

吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染及其潜在健康风险

麦尔哈巴·图尔贡^a, 麦麦提吐尔逊·艾则孜^b, 王维维^a

新疆师范大学 a. 地理科学与旅游学院 b. 新疆干旱区湖泊环境与资源实验室, 新疆 乌鲁木齐 830054

摘要:

[背景] 农用地土壤环境质量与农产品质量安全有着密切的关系。在区域农业集约化背景下, 具有生理毒性的重金属元素进入土壤生态系统会导致土壤环境恶化、功能失调等一系列土壤环境安全问题。

[目的] 分析中国葡萄主产区土壤重金属污染水平与分布规律, 并评价其潜在人体健康风险。

[方法] 采集新疆吐鲁番盆地葡萄园 101 个采样点的土壤样品, 分析其中砷 (As)、镉 (Cd)、铬 (Cr)、镍 (Ni)、铅 (Pb) 和汞 (Hg) 元素的含量, 并与 GB 15618—2018《土壤环境质量标准农用地土壤污染风险管控标准 (试行)》进行比较。采用 Nemerow 污染指数 (NPI) 和美国环境保护署健康风险评估模型对葡萄园土壤重金属污染及其潜在健康风险进行评价。

[结果] 吐鲁番盆地葡萄园土壤中 As、Cd、Cr、Ni、Pb 和 Hg 元素质量分数平均值分别为 9.57、0.19、59.0、21.60、13.41、0.045 mg·kg⁻¹, 均低于 GB 15618—2018 中的限值, 但 As、Cd、Cr 和 Hg 质量分数平均值均高于新疆灌耕土背景值。葡萄园土壤重金属元素单项污染指数 (P_i) 平均值从高到低依次为 Cd (1.54)、Cr (1.49)、Hg (1.16)、As (1.05)、Pb (0.99) 和 Ni (0.82), 其中 Cd、Cr、Hg 和 As 处于轻度污染态势 ($1 < P_i \leq 2$), Pb 和 Ni 处于预警态势 ($0.7 < P_i \leq 1$); 6 种重金属的 NPI 平均值为 1.53, 处于轻度污染状态 ($1 < NPI \leq 2$)。葡萄园土壤中 6 种重金属元素的非致癌风险 [非致癌风险指数 (HI) < 1] 和致癌风险 [致癌风险指数 (TCR) < 1×10⁻⁶] 均为可忽略水平。不同暴露途径中, 各金属元素经手-口摄入的非致癌风险商 (HQ) 和致癌风险商 (CR) 均最高。6 种重金属元素对儿童的非致癌和致癌风险均高于成人。

[结论] 研究区葡萄园土壤中 6 种重金属元素通过手-口摄入、呼吸吸入、皮肤接触 3 种暴露途径的致癌和非致癌风险均处于安全范围内。

关键词: 葡萄园; 土壤; 重金属; 污染; 健康风险评估; 吐鲁番盆地

Contamination and potential health risk of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin
Marhaba TURHUN^a, Mamattursun EZIZ^b, WANG Wei-wei^a (a.College of Geographical Science and Tourism b.Xinjiang Laboratory of Lake Environment and Resources, Xinjiang Normal University, Urumqi, Xinjiang 830054, China)

Abstract:

[Background] The environmental quality of agricultural land soils is closely related to the quality and safety of agricultural products. With the regional agricultural intensification, a series of soil environmental safety problems, such as soil degradation and dysfunction, are caused by toxic heavy metal elements entering into the soil ecosystem.

[Objective] This study aims to understand the pollution levels and distribution patterns of heavy metals in vineyard soil in a main grape production area in China, and evaluate their potential human health risks.

[Methods] A total of 101 soil samples from vineyard in Turpan Basin were collected for analyzing the concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), nickel (Ni), lead (Pb), and mercury (Hg). The detected concentrations were compared with the *Soil environment quality—Risk control standard for soil contamination of agriculture land* (GB 15618-2018). The contamination levels and potential health risks of the six heavy metals in vineyard soil were analyzed based on the Nemerow pollution index (NPI) and the US Environmental Protection Agency Health Risk Assessment Model.

DOI 10.13213/j.cnki.jeom.2020.19816

基金项目

国家自然科学基金项目 (41867076, 41561073)

作者简介

麦尔哈巴·图尔贡 (1995—), 女, 硕士生;
E-mail: maraba218@126.com

通信作者

麦麦提吐尔逊·艾则孜, E-mail: oasiseco@126.com

利益冲突 无申报

收稿日期 2019-11-28

录用日期 2020-03-20

文章编号 2095-9982(2020)06-0558-08

中图分类号 R124

文献标志码 A

引用

麦尔哈巴·图尔贡, 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 王维维. 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染及其潜在健康风险 [J]. 环境与职业医学, 2020, 37 (6): 558-565.

本文链接

www.jeom.org/article/cn/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19816

Funding

This study was funded.

Correspondence to

Mamattursun EZIZ, E-mail: oasiseco@126.com

Competing interests None declared

Received 2019-11-28

Accepted 2020-03-20

To cite

Marhaba TURHUN, Mamattursun EZIZ, WANG Wei-wei. Contamination and potential health risk of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin [J]. Journal of Environmental and Occupational Medicine, 2020, 37(6): 558-565.

Link to this article

www.jeom.org/article/en/10.13213/j.cnki.jeom.2020.19816

[Results] The average concentrations of As, Cd, Cr, Ni, Pb, and Hg in vineyard soil in Turpan Basin were 9.57, 0.19, 59.0, 21.60, 13.41, and 0.045 mg·kg⁻¹, respectively, and all were lower than the national limits (GB 15618-2018), but the average concentrations of As, Cd, Cr, and Hg exceeded the background values of irrigation soil in Xinjiang. The average values of single contamination factor (P_i) for each heavy metal element from high to low were Cd (1.54) > Cr (1.49) > Hg (1.16) > As (1.05) > Pb (0.99) > Ni (0.82). Among them, the vineyard soil was mildly polluted by Cd, Cr, Hg, and As ($1 < P_i \leq 2$), and slightly polluted by Ni and Pb ($0.7 < P_i \leq 1$, warning line). The average value of NPI for the vineyard soil was 1.53 and suggested the soil was mildly polluted ($1 < NPI \leq 2$). Both the non-carcinogenic [hazard index (HI) < 1] and carcinogenic [total carcinogenic risk (TCR) < 1×10^{-6}] health risks of selected six heavy metal elements in vineyard soil showed a negligible risk level. The hazard quotients (HQ) and carcinogenic risks (CR) of selected heavy metal elements via hand-mouth ingestion were the highest among various exposure pathways. Both the non-carcinogenic and carcinogenic health risks of selected heavy metals for children were higher than those for adults.

[Conclusion] The potential health risks caused by exposure through three pathways such as hand-mouth ingestion, inhalation, and skin contact to selected six heavy metal elements in vineyard soil in the study area are in safety scales.

Keywords: vineyard; soil; heavy metal; contamination; health risk assessment; Turpan Basin

农用地土壤污染物中, 重金属元素因其较强的生物毒性、潜伏性和不可降解性等特征, 威胁土壤和农产品质量安全以及人体健康^[1-2]。在农业生产过程中, 适当施用肥料和农药能提高农作物产量, 但过量和长期施用肥料和农药会影响土壤的结构和功能^[3-4]。污水灌溉、污泥施肥、大气沉降、交通排放、工矿烟尘以及杀虫剂和塑料薄膜的施用等导致重金属元素在土壤中积累, 通过土壤-植物-生物体之间的循环迁移, 造成食品生产系统中的重金属污染, 被人体摄入后引发免疫力下降、生长迟缓、心理障碍和营养不良等各种疾病^[5-6]。

许多学者重点关注和评估了不同类型果园土壤重金属污染及潜在健康风险。Liang等^[7]采用美国环境保护署(US Environmental Protection Agency, US EPA)健康风险评估模型, 评价河北省张家口市葡萄园土壤重金属污染的潜在健康风险, 发现儿童更容易受到葡萄园土壤重金属污染的健康危害。Mirzaei等^[8]采用污染负荷指数法与US EPA健康风险评估模型, 对伊朗38个施肥葡萄园中土壤重金属污染及潜在健康风险进行评估, 发现研究区葡萄园土壤持续施用肥料导致镉明显富集, 已超出安全限值。刘亨桂等^[9]分析了碳化硅工业集聚区对周边葡萄园土壤重金属含量和果实品质产量的影响, 发现葡萄果实和土壤中重金属元素含量呈正相关关系。康露等^[10]采用目标危害系数法对新疆葡萄主产区土壤中重金属含量及其健康风险进行评估, 发现吐鲁番盆地鄯善县葡萄中镉和铅元素的污染达到警戒线水平, 存在健康风险。庞荣丽等^[11]发现葡萄对土壤中不同重金属元素吸收能力差异较大, 对镉的吸收能力最强。刘子龙等^[12]分析新疆石河子葡萄主产区51个葡萄园土壤重金属含量,

发现污染级别达到警戒线水平的果园约占43%, 其中铅含量超出限定值。可以看出, 由于果园土壤环境质量直接影响果树的生长与果品品质, 并最终影响消费者身体健康, 不同类型果园土壤重金属污染及潜在健康风险评估已成为国内外研究的热点。

新疆吐鲁番盆地为我国著名的葡萄主产区和最大的无核葡萄生产基地之一^[13]。吐鲁番盆地的葡萄是国家地理标志产品, 葡萄总产量约占全疆的52%。本研究旨在系统分析吐鲁番葡萄园土壤重金属污染水平及其潜在健康风险, 为葡萄园土壤环境安全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

吐鲁番盆地地理位置介于东经88°57'~89°34'和北纬42°46'~43°05'间, 位于新疆火焰山西南部, 库木塔格沙漠西北部, 总面积668.5 km²。研究区气候属于暖温带大陆性干旱荒漠气候, 年均降水量约15 mm, 年均气温约14.4℃, 极端最高气温达49.6℃。盆地南部山麓的艾丁湖海拔-154 m, 是我国地势最低的洼地。吐鲁番盆地农业发展模式具有典型的绿洲灌溉农业的特点, 土壤类型主要为棕漠土与灌耕土, 葡萄资源丰富, 葡萄产业具有集群优势, 盛产的葡萄以品种多、品质好、无核、皮薄、糖多等为特点。该区域葡萄种植面积约312 km², 是当地农民增收的支柱产业和特色产业, 约占农民收入的60%^[14-15]。

1.2 样品采集与测定

2019年5月在吐鲁番盆地葡萄园共采集了101个采样点的表层(0~20 cm)土壤样品。根据HJ/T 166—2004《土壤环境监测技术规范》^[16]进行监测点位布设

和样品采集(图1)。采样过程中,采用10m×10m内“梅花形”布设5个子样点,每个子样点采集表层土壤200g左右,将其充分混合后装入洁净自封塑料袋内。所有样品委托新疆维吾尔自治区分析测试研究院测定砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、镍(Ni)、铅(Pb)、汞(Hg)共6种元素含量。As含量检测依据为GB/T 22105.2—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法第2部分:土壤中总砷的测定》^[17],Cd与Pb含量检测依据为GB/T 17140—1997《土壤质量 铅、镉的测定 KI-MIBK萃取火焰原子吸收分光光度法》^[18],Cr与Ni含量检测依据为HJ 781—2016《固体废物 22种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法》^[19],Hg含量检测依据为GB/T 22105.1—2008《土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第1部分:土壤中总汞的测定》^[20]。各元素含量与GB 15618—2018《土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》^[21]进行对比分析。土壤pH值用pH计(梅特勒-托利多,瑞士)测定。

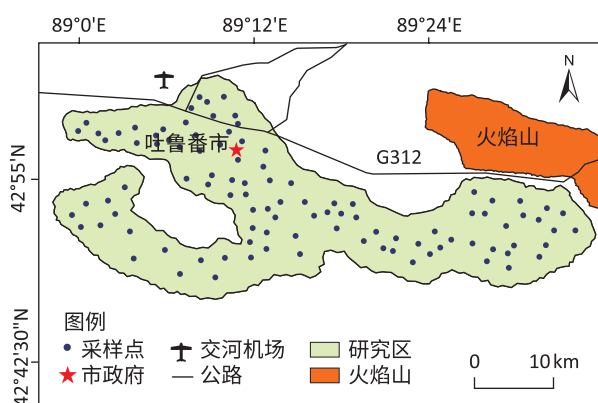


图1 吐鲁番盆地葡萄园采样点位置示意图
Figure 1 Sampling sites in vineyards in Turpan Basin

1.3 污染评价方法

以新疆灌耕土背景值^[22]为参考值,采用国际上广泛应用的Nemerow污染指数(Nemerow pollution index, NPI)^[23],评价吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染水平。单项污染指数: $P_i=C_i/S_i$;综合污染指数: $NPI=[(P_{i-max}^2+P_{i-ave}^2) \times 0.5]^{0.5}$ 。式中: C_i 为元素*i*的实测浓度, S_i 为元素*i*的参考值, P_{i-max} 为 P_i 的最大值, P_{i-ave} 为 P_i 的平均值。 P_i 和 NPI 的污染分级标准: P_i 或 $NPI \leq 0.7$ 为安全(I), $0.7 < P_i$ 或 $NPI \leq 1$ 为预警(II), $1 < P_i$ 或 $NPI \leq 2$ 为轻度污染(III), $2 < P_i$ 或 $NPI \leq 3$ 为中度污染(IV), P_i 或 $NPI > 3$ 为重度污染(V)。

1.4 健康风险评价

1.4.1 重金属日均暴露量计算 US EPA健康风险评估模型以风险度作为指标,把土壤污染与人体健康联系起来,定量描述土壤污染物对人体产生健康危害的风险,是很有效的环境评价方法^[5, 7]。采用US EPA健康风险评估模型^[24],分析儿童和成人重金属的日平均暴露量。经手-口摄入途径日均暴露量: $CDI_{ing}=C_i \times IngR \times EF \times ED \times BW^{-1} \times AT^{-1} \times 10^{-6}$;经呼吸途径日均暴露量: $CDI_{inh}=C_i \times InhR \times EF \times ED \times BW^{-1} \times AT^{-1} \times PEF^{-1}$;经皮肤接触途径日均暴露量: $CDI_{derm}=C_i \times SA \times AF \times ABS \times EF \times ED \times BW^{-1} \times AT^{-1} \times 10^{-6}$ 。式中: $IngR$ 为经手-口摄入频率(儿童取 $200 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$,成人取 $100 \text{ mg} \cdot \text{d}^{-1}$); BW 为体重(儿童取 20.08 kg ,成人取 62.4 kg)^[25]; $InhR$ 为呼吸频率(儿童取 $7.5 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$,成人取 $16.2 \text{ m}^3 \cdot \text{d}^{-1}$); PEF 为灰尘排放因子,为 $1.36 \times 10^9 \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1}$; SA 为暴露皮肤表面积(儿童取 7600 cm^2 ,成人取 16000 cm^2)^[25-26]; AF 为皮肤黏附系数(儿童取 $0.20 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,成人取 $0.07 \text{ mg} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[27]; ABS 表示皮肤吸收因子,为 0.001 ^[28]; ED 为暴露期(儿童取6年,成人取24年)^[28]; EF 为暴露频率, $350 \text{ d} \cdot \text{年}^{-1}$; AT 为平均暴露时间,其中儿童与成人非致癌平均暴露时间分别为2190 d和8760 d,致癌平均暴露时间均为25550 d^[29]。

1.4.2 人体健康风险表征 采用非致癌风险商(hazard quotient, HQ)和非致癌风险指数(hazard index, HI)来分析葡萄园土壤中6种元素的非致癌风险。 $HQ=CDI \times RfD^{-1}$; $HI=HQ_{ing}+HQ_{inh}+HQ_{dermo}$ 。式中: RfD 为重金属元素在不同暴露途径的参考剂量。当 HQ 或 $HI \leq 1$ 时,表示非致癌健康风险可以忽略。当 HQ 或 $HI > 1$ 时,表示存在非致癌健康风险。

致癌风险用致癌风险商(carcinogenic risk, CR)与致癌风险指数(total carcinogenic risk, TCR)来表示。 $CR=CDI \times SF$; $TCR=CR_{ing}+CR_{inh}+CR_{dermo}$ 。式中: SF 为重金属在某种暴露途径的致癌风险斜率系数。 CR 或 TCR 在 1×10^{-4} 为最大可接受风险水平,小于 1×10^{-6} 为可忽略致癌风险水平。由于US EPA只给出了As与Cd的 SF 值,故本研究只对As与Cd进行致癌风险评估。根据相关研究成果^[1, 28],本研究采用的各种暴露途径的 RfD 和 SF 见表1。

1.5 统计学分析

所有数据采用SPSS 20.0软件进行统计分析,包括描述性统计分析与正态性检验。基于地理信息系统技术与地统计学理论,首先采用GS+9.0软件确定各元素

P_i 、 HI 与 TCR 值的最佳半方差函数理论模型和相关参数,再利用ArcGIS 10.3 软件,选择克里格最优内插法,得到土壤中6种元素 P_i 、 HI 与 TCR 值的空间分布图。检验水准 $\alpha=0.05$,双侧检验。

表1 重金属不同暴露途径的参考剂量(RfD)和斜率因子(SF)
Table 1 Reference doses (RfD) and slope factors (SF) of heavy metals through various exposure pathways

重金属元素 Heavy metal element	RfD/mg·kg ⁻¹ ·d ⁻¹			SF/kg·d ⁻¹ ·mg ⁻¹		
	手-口途径 Hand-mouth ingestion	呼吸途径 Respiration	皮肤接触途径 Skin contact	手-口途径 Hand-mouth ingestion	呼吸途径 Respiration	皮肤接触途径 Skin contact
As	0.0003	0.0003	0.000123	1.5	15.1	3.66
Cd	0.001	0.001	0.00001	6.1	6.3	—
Cr	0.003	0.0000286	0.00006	—	—	—
Ni	0.02	0.0206	0.0054	—	—	—
Pb	0.0035	0.00352	0.000525	—	—	—
Hg	0.0003	0.0003	0.0003	—	—	—

2 结果

2.1 葡萄园土壤重金属含量特征

土壤中As、Cd、Cr、Ni、Pb和Hg元素质量分数范围及均数($\bar{x}$)、标准差(s)和变异系数(CV)见表2。最大值均未超出GB 15618—2018中的国家标准限值;Ni和Pb质量分数的均值未超出新疆灌耕土壤背景值,但As、Cd、Cr和Hg质量分数均值分别为新疆灌耕土背景值的1.05、1.58、1.49、1.15倍,表明葡萄园土壤中As、Cd、Cr和Hg元素的积累较为明显。葡萄园土壤pH均未超出GB 15618—2018中的筛选值($pH>7.5$),pH值的变化范围介于7.07~8.98之间,平均值为8.01,属于弱碱性土壤。葡萄园土壤中Hg元素质量分数的 CV 值最大,为0.65,呈现强变异($CV>0.5$),表明Hg元素空间分布不均匀;Cd与Pb元素的 CV 值分别为0.22与0.21,呈现中等变异($0.2<CV<0.5$);As、Ni、Cr元素的 CV 值分别为0.17、0.11、0.09,呈现弱变异($CV<0.2$)。

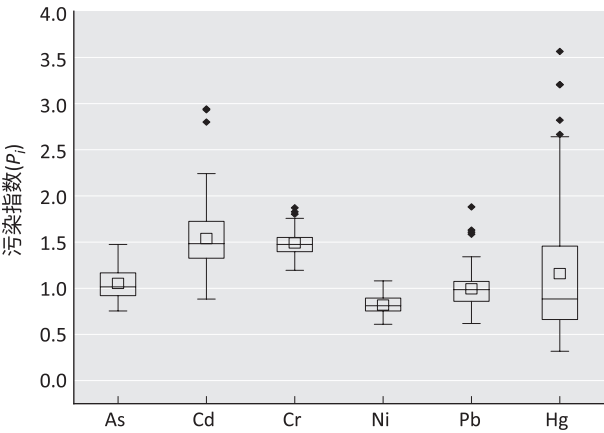
表2 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属质量分数($n=101$)/mg·kg⁻¹
Table 2 Heavy metal contents in vineyard soil in Turpan Basin ($n=101$)/mg·kg⁻¹

重金属元素 Heavy metal element	最小值 Min	最大值 Max	均数 $\bar{x}$	标准差 s	变异系数 CV	新疆灌溉土壤背景值 Background value of irrigation soil in Xinjiang	GB 15618—2018 国家限值 National limit of GB 15618-2018
As	6.86	13.40	9.57	1.64	0.17	9.09	25.0
Cd	0.11	0.35	0.19	0.04	0.22	0.12	0.60
Cr	47.30	74.10	59.00	5.33	0.09	39.60	250.0
Ni	16.10	28.50	21.60	2.46	0.11	26.40	190.0
Pb	8.34	25.40	13.41	2.76	0.21	13.50	170.0
Hg	0.012	0.139	0.045	0.029	0.65	0.039	3.40

2.2 葡萄园土壤重金属污染评价

从图2可知,吐鲁番盆地葡萄园土壤中6种重金属元素 P_i 值变化范围较大,均值从大到小依次为Cd(1.54)、Cr(1.49)、Hg(1.16)、As(1.05)、Pb(0.99)和Ni

(0.82)。按照 P_i 污染分级标准,葡萄园土壤中Cd、Cr、Hg和As呈现轻度污染态势,Pb和Ni呈现预警态势。



[注] 箱体范围依次为上四分位数、中位数、下四分位数,须表示1.5倍四分位数区间,□表示均值,◆表示异常值。
[Note] Box shapes indicate median and the 25th and 75th percentiles; whiskers indicate the 10th and 90th percentiles; □ indicate mean; ◆ indicate individual outliers.

图2 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属单因子污染指数
Figure 2 Single contamination factor of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

从吐鲁番葡萄园土壤重金属元素的 P_i 空间分布规律差异较大(图3)。As元素在研究区东部呈现轻度污染,西部呈现预警态势。Cd是污染程度和污染面积最大的元素,在盆地西南部出现污染高值区,表现为中度污染,其他区域处于轻度污染态势。Pb元素的 P_i 值在人口相对密集的区域较大,呈现轻度污染。Hg元素的 P_i 值呈现点状分布格局,在盆地北部和中部出现重度、中度污染区。由于所有采样点Cr和Ni元素污染等级基本相同,为了更清楚地表现这两种元素污染空间分布格局,在图3上用其具体的 P_i 值划分污染水平。Cr元素的污染面积和污染程度仅次于Cd,Cr元素 P_i 值

的污染高值区分布于研究区中部和市区附近,所有采样点Cr元素均呈现轻度污染。从Ni元素的 P_i 值空间分布情况来看,污染高值区分布于研究区东部、中部和西南部,研究区北部区域Ni污染较低,89.11%样品Ni元素呈现预警态势。 NPI 变化范围介于1.13~2.76之间,平均值为1.53,处于轻度污染,91.09%样品处于轻度污染。

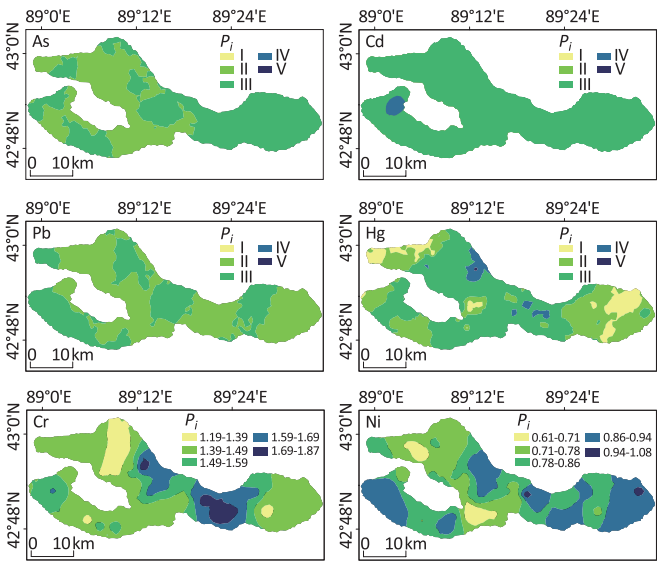


图3 吐鲁番葡萄园土壤重金属的 P_i 空间分布
Figure 3 P_i spatial distribution of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

2.3 非致癌风险评估

非致癌风险计算结果(表3)表明,对成人和儿童,手-口摄入途径均为吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属最主要的暴露途径,其次为皮肤接触途径。6种重金属通过3种途径的总日均非致癌暴露量从大到小依次为Cr、Ni、Pb、As、Cd、Hg。葡萄园土壤中Cr元素对成人和儿童的总日均非致癌暴露量(CDI_{total})最高。各暴露途径中,儿童的非致癌暴露量均大于成人的暴露量。

从表4可知,研究区葡萄园土壤中6种重金属通过3种暴露途径的成人 HQ 值和儿童 HQ 值大小顺序依次为 $As>Cr>Pb>Ni>Cd>Hg$ 。从暴露途径来看,手-口摄入途径 HQ 最高,其次为皮肤接触途径 HQ ,呼吸途径 HQ 最小。葡萄园土壤重金属元素各暴露途径儿童的 HQ 均大于成人。As和Cr元素的 HQ 对 HI 的贡献率很大。其中,对于成人来说,As和Cr的 HQ 值对 HI 值的贡献率分别为45.82%和43.18%;对于儿童来说,As和Cr的 HQ 值对 HI 值的贡献率分别为50.0%和41.94%。可以看出,As和Cr是主要的非致癌健康风险元素。整体上,重金属元素对儿童和成人的 HI 分别为0.11和0.62,重金属对儿童的非致癌风险大于成人。3种暴露途径中 HQ 和 HI 平均值均小于1,属于可接受风险水平,不存在健康危害。但 HI 的最大值(0.76)已达到了较高的水平,值得引起重视。

表3 吐鲁番葡萄园土壤重金属非致癌风险日均暴露量/ $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$

Table 3 Daily average exposure levels of non-carcinogenic heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin/ $mg\cdot kg^{-1}\cdot d^{-1}$

重金属元素 Heavy metal element	CDI_{ing}		CDI_{inh}		CDI_{derm}		CDI_{total}	
	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)
As	1.47×10^{-5}	9.14×10^{-5}	1.75×10^{-9}	2.52×10^{-9}	1.65×10^{-7}	6.95×10^{-7}	1.49×10^{-5}	9.21×10^{-5}
Cd	2.84×10^{-7}	1.76×10^{-6}	3.38×10^{-11}	4.86×10^{-11}	3.18×10^{-9}	1.34×10^{-8}	2.87×10^{-7}	1.78×10^{-6}
Cr	9.07×10^{-5}	5.63×10^{-4}	1.08×10^{-8}	1.55×10^{-8}	1.02×10^{-6}	4.28×10^{-6}	9.17×10^{-5}	5.68×10^{-4}
Ni	3.32×10^{-5}	2.06×10^{-4}	3.95×10^{-9}	5.69×10^{-9}	3.72×10^{-7}	1.57×10^{-6}	3.36×10^{-5}	2.08×10^{-4}
Pb	2.06×10^{-5}	1.28×10^{-4}	2.46×10^{-9}	3.53×10^{-9}	2.31×10^{-7}	9.74×10^{-7}	2.08×10^{-5}	1.29×10^{-4}
Hg	6.94×10^{-8}	4.32×10^{-7}	8.27×10^{-12}	1.19×10^{-11}	7.78×10^{-10}	3.28×10^{-9}	7.02×10^{-8}	4.35×10^{-7}

表4 吐鲁番葡萄园土壤重金属非致癌风险指数

Table 4 Non-carcinogenic risk indices of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

重金属元素 Heavy metal element	HQ_{ing}		HQ_{inh}		HQ_{derm}		HQ	
	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)
As	4.90×10^{-2}	3.05×10^{-1}	5.84×10^{-6}	8.40×10^{-6}	1.34×10^{-3}	5.65×10^{-3}	5.04×10^{-2}	3.10×10^{-1}
Cd	2.84×10^{-4}	1.76×10^{-3}	3.38×10^{-8}	4.86×10^{-8}	3.18×10^{-4}	1.34×10^{-3}	6.02×10^{-4}	3.10×10^{-3}
Cr	3.02×10^{-2}	1.88×10^{-1}	3.78×10^{-4}	5.43×10^{-4}	1.69×10^{-2}	7.14×10^{-2}	4.75×10^{-2}	2.60×10^{-1}
Ni	1.66×10^{-3}	1.03×10^{-2}	1.92×10^{-7}	2.76×10^{-7}	6.88×10^{-5}	2.90×10^{-4}	1.73×10^{-3}	1.06×10^{-2}
Pb	5.89×10^{-3}	3.66×10^{-2}	6.97×10^{-7}	1.00×10^{-6}	4.40×10^{-4}	1.85×10^{-3}	6.33×10^{-3}	3.85×10^{-2}
Hg	2.31×10^{-4}	1.44×10^{-3}	2.76×10^{-8}	3.97×10^{-8}	2.59×10^{-6}	1.09×10^{-5}	2.34×10^{-4}	1.45×10^{-3}

从 HI 的空间分布格局 (图4) 来看, 研究区葡萄园土壤重金属元素对应于成人和儿童的 HI 值空间分布格局基本相同, 成人和儿童 HI 值均出现高值区, 其高值区主要分布于研究区东部。大体上, 重金属元素的 HI 值从研究区东部向西部逐渐减少, 呈现较明显的地带性分布规律。这与 As 和 Cr 元素的 P_i 值空间分布规律基本一致, 进一步说明 As 和 Cr 是研究区葡萄园土壤中最主要的非致癌健康风险因子。

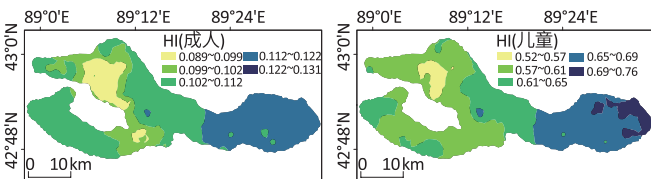


图4 吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属 HI 空间分布

Figure 4 HI spatial distribution of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

2.4 致癌风险评估

从致癌风险暴露情况 (表5) 来看, As 的总日均致癌暴露量大于 Cd 的总日均致癌暴露量, 且葡萄园土壤中 As 通过 3 种途径的致癌风险暴露量均比 Cd 高。葡萄园土壤中 As 与 Cd 的手-口摄入和皮肤接触途径儿童致癌风险日均暴露量均高于成人。从暴露途径来

看, 不论对于成人还是儿童, 通过手-口摄入葡萄园土壤中重金属均为该区域葡萄园土壤中重金属最主要的致癌风险暴露途径, 其次为皮肤接触途径, 通过呼吸途径对人体致癌风险最小。

从致癌风险指数 (表6) 来看, 研究区葡萄园土壤中 As 的 CR 大于 Cd 的 CR 。3 种暴露途径致癌风险中, 成人和儿童均手-口摄入途径 CR 最高, 其次为皮肤接触途径。儿童的 TCR (1.29×10^{-5}) 大于成人的 TCR (8.37×10^{-6}), 表明葡萄园土壤重金属 As 与 Cd 污染对儿童产生的致癌风险大于成人。对于成人来说, 葡萄园土壤中 As 和 Cd 的 CR 值对 TCR 值的贡献率分别为 92.91% 和 7.09%; 对于儿童来说, As 和 Cd 的 CR 值对 TCR 值的贡献率分别为 92.85% 和 7.15%。可知, 研究区 TCR 主要由 As 元素不同暴露途径所贡献, As 是研究区主要的致癌风险因子。总的来看, 吐鲁番盆地葡萄园土壤中 As 和 Cd 通过 3 种暴露途径的 CR 和 TCR 均小于 1×10^{-4} , 属于可接受水平, 不存在健康危害。

从 TCR 空间分布格局 (图5) 来看, 成人和儿童的 TCR 空间分布格局基本一致, 并均出现高风险区。 TCR 值较高的区域主要分布于研究区东部, TCR 值较低的区域主要分布于研究区西部。 TCR 高风险区的样本中 As 含量较高, 这与非致癌风险指数 (HI) 空间分布规律一致。

表5 吐鲁番葡萄园土壤重金属致癌风险日均暴露量 / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

Table 5 Daily average exposure levels of carcinogenic heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin / $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{d}^{-1}$

重金属元素 Heavy metal element	CDI_{ing}		CDI_{inh}		CDI_{derm}		CDI_{total}	
	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)
As	5.04×10^{-6}	7.84×10^{-6}	6.01×10^{-10}	2.16×10^{-10}	5.65×10^{-8}	5.95×10^{-8}	5.10×10^{-6}	7.90×10^{-6}
Cd	9.73×10^{-8}	1.51×10^{-7}	1.16×10^{-11}	4.17×10^{-12}	—	—	9.84×10^{-8}	1.52×10^{-7}

表6 吐鲁番葡萄园土壤重金属致癌风险指数

Table 6 Carcinogenic risk indices of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

重金属元素 Heavy metal element	CR_{ing}		CR_{inh}		CR_{derm}		CR	
	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)	成人 (Adult)	儿童 (Child)
As	7.56×10^{-6}	1.18×10^{-5}	9.07×10^{-9}	3.26×10^{-9}	2.07×10^{-7}	2.18×10^{-7}	7.78×10^{-6}	1.20×10^{-5}
Cd	5.93×10^{-7}	9.22×10^{-7}	7.30×10^{-11}	2.63×10^{-11}	—	—	5.93×10^{-7}	9.22×10^{-7}

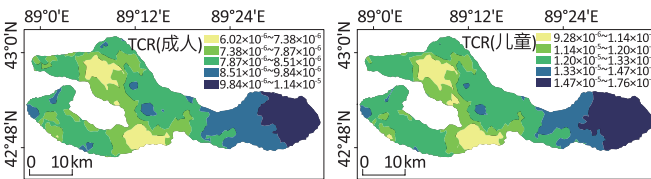


图5 研究区葡萄园土壤重金属 TCR 空间分布

Figure 5 TCR spatial distribution of heavy metals in vineyard soil in Turpan Basin

3 讨论

农用地土壤重金属污染不仅导致土壤理化性状恶化, 而且通过食物链的富集作用对生态系统安全与人体健康产生严重威胁^[31]。本研究检测到的吐鲁番盆地葡萄园土壤中 6 种重金属元素含量均值和最大值均未超出国家土壤环境质量标准 (GB 15618—2018) 的筛选值, 说明研究区葡萄园土壤环境质量处于安全

范围内。葡萄园土壤中As、Cd、Cr和Hg含量均值均超出土壤背景值,这4种元素的污染指数均值均处于轻度污染态势,重金属元素的综合污染指数也处于轻度污染水平。结合采样点实际情况,研究区葡萄园土壤中As、Cd、Cr、Ni、Pb和Hg元素污染高值区主要分布于研究区内人口密集的城镇周边的葡萄园和交通主干道周边的葡萄园。研究区交通主干道周边葡萄园土壤重金属Pb污染较重是因为交通运输过程中含铅汽油燃烧产生的Pb和汽车轮胎磨损产生的残留物进入土壤环境,导致Pb的积累^[30]。农用地土壤中,无论重金属的来源如何,重金属的积累都会降低农用地土壤质量、农作物产量和农产品质量,并产生健康危害^[30]。因此,吐鲁番盆地葡萄园土壤重金属污染风险与污染来源应当引起关注。从健康风险评估结果来看,虽然研究区葡萄园土壤重金属元素3种暴露途径日均暴露量与潜在健康风险均处于安全范围内,对人体不会产生潜在健康风险,但手-口摄入途径和皮肤接触途径日均暴露量达到较高的水平,值得关注。

吐鲁番盆地葡萄园土壤中As和Cr的HQ值约占HI值的90%,为主要的非致癌风险因子,这主要与US EPA健康风险模型中As和Cr元素RfD值较高有关。As为主要的致癌风险因子,As的CR值占TCR值的92.91%(成人)和92.85%(儿童)。3种暴露途径中儿童HQ均高于成人,说明研究区葡萄园土壤对儿童造成较高的非致癌风险,同时儿童CR均高于成人,说明研究区葡萄园土壤对儿童造成较高的致癌风险。这是因为手-口摄入途径是土壤中重金属元素健康风险最直接的途径^[32],儿童生活习惯可能是导致健康危害较高的主要原因。由于农产品质量安全与农用地土壤中重金属元素有效态含量密切相关^[30],通过对研究区葡萄园土壤中重金属元素的有效态含量与葡萄园中重金属含量相关性进行研究,可进一步弄清葡萄园土壤重金属污染对葡萄质量与人体健康的危害程度。

风险评价过程中合理确定重金属元素筛选值是污染风险识别和准确评价的基础,评价参数的不确定性都会增加风险评估结果的不确定性。本研究采用的US EPA健康风险模型部分参数存在不确定性,风险评估过程与结果均存在一定的局限性与不确定性。虽然本研究采用《中国人群暴露参数手册》^[25-26]对US EPA健康风险模型中的暴露皮肤面积、经手-口摄入频率以及平均体重等评估参数进行修订,进一步提高US EPA健康风险模型对本研究区的适宜性,但该模型其

他参数的适宜性不可忽略。因此,进一步探索研究适合研究区实际的潜在健康危害评估参数,将是今后研究的重点。

总的来说,吐鲁番盆地葡萄园土壤中As、Cd、Cr、Ni、Pb和Hg元素含量未超出国家土壤环境质量标准(GB 15618—2018)中的筛选值,污染水平较低,潜在非致癌、致癌风险指数在可接受的范围内,表明吐鲁番盆地葡萄园土壤环境是安全的。考虑到As与Cr元素2种毒性较强的元素含量相对较高,为研究区主要的风险因子,在葡萄生产过程中,必须做好葡萄园土壤重金属的污染防治工作,尤其要防范葡萄园土壤As与Cr的污染风险,科学利用葡萄园土壤资源。

参考文献

- [1] 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]. Environ Sci Pollut Res, 2016, 23 (14): 14560-14566.
- [2] 易文利,董奇,杨飞,等.陕西省宝鸡市不同功能区土壤重金属污染特征及健康风险评价[J].环境与职业医学, 2018, 35 (11): 1019-1024, 1030.
- [3] SAHODARAN N K, RAY J G. Heavy metal contamination in "chemicalized" green revolution banana fields in southern India [J]. Environ Sci Pollut Res, 2018, 25 (27): 26874-26886.
- [4] 周开胜.蚌埠及周边地区土壤和蔬菜的重金属污染研究[J].环境与职业医学, 2018, 35 (10): 910-916.
- [5] WANG Q, LIU J, CHENG S. Heavy metals in apple orchard soils and fruits and their health risks in Liaodong Peninsula, northeast China [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187 (1): 4178.
- [6] CHEN C, QIAN Y, CHEN Q, et al. Evaluation of pesticide residues in fruits and vegetables from Xiamen, China [J]. Food Control, 2011, 22 (7): 1114-1120.
- [7] LIANG Q, XUE Z J, WANG F, et al. Contamination and health risks from heavy metals in cultivated soil in Zhangjiakou City of Hebei Province, China [J]. Environ Monit Assess, 2015, 187 (12): 754.
- [8] 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]. Environ Geochem Health, 2020, 42 (1): 27-43.

- [9] 刘亨桂, 陵军成. 碳化硅冶炼集聚区对周边葡萄建园地重金属含量和果实品质产量的影响 [J]. 林业科技通讯, 2017 (1) : 56-58.
- [10] 康露, 帕尔哈提·克依木, 赵多勇, 等. 新疆产区葡萄和桃中重金属含量特征及风险评价 [J]. 干旱区资源与环境, 2018, 32 (1) : 147-154.
- [11] 庞荣丽, 吴斯洋, 党琪, 等. 葡萄对重金属吸收能力的差异性研究 [J]. 干旱区资源与环境, 2019, 33 (12) : 96-101.
- [12] 刘子龙, 鲁建江, 张广军. 石河子葡萄主产区土壤重金属含量分析及污染评价 [J]. 西北林学院学报, 2010, 25 (4) : 14-18.
- [13] 陈晓丽, 陈彤. 特色林果产品消费者行为分析——以新疆为例 [J]. 农村经济, 2017 (3) : 55-60.
- [14] 葛洪燕. 吐鲁番市颗粒物浓度变化特征及与气象要素的关系 [J]. 沙漠与绿洲气象, 2018, 12 (2) : 78-83.
- [15] 杨少敏, 楚新正, 张扬. 近 65 年来吐鲁番市气温降水变化特征分析 [J]. 生态科学, 2018, 37 (3) : 44-50.
- [16] 土壤环境监测技术规范: HJ/T 166—2004 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [17] 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 2 部分: 土壤中总砷的测定: GB/T 22105.2—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [18] 土壤质量 铅、镉的测定 KI-MIBK 萃取火焰原子吸收分光光度法: GB/T 17140—1997 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2004.
- [19] 固体废物 22 种金属元素的测定 电感耦合等离子体发射光谱法: HJ 781—2016 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 2016.
- [20] 土壤质量 总汞、总砷、总铅的测定 原子荧光法 第 1 部分: 土壤中总汞的测定: GB/T 22105.1—2008 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [21] 土壤环境质量标准 农用地土壤污染风险管控标准(试行): GB 15618—2018 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
- [22] 郑国璋. 农业土壤重金属污染研究的理论与实践 [M]. 北京: 中国环境科学出版社, 2007 : 20-25.
- [23] NEMEROW N L. Stream, lake, estuary, and ocean pollution [M]. New York : Van Nostrand Reinhold Publishing Co., 1985.
- [24] Exposure factors handbook : EPA/600/P-95/002 [S]. Washington : Office of Emergency and Remedial Response, 1997 : 104-126.
- [25] 赵秀阁, 段小丽. 中国人群暴露参数手册(成人卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2014.
- [26] 段小丽. 中国人群暴露参数手册(儿童卷) 概要 [M]. 北京: 中国环境出版社, 2016.
- [27] US EPA. Risk assessment guidance for Superfund. Volume I : human health evaluation manual Part E : supplemental guidance for dermal risk assessment [R]. Washington : Office of Superfund Remediation and Technology Innovation, 2004.
- [28] US EPA. Code of federal regulations: Protection of environment. Title 40, part 60. (revised as of July 1, 1993) [EB/OL]. [1993-07-01]. <https://www.osti.gov/biblio/107877>.
- [29] US EPA. Risk assessment guidance for Superfund. Human health evaluation manual Part A, vol.1 [R]. Washington : Office of Emergency and Remedial Response, 1989 : 1-100.
- [30] 麦麦提吐尔逊·艾则孜, 阿吉古丽·马木提, 艾尼瓦尔·买买提, 等. 博斯腾湖流域绿洲农田土壤重金属污染及潜在生态风险评价 [J]. 地理学报, 2017, 72 (9) : 1680-1694.
- [31] HU Y, LIU X, BAI J, et al. Assessing heavy metal pollution in the surface soils of a region that had undergone three decades of intense industrialization and urbanization [J]. Environ Sci Pollut Res, 2013, 20 (9) : 6150-6159.
- [32] CALABRESE EJ, STANEK EJ, JAMES RC, et al. Soil ingestion : a concern for acute toxicity in children [J]. Environ Health Perspect, 1997, 105 (12) : 1354-1358.

(英文编辑: 汪源; 责任编辑: 汪源)