

酸性土壤有效砷提取方法研究

黄瑞卿, 王 果, 汤榕雁, 廖上强, 陈炎辉

(福建农林大学资源与环境学院, 福建 福州 350002)

摘 要:采用 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ (pH8.5), $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 和 $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HCl}$ 等 3 种浸提剂,对福建省酸性水稻土和酸性菜地土壤有效砷的提取效果以及相关的提取条件进行了研究。结果表明,3 种浸提剂所提取的土壤有效砷与作物可食用部分砷含量之间均存在显著相关,其中 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4$ 提取的有效砷与糙米和蔬菜地上部砷含量的相关性最高,相关系数分别是 0.628 和 0.824,是三者中最佳的浸提剂。对 NaH_2PO_4 的提取条件的研究表明,在 15:1 的液土比条件下以 $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$ 的速度振荡 120 min 是最佳的酸性土壤有效砷的提取方法。

关键词:酸性土壤;有效砷;浸提剂;浸提时间;液土比;振荡速度

中图分类号:S151.93 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-2043(2005)03-0610-06

Extraction Method for Available Arsenic in Acid Soils

HUANG Rui-qing, WANG Guo, TANG Rong-yan, LIAO Shang-qiang, CHEN Yan-hui

(Department of Resources and Environmental Sciences, Fujian Agriculture and Forestry University, Fuzhou 350002, China)

Abstract: In order to choose a best extractant for predicting the availability of arsenic in acid soils, three extractants, $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ (pH8.5), $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4$ and $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HCl}$, were compared by using some acid paddy soils and vegetable soils as well as the edible parts of rice and the vegetables grown in the soils collected from Fujian Province. The pH values of the soils ranged from 3.92 to 7.03. The best extraction conditions for the chosen extractant were also studied. The amounts of the available arsenic extracted by the three extractants decreased in the order of $0.1\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{HCl}>0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaH}_2\text{PO}_4>0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{NaHCO}_3$ (pH8.5). The available arsenic extracted by the three extractants all showed significant correlations with the arsenic content of the rice grains (air-dried basis) and the aboveground parts of the vegetables (fresh basis), indicating that all the extractants were good for predicting the availability of the soil arsenic. Among the three extractants, NaH_2PO_4 was best because the correlation was most significant between the available As extracted by it and As contents of both the rice grains and the aboveground parts of the vegetables, the correlation coefficients (r) being 0.628 and 0.824, respectively. The extracted arsenic of the soils rich in available arsenic by NaH_2PO_4 increased with increasing ratio of solution to soil until 15:1, with increasing shaking time until 120 min, and with increasing shaking velocity until $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. The soils poor in available arsenic reached their maximal extracted amounts when the ratio of solution to soil was less than 2, the shaking time was less than 60 min, and the shaking velocity was less than $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$. For ensuring the complete extraction from both the soils with higher and lower available As, the best extraction conditions by NaH_2PO_4 were 15:1 of the ratio of solution to soil, 120 minutes of shaking time with the shaking velocity of $250\text{ r}\cdot\text{min}^{-1}$.

Keywords: acid soil; available arsenic; extractant; extraction time; ratio of solution to soil; shaking velocity

我国土壤砷元素背景值为 $9.6\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$, 范围为 $2.5\sim33.5\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ [1]。农药施用、含砷矿物的冶炼以及含砷化合物制造等工业废物的排放可能导致土壤砷的

污染。土壤砷污染会使农产品砷含量升高,进而危害人畜健康。长期食用被砷污染的粮食和其他食品,会引起砷中毒。砷在土壤中以无机态为主,在氧化条件下砷酸盐是其主要形态,在还原条件下亚砷酸盐是主要形态。砷酸盐在酸性土壤中容易被铁、铝等氧化物固定,毒性较低,而亚砷酸盐在土壤中的溶解度较高,毒性也较强[2]。砷在土壤中会产生强烈的固定作用,但不同理化性质的土壤对砷的固定能力差异悬殊,因而

收稿日期:2004-09-06

基金项目:福建省科技厅重点攻关项目(2003Y026)

作者简介:黄瑞卿(1979—),男,硕士,研究方向为土壤环境化学与土壤污染生态。

联系人:王 果 E-mail:gwang@yahoo.com.cn

砷在土壤中的形态及其比例也大不相同,相同含量的砷在不同土壤中的生物有效性和毒性可能有很大差异。因此,土壤全砷含量对于衡量土壤砷的生物有效性和生物毒性而言意义有限^[3]。虽然目前不少国家的土壤有害元素的限量依然用元素总量表达,但越来越趋于一致的意见是应该以土壤有害元素的有效量来表达土壤有害元素的限量^[4]。因此,测定土壤有效砷含量对判断土壤砷的生物有效性和土壤砷环境风险评价具有十分重要的意义。

土壤污染元素有效量测定的关键在于浸提剂的选择和浸提条件的确定。有关土壤有效砷提取方法的研究较少。Woolson 等认为,在 pH<6.5 的土壤上,用 0.05 mol·L⁻¹ HCl 作为浸提剂较好,而在 pH 较高的土壤上则以 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 为佳^[5]。涂从等(1992)在比较了 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH8.5), 1.0 mol·L⁻¹ NH₄Cl, 0.1 mol·L⁻¹ HCl 对紫色土和黄壤有效砷的提取效果后认为 3 种提取剂都可以作为土壤有效砷的浸提剂,但以 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃(pH8.5)为最佳^[6]。肖玲等(1996)的研究认为 pH8.5 的 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 作为石灰性土壤有效砷的提取剂比较合适^[7]。Peryea (2002) 的研究表明,苹果叶片和果实中砷含量与 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ 或 TCLP 提取的砷有较好的相关^[8]。

从上述结果看,目前较普遍被采用的土壤有效砷浸提剂是 0.5 mol·L⁻¹ NaHCO₃ (pH8.5)。但上述研究主要在石灰性土壤上进行。酸性土壤富含对砷固定能力很强的氧化铁、铝,其中砷的化学行为不同于石灰性土壤,因而对酸性土壤中有效砷的提取方法未必与石灰性土壤相同^[9]。目前关于酸性土壤有效砷的提取尚缺乏一个比较公认的方法。为了合理评价热带亚热带地区酸性土壤砷的生物有效性及环境风险,我们以福建省的酸性土壤为材料,进行了酸性土壤有效砷提取方法的研究。

1 材料与方法

1.1 材料

为了使研究结果更符合田间的情况,我们完全采用田间采集的作物和相应的土壤进行研究。供试样品(共 17 个水稻和 37 个蔬菜样品及相应土壤)分别采自福建省龙岩市新罗区(XL)、南平市延平区(YP)、宁德市古田县(GT)和蕉城区(JC)、福州市郊区(FZ)等地。采样时首先选择作物种类和采样小区,在选定的采样小区上采集作物的可食用部分,每个采样小区至少采集 3~5 个样品组成一个混合样品。同时采集相应

土壤(略深于根系分布层,地表到≤15 cm)组成混合样品,采集后尽快运回实验室处理。

新鲜蔬菜样品经洗净后,适当滤干除去外表的水分,称鲜重。置于 80℃~90℃鼓风干燥箱中烘 15~30 min 以杀酶;之后置于烘干箱中低温烘干(约 65℃),必要时在微波炉中加速烘干。称烘干重,并计算含水量。烘干后的植物样品用不锈钢粉碎机粉碎后过 0.5 mm 尼龙筛,储存于密封塑料袋备用。谷粒则风干后直接去壳、研磨、过筛、装袋备用。土样经风干磨细后,过 2 mm 筛,少量过 0.149 mm 筛,储存于密封的塑料袋中备用。

供试土壤的 pH 值在 3.92(YP-011)到 7.03(XL-2L3)之间,有机质含量在 18.8 g·kg⁻¹(GT-012)到 87.4 g·kg⁻¹(XL-040)之间,CEC 在 4.73 cmol(+)·kg⁻¹(XL-081)到 12.31 cmol(+)·kg⁻¹(YP-023)之间,<0.002 mm 粘粒含量在 48.7 g·kg⁻¹(JC-003)到 330.9 g·kg⁻¹(GT-011)之间,土壤全砷含量在 1.212 mg·kg⁻¹(XL-082)到 10.88(FZ-025)mg·kg⁻¹ 之间。

1.2 方法

1.2.1 土壤和植物样品含砷量的测定

在供试样品测定之前,先用国标土壤和植物样品检验测定方法,直至测定结果符合标样保证值范围,方开始供试样品的测定。

1.2.2.1 土壤样品全砷含量测定

称取过 0.149 mm 筛的土样 0.25 g 于 100 mL 锥形瓶中,用少量蒸馏水湿润之,加 6 mL 盐酸,5 mL 硝酸,2 mL 高氯酸,并在锥形瓶口加盖小漏斗,置于电热板低温加热至剧烈反应停止。用少量蒸馏水冲洗漏斗,取下漏斗,低温加热三角锥瓶至近干,取下冷却,全量转移至 50 mL 容量瓶,加 5 mL 50 g·L⁻¹ 硫脲并用蒸馏水定容,以 10% HCl 为载流 1.5% 硼氢化钾为还原剂在原子荧光光谱仪(北京瑞利分析仪器公司,AF-610A 型)上测定。

1.2.1.2 植物样品全砷含量测定

称取植物样 0.5 g 置于 100 mL 锥形瓶中,加硝酸 20 mL,硫酸 1.25 mL,摇匀后放置过夜,置于电热板加热消解,当消解液处理至 10 mL 左右,补加硝酸 5 mL,再消解至 10 mL 左右再补加硝酸 5 mL(注意避免炭化)。当消解液再次处理至 10 mL 左右时,加入高氯酸 1.5 mL,继续加热至消解完全,待高氯酸白烟散尽、硫酸白烟冒出,加水 25 mL,再蒸发至冒硫酸白烟。冷却,用水将内容物定量转入 25 mL 容量瓶中,其间加入 50 g·L⁻¹ 硫脲 2.5 mL,补水至刻度并混匀,以 10%

HCl为载流,1.5%硼氢化钾为还原剂,在原子荧光光谱仪上测定。

1.2.2 土壤有效砷浸提方法的研究

1.2.2.1 浸提剂的选择

称取<2 mm 风干土样(水稻土样品 17 个,菜地土壤样品 37 个)5.00 g 于 150 mL 加盖塑料瓶中。在本研究的最佳液土比未确定之前,先根据肖玲等(1996)的研究结果^[7],按液土比 10:1 分别加入 $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 (pH8.5), $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaH_2PO_4 和 $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl,在振荡器上(国华电器有限公司, HY-8 型调速振荡器)以 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度振荡 60 min。到达时间后,立即取出用定量滤纸干过滤,同时做空白。滤液与标准系列溶液同时在原子荧光光谱仪上测定。不同浸提剂提取的有效砷与作物可食部分含砷量进行相关性分析,从而确定最佳浸提剂。

1.2.2.2 液土比的选择

称取<2 mm 的土样(水稻土样品 17 个,菜地土壤样品 12 个)5.00 g 于 150 mL 加盖塑料瓶中,分别加入上述步骤所确定的最佳浸提剂 10、25、50、75、100 mL,此时液土比分别为 2、5、10、15、20。在振荡器上(国华电器有限公司, HY-8 型调速振荡器)以 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度振荡 60 min。取出后立即用滤纸干过滤,同时做空白。滤液与标准系列溶液同时在原子荧光光谱仪上测定。根据土壤砷的提取量确定最佳液土比。

1.2.2.3 振荡时间的选择

在上述土壤中选择 6 个代表土样,各称取 5.00 g 置于 150 mL 加盖塑料瓶中,以上述步骤确定的最佳液土比加入已确定的最佳浸提剂,在振荡器上(国华电器有限公司 HY-8 型调速振荡器)以 $250 \text{ r} \cdot \text{min}^{-1}$ 的速度分别振荡 12、30、60、90、120、150、180 min,取出后立即用滤纸干过滤,同时做空白。滤液与标准系列溶液同时在原子荧光光谱仪上测定。根据土壤砷的提取量确定最佳振荡时间。

1.2.2.4 振荡速度的选择

分别称取以上步骤所确定的六个土样 5.00 g 置于 150 mL 加盖塑料瓶中,以上述步骤确定的最佳液土比加入已确定的最佳浸提剂,在振荡器上(国华电器有限公司 HY-8 型调速振荡器)以 80、140、210、250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 分别振荡 120 min,取出后立即用滤纸干过滤,同时做空白。滤液与标准系列溶液同时在原子荧光光谱仪上测定。根据土壤砷的提取量确定最佳振荡速度。

2 结果与分析

2.1 浸提剂的选择

图 1 分别为 3 种浸提剂提取的水稻土和菜地土壤有效砷含量与糙米和蔬菜地上部含砷量之间的相关性。从图 1 可以看出,3 种浸提剂所提取的有效砷量不同, $0.1 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ HCl 的提取量最高, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaH_2PO_4 的提取量其次, $0.5 \text{ mol} \cdot \text{L}^{-1}$ NaHCO_3 (pH8.5) 的提取量最低。3 种浸提剂提取的土壤有效砷量与糙米砷含量均呈显著相关,但相关程度有差异。其中 NaH_2PO_4 提取的有效砷量与糙米砷含量的相关性最高,相关系数 $r=0.628^*$; HCl 提取的有效砷含量与糙米的相关性居次,相关系数 $r=0.598^*$; 而 NaHCO_3 提取的有效砷量与糙米砷含量的相关性最低,相关系数 $r=0.579^*$ 。

上述结果表明,以上 3 种浸提剂都可以较好地预测酸性水稻土砷的有效性,但 NaH_2PO_4 的预测效果最好,它所提取的有效砷量能最好地反映土壤砷向水稻籽粒的迁移倾向。3 种浸提剂对菜地土壤有效砷的提取也得到相似的结果。从图 1 可以看出,3 种浸提剂所提取的土壤有效砷均与蔬菜地上部含砷量呈极显著相关,相关系数 r 分别为 0.824^{**} (NaH_2PO_4)、 0.783^{**} (NaHCO_3) 和 0.769^{**} (HCl)。相关性最高的仍是 NaH_2PO_4 ,其次是 NaHCO_3 ,最后是 HCl。提取量最高的是 NaH_2PO_4 ,其次是 HCl,最后是 NaHCO_3 。显然,对于菜地土壤而言, NaH_2PO_4 预测土壤砷对蔬菜的有效性的效果最佳, NaHCO_3 其次, HCl 较差。

砷与磷的化学性质相似,它们在土壤中的化学行为也有一定相似性。在通气性良好的土壤中,砷主要以砷酸根 (AsO_4^{3-}) 形态存在,它和磷酸根 (HPO_4^{2-} 或 H_2PO_4^-) 有很大的相似性。在大多数自然土壤中, As(V) 可以被氧化铁、氧化铝和氧化钙吸附固定^[2,9],与 As(V) 相似,磷酸盐在酸性土壤中也会被上述物质强烈地吸附固定。研究表明,磷和砷可以相互竞争土壤胶体上的吸附位点^[9]。磷酸二氢根 (H_2PO_4^-) 能显著减少土壤胶体对砷的吸持能力。Alam(2001)等比较了磷酸钾、硫酸钾、氯化钾、硝酸钾和高氯酸钾对土壤砷的提取率之后,发现磷酸钾的提取率比其他几种盐的提取率高得多;土壤对磷酸根吸附选择性高于砷酸根,因而磷酸根可以有效地将土壤吸持的砷酸根提取出来;磷酸根提取砷酸根的主要机制是阴离子交换作用,它可以有效地将氧化铁和氧化铝所吸附的砷提取出来^[10]。较

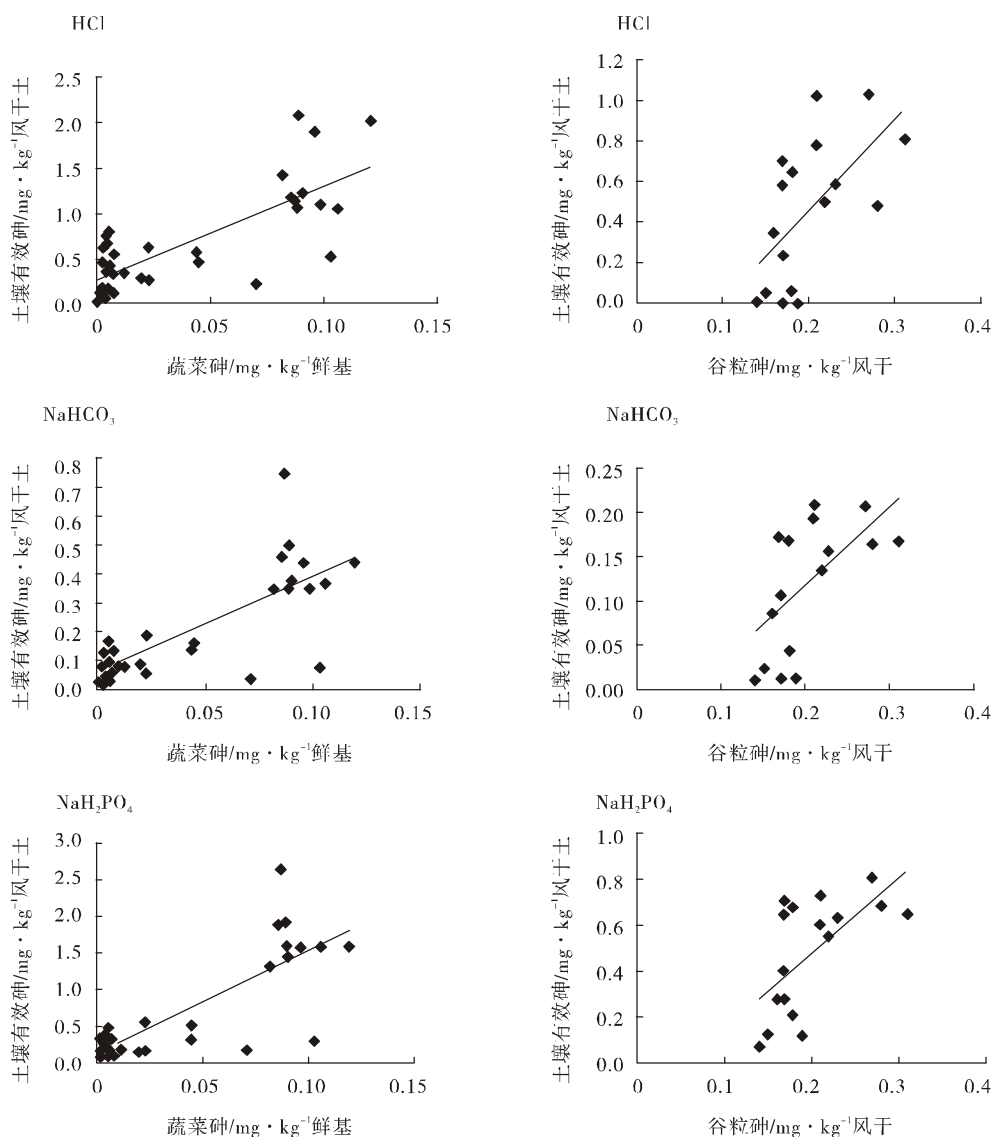


图1 3种浸提剂提取的有效砷与作物含砷量的相关性

Figure 1 Relationship between the As contents of the vegetables and rice grain and the available As extracted by the three extractants

高浓度的 HCO_3^- 虽然也能从土壤砷的固定基质表面将砷酸根取代出来,但 HCO_3^- 与砷酸根在化学性质上没有什么相似之处,它对被吸附固定的砷酸根的取代主要是在高浓度的驱动下对砷酸根的取代(服从于质量作用定律),这种取代与磷酸根对砷酸根的取代有本质的不同。 HCl 中的阴离子是 Cl^- 。 Cl^- 与砷酸根也没有化学性质上的相似之处,氯盐对土壤砷的提取效率远低于磷酸盐^[10]。因此 HCl 对砷酸根的取代与磷酸根对砷酸根的取代有根本的不同,其中较强的酸性溶解作用可能起重要作用。

从3种浸提剂对砷酸根的取代机理来看,磷酸二氢钠也是一种酸性土壤有效砷的比较合理的浸提剂。虽然有人认为酸性土壤应该采用稀 HCl 溶液作为有

效砷的浸提剂^[9],但我们的研究结果并不支持这一观点。本研究的结果表明,在这3种浸提剂中, NaH_2PO_4 是酸性土壤有效砷的最佳浸提剂。

2.2 液土比的选择

液土比是土壤元素有效量提取的重要条件。从图2可以看出,不论是水稻土还是菜地土壤,有效砷的提取量在一定的液土比范围内随液土比的升高而升高。当液土比升高到一定值时,有效砷提取量则不再升高。对于有效砷含量较低的土样,在较小的液土比条件下即可取得最大砷提取量。如图2所示,水稻土中的 XL-081、GT-012 和 XL-082 样品,其有效砷提取量几乎不随液土比的升高而升高;菜地土中的 FZ-002、GT-017、YP-008、YP-011、YP-023 和 YP-037 样

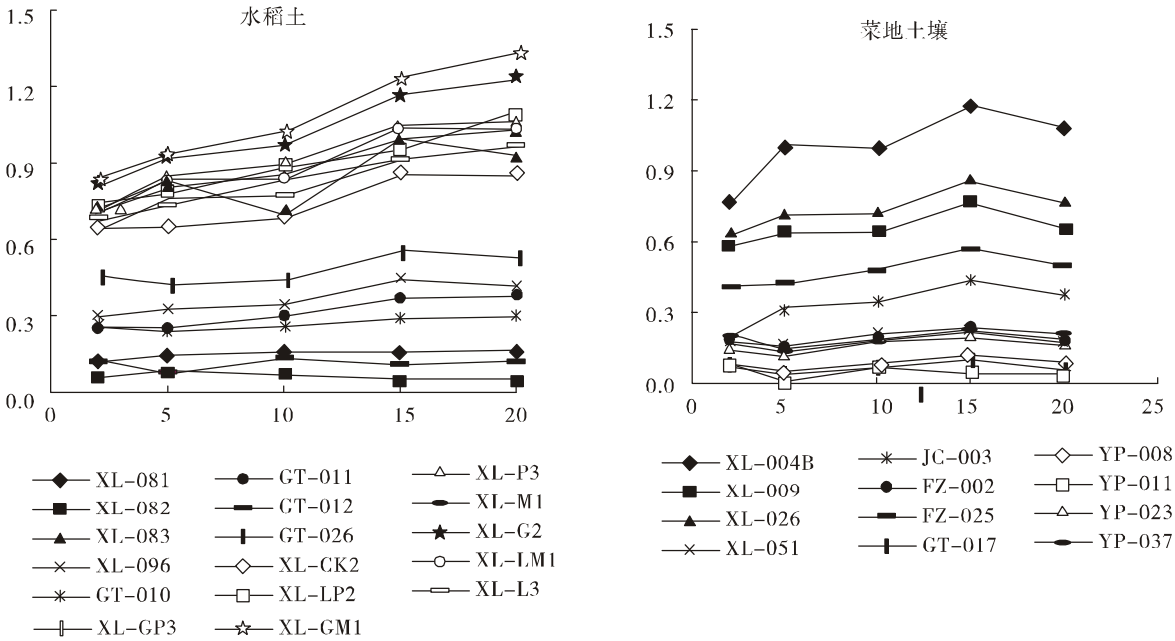


图 2 液土比对 NaH_2PO_4 的砷提取量的影响

Figure 2 Effects of the ratio of solution to soil on the arsenic extracted by NaH_2PO_4

品的有效砷提取量在液土比为 2 时有效砷提取也已达到最大值。

产生上述现象的原因可能是对于有效砷含量低的土壤,少量的浸提剂就已足够将可取代的砷酸根取代出来,增加浸提剂的用量已经没有任何意义。对于有效砷含量较高的土样,在液土比小于 15:1 范围内有效砷提取量随液土比的增加而出现明显的上升趋势。有效砷量越高,这一趋势越明显。当液土比达到 15:1 时,大部分土样的砷提取量达到最大值。当液土比继续增加到 20:1 时,大部分土样的砷提取量没有增加,有的甚至开始减少。过高的液土比会由于稀释作用而降低提取液中砷的浓度。可以预计,继续提高液土比例,浸提液中的有效砷浓度不会增加,只会进一步降低,造成砷测定的困难。

根据上述结果,我们确定酸性土壤有效态砷浸提的液土比为 15:1。这样的液土比既保证了含砷量高的土壤的有效砷的完全提取,对含砷量低的土壤有效砷的提取也没有不利影响。肖玲等(1996)的研究结果表明,以 pH8.5 的 $0.5\text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}\text{ NaHCO}_3$ 作为石灰性土壤有效砷的提取剂,提取量随水土比的升高而升高,但当水土比达 10:1 时趋于稳定^[7]。在我们的液土比试验中,砷提取量与液土比的关系也呈现相似的趋势,不同之处是有效砷含量较高的土壤达到稳定的液土比较高,所以我们选择 15:1 作为最佳的液土比。产生这种不同的原因在于土壤性质、有效砷含量和提取剂的

不同。

2.3 振荡时间的选择

振荡时间也是土壤元素有效量提取的一个重要条件。有研究表明,当振荡时间在 60 min 之内时,土壤有效砷提取量有随振荡时间的延长而增加的趋势^[7]。在上述试验的基础上,我们选择了 6 个土样进行振荡时间的研究,并得到了类似的结果。从图 3 可以看出,土壤有效砷的提取量与振荡时间有密切关系。有效砷含量低的土壤,如 YP-023 和 YP-008 号样品,60 min 以后的提取量不再随振荡时间的延长而升高。有效砷含量高的样品,当振荡时间在 120 min 之内时,有效砷的提取量随振荡时间的延长而升高;在振荡前期,提取量升高的趋势更显著。当振荡时间超

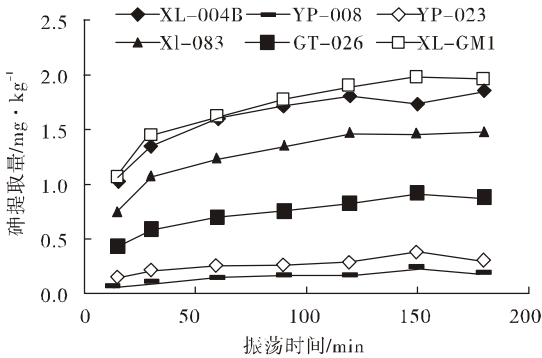


图 3 振荡时间与土壤有效砷提取量之间的关系

Figure 3 Relationship between the shaking time and the available As extracted by NaH_2PO_4

过 120 min 时, 除个别土样的砷提取量略有增加, 其他绝大部分土样的有效砷提取量并没有增加。

上述结果说明, 120 min 的振荡时间既可以保证有效砷含量高的土壤的提取, 也不影响有效砷含量低的土壤的提取。但如果振荡时间不足, 将明显影响有效砷含量高的土壤的提取。因此我们将振荡时间确定为 120 min。

2.4 振荡速度的选择

本研究选用国华电器有限公司生产的 HY-8 型调速振荡器研究不同振荡强度对土壤有效砷提取量的影响。振荡强度分别为 80、140、210 和 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 。随着振荡速度从 80 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 提高到 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$, 有效砷提取量呈逐渐上升的趋势, 但从 210 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 到 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 时增加量不大。如图 4 所示。

考虑到 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 已是该型号振荡器的最大振荡速度, 因此我们确定 250 $\text{r} \cdot \text{min}^{-1}$ 做为本提取方法的振荡速度。不同型号振荡器对提取效果可能有不同影响, 实际应用时应该规定通用的振荡器型号, 以便于对提取结果进行比较。

参考文献:

- [1] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990.
- [2] Voigt D E, Brantley S L and Hennes R J C. Chemical fixation of arsenic in contaminated soils[J]. *Applied Geochemistry*, 1996, 11: 633–643.
- [3] Flynn H C, et al. Assessment of bioavailability arsenic and copper in soils and sediments from the Antofagasta region of northern Chile[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 286: 51–59.

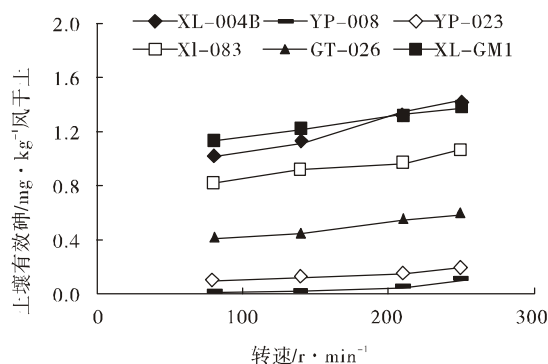


图 4 振荡速度与土壤有效砷提取量之间的关系

Figure 4 Relationship between the shaking velocity and the available As extracted by NaH_2PO_4

- [4] McLaughlin M J, et al. Soil testing for heavy metals[J]. *Commun Soil Sci Plant Anal*, 2000, 31(11–14): 1661–1700.
- [5] Woolson E A, et al. Correlation Between Available Soil Arsenic, Estimated by Six Methods and Response of Corn[J]. *Soil Sci Soc Am Proc*, 1971, 35(1): 101.
- [6] 涂从, 苗金燕, 何峰. 土壤砷有效性研究[J]. 西南农业大学学报, 1992, 14(6): 477–482.
- [7] 肖玲, 赵允格. 石灰性土壤中有效砷提取剂的选择[J]. 陕西环境, 1996, 3(3): 18–21.
- [8] Peryea F J. Evaluation of five soil tests for predicting responses of apple trees planted in lead arsenate-contaminated soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*. 2002, 33: 243–257.
- [9] 雷梅, 陈同斌, 等. 磷对土壤中砷吸附的影响[J]. 应用生态学报, 2003, 11(14): 1989.
- [10] Alam M G M, S Tokunaga and Maekawa T. Extraction of arsenic in a synthetic arsenic-contaminated soil using phosphate[J]. *Chemosphere*, 2001, 43: 1035–1041.