POD 活力达到最低值, 但随着浓度增加 POD 活力值达逐渐增强, 且与 0.4g/kg 之间达到显著差异 ($p < 0.05$), 而低磷胁迫下各乙烯利浓度对 POD 活力的影响差异不显著。供磷处理下, 添加 0.05g/kg 浓度的氯化钴表现出最高的 POD 活力值, 且随着氯化钴浓度的增加, POD 活力逐渐降低; 低磷胁迫下, 添加 0.01g/kg 浓度的氯化钴 POD 活力值达到最高 (图 7)。供磷处理下, 随着添加乙烯利浓度的增加, SOD 活力值逐渐降低, 与 0.4g/kg 时差异显著, 低磷胁迫下 0.01g/kg 乙烯利处理表现出较高的超氧化物歧化酶(SOD); 供磷处理下, 各氯化钴浓度对 SOD 活力的影响差异不显著; 而低磷胁迫下, 0.01g/kg 氯化钴处理下的 SOD 活力值达到最高 (图 8)。

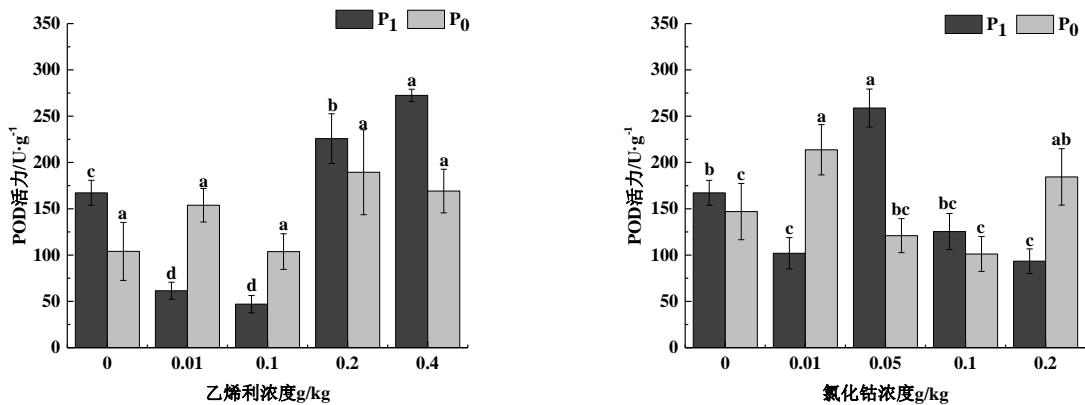


图 7 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根系 POD 活性的影响

Fig.7 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root POD activity of Chinese fir seedlings

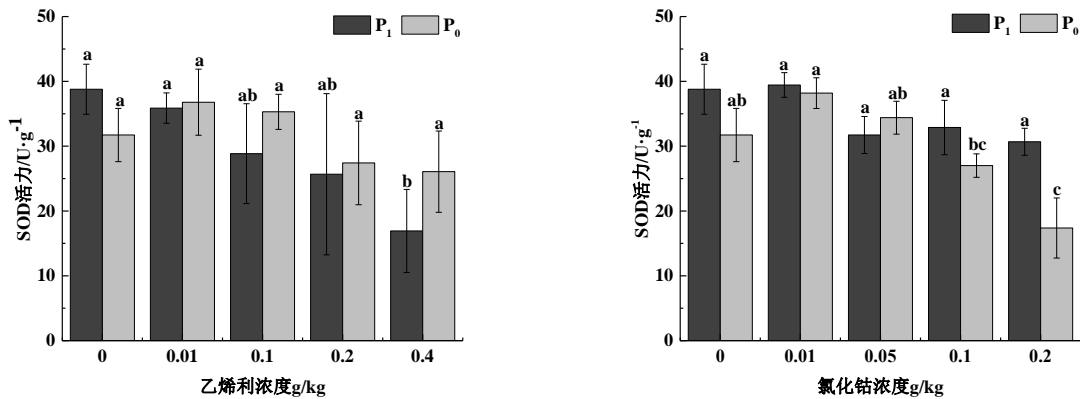


图 8 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根系 SOD 活性的影响

Fig.8 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on root SOD activity of Chinese fir seedlings

2.4 不同浓度的乙烯利与氯化钴对低磷胁迫杉木幼苗根系 MDA 含量的影响

在两种供磷水平下浓度为 0.01g/kg 乙烯利浓度时 MDA 含量达到最大值, 但未达到显著差异 ($p > 0.05$, 图 9)。在 P₁ 下 0.01g/kg 氯化钴的 MDA 含量达到最大值, 而在 P₀ 下 0.1 g/kg 氯化钴的 MDA 含量达到最大值 (图 9)。

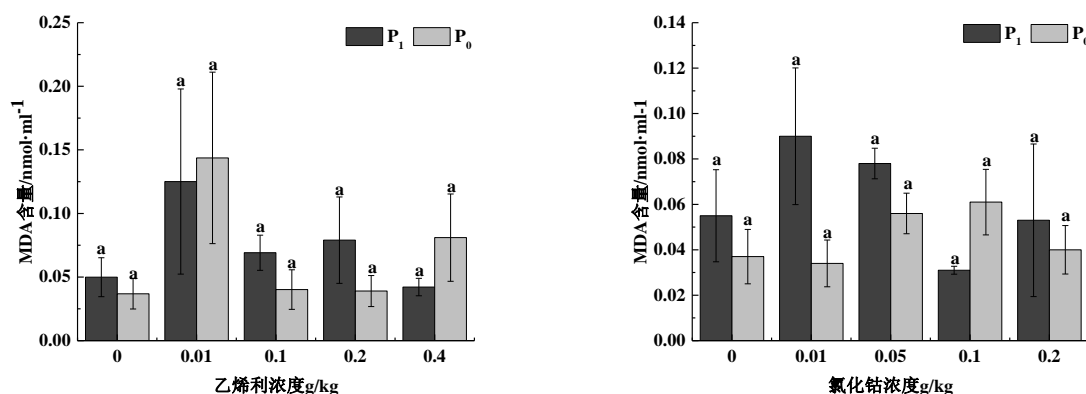


图9 不同浓度乙烯利和氯化钴对杉木幼苗根系MDA含量的影响

Fig.9 Effects of different concentrations of ethephon and cobalt chloride on MDA content in roots of Chinese fir seedlings

3 讨论与分析

在植物根系的发育过程中，根系结构的重塑能够使植物能更加有效的探寻磷资源，根长、根表面积、根体积等性状的变化均会影响根系对磷素的探寻，它对营养、水分和其他环境参数非常敏感，乙烯就是其中一个重要的信号机制。研究表明，外源乙烯能够影响内源 ACC 合成酶含量，进而诱导内源乙烯的生物合成，并且当植物体内的乙烯的含量达到某一阈值时能够满足根系的生长，但当超过这个阈值时，就会抑制根系的生长。本研究发现，乙烯利浓度为 0.01 g/kg 时，植物体内释放的乙烯可以和外源乙烯达到最适根系生长的阈值，刺激杉木根系的生长。杉木根长、根表面积、根体积和根平均直径达到最大值，随着外施乙烯利浓度的增加，根系生长受到抑制，与 0.4 g/kg 时差异显著，这说明乙烯利浓度与根构型重塑有着紧密的联系。根系的生长由根顶端分生组织的细胞分裂和伸长区细胞的伸长共同决定，而乙烯主要抑制发生在根伸长区的细胞伸长，表皮是乙烯作用控制植物根和茎生长的主要部位，并通过抑制植物最外层细胞中生长素的作用来抑制植物的生长。有研究表明，低浓度乙烯会触发诱导生长素合成和运输的修饰，有助于生长素的合成，相反高浓度乙烯介导的生长素运输的刺激可能通过减少原生木鞘中生长素的积累来抑制根的形成，最近有研究验证了 *HB52* 作为乙烯与生长素信号通路的其中一个重要节点，通过调节 *EIN3* 下游生长素运输成分的表达，参与乙烯介导的根伸长抑制，这可能通过抑制生长素依赖的质膜 H⁺-ATP 酶和活性氧(ROS)来修改细胞壁特性进行控制的。并且，乙烯水平的增加也能够通过与茉莉酸相互作用阻止细胞分裂和促进细胞分化，影响主根分生组织的活性。

此外，根系大量释放分泌物会导致体内贮存养分的快速消耗，不利于植物对磷胁迫环境的适应。而低浓度氯化钴通过抑制 ACC 氧化酶减少了胁迫导致的内源乙烯的产生，使植物节约了能量损耗并通过根系增生扩大觅磷的范围，最终杉木幼苗根长、根表面积以及根体积达到最大值，分别比不添加时增加了 72.78%、102.56%和 138.18%，且与正常供磷条件下差异显著。另一方面，低浓度的 CoCl₂ 可以逆转低磷和乙烯对主根的抑制作用，但随着氯化钴浓度的升高，根系生长被抑制，这说明低磷胁迫下低浓度的氯化钴有激发杉木幼苗根系生长的可能性，而且根系在低磷环境下有乙烯气体的产生，促使杉木幼苗根系的敏感性增加，进而使杉木根系形态发生变化。有研究表明，在缺磷条件下 *anac044* 调控细胞壁磷的活化，通过乙烯信号的转导作用使根系中磷库的再利用效率增加，提高获得性磷在植物体内的重吸收，最大限度地分配给发育器官。乙烯介导的一些 *PSI* 基因表达的变化也直接影响土壤对磷的吸收以及内外磷素的再分配。这说明磷胁迫下体内乙烯信号的改变和转导可使杉木体内源-库关系进行调整，使内部资源不断转运和再利用，植物充分适应低磷胁迫环境。

植物在营养胁迫条件下会产生大量的 O₂⁻、OH⁻等活性氧 (ROS)，促使蛋白质和生物大分子变性以及细胞膜过氧化加剧。当环境胁迫程度较低时，植物体内抗氧化酶系统会启动适应机制，清除体内多余的活

性氧并维持在一个正常的动态水平,以提高植物的抗逆性。其中,SOD 是细胞内的天然超氧自由基清除酶,能将不稳定的 O_2^- 转化为 H_2O_2 ,POD 酶主要使 SOD 歧化反应产生的 H_2O_2 进一步转变成无毒的 H_2O 。且细胞内氧化爆发会促使丝裂原活化蛋白激酶级联(MAPK)的激活,诱导 ACC 合成酶的激活/磷酸化,进而提高乙烯的产量^[9]。ROS 不仅是植物受到胁迫时产生的有毒化合物,而且在植物生长、细胞周期、程序化细胞等许多生物过程中发挥着重要的调节作用。研究表明,活性氧参与了乙烯介导的植物的各种反应^[29]。本研究发现,供磷处理下,随着乙烯利浓度的增加,SOD 酶的活性被抑制,POD 酶的活性增强;而低磷胁迫条件下,添加 0.01g/kg 的氯化钴均促进了 SOD 和 POD 的增加,SOD 可能是杉木幼苗响应低磷胁迫下氯化钴处理的抗氧化酶系统的主效因子。可以看出乙烯激发了植物抗氧化酶系统,使得根系分生组织的氧化还原状态发生失衡,且低磷胁迫产生了更多的 H_2O_2 ,由于 H_2O_2 也是蛋氨酸形成乙烯过程中的一种中间物, O_2^- 又与乙烯合成酶的活性有关,因此,外源乙烯有可能通过调节蛋氨酸形成乙烯过程中活性氧的产生而影响内源乙烯的生成来响应杉木磷胁迫状态,从而提升杉木的耐低磷性。进而在植物根系的重塑方面发挥重要作用,促使植物应对磷饥饿环境做出应答,从而提高幼苗的耐低磷能力。

4 结论

磷胁迫和正常供磷条件下,随着外源乙烯浓度的升高,逐渐抑制了杉木幼苗根长、根表面积、根体积和根平均直径的生长。添加乙烯合成抑制剂 $CoCl_2$ 时发现,0.01g/kg 氯化钴处理对低磷胁迫下杉木根长、根表面积、根体积和根直径有明显的促进效果,但是随着氯化钴浓度的增加,根系生长逐渐受到抑制,低浓度的氯化钴明显促进了低磷下杉木的生长,增强根系觅磷能力。从生理指标的变化情况来看,正常供磷环境下,随着乙烯利浓度的升高可明显提高 SOD 酶活性,但降低 POD 酶活性,0.01g/kg 的氯化钴处理促进了低磷胁迫下杉木的 POD 和 SOD 酶活性,随着浓度的升高活性降低。外源乙烯利与根系重塑有着紧密的联系,这为今后揭示外源激素对木本植物适应养分胁迫逆境的内在调控机制研究提供了理论基础。