

羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯生长及品质的影响

宋勇¹, 何谈², 刘明月¹, 曾敏³, 廖柏寒^{3*}

(1. 湖南农业大学园艺园林学院, 长沙 410128; 2. 湖南农业大学资源环境学院, 长沙 410128; 3. 中南林业科技大学生物技术开放性中心实验室, 长沙 410004)

摘要:通过温室盆栽实验研究了施用羟基磷灰石改良 Cd 污染土壤对马铃薯生长及品质的影响. 实验设置了 3 个 Cd 污染水平 (0、5、10 mg·kg⁻¹)、6 个羟基磷灰石施用量 (0、4、8、10、16、30 g·kg⁻¹) 和 2 个马铃薯品种 (中薯 3 号、大西洋). 结果表明, 土壤 Cd 污染导致马铃薯单株产量下降 (5 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中降低 24%~31%, 10 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中降低 41%~45%), 但是施用羟基磷灰石可以提高单株产量. 相对于不施用羟基磷灰石, 5 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中施用 10 g·kg⁻¹ 的羟基磷灰石可以增产 17%~39%, 10 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中施用 30 g·kg⁻¹ 的羟基磷灰石可以增产 45%~58%. 由于羟基磷灰石改善了 Cd 污染土壤环境, 因此马铃薯器官中叶绿素含量和 SOD 活性明显上升, 而 MDA 含量明显下降. 施用羟基磷灰石也提高了马铃薯品质, 马铃薯块茎中维生素 C 含量、淀粉含量以及蛋白质含量也明显提高. 随着羟基磷灰石施用量由 0 g·kg⁻¹ 增加到 30 g·kg⁻¹, 在 5 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中, 马铃薯块茎 Cd 含量由 0.87~0.95 mg·kg⁻¹ 下降到 0.13~0.21 mg·kg⁻¹, 降幅为 78%~85%; 在 10 mg·kg⁻¹ 的 Cd 污染土壤中, 块茎 Cd 含量由 1.86~1.93 mg·kg⁻¹ 下降到 0.52~0.65 mg·kg⁻¹, 降幅为 66%~72%. 实验表明, 羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性的主要机制是提高土壤 pH 值, 降低土壤中有效态 Cd 含量, 羟基磷灰石中的 Ca 阻碍土壤 Cd 向马铃薯迁移. 但是羟基磷灰石对土壤 Cd 毒性的缓解效应是有限性的, 过量施用可能对马铃薯生长和品质产生胁迫作用. 在 Cd 污染土壤中施用适量的羟基磷灰石后中薯 3 号生长状况和品质好于大西洋, 说明不同马铃薯品种对种植环境的改善有不同的响应.

关键词: 马铃薯; Cd 污染; 土壤; 羟基磷灰石; 改良; 品质

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2010)09-2240-08

Effects of Hydroxyapatite on Growth and Quality of Potato (*Solanum tuberosum* L.) in Cd Polluted Soil

SONG Yong¹, HE Tan², LIU Ming-yue¹, ZENG Min³, LIAO Bo-han³

(1. College of Horticulture, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 2. College of Resources and Environment, Hunan Agricultural University, Changsha 410128, China; 3. Biotechnology Core Facilities, Central South University of Forestry and Technology, Changsha 410004, China)

Abstract: A pot experiment was conducted in a glasshouse to study effects of hydroxyapatite amending Cd polluted soil on growth and quality of potato (*Solanum tuberosum* L.). In the experiment, 3 levels of Cd pollution (0, 5, and 10 mg·kg⁻¹) and 6 levels of hydroxyapatite application (0, 4, 8, 10, 16, and 30 g·kg⁻¹) in soil were prepared to plant 2 potato varieties (Zhongshushanhao and Daxiyan in Chinese system). The results showed that Cd pollution in soil resulted in decrease in yield per plant of potato; for example, in the soils with 5 and 10 mg·kg⁻¹ of Cd, the yield per plant decreased 24%-31% and 41%-45%, respectively. Applying hydroxyapatite to Cd pollution could greatly increase yield per plant of potato. Compared to the soil without hydroxyapatite, 10 or 30 g·kg⁻¹ hydroxyapatite added to the soil with 5 or 10 mg·kg⁻¹ of Cd increased 17%-39% or 45%-58% in yield per plant. Due to hydroxyapatite amending Cd polluted soil, chlorophyll contents in leaves and superoxide dismutase (SOD) activities in tubers enhanced and malondialdehyde (MDA) contents in tubers declined apparently. Meanwhile, quality of potato tubers was obviously improved, such as increase in vitamin C contents, starch contents, and protein contents in potato tubers. With hydroxyapatite applying from 0 to 30 g·kg⁻¹, Cd contents in potato tubers decreased from 0.87-0.95 mg·kg⁻¹ to 0.13-0.21 mg·kg⁻¹ by 78%-85% in the soils with 5 mg·kg⁻¹ of Cd, and from 1.86-1.93 mg·kg⁻¹ to 0.52-0.65 mg·kg⁻¹ by 66%-72% in the soils with 10 mg·kg⁻¹ of Cd. The experiment indicated that the mechanism of hydroxyapatite alleviating soil Cd toxicity main included rising soil pH values, reducing effective Cd contents in soil, and Ca from hydroxyapatite blocking soil Cd moving to potato. However, ability of hydroxyapatite alleviating soil Cd toxicity was limited, and excessive hydroxyapatite to soil exhibited stress effects on growth and quality of potato. In the Cd polluted soils with proper hydroxyapatite, growth and quality of Zhongshushanhao were better than those of Daxiyan, indicating different responses of various potato varieties to environment amelioration.

Key words: potato (*Solanum tuberosum* L.); Cd pollution; soil; hydroxyapatite; amendment; quality

收稿日期: 2009-10-22; 修订日期: 2010-02-06

基金项目: 公益性行业(农业)科研专项(nyhyzx 07-006-7); 国家自然科学基金项目(20677080)

作者简介: 宋勇(1968~), 男, 博士, 副教授, 主要研究方向为马铃薯栽培育种, E-mail: songyong@hunau.net

* 通讯联系人, E-mail: liaobh1020@163.com

土壤 Cd 对植物的生长发育有着明显的毒害作用. 受到 Cd 毒害的植物会表现出根系对水分吸收减少, 叶绿素含量和光合效应降低, 植物体内活性氧自由基的代谢平衡受到影响, 因而出现植物褪绿、植株矮小、物候期延迟、生物产量下降甚至死亡等症状^[1]. Cd 对植物的品质也表现出毒害特征, 例如随着土壤中 Cd 含量的增加, 小白菜还原糖和维生素 C 含量逐渐下降^[2]. 因此, 治理与改良 Cd 污染土壤以有利于农业生产一直是备受关注的研究课题. 近几年来, 向土壤投加羟基磷灰石、石灰石等固化剂成为治理土壤 Cd 污染的有效措施^[3], 因为这些固化剂既可提高土壤 pH 值, 增强土壤对 Cd 的吸附, 同时又可以提供植物需要的 Ca 元素, 还可以使土壤中 Cd 形成难溶性的含 Cd 沉淀物^[4].

马铃薯 (*Solanum tuberosum* L.) 是一种重要的粮食作物. 研究表明, Cd 等重金属污染导致马铃薯 DNA 严重破损, 表现出马铃薯生长受阻, 植株高度显著下降, 叶片曲卷等症状^[5]. Cd 污染对马铃薯生长的毒性取决于 Cd 胁迫强度、马铃薯品种、暴露时间等因素^[6]. 由于重金属污染土壤中生长的植物根系大量积累重金属^[7,8], 马铃薯块茎中重金属 Cd 含量和马铃薯品质问题应该予以特别关注.

湖南是有色金属之乡, 土壤重金属污染相当严重; 同时, 马铃薯在湖南种植面积很大. 然而, 国内外有关 Cd 污染土壤改良对马铃薯种植和品质影响的研究目前还少见报道. 本研究通过温室盆栽实验, 分析了施用羟基磷灰石 [$\text{Ca}_{10}(\text{PO}_4)_6(\text{OH})_2$] 改良 Cd 污染土壤对马铃薯生长及品质的影响, 探讨了羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性的机制和局限性, 其目的是改善 Cd 污染土壤环境以利于马铃薯生长与品质的提高, 以期为重金属污染土壤中马铃薯的种植提供科学依据.

1 材料与方法

盆栽实验在日光温室中进行, 栽培时间为 3~5 月. 供试土壤采自湖南农业大学实验基地, 其基本理化性质按照土壤农业化学分析方法进行测试 (表 1)^[9]. 将土壤风干, 过 5 mm 筛, 统一施 CdCl_2 (以纯 Cd 计, 设 3 个处理: 0、5、10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$), 施羟基磷灰石 (设 6 个处理: 0、4、8、10、16、30 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$), 每个处理进行 3 次重复. 土壤熟化一周后, 装入塑料盆 (高 40 cm、直径 30 cm), 每盆装土 5 kg, 同时每盆加入复合肥 (含 N 15%、P 15%、K 15%) 2 g 作为基肥拌匀. 盆栽马铃薯品种选用中薯 3 号 (鲜食型品

种) 和大西洋 (加工型品种). 将 2 个马铃薯品种的微型薯直接栽种于盆中, 每盆 1 株, 栽种后浇适量水, 保持含水量在 10% 左右. 开花 3 周后收获, 培养期为 60 d, 在晴天挖出块茎, 于背阴处晾干^[10].

表 1 供试土壤的基本理化性质

Table 1 Physical and chemical properties of the tested soil

土壤类型	pH	CEC / $\text{cmol}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质 / $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全 Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$	交换态 Cd / $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$
红壤	4.76	5.87	22.13	0.53	0.06

收获时测定每盆马铃薯株高, 称每盆马铃薯块茎鲜重, 测叶片叶绿素含量、块茎中的过氧化物歧化酶 (SOD) 活性、丙二醛 (MDA) 含量. 叶绿素含量用丙酮和乙醇浸提法测定^[11], SOD 活性和 MDA 含量用试剂盒测定 (试剂盒由南京建成生物工程研究所提供). 晾干后的马铃薯块茎洗净、擦干, 并测定维生素 C 含量、淀粉含量、蛋白质含量. 维生素 C 含量用比色法测定^[9]、淀粉含量用碘显色法测定^[12]、蛋白质含量用考马斯亮蓝 G-250 法测定^[11]. 马铃薯块茎 Cd 含量的测定^[13]: 将收获时采集的马铃薯块茎洗净擦干, 切成块状, 放入烘箱中, 60℃ 烘干至恒质量, 粉碎过筛, 块茎粉末用 $\text{HNO}_3:\text{HClO}_4 = 5:1$ 消化, 定容后用原子吸收法 (AA-646, 日本岛津) 测定 Cd 含量. 测定数据用 Excel 进行单因素方差分析.

2 结果与分析

2.1 羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯生长指标的影响

由表 2 可知, 土壤 Cd 污染对马铃薯生长产生严重影响, 单株产量和平均株高都明显下降. 相对于无污染土壤, 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染导致中薯 3 号和大西洋单株产量分别降低 30.9% 和 23.6%, 株高分别降低 18.9% 和 22.6%; 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染则导致中薯 3 号和大西洋单株产量分别降低 44.8% 和 41.3%, 株高分别降低 32.1% 和 45.9%. 从单株产量上看, 大西洋产量略高于中薯 3 号, 但二者之间不存在显著差异性. 但是, 随着羟基磷灰石施用量的增加, 未污染土壤中中薯 3 号和大西洋单株产量和株高呈现先升后降的趋势, 分别在羟基磷灰石用量为 4 和 8 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值; 对于 5 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤, 单株产量和株高分别在羟基磷灰石用量为 10 和 4 $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 时达到最大值 (相对于不施用羟基磷灰石, 单株产量增幅分别为 39.0% 和 16.7%); 而对于 10 $\text{mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤, 单株产量和株高

分别在羟基磷灰石用量为 30 和 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 时达到最大值(单株产量增幅分别为 57.5% 和 45.1%)。显然,羟基磷灰石的施用显著改善了 Cd 污染土壤环

境,促进了马铃薯的生长,而且对于 Cd 污染程度不同的土壤,马铃薯生长达到最佳条件的羟基磷灰石施用量是不同的。

表 2 Cd 污染土壤中施用羟基磷灰石马铃薯的生长指标¹⁾

Table 2 Growth indexes of *Solanum tuberosum* L. plants in Cd polluted soils treated with various application of hydroxyapatite

马铃薯 品种	羟基磷灰石添加量 $/\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$	$\omega(\text{Cd}) = 0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{Cd}) = 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{Cd}) = 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
		单株产量/g	株高/cm	单株产量/g	株高/cm	单株产量/g	株高/cm
中薯 3 号	0	76.2 ± 2.5^a	30.2 ± 1.2^{de}	52.6 ± 1.3^e	24.5 ± 0.7^e	42.1 ± 1.2^e	20.5 ± 0.7^e
	4	77.3 ± 1.5^a	32.9 ± 1.8^{abc}	59.4 ± 0.7^d	42.5 ± 2.0^a	48.9 ± 0.8^d	33.3 ± 2.1^b
	8	75.9 ± 2.2^{ab}	34.0 ± 1.9^a	67.3 ± 0.9^c	38.4 ± 1.3^{bc}	54.4 ± 1.2^c	36.9 ± 1.5^a
	10	74.2 ± 1.6^{ab}	31.3 ± 0.9^{bcd}	73.2 ± 1.1^a	37.6 ± 2.4^{bc}	61.2 ± 1.1^b	33.1 ± 1.4^b
	16	72.7 ± 1.3^b	30.5 ± 0.7^{cde}	70.6 ± 0.6^b	35.7 ± 2.2^{cd}	65.4 ± 1.1^a	27.3 ± 1.0^c
	30	67.5 ± 0.9^c	28.4 ± 0.9^e	68.4 ± 1.0^c	33.6 ± 1.2^d	66.3 ± 1.0^a	23.8 ± 1.5^d
大西洋	0	80.0 ± 3.1^a	30.5 ± 1.6^{ab}	61.1 ± 1.3^d	23.6 ± 0.5^d	47.0 ± 1.8^f	16.5 ± 0.5^e
	4	82.2 ± 1.0^a	32.0 ± 1.4^{ab}	63.9 ± 1.4^c	37.9 ± 2.7^a	50.9 ± 0.6^e	28.3 ± 1.5^{bc}
	8	79.8 ± 0.5^a	32.7 ± 2.6^a	67.2 ± 0.9^b	37.8 ± 0.6^a	56.0 ± 1.4^d	33.3 ± 1.1^a
	10	76.4 ± 1.2^b	31.3 ± 0.8^{ab}	71.3 ± 0.7^a	32.7 ± 0.3^b	59.3 ± 0.8^c	29.5 ± 0.9^b
	16	74.8 ± 1.6^b	30.3 ± 0.7^{ab}	70.3 ± 0.9^a	29.2 ± 3.4^c	64.4 ± 1.0^b	27.6 ± 0.8^{cd}
	30	71.2 ± 0.8^c	29.5 ± 1.0^b	67.3 ± 1.0^b	25.9 ± 1.5^{cd}	68.2 ± 0.7^a	26.4 ± 1.1^d

1) 数据为平均值 $\pm$ 标准差 ($n = 3$); 同一列同一 Cd 浓度下, 字母相同者表示在 0.05 水平上差异不显著

2.2 羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯生理生化指标的影响

植物叶片叶绿素含量是反映污染物对植物伤害程度的一个重要指标。由图 1(a) 可知, 马铃薯叶片中叶绿素含量随着羟基磷灰石施加量的增加而显著增加, 其中中薯 3 号叶绿素含量增加 19% ~ 21%, 大西洋叶绿素含量增加 15% ~ 34%。无 Cd 污染且不施用羟基磷灰石情况下, 中薯 3 号叶片叶绿素含量略高于大西洋。但是, 由于羟基磷灰石的施用, 导致中薯 3 号叶片叶绿素含量在污染与非污染土壤之间差异性不明显, 而无污染土壤中大西洋叶片叶绿素含量低于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中叶绿素含量, 说明不同品种马铃薯对羟基磷灰石的响应是不同的。有研究表明, 高浓度重金属可以破坏叶绿素的合成过程并影响叶绿素酶的活性^[14], 因此土壤 Cd 污染导致植物叶绿素含量的下降。从叶绿素含量变化可知, 羟基磷灰石的施用缓解了土壤 Cd 对马铃薯生长的毒害。

图 1(b) 表明, 随着羟基磷灰石施用量的增加, 马铃薯块茎中 SOD 活性明显升高。虽然中薯 3 号 SOD 活性在数值上明显高于大西洋, 但是相对于不同的 Cd 污染水平, 2 个品种之间 SOD 活性具有非常相似的上升趋势。例如在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中, 中薯 3 号 SOD 活性增加 $21 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$, 而大西洋 SOD 活性也增加 $19 \text{ U} \cdot \text{mg}^{-1}$ 。在未污染土壤中, 2 个品种马铃薯块茎 MDA 含量随着羟基磷灰石施用量

的增加而略有增加, 但这种变化不显著[图 1(c)]。对于 Cd 含量为 0、5、 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的土壤, 中薯 3 号 MDA 含量为 3.65、4.76、 $5.35 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1}$, 大西洋 MDA 含量为 3.25、4.56、 $5.09 \text{ nmol} \cdot \text{mg}^{-1}$, 2 个品种马铃薯块茎中 MDA 含量均随土壤 Cd 浓度的升高而显著增加。但是, 随着羟基磷灰石施用量的增加, 在 2 个 Cd 污染土壤中, 2 个品种马铃薯块茎中 MDA 含量均显著降低, 最大降幅为 24% ~ 26%。显然, 马铃薯块茎中 MDA 含量的差异和变化很好地反映了土壤 Cd 污染水平。根据马铃薯块茎中 SOD 活性和 MDA 含量变化可知, 施用适量的羟基磷灰石可以增强马铃薯清除块茎中活性氧化自由基的能力, 降低块茎中膜脂化程度, 缓解土壤 Cd 对马铃薯生长的毒害。

2.3 羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯品质指标的影响

维生素 C 是植物体内重要的小分子抗氧化物质, 可以直接清除植物体内因氧化代谢、光合作用及环境胁迫等产生的活性氧^[15], 还能维持另一重要抗氧化剂维生素 E 的还原态^[16], 并通过抗坏血酸-谷胱甘肽循环间接清除 H_2O_2 ^[17], 从而保护植物有机体免于氧化胁迫造成的伤害。因此, 维生素 C 含量的变化能够较好地反映植物所处环境条件的改变。由图 2(a) 可知, 2 个品种马铃薯的维生素 C 含量随环境条件的变化存在明显差异。在未污染土壤中, 大西洋块茎中维生素 C 含量明显高于中薯 3 号块茎中维

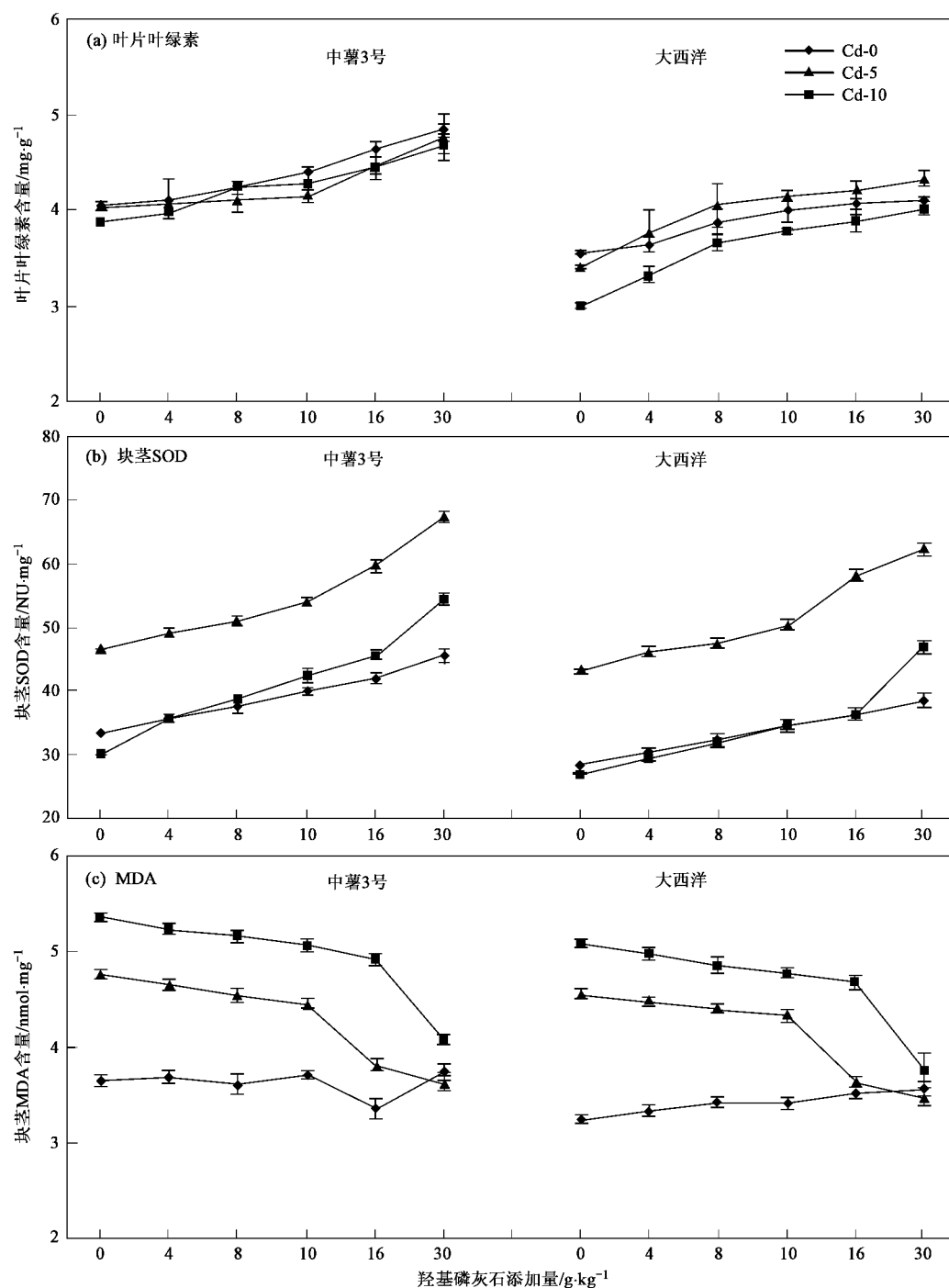


图1 羟基磷灰石施用对 Cd 污染土壤中马铃薯叶片叶绿素、块茎 SOD 和 MDA 的影响

Fig.1 Effects of hydroxyapatite application on trends of chlorophyll contents in leaves, SOD activities, and MDA contents in tubers of *Solanum tuberosum* L. plants in Cd polluted soil

生素 C 含量,且随着羟基磷灰石施用量的增加呈现出线性下降的趋势,下降大约 22%;而中薯 3 号的维生素 C 含量呈现先上升后下降趋势.在 Cd 污染土壤中,随着羟基磷灰石施用量的增加,中薯 3 号的维生素 C 含量仍然呈现先上升后下降趋势,而大西洋的维生素 C 含量则表现为线性上升,在 5 和 10

$\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中增加幅度分别为 40% 和 48%.显然,对于中薯 3 号而言,低中量羟基磷灰石的施用可以提高块茎中维生素 C 含量,而过量的羟基磷灰石可能降低其维生素 C 含量;对于大西洋而言,未污染土壤中羟基磷灰石的施用导致维生素 C 含量的降低,而污染土壤中羟基磷灰石可以促进维

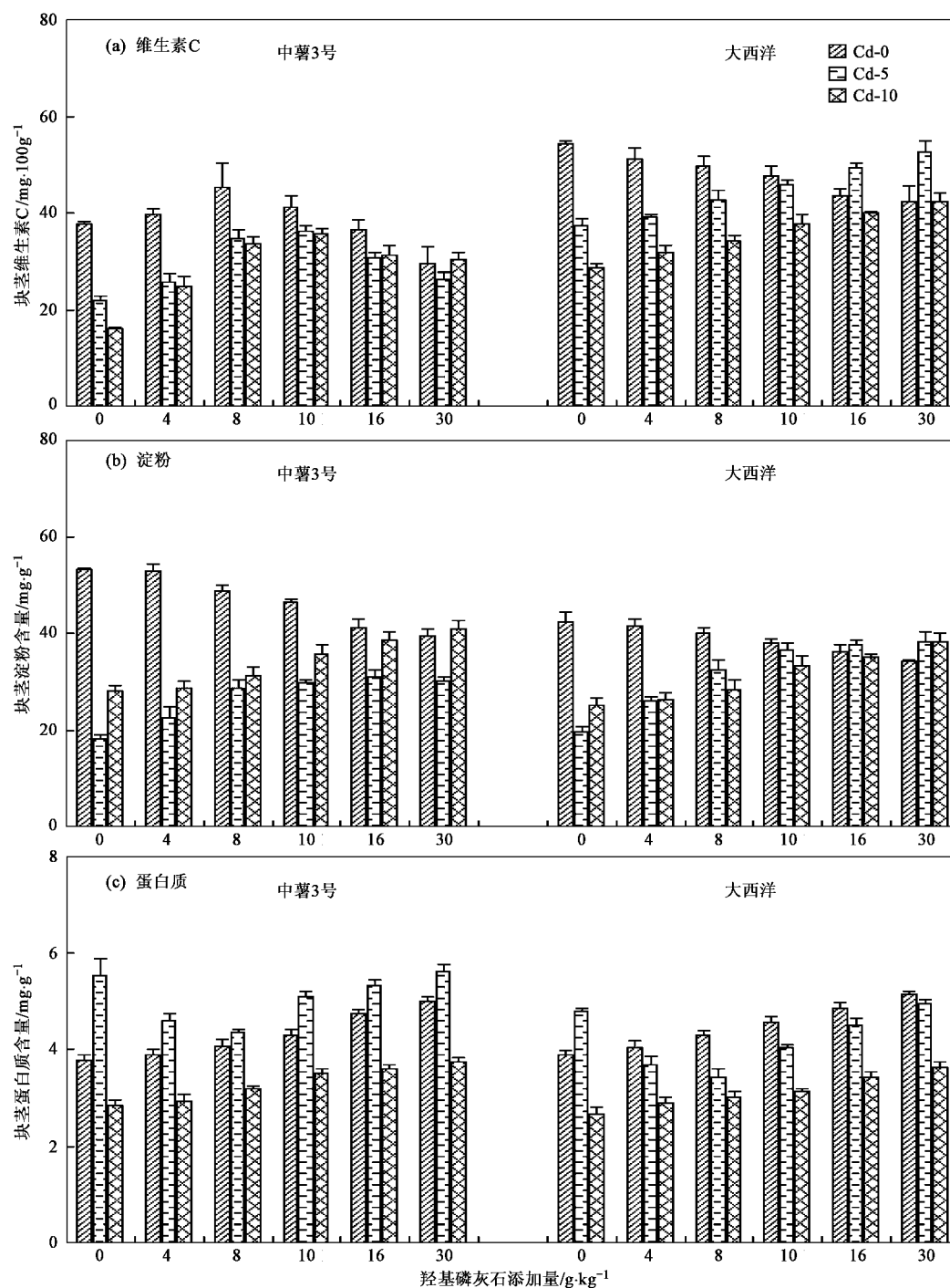


图2 羟基磷灰石施用对 Cd 污染土壤中马铃薯块茎中维生素 C、淀粉和蛋白质的影响

Fig. 2 Effects of hydroxyapatite application on trends of vitamin C contents, starch contents, and protein contents in tubers of *Solanum tuberosum* L. plants in Cd polluted soil

生素 C 含量的增加。

淀粉是马铃薯块茎中的主要贮藏物质,马铃薯的蛋白质容易消化吸收,优于其他作物的蛋白质^[18]。在未污染土壤中,羟基磷灰石的施用导致 2 个品种马铃薯块茎中淀粉含量线性下降(中薯 3 号由 $53.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $39.5 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,降幅 26%;大

西洋则由 $42.3 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$ 下降到 $34.1 \text{ mg} \cdot \text{g}^{-1}$,降幅 19%),表明在未污染土壤中施用羟基磷灰石反而对马铃薯生长和品质产生胁迫作用[图 2(b)]。但是,在 Cd 污染土壤中,2 个品种马铃薯淀粉含量都随着羟基磷灰石施用量的增加呈现明显上升趋势,说明羟基磷灰石具有明显改善土壤 Cd 污染有利于

马铃薯种植的作用. 相对而言, 中薯 3 号块茎中淀粉含量高于同一条件下大西洋的淀粉含量.

由图 2(c) 可知, 在未污染土壤和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中, 2 个品种马铃薯块茎中的蛋白质含量均随着羟基磷灰石施用量的增加而呈现缓慢的线性上升趋势. 不施用羟基磷灰石与羟基磷灰石添加量为 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的情况相比, 2 个品种马铃薯块茎中的蛋白质含量增幅为 32% ~ 36%. 但是对于 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤而言, 随着羟基磷灰石施用量的增加, 2 个品种马铃薯块茎中的蛋白质含量都呈现先下降后上升趋势, 最大降幅为 21% ~ 29%, 出现在羟基磷灰石施用量为 $8 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的条件下.

2.4 羟基磷灰石对 Cd 污染土壤中马铃薯块茎 Cd 含量的影响

图 3 表明, 马铃薯块茎中 Cd 含量与土壤 Cd 污染水平显著相关, 土壤 Cd 含量越高则马铃薯块茎中 Cd 含量也越高; 同时, 羟基磷灰石的施用可以极

大地降低马铃薯块茎中 Cd 含量. 随着羟基磷灰石施用量由 $0 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 增加到 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 在未污染土壤中, 马铃薯块茎 Cd 含量由 $0.031 \sim 0.035 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.016 \sim 0.019 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅为 46% ~ 48%; $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中, 中薯 3 号块茎 Cd 含量由 $0.95 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.21 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大西洋块茎 Cd 含量由 $0.87 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.13 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅分别为 78% 和 85%; $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ Cd 污染土壤中, 中薯 3 号块茎 Cd 含量由 $1.93 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.65 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 大西洋块茎 Cd 含量由 $1.86 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.52 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 降幅分别为 66% 和 72%. 对数据的回归分析表明, 在 2 个 Cd 污染土壤中, 羟基磷灰石的施用量与马铃薯块茎 Cd 含量之间存在极显著的负直线关系 ($R^2 = 0.96, n = 6$). 然而, 必须注意到, 虽然在 Cd 污染土壤上施用羟基磷灰石极大地降低了马铃薯块茎的 Cd 含量, 但是这个 Cd 含量仍然超过我国无公害蔬菜安

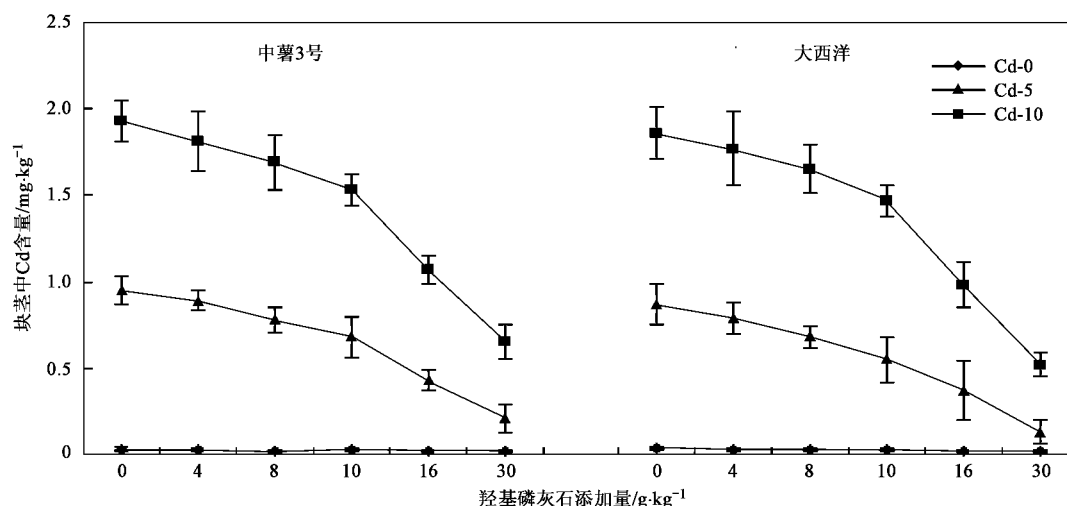


图 3 羟基磷灰石施用对 Cd 污染土壤中马铃薯块茎 Cd 含量的影响

Fig. 3 Effects of hydroxyapatite application on trends of Cd contents in tubers of *Solanum tuberosum* L. plants in Cd polluted soil

全标准中薯类 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 允许量^[19].

3 讨论

3.1 羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性作用的机制

在 Cd 污染土壤中适量施用羟基磷灰石可以明显缓解土壤 Cd 的毒性作用, 改善马铃薯生长环境, 提高马铃薯块茎品质, 主要表现在提高马铃薯单株产量, 增加块茎中维生素 C、淀粉以及蛋白质含量, 并明显降低块茎中 Cd 含量. 有文献表明, 羟基磷灰石、石灰石等碱性物质可以提高土壤 pH 值, 增强土壤对 Cd 的吸附, 还提供植物需要的 Ca 元素, 并形

成难溶性含 Cd 沉淀物^[4]. 对本实验添加 Cd 后而添加羟基磷灰石前的土壤性质进行分析, 并与马铃薯种植后的土壤性质进行比较, 发现土壤 pH 值由 4.7 ~ 4.9 上升到 5.3 ~ 5.5, 土壤有效态 Cd 含量由 $1.3 \sim 2.6 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 下降到 $0.47 \sim 0.53 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$. 由此可知, 羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性的主要机制是, 羟基磷灰石的施用提高了土壤 pH 值, 降低了土壤中有效态 Cd 含量, 随羟基磷灰石而进入土壤的 Ca 阻碍了土壤 Cd 向马铃薯迁移, 因此缓解土壤 Cd 对马铃薯生长的毒性.

3.2 羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性作用的局限性

在利用羟基磷灰石改良 Cd 污染土壤的同时应该注意 2 个问题,一是羟基磷灰石对无 Cd 污染土壤中生长的植物可能产生的胁迫作用,二是羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性的局限性.表 2 表明,在 $0 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中施加 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的羟基磷灰石,2 个品种马铃薯单株产量均下降 11%,同时观察到块茎中维生素 C 含量和淀粉含量的明显下降(图 2).这说明,过量羟基磷灰石的施用对于无 Cd 污染土壤中马铃薯生长和品质也可能造成一定的胁迫作用.图 3 表明,在 $5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 或 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中种植马铃薯,尽管羟基磷灰石的施用量高达 $30 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$,其块茎 Cd 含量仍然超过国家无公害蔬菜安全标准中薯类 $0.05 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 允许限量,而且马铃薯单株产量比无 Cd 污染且不添加羟基磷灰石的条件减产 10% ~ 16%(表 2).这表明,羟基磷灰石改良 Cd 污染土壤的效果是有限的,既取决于羟基磷灰石的施用量,也取决于土壤 Cd 含量.

3.3 叶绿素与其他生理生化指标和品质指标之间的关系

叶绿素是植物光合作用的主要色素,植物叶片中叶绿素含量随着土壤 Cd 浓度的升高而降低^[20],叶绿素的破坏与降解会直接导致光合作用效率的降低.SOD 是植物体内重要的保护酶系统,与其他保护酶系统一起可有效清除代谢过程中产生的活性氧

对脂膜的过氧化及其他伤害过程^[20].MDA 是膜脂过氧化作用的产物,常用来表示植物对逆境条件反应的强弱,随着 Cd^{2+} 浓度的增加,MDA 含量逐渐升高^[21].因此,在马铃薯叶片叶绿素含量与块茎 SOD 活性、MDA 含量之间应该存在某种关联.对相关实验数据的线性回归分析表明(表 3),中薯 3 号块茎 SOD 活性与叶片叶绿素含量存在着极显著的正的线性关系,MDA 含量与叶片叶绿素含量之间的负线性关系也达到显著或极显著水平,而大西洋品种仅仅在块茎 SOD 活性与叶片叶绿素含量之间达到显著的正线性关系.由于叶片叶绿素含量反映了土壤污染状况,因此与马铃薯块茎品质之间也应该存在某种关联.表 3 表明,中薯 3 号品种块茎淀粉含量和蛋白质含量均与叶片叶绿素含量仅在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中存在极显著的正线性关系;对于大西洋而言,块茎维生素含量和淀粉含量与叶片叶绿素含量在 5 和 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中均存在显著或极显著的正线性关系,蛋白质含量与叶绿素含量仅在 $10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 的 Cd 污染土壤中存在极显著的正线性关系.本实验结果对马铃薯叶片叶绿素与块茎其他生理生化指标和品质指标之间的关系虽然仅仅是探索性的阐述,随着相关研究的进一步完善和实验数据的进一步积累,这些关系将会更加明晰.

表 3 马铃薯叶片叶绿素与块茎其他生理生化指标和品质指标之间的关系¹⁾

Table 3 Relations between chlorophyll contents in leaves and physiological and biochemical indexes or quality indexes of *Solanum tuberosum* L. plants

马铃薯品种	相互关系	$\omega(\text{土壤 Cd}) = 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$		$\omega(\text{土壤 Cd}) = 10 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	
		$y = ax + b$	R^2	$y = ax + b$	R^2
中薯 3 号	SOD 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 26.1x - 56.3$	0.966**	$y = 28.0x - 77.6$	0.966**
	MDA 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = -1.58x + 11.1$	0.952**	$y = -1.39x + 10.9$	0.801*
	维生素 C 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = -1.36x + 35.0$	0.005	$y = 16.3x - 40.5$	0.452
	淀粉含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 11.2x - 21.1$	0.395	$y = 17.5x - 40.3$	0.941**
	蛋白质含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 0.991x + 0.859$	0.319	$y = 1.21x - 1.84$	0.933**
大西洋	SOD 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 18.2x - 21.2$	0.709*	$y = 15.4x - 21.4$	0.727*
	MDA 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = -1.04x + 8.30$	0.581	$y = -0.923x + 8.02$	0.560
	维生素 C 含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 15.7x - 18.1$	0.835*	$y = 12.5x - 14.1$	0.850**
	淀粉含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 21.7x - 54.9$	0.979**	$y = 15.4x - 21.4$	0.727*
	蛋白质含量(y)-叶绿素含量(x)	$y = 0.002x + 4.21$	1E-06	$y = 0.840x + 0.0894$	0.871**

1) ** 表示在 0.01 水平上显著, * 表示在 0.05 水平上显著; $n = 6$, $R_{0.01}^2 = 0.841$, $R_{0.05}^2 = 0.658$

4 结论

(1) 土壤 Cd 污染对马铃薯生长有明显的胁迫作用,对马铃薯生长和块茎品质产生不利影响,主要表现在马铃薯单株产量、叶片叶绿素含量、块茎维生素 C 含量、淀粉含量下降,块茎 Cd 含量上升.

(2) 适量施用羟基磷灰石可以明显改善 Cd 污

染土壤环境,缓解土壤 Cd 对马铃薯生长的毒性,提高马铃薯块茎品质.羟基磷灰石缓解土壤 Cd 毒性的主要机制是提高土壤 pH 值,降低土壤中有效态 Cd 含量,羟基磷灰石中的 Ca 阻碍土壤 Cd 向马铃薯迁移.但是,羟基磷灰石对土壤 Cd 毒性的缓解效应是有限性的,过量羟基磷灰石施用对无 Cd 污染土壤中的马铃薯生长可能产生胁迫作用.

(3) 马铃薯叶片叶绿素含量和块茎中 SOD 活性、MDA 含量等生理生化指标的变化可以在一定程度上反映土壤 Cd 污染状况,同时也可以反映施用羟基磷灰石改善 Cd 污染土壤环境的状况。

(4) 在无 Cd 污染土壤中大西洋生长状况和品质好于中薯 3 号,但是在 Cd 污染土壤中施用适量的羟基磷灰石后中薯 3 号生长状况和品质好于大西洋,说明不同马铃薯品种对种植环境的改善有不同的响应。

参考文献:

- [1] 夏汉平. 土壤-植物系统中的镉研究进展[J]. 应用与环境生物学报, 1997, **3**(3): 289-298.
- [2] 谢建治, 李博文, 刘树庆. Cd、Zn 污染对小白菜营养品质的影响[J]. 华南农业大学学报, 2005, **26**(1): 42-45.
- [3] 商平, 王丽娜. 环境矿物材料治理镉(Cd^{2+})污染研究进展[J]. 岩石矿物学杂志, 2005, **6**(24): 681-685.
- [4] 崔德杰, 张玉龙. 土壤重金属污染现状与修复技术研究进展[J]. 土壤通报, 2004, **3**(35): 366-370.
- [5] Gichner T, Atková Z, Száková J, *et al.* Toxicity and DNA damage in tobacco and potato plants growing on soil polluted with heavy metals [J]. Ecotoxicology and Environmental Safety, 2006, **65**(3): 420-426.
- [6] Gonçalves J F, Antes F G, Maldaner J, *et al.* Cadmium and mineral nutrient accumulation in potato plantlets grown under cadmium stress in two different experimental culture conditions [J]. Plant Physiology and Biochemistry, 2009, **47**(9): 814-821.
- [7] 雷鸣, 廖柏寒, 秦普丰, 等. 矿区污染土壤 Pb、Cd、Cu 和 Zn 的形态分布及其生物活性的研究[J]. 生态环境, 2007, **16**(3): 807-811.
- [8] 曾敏, 廖柏寒, 曾清如, 等. 土壤-植物系统中模拟酸雨与 Cd 复合污染的短期环境效应——黄豆盆栽试验[J]. 环境科学学报, 2005, **25**(12): 1687-1692.
- [9] 鲁如坤. 土壤农业化学分析法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1999.
- [10] 夏仁学. 园艺植物栽培学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2004.
- [11] 王学奎. 植物生理生化实验原理和技术[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.
- [12] 徐昌杰, 陈文峻, 陈昆松, 等. 淀粉含量测定的一种简便方法——碘显色法[J]. 生物技术, 1998, **8**(2): 41-43.
- [13] 陈建勋, 王晓峰. 植物生理学实验指导[M]. 广州: 华南理工大学出版社, 2002.
- [14] Prasad D D K, Prasad A R K. Effect of lead and mercury on chlorophyll synthesis in mung bean seedlings [J]. Phytochemistry, 1987, **26**(4): 881-883.
- [15] Padh H. Cellular functions of ascorbic acid [J]. Biochemistry and Cell Biology-Biochimie et Biologie Cellulaire, 1990, **68**: 1166-1173.
- [16] Liebler D C, Jeanne A B. Antioxidants protection of phospholipid bilayer by alpha-tocopherol. Control of alpha-tocopherol status and lipid peroxidation by ascorbic acid and glutathione [J]. Biological Chemistry, 1986, **261**: 12114-12449.
- [17] Asada K. Ascorbate peroxidase—a hydrogen peroxide-scavenging enzyme in plants [J]. Physiologia Plantarum, 1992, **85**: 235-241.
- [18] 熊兴耀, 刘明月, 何长征. 马铃薯生产实用技术[M]. 长沙: 湖南科学技术出版社, 2006.
- [19] GB 15201-1994, 食品中镉限量卫生标准[S].
- [20] Liao B H, Liu H Y, Lu S Q, *et al.* Combined toxic effects of Cd^{2+} and acid rain on *Vicia faba* L. [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2003, **71**(5): 998-1004.
- [21] 黄运湘, 廖柏寒, 肖浪涛, 等. 镉处理对大豆幼苗生长及激素含量的影响[J]. 环境科学, 2006, **27**(7): 1398-1401.