

# 长城塬全新世黄土剖面重金属元素揭示的成壤环境变化

张玉柱, 黄春长, 庞奖励, 杨红瑾

(陕西师范大学 旅游与环境学院, 陕西 西安 710062)

**摘要:** 通过广泛的野外考察,选择宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面进行了系统采样以及化学元素、磁化率、和粒度等多指标的测定。结果表明:(1) 重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 的含量变化趋势与磁化率、烧失量和黏粒含量变化趋势呈正相关关系,而它们与 CaCO<sub>3</sub> 和粗粉沙含量变化趋势呈负相关关系。这些重金属元素的含量在全新世中期古土壤层(S<sub>0</sub>)中呈现高值,在各黄土层(L<sub>1</sub>, L<sub>2</sub>, L<sub>3</sub>)中呈现低值。这表明风化成壤过程中,这些元素的含量变化受到全新世以来季风气候变化和成壤作用的影响。(2) 重金属元素 Pb 含量变化趋势与上述元素的含量变化趋势相比差异较大。Pb 的含量变化趋势与磁化率变化趋势无明显相关性,Pb 的含量变化趋势与黏粒和烧失量变化趋势呈负相关关系,而与粗粉沙含量变化趋势呈正相关关系。Pb 的含量在全新世早期过渡性黄土层(L<sub>1</sub>)呈现最低值,在全新世中期古土壤层(S<sub>0</sub>)、近代黄土层(L<sub>0</sub>)和现代表土层(TS)相对较高,并与晚更新世马兰黄土层(L<sub>1</sub>)相当,表明 Pb 主要包含在粗颗粒和重矿物之中,其化学性质比较稳定,具有强抗风化性,很少受到风化成壤作用的影响。

**关键词:** 长城塬; 重金属元素; 全新世; 气候

文献标识码: A

文章编号: 1000-288X(2013)04-0096-07

中图分类号: P934

## Climate Change Indicated by Heavy Metals in Holocene Loess Profile in Changcheng Tableland

ZHANG Yu-zhu, HUANG Chun-chang, PANG Jiang-li, YANG Hong-jin

(College of Tourism and Environment Sciences, Shaanxi Normal University, Xi'an, Shaanxi 710062, China)

**Abstract:** Based on filed survey, soil samples were collected systematically in the Holocene loess profile in Changcheng tableland, the Ningxia Hui Autonomous Region. Chemical elements, magnetic susceptibility, particle-size distribution, loss on ignition and the content of calcium carbonate were measured in the laboratory. The results showed that: (1) There was a significant positive correlation between the curves of the heavy metals(Mn, Zn, Ni, Cu, V and Cr) and the curves of magnetic susceptibility, loss on ignition and clay. While a negative correlation was showed between the curves of the heavy metals(Mn, Zn, Ni, Cu, V and Cr) and the curves of the content of calcium carbonate and coarse silt. The contents of these heavy metals in the mid-Holocene Ustic Isohumisol were higher than that in the loess. It indicated that these heavy metals were affected by weathering and pedogenesis along with the Holocene climatic change. (2) The shape of the curve between the Pb was different from that of the heavy metals(Mn, Zn, Ni, Cu, V and Cr). The curve of Pb was uncorrelated with the curve of magnetic susceptibility. The content of Pb was very low in the transitional loess(L<sub>1</sub>). The content of Pb was relatively high with very small variability in the Ustic Isohumisol (S<sub>0</sub>) and in the recent loess and topsoil (L<sub>0</sub>, TS). It seemed that these elements are not much affected by climatic change in the Holocene.

**Keywords:** Changcheng tableland; heavy metals; Holocene; climate

土壤中含量较少的重金属元素在土壤形成和植物生长过程中发挥着不可或缺的作用,并且对人类的身体健康也存在重要影响。国内外学者对土壤中重金属元素的研究,多注重在现代表土层耕作土壤(厚度

收稿日期:2012-06-09

修回日期:2012-09-27

资助项目:教育部博士点基金优先发展领域项目“黄河晋陕峡谷全新世古洪水事件及其对于全球化的响应规律研究”(20110202130002);中央高校基本科研业务费专项基金(GK201101002);陕西师范大学优秀博士生资助项目(X2012YB04)

作者简介:张玉柱(1987—),男(汉族),山东省临沂市人,博士研究生,主要从事土地资源开发与环境演变研究。E-mail:SSDZYZ@126.com。

通信作者:黄春长(1954—),男(汉族),陕西省彬县人,教授,博士生导师,主要从事土地资源开发与环境演变研究。E-mail:chuang@snnu.edu.cn。

大约 100 cm) 中重金属元素的存在形态、空间含量分布、丰缺状况对植物生长的影响及由现代人类活动造成的重金属污染的危害及治理等方面<sup>[1-8]</sup>。在对土壤中重金属元素在时间尺度上特别是万年时间尺度上分布规律研究甚少<sup>[9]</sup>, 且对黄土高原北部地区的研究存在空白。此外, 作为土壤物质迁移动力的土壤水分因雨水下渗在土壤中的含量深度往往要大于 100 cm, 野外考察发现降雨下渗深度可达到 180 cm 左右, 因此只研究表层耕作土壤是不够的。在野外综合考察研究的基础上, 选取了全新世发育完整的典型的宁夏自治区长城塬黄土土壤剖面作为研究剖面, 对重金属元素在万年时间尺度上的分布规律及其与成壤环境变化的相关性进行研究。通过分析各项气候代用指标与全新世长城塬剖面重金属元素含量变化存在相关性, 探讨了在万年时间尺度上, 引起土壤中重金属元素动态演变的根本因素, 有助于深刻理解该地区成壤环境演变的机制和客观评价该地区现代土壤中的重金属污染, 对该区的绿色农业建设具有重要的科学指导意义。

## 1 研究区概况

研究区宁夏自治区固原市彭阳县长城塬全新世典型黄土土壤剖面(35°52′01″N, 106°46′44″E), 海拔约 1 678 m, 属温带半干旱大陆性季风气候, 年平均气温 7.4~8.4 °C, 年平均降水量 350~550 mm。年

日照量 2 500 h, 无霜期 160 d。该剖面处在平坦开阔的黄土高原塬面上, 黄土堆积完整连续, 发育了典型的全新世中期黑垆土, 厚度达 100 cm, 地表自然植被已不复存在, 现在为农田景观。采样点选在长城塬最高点平坦地面的塬边陡坎, 将陡坎面外表厚约 10 cm 的表层除去, 向下按 2 cm 间距连续采样, 至马兰黄土顶部 60 cm 处, 共采集样品 125 个。

根据野外观察并结合室内试验数据分析, 对该剖面进行了详细的地层划分和土壤学特征描述(表 1)。与黄土高原其他地区一样, 宁夏自治区长城塬剖面中的全新世黄土土壤层覆盖于晚更新世马兰黄土层(L<sub>1</sub>)之上。

参照课题组陕西省长武县二塘村剖面和甘肃省合水县马家塬剖面的光释光和考古学测年数据<sup>[10-15]</sup>, 可以基本确定宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面的年代框架。

190 cm 处为晚更新世马兰黄土和全新世黄土土壤剖面的分界处, 标志着晚更新世的结束和全新世的开始, 确定年代为 11 500 a B. P.; 190—150 cm, 发育全新世早期过渡性黄土(L<sub>1</sub>), 为全新世早期(11 500—8 500 a B. P.); 150—54 cm, 发育了典型的全新世中期古土壤(S<sub>0</sub>), 为全新世大暖期(8 500—3 100 a B. P.); 54—20 cm, 发育了典型的近代黄土(L<sub>0</sub>), 为全新世晚期(3 100—1 500 a B. P.); 20 cm 以上至地表为现代表土层(TS)。

表 1 宁夏自治区长城塬剖面地层学和土壤学特征

地层划分	深度/cm	颜色及结构构造特征
现代表土层(TS)	20—0	浊橙色, 发育良好的现代耕作土壤, 团粒结构, 粉沙质地, 较疏松, 含大量植物根系。
近代黄土层(L <sub>0</sub> )	54—20	浊黄橙色的近代黄土, 粉沙质地, 较松散。
全新世中期古土壤层(S <sub>0</sub> )	150—54	浊棕色的黑垆土, 团粒结构丰富, 发育强烈, 有大孔隙, 在 130—54 cm, 土质较硬, 向下较松软。
全新世早期过渡性黄土层(L <sub>1</sub> )	190—150	浊橙色的过渡性黄土, 粉沙质地, 很松散, 其中含有大量碳酸钙假菌丝体及细小的钙结核。
晚更新世马兰黄土层(L <sub>1</sub> )	>190	浊黄橙色, 典型的风成马兰黄土, 粉沙质地, 很松散, 未出现明显的碳酸钙淀积层。

## 2 实验方法

2009 年 10 月 5 日将采集回来的所有样品在样品室内自然风干。在实验室分对自然风干样品别进行了磁化率、元素分析、烧失量、碳酸钙和粒度等项目的测定。

磁化率实验是将样品进行粗研磨至 2 mm 以下, 称取 10 g 置于小塑料盒中, 使用英国 Batington 公司

生产的 MS-B2 磁化率仪, 连续对每个样品进行低频磁化率(0.47 kHz)和低频磁化率(4.7 kHz)的测定, 连续测量 3 次, 分别取其平均值, 测量精度为 0.1; 化学元素分析是将待测样品用机器研磨至 200 目以下, 称取 4 g, 用 YY-60 型压样机制成样片, 编号并按顺序放入样杯中, 利用荷兰 Panalytical 公司生产的 PW2403 X-Ray 荧光光谱仪对样品进行元素测定。在测量过程中加入了国家标样 GSS-1 和 GSD-12 进

行误差控制,实测值和参考值的相对误差均小于 10%;烧失量是将干燥样品置于马弗炉中,400 °C 灼烧 2 h,置于干燥器内冷却后称量,计算各样品的损失率;碳酸钙含量测定是称取干燥样品 1.5 g,使用荷兰 Eijkelkamp 公司生产的 08.53 型 Calcimeter 仪器测量其中的  $\text{CaCO}_3$  含量;粒度分析是采用英国 Malvern 公司生产的 Mastersizer-S 型激光粒度仪,样品前处理当中,先加入 10%  $\text{H}_2\text{O}_2$  去除有机质,后加入 10%  $\text{HCl}$  充分反应,去除次生碳酸盐,再加入分散剂使样品中的黏粒充分分散后放入仪器进行测定。

### 3 结果分析

#### 3.1 磁化率、烧失量、碳酸钙和粒度分析

磁化率能够指示黄土土壤剖面中风化成壤的强度,也是揭示东亚夏季风演变的良好代用指标<sup>[16]</sup>,它反映了黄土土壤剖面中铁磁性矿物的含量变化。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,磁化率介于  $4.21 \times 10^{-7} \sim 8.49 \times 10^{-7} \text{ m}^3/\text{kg}$ (图 1)。总体看来,低于关中盆地其它区域的全新世黄土土壤剖面,表明位置偏北的宁夏自治区长城塬在全新世中期古土壤形成时期,相对于南部的关中盆地,气候比较干旱,暖湿程度低,风化成壤作用较弱。黄河中游南部地区在全新世中期大暖期具有北亚热带气候特点,关中盆地为亚热带暖湿气候<sup>[8]</sup>,从而表明关中盆地以北的宁夏自治区长城塬地区在全新世大暖期为比较干旱的暖温带气候环境。但是,在宁夏自治区长城塬剖面中,磁化率仍呈现有规律的变化。在全新世中期

古土壤层( $S_0$ )中,磁化率呈现高值,表明当时气候温暖湿润,降水丰富,生物分化成壤作用强烈,淋溶和黏化过程强。在各黄土层( $L_1, L_t, L_0$ )中,磁化率呈现低值,表明其堆积时期气候冷干,堆积之后的成壤改造极其微弱。

烧失量是烘干土样在 400 °C 高温下的损失率,主要包括有机质和结合水,反映成壤过程中生物活动强度的变化,对过去的环境状况和气候变化具有较好的指示意义。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,烧失量介于 0.60%~2.44%,其变化趋势与磁化率变化趋势呈正相关关系,相关系数为 0.89,显著性水平为  $\alpha_{0.01}$ (图 1,表 2)。在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中,烧失量呈现高值,表明成壤过程中生物活动强度大。在现代表土层(TS)中,烧失量呈现较高值,是因为其含有大量的半分解和未分解的植物残体,腐殖质含量较高。

$\text{CaCO}_3$  含量变化可以直接作为东亚夏季风变化的替代性指标<sup>[17]</sup>,反映了与夏季风密切相关的降雨量的大小。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中, $\text{CaCO}_3$  含量介于 11.14%~17.36%,其变化趋势与磁化率和烧失量变化趋势呈负相关,相关系数分别为 -0.86 和 -0.65,显著性水平为  $\alpha_{0.01}$ (图 1,表 2)。

在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中, $\text{CaCO}_3$  含量呈现低值,表明当时气候温暖湿润,夏季风强盛,降水丰富, $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类被淋溶并淀积在全新世早期过渡性黄土层( $L_t$ )中,从而导致全新世早期过渡性黄土( $L_t$ )层的  $\text{CaCO}_3$  含量呈现最高值。

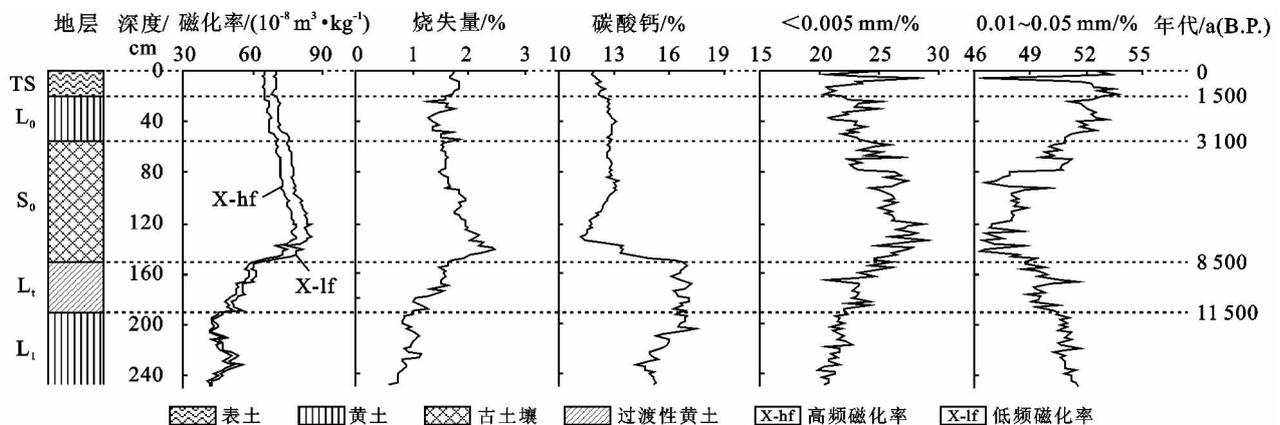


图 1 宁夏自治区长城塬剖面地层划分、磁化率、烧失量、碳酸钙、黏粒和粗粉沙曲线

黏粒( $<0.005 \text{ mm}$ )能够指示黄土土壤剖面中残积黏化作用的强度<sup>[18]</sup>。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,黏粒含量介于 19.73%~29.05%,其变化趋势与磁化率和烧失量变化趋势呈正相关,相关系数为 0.72 和 0.74,显著性水平为  $\alpha_{0.01}$ (图 1,表

2)。在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中,黏粒含量呈现高值,在各黄土层( $L_1, L_t, L_0$ )中,黏粒含量呈现低值。粗粉沙(0.01~0.05 mm)含量介于 46.13%~53.75%,其变化趋势与黏粒含量变化趋势呈负相关关系,相关系数为 -0.84,并与  $\text{CaCO}_3$  含量变化趋势呈

正相关关系, 相关系数为 0.15, 显著性水平为  $\alpha_{0.01}$  (图 1, 表 2)。

在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中, 该层的粗粉沙含量呈现低值, 在各黄土层( $L_1, L_t, L_0$ )中, 该层粗粉沙

含量呈现高值。这表明古土壤形成时期气候温暖湿润, 沙尘暴活动弱, 成壤过程中残积黏化作用强。在黄土堆积时期气候冷干, 沙尘暴活动频繁, 带来大量的粗颗粒物。

表 2 宁夏自治区长城塬剖面重金属元素与磁化率、烧失量、碳酸钙、黏粒、粗粉沙之间的相关系数

项目	Mn	Zn	Ni	Cu	Pb	V	Cr	磁化率	烧失量	碳酸钙	黏粒	粗粉沙
Mn	1	0.72**	0.65**	0.56**	0.09	0.41**	0.33**	0.49**	0.39**	-0.46**	0.54**	-0.65**
Zn		1	0.75**	0.76**	0.32**	0.34**	0.25**	0.34**	0.24**	-0.38**	0.48**	-0.58**
Ni			1	0.79**	-0.03	0.42**	0.04	0.20*	0.24**	-0.03	0.59**	-0.73**
Cu				1	0.14	0.44**	0.10	0.20*	0.23*	-0.13	0.43**	-0.59**
Pb					1	-0.18*	0.19*	-0.11	-0.36**	-0.29**	-0.26**	0.28**
V						1	0.04	0.08	0.12	0.09	0.25**	-0.44**
Cr							1	0.61**	0.50**	-0.66**	0.45**	-0.24**
磁化率								1	0.88**	-0.86**	0.72**	-0.43**
烧失量									1	-0.65**	0.74**	-0.50**
碳酸钙										1	-0.46**	0.15
黏粒											1	-0.84**
粗粉沙												1

注: \*\*表示显著性水平为 0.01, \*表示显著性水平 0.05, 未标注表示差异不显著。

### 3.2 重金属元素分析

第四纪地层和沉积物中重金属元素及其含量变化具有特定的古环境意义。因此, 重金属元素含量的变化对恢复古气候也是很好的代用指标<sup>[19-20]</sup>。

在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中, 选用 Mn, Zn, Ni, Cu, Pb, V, 和 Cr 这 7 个重金属元素进行分析(图 2)。在宁夏自治区长城塬剖面中, 各重金属元素变异系数很小, 分别为 0.02, 0.03, 0.03, 0.04, 0.08, 0.02 和 0.05。表明这些重金属元素在长城塬剖面上的分布相对稳定, 反映长城塬剖面不同时代的黄土物质成分具有均一的特征<sup>[21]</sup>。在剖面中, 这些元素含量在晚更新世马兰黄土层( $L_1$ )都呈现低值。但是, 它们的地球化学行为在上覆的全新世黄土土壤剖面中却不同。运用 SPSS 软件对宁夏自治区长城塬剖面样品进行相关性分析, 表明 Pb 的含量变化趋势与其他重金属元素含量变化趋势相比存有特殊性。

在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中, Mn 的含量介于 613.57~635.39 mg/kg, Zn 的含量介于 54.70~57.00 mg/kg, Ni 的含量介于 29.50~31.15 mg/kg, Cu 的含量介于 21.28~22.37 mg/kg。在元素的地球化学分类中, Mn 和 Ni 属铁族元素, Zn 和 Cu 是亲铜元素。但它们之间的相关系数非常大, 均呈正相关关系, 显著性水平为  $\alpha_{0.01}$ (表 2)。这是因为它们的离子半径相近, 都以类质同像的形式进入黄土的重矿物之中, 都易被黏土矿物吸附而富集。在黄土偏碱性和偏氧化性的介质环境中活性低, 并且都是

植物生长所必需的微量营养元素, 和生物活动有着密切的关系。有研究表明<sup>[21]</sup> 黄土中 Mn, Zn, Ni 和 Cu 具有稳定的组成比例, 并保持一种相对的稳定。在宁夏自治区 CCY 剖面中, Mn, Zn, Ni 和 Cu 含量变化趋势与磁化率、烧失量和黏粒含量变化趋势呈正相关关系, 而与  $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量变化趋势呈负相关关系, 显著性水平为  $\alpha_{0.01}$ (表 2)。在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中, Mn, Zn, Ni 和 Cu 含量呈现高值, 显然是由于当时气候暖湿, 降水丰富, 风化成壤作用和次生黏化作用强烈, 淋溶作用旺盛,  $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类淋失, 从而使它们相对富集。在全新世早期过渡性黄土层( $L_t$ )中, Mn, Zn, Ni 和 Cu 含量呈现低值, 甚至低于它们在晚更新世马兰黄土层( $L_1$ )中的含量。这是由于从全新世中期古土壤中淋失掉的  $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类在该层发生了淀积, 从而使它们的含量相对减少。在近代黄土层( $L_0$ )和现代表土层(TS)中, Mn, Zn, Ni 和 Cu 含量呈现低值, 也要低于它们在晚更新世马兰黄土中的含量, 并与陕西省长武县 ETC 剖面中 Mn, Zn, Ni 和 Cu 的分布规律一致<sup>[12-13]</sup>。这可能是频繁的沙尘暴活动, 加之人类活动的影响造成的。

在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中, V 的含量介于 80.31~80.72 mg/kg, Cr 的含量介于 72.19~79.09 mg/kg。V 和 Cr 都属铁族元素, 它们的地球化学性质有相似之处, 都具有亲氧性<sup>[21]</sup>。在宁夏自治区长城塬剖面中, V 和 Cr 的含量变化趋势都与黏粒含量变化趋势呈正相关, 与粗粉沙含量变化趋

势呈负相关,显著性水平为  $\alpha_{0.01}$  (表 2)。在全新世中期古土壤( $S_0$ )中,V 和 Cr 含量呈现高值,可见全新世中期古土壤成壤过程中,次生黏土矿物的增加是造成其相对富集主要因素。在各黄土层( $L_1, L_t, L_0$ )中,V 和 Cr 含量呈现低值,可见在黄土堆积时期气候冷干,沙尘暴活动频繁,风化成壤作用和次生黏化作用微弱。

在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,Pb 的含量介于 16.83~20.10 mg/kg(图 2)。在宁夏自治区 CCY 剖面中,Pb 的含量变化趋势与磁化率变化趋势无明显相关性,与黏粒和烧失量呈负相关关系,

却与粗粉沙呈正相关关系(表 2)。在全新世早期过渡性黄土层( $L_t$ )中,Pb 的含量呈现最低值,这是由于从全新世中期古土壤层( $S_0$ )中淋失掉的  $CaCO_3$  等易溶碳酸盐类在该层发生了淀积,极大的淡化了 Pb 的含量。在全新世中期古土壤层( $S_0$ )、近代黄土层( $L_0$ )和现代表土层(TS)含量相对较高,与晚更新世马兰黄土层( $L_1$ )中的含量相当,其含量变化很小。这主要是由于 Pb 元素主要包含在粗颗粒和重矿物之中,其化学性质比较稳定,具有强抗风化性,很少受到风化成壤作用的影响。

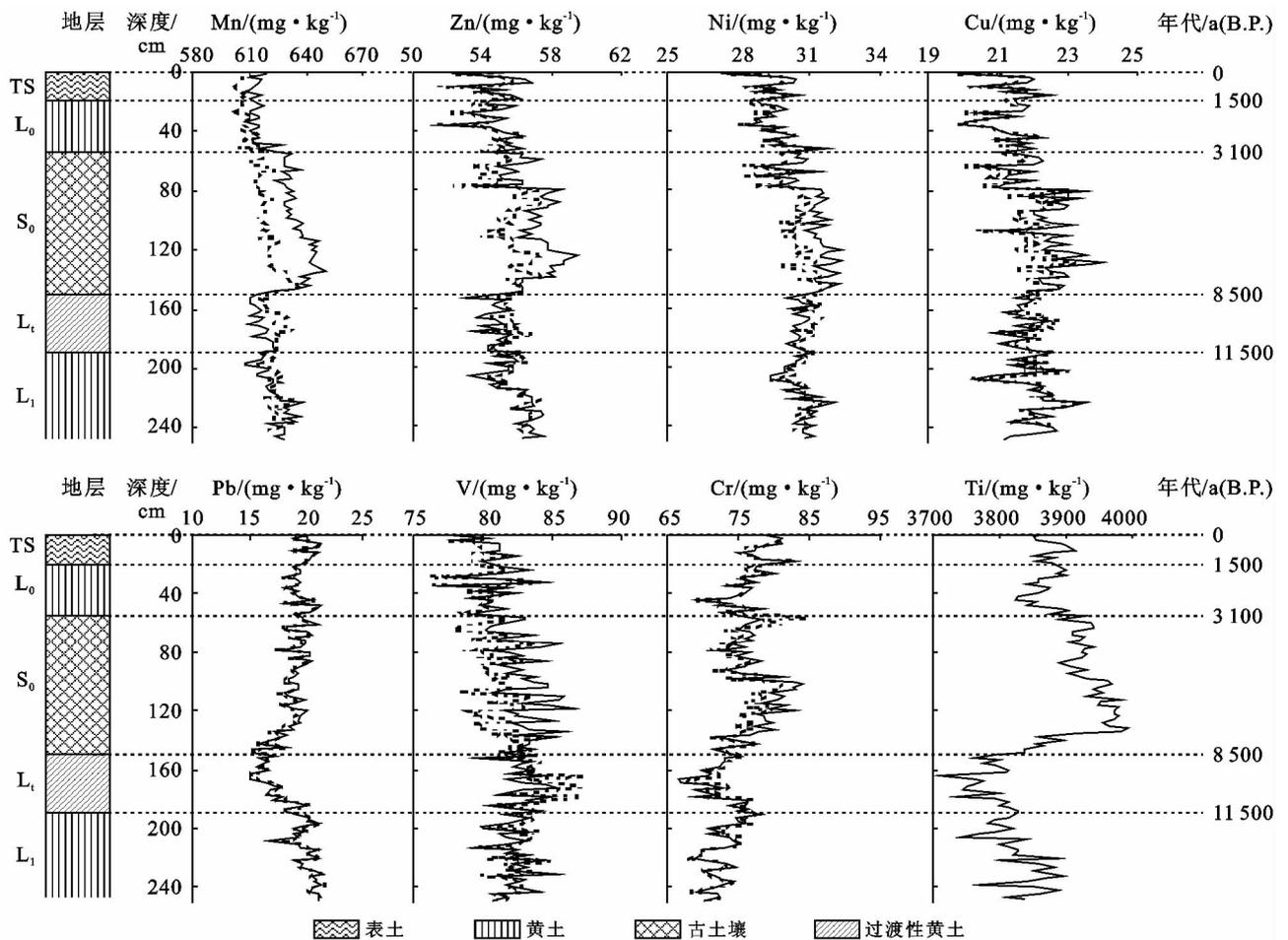


图 2 宁夏自治区长城塬剖面地层划分、重金属元素和 Ti 元素含量曲线

注:图中实线代表化学元素含量变化曲线;虚线代表用 Ti 元素含量标准化过的曲线,以减小  $CaCO_3$  等易溶碳酸盐类淋溶淀积作用的影响<sup>[22]</sup>。

### 4 结果讨论

在晚更新世时期,黄土高原地区堆积了马兰黄土( $L_1$ )。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,马兰黄土层的磁化率达到最低,且存在一个波谷。 $CaCO_3$  和粗粉沙含量高,烧失量和黏粒含量最小,反映出马兰黄土堆积时期,冬季风活动强盛,导致气候寒冷干燥,沙尘暴活动强烈,次生黏化作用微弱,风尘

堆积速率很大,粒度分选很好。黄土堆积为原生堆积物,因此马兰黄土中各项指标的含量可以作为评价全新世黄土土壤剖面形成过程中风化成壤环境变化的背景值。干冷的气候条件束缚了马兰黄土中元素的活动性,导致重金属元素 Mn,Zn,Ni,Cu,Pb,V 和 Cr 含量相对较低。

11 500—8 500 a B. P. 为全新世早期,发育了过渡性黄土层( $L_t$ )。在宁夏自治区长城塬全新世黄土

土壤剖面中,全新世早期过渡性黄土层中的磁化率、烧失量和黏粒含量逐渐增大,粗粉沙含量降低,这反映出全新世早期气候逐渐转暖,进入间冰期环境。随着气候的变暖,黄土高原地区沙尘暴活动减弱,粉尘堆积速率减小,粗粉沙含量降低,降雨量增加,植被得到恢复,开始出现微弱的成壤作用和次生黏化作用,土壤中铁磁性矿物含量增大。但是,在宁夏自治区长城塬剖面中,全新世早期过渡性黄土层中的  $\text{CaCO}_3$  含量呈现最高值,这是由于全新世中期古土壤层中的  $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类,在其强烈的风化成壤过程中,被淋溶并淀积在全新世早期过渡性黄土层中。从而导致重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, Pb, V, 和 Cr 含量相对减少。

8 500—3 100 a B. P. 为全新世中期大暖期,由于气候温暖湿润,发育了古土壤层( $S_0$ )。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,全新世中期古土壤层中的磁化率、烧失量和黏粒含量达到最大值, $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量明显减少。这表明沙尘暴活动减弱,东亚夏季风活动增强,粉尘堆积速率降低,风化成壤作用强烈,次生黏化作用使得土壤中黏粒含量增加。由东亚夏季风控制的降水的增加使得  $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类淋失强烈,从而淀积在全新世早期过渡性黄土层和晚更新世马兰黄土层中。而重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, V, 和 Cr 元素主要以残渣晶格态、铝铁锰氧化物结合态、有机结合态等形态存在于黄土土壤剖面中,且易于被有机质和黏粒吸附,发生络合、螯合作用,迁移性很小。同时,在全新世中期大暖期,东亚夏季风控制下的强烈的生物成壤改造作用使得土壤中的  $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类被迁移淋失,从而导致 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 含量相对富集。

3 100 a B. P. 至今为全新世晚期。3 100—1 500 a B. P. 东亚季风格局转变<sup>[23-24]</sup>,气候变得干冷,风化成壤作用衰退,古土壤发育停止,堆积了近代黄土层( $L_0$ )。在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,近代黄土层中的磁化率、烧失量和黏粒含量逐渐降低,粗粉沙和  $\text{CaCO}_3$  含量逐渐增加。这反映出在近代黄土堆积时期,冬季风变得强盛,沙尘暴活动频繁,降水减少,粉尘堆积速率增大,次生黏化作用减弱,土壤中有有机质含量减少, $\text{CaCO}_3$  等易溶碳酸盐类淋溶微弱,从而造成重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 含量相对下降。从 1 500 a B. P. 至今,全球气候得到改善,加之人类旱作农业耕作活动的影响,发育了现代代表土层(TS)。在宁夏自治区长城塬剖面中,20 cm 以上为现代代表土层。其接受了微弱的成壤改造作用和历史时期的耕作改造,土壤结构发生了变化,但是基

本上仍然表现为黄土的性质,所以,重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 在现代代表土层中的含量相对于近代黄土层中的含量变化很小

## 5 结论

(1) 在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,磁化率、烧失量、 $\text{CaCO}_3$  含量和粒度作为良好的气候代用指标,都呈现出有规律的变化。磁化率、烧失量和黏粒含量呈正相关,但它们与  $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量呈负相关。在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中,磁化率、烧失量和黏粒含量呈现高值, $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量呈现低值,表明全新世中期古土壤形成时期气候温暖湿润,粉尘堆积速率降低,风化成壤作用强烈,淋溶和黏化作用强。在各黄土层位( $L_1, L_t, L_0$ ),磁化率、烧失量和黏粒含量呈现低值, $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量呈现高值,表明黄土堆积期气候相对干冷,沙尘暴活动强烈,风尘堆积速率大,风化成壤作用弱,淋溶和黏化作用弱。

(2) 在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,重金属元素 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 的含量与各项气候代用指标之间均具有较好的相关性。大部分重金属元素与磁化率、烧失量和黏粒含量变化趋势呈正相关,并且与  $\text{CaCO}_3$  和粗粉沙含量变化趋势呈负相关关系。这些元素在全新世中期古土壤层( $S_0$ )中呈现高值,在各黄土层位( $L_1, L_t, L_0$ )呈现低值。这说明在黄土风化成壤过程中,这些重金属元素的含量变化趋势可以间接反映全新世以来的气候变化和成壤环境的变化。

(3) 在宁夏自治区长城塬全新世黄土土壤剖面中,重金属元素 Pb 的含量变化趋势与 Mn, Zn, Ni, Cu, V 和 Cr 的含量变化趋势相比存有特殊性。Pb 的含量变化趋势与磁化率变化趋势无相关性,与黏粒和烧失量呈负相关关系,却与粗粉沙呈正相关关系。说明 Pb 元素主要包含在粗颗粒和重矿物之中,其化学性质比较稳定,具有强抗风化性,很少受到风化成壤作用的影响。

### [ 参 考 文 献 ]

- [1] 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(3):131-136.
- [2] 刘爱华,杨忠芳,张本仁,等. 水稻土中 Hg, Cd, Pb 和 As 的空间变异性特征及相关影响因素探讨:以四川孝泉地区为例[J]. 第四纪研究,2005,5(3):396-403.
- [3] 路远发,杨红梅,周国华,等. 杭州市土壤铅污染的铅同位素示踪研究[J]. 第四纪研究,2005,25(3):355-362.
- [4] 曾希柏,李莲芳,梅旭荣. 中国蔬菜土壤重金属含量及来

- 源分析[J]. 中国农业科学, 2007, 40(11): 2507-2517.
- [5] 郑国璋. 关中黄土剖面中重金属元素的垂直分布规律研究[J]. 地球学报, 2008, 29(8): 109-115.
- [6] 陈富荣, 陈永宁, 贾十军, 等. 合肥市土壤重金属元素异常及其生态效应[J]. 岩矿测试, 2007, 26(4): 275-280.
- [7] Zhou Shenglu, Liao Fuqiang, Wu Shaohua, et al. Heavy metals contents in soil profiles of typical agricultural lands in Yixing, Jiangsu Province, China[J]. Chinese Science Bulletin, 2008, 53(S1): 177-187.
- [8] Jun Dai, Thierry B, James H R, et al. Influence of heavy metals on C and N mineralisation and microbial biomass in Zn-, Pb-, Cu-, and Cd-contaminated soils[J]. Applied Soil Ecology, 2004, 25(2): 99-109.
- [9] 何忠, 黄春长, 庞奖励, 等. 淮河上游全新世黄土—土壤剖面重金属元素分布与环境变化[J]. 环境科学, 2006, 27(7): 1323-1328.
- [10] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Chen Shue, et al. Charcoal records of the fire history in the Holocene loess-soil sequences over the southern Loess Plateau of China[J]. Palaeogeography Palaeoecology Palaeoclimatology, 2006, 239(1/2): 28-44.
- [11] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Zhou Qunqing, et al. Holocene pedogenic change and the emergence and decline of rain-fed cereal agriculture on the Chinese Loess Plateau[J]. Quaternary Science Reviews, 2004, 23(23/24): 2529-2539.
- [12] Huang Chunchang, Jia Yaofeng, Pang Jiangli, et al. Holocene colluviation and its implications for tracing human-induced soil erosion and redeposition on the piedmont loess lands of the Qinling Mountains, Northern China[J]. Geoderma, 2006, 136(3/4): 838-851.
- [13] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Su Hongxia, et al. The Ustic Isohumisol(Chernozem) distributed over the Chinese Loess Plateau: Modern soil or palaeosol? [J] Geoderma, 2009, 150(3/4): 344-358.
- [14] Huang Chunchang, Zhao Shichao, Pang Jiangli, et al. Climatic aridity and the relocations of the Zhou Culture in the Southern Loess Plateau of China[J]. Climatic Change, 2003, 61(3): 361-378.
- [15] Huang Chunchang, Pang Jiangli, Chen Shue, et al. Holocene dust accumulation and the formation of polycyclic cinnamon soils in the Chinese Loess Plateau[J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2003, 28(12): 1259-1270.
- [16] 隋玉柱. 黄土不同指标的古环境意义探讨[J]. 中国沙漠, 2006, 26(1): 14-19.
- [17] 郭玉文, 加藤 诚, 宋菲, 等. 黄土高原黄土团粒组成及其与碳酸钙关系的研究[J]. 土壤学报, 2004, 41(3): 362-368.
- [18] 查小春, 黄春长, 庞奖励. 关中东部缓坡地面全新世土壤侵蚀与沉积发展演变规律研究[J]. 生态环境, 2005, 14(1): 52-56.
- [19] 高尚玉, 董光荣, 李保生, 等. 萨拉乌苏河第四纪地层中化学元素的迁移和聚集与古气候的关系[J]. 地球化学, 1985(3): 269-276.
- [20] 李铮华, 王玉海. 黄土沉积的地球化学记录与古气候演化[J]. 海洋地质与第四纪地质, 1998, 18(2): 41-47.
- [21] 文启忠. 中国黄土地球化学[M]. 北京: 科学出版社, 1989.
- [22] Bloemendal J, Liu Xiuming, Sun youbin, et al. An assessment of magnetic and geochemical indicators of weathering and pedogenesis at two contrasting sites on the Chinese Loess Plateau [J]. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology, 2008, 257(1/2): 152-168.
- [23] 施雅风, 孔昭宸, 王苏民, 等. 中国全新世大暖期的气候波动与重要事件[J]. 中国科学(B辑): 化学, 1992, 22(12): 1300-1308.
- [24] 黄春长, 庞奖励, 陈宝群, 等. 渭河流域先周一西周时代环境和水土资源退化及其社会影响[J]. 第四纪研究, 2003, 23(4): 404-414.