

糠醛渣和磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤的改良效果研究*

杨 丹

(贵阳学院生物与环境工程学院, 贵州 贵阳 550005)

摘要 采用盆栽试验,研究糠醛渣、磷石膏及两者混合物施入菱镁矿粉尘污染土壤后,土壤理化性质以及玉米幼苗生长状况、生物量、叶绿素含量、超氧化物歧化酶(SOD)、过氧化氢酶(CAT)、过氧化物酶(POD)活性的变化,旨在了解糠醛渣和磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤的改良作用与效果。结果表明:糠醛渣和磷石膏均能显著增加土壤中微生物生物量碳和氮,糠醛渣能有效降低土壤pH,增加有机质含量;磷石膏能有效调节土壤水溶性 Mg^{2+}/Ca^{2+} 。糠醛渣和磷石膏混合施用时,玉米幼苗最大根长、株高、生物量、叶绿素含量及 SOD、CAT、POD 活性均优于其他处理组。可见,糠醛渣与磷石膏可有效改善菱镁矿粉尘污染土壤理化性质,促进植物生长,且两者混合施用效果优于单施。

关键词 菱镁矿 土壤 糠醛渣 磷石膏 玉米

DOI:10.15985/j.cnki.1001-3865.2017.03.014

Ameliorating effect of furfural residue and phosphogypsum on soil contaminated by magnesite dusts YANG Dan. (College of Biological and Environmental Engineering, Guiyang University, Guiyang Guizhou 550005)

Abstract: A pot experiment was conducted, in which furfural residue, phosphogypsum and their mixture were added to magnesite dusts contaminated soil. Soil physicochemical properties, as well as growth, biomass, chlorophyll concentration, superoxide dismutase (SOD), catalase (CAT) and peroxidase (POD) activities of maize seedlings were determined to analyze ameliorating effect of furfural residue and phosphogypsum on contaminated soil. The results showed that both furfural residue and phosphogypsum could obviously increase soil microbial biomass C and N; furfural residue could effectively decrease soil pH and increase organic matter; phosphogypsum could significantly adjust soil Mg^{2+}/Ca^{2+} . Mixed amendment addition could better increase the maximum root length, height, biomass, chlorophyll concentration, SOD, CAT and POD activities of maize seedlings than other treatments. Therefore, furfural residue and phosphogypsum could significantly improve physicochemical properties for such contaminated soil, promote plant growth, and their mixed addition had better ameliorating effect.

Keywords: magnesite; soil; furfural residue; phosphogypsum; maize

我国菱镁矿资源储量丰富,其开采、加工及出口量均居世界首位。然而,大规模菱镁矿开采和加工严重破坏了矿区周边环境。菱镁矿在煅烧过程中释放的粉尘(主要成分为氧化镁和碳酸镁)沉降于地表后在降雨等作用形成致密结皮($4MgCO_3 \cdot Mg(OH)_2 \cdot 4H_2O$),使矿区土壤性质恶化,主要表现为pH急剧上升,土壤有机质、氮、磷和有效钙含量等较低,土壤镁钙比例严重失调等^[1-2]。菱镁矿粉尘还对土壤酶活性造成影响,土壤中多种酶的活性均与镁含量呈负相关关系^[3]。随着污染程度的增加,菱镁矿煅烧厂附近土壤微生物纤维素酶活性、微生物群落呼吸强度、生物量和新陈代谢熵等均呈显著下降趋势^[4]。由于菱镁矿粉尘造成土壤性质改变,使得

植被生长受到影响^[5],污染严重的地区草本植物几乎不能生存,仅有少量灌木存活,从而导致森林和田间生产力急剧下降。

目前,菱镁矿粉尘污染土壤的治理和修复尚无成熟的技术和经验借鉴^[6]。有学者提出通过施加硫酸钙降低粉尘中镁对土壤物理性质的影响^[7],或者对土壤改良后进行施肥,解决污染土壤中养分不足的问题,从而使农作物正常生长^[8]。张立军等^[9]的研究表明,在菱镁矿粉尘污染土壤中加入磷石膏后,不仅可增加有效钙含量,降低土壤中水溶性 Mg^{2+}/Ca^{2+} ,缓解土壤中过量镁的毒害作用,同时能降低土壤pH,提高有效磷含量,从而促进作物生长。若再施入猪粪,可使土壤的营养供给得到进一步改善,促

作者:杨 丹,女,1982年生,博士,副教授,研究方向为土壤环境质量评价与污染防治。

* 贵州省科学技术基金资助项目(黔科合J字[2013]2299号);贵州省科学技术联合基金资助项目(黔科合LH字[2014]7180号)。

表 1 土壤、糠醛渣和磷石膏的理化性质
Table 1 Physicochemical characteristics of soil, furfural residue and phosphogypsum

供试材料	pH	有机碳 /(g · kg ⁻¹)	全氮 /(g · kg ⁻¹)	全磷 /(g · kg ⁻¹)	碱解氮 /(mg · kg ⁻¹)	速效磷 /(mg · kg ⁻¹)	水溶性 Ca ²⁺ /(cmol · kg ⁻¹)	水溶性 Mg ²⁺ /(cmol · kg ⁻¹)
土壤	9.36	13.28	0.72	0.44	20.79	8.72	0.26	3.68
糠醛渣	2.95	446.81	2.80	0.47	393.00	67.04	1.49	0.98
磷石膏	5.80			13.90		136.70	14.45	1.53

进玉米根系发育,增大其根系活力^[10]。VYSH-POLSKY 等^[11]在长期的田间实验中发现,在镁含量较高的地区,施加磷石膏能显著提高当地棉花的产量。王泓泉等^[12]发现,在菱镁矿粉尘污染土壤中配施磷酸二氢钙后,显著促进了羊草、披碱草、剪股颖和碱茅的生长。可见,菱镁矿粉尘污染土壤理化性质的改良是解决菱镁矿区生态修复中植被构建问题的有效措施,是菱镁矿区环境综合治理的重点。

本研究前期已对辽宁省海城市某菱镁矿区土壤污染状况进行了调查和分析,发现菱镁矿粉尘污染土壤的改良主要是解决土壤 pH 较高、水溶性 Mg²⁺ 含量较高、水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 失调和养分不足等问题^[13-14]。工业固体废弃物糠醛渣酸性较强,且富含有机质,可用来调节污染土壤中的 pH,增加土壤养分;磷石膏中含有大量 Ca²⁺ 和 P,可用于调节污染土壤中水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺,提高土壤养分含量。因此,根据菱镁矿粉尘污染土壤的特点,采用糠醛渣和磷石膏作为改良剂,研究不同改良剂添加方案对土壤理化性质和玉米生长及生理指标的影响,评价糠醛渣和磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤的改良效果,旨在为菱镁矿粉尘污染土壤的改良提供依据,进而为菱镁矿区生态修复中的植被构建提供有效途径。

1 材料与方法

1.1 试验材料

供试土壤采自辽宁省海城市内距某菱镁矿煅烧厂 300 m 左右的菱镁矿粉尘污染废弃地,土壤采样深度 0~20 cm,为发育于黄土状母质的棕壤;供试糠醛渣为某糠醛生产公司的废弃物,磷石膏为某化肥厂生产磷铵的副产品。土壤、糠醛渣、磷石膏的理化性质见表 1。

1.2 试验设计

土壤、糠醛渣、磷石膏均风干后过 2 mm 筛。在预实验中,将糠醛渣和磷石膏分别以 5.0%(质量分数,下同)、10.0%、15.0%、20.0%、30.0% 的添加量加入菱镁矿粉尘污染土壤中,平衡 45 d 后种植玉米。研究发现,糠醛渣、磷石膏的添加量为 15.0%

时玉米幼苗的长势、株高和生物量均为最佳。为此,本试验设计改良剂添加量为 15.0%,单施糠醛渣处理记为 F 组,单施磷石膏处理记为 P 组,两者混施(糠醛渣 7.5%+磷石膏 7.5%)处理记为 F+P 组。将改良剂与土壤混合均匀,每盆装土 2.5 kg 放于室内,每天称重,土壤含水率始终保持在田间持水量的 70%(质量分数)左右,平衡 45 d 后种植玉米,同时设不加改良剂的对照处理(CK 组)。玉米种子经消毒浸泡后,每盆撒种 3 粒,待出苗后每盆定植 2 株,每个处理种植 6 盆,其中 3 盆用于测定生长指标,3 盆用于测定生理指标,45 d 后收获。

1.3 测定方法

土壤、糠醛渣及磷石膏的 pH、全氮、全磷、硝态氮、铵态氮、碱解氮、速效磷、有机碳、水溶性 Ca²⁺、水溶性 Mg²⁺ 等理化性质的测定采用土壤农业化学分析法^[15];微生物生物量碳(MBC)的测定参照文献^[16];微生物生物量氮(MBN)的测定参照文献^[17];采用丙酮浸提/分光光度法测定叶绿素含量^[18];采用氮蓝四唑(NBT)光还原法测定超氧化物歧化酶(SOD)活性^[19];采用愈创木酚法测定过氧化物酶(POD)活性^[20];采用过氧化氢法测定过氧化氢酶(CAT)活性^[21]。

1.4 数据处理

采用 Microsoft Excel 2010 进行数据处理,所有数据均为 3 次重复平均值。采用最小显著差异法(LSD)进行差异显著性检验。

2 结果与讨论

2.1 改良剂对土壤理化性质的影响

不同处理组菱镁矿粉尘污染土壤的基础理化性质见表 2。由表 2 可见,与 CK 组相比,F 组、P 组 pH 均有所下降,F 组 pH 下降较 P 组明显;F 组有机碳明显增加,P 组有机碳没有明显变化;F 组、P 组土壤中铵态氮、硝态氮含量均有不同程度的增加,P 组速效磷增幅较大,F 组中水溶性 Ca²⁺ 提高了 66.7%,P 组水溶性 Ca²⁺ 增加了 23.3 倍。F 组水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺(摩尔比)降低到 10.68,而 P 组水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 降低到 0.80,相比 CK 组降幅为 94.3%,

表 2 不同处理下菱镁矿粉尘污染土壤的基础理化性质¹⁾
Table 2 Soil physico chemical characteristics of different treatment groups

理化性质指标	CK 组	F 组	P 组	F+P 组
pH	9.30±0.06a	8.18±0.05c	9.00±0.06b	8.00±0.05c
有机碳/(g·kg ⁻¹)	12.92±0.80c	75.10±1.93a	12.78±0.81c	66.35±1.88b
铵态氮/(mg·kg ⁻¹)	0.49±0.07d	1.67±0.16b	0.86±0.08c	1.74±0.14a
硝态氮/(mg·kg ⁻¹)	2.77±0.31c	20.40±2.02b	21.01±2.11b	36.59±2.47a
速效磷/(mg·kg ⁻¹)	9.31±0.60d	37.19±2.21c	313.63±17.21a	224.88±11.33b
水溶性 Ca ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	0.30±0.05d	0.50±0.05c	7.28±0.26a	5.81±0.18b
水溶性 Mg ²⁺ /(cmol·kg ⁻¹)	4.19±0.20d	5.34±0.54c	5.85±0.50b	6.46±0.50a
水溶性 Mg ²⁺ /Ca ²⁺	13.97	10.68	0.80	1.11

注: 1) 字母不同代表组间处理差异显著(P<0.05), 图 1 至图 5 及表 3 同。

F+P 组对各理化指标及水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 的调节作用也十分明显。

由表 2 可知, 两种改良剂对土壤均具有一定改良效果, 分析原因, 糠醛渣是用玉米芯生产糠醛后排出的固体废弃物, 含残余硫酸, 且含有丰富的有机质以及一定量的氮磷等速效养分^[22]。由于本身酸性较强, 糠醛渣能够有效中和污染土壤的碱性, 使土壤 pH 显著降低, 其中富含的有机质也显著提高了土壤有机碳含量。磷石膏是生产磷肥排放的固体废弃物, 几乎不含有机质, 主要成分为磷酸钙, 并富含速效磷、水溶性 Ca²⁺ 等, 游离酸含量相对较少, 因而对土壤 pH 调节效果不大, 也不会增加土壤中的有机碳含量。碱性条件下铵态氮易挥发^[23], 添加糠醛渣可有效调节土壤 pH, 且糠醛渣中的无机酸和有机酸与铵结合形成铵盐, 避免了土壤中铵态氮的挥发损失^[24]。磷石膏中含有的少量无机酸也能与铵结合, 提高土壤铵态氮含量。由于糠醛渣和磷石膏中都含有大量速效磷(见表 1), 因此添加改良剂的处理组中速效磷含量均显著高于 CK 组。磷石膏中所含的钙提高了土壤中水溶性 Ca²⁺ 含量, 因而有效调节了土壤中的水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺, 而糠醛渣含钙量较低, 对水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 的调节效果不显著。

土壤中水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 是影响植物生长的一个重要因素, 土壤中过量 Mg²⁺ 对植物的危害不取决于水溶性 Mg²⁺ 的绝对含量, 而是取决于水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺。水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 过大时将导致作物吸收 Ca²⁺ 产生拮抗作用, 导致作物缺钙, 从而发生 Mg²⁺ 的毒害作用^[25]。吴洪生等^[26]研究发现, 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 小于 1 时, 植物生长不受 Mg²⁺ 的毒害; 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 为 1~3 时, 某些作物的生长将受到一定的影响; 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 为 3~9 时, 小麦种根受到明显影响; 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 为 9~15 时, 小麦种根无根毛, 苗直立而叶卷缩, 三叶期后种子胚乳耗尽; 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 为

15~20 时, 所有作物和树木都生根困难; 水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 大于 20 时, 所有植物种子都难以萌发。本研究中 F 组水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 为 10.68, 仍在 10 以上; P 组、F+P 组的水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 分别为 0.80、1.11, P 组、F+P 组玉米生长状况好于 F 组, 可能与水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 的调节效果有关。

2.2 改良剂对土壤 MBC、MBN 及玉米生长的影响

不同处理组的 MBC、MBN 对比见图 1。由图 1 可见, F 组土壤 MBC、MBN 比 CK 组分别高出 2.02、4.75 倍; P 组土壤 MBC、MBN 比 CK 组分别高出 2.27、5.54 倍; F+P 组土壤 MBC、MBN 比 CK 组分别高出 8.08、7.14 倍。这是因为加入改良剂后土壤 pH 和养分状况得到改善, 且 MBC、MBN 与土壤水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 呈显著负相关, 因此微生物量得到增加。值得说明的是, F+P 组土壤 MBC、MBN 明显高于 F 组和 P 组, 说明此条件下土壤 pH、养分含量、水溶性 Mg²⁺/Ca²⁺ 等更适宜微生物生长。

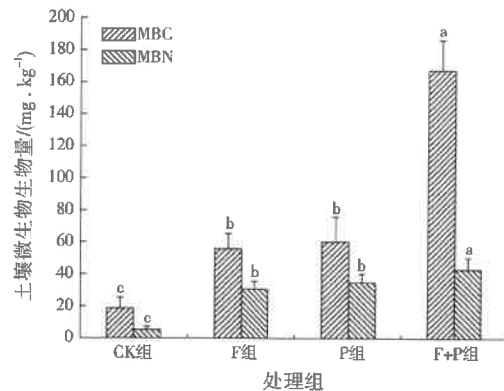


图 1 不同处理组的 MBC、MBN

Fig.1 MBC and MBN of different treatment groups

不同处理组的玉米幼苗生长情况见表 3。由表 3 可见, F 组玉米幼苗最大根长、株高、地上生物量、根部生物量分别高于 CK 组 1.05、1.15、1.46、1.52 倍; P 组玉米幼苗最大根长、株高、地上生物量、根部生物量分别高于 CK 组 1.14、1.34、1.54、1.71 倍;

表3 不同处理组的玉米幼苗生长情况¹⁾

Table 3 The maize seedlings growth in different treatment groups

处理组	最大根长/cm	株高/cm	地上生物量/g	根部生物量/g
CK组	9.17±1.06c	9.30±1.06c	0.83±0.06c	0.21±0.03c
F组	18.80±1.40b	20.00±1.47b	2.04±0.20b	0.53±0.05b
P组	19.60±1.44b	21.80±1.52b	2.11±0.21b	0.57±0.05b
F+P组	20.80±1.47a	29.80±1.84a	2.87±0.30a	0.69±0.07a

注: ¹⁾地上生物量、根部生物量均以干质量计。

F+P组玉米幼苗最大根长、株高、地上生物量、根部生物量分别高于CK组1.27、2.20、1.54、2.29倍。其中,F+P组的玉米幼苗最大根长、株高、植株生物量明显优于其他处理组,与土壤MBC、MBN改良效果相似。可见,两种改良剂混合添加对于改良菱铁矿粉尘污染土壤更为有效。

2.3 改良剂对玉米幼苗叶绿素及酶活性的影响

不同处理组玉米幼苗叶绿素含量见图2。由图2可见,F组、P组、F+P组的叶绿素含量显著高于CK组,F组与P组叶绿素含量差异性不显著,F+P组叶绿素高于CK组56%。叶绿素含量的高低反映了植物叶片光合能力的强弱。糠醛渣和磷石膏混合添加时,玉米幼苗叶片叶绿素含量显著高于其他处理,说明此条件下玉米幼苗光合能力较强。弓建国等^[27]的研究表明,有机肥与磷肥的施用能够提高马铃薯叶绿素含量。糠醛渣富含丰富的有机质及腐殖酸,磷石膏富含大量的磷和钙,糠醛渣和磷石膏混合对土壤的改良效果与有机肥和磷肥混合的改良效果类似。

不同处理组在玉米幼苗生长20、30、40 d时叶片及根部SOD活性对比见图3。由图3可见,F组、P组、F+P组玉米幼苗叶片及根部SOD活性均显著高于CK组,F组与P组玉米幼苗叶片SOD活性无显著差异,P组玉米幼苗根部SOD活性接近F+P

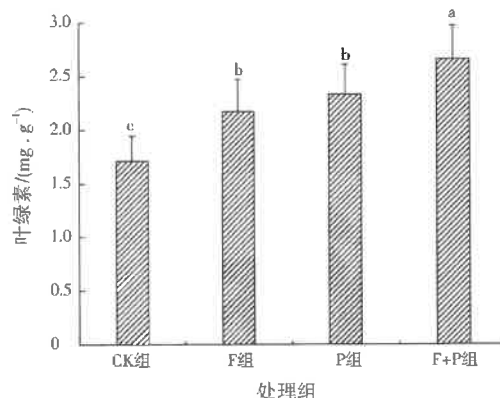


图2 不同处理组的玉米幼苗叶绿素

Fig.2 Chlorophyll content of maize seedlings in different treatment groups

组,显著高于F组及CK组。

不同处理组在玉米幼苗生长20、30、40 d时叶片及根部CAT活性对比见图4,POD活性对比见图5。由图4可见,F组、P组、F+P组玉米幼苗叶片及根部CAT活性均显著高于CK组,其中F+P组玉米幼苗叶片及根部CAT活性均最高,其次为P组。由图5可见,F+P组玉米幼苗叶片POD活性最高,P组根部POD活性最高。总体而言,F+P组玉米幼苗叶片和根部抗氧化酶活性最好。

生物细胞在污染、盐胁迫等逆境条件下会受到活性氧自由基的伤害^[28-29]。SOD是清除体系中活

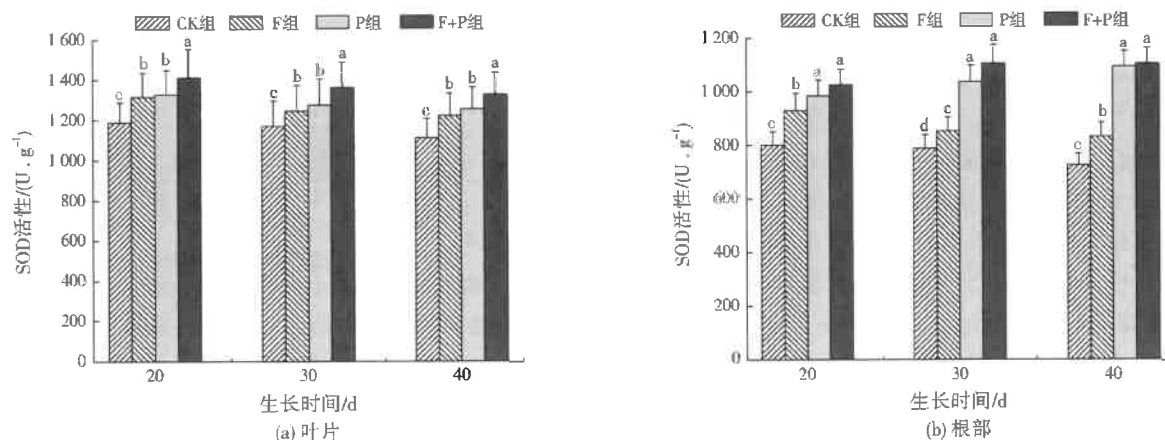


图3 不同处理组玉米幼苗的SOD活性

Fig.3 The SOD activity of maize seedlings in different treatment groups

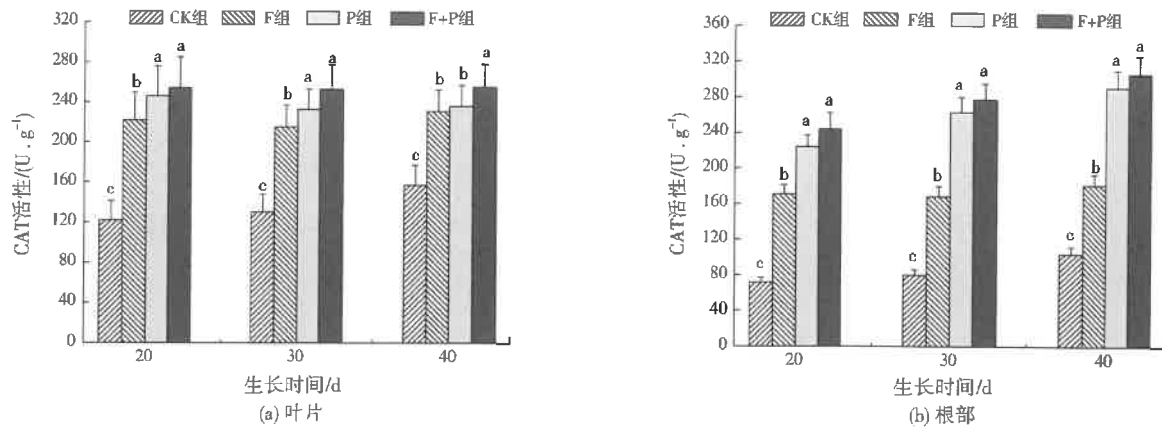


图 4 不同处理组玉米幼苗 CAT 活性
Fig.4 The CAT activity of maize seedlings in different treatment groups

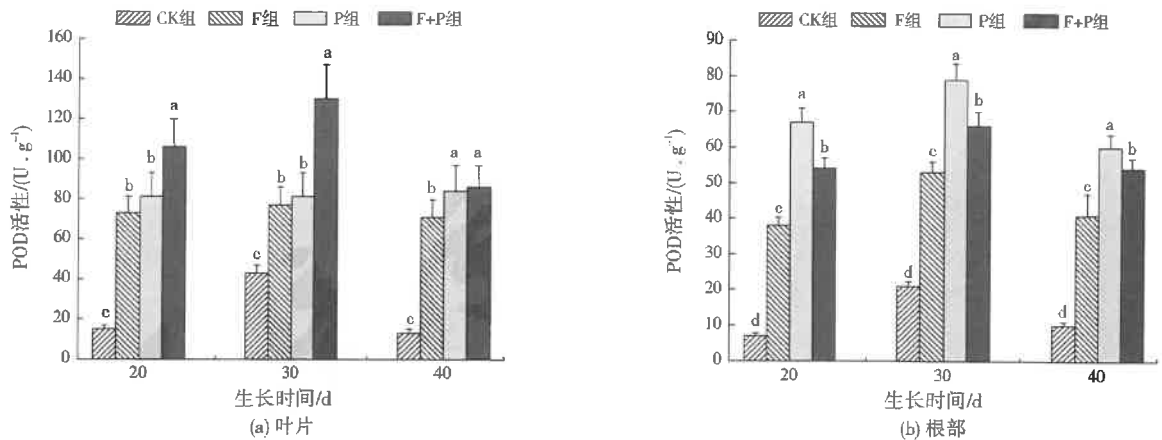


图 5 不同处理组玉米幼苗 POD 活性
Fig.5 The POD activity of maize seedlings in different treatment groups

性氧的关键酶,是防止超氧自由基对细胞膜系统造成损伤的保护酶;CAT 参与活性氧代谢过程,其活性变化是植物对环境的一种生理生化反应;POD 是与植物抵御不良环境如污染胁迫等有关的细胞内保护酶^[30-31]。SOD、CAT、POD 共同组成了活性氧清除系统,防止自由基的毒害,维护膜系统的稳定性,SOD、CAT 和 POD 活性的高低,反映了植物细胞膜的抗氧化能力以及植物生长状况^[32]。在本研究中,添加改良剂的玉米幼苗 SOD、CAT、POD 活性均显著高于对照组,说明改良剂可提高植物保护自身细胞膜系统的能力,有利于植物的生长发育。P 组玉米幼苗叶片和根部 SOD、CAT、POD 活性均高于 F 组,可能与磷石膏对土壤中可溶性 Mg^{2+}/Ca^{2+} 的调节效果更佳有关。F+P 组玉米幼苗叶片和根部的 SOD、CAT、POD 活性最高,说明此时植物保护自身细胞膜系统的能力强于其他处理组,结合玉米幼苗株高、生物量、叶绿素含量等玉米生长指标可知,糠

醛渣与磷石膏的混合施用能更有效地改善菱镁矿粉尘污染土壤的性质,促进植物生长发育。

3 结 论

糠醛渣能够有效降低菱镁矿粉尘污染土壤 pH、增加土壤有机质含量,磷石膏能够显著增加水溶性 Ca^{2+} 含量,调节土壤水溶性 Mg^{2+}/Ca^{2+} ;将糠醛渣与磷石膏混合添加于菱镁矿粉尘污染土壤中后种植玉米,玉米幼苗的株高、生物量、叶绿素含量、SOD、CAT 及 POD 活性等明显高于单施糠醛渣、单施磷石膏及对照组。由此可知,糠醛渣与磷石膏混合施用能更有效地改善菱镁矿粉尘污染土壤性质,促进植物生长,有利于菱镁矿区植被构建。

(致谢:感谢中国科学院沈阳应用生态研究所林业生态工程组为本研究提供实验场所,感谢艾桂艳和李晶石在室内样品处理及分析过程中的大力帮助!)

参考文献:

- [1] RAMAN N, NAGARAJAN N, GOPINATHAN S, et al. Mycorrhizal status of plant species colonizing a magnesite mine spoil in India[J]. Biology and Fertility of Soils, 1993, 16(1): 76-78.
- [2] MACHIN J. Soil pH changes induced by contamination by magnesium oxides dust[J]. Land Degradation & Development, 2000, 11(1): 37-50.
- [3] 李军, 赵斌. 菱镁矿粉尘污染土壤的机理[M]. 沈阳: 东北大学出版社, 1998.
- [4] KAUTZ G, ZIMMER M, ZACH P, et al. Suppression of soil microorganisms by emissions of a magnesite plant in the Slovak Republic[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2001, 125(1): 121-132.
- [5] BRADSHAW A. Restoration of mined lands: using natural processes[J]. Ecological Engineering, 1997, 8(4): 255-269.
- [6] 方英, 赵琼, 台培东, 等. 芒颖大茅草对菱镁矿粉尘污染的生态适应性[J]. 应用生态学报, 2012, 23(12): 3474-3478.
- [7] RENGASAMY P, GREENE R S B, FORD G W, et al. Identification of dispersive behaviour and the management of red-brown earths[J]. Australian Journal of Soil Research, 1984, 22(4): 413-431.
- [8] 刘向来. 镁质碱化土的改良[J]. 土壤通报, 1985, 16(2): 62-63.
- [9] 张立军, 王秋兵, 于天颖. 施用磷石膏对菱镁矿粉尘污染土壤上玉米生长发育的影响[J]. 植物生理学通讯, 1995(1): 24.
- [10] 张心昱, 王秋兵, 岳振平, 等. 猪粪与磷石膏配合施用对菱镁矿粉尘污染土壤化学性状的影响[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(1): 124-127.
- [11] VYSHPOLSKY F, MUKHAMEDJANOV K, BEKBAEV U, et al. Optimizing the rate and timing of phosphogypsum application to magnesium-affected soils for crop yield and water productivity enhancement[J]. Agricultural Water Management, 2010, 97(9): 1277-1286.
- [12] 王泓泉, 赵琼, 赵欣然, 等. 菱镁矿区镁粉尘污染土壤的植物修复效果评价[J]. 生态学报, 2014, 33(10): 2782-2788.
- [13] FU Shasha, LI Peijun, FENG Qian, et al. Soil quality degradation in a magnesite mining area[J]. Pedosphere, 2011, 21(1): 98-106.
- [14] YANG D, ZENG D H, ZHANG J W, et al. Chemical and microbial properties in contaminated soils around a magnesite mine in Northeast China[J]. Land Degradation & Development, 2012, 23(3): 256-262.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] VANCE E D, BROOKES P C, JENKINSON D S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1987, 19(6): 703-707.
- [17] JOERGENSEN R G, BROOKES P C. Nitrification of microbial biomass in 0.5 M K₂SO₄ soil extracts[J]. Soil Biology & Biochemistry, 1990, 22(8): 1023-1027.
- [18] HEGEDÜS A, ERDEI S, HORVÁTH G. Comparative studies of H₂O₂ detoxifying enzymes in green and greening barley seedlings under cadmium stress[J]. Plant Science, 2001, 160(6): 1085-1093.
- [19] KRIVOSHEEVA A, TAO D L, OTTANDER C, et al. Cold acclimation and photoinhibition of photosynthesis in Scots pine[J]. Planta, 1996, 200(3): 296-305.
- [20] WU Yuexuan, VON TIEDEMANN A. Impact of fungicides on active oxygen species and antioxidant enzymes in spring barley (*Hordeum vulgare* L.) exposed to ozone[J]. Environmental Pollution, 2002, 116(1): 37-47.
- [21] PINHERO R G, RAO M V, PALIYATH G, et al. Changes in activities of antioxidant enzymes and their relationship to genetic and paclobutrazol-induced chilling tolerance of maize seedlings[J]. Plant Physiology, 1997, 114(2): 695-704.
- [22] 秦嘉海, 金自学, 陈修斌, 等. 含钾有机废弃物糠醛渣改土培肥效应研究[J]. 土壤通报, 2007, 38(4): 705-708.
- [23] MENGEL K, KIRKBY E A. Principles of plant nutrition[M]. Bern: International Potash Institute, 1982.
- [24] 纪宝华, 胡童坤, 袁春莲, 等. 糠醛废渣改土效应的试验研究[J]. 辽宁农业科学, 1994(6): 49-53.
- [25] 赵芸晨, 秦嘉海, 肖占文, 等. 糠醛渣、沼渣与化肥配施对制种玉米田理化性质和酶活性的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(3): 102-105.
- [26] 吴洪生, 陈小青, 周晓冬, 等. 磷石膏改良剂对江苏如东滨海盐土理化性状及小麦生长的影响[J]. 土壤学报, 2012, 49(6): 1262-1266.
- [27] 刁建国, 徐松鹤. 氮磷钾有机肥对马铃薯叶绿素含量的影响[J]. 安徽农业科学, 2009, 37(23): 10940-10942.
- [28] 孙慧群, 朱琳. 化工废水对植物过氧化氢酶和叶绿素的影响[J]. 江苏大学学报(自然科学版), 2006, 27(1): 18-21.
- [29] 孙建伟. 二氧化硫对玉米细胞过氧化氢酶活性的影响[J]. 作物学报, 2007, 33(12): 1968-1971.
- [30] 郑翠明, 滕冰, 高凤兰, 等. 感染 SMV 后大豆种皮超氧化物歧化酶过氧化物酶和多酚氧化酶的变化[J]. 中国农业科学, 1999, 32(1): 99-101.
- [31] 刘鹏, 杨玉爱. 铜、硼对大豆叶片膜脂过氧化及体内保护系统的影响[J]. 植物学报, 2000, 42(5): 461-466.
- [32] 马成仓. 汞对油菜叶细胞膜的损伤及细胞的自身保护作用[J]. 应用生态学报, 1998, 9(3): 323-326.

编辑: 丁 怀 (收稿日期: 2016-08-20)

(上接第 294 页)

- [7] 鲁冬雪, 徐倩倩, 王稳航. 海藻酸钠凝胶机制及其在食品中的应用研究进展[J]. 中国食物与营养, 2014, 20(10): 43-46.
- [8] 谢新宇. 聚氧化乙烯与聚乙烯醇凝胶球应用于废水中无机磷去除的研究[D]. 哈尔滨: 东北林业大学, 2009.
- [9] 王爱平. 活性炭对溶液中重金属的吸附研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2003.
- [10] 张淑琴, 童仕唐. 活性炭对重金属离子铅镉铜的吸附研究[J]. 环境科学与管理, 2008, 33(4): 91-94.
- [11] 徐涛, 史季春. 重金属废水化学处理法的研究现状[J]. 环境管理, 2011, 9(3): 29-31.
- [12] 孙建民, 于丽青, 孙汉文. 重金属废水处理技术进展[J]. 河北大学学报(自然科学版), 2004, 24(4): 438-443.
- [13] 田素燕. 重金属离子废水的处理技术进展[J]. 盐湖研究, 2012, 20(4): 67-72.
- [14] 杨春华. 膜技术在处理重金属废水中的应用[J]. 三峡环境与生态, 2013, 35(3): 28-32.
- [15] 钱小娟, 宋建军. 重金属废水处理技术探讨及其发展趋势[J]. 中国西部科技, 2014, 13(9): 39-40.
- [16] 张帆, 李菁, 谭建华, 等. 吸附法处理重金属废水的研究进展[J]. 化工进展, 2013, 32(11): 2749-2756.

编辑: 徐婷婷 (收稿日期: 2016-03-15)