

# 黄土高塬沟壑区农田土壤重金属及矿质元素变化分析<sup>①</sup>

徐娜<sup>1,2,3</sup>, 党廷辉<sup>3\*</sup>

(1 陕西省土地工程建设集团有限责任公司, 西安 710075; 2 陕西地建土地工程技术研究院有限责任公司,

西安 710075; 3 中国科学院水利部水土保持研究所, 陕西杨凌 712100)

**摘要:** 针对黄土高塬沟壑区旱作农田土壤重金属的分布特征及矿质元素含量变化展开研究, 旨在评估该区域农田土壤的健康状况及土壤性状发育情况。试验监测区包括黑垆土和黄绵土两种土壤类型, 黑垆土属于塬面地形, 根据施肥管理分别布设不施肥监测区(CK)、化肥监测区(HF)、化肥有机肥监测区(NPM)和农民地监测区(NM); 黄绵土属于梯田, 该监测区(LS)的施肥管理同化肥监测区(HF)一致。研究结果表明, 对于黑垆土, CK监测区Cd元素在剖面表层和中部的含量较底层分布高, Pb、Cr、Ni、As元素随着土层深度的加深而增大; HF监测区Pb、Cr、Ni元素均出现深层累积现象; NPM监测区Cd元素在土壤垂直剖面上出现降低, Pb、Cr、Ni、As元素则出现深层累积; NM监测区Cd、Cr元素底层含量较高, Ni、Hg元素表层含量较高。对于黄绵土监测区, Cd元素在表层和中部含量较其他土层偏高; Pb元素表层含量高; Cr、Ni、Hg、As在土壤垂直剖面上的变化率不大; 该类土壤的重金属含量整体低于黑垆土。黑垆土各施肥监测区0~100 cm土层内Cd、Pb、Cr、Hg元素含量均未超出土壤环境质量一级标准值; CK监测区和HF监测区60~100 cm土层, NPM监测区10~20、60~100 cm土层As元素含量超出土壤环境一级标准值。NM监测区除了Cd元素含量略微高于其他施肥监测区, 其余重金属元素含量均相对较低, 该研究区域农民地目前的施肥习惯没有造成土壤重金属污染, 土壤健康状况较为良好。黄绵土各类重金属在土壤垂直剖面上的分布均小于土壤环境一级标准值, 土壤健康状况良好。本研究监测区域土壤矿质元素总体上呈现出 $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} \approx \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} \approx \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$ , 土壤风化指标表明该区域农田土壤发育较为成熟, 耕性良好。

**关键词:** 施肥监测; 大田管理; 重金属; 矿质全量

中图分类号: S151.9+3 文献标识码: A

土壤作为地球生物赖以生存的介质, 是生态系统的重要构成。土壤中各种元素的含量偏低或超标都会影响地球上所有植物的生存健康, 这些元素通过绿色植物吸收, 一步步地通过食物链到达生物体内富集, 若导致某些有害元素含量超标, 则会直接危害生物的健康<sup>[1]</sup>。目前我国已经进入工业快速发展时期, 各种化工产品生产速度快, 制造量大, 诸如矿业、电镀、冶炼、化工等产生的废水、废渣以及农田的污水灌溉, 农药、化肥等使用不当都会加重土壤重金属的污染<sup>[2-3]</sup>, 土壤重金属已成为环境、土壤学界研究的热点话题<sup>[4-9]</sup>。据不完全统计, 目前我国耕地已受到一定程度的重金属污染, 其污染面积约占耕地总面积的1/5, 这将直接导致粮食减产, 使得国家粮食产值受到影响<sup>[10]</sup>。土壤中的污染重金属主要包括Cd、As、

Hg、Pb、Cr等具有强烈生物毒性的元素, 也包括具有一定毒性的一般重金属如Ni、Cu、Zn、Si等元素, 诸如此类的土壤重金属污染具有不可逆、长期性、滞后性等特点, 潜在危害性大, 若通过食物链累积放大进入人体内, 将会产生严重的不良后果<sup>[11-13]</sup>。黄土高塬沟壑区作为典型的渭北旱塬耕作区域, 长期以来大部分研究多集中于土壤养分元素变化、农田耕作措施效应以及水肥调控等方面, 对于农田土壤重金属和土壤矿质元素方面的研究鲜有报道<sup>[14-19]</sup>。本研究以黄土高塬沟壑区旱作雨养农业区域为背景, 其栽培管理及施肥耕作方式完全参照当地的大田管理模式, 与其他施肥、耕作等规范化管理的田间试验相比, 本试验监测区的田间管理更加接近当地农田的实际情况, 研究结果具备更加良好的指导意义。重点研究当地农田特

基金项目: 中国生态系统研究网络(CERN)长武站长期监测项目(K318009703)和退化及未利用土地整治创新团队项目(2016KCT-23)资助。

\* 通讯作者(dangth@ms.iswc.ac.cn)

作者简介: 徐娜(1990—), 女, 陕西西安人, 硕士研究生, 主要从事土壤化学研究。E-mail: xunaxn@126.com

有的两种土壤,黑垆土和黄绵土在不同管理条件下的土壤重金属变化,并对其剖面分布加以分析,初步了解黄土高原沟壑区农田土壤重金属的分布特征及土壤健康状况;进而分析土壤矿质元素含量,了解区域土壤分化发育情况。

## 1 材料与方 法

### 1.1 自然概况

监测地位于陕西省长武县中国科学院长武黄土高原农业生态站,地处黄土高原中南部陕甘交界处的长武县洪家镇王东村,35°12′~35°16′N,107°40′~107°42′E,海拔 940~1 220 m,地下水埋深 50~80 m,年均降水 580 mm,年平均气温 9.1℃,无霜期 171 d,属暖温带半湿润大陆性季风气候。土壤母质是深厚的中壤质马兰黄土,土体疏松,通透性好。该区属典型的旱作雨养农业区域,作物所需水分均依赖于自然降水,地貌属高塬沟壑区。

### 1.2 试验设计

本研究设置塬面和梯田两种监测地形,塬面土壤类型为黑垆土,根据肥料管理设置四大试验监测区,分别为无肥监测区(CK),化肥监测区(HF),化肥有机肥监测区(NPM)和 3 块农民地监测区(NM1、NM2、NM3);梯田监测区(LS)土壤类型为黄绵土,其培肥措施与化肥监测区(HF)一致。农民地监测区是在试验站周围农田选择具有代表性的 3 个农户田块,施肥方式和用量均遵循当地农民的习惯,以氮、磷和有机肥为主,各监测区肥料用量范围见表 1。试验所用肥料氮肥以尿素为主,磷肥以过磷酸钙为主,有机肥料以农家肥为主,肥料基本上在作物播种前作为基肥撒施,小麦品种为“长旱 58”。本研究试验监测区的农田管理完全符合当地大田管理模式,因此施肥量存在一定的波动,这样也更能符合当地农田的实际情况。各监测区面积分别为 CK 350 m<sup>2</sup>, HF 2 704 m<sup>2</sup>, NPM 350 m<sup>2</sup>, NM 1 1 998 m<sup>2</sup>, NM 2 1 332 m<sup>2</sup>, NM 3 666 m<sup>2</sup>, LS 999 m<sup>2</sup>。

表 1 各监测区施肥水平(kg/hm<sup>2</sup>)  
Table 1 Fertilization levels of monitored areas

土壤类型	处理	氮肥	磷肥	有机肥
黑垆土	CK	0	0	0
	HF	100~150	38.7~90	0
	HM	100~150	38.7~90	65 000
	NM	40~300	38.7~280	30 000~80 000
黄绵土	LS	100~150	38.7~90	0

### 1.3 样品采集与测定分析

土壤样品采集:于小麦收获期分别采集 0~10、10~20、20~40、40~60、60~100 cm 剖面土壤样品。在采样区内,采用“W”型布点,每线段采 5 点混合,形成 3~6 个土壤表层样品,混匀后取部分样品分别过 1 mm 和 0.149 mm 筛,用于土壤养分分析。

Cd 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 消煮-石墨炉原子吸收分光光度法测定;Pb 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮-ICP-AES 法测定;Cr、Ni 采用 HCl-HNO<sub>3</sub>-HF-HClO<sub>4</sub> 消煮-ICP 法测定;Hg 采用 1:1 王水消煮-冷原子荧光吸收法测定;As 采用 1:1 王水消煮-氢化物发生原子荧光光谱法测定。土壤矿质全量采用 X 射线荧光光谱法测定。

### 1.4 数据分析

本研究田间实测数据资料均来自中国生态系统研究网络数据集<sup>[20]</sup>。试验数据处理采用 SigmaPlot 12.5 和 SPSS 16.0 软件进行统计分析。

## 2 结果与讨论

### 2.1 不同施肥监测区土壤重金属的空间分布特征

**2.1.1 土壤 Cd 元素含量变化** 在本研究区域,各个试验监测区土壤 Cd 元素的变化规律不同(图 1)。对于塬面黑垆土,在 0~10 cm 土层内,CK、HF、NPM、NM 监测区的土壤 Cd 元素含量分别为 0.162、0.165、0.169 和 0.149 mg/kg,其中 NM 监测区的土壤 Cd 元素含量明显低于其他 3 个试验监测区,而 CK、HF 和 NPM 3 个监测区之间无明显差异性。在 10~20 cm 土层内,所有试验监测区的 Cd 元素含量均在 0.150 mg/kg 左右,CK 监测区最高,为 0.154 mg/kg;NPM 最低,为 0.143 mg/kg,各试验监测区之间差异不显著。由图 1 可以看出,在 20 cm 土层以下,随着土层深度的加深,各试验监测区之间土壤 Cd 元素的变化差异也逐渐增大。在 20~40 cm 土层内,HF 监测区的 Cd 元素含量明显高于其他试验监测区,为 0.192 mg/kg;其次是 NPM 监测区,为 0.162 mg/kg;

NM 监测区为 0.153 mg/kg；CK 监测区最小，为 0.138 mg/kg。40~60 cm 土层内，土壤 Cd 元素含量表现出 CK > NM > HF > NPM，分别为 0.176、0.163、0.145 和 0.121 mg/kg。60~100 cm 土层内，HF 监测区最高，为 0.165 mg/kg，其他 3 个监测区 Cd 元素含量均在 0.130 mg/kg 左右，HF 监测区的 Cd 元素含量显著高于其他 3 个试验监测区。对于梯田黄绵土 LS 监测区，Cd 元素含量表现出随着土层深度的加深呈现波浪式降低，依土层自上而下其 Cd 元素含量分别为 0.154、0.140、0.153、0.126 和 0.141 mg/kg，0~10 cm 和 20~40 cm 土层，Cd 元素含量基本相同且高于其他土层。通过分析可知，所有试验监测区 0~100 cm 土层内土壤 Cd 元素含量均小于土壤环境质量一级标准( $\leq 0.20$  mg/kg)，表层及深层土壤均未出现土壤 Cd 污染情况。由图 1 可以看出，随着土层深度的加深，LS 监测区和 NPM 监测区 Cd 元素含量变化趋势基本一致，都呈现波浪式降低，表层和中部含量较其他土层偏高；CK 监测区土壤 Cd 元素含量表现出表层和中部含量高，底层含量低的分布规律；HF 监测区表现出中部含量高，其他土层含量相对较低；NM 监测区土壤 Cd 元素含量在中部以上土层表现较稳定，中部以下土层随着深度的加深明显降低。可以看出，梯田黄绵土的 Cd 元素含量整体低于塬面黑垆土。

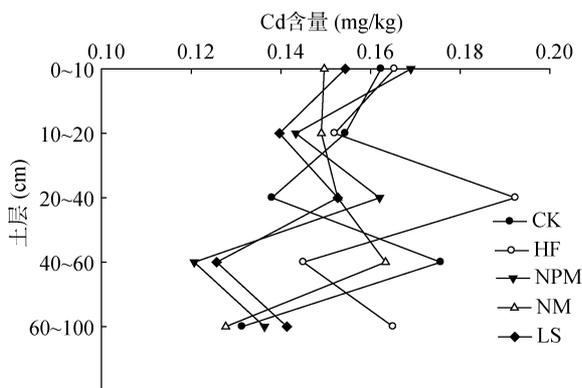


图 1 不同施肥处理土壤 Cd 元素含量变化

Fig.1 Profile distributions of Cd contents under different fertilization levels

**2.1.2 土壤 Pb 元素含量变化** 不同试验监测区之间土壤 Pb 元素的变化规律不同(图 2)。对于塬面黑垆土，在表层 0~10 cm 土层内，HF 监测区 Pb 元素含量最高，为 22.33 mg/kg；其次是 CK 监测区和 NPM 监测区，二者之间无明显差异，21.90 mg/kg 左右；NM 监测区 Pb 元素含量最小，为 21.43 mg/kg。在 10~20 cm 土层，NPM 监测区 Pb 元素含量明显低于其他 3 个试验监测区，为 21.17 mg/kg，而 HF、NM 和 CK

监测区 Pb 元素含量均在 22 mg/kg 左右。由图 2 可以看出，在 20 cm 土层之下，各监测区之间 Pb 元素含量差异增大。在 20~40 cm 土层内表现出 HF > NPM > CK > NM，Pb 元素含量分别为 23.7、22.73、21.37 和 21.23 mg/kg。40~60 cm 土层内，CK 监测区 Pb 元素含量最高，为 23.57 mg/kg，其余 3 个试验监测区 Pb 含量均在 22.50 mg/kg 左右。在 60~100 cm 土层内，HF 监测区 Pb 元素含量显著高于其他 3 个试验监测区，为 24.87 mg/kg；CK、NPM、NM 监测区 Pb 元素含量依次降低，分别为 22.77、22.47 和 21.77 mg/kg。对于梯田黄绵土监测区，在 0~20 cm 土层内，Pb 元素含量基本相同，均在 21.40 mg/kg 左右；20 cm 土层以下，随着土层深度的加深 Pb 元素含量逐渐降低，维持在 20.00 mg/kg 左右。通过分析可知，在该研究区域，黑垆土和黄绵土监测区域的 0~100 cm 土层内，Pb 元素含量均小于土壤环境质量一级标准( $\leq 35$  mg/kg)，未造成土壤重金属 Pb 的污染。由图 2 分析可知，对于 CK、HF 和 NPM 监测区，Pb 元素含量表现出随着土层深度的加深而逐渐增大的趋势；NM 监测区 Pb 元素含量基本维持稳定状态；LS 监测区 Pb 元素含量随着土层深度的加深逐渐降低。整体看出，梯田黄绵土的 Pb 元素含量明显小于塬面黑垆土的 Pb 元素含量，这一方面与土壤类型本身有关，另一方面也与梯田土壤性质相关。

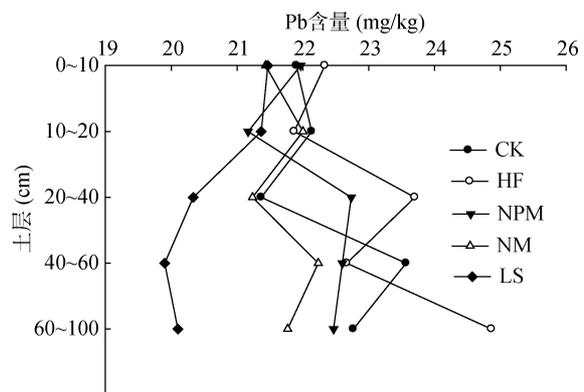


图 2 不同施肥处理土壤 Pb 元素含量变化

Fig.2 Profile distributions of Pb contents under different fertilization levels

**2.1.3 土壤 Cr 元素含量变化** 塬面黑垆土的不同施肥监测区土壤 Cr 元素含量变化规律基本一致，在各个土层内，不同试验监测区之间 Cr 元素含量变化差异明显；而梯田黄绵土的 Cr 元素含量变化率不大(图 3)。对于黑垆土监测区域来说，在 0~10 cm 土层内，Cr 元素含量表现出 CK > HF > NPM > NM 监测区，分别为 77.93、76.97、73.67 和 67.17 mg/kg，NM

监测区的 Cr 元素平均含量显著低于其他监测区。在 10 cm 以下土层, Cr 含量均表现出 HF>CK>NPM>NM, 特别是在 10~20 cm 和 20~40 cm 土层变化率最大, 其含量分别为 78.70、76.67、71.87、68.7 mg/kg 和 77.33、77.16、75.8、68.06 mg/kg, NM 监测区的 Cr 元素含量显著低于其他监测区。40~60 cm 土层内各监测区之间的 Cr 元素含量差异减小, 均在 72~78 mg/kg 之间; 60~100 cm 土层, CK 和 HF 监测区 Cr 元素含量均在 84 mg/kg 左右, NPM 和 NM 监测区 Cr 元素含量均在 77 mg/kg 左右。对于梯田黄绵土 LS 监测区而言, 其 Cr 元素含量随着土层深度的加深未表现出明显的波动, 表层含量略高, 为 67.50 mg/kg, 其他土层基本维持在 65.00 mg/kg 左右。所有试验监测区 0~100 cm 土层内, 土壤 Cr 元素含量均小于土壤环境质量一级标准值( $\leq 90$  mg/kg)。由图 3 可以看出, 黑垆土不同施肥监测区的 Cr 元素含量在土壤垂直剖面上均表现出随土层深度的增加而增大的趋势。NM 监测区 Cr 元素平均含量在 40 cm 以下土层出现持续增长趋势; 其他 3 个试验监测区 Cr 含量在 60 cm 以下土层出现明显的持续增长。梯田黄绵土的 Cr 元素含量明显低于黑垆土监测区域。

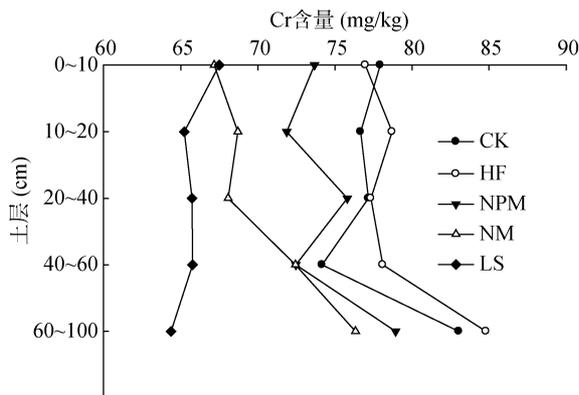


图 3 不同施肥处理土壤 Cr 元素含量变化  
Fig. 3 Profile distributions of Cr contents under different fertilization levels

**2.1.4 土壤 Ni 元素含量变化** 不同试验监测区土壤 Ni 元素含量变化不同(图 4)。对于塬面黑垆土, 0~10 cm 土层, NM 监测区的 Ni 元素含量显著高于其他试验监测区, 达到 40.03 mg/kg; 其次是 HF 监测区, 为 34.97 mg/kg; CK 监测区和 NPM 监测区含量最小, 均在 33 mg/kg 左右。10~20 cm 土层, CK、HF 和 NPM 监测区土壤 Ni 元素含量变化率都较小, NM 监测区出现明显下降, 下降至 31.8 mg/kg。20~40 cm 土层内, NM 监测区 Ni 元素含量升高至 37.6 mg/kg, CK 和 HF 均在 35 mg/kg 左右, NPM 监测区继续维

持在 33 mg/kg 左右。40 cm 土层以下, 土壤 Ni 含量持续增长, 并呈现出 HF>CK>NPM>NM 的趋势, 分别为 40.1、37.5、36.3 和 35.6 mg/kg。梯田黄绵土 0~10 cm 土层的 Ni 元素含量为 30.13 mg/kg, 随着土层深度的加深, Ni 元素含量出现略微增长, 均维持在 30.75 mg/kg 左右。通过与土壤环境质量一级标准( $\leq 40$  mg/kg)比较可知, NM 监测区 0~10 cm 土层和 HF 监测区 60~100 cm 土层的土壤 Ni 含量略微偏高, 其他试验监测范围内土层 Ni 含量均处于正常水平。由图 4 可以看出, 梯田黄绵土 LS 监测区的 Ni 元素含量明显低于黑垆土监测区域, 且随土层深度的变化率较小; 塬面黑垆土 NM 监测区表层土壤 Ni 含量显著高于底层土壤, 其他 3 个不同施肥监测区均呈现出随着土层深度的增加而增加的趋势, 出现 Ni 的深层累积现象。

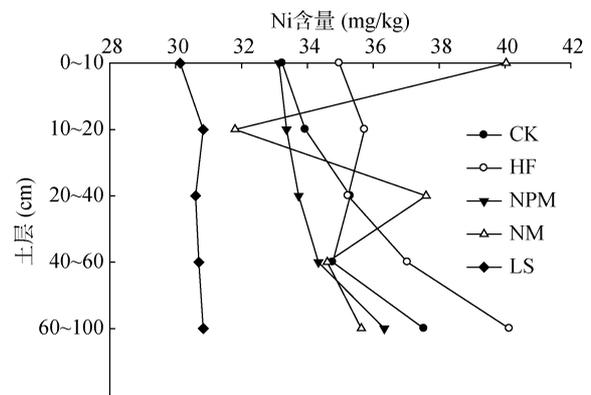


图 4 不同施肥处理土壤 Ni 元素含量变化  
Fig. 4 Profile distributions of Ni contents under different fertilization levels

**2.1.5 土壤 Hg 元素含量的变化** 不同试验监测区各土层内土壤 Hg 元素含量不同, 塬面黑垆土监测区表层(0~20 cm)基本呈现出 NPM>HF>NM>CK 的变化规律, 含量分别为 0.041、0.036、0.032 和 0.024 mg/kg; 0~10 cm 和 10~20 cm 土层的 Hg 含量变化率较小。在 20~40 cm 土层, CK 监测区土壤 Hg 含量出现明显升高, 达到 0.042 mg/kg; 其次是 HF 监测区, Hg 含量未出现明显变化; NPM 和 NM 监测区均出现明显降低, 分别降至 0.027 mg/kg 和 0.023 mg/kg。40~60 cm 土层, 各监测区土壤 Hg 含量仍出现持续降低, HF、CK、NPM 和 NM 监测区的 Hg 含量分别为 0.024、0.020、0.019 和 0.016 mg/kg。60~100 cm 土层土壤 Hg 含量变化率较小, 基本维持稳定状态。对于梯田黄绵土 LS 监测区而言, Hg 元素含量随着土层深度的加深变化率不大, 各土层内的 Hg 含量基本维持在 0.014 mg/kg 左右, 低于黑垆土各监测

区域 Hg 含量。由分析结果可知,在 0~100 cm 土层,各试验监测区的土壤 Hg 含量均小于土壤环境一级标准( $\leq 0.15$  mg/kg)。由图 5 可知,各施肥监测区表层(0~20 cm)Hg 含量远远大于土壤底层含量,并且随着土层深度的加深呈现出明显的降低趋势,在 10~20 cm 土层出现明显的拐点,60 cm 土层以下变化率降低,基本维持稳定状态。

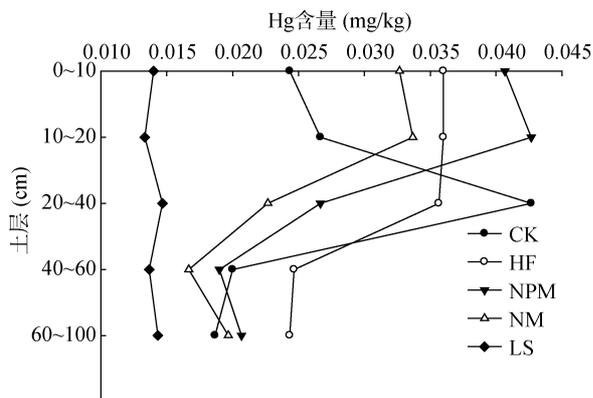


图 5 不同施肥处理土壤 Hg 元素含量变化  
Fig. 5 Profile distribution of Hg contents under different fertilization levels

有研究表明,重金属 Hg 元素与土壤 pH 呈显著或极显著的负相关,尤其是在  $\text{pH} > 5$  时,随着 pH 的继续升高,土壤中  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附量降低<sup>[21-22]</sup>。本研究区域的黑垆土和黄绵土的 pH 均大于 7.5,呈强碱性土壤,在一定程度上减少了土壤中  $\text{Hg}^{2+}$  的吸附,使土壤重金属 Hg 的含量偏低。

**2.1.6 土壤 As 元素含量的变化** 不同试验监测区土壤 As 元素含量不同,对于塬面黑垆土而言,在整个监测土层范围内,NM 监测区土壤 As 元素含量明显小于其他施肥监测区(图 6)。在 0~10 cm 土层内, $\text{NPM} > \text{HF} > \text{CK} > \text{NM}$ ,其 As 元素含量分别为 14.67、14.50、13.43 和 11.53 mg/kg,并且在 10~20 cm 土层 As 含量也呈现出相同的大小规律。30 cm 土层以下,不同施肥监测区 As 元素含量的大小发生变化,表现为  $\text{HF} > \text{CK} > \text{NPM} > \text{NM}$  监测区。20~40 cm 土层,As 含量按大小顺序分别为 14.27、13.53、13.00 和 11.27 mg/kg;40~60 cm 土层分别为 14.97、14.83、14.5 和 10.3 mg/kg;60~100 cm 土层分别为 15.83、15.80、15.47 和 10.57 mg/kg。整体看出,黑垆土 NM 监测区的 As 元素含量显著低于其他施肥监测区,在表层 0~30 cm,各监测区之间 As 元素含量变化差异较大,随着土层深度的加深,CK、HF 和 NPM 之间的 As 含量差异减小。对于梯田黄绵土 LS 监测区而言,其 As 元素含量随着土层深度的加

深缓慢降低,依土层自上而下其 As 含量依次为 11.00、11.17、10.97、11.13 和 10.43 mg/kg。与土壤环境质量一级标准( $\leq 15$  mg/kg)相比,CK 监测区和 HF 监测区的 60~100 cm 土层,NPM 监测区的 10~20 cm、60~100 cm 土层,As 元素含量均出现超标,其他各试验监测土层 As 含量均处在标准范围内。由图 6 可以看出,CK、HF 和 NM 监测区 As 元素含量在 0~40 cm 土层内变化率较小,NPM 监测区呈现出先升后降的趋势,40 cm 土层以下,As 含量基本呈现增大趋势,整体表现表层低、底层高,As 元素出现深层累积现象。LS 监测区 As 元素含量随着土层深度的加深变化率较小。

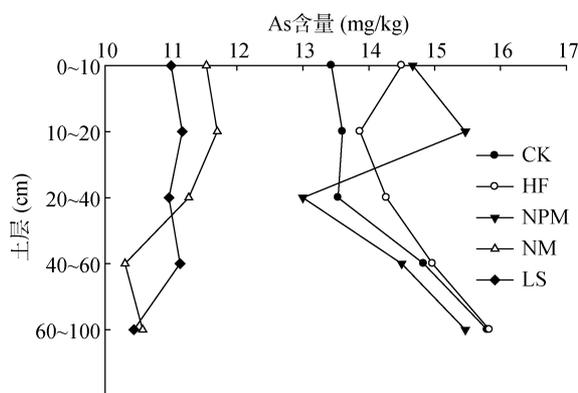


图 6 不同施肥处理土壤 As 元素含量变化  
Fig. 6 Profile distribution of As contents under different fertilization levels

通过分析可知,在本研究监测区域内,黄绵土监测范围内各类重金属含量均小于土壤环境一级标准值,其重金属元素含量相对黑垆土偏低,这主要与黄绵土所处的地形有关,其为梯田形式,在改造过程中使得长期经过人为耕作影响的表土剥离,生土裸露,而深层土壤受化肥、农药等污染较小,加之没有其他工业污染来源,其重金属含量自然偏低。黑垆土各施肥监测区 0~100 cm 土层内 Cd、Pb、Cr、Hg 元素含量均小于土壤环境一级标准值;农民地监测区 0~10 cm 和 HF 监测区 60~100 cm 土层 Ni 含量略微偏高,其他监测土层内 Ni 含量均处于正常水平;无肥监测区和化肥监测区 60~100 cm 土层,化肥有机肥监测区 10~20 cm、60~100 cm 土层 As 元素含量均出现超标。对于不同施肥条件而言,农民地监测区的 Cd 元素含量相对其他施肥监测区较高,其余重金属元素含量农民地监测区都表现出含量较低,这说明在该研究区域农田,农民地目前的施肥习惯没有造成土壤重金属的严重积累以及重金属污染现象,土壤健康状况良好。

## 2.2 土壤矿质全量分析

土壤不是由单一物质组成,它是由多种元素组成的矿物质所构成。土壤矿物质作为土壤的重要组成部分,占土壤固体部分的 95% 以上。土壤矿物质主要以 O、Si、Al、Fe 所占比例较大, SiO<sub>2</sub>、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 是构成土壤的骨干成分。土壤矿物质的化学组成主要受成土条件及过程影响,分析土壤矿质全量的化学组成,有利于掌握矿质元素在剖面的迁移和变化,阐明土壤化学性质在成土过程中的演变情况,了解土壤的风化发育程度。

本研究不同试验监测区土壤矿质全量分析结果见表 2。由结果可知,对于塬面黑垆土监测区而言, SiO<sub>2</sub> 在土壤化学物质组成中所占比例最大,其次是 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,二者作为土壤构成的主要成分,占土壤矿物质总量的 70% 以上;其次是 Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 和 CaO,这两者含量几乎相同,均在 50 g/kg 左右; MgO、K<sub>2</sub>O、Na<sub>2</sub>O 的含量远远高于 MnO 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。在本研究区域,黑垆

土土壤中的矿质全量总体上呈现出 SiO<sub>2</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > CaO ≈ Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > K<sub>2</sub>O ≈ MgO > Na<sub>2</sub>O > TiO<sub>2</sub> > P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > MnO 的趋势。SiO<sub>2</sub> 在整个剖面土层上表现出下层含量高于中上层,分析原因可能是由于黏粒的机械淋溶和淀积作用所致<sup>[23]</sup>; CaO 和 P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 体现出表层含量高的结果,可能是与在土壤形成时期黄土沉积作用有关,也与土壤母质有关<sup>[24]</sup>; 其余矿质元素含量随剖面土层的变化均较弱,没有出现明显的聚集和淋溶现象。MnO<sub>2</sub> 在土壤中最不易发生变化,受土壤风化作用的影响较小,含量也属于微量。黄绵土 LS 监测区各类土壤矿质元素含量在剖面土层上没有表现出明显的差异,这主要与梯田土壤性质有关,经过改造生土裸露地表,土壤性状差异不大,总体上呈现出 SiO<sub>2</sub> > Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > CaO > Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> > K<sub>2</sub>O ≈ MgO > Na<sub>2</sub>O > TiO<sub>2</sub> > P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> > MnO 的趋势,与黑垆土土壤矿质全量变化规律基本相同,但其 SiO<sub>2</sub> 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量相对稍微偏低, CaO 含量偏高。

表 2 土壤矿质元素组成与风化指标  
Table 2 Composition of soil mineral elements and soil weathering indexes

试验监测区	采样深度(cm)	SiO <sub>2</sub> (g/kg)	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/kg)	MnO (g/kg)	TiO <sub>2</sub> (g/kg)	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> (g/kg)	CaO (g/kg)	MgO (g/kg)	K <sub>2</sub> O (g/kg)	Na <sub>2</sub> O (g/kg)	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (g/kg)	硅铝率	硅铁率	硅铝铁率
CK	0~10	600.9	50.7	0.9	6.7	127.3	64.9	22.9	25.7	13.7	1.9	4.72	11.84	3.37
	10~20	601.9	50.6	0.9	6.7	127.1	65.2	22.9	25.4	13.8	1.9	4.74	11.90	3.39
	20~40	605.3	50.4	0.9	6.7	127.4	62.8	22.7	25.5	13.8	1.7	4.75	12.02	3.41
	40~60	624.0	51.5	0.9	6.8	131.5	49.2	22.8	26.1	13.5	1.5	4.75	12.11	3.41
	60~100	631.6	54.1	1.0	6.9	136.7	39.5	22.3	26.9	12.7	1.5	4.62	11.67	3.31
HF	0~10	604.3	51.0	0.9	6.7	127.6	63.2	22.8	25.6	13.5	2.1	4.74	11.84	3.38
	10~20	604.5	50.7	0.9	6.7	127.6	63.3	22.9	25.7	13.7	2.0	4.74	11.92	3.39
	20~40	612.2	50.3	0.9	6.8	128.1	58.8	22.9	25.6	13.8	1.7	4.78	12.16	3.43
	40~60	635.3	51.9	1.0	6.9	133.2	43.5	22.7	26.4	13.5	1.5	4.77	12.23	3.43
	60~100	635.0	54.8	1.0	6.9	138.6	36.4	22.2	27.1	12.5	1.4	4.58	11.59	3.28
NPM	0~10	605.3	50.4	0.9	6.7	127.5	61.3	22.9	25.5	13.8	1.9	4.75	12.00	3.40
	10~20	614.6	51.3	0.9	6.7	130.3	54.3	22.6	25.8	13.5	1.7	4.72	11.99	3.38
	20~40	607.2	50.5	0.9	6.7	127.8	61.2	22.9	25.6	13.7	1.7	4.75	12.02	3.40
	40~60	629.6	51.7	0.9	6.8	132.8	43.5	22.8	26.2	13.5	1.5	4.74	12.17	3.41
	60~100	627.9	54.4	1.0	6.9	137.2	39.1	22.4	26.9	12.6	1.5	4.58	11.54	3.28
NM	0~10	604.6	49.4	0.9	6.6	124.6	65.6	22.7	25.3	14.1	1.9	4.85	12.24	3.47
	10~20	601.5	49.9	0.9	6.7	125.0	67.0	22.8	25.4	13.9	2.0	4.81	12.06	3.44
	20~40	604.9	49.1	0.9	6.6	124.3	65.4	22.7	24.9	14.2	1.8	4.87	12.33	3.49
	40~60	634.7	50.9	0.9	6.8	129.6	48.4	22.6	25.9	13.9	1.6	4.90	12.46	3.52
	60~100	629.5	53.9	1.0	6.8	134.8	43.5	22.2	26.7	12.8	1.6	4.67	11.68	3.34
LS	0~10	563.4	48.5	0.8	6.5	118.6	94.7	23.4	23.1	14.1	1.7	4.75	11.62	3.37
	10~20	559.6	48.6	0.8	6.5	118.5	96.6	23.4	22.9	13.9	1.5	4.72	11.51	3.35
	20~40	560.7	48.7	0.8	6.6	118.7	97.2	23.6	22.9	13.9	1.5	4.72	11.52	3.35
	40~60	560.0	49.6	0.8	6.6	119.1	98.6	23.7	23.1	13.7	1.4	4.70	11.29	3.32
	60~100	561.1	49.5	0.9	6.5	119.3	97.6	23.9	23.2	13.7	1.4	4.70	11.34	3.32

土壤的硅铝率(Sa)、硅铁率(Sf)、硅铝铁率(Saf)作为反映土壤矿物风化强度的指标之一,能够反映出在黏粒及铁、铝等物质在剖面土层中的累积及迁移情况。本研究区域,各试验监测区之间硅铝率(Sa)、硅铁率(Sf)、硅铝铁率(Saf)差异均不明显,并且在同一剖面土层的垂直变化差异较小,矿质元素迁移不明显,其大小范围分别是 4.5~4.9、11.3~12.5、3.2~3.5。硅铝铁率(Saf)反映土壤的风化分解程度,并与之呈负相关关系。当  $\text{SiO}_2/\text{R}_2\text{O}_3 > 2$  时,土壤为高硅性土,此类土壤盐基含量高,吸水、保水、保肥能力强,持水力高,水分渗透率低;同时含蒙脱石类黏土矿物多,具有强烈的膨胀性和收缩性,易与腐殖酸钙紧密结合形成稳定的团聚体,土质较好。本试验监测区域土壤在长期人为耕作管理的条件下,土壤发育较为成熟,属于良好的耕作土壤。

### 3 结论

1)从土壤重金属的垂直分布来看,黑垆土不同施肥条件下的土壤重金属变化规律不同,重金属元素在土壤剖面中的累积也出现差异。CK 无肥监测区土壤 Cd 元素表层和中部含量高,底层含量相对较低;Pb、Cr、Ni、As 元素含量随着土层深度的加深而增大;HF 化肥监测区 Pb、Cr、Ni 元素均出现深层累积;NPM 化肥有机肥监测区 Cd 元素在土壤垂直剖面上出现降低,Pb、Cr、Ni、As 则出现深层累积;NM 农民地监测区 Cd、Cr 元素底层含量较高,Ni、Hg 元素表层含量较高。对于黄绵土 LS 监测区,Cd 元素在土壤表层和中部含量较其他土层偏高;Pb 元素表层含量高,20 cm 土层以下逐渐降低;Cr、Ni、Hg、As 在土壤垂直剖面上的变化率不大。

2)本研究区域土壤矿质元素中  $\text{SiO}_2$  占绝对优势;其次是  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ;CaO 略高于  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,总体上呈现出  $\text{SiO}_2 > \text{Al}_2\text{O}_3 > \text{CaO} \approx \text{Fe}_2\text{O}_3 > \text{K}_2\text{O} \approx \text{MgO} > \text{Na}_2\text{O} > \text{TiO}_2 > \text{P}_2\text{O}_5 > \text{MnO}$  的趋势, $\text{Fe}_2\text{O}_3$  出现了一定的深层淋溶现象,CaO、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{Na}_2\text{O}$  表层积累较多,其他矿质元素土层间变化差异不大。各试验监测区硅铝率(Sa)、硅铁率(Sf)、硅铝铁率(Saf)差异均不明显,并且在同一剖面土层的垂直变化差异较小,矿质元素迁移不明显。

### 参考文献:

[1] 张晓敏,张秀英,钟太洋,等.中国农田土壤重金属富集状况及其空间分布研究[J].环境科学,2014,35(2):692-703

[2] Adriano D C. Trace elements in terrestrial environments[J]. Quarterly Review of Biology, 2001, 32(1): 374

[3] 王国梁,周生路,赵其国,等.菜地土壤剖面上重金属元素含量随时间的变化规律研究[J].农业工程学报,2006,22(1):79-84

[4] 钟晓兰,周生路,李江涛,等.经济快速发展区土壤重金属累积评价[J].环境科学,2010,6(31):1608-1616

[5] Baldrian P. Effect of heavy metals on saprotrophic soil fungi[J]. Soil Biology, 2010, 19: 263-297

[6] 霍霞妮,李红,孙丹峰,等.北京市农业土壤重金属状态评价[J].农业环境科学学报,2009,28(1):66-71

[7] 蒋红群,王彬武,刘晓娜,等.北京市土壤重金属潜在风险预警管理研究[J].土壤学报,2015,52(4):731-746

[8] Tonmoy K. Heavy metal accumulation in soil amended with roadside pond sediment and uptake by rice[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(5): 2577-2594

[9] Tomohito A, Satoru I, Masaharu M, et al. Heavy metal contamination of agricultural soil and countermeasures in Japan[J]. Paddy Water Environ, 2010, 8(12): 247-257

[10] 李广云,曹永富,赵书民,等.土壤重金属危害及修复措施[J].山东林业科技,2011(6):96-101

[11] 陈玉东,周健民,邢璐,等.黑龙江海伦市农田土壤重金属与磷素含量的特征研究[J].土壤,2015,47(5):965-972

[12] 张桃林.科学认识和防治耕地土壤重金属污染[J].土壤,2015,47(3):435-439

[13] 杨敏,滕应,任文杰,等.石门雄黄矿周边农田土壤重金属污染及健康风险评估[J].土壤,2016,48(6):1172-1178

[14] 戚瑞生,党廷辉,杨绍琼,等.长期轮作与施肥对农田土壤磷素形态和吸持特性的影响[J].土壤学报,2012,49(6):1136-1146

[15] 成婧,吴发启,云峰,等.渭北旱塬坡耕地玉米-苜蓿间作对土壤养分和产量的影响[J].水土保持通报,2013,33(4):228-232

[16] 戴健,王朝辉,李强,等.氮肥用量对旱地冬小麦产量及夏闲期土壤硝态氮变化的影响[J].土壤学报,2013,50(5):956-965

[17] 何晓雁,郝明德,李慧成,等.黄土高原旱地小麦施肥对产量及水肥利用效率的影响[J].植物营养与肥料学报,2010,16(6):1333-1340

[18] 孟红旗,刘景,徐明岗,等.长期施肥下我国典型农田耕层土壤的 pH 演变[J].土壤学报,2013,50(6):1109-1116

[19] 章孜亮,刘金山,王朝辉,等.基于土壤氮素平衡的旱地冬小麦监控施氮[J].植物营养与肥料学报,2012,18(6):1387-1396

[20] 刘文兆,党廷辉.中国生态系统定位观测与研究数据集:农田生态系统卷-陕西长武站[M].北京:中国农业出版社,2012

[21] 陈永,黄标,胡文友,等.设施蔬菜生产系统重金属积累特征及生态效应[J].土壤学报,2013,50(4):693

- [22] 毛明翠, 黄标, 李元, 等. 我国北方典型日光温室蔬菜生产系统土壤重金属积累趋势[J]. 土壤学报, 2013, 50(4): 835-841
- [23] 郭曼, 安韶山, 常庆瑞, 等. 宁南宽谷丘陵区土壤矿物质元素与氧化铁的特征[J]. 水土保持研究, 2005, 12(3): 38-40-702
- [24] 刘素华, 王慧强. 辽宁朝阳第四纪古红土的矿质元素与氧化铁特性研究[J]. 农业科技与装备, 2008(3): 19-22

## On Profile Distributions of Heavy Metals and Mineral Elements in Farmlands in Gully Area of Loess Plateau

XU Na<sup>1, 2, 3</sup>, DANG Tinghui<sup>3\*</sup>

(1 Shaanxi Provincial Land Engineering Construction Group Co., Ltd. Xi'an 710075, China; 2 Institute of Land Engineering & Technology, Shaanxi Land Construction Group Co., Ltd., Xi'an 710075, China; 3 Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** In this paper, in order to assess soil health and soil properties in local farmlands, the profile distribution characteristics of heavy metal and mineral element contents in soil of dry farmlands in the gully area of the Loess Plateau were studied. The monitored area included two kinds of soils: black loessial soil and loessial soil. The black loessial soil locates on the table-land terrain. No fertilizer monitoring area (CK), chemical fertilizer monitoring area (HF), inorganic and organic fertilizer monitoring area (NPM) and farmland monitoring area (NM) were set up according to fertilizer management. The loessial soil locates on the terrace, and the fertilization management was the same as HF. For the black loessial soil, the results showed that the contents of Cd in top layer and middle layers were higher than that of bottom layer; the contents of Pb, Cr, Ni and As were increased with the increase of depth in CK treatment. The concentrations of Pb, Cr and Ni in HF treatment were accumulated in the profile bottom. The content of Cd was decreased with the increase of depth in NPM treatment, and the contents of Pb, Cr, Ni and As were accumulated in the deep layers. For NM treatment, Cd and Cr were higher in the bottom profile, while Ni and Hg were higher in top layer. For loessial soil, the content of Cd was higher in top layer and the middle layers. The contents of Cr, Ni, Hg and As changed little in the profile and the contents of heavy metals in this soil were lower than those in the black loessial soil. The contents of Cd, Pb, Cr and Hg in 0-100 cm soil profile of each fertilization monitored area were not exceed the values of the 1<sup>st</sup> grade standard of soil environment quality, but the contents of As in 60-100 cm layer in CK monitored area and HF monitored area, 10-20 cm and 60-100 cm layers in NPM monitored area were exceeded the standard value. For NM monitored area, the content of Cd was slightly higher than those of other fertilization monitored areas, and the other heavy metal elements were relatively low. It indicated that the current fertilization in the study area does not cause soil heavy metal pollution and soil health status was well. The profile distributions of heavy metal contents in loessial soil were all smaller than the 1st grade standard of soil environment quality, and soil health was well too. The total mineral content of soil in this study area were in order of SiO<sub>2</sub>>Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>CaO≈Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>>K<sub>2</sub>O≈MgO>Na<sub>2</sub>O>TiO<sub>2</sub>>P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>>MnO. Soil weathering indexes indicated that soils in the study area were developed maturely and had good tillage.

**Key words:** Fertilization monitoring; Farmland management; Heavy metals; Total mineral content