

doi: 10.12029/gc20160425

蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 等. 河北平原农田土壤重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的影响因素[J]. 中国地质, 2016, 43(4): 1420–1428.

Cai Kui, Duan Yamin, Luan Wenlou, et al. Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain[J]. Geology in China, 2016, 43(4): 1420–1428(in Chinese with English abstract).

## 河北平原农田土壤重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的影响因素

蔡 奎<sup>1,2</sup> 段亚敏<sup>3</sup> 栾文楼<sup>2</sup> 李 倩<sup>2</sup> 马云超<sup>2</sup>

(1. 河北地质大学 地质调查研究院, 河北 石家庄 050031; 2. 河北地质大学 资源与环境工程研究所, 河北 石家庄 050031;  
3. 河北地质大学 研究生院, 河北 石家庄 050031)

**摘要:** 土壤重金属元素地球化学行为是目前国内外研究的热点。研究显示重金属元素地球化学行为与土壤理化性质有密切关系。本文选择河北平原农田为研究区, 采集了 325 个根系土样品, 测定了 Pb、Hg 有效态含量, 并探讨了影响其地球化学行为的主要因素。研究表明: (1) Pb、Hg 水溶态和离子交换态与土壤 pH 值呈显著负相关关系, 土壤酸化使 Pb、Hg 有效性增加, 直接导致农作物中 Pb、Hg 含量增加, 保持土壤 pH 值在弱酸性至弱碱性范围, 防止土壤酸化, 可以降低重金属危害。(2) 土壤中有机质含量与 Pb、Hg 全量呈显著的正相关性, 但与水溶态和离子交换态呈负相关。所以土壤中有机质的增加可以降低 Pb、Hg 元素水溶态和离子交换态含量。(3) 随着土壤黏粒的增加, Pb、Hg 水溶态和离子交换态含量降低, 说明黏粒可以吸附一定量的重金属离子, 与重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为存在一定关系。土壤 pH 值、有机质、黏粒是控制重金属元素 Pb、Hg 地球化学行为的重要因素。

**关键词:** 河北; 重金属; 地球化学行为; 影响因素

中图分类号: P 595 文献标志码: A 文章编号: 1000-3657(2016) 04-1420-09

## Geochemical behavior of heavy metals Pb and Hg in the farmland soil of Hebei plain

CAI Kui<sup>1,2</sup>, DUAN Ya-min<sup>3</sup>, LUAN Wen-lou<sup>2</sup>, LI Qian<sup>2</sup>, MA Yun-chao<sup>2</sup>

(1. Institute of Geological Survey, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 2. Institute of Natural Resources and Environmental Engineering, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, Hebei, China; 3. Postgraduate Academy, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031 Hebei, China)

**Abstract:** The geochemical behavior of heavy metal elements in soil is a hot research topic. Studies show that the geochemical behavior of heavy metal elements is related not only to soil texture, but also to the physical and chemical properties of soil. In this paper, the authors chose the farmland of Hebei plain as the study area, collected 325 soil samples, made effective state analysis of

收稿日期: 2015-05-25; 改回日期: 2015-09-14

基金项目: 河北省政府与中国地质调查局合作项目, 河北省农业地质调查项目(200414200007)资助。

作者简介: 蔡奎, 男, 1985 年生, 硕士, 助理研究员, 地球化学专业; E-mail: caikui5201314@163.com。

soil Pb, Hg heavy metals, and discussed the factors affecting the geochemical behavior of heavy metals. Some conclusions have been reached: (1) Pb, Hg water soluble ions and exchanged values show a significant negative correlation with soil pH values, and soil acidification results in increase of Pb, Hg effective fraction, which leads directly to increase of Pb, Hg in the crops; and hence maintaining soil pH in weak acid and weak alkaline range and preventing soil acidification and salinization can reduce the harm of heavy metals. (2) The values of organic matter and Pb, Hg exhibit significant positive correlation in soil, the increase of the soil organic matter can significantly reduce water soluble and exchangeable content of Pb, Hg elements. (3) With the increase of clay soil, Pb, Hg in water solution state and ion exchangeable state decrease, indicating that the clay can absorb a certain amount of heavy metal ions, and heavy metal elements Pb and Hg show certain relationship in geochemical behavior. The pH value, organic matter, and viscosity of soil seem to be important factors controlling the geochemical behavior of the heavy metals Pb, Hg.

**Key words:** Hebei; heavy metal elements; geochemical behavior; influence factors

**About the first author:** CAI Kui, male, born in 1985, assistant researcher, master candidate, engages in the study of geochemistry; E-mail: caikui5201314@163.com.

**Fund support:** Supported by Hebei Provincial Government in Cooperation with China Geological Survey project, Hebei Agricultural Geological Survey Program (No. 200414200007).

农田土壤重金属污染,因其隐蔽性、不可逆性和长期性的特点,已成为全球性的环境问题,并通过食物链影响人体健康。国外如日本在20世纪60年代汞农药的使用,造成农田汞污染。瑞士因污灌造成重金属(Pb、Cu、Zn)的累积,土豆、花生受到严重污染<sup>[1]</sup>。国内如重庆酸沉降导致土壤汞活化,造成蔬菜中Hg严重超标,达28%<sup>[2]</sup>。

土壤中Pb、Hg重金属元素,是农作物安全重要控制元素<sup>[3]</sup>。农作物中的Pb、Hg元素主要来自农作物根系对土壤离子的吸收。重金属元素以多种形态存在(水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化态、强有机结合态、残渣态),其中水溶态、离子交换态比较容易被植物吸收利用,对作物危害最大<sup>[4-5]</sup>。重金属地球化学行为不仅与土壤质地有关,还与土壤理化性质有密切关系<sup>[6-7]</sup>。

近年来国内外报道重金属元素的地球化学行为影响因素主要为pH值、CEC、黏粒和有机质含量。余涛等<sup>[8]</sup>研究证明,含量相同重金属元素在不同质地的土壤中,由于土壤pH值、有机质及黏粒含量不同均表现出完全不同的地球化学行为。董建军等人研究认为,CEC是影响土壤中Hg对水稻有效性的因素;影响土壤中Cd对小麦有效性的主要因素是pH和CEC, pH与Pb有效性, Cr有效性与有机质显著负相关。黏粒含量增加使Pb离子交换态占全量的比值增加,有机质的加入会显著降低植物吸收土壤中的重金属元素<sup>[9-26]</sup>。可见,土壤pH值、黏粒、有机质是影响重金属元素地球化学行为的重要因素。

本文选择素有“京津冀菜篮子”之称的河北平原为研究区,分别探讨了Pb、Hg与土壤pH值、土壤有机质及黏粒含量关系,并对影响Pb、Hg元素地球化学行为的控制因素进行了研究,为河北平原农作物安全及污染防治提供科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 样品采集

按照中国地质调查局多目标地球化学调查规范要求,河北平原共采集了325件玉米及根系土样品(见图1)。

(1)农作物样品:以对角线法分别选取4点(距离地边大于1 m),每点取1 m×1 m的样方一个,采集籽实。每个采样点位,实际测量植株高度,数取2 m×2 m范围内的植株行数与列数并记录。返回室内后,从每个点位样品随机取5株籽实穗,数取各穗的籽实数量,记录平均数;将玉米脱粒,蒸馏水洗涤,自然风干后称取玉米籽实的千粒重,并记录。

(2)根系土壤样品:与作物同点采集耕作层0~20 cm的土壤。采样时去除表面土、杂草、草根、砾石、砖块、肥料团块等杂物。为保证样品的代表性,采样时以1点作为定点位置,在其周围20 m范围内多点采集3~5个子样组合为一个样品,重量大于1 kg。

### 1.2 样品处理

(1)农作物样品:①蒸馏水冲净植株上的灰尘、杂物等;②自然晒干;称取农作籽实千粒重,结合采样时测量的单位面积主穗数和每穗籽实颗粒数,用

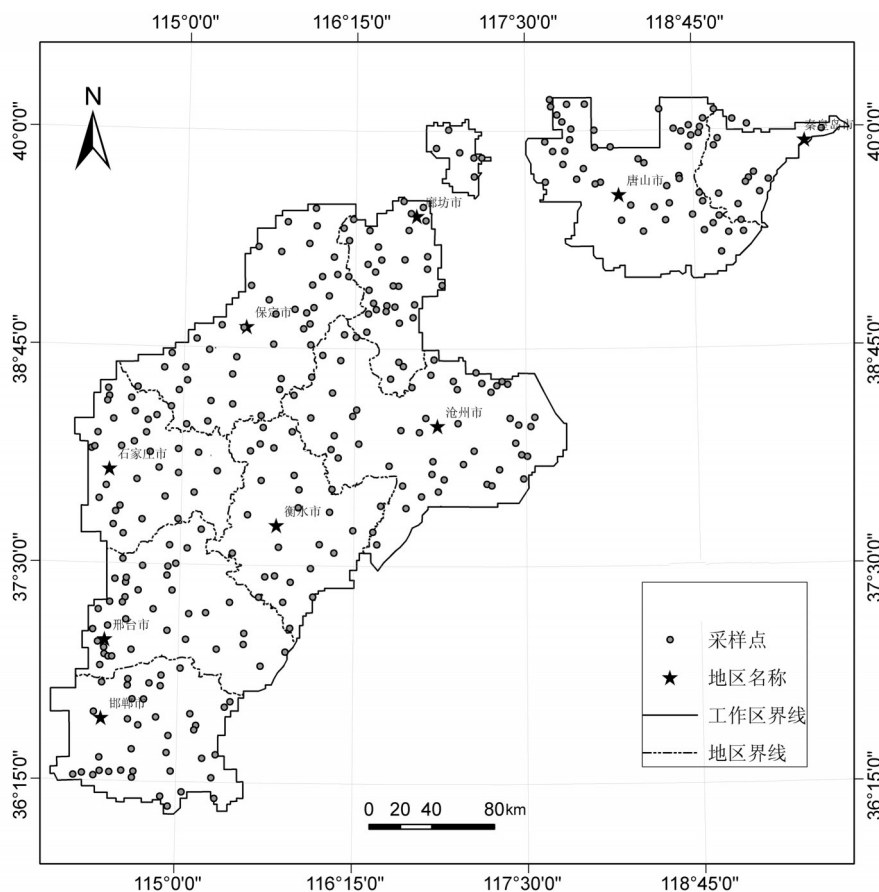


图1 研究区域及采样点位置

Fig.1 Location of the study area and sampling sites

于作物通量计算;③按测试分析和样品备份需要,称取500 g的样品,样品加工至20目,分析样品加工至100目;④采用冷冻干燥,湿法微波密闭消解法或干法消解样品。

(2)根系土样品:经自然风干后,剔除砾石和碎石、生物残骸、植物根系后过20目尼龙筛,再混匀缩分、研磨至200目,四分法取约100 g样品装袋、送样。作有效态分析的样品在过10目筛后直接送实验室分析。

### 1.3 样品分析及质量评述

样品分析严格按照中国地质调查局《DD2005-1多目标区域地球化学调查规范》和《DD2005-3区域生态地球化学评价样品分析技术要求》进行。通过插入标准参考物,采取实验室内部检查的手段,监控分析质量。样品分析在天津地质矿产研究所进行。

#### (1)农作物样品分析

本次工作采集的农作物样品玉米,测试指标包

括Hg、Pb,分析方法采用GB/T 5009《生物样品元素分析分解方法》,质量控制按照《生态地球化学评价样品分析技术要求》执行。

#### ①准确度

使用GBW08502(大米粉)、GBW08503b(小麦粉)、GBW10010(大米)、GBW10011(小麦)、GBW10012(大玉米)、GBW10013(黄豆)进行准确度控制,相对误差 $RE \leq 30\%$ 。在试样中插入标准物质4组共8件同时分析,标准物质中各元素测定值与推荐值间相对误差均小于30%,标准监控样各元素合格率为100%。

#### ②精密度

对所有送检样品进行100%的重复分析,要求同一样品两次测量值之间的相对偏差 $RE \leq 30\%$ 。数据合格率为99%(表1)。以合格率 $\geq 85\%$ 的要求,农作物样品分析精密度符合《生态地球化学评价样品分析技术要求》。

表1 玉米样品分析精密度  
Table 1 Corn samples analysis precision

| 类别    | Pb   | Hg   |
|-------|------|------|
| 超差数/件 | 1    | 3    |
| 合格率/% | 99.9 | 99.6 |

(2)土壤样品分析

Pb 重金属全量采用离子体原子发射光谱法(ICP-OES)测定;Hg采用王水消解,冷原子吸收法测定;有机质的测定方法采用重铬酸钾容量法;黏粒含量采用吸管法测定;pH值采用电位法测定。

①准确度

通过对每批次样品密码插入4个标准物质(GSS2、GSS3、GSS4、GSS6)进行分析,计算测量值与标准值的对数差( $\Delta\lg C$ ),其中 $\Delta\lg C$ 最大值为0.092,平均值为0.036。所有 $\Delta\lg C$ 均小于《多目标区域地球化学调查规范(1:25万)》规定的允许限,一级标准物质准确度合格率达100%。

②精密度

计算每批次密码插入的标准物质测量值与监控值的对数标准偏差( $\lambda$ ),其中 $\lambda$ 最大值0.120,平均值0.045,均小于《多目标区域地球化学调查规范(1:25万)》要求,一级标准物质精密度合格率100%。

③报出率

元素报出率为100%,达到了90%的要求,所采用的分析方法检出限满足试样分析要求。

(3)元素形态分析方法:称取定量样品,分别以水、氯化镁、醋酸钠、焦磷酸钠、盐酸羟胺、过氧化氢为提取剂提取水溶态、离子交换态、碳酸盐结合态、腐殖酸结合态、铁锰氧化物结合态、有机结合态,制备各形态分析液。取适量提取上述各形态分析液后的残渣,用盐酸、硝酸、高氯酸、氢氟酸处理后制备残渣态分析液。用全谱直读电感耦合等离子体发射光谱法分析各形态中的铅,用氢化物发生-原子荧光光谱法分析汞。

为了体现测试数据的精密度和准确性,以土壤元素全量作为标准,与各形态之和比较,计算相对

偏差:  $RE = \frac{C_{总} - C_{全}}{C_{全}} \times 100\%$

式中:  $C_{全}$  为元素全量,mg/kg;  $C_{总}$  为元素形态总量,mg/kg;RE单位为%。

按《生态地球化学评价样品分析技术要求》,元素全量与形态总量相对偏差 $\leq 40\%$ 时,则该元素形态分析合格。经统计根系土样品Pb、Hg元素形态分析准确度合格率为100%。

2 数据分析

数据利用Microsoft Excel、SPSS、ArcGIS等数据处理软件,进行数据分布检验和参数计算。采用相关分析法、回归分析法等多元统计方法进行数据处理和分析。

3 土壤pH值对Pb、Hg活动性的影响

为研究Pb、Hg元素水溶态和离子交换态含量与pH值变化趋势,将325件土壤样中Pb、Hg水溶态和离子交换态占全量的百分比与土壤pH值作散点分布图,分析其变化趋势(图2、图3),据此建立土壤pH值和Pb、Hg有效性的回归拟合方程。

3.1 土壤pH值对土壤Pb活动性的影响

由图2可见,Pb离子交换态与全量的比值随pH值增加而下降,呈负相关关系,关系方程为Pb离子交换态/全量(%)= $-0.1807 \times \text{pH} + 2.2675$ ,相关系数 $R^2=0.0668$ 。而Pb水溶态与全量比值与pH关系呈正相关关系,当pH值越高水溶态比例上升,方程为Pb水溶态/全量(%)= $0.0133 \times \text{pH} + 0.0421$ ,相关系数 $R^2=0.0165$ 。

通过分析325件样品pH值均在6~9。当pH值为8.5时,Pb的离子交换态占全量的比例基本稳定在1.0%左右,变化范围0.5%~1.5%。Pb的水溶态占全量的比例基本稳定在0.15%左右,变化范围0.1%

表2 土壤样品重金属元素形态分析检出限  
Table 2 Speciation analysis of heavy metal element detection limit of soil samples

| 类别 | 检出限/ $10^{-6}$ |       |       |       |       |        |       |
|----|----------------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|
|    | 水溶态            | 离子结合态 | 碳酸盐态  | 腐殖酸态  | 铁锰氧化态 | 强有机结合态 | 残渣态   |
| Pb | 0.1            | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5   | 0.5    | 2     |
| Hg | 0.001          | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002 | 0.002  | 0.005 |



~0.2%。

从图2-b可见,土壤酸化使Pb离子交换态比例上升,直接导致农作物中Pb含量增加。土壤呈弱碱性,可有效的降低农作物对Pb元素的吸收。这与廖启林<sup>[27]</sup>研究结果一致。

### 3.2 土壤pH值对土壤Hg活动性的影响

通过分析325件样品pH值均在6~9。当pH值为8.5时,Hg离子交换态占全量的比例基本稳定在2%左右,变化范围0~4%。Hg水溶态占全量的比例基本稳定在2%左右,变化范围0~4%。

从图3-b可见,土壤酸化使Hg离子交换态比例上升,直接导致农作物中Hg含量增加。土壤呈弱碱性,可有效的降低农作物对Hg元素的吸收,与Pb离子交换态规律一致。

Hg离子交换态与水溶态占全量的比例与pH值关系大体趋势相似。关系方程分别为Hg水溶态/全量(%)=-0.6679pH+6.7318,相关系数 $R^2=-0.1115$ ,Hg离子交换态/全量(%)=-0.6032pH+6.7318,相关系数 $R^2=-0.1629$ 。

### 3.3 农作物籽实元素含量与pH值的关系

研究区玉米籽实的富集系数[富集系数=(玉米籽实Pb含量/土壤中Pb含量)×100]与土壤pH值变

化趋势。从图4-a可以看出,玉米籽实Pb富集系数与土壤pH值的关系。当pH值从6~7时,富集系数有降低的趋势,在7~8时,富集系数最小,当>8时,富集系数上升。可见,控制土壤在弱酸性和弱碱性条件下,是降低作物对土壤重金属吸收累积、保障农产品安全的重要手段。

## 4 土壤有机质对Pb、Hg地球化学行为的影响

土壤有机质泛指土壤中来源于生命的物质,包括土壤微生物、土壤动物及其分泌物、土体中植物残体和植物分泌物。不同土体构型有机质含量有所差别(表3),土壤有机质含量的高低,在一定程度上预示着土壤的肥沃程度<sup>[28]</sup>。土壤重金属转化机制和环境效应不仅受土壤pH值的影响,还与土壤有机质有着密切关系。

从有机质与Hg、Pb元素含量关系图(图5)可以看出,土壤中有有机质含量与Hg、Pb元素含量呈正相关关系,说明表层土壤有机质对重金属元素的累积有明显控制作用,这与郝立波等<sup>[29]</sup>研究一致。有机质对重金属离子主要是离子交换、络合和吸附作用。

土壤中有有机质主要为腐殖质,有机质在土壤中

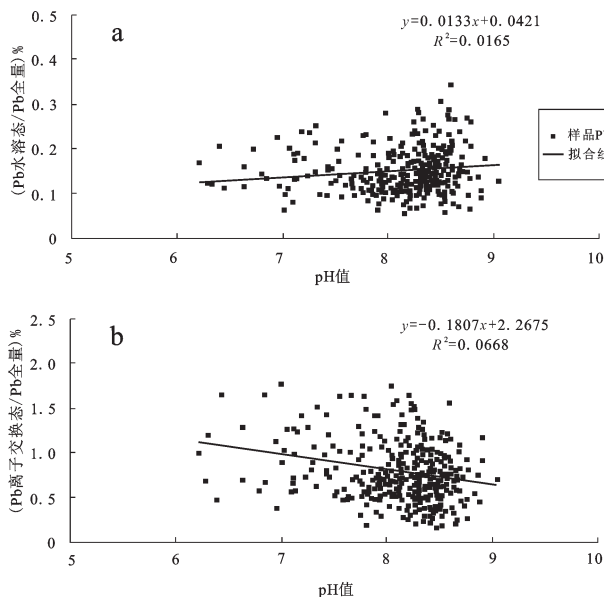


图2 pH值与Pb元素水溶态、离子交换态占全量的比值关系图  
Fig.2 Relationship between pH values and the proportion of water soluble, exchangeable state Pb in total amount of Pb element

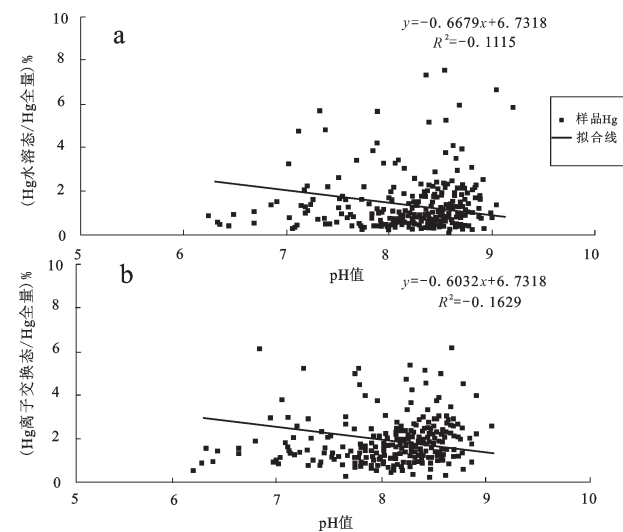


图3 pH值与Hg元素水溶态、离子交换态占全量的比值关系图

Fig.3 Relationship between pH values and the proportion of water soluble, exchangeable state Hg in total amount of Hg element

表3 河北平原不同土壤质地有机质百分含量特征  
Table 3 Organic matter content of different soil textures in Hebei plain

| 土壤质地  | 有机质/% |      |      | 样品数/个 |
|-------|-------|------|------|-------|
|       | 最小值   | 最大值  | 均值   |       |
| 壤质土壤  | 0.28  | 6.31 | 1.76 | 140   |
| 砂质土壤  | 0.88  | 3.65 | 1.67 | 32    |
| 黏质土壤  | 0.71  | 4.6  | 1.77 | 64    |
| 上砂下黏型 | 0.83  | 3.67 | 1.74 | 37    |
| 上黏下砂型 | 0.53  | 4.6  | 1.81 | 52    |

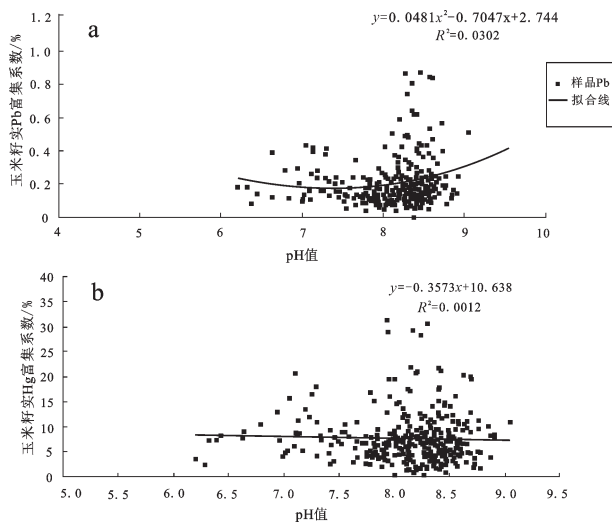


图4 pH值与玉米籽实中Pb、Hg元素富集系数关系图  
Fig.4 Relationship between pH values and enrichment coefficients of Pb, Hg in maize seed

与金属离子发生反应时,大量的官能团,如氨基、偶氮化合物( $—N=N—$ )、环形氮化物、羧基、醚和酮等,在发生络合或螯合过程中发挥着重要作用。实验研究表明金属元素-腐殖质络合物的总稳定常数的范围为 $10^5$ ( $Zn^{2+}$ 、 $Cd^{2+}$ 和 $Ni^{2+}$ )到 $10^{10}$ ( $Cu^{2+}$ )<sup>[30-31]</sup>。这部分被络合或螯合的重金属离子可牢牢地固定在土壤中,从而降低土壤中有效金属离子的浓度,减轻重金属污染的危害。

图6为土壤Hg、Pb水溶态、离子交换态占全量百分比与土壤有机质关系图,可以看出,土壤中有有机质含量增加可有效降低Hg和Pb的水溶态和离子交换态含量,这与余涛等<sup>[8]</sup>、祖艳群等<sup>[32]</sup>研究一致。而以水溶态和离子交换态存在的Hg、Pb元素极易迁移进入农作物中。因此,对于存在Hg、Pb等重金

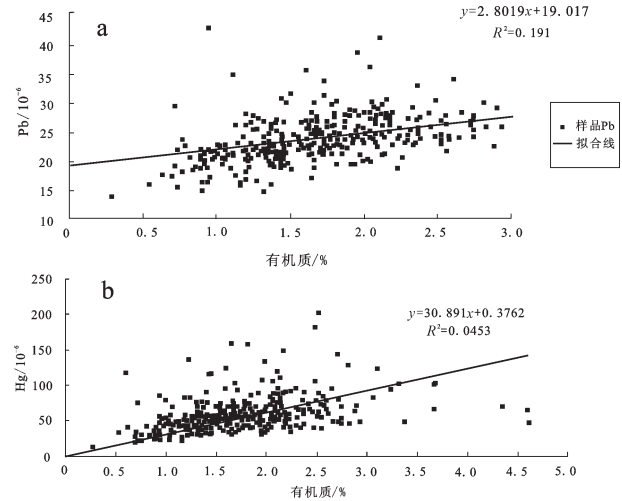


图5 研究区土壤有机质与Pb、Hg元素含量关系图  
Fig.5 Relationship between soil organic matter and Pb and Hg elements in the study area

属污染的地区,增施有机肥使土壤缓冲力加强,可有效地提高农产品安全性。

土壤有机质控制着土壤重金属Pb、Hg地球化学行为,它不仅影响土地肥沃程度,而且对土壤中重金属生态效应也有重要影响<sup>[8]</sup>。

## 5 黏粒与Pb、Hg元素地球化学行为的关系

图7为研究区土壤中黏粒与Pb、Hg水溶态和离子可交换态含量/全量关系图。从中可以看出,重金属元素Pb和Hg水溶态和离子可交换态占全量的比值与黏粒含量也表现出一定的相关性,随着黏粒含量增加,土壤中金属元素水溶态和离子可交换态含量占全量的比值略有降低,尤其是Pb元素。这说明黏粒表面可以吸附一定量的重金属离子,对于重金属元素地球化学行为有一定影响。这与郭平、王存龙等研究一致<sup>[33-34]</sup>。

## 6 结论和建议

(1)pH值是控制Pb、Hg元素地球化学行为的重要因素,较低或过高的pH值会增加水溶态和离子交换态含量,加剧重金属对农田土壤的污染,有利于超累积植物的吸收和富集。

(2)土壤有机质是控制重金属元素地球化学行为的重要因素。土壤中有有机质的增加可以明显降

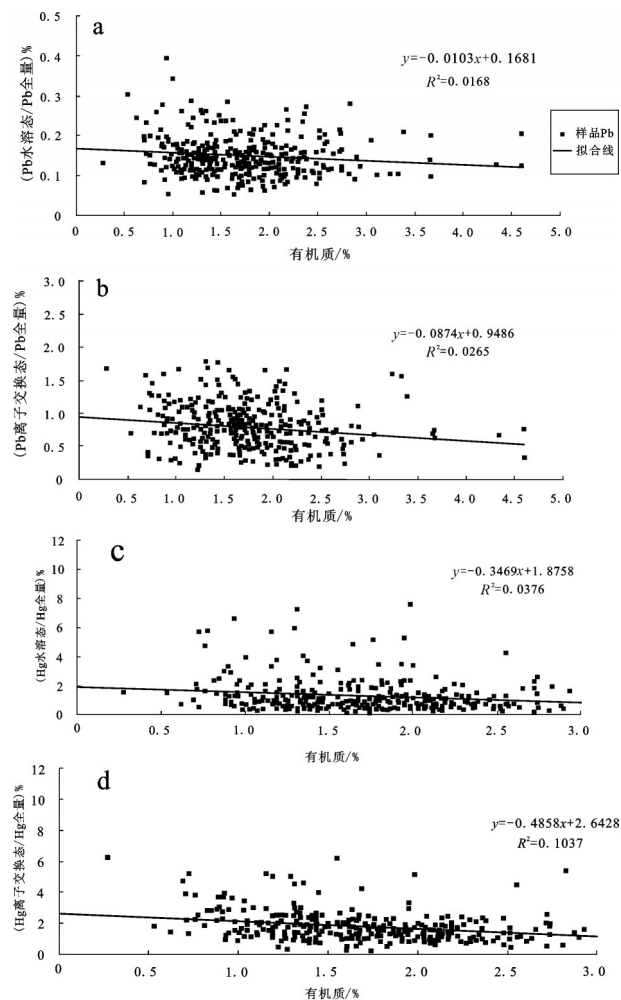


图6 研究区土壤有机质与Pb、Hg元素水溶态、离子交换态含量占全量比值关系图

Fig. 6 Relationship between soil organic matter and the proportion of water soluble ion exchangeable content in total volume of Pb, Hg elements in the study area

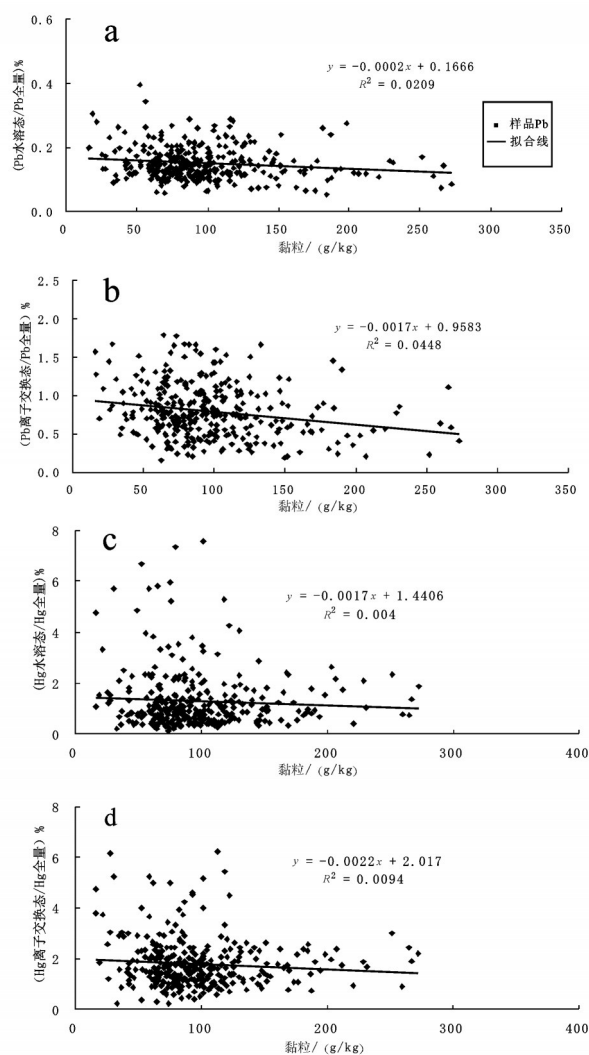


图7 研究区土壤黏粒与Pb、Hg元素水溶态、离子交换态含量占全量比值关系图

Fig. 7 Relationship between soil clay and the proportion of water soluble ion exchangeable content in total volume of Pb, Hg elements in the study area

低Pb、Hg水溶态和离子交换态含量。

(3)土壤黏粒的增加,使Pb、Hg水溶态和离子交换态含量降低,说明黏粒可以吸附一定量的重金属离子,与重金属元素地球化学行为存在一定关系。

#### 参考文献(References):

- [1] 喜田村正次. 汞. 背景[M]. 北京: 原子能出版社, 1988.  
Yoshida Mujungji. Hg. Background[M]. Beijing: Atomic Energy Press, 1988.
- [2] 牟树森, 青长乐. 酸沉降区作物对汞的积累及其影响因素的研究[J]. 重庆环境科学, 1997, 19(1): 5-10.

Mou Shusen, Qin Changle. Crops Accumulating Hg and Its Influencing Factors in Acid Precipitation Area[J]. Chongqing Environmental Science, 1997, 19(1): 5-10(in Chinese with English abstract).

- [3] 中华人民共和国国家标准——农产品安全质量无公害蔬菜安全要求 GB 18406. 1-2001[R]. 北京: 国家质量监督检验检疫总局, 2001.  
National Standards of the People's Republic of China—The Safety of Agricultural Products Quality Safety Requirements Vegetable GB18406. 1- 2001[R]. Beijing: General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine

- of the People's Republic of China. 2001(in Chinese).
- [4] 刘明华. 辽东湾北部浅海区底泥镉元素形态特征[J].地质与资源, 2010, 19(2):123-125.  
Liu Minghua, State characteristics of cadmium in bottom mud of shallow sea of northern liaodong bay[J]. Geology and Resources, 2010, 19(2): 123-125.(in Chinese with English abstract).
- [5] 王亚平, 裴韬, 成杭新, 等. B城近郊土壤柱状剖面中重金属元素分布特征研究[J]. 矿物岩石地球化学通报, 2003, 22(2): 144-148.  
Wang Yaping, Pei Tao, Chen Hangxin, et al. Research on the Distribution Characters of Heavy Metal in Column Profile of Soil Within B City[J]. Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry, 2003, 22(2): 144-148. (in Chinese with English abstract).
- [6] 李瑞萍, 王安建, 曹殿华, 等. 云南兰坪金顶铅锌矿区土壤中Pb分布特征[J]. 地球学报, 2009, 30(1): 72-78.  
Li Runping, Wang Anjian, Cao Dianhua, et al. Distribution of Pb in Soils of the Jinding Pb-Zn Deposit, Lanping, Yunnan Province[J]. Acta Geoscientica Sinica, 2009, 30(1): 72-78. (in Chinese with English abstract).
- [7] 蔡奎, 栾文楼, 宋泽峰, 等. 廊坊地区土壤重金属存在形态及有效性分析[J]. 现代地质, 2011, 25(4): 813-818.  
Cai Kui, Luan Wenlou, Song Zefeng, et al. Soil Heavy metal existence form in Langfang area and its validity analysis[J]. Geoscience, 2011, 25(4): 813-818. (in Chinese with English abstract).
- [8] 余涛, 杨忠芳, 钟坚, 等. 土壤中重金属元素Pb、Cd地球化学行为的影响因素研究[J]. 地学前缘, 2008, 15(5): 67-73.  
Yu Tao, Yang Zhongfang, Zhong Jian, et al. Factors affecting the geochemical behavior of heavy metal elements Pb and Cd in soil. Earth Science Frontiers, 2008, 15(5): 67-73. (in Chinese with English abstract).
- [9] 陈守莉, 孙波, 王平祖, 等. 污染水稻土中重金属的形态分布及其影响因素[J]. 土壤, 2007, 39(3): 375-380.  
Chen Shouli, Sun Bo, Wang Pingzu, et al. Chemical form distribution of heavy metals in polluted paddy soils and its influencing factors[J]. Soils, 2007, 39(3): 375-380. (in Chinese with English abstract).
- [10] 徐福银, 梁晶, 方海兰, 等. 上海市典型绿地土壤中重金属形态分布特征[J]. 东北林业大学学报, 2011, 39(6): 60-64.  
Xu Fuyin, Liang Jing, Fang Hailan, et al. Distribution Characteristic of Heavy Metal Forms in Typical Green-Belt Soils in Shanghai[J]. Journal of Northeast Forestry University, 2011, 39(6): 60-64 (in Chinese with English abstract).
- [11] 李月芬, 王冬艳, 汤洁, 等. 吉林西部土壤砷的形态分布及其与土壤性质的关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2012, 31(3): 516-522.  
Li Yuefen, Wang Dongyan, Tang Jie, et al. Speciation of soil arsenic and its correlation with soil properties in western Jilin Province[J]. Journal of Agro-environment Science, 2012, 31(3): 516-522(in Chinese with English abstract).
- [12] 周聪, 赵敏. 蔬菜产地酸性土壤中Pb、Cd、Cr形态分析研究[J]. 热带作物学报, 2011, 32(7): 1272-1277.  
Zhou Cong, Zhao Min. Analytical Investigation of Pb, Cd and Cr Forms in Acid Soil of Vegetable Production Areas[J]. Chinese Journal of Tropical Crops, 2011, 32(7): 1272-1277(in Chinese with English abstract).
- [13] 蔡奎, 段亚敏, 栾文楼, 等. 石家庄农田区土壤重金属Cd、Cr、Pb、As、Hg形态分布特征及其影响因素[J]. 地球与环境, 2014, 42(6): 742-749.  
Cai Kui, Duan Yamin, Luan Wenlou, et al. Form Distribution Characteristics and Influencing Factors of Cd, Cr, Pb, As and Hg in Farmland Soil from the Shijiazhuang Area[J]. Earth and Environment, 2014, 42(6): 742-749. (in Chinese with English abstract).
- [14] 董建军. 合肥地区农田土壤重金属形态特征及其生物有效性研究[D]. 安徽农业大学, 2007.  
Dong Jianjun. Study on the Character of Heavy Metal Forms in Soil and Its Bioavailability in Hefei Area[D]. Anhui Agricultural University, 2007.(in Chinese with English abstract).
- [15] 汪霞, 南忠仁, 武文飞, 等. 干旱区绿洲土壤中重金属的形态分布及生物有效性研究[J]. 生态环境学报, 2010, 19(7): 1663-1667.  
Wang Xia, Nan Zhongren, Wu Wenfei, et al. Experiments on speciation and bioavailability of selected heavy metals in arid oasis soil, northwest China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2010, 19(7): 1663-1667(in Chinese with English abstract).
- [16] 杨维, 沈爱莲, 李璇, 等. 大孤山矿区土壤重金属形态分布特征及影响因素[J]. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2011, 27(1): 130-134.  
Yang Wei, Shen Ailian, Li Xuan, et al. Distribution characteristic of heavy metal chemical form and its influencing factors around the Dagushan mine district[J]. Journal of Shenyang Jianzhu University(Natural Science), 2011, 27(1): 130-134(in Chinese with English abstract).
- [17] 王友保, 张莉, 张凤美, 等. 大型铜尾矿库区节节草根际土壤重金属形态分布与影响因素研究[J]. 环境科学学报, 2006, 26(1): 76-84.  
Wang Youbao, Zhangli, Zhang Fengmei, et al. Distribution of heavy metal forms and its affecting factors in rhizosphere soils of Hippochaete ramosissima in large-scale copper tailings yard[J]. Acta Science Circumstantiae, 2006, 26(1): 76-84(in Chinese with English abstract).
- [18] 方盛荣, 徐颖, 魏晓云, 等. 典型城市污染水体底泥中重金属形态分布和相关性[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6): 2066-2070.  
Fang Shenrong, Xu Ying, Wei Xiaoyun, et al. Morphological distribution and correlation of heavy metals in sediment of typical urban polluted water bodies[J]. Ecology and Environmental



- Sciences, 2009, 18(6): 2066–2070(in Chinese with English abstract).
- [19] 祝云龙, 姜加虎, 黄群, 等. 东洞庭湖与大通湖水体沉积物和生物体中Cd、Pb、Hg、As的含量分布及相互关系[J]. 农业环境科学学报, 2008, 27(4): 1377–1384.
- Zhu Yunlong, Jiang Jiahu, Huang Qun, et al. Content, Distribution and Correlation of Cd, Pb, Hg, As in Water, Sediment and Organsims from East Dongting Lake and Datong Lake[J]. Journal of Agro- Environment Science, 2008, 27(4): 1377–1384(in Chinese with English abstract).
- [20] 谢文彪, 杨军华, 陈穗玲, 等. 福建沿海水稻Cd、Pb、Hg等重金属含量变化规律[J]. 生态环境, 2008, 17(1): 206–209.
- Xie Wenbiao, Yang Junhua, Chen Huiling, et al. Variational characteristics of Cd, Pb, Hg content of rice in coastal region of Fujian province[J]. Ecology and Environment, 2008, 17(1): 206–209(in Chinese with English abstract).
- [21] 黄思宇, 彭晓春, 陈志良, 等. 广州市南沙经济区土壤重金属形态分布研究[J]. 广东农业科学, 2013, 10: 58–61.
- Huang Siyu, Peng Xiaochun, Chen Zhiliang, et al. Species distribution of heavy metals in soil of Nansha economic zone of Guangzhou city[J]. Guangdong Agricultural Sciences, 2013, 10: 58–61 (in Chinese with English abstract).
- [22] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤中重金属的化学形态分布[J]. 环境化学, 2003, 22(2): 131–136.
- Lu Ying, Gong Zitong, Zhang Ganlin. The Chemical Speciation of Heavy Metals of Urban Soil in Nanjing[J]. Environmental Chemistry, 2003, 22(2): 131–136(in Chinese with English abstract).
- [23] 卢瑛, 龚子同, 张甘霖. 南京城市土壤Pb的含量及其化学形态[J]. 环境科学学报, 2002, 22(2): 156–160.
- Lu Ying, Gong Zitong, Zhang Ganlin. The concentration and chemical speciation of Pb in Nanjing urban soils[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2002, 22(2): 156–160(in Chinese with English abstract).
- [24] 刘洪莲, 李恋卿, 潘根兴. 苏南某些水稻土中CuPbHgAs的剖面分布及其影响因素[J]. 农业环境科学学报, 2006, 25(5): 1221–1227.
- Liu Honglian, Li Lianqin, Pan Genxing. Profile distribution of total Cu, Pb, Hg, As in some paddy soils from the southern Jiangsu, China and the influencing factors[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2006, 25(5): 1221–1227(in Chinese with English abstract).
- [25] 韩春梅, 王林山, 巩宗强, 等. 土壤中重金属形态分析及其环境学意义[J]. 生态学杂志, 2005, 24(12): 1499–1502.
- Han Chunmei, Wang Linshan, Gong Zongqiang, et al. Chemical forms of soil heavy metals their environmental significance[J]. Chinese Journal of Ecology, 2005, 24(12): 1499–1502(in Chinese with English abstract).
- [26] 陈俊, 范文宏, 孙如梦, 等. 新河污灌区土壤中重金属的形态分布和生物有效性研究[J]. 环境科学学报, 2007, 27(5): 831–837.
- Chen Jun, Fan Wenhong, Sun Rumeng, et al. Bioavailability and species distribution of heavy metals in sewage-irrigated soil from Xinhe[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2007, 27(5): 831–837 (in Chinese with English abstract).
- [27] 廖启林, 刘聪, 蔡玉曼, 等. 江苏典型地区水稻与小麦字实中元素生物富集系数(BCF)初步研究[J]. 中国地质, 2013, 40(1): 331–340.
- Liao Qilin, Liu Cong, Cai Yuman et al. A preliminary study of element bioconcentration factors within milled rice and wheatmeal in some typical areas of Jiangsu Province[J]. Geology in China, 2013, 40(1): 331–340(in Chinese with English abstract).
- [28] 郭燕, 纪文君, 吴宏梅, 等. 基于野外VIS-NIR光谱的土壤有机质预测与制图[J]. 光谱学与光谱分析, 2013, 23(4): 1135–1140.
- Guo Yan, Ji Wenjun, Wu Hongmei, et al. Estimation and Mapping of Soil Organic Matter Based on Vis- NIR Reflectance Spectroscopy[J]. Spectroscopy and Spectral Analysis, 2013, 23(4): 1135–1140(in Chinese with English abstract).
- [29] 郝立波, 陆继龙, 马力. 浅覆盖区土壤化学成分与基岩化学成分的关系及其意义——以大兴安岭北部地区为例[J]. 中国地质, 2005, 32(3): 477–482.
- Hao Libo, Lu Jilong, Ma Li. Relation between the chemical compositions of residual soils and bedrocks in shallow overburden areas and its significance—a case study of the northern Da Hinggan Mountains[J]. Geology in China, 2005, 32 (3): 477–482(in Chinese with English abstract).
- [30] Buffle J. Complexation Reactions in Aquatic Systems [M]. Chichester: Ellis Horwood, 1988: 692–694.
- [31] Zuehlke R, Kester D. Copper Speciation in Marine Waters[M]. New York: Plenum Press, 1983: 773–788.
- [32] 祖艳群, 李元, 陈海燕, 等. 蔬菜中铅镉铜锌含量的影响因素研究[J]. 农业环境科学学报, 2003, 22(3): 289–292.
- Zu Yanqun, Li Yuan, Chen Hai Yan, et al. Research on Factors Influencing Concentrations of Pb, Cd, Cu and Zn in Vegetables[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2003, 22(3): 289–292. (in Chinese with English abstract).
- [33] 郭平. 长春市土壤重金属污染机理与防治对策研究[D]. 吉林大学, 2005.
- Guo Ping. Study on Mechanism and Control of Heavy Metal Pollution in Changchun City[D]. Changchun: Jilin University, 2005(in Chinese with English abstract).
- [34] 王存龙, 曾宪东, 刘华峰, 等. 烟台市土壤环境质量现状及重金属元素分布迁移规律[J]. 中国地质, 2015, 42(1): 317–330.
- Wang Cunlong, Zeng Xiandong, Liu Huafeng, et al. The present situation of soil environmental quality and the distribution and migration regularity of heavy metals in soil of Yantai [J]. Geology in China, 2015, 42(1): 317–330(in Chinese with English abstract).