**土壤中不同结合态铅的人体生物有效性：体内实验和体外试验**

李士伟1,2，历红波2

（1 济南大学，山东济南 250022；2 南京大学，江苏南京 210023；）

\*通讯作者联系方式：stu­\_lisw@ujn.edu.cn

**摘要**：通过手口行为偶然摄入污染土壤是儿童铅暴露的重要方式。为了评估人体铅暴露风险，小鼠模型和体外胃肠模拟方法已经被用来研究土壤中铅的生物有效性。被广泛使用的Tessier五步化学连续提取方法把土壤中的铅结合态分为可交换态（F1）、碳酸盐结合态（F2）、铁锰氧化物结合态（F3）、有机质结合态（F4）和残渣态（F5），铅结合态是影响其生物有效性的关键因子，但是土壤中不同结合态铅的生物有效性还鲜有报告。当前研究，选取三种典型污染土壤，制备分别去除F1+F2（制备的土壤命名为F345）、F1+F2+F3（F45）、F1+F2+F3+F4（F5）的样品；利用小鼠模型和两种典型的体外胃肠模拟方法(SBRC和PBET) 测定了不同铅结合态的生物有效性；最后，结合铅形态分布数据，计算土壤中每种铅结合态的生物有效性。研究结果显示，去除不同结合态铅后，土壤中铅的浓度从未处理土壤中的1118–4333 mg kg–1降低到F5中的42.5–674 mg kg–1；小鼠活体实验表明，铅的相对生物有效性从未处理土壤中的44.4–93.1%逐渐降低到F5中15.4–68.5%；体外胃肠模拟实验中SBRC胃相、SBRC肠相和PBET胃相生物可利用性变化趋势与体内活体实验一致，分别从39.5–92.7%、0.24–20.6%和8.06–55.0%降低到14.1–48.3%、<0.01–1.12%和4.16–14.3%，而PBET肠相中F45结合态的生物可利用性最高；对比体内和体外结果显示，SBRC和PBET胃相与体内实验结果有较高的相关性（R2为0.73–0.94），而他们的肠相相对较差（R2=0.46）。根据化学计算，基于小鼠模型的铅相对生物有效性从F12的93.1–107%逐渐降低到 F5中15.4–68.5%，这说明F1和F2中的铅基本是全部有效性，随着连续提取的逐步推进，铅在F3–F5的相对生物有效性逐整体从48.3–93.8%降低到15.4–68.5%）；而基于SBRC和PBET胃相计算得到铅在F12到F5中的生物可利用性也逐渐降低（从15.6–118%降低到4.16–14.1%），但是SBRC的变化趋势与体内结果更加接近，这进一步证明了SBRC胃相替代体内实验的可靠性。

**关键词**：铅；连续提取；生物有效性；体内方法；体外方法；