

黄土高原白水縣不同种植年限苹果园 土壤重金属含量特征与风险评价

董红梅¹, 赵景波², 宋友桂³, 刘慧芳³

(1.西安科技大学 管理学院, 西安 710054; 2.陕西师范大学 地理科学与旅游学院,
西安 710119; 3.中国科学院 地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

摘要:为研究不同种植年限苹果园土壤中的重金属元素分布特点,评价其污染现状和风险。以黄土高原陕西省白水縣果园土壤为研究对象,利用电感耦合等离子质谱法方法对 5 种不同年龄(5 年、10 年、15 年、20 年和 25 年)苹果园土壤和现代农田土壤以及自然土壤的重金属含量状况进行了测量,并结合单因子污染指数和内梅罗多因子综合指数评价法开展重金属污染风险评估。结果表明 Cr、Ni、As、Pb、Hg 等元素的平均含量在农田土壤中比苹果园土壤中的高,这些重金属元素在农田土壤中更容易富集;而在苹果园土壤中,Ni、Cu、As、Hg 等的平均含量在 25 年苹果园土壤中相对高于其他年龄苹果园土壤;从综合污染指数看,农田土壤中最高,苹果园土壤中则是随着种植年限的增加而增大。由此说明随着种植年限增加,苹果园土壤中重金属的富集会逐渐显现。但是,以无公害果园和绿色食品产地土壤环境质量为标准,白水土壤完全符合无公害和绿色食品产地对土壤环境的要求。

关键词:苹果园土壤; 种植年限; 重金属含量; 风险评价; 黄土高原

中图分类号:X825; X53

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2021)05-0205-07

Characteristics and Risk Assessment of Heavy Metal Content in Soils of Apple Orchard with Different Cultivating Years in Baishui County on the Loess Plateau

DONG Hongmei¹, ZHAO Jingbo², SONG Yougui³, LIU Huifang³

(1.School of Management, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China;

2.School of Geography and Tourism, Shaanxi Normal University, Xi'an 710119, China; 3.State Key Laboratory of
Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

Abstract: In order to study enrichment characteristics of heavy metal elements of soils from different cultivating years apple orchard and evaluate their heavy metal pollution risk, we employed inductively coupled plasma mass spectrometry (ICP-MS) method to determine the heavy metal contents of soils of apple orchards with 5 different cultivating years (5 a, 10 a, 15 a, 20 a, and 25 a) and soil in modern farmland from Baishui County in the Loess Plateau, and used the single-factor pollution index (P_i) and Nemerow multi-factor comprehensive index (NCI) to evaluate heavy metal pollution risk. The results show that the average contents of Cr, Ni, As, Pb, Hg in soil of farmland is higher than those in soil of apple orchard, suggesting that these heavy metal elements are more likely to be enriched in soil of farmland. The average contents of Ni, Cu, As, Hg in soil of the 25-year apple orchard are relatively higher than those of soils in the other apple orchards, indicating the accumulation of heavy metals in soil of the apple orchard increases with the increase of cultivating years. From the perspective of the comprehensive pollution index, the soil of farmland is the highest, while the index of soil in apple orchard increases with the increase of cultivating years. Pollution risk based on

收稿日期:2020-10-25

修回日期:2020-11-12

资助项目:中国地质调查局西安地质调查中心项目“大西安重要环境地质问题调查”([2019]057);中国科学院重点部署项目“黄土高原及周边沙地近代生态环境的演变与可持续发展性”(KZZD-EW-04)

第一作者:董红梅(1973—),女,山西平陆人,博士,副教授,主要从事区域环境、旅游管理与资源开发的研究。E-mail:donghm1230@163.com

pollution indexes P_i and NCI suggests that the soils of the apple orchards can meet the heavy metal quality standard of pollution-free fruit and green food production.

Keywords: soil in apple orchard; cultivating years; heavy metal content; risk assessment; Loess Plateau

随着社会经济的发展和人民生活水平的提高,大众对食品质量安全的要求不断提高,对粮食、蔬菜、水果的生产环境安全性越来越关注,无公害食品和绿色食品越来越为大众重视。近年来,作为农业生产载体的土壤重金属污染日渐突出,这不但导致土壤肥力退化,降低农产品的产量和品质,而且严重影响了人类健康和环境安全^[1-3]。其中土壤重金属污染及其危害、风险评估已成为环境科学领域研究的热点问题^[4-8]。土壤环境质量是果品安全生产的基础和保障,其直接影响果树的生长、结果和果品质量^[3,9-13],无公害果园和绿色食品产地环境质量评价越来越受到重视。

苹果作为大众果品,其生产环境和质量安全性已引起了学者、政府和消费者的广泛关注。黄土高原是中国乃至世界优质苹果生产基地之一,有着悠久的种植历史,尤其是改革开放以来大规模的种植为地方经济发展做出重要贡献。随着工业、农业和交通运输业迅速发展,环境污染的加剧,土壤环境中的有害重金属(如 Hg, Cd, Pb, Cr 和 As 等)不断增加,直接影响到果品质量安全^[14-17]。同时,多年种植造成果园土壤质量下降问题已成为威胁果品生产的一个重要问题^[12,18-20]。随着黄土高原绿色食品苹果生产和生态建设的需要,全面、系统地调查与评价苹果生产基地不同种植年限果园土壤重金属含量及其污染现状成为一项迫切需要的基础性工作^[21-23]。白水作为陕西主要苹果产区,其土壤环境已受到了重金属元素的污染与威胁^[24-25],探讨不同种植年龄苹果园土壤中的重金属元素分布特点,评价其污染现状,可为苹果园土壤质量的改善、重金属污染防治和修复以及绿色食品生产提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

白水县处于关中平原与陕北黄土高原的过渡地带,属黄土高原沟壑区,为暖温带大陆性气候,年均气温 11.6℃,年均降水量 598.2 mm,日照时数 2 309.5 h,雨热同季,无霜期长,光照充足,昼夜温差大,是国内外公认的世界苹果最佳优生区(其与日本富士产区基本处于同一纬度线)。在苹果生长季白水县的昼夜温差 8~12℃,生长期(4—9月)降水占年降水量的 70%~

80%。苹果的正常生长要求年日照时数 $\geq 1\ 500$ h,最适宜为 2 200~2 800 h,因此白水县的气候条件完全符合苹果生长的指标要求^[26]。白水县森林覆盖率为 28.8%,植被覆盖度为 36.3%,主要为多年生草本植物和灌木,少量乔木林和以苹果为主的经济林。境内土壤多属黄土母质,主要有褐土、娄土、黄土、红土等 7 个土类,质地良好,以轻壤和中壤为主。

白水苹果栽植距今已有 400 余年的历史,最早可以追溯到西汉,到明朝晚期白水苹果推广到中原大地,成为皇宫的贡品,但由于社会因素制约,面积甚微,至解放前夕,全县苹果面积仅存有 1.933 hm²。解放后,苹果种植发展较快。经历了 60 年代的探索起步,70 年代大发展,80 年代出名、90 年代上规模,实现了新的飞跃等几个阶段后,白水县赢得了“中国苹果之乡”之称号^[27],成为中国西北黄土高原苹果产区的中心地带,全县苹果栽植面积达 3.67 万 hm²。

1.2 样品的采集与分析

本研究以白水县史官镇北部优质苹果林地(35°24'N, 109°38'E, 870 m)为研究对象,分别选择 5 a, 10 a, 15 a, 20 a 和 25 a 苹果林地进行钻孔取样,同时也采集同一塬面农田轮作地(小麦/玉米地)和自然土壤(未耕作)作对比研究,其中上部 0—30 cm 采样间距为 5 cm, 30 cm 以下至 300 cm 采样间距为 10 cm。样品采集后封装,带回实验室进行自然风干,然后进行前处理分析测试。

1.2.1 样品指标测定 重金属元素分析采用沉积物样品酸溶方法进行处理,首先准确称取 40 mg 样品于 PTFE 内罐中,加入 0.6 ml 的 HNO₃, 2 ml 的 HF (Hg 仅为 2 ml 的 HNO₃)封盖静置后,放入防腐高效溶样罐,扣合拧紧,在防腐烘箱内 150℃ 消解 12 h 后冷却。然后,取出放入防腐高效溶样 PTFE 内罐,加入 1 ml 的 HNO₃于 120℃ 防腐电热板上敞开蒸酸至半干,再加入 1 ml 的 HNO₃, 1 ml 的 H₂O 后,密闭放入防腐烘箱 150℃ 回溶 12 h 后冷却,转移到聚酯瓶内,用高纯 H₂O 定容至 40 g,最后使用美国 Perkin Elmer 公司生产的 Elan DRC II 型号的电感耦合等离子质谱法(ICP-MS)进行测试。

1.2.2 土壤重金属污染评价方法 本文的土壤环境质量评价采用单因子污染指数评价法和内梅罗多因

子综合指数^[28]评价法。

单因子污染指数法是评价土壤中某一重金属污染程度的重要方法。其计算公式如下：

$$P_i=C_i/S_i \tag{1}$$

式中： P_i 为污染物 i 的污染指数； C_i 为土壤污染物 i 的实际测量浓度； S_i 为污染物 i 的评价标准。当 $P_i \leq 1$ 时，表示土壤未受污染； $P_i > 1$ 时，表示土壤已受污染，且 P_i 值越大表示污染越严重。

同时，为了更好地反映土壤的污染情况，在单因子污染指数小于 1 的情况下，需要对不同地点的土壤污染综合状况进行分析，目前应用较多的综合污染指数是内梅罗指数，它是一种兼顾极值或称突出最大值的计权型多因子环境质量指数。其计算公式如下：

$$P_{综}=\{[(C_i/S_i)_{max}^2+(C_i/S_i)_{ave}^2]/2\}^{1/2} \tag{2}$$

式中： $P_{综}$ 为综合污染指数； $(C_i/S_i)_{max}$ 为土壤重金属元素中污染指数最大值。 $(C_i/S_i)_{ave}$ 为土壤各污染指数的平均值。其评价结果分级标准为： $P_{综} < 0.7$ 表示土壤清洁安全。 $0.7 < P_{综} \leq 1$ 表示土壤尚清洁，处于警戒线。 $1 < P_{综} \leq 2$ 表示土壤轻度污染，其作物开始受到污染。 $2 < P_{综} \leq 3$ 表示土壤中度污染，作物受中度污染。 $P_{综} > 3$ 表示土壤重度污染，作物污染严重。

表 1 陕西白水苹果园地和农田土壤重金属元素含量特征与标准差 mg/kg

| 类型 | 参数 | Cr | Zn | Ni | Cu | Pb | As | Cd | Hg |
|----------|------|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-----------|-----------|
| 自然 | 变化范围 | 61.29~96.12 | 61.63~83.71 | 27.32~41.48 | 25.32~36.17 | 19.35~27.89 | 9.9~14.5 | 0.25~0.34 | 0.04~0.08 |
| | 平均值 | 78.05 | 72.85 | 33.64 | 30.41 | 23.75 | 11.52 | 0.297 | 0.051 |
| | 标准差 | 9.37 | 5.40 | 3.21 | 2.85 | 2.25 | 1.01 | 0.023 | 0.010 |
| 5 年苹果林地 | 变化范围 | 68.43~80.13 | 65.53~76.65 | 29.6~40.72 | 26.47~32.05 | 20.98~25.33 | 10.13~12.32 | 0.24~0.37 | 0.02~0.08 |
| | 平均值 | 73.43 | 71.72 | 32.34 | 29.82 | 23.11 | 11.25 | 0.295 | 0.043 |
| | 标准差 | 2.76 | 2.97 | 2.05 | 1.36 | 1.06 | 0.47 | 0.029 | 0.012 |
| 10 年苹果林地 | 变化范围 | 68.43~80.13 | 65.53~76.65 | 29.6~40.72 | 26.47~32.05 | 20.98~25.33 | 10.13~12.32 | 0.24~0.37 | 0.02~0.08 |
| | 平均值 | 73.43 | 71.72 | 32.34 | 29.82 | 23.11 | 11.25 | 0.295 | 0.043 |
| | 标准差 | 2.76 | 2.97 | 2.05 | 1.36 | 1.06 | 0.47 | 0.029 | 0.012 |
| 15 年苹果林地 | 变化范围 | 62.92~90.74 | 65.89~82.02 | 29.29~38.09 | 27.39~34.8 | 20.62~26.89 | 9.89~14.05 | 0.25~0.35 | 0.02~0.06 |
| | 平均值 | 73.66 | 72.93 | 32.07 | 29.99 | 23.13 | 11.23 | 0.296 | 0.040 |
| | 标准差 | 7.50 | 4.48 | 2.27 | 1.94 | 1.63 | 0.99 | 0.025 | 0.009 |
| 20 年苹果林地 | 变化范围 | 66.83~93.65 | 66.86~97.17 | 29.3~37.21 | 27.31~40.26 | 20.18~28.62 | 9.2~12.25 | 0.24~0.36 | 0.03~0.11 |
| | 平均值 | 78.12 | 75.73 | 32.04 | 31.14 | 23.68 | 11.00 | 0.289 | 0.055 |
| | 标准差 | 7.59 | 8.04 | 1.94 | 3.32 | 2.26 | 0.62 | 0.032 | 0.018 |
| 25 年苹果林地 | 变化范围 | 64.75~96.22 | 65.69~90.08 | 29.19~42.05 | 27.04~66.12 | 20.81~29.52 | 10.18~16.21 | 0.23~0.35 | 0.04~0.12 |
| | 平均值 | 74.33 | 73.42 | 32.54 | 35.28 | 23.39 | 11.58 | 0.297 | 0.057 |
| | 标准差 | 8.00 | 5.28 | 2.87 | 10.63 | 1.95 | 1.25 | 0.026 | 0.013 |
| 农田 | 变化范围 | 65.47~111.17 | 65.66~92.67 | 29.64~44.41 | 27.11~39.73 | 20.94~30.09 | 9.85~15.89 | 0.24~0.36 | 0.04~0.15 |
| | 平均值 | 79.16 | 75.48 | 33.55 | 31.23 | 24.07 | 11.70 | 0.295 | 0.060 |
| | 标准差 | 11.86 | 6.35 | 3.60 | 3.18 | 2.49 | 1.52 | 0.032 | 0.025 |

Cr, Ni, As, Pb, Hg 等的平均含量在农田土壤中较苹果园土壤中普遍较高(表 1), 指示这些重金属元素在农田土壤中比苹果园土壤中更容易富集, 这在一定程度上说明白水苹果园比耕地在农药、化肥使用上有严格的要求和限制。在苹果种植的早期(5 a 内)土壤中 Cr, Ni, Zn, As 平均含量低于自然剖面土壤中的含量, 说明在早期苹果树对某些重金属有一定的吸附作用^[16, 29-30]。Cr, Ni, Zn, Cu, As, Hg 等的平均含量随着种植年限的增加呈微弱的上升趋势, 在 20 a, 25 a 苹果园土壤中其含量相对较高, 说明随着种植年限的增加苹果园土壤中重金属元素的含量会呈现出一定的累积趋势。

2.2 重金属含量标准差变化特征

标准差是衡量研究样本波动大小的量。一方面, 土壤剖面中某一元素含量的标准差越大说明这一元素的波动越大, 反之则越小。另一方面, 同一元素在同一地区不同土壤剖面中含量的标准差差别大小也可以反映土壤环境受人为干扰的程度。一般情况下, 同一地区的土壤在不受任何人为因素干扰的情况下, 不同剖面的土壤重金属元素含量的标准差差别应该很小; 反之, 标准差差别可能较大。在此主要根据同一地区不同的土壤剖面重金属含量的标准差的差别大小来判断土壤中重金属是否受人为作用的影响。一般来说, 某重金属含量在不同土壤剖面的标准差差别越大, 说明该重金属元素有人为输入的可能性越大; 相反, 越小则说明该重金属元素的含量主要是受自然因素控制。Cr, Cu, As, Zn 等元素含量的标准差在不同土壤剖面中的差别很大(表 1), 说明所研究的土壤中可能有些已表现出一定的 Cr, Cu, As, Zn 等元素的人为输入。Ni, Cd, Hg, Pb 等元素含量的标准差在不同土壤间的差别较小。Cr, Zn 含量的标准差在农田, 5 a, 25 a, 20 a 及 15 a 苹果园土壤中比较大, 说明这些土壤可能有 Cr, Zn 的人为累积。Cu 元素含量的标准差在 25 a 苹果园土壤中最大, 而在其余土壤中差别不大, 指示 25 a 苹果园土壤中可能出现 Cu 元素的人为累积。As 元素含量的标准差在农田、25 a 苹果园及 5 a 苹果园土壤中较大, 同样说明这些土壤中可能有 As 元素的人为累积。

重金属的来源研究中相关性分析是一种常用的判定方法。一般相关系数较高的重金属可能具有相似的来源途径或者经历相同的迁移转化过程^[31-32], 这一来源可能来自天然即地球化学来源, 相关系数较低或者呈现负相关的表示来源不一样, 除母质影响

外, 还可能是人为活动造成的复合污染所致。在自然地中 Cr 与 Ni, Cu, Pb, Zn 之间存在显著的正相关关系($p < 0.05$, 相关系数均大于 0.8), 指示相同的来源; Cd 和 Hg 与其他重金属之间不存在显著的关系, 表明其来源具有多样性。但在苹果地的重金属元素相关性显著变弱, 说明人为来源的影响。而在农田中最明显的一个变化是 As 与 Cr, Ni, Pb 和 Zn 从弱相关到显著相关, 是人为原因增加还是其他原因有待进一步研究。

2.3 陕西白水苹果园土壤重金属污染评价

2.3.1 无公害果园产地土壤重金属污染评价 重金属元素主要富集在土壤表层 0—30 cm 的深度, 所以计算白水苹果园土壤重金属污染指数时选择了 30 cm 以上的层段。以土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB15618-2018)的风险筛选值作为无公害果园土壤的评价标准, 将陕西白水苹果园土壤重金属含量代入公式(1—2), 得到了不同种植年限苹果园土壤和农田土壤表层重金属单项污染指数 P_i 和综合污染指数 $P_{\text{综}}$ (表 2)。由表 2 中的污染指数可知, 在研究的 6 个土壤剖面中, 8 种重金属元素的单项污染指数均小于 1, 综合污染指数都小于 0.7, 说明陕西白水土壤中重金属含量水平都符合我国无公害果园产地土壤环境的要求。

从单项污染指数在 5—30 cm 层段从上向下的变化来看, Cr, Ni, Cu, Zn, As 等元素的单项污染指数在 5 a, 10 a, 15 a, 20 a 苹果园土壤和农田土壤中的变化规律不明显。Ni, Cu, Zn, As 等元素在 25 a 苹果园土壤表层中均呈现一定的减小趋势。Pb, Hg 元素的单项污染指数在研究的 6 类土壤中相对稳定或变化规律不明显。从平均值看, Cr, Ni, Cu, Zn, As, Ni 元素的单项污染指数总体上随种植年限增加而呈逐渐(微弱)增加的特点。

Pb, Hg 元素的单项污染指数随着种植年限增加没有表现出明显的变化趋势。这说明随着果树种植年限的增加, 表层土壤中 Cr, Ni, Cu, Zn, As 等元素的富集和累积逐渐显现, 而且在种植年限长的 25 a 苹果园土壤中还明显存在着由表向下减小的特点。相比较而言, 农田土壤中的 Cr, Ni, Cu, Zn, As 等元素的单项污染指数与 25 a 苹果园土壤相当, 而 Hg 元素的单项污染指数要远高于其他的苹果园土壤, 这说明农田表层土壤有明显的 Cr, Ni, Cu, Zn, As 和 Hg 等元素的累积。

从综合污染指数的平均值看, 农田土壤中最高,

为0.43,而不同种植年限苹果园土壤中具有随种植年限增加而增加的特点。由此可知,白水苹果园土壤虽然没有表现出明显的重金属污染,但是随着种植年限增加,表层土壤中Cr, Ni, Cu, Zn, As等元素累积现象已经出现,若不采取有效的控制与防治措施而继续种植,年限长的果园土壤中终会表现出重金属污染。

2.3.2 绿色食品产地土壤重金属污染评价 以中国绿色食品产地土壤重金属含量标准(NY/T391-2000)为评价标准,同理计算出5种年限苹果园土壤和农田土壤重金属单项污染指数 P_i 和综合污染指数 $P_{综}$ (表3)。

从表3中的重金属元素的单项污染指数看,农田及5种年限苹果园土壤中的重金属污染程度均是

$Cr>As>Pb>Cu>Hg$ 。所有土壤中的重金属元素的单项污染指数都小于1,说明陕西白水苹果园土壤中的这些重金属元素含量都没有超过绿色食品产地土壤环境质量对重金属含量的限值。从综合污染指数看,不同种植年限苹果园土壤和农田土壤重金属的综合污染指数都在0.7以下,说明白水苹果园土壤环境的重金属含量也没有达到污染的水平,其土壤重金属综合污染程度呈现25 a苹果园>20 a苹果园>15 a苹果园>10 a苹果园>5 a苹果园,而农田土壤的重金属综合污染程度与25 a苹果园的相当,与以无公害果园产地土壤环境质量为标准评价的结果相一致。

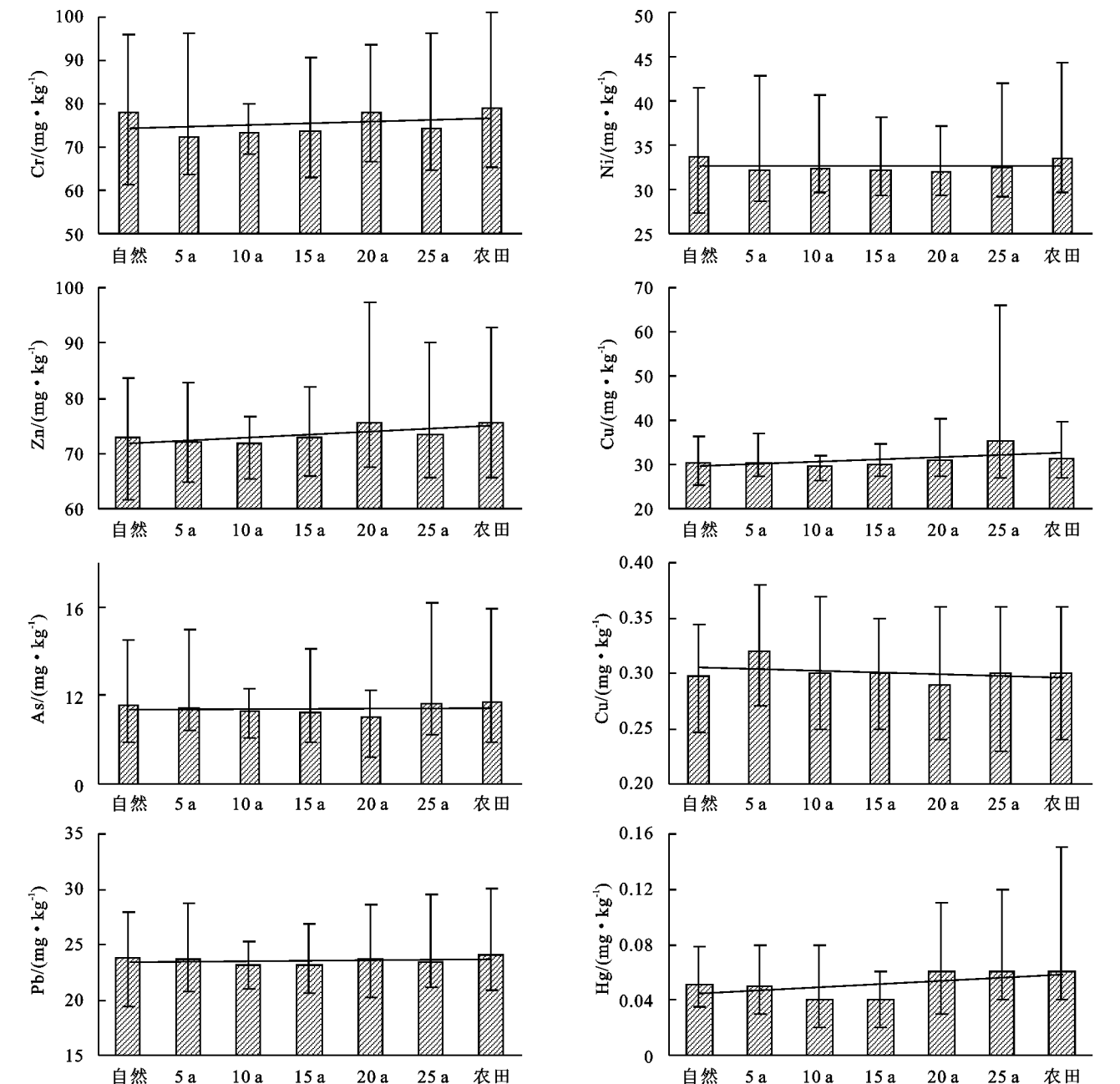


图1 陕西白水自然地、不同种植年限苹果园地和农田土壤重金属元素的含量变化特征

表 2 陕西白水无公害果园产地土壤重金属污染指数

| 土壤类型 | 指数 | P_i | | | | | | | $P_{\text{综}}$ |
|-----------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| | | Cr | Ni | Cu | Zn | As | Pb | Hg | |
| 农田 | 变化范围 | 0.3~0.34 | 0.53~0.56 | 0.15~0.16 | 0.24~0.26 | 0.44~0.46 | 0.07~0.08 | 0.06~0.15 | 0.42~0.44 |
| | 均值 | 0.32 | 0.54 | 0.16 | 0.25 | 0.46 | 0.07 | 0.1 | 0.43 |
| 5 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.27~0.29 | 0.49~0.52 | 0.14~0.15 | 0.24~0.25 | 0.42~0.45 | 0.07~0.07 | 0.03~0.05 | 0.39~0.41 |
| | 均值 | 0.28 | 0.5 | 0.14 | 0.24 | 0.43 | 0.07 | 0.05 | 0.39 |
| 10 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.28~0.3 | 0.49~0.52 | 0.14~0.15 | 0.23~0.24 | 0.42~0.45 | 0.07~0.07 | 0.02~0.08 | 0.39~0.41 |
| | 均值 | 0.29 | 0.51 | 0.14 | 0.23 | 0.43 | 0.07 | 0.04 | 0.4 |
| 15 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.31~0.32 | 0.49~0.51 | 0.14~0.15 | 0.23~0.25 | 0.43~0.45 | 0.07~0.07 | 0.03~0.05 | 0.39~0.41 |
| | 均值 | 0.31 | 0.5 | 0.14 | 0.24 | 0.44 | 0.07 | 0.04 | 0.4 |
| 20 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.3~0.33 | 0.5~0.54 | 0.15~0.16 | 0.23~0.25 | 0.43~0.46 | 0.06~0.07 | 0.03~0.04 | 0.39~0.43 |
| | 均值 | 0.31 | 0.52 | 0.15 | 0.24 | 0.45 | 0.07 | 0.04 | 0.41 |
| 25 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.3~0.36 | 0.52~0.6 | 0.24~0.43 | 0.25~0.27 | 0.45~0.5 | 0.07~0.07 | 0.05~0.07 | 0.42~0.48 |
| | 均值 | 0.33 | 0.54 | 0.26 | 0.25 | 0.47 | 0.07 | 0.05 | 0.44 |

表 3 陕西白水绿色食品产地土壤重金属污染指数

| 土壤类型 | 指标 | P_i | | | | | $P_{\text{综}}$ |
|-----------|------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|----------------|
| | | Cr | Cu | As | Pb | Hg | |
| 农田 | 变化范围 | 0.63~0.7 | 0.25~0.26 | 0.56~0.58 | 0.5~0.53 | 0.16~0.43 | 0.55~0.6 |
| | 均值 | 0.67 | 0.26 | 0.57 | 0.52 | 0.3 | 0.58 |
| 5 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.57~0.61 | 0.23~0.25 | 0.52~0.57 | 0.49~0.51 | 0.09~0.15 | 0.49~0.52 |
| | 均值 | 0.58 | 0.24 | 0.54 | 0.5 | 0.13 | 0.5 |
| 10 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.59~0.63 | 0.24~0.25 | 0.53~0.57 | 0.46~0.51 | 0.07~0.22 | 0.51~0.53 |
| | 均值 | 0.61 | 0.24 | 0.54 | 0.49 | 0.13 | 0.52 |
| 15 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.64~0.66 | 0.24~0.25 | 0.54~0.57 | 0.47~0.52 | 0.1~0.15 | 0.53~0.55 |
| | 均值 | 0.65 | 0.24 | 0.56 | 0.49 | 0.12 | 0.54 |
| 20 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.63~0.69 | 0.24~0.26 | 0.54~0.58 | 0.45~0.5 | 0.09~0.12 | 0.53~0.58 |
| | 均值 | 0.65 | 0.25 | 0.56 | 0.48 | 0.11 | 0.54 |
| 25 a 苹果林地 | 变化范围 | 0.63~0.75 | 0.39~0.72 | 0.57~0.62 | 0.49~0.52 | 0.13~0.21 | 0.54~0.63 |
| | 均值 | 0.67 | 0.49 | 0.6 | 0.5 | 0.15 | 0.58 |

4 结 论

陕西白水果园土壤重金属含量随着不同种植年龄而不同。Cr、Ni、As、Pb、Hg 等元素在农田土壤 中比苹果园土壤中更容易富集。在苹果园土壤中，Ni、 Cu、As、Hg 等的平均含量随着种植年限增加而增大。 从综合污染指数看，农田土壤中最高，苹果园土壤中 则是随着种植年限的增加而增大，这说明随着种植年 限增加，重金属综合污染水平增高。

陕西白水苹果园和农田土壤中的 Cr、Ni、Cu、Zn、 As、Pb、Hg 等重金属元素的单项污染指数都小于 1，综 合污染指数小于 0.7，说明陕西白水苹果园土壤中的重 金属含量没有超标，完全符合我国无公害果园产地和绿 色食品产地对土壤环境的要求。白水苹果园土壤虽然 没有表现出明显的重金属污染，但是随着种植年限增 加，表层土壤中 Cr、Ni、Cu、Zn、As 等元素累积已经出现， 若不采取有效的控制与防治措施而继续种植，年限长 的果园土壤中终会表现出重金属污染风险。

参考文献：

[1] Huang H, Luo L, Huang L, et al. Effect of manure compost on distribution of Cu and Zn in rhizosphere soil and heavy metal accumulation by Brassica juncea[J]. Water, Air, & Soil Pollution, 2020,231(5):1-10.

[2] Guo J, Yue T, Li X, et al. Heavy metal levels in kiwifruit orchard soils and trees and its potential health risk assessment in Shaanxi, China[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2016,23(14):14560-14566.

[3] Li Q, Li C, Wang H, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in soil and blueberries of the core majiang blueberry production area[J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 2021,106(1):57-64.

[4] Sun Y, Li H, Guo G, et al. Soil contamination in China: Current priorities, defining background levels and standards for heavy metals[J]. Journal of Environmental Management, 2019,251, <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2019.109512>.

[5] Zhang Y, Wu F, Zhang X, et al. Pollution characteris-

- tics and ecological risk assessment of heavy metals in three land-use types on the southern Loess Plateau, China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2017,189(9):1-14.
- [6] Mirzaei M, Marofi S, Solgi E, et al. Ecological and health risks of soil and grape heavy metals in long-term fertilized vineyards(Chaharmahal and Bakhtiari province of Iran)[J]. *Environmental Geochemistry and Health*, 2020,42(1):27-43.
- [7] 张家春,曾宪平,张珍明,等.喀斯特林地土壤重金属形态特征及其评价[J].*水土保持研究*,2019,26(6):347-352,358.
- [8] 陈为峰,孙其远,宋希亮,等.不同城市功能区绿地土壤重金属分布及其生态风险评价[J].*水土保持研究*,2019,26(3):148-153.
- [9] Wang Q, Liu J, Cheng S. Heavy metals in apple orchard soils and fruits and their health risks in Liaodong Peninsula, Northeast China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015,187(1):1-8.
- [10] Yan M, Ding X, Lei J, et al. Potential ecological and health risk assessment of different kiwifruit orchards in Qianjiang district, Chongqing city, China[J]. *Environmental Science and Pollution Research*, 2021,28(3):3088-3105.
- [11] 陈召亚,刘会玲,张新星,等.不同种植年限温室土壤中铜、铅垂直分布特征[J].*水土保持学报*,2016,30(1):321-325.
- [12] Li Q, Li C, Wang H, et al. Geochemical characteristics of heavy metals in soil and blueberries of the core Majiang blueberry production area[J]. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 2021,106(1):57-64.
- [13] 张珍明,乐乐,林昌虎,等.种植年限对山银花土壤质量的影响[J].*水土保持研究*,2016,23(2):66-72.
- [14] 袁景军,张林森,赵政阳,等.陕西澄城县无公害优质苹果基地环境质量现状评价[J].*西北林学院学报*,2006,21(2):45-49.
- [15] Yan X, Liu M, Zhong J, et al. How human activities affect heavy metal contamination of soil and sediment in a long-term reclaimed area of the Liaohe River Delta, North China[J]. *Sustainability*, 2018,10(2), <https://doi.org/10.3390/su10020338>.
- [16] Sungur A. Heavy metals mobility, sources, and risk assessment in soils and uptake by apple(*Malus domestica* Borkh.) leaves in urban apple orchards [J]. *Archives of Agronomy and Soil Science*, 2016,62(8):1051-1065.
- [17] Sonoda K, Hashimoto Y, Wang S L, et al. Copper and zinc in vineyard and orchard soils at millimeter vertical resolution [J]. *Science of the Total Environment*, 2019,689:958-962.
- [18] 常美蓉,庞奖励,张彩云,等.渭北旱塬连续40年苹果园土壤重金属元素分布特征研究[J].*干旱区资源与环境*,2009,25(8):160-163.
- [19] 张彩云,庞奖励,申海元.洛川县不同种植年限果园土壤基本性质与重金属含量评价[J].*水土保持通报*,2009,29(1):32-35.
- [20] 张彩云,庞奖励,申海元,等.人工苹果园持续时间对土壤重金属分布的影响[J].*干旱地理*,2010,33(2):164-169.
- [21] 刘子龙,赵政阳,张翠花,等.陕西苹果主产区果园土壤重金属含量水平及评价[J].*干旱区研究*,2009,27(1):21-25.
- [22] 赵佐平.陕西苹果园土壤污染现状评估分析[J].*北方园艺*,2015(11):192-196.
- [23] 刘子龙,赵政阳,鲁玉妙.陕西苹果园土壤砷和重金属污染评价[J].*干旱区研究*,2010,27(2):273-277.
- [24] 梁俊,赵政阳,王雷存,等.陕西白水县无公害苹果园环境质量评价[J].*西北农林科技大学学报:自然科学版*,2004,32(8):13-17.
- [25] 郑小春,车金鑫,卢海蛟,等.陕西白水县红富士苹果示范园土壤养分状况分析[J].*西北农业学报*,2011,20(10):97-101.
- [26] 贾金海,李秀琳,张永红.白水苹果优质高产气候资源分析[J].*陕西气象*,2006(4):25-28.
- [27] 唐根侠,程俊侠.白水苹果产业发展现状与可持续发展对策[J].*陕西农业科学*,2007(4):110-112.
- [28] Nemerow N L. Scientific stream pollution analysis[M]. New York:Mcgraw-Hill Book Co.,1974.
- [29] An L, Pan Y, Wang Z, et al. Heavy metal absorption status of five plant species in monoculture and intercropping[J]. *Plant and Soil*, 2011,345(1):237-245.
- [30] Liu W, Yang X, Duan L, et al. Variability in plant trace element uptake across different crops, soil contamination levels and soil properties in the Xinjiang Uygur Autonomous Region of northwest China [J]. *Scientific Reports*, 2021,11(1):1-13.
- [31] Zaharescu D G, Hooda P S, Soler A P, et al. Trace metals and their source in the catchment of the high altitude Lake Respomuso, Central Pyrenees[J]. *Science of the Total Environment*, 2009,407(11):3546-3553.
- [32] Song H, Hu K, An Y, et al. Spatial distribution and source apportionment of the heavy metals in the agricultural soil in a regional scale[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2018,18(3):852-862.