

食用向日葵的重金属污染健康风险评价——以新疆阿勒泰地区青河县为例

马玉^{1,2}, 汪溪远^{1*}, 王志强^{1,2}, 刘玉莹^{1,2}, 万彦博^{1,2}, 程维明^{3,4}

(1. 新疆大学资源与环境科学学院, 智慧城市与环境建模自治区普通高校重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046; 2. 新疆绿洲生态重点实验室, 新疆乌鲁木齐 830046; 3. 资源与环境信息系统国家重点实验室, 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 4. 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要 对阿勒泰地区青河县大规模种植的食用向日葵和其种植地土壤进行采样调查, 采用单因子指数法和内梅罗指数法、生物富集系数、靶标危害系数和危害指数进行评价。结果表明: 向日葵种植土壤中重金属 Cr、Cu、Zn、As、Cd 的含量均超过阿勒泰地区的本底值; 向日葵的毛根和籽粒对各种重金属的吸收能力较强, 在籽粒中 Cd 与 Cr 的含量较高, 易造成健康风险; 向日葵对 Cr、Cu、Zn、Cd 4 种元素的转移能力较强, 其中地上部对 Cr 和 Cd 的富集系数较高; 籽粒中 As 和 Cr 元素的风险指数较高, 对成人的健康威胁更大; 危害指数的估算表明, 重金属的累积会对人体造成较大的危害。建议当地将种植方式改变为轮作, 且合理地使用化肥和农药, 收割植物时连根拔起, 以减少土壤重金属的累积。

关键词 向日葵; 重金属污染; 单因子指数法; 富集系数; 健康风险

中图分类号 X173 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2021)24-0083-05

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2021.24.019

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Health Risk Assessment of Heavy Metal Pollution in Edible Sunflower—A Case Study of Qinghe County, Altay, Xinjiang

MA Yu^{1,2}, WANG Xi-yuan¹, WANG Zhi-qiang^{1,2} et al (1. College of Resources and Environmental Science, Xinjiang University, Key Laboratory of Smart City and Environmental Modeling for Autonomous Regional Universities, Urumqi, Xinjiang 830046; 2. Xinjiang Key Laboratory of Oasis Ecology, Urumqi, Xinjiang 830046)

Abstract Sampling surveys of edible sunflowers grown on a large scale in Qinghe County, Altay Prefecture and the soil of their planting areas were carried out using single factor index method and Nemerow index method, bioconcentration coefficient, target hazard coefficient and hazard index for evaluation. The results showed that the content of heavy metals Cr, Cu, Zn, As, and Cd in sunflower planting soil all exceeded the background value in Altay region; sunflower hair roots and seeds have a strong ability to absorb various heavy metals, and the content of Cd and Cr in the seeds is relatively high, which may easily cause health risks; sunflower had a strong ability to transfer Cr, Cu, Zn, and Cd, among which the aboveground part had a high enrichment coefficient of Cr and Cd; the high risk index of As and Cr in seeds poses a greater threat to the health of adults; the estimation of the hazard index shows that the accumulation of heavy metals will cause great harm to human body. It is suggested that the local planting methods should be changed to crop rotation, and proper use of fertilizers and pesticides should be used to uproot plants during harvesting to reduce the accumulation of heavy metals in the soil.

Key words Sunflower; Heavy metal pollution; Single factor exponential method; Enrichment coefficient; Health risks

向日葵作为我国五大油料作物之一, 在东北、西北和华北地区都有大面积种植^[1], 种植面积约为 113.09 万 hm^2 , 葵花籽年产量接近 200 万 t, 经济价值十分可观。相比于玉米、紫花苜蓿及芥菜, 向日葵对镉、铅等多种重金属具有较强的富集能力^[2-3]。目前, 向日葵已被作为一种重金属富集植物进行了深入研究^[4], 但有关重金属污染向日葵导致的食物安全性评价的研究相对较少。在当前大规模种植的背景下, 施加含有重金属的化肥和农药后, 向日葵可食用部分受到污染, 最终可能会威胁人类健康。因此, 该研究以阿勒泰地区清河县大规模种植的食用向日葵为研究对象, 评价种植土壤中重金属的累积, 以及向日葵富集重金属而产生的人体健康风险, 旨在为当地发展绿色农业, 提升食品安全性提供有价值的信息和科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况 新疆阿勒泰地区青河县地处准噶尔盆地东北边缘, 阿尔泰山东南麓, 西邻富蕴县, 南连昌吉州奇台

县, 东北与蒙古国接壤, 是阿勒泰地区最东边的一个县。属大陆性北温带干旱气候, 冬季漫长而寒冷, 夏季凉爽, 年降雨量少, 蒸发量大。极端最低气温为 $-53\text{ }^\circ\text{C}$, 年平均气温 $0\text{ }^\circ\text{C}$, 年均降水量 165 mm, 蒸发量达 1 495 mm; 无霜期平均为 103 d。2020 年食用向日葵在新疆阿勒泰地区的种植面积达到 3.90 万 hm^2 , 占阿勒泰地区作物总播种面积的 14.3%。其中青河县种植面积为 0.482 万 hm^2 , 占青河县经济作物总种植面积的 74.8%, 研究区位于青河县阿克达拉镇阿魏灌渠垦区, 食用向日葵是当地最主要的经济作物之一。

1.2 样品采集与处理 选取连种 3 年向日葵的大田土壤为研究对象。采样点位于阿勒泰地区青河县阿克达拉镇阿魏灌渠渠首片区 (3 灌区), 面积约 270 hm^2 ($46^\circ 21' 14''\text{N}$, $90^\circ 06' 12''\text{E}$), 向日葵产量为 13~17 kg/hm^2 , 葵花籽主要外销。经对该地种植户的访问得知, 当地采用地膜覆盖作物, 通过滴灌形式浇水、施肥和撒农药。采样时间为 2019 年 11 月 28 日, 参照《土壤环境检测技术规范》, 分别采大田表层 (0~20 cm) 土壤以及向日葵根际土壤, 在室温 ($20\sim 24\text{ }^\circ\text{C}$) 下自然风干, 过 200 目尼龙筛网去除杂质和其他碎屑后用于检测。向日葵样品的采集为随机选取 15 株, 分成根部、秸秆、花头、籽粒, 用去离子水充分冲洗以去除黏附于其上的杂质, 冲洗至少 3 遍。然后沥去水分并用滤纸吸去表面水分, 样品碾碎、混匀, 然后烘干 (先于 $105\text{ }^\circ\text{C}$ 下杀青 30 min, 然后在

基金项目 新疆维吾尔自治区自然科学基金(2019D01C068); 伊犁哈萨克自治州阿勒泰地区科学技术局项目“阿勒泰山水林田湖草生命共同体机制机理与关键修复技术研究”(专题 4)。

作者简介 马玉 (1995—), 女, 新疆乌鲁木齐人, 硕士研究生, 研究方向: 干旱土壤污染防治与治理。* 通信作者, 副教授, 硕士生导师, 从事环境科学研究。

收稿日期 2021-03-26

85 ℃ 烘箱中烘 1~2 h 至恒重), 烘干后将向日葵的主根和毛根分开, 再将花头、秸秆、籽粒和毛根用研磨机粉碎后过 40 目筛后用于检测。

1.3 样品分析方法 以铜(Cu)、锌(Zn)、铬(Cr)、镉(Cd) 4 种常见重金属和类金属砷(As)为研究对象, 分析它们在土壤和植物中的分布情况。土壤样品根据 GB/T 17141—1997《土壤质量 铅、镉的测定 石墨炉原子吸收分光光度法》、HJ 491—2019《土壤和沉积物铜、锌、铅、镍、铬的测定 火焰原子吸收分光光度法》的测定方法, 对土壤样品中 Pb、Cd、As 和 Cu 含量进行样品的制备和测试。Pb、Cd 和 Cu 含量采用原子吸收光谱仪进行测定; As 含量采用原子荧光光谱仪进行测定。

向日葵样品根据 GB 5009.15—2014《食品安全国家标准 食品中镉的测定》、GB 5009.14—2017《食品安全国家标准 食品中锌的测定》、GB 5009.11—2014《食品安全国家标准 食品中总砷及无机砷的测定》、GB 5009.123—2017《食品安全国家标准 食品中铬的测定》的测定方法和 GB 5009.13—2017《食品安全国家标准 食品中铜的测定》的测定方法, 向日葵中重金属元素 Pb、Cd 和 Cu 含量测定采用原子吸收光谱仪进行, As 含量测定采用原子荧光光谱仪进行。

1.4 土壤重金属污染评价方法 采用单因子污染指数法与内梅罗污染指数法评价大田土壤以及向日葵根际土壤中重金属污染程度。该研究参考 GB 15618—2018《土壤环境质量 农用地土壤污染风险管控标准(试行)》中的农用地土壤污染风险筛选值和 NY-T 391—2013《绿色食品产地环境质量》的土壤环境质量要求(表 1)。

表 1 评价标准

Table 1 Evaluation standard

元素 Element mg/kg	风险筛选值(pH≥7.5) Risk screening value (pH ≥7.5)	绿色食品产地环境质量(pH≥7.5) Green food production environment quality(pH ≥7.5)
As	25.0	20.0
Cu	100.0	60.0
Zn	300.0	—
Cd	0.6	0.4
Cr	250.0	120.0

单因子污染指数计算公式:

$$P_i = C_i / S_i \quad (1)$$

式中, P_i 为该污染物的指数, C_i 为该污染物实测值, S_i 为该污染物评价标准值。

为了研究高质量分数重金属对环境质量的影响作用, 还需要采用综合污染指数进行评价, 如内梅罗污染指数, 计算公式为:

$$P_c = [(P_{ave}^2 + P_{max}^2) / 2]^{1/2} \quad (2)$$

式中, P_c 为内梅罗综合污染指数, P_{ave} 为单因子污染指数的算术平均值, P_{max} 为单因子污染指数的最大值。

国家土壤环境质量标准对土壤污染程度的等级划分见表 2。

1.5 生物富集系数 生物富集系数(BCF)是植物体内重金

表 2 土壤重金属污染评价分类标准

Table 2 The classification standard of soil heavy metal pollution evaluation

等级 Class	P_i	P_c	污染等级 Class of pollution	污染水平 Level of pollution
1	$P_i \leq 0.7$	$P_c \leq 0.7$	安全	无污染
2	$0.7 < P_i \leq 1.0$	$0.7 < P_c \leq 1.0$	警戒级	较适宜
3	$1.0 < P_i \leq 2.0$	$1.0 < P_c \leq 2.0$	轻微污染	可能污染土壤和植物
4	$2.0 < P_i \leq 3.0$	$2.0 < P_c \leq 3.0$	中度污染	轻微污染土壤和植物
5	$P_i > 3.0$	$P_c > 3.0$	严重污染	严重污染土壤和植物

属质量分数与土壤中相应重金属质量分数的比值, 反映植物对土壤中重金属元素吸收积累的难易程度, 是植物富集重金属能力的评价指标。BCF>1 时, 植物体内重金属含量大于植物生长土壤环境中的重金属含量, 可以用于土壤重金属污染修复^[5]。植物体内重金属超标倍数(TON)采用植物正常含量为参考值^[6]进行计算, 度量植物污染的相对程度。计算公式:

$$BCF = \omega / \omega_{soil} \quad (3)$$

$$BCF_{root} = \omega_{root} / \omega_{soil} \quad (4)$$

式中, BCF、BCF_{root} 分别为地上部各部分、根部生物富集系数。 ω 、 ω_{root} 、 ω_{soil} 分别为植物地上部各部分、植物根部、根系土壤的重金属质量分数, 单位为 mg/kg。

生物转移系数(BTF)是植物地上部重金属含量与植物根部重金属质量分数之比, 反映重金属在植物体内的迁移能力。BTF>1 时, 植物将根部吸收的重金属元素转运到地上部分。计算公式:

$$BTF = \omega_{above} / \omega_{root} \quad (5)$$

式中, BTF 为生物转移系数, ω_{above} 、 ω_{root} 分别为植物地上部、植物根部的重金属质量分数, 单位为 mg/kg。

1.6 健康风险评估方法 靶标危害系数(THQ)常用于重金属经口摄入后的非致癌健康风险评估。当 THQ<1 时, 表明该种重金属元素对人体健康没有造成威胁。

单一重金属的健康风险:

$$THQ = (E_D \times E_F \times E_{IR} \times C) \times 1000 / (0.5R_f D \times W_{AB} \times T_A) \quad (6)$$

式中, E_D 为暴露时间, 通常等于人均寿命, 一般取 70 a^[7]; E_F 为人群暴露频率, 一般设定为 365 d/a^[8]; E_{IR} 为摄入量, 成人与儿童分别设定为 15、5 g/d; C 为蔬菜中重金属含量; R_f 为参考剂量, Cd、As、Cu、Zn、Cr 分别为 0.000 5、0.000 3、0.040 0、0.150 0、0.001 5 mg/(kg·d)^[8]; W_{AB} 为平均体重, 成人与儿童分别设为 55.9 和 32.7 kg^[9-10]; T_A 为非致癌性平均暴露时间, 取 25 550 d。

危害指数(HI)表示所有重金属的风险系数之和, 计算公式:

$$HI = \sum_{i=0}^n THQ_i \quad (7)$$

式中, i 为某种重金属。当危害指数小于 1 时, 认为人体负荷的重金属对人体健康造成的影响不明显; 若危害指数大于 1, 则认为人体负荷的重金属危害到人体健康。

1.7 数据处理与分析 试验数据采用 Excel 2016 进行整理;

试验作图采用 Origin 9.0 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤重金属含量水平 大田土壤中 5 种元素的含量排序为 Cr>Zn>Cu>As>Cd(图 1)。其中 Cd 的含量远低于其他元素,而 Zn 和 Cr 的含量较高,这与马添翼^[11]的研究结果一致,说明在此地区内存在一定的重金属污染。As 的平均值为 16.200 mg/kg,高于阿勒泰地区环境背景值 7.290 mg/kg,略小于全国土壤环境背景值 17.000 mg/kg,说明在此地区内存在一定的 As 污染,但不影响农业生产安全。Cu 的平均值为 42.730 mg/kg,高于阿勒泰地区环境背景值 28.750 mg/kg 和全国土壤环境背景值 20.000 mg/kg,说明 Cu 对当地农田的土壤产生了一定危害,但不一定影响该地区的植物与动物健康。Zn 的平均值为 84.070 mg/kg,接近阿勒泰地区土壤环境背景值 82.350 mg/kg,远高于全国土壤背景值 71.000 mg/kg,说明在该地区可能产生了 Zn 污染。Cd 的平均值为 0.203 mg/kg,略高于阿勒泰地区环境背景值 0.140 mg/kg,且高于全国土壤环境背景值 0.080 mg/kg,说明 Cd 对当地土壤产生了一定的污染。Cr 的平均值为 85.300 mg/kg,高于阿勒泰地区土壤环境背景值 54.000 mg/kg,且高于全国土壤环境背景值 70.000 mg/kg,Cr 含量对该地区土壤环境形成一定威胁,可能会影响植物生长和农产品安全。

2.2 土壤重金属污染评价 以向日葵大田土壤和根际土壤重金属进行单因子污染指数和内梅罗综合指数评价(表 3),结果表明:大田土壤中各重金属平均单项污染指数依次为 As>Cu>Cr>Cd>Zn,As 与 Cu 元素的平均值均超过了 0.7,处

于“警戒级”、接近“轻微污染”的程度,说明这两种元素对当地的土壤质量产生了不良影响。根际土壤中各重金属平均单项污染指数依次为 Cr>As>Cu>Cd>Zn,其中 As 和 Cu 的污染等级处于“警戒级”,说明这两种元素造成了局部污染。根据内梅罗指数结果,As、Cu、Cr 的含量超过污染临界值,对土壤和作物开始产生影响,其中 Cr 在根际土壤中的污染等级为“轻微级”。

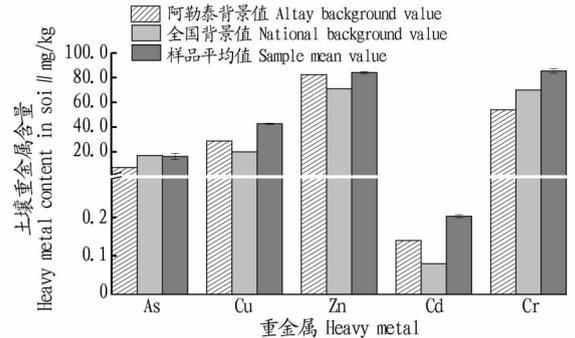


图 1 土壤样品的重金属含量与背景值

Fig.1 Content and background values of heavy metals in soil samples

大田土壤和根际土壤中元素 As 和 Cu 的污染等级相同,说明这两种元素在土壤中是均匀分布的。Cr 在根际土壤中的污染等级高于在大田土壤中的等级,说明 Cr 正在向植物所在的土壤迁移。植物正常生长发育不需要大量 Cr,因此,它被认为是非必需的植物营养物质,并根据其浓度引起植物毒性^[12]。应关注后续耕作中 Cr 对土壤环境质量的污染状况。

表 3 向日葵土壤重金属污染状况

Table 3 Soil heavy metal pollution of sunflower

重金属元素 Heavy metal element // mg/kg	大田土壤 The field soil				污染等级 Pollution levels	根际土壤 Rhizosphere soil				污染等级 Pollution levels
	P_{min}	P_{max}	P_{ave}	P_c		P_{min}	P_{max}	P_{ave}	P_c	
As	0.625	0.935	0.810	0.875	警戒级	0.725	0.925	0.818	0.873	警戒级
Cu	0.707	0.723	0.712	0.718	警戒级	0.725	0.763	0.745	0.754	警戒级
Zn	0.276	0.283	0.280	0.281	安全	0.270	0.287	0.280	0.283	安全
Cd	0.493	0.518	0.508	0.513	安全	0.460	0.478	0.470	0.474	安全
Cr	0.698	0.731	0.520	0.721	警戒级	0.998	1.132	1.043	1.088	轻微污染

2.3 向日葵不同部位中重金属含量特征 根据 5 种重金属元素中向日葵各部分的含量及分布可知(图 2),向日葵的毛根和籽粒对各个重金属的吸收能力较强。其中,As 主要集中在向日葵的毛根中,比例达 57%,曾小飏等^[13]研究表明,低浓度的 As 在一定程度上可以增强根系活力,但随着 As 胁迫浓度的增大,向日葵根系活力则表现出下降趋势,这可能是毛根吸附 As 的原因。Cu 在向日葵的体内主要分布在毛根和籽粒中。Cd 在向日葵体内各部分的分布差异较小,向日葵植株对 Zn 富集效果最好的是根部和籽粒,这与吴运东等^[14]的研究结果一致。Rivelli 等^[15]研究表明,向日葵在根部积累 Zn 以保存光合组织。Cr 主要集中在根部和籽粒中,Stoikou 等^[16]研究证明向日葵的根部可积累大量的 Cr。根据重金属在向日葵体内的总值来看,Cr 的含量相对较高,Cd 的

含量相对较低,说明向日葵对 Cr 具有较强的吸收偏好。

2.4 生物富集指数 重金属经植物根系吸收后,通过木质部向地上部运输,在一些转运体或螯合剂的作用下,完成其在植物体内的积累和分布定位过程^[17],因此可通过计算向日葵体内各部分重金属元素的富集指数来表明重金属分布及迁移。

结合表 4 与图 3 可知,向日葵地上部对 Cd 的富集系数达到 1.677>1,说明向日葵对 Cd 具有一定的富集能力,这与龙婵等^[18]的研究结果一致。王永芬等^[19]发现当土壤 Cu 浓度较高时,地上部对 Cu 有较高的积累,集中收获地上部分可转移出土壤中过多的 Cu。由表 4 可知,Cu 的转移系数为 1.467>1,说明向日葵地上部对 Cu 有一定的转移能力。Zn 的转移系数也>1,杨翠凤等^[20]证明向日葵幼苗根部吸收的部

分 Zn 可以通过有效途径输送并保存到其他器官中。As 的转移系数与生物富集系数均未达到 1,说明向日葵对 As 的富集能力较弱。向日葵地上部对 Cr 的富集系数为 1.304,说明向日葵对 Cr 具有一定的富集能力,Cr 进入植物体内后由根

部向上转移,最后到籽粒,其中受到秸秆等的阻隔。除 As 以外其余元素地下部分的富集系数均小于地上部分,重金属从土壤转移到了植物体内,说明向日葵在生长过程中易受到重金属的胁迫,重金属更易富集在向日葵的秸秆、花头和籽粒。

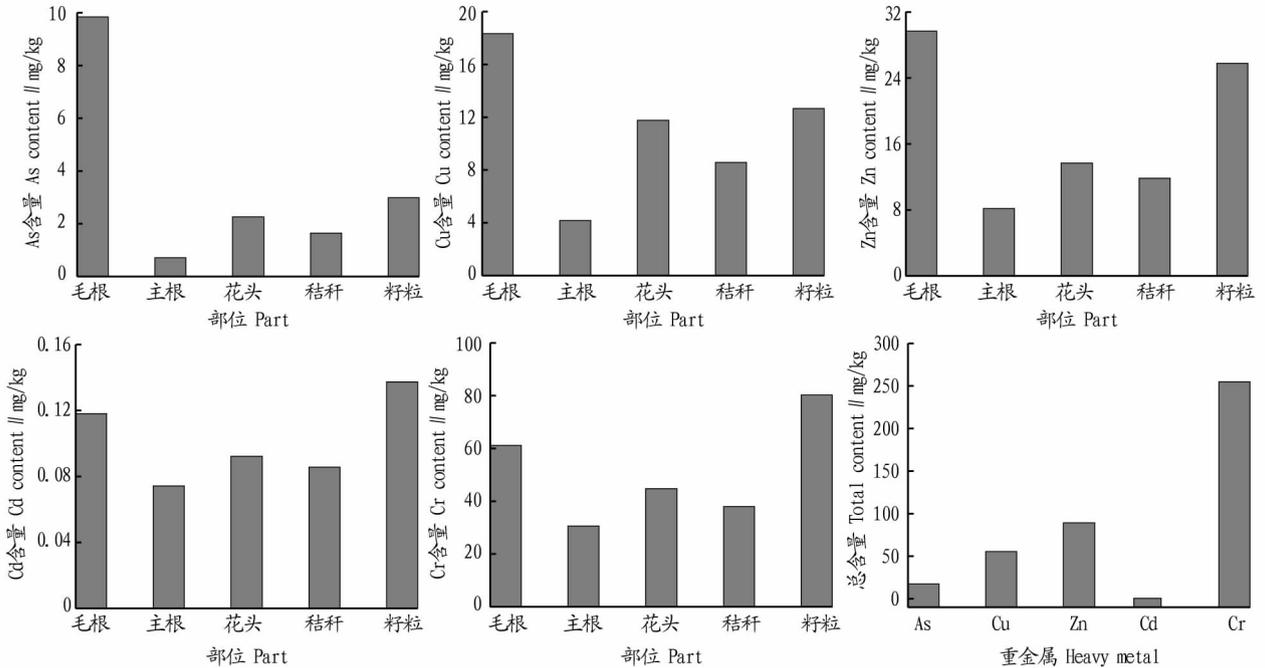


图2 5种元素在向日葵各部位的含量及分布

Fig.2 Content and distribution of five elements in various parts of sunflower

表4 向日葵各部分的富集系数与转移系数

Table 4 Enrichment coefficient and transfer coefficient of each part of sunflower

部分 Part	As		Cu		Zn		Cd		Cr	
	BTF	BCF								
花头 Flower heads	0.651	0.137	1.467	0.263	1.355	0.097	1.640	0.491	1.777	0.358
秸秆 Straw		0.100		0.192		0.141		0.456		0.304
籽粒 Grain		0.182		0.283		0.307		0.730		0.642
地上部 Aboveground part		0.419		0.738		0.545		1.677		1.304
地下部 Underground part		0.643		0.503		0.451		1.023		0.733

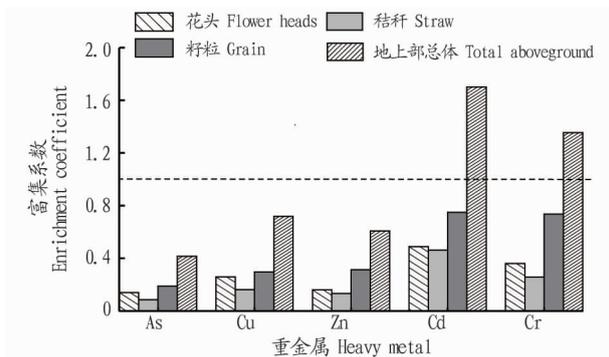


图3 地上部分重金属富集系数

Fig.3 Enrichment coefficient of heavy metals in the overground part

2.5 向日葵健康风险评估 依据向日葵成品入口的重金属平均含量及儿童与成人每日对向日葵籽粒及向日葵制作的食用油的消耗量,对儿童与成人两种人群分别进行了向日葵中重金属的靶标危害系数与危害指数的估算(表5)。由表5

可知,对儿童与成人而言,As 的危害系数大于 1,说明 As 会对人体健康造成威胁。Cr 的危害系数远超过 1,说明该地区的 Cr 污染较严重,如果 Cr 进入人体内会对人体造成伤害,在成人体内这种伤害会更加明显。有研究证明 Cr 经人体对叶类蔬菜的摄入是造成 Cr 元素在人体富集的重要途径,必须改善 Cr 污染的蔬菜生长环境^[21]。同时,尽管其他重金属的 THQ 值未超过 1,但也不能保证是完全安全的。成人与儿童的 HI 值均超过 1,说明人体内负荷的重金属总值过高,会对人体健康造成威胁,这种威胁对儿童的影响更大。

3 讨论

3.1 土壤中重金属的来源分析 该研究中的 5 种重金属在土壤中的含量均超过阿勒泰地区的本底值,这可能与当地采用滴灌形式的水溶肥有关,由于肥料中含有少量重金属元素,特别是有机肥中重金属经常超标^[22-23],长期施用化肥或有机肥可能造成土壤重金属累积^[24-26]。例如当地使用的一种农药——代森锰锌中就含有重金属 Zn;有些农资也会含有少量重金属,例如塑料大棚和地膜中就将 Cd 用作生产农

用薄膜的热稳定剂^[27]。但由于重金属含量较低且分布均匀,故还未对土壤形成较大的伤害。

表 5 向日葵体内重金属健康风险指数

Table 5 Health risk index of heavy metals in sunflower

重金属 Heavy metal	R _F D mg/(kg·d)	THQ(成人) THQ(Aldult)	THQ(儿童) THQ(Child)
As	0.001	2.660	1.515
Cu	0.080	0.085	0.048
Zn	0.300	0.046	0.026
Cd	0.001	0.074	0.042
Cr	0.003	14.365	8.186
HI	—	9.818	17.229

3.2 向日葵富集重金属的特征分析 该研究中 Cr 在根际土壤中的污染等级高于大田土壤,说明 Cr 有向植物所在地迁移的趋势。已有研究^[28]表明向日葵的根可以聚集大量的 Cr,只有少量的 Cr 转移到嫩枝,这与耐 Cr 细菌对根系浓度的影响大于茎部浓度有关^[29]。但笔者的研究表明,Cr 不仅仅大量存在根系中,在籽粒中的含量也较高,可能是由于向日葵品种不同,且该次研究的是籽粒成熟期后的向日葵,未在向日葵幼苗时期就对其采样分析,针对这一不足,后期研究可针对 Cr 展开详细研究。

研究表明,向日葵对 Cu、Pb、Zn 等重金属有富集特性^[30]。有学者^[31]认为,向日葵倾向于在根中储存和累积 Zn 和 Cu,从根到芽的转移效率很低^[32];郭平等^[33]的研究表明:向日葵幼苗的根部可富集大量的 Cu,限制其向茎叶运输。但该研究结果表明籽粒中也储存了大量 Zn 和 Cu,成熟的籽粒可能对 Cu 的富集作用更大,使得 Cu 由根部向籽粒部分迁移。随着向日葵的生长,芽变成籽粒的过程可能会影响重金属在各个部位的分布。

3.3 向日葵重金属污染评价 该研究向日葵的籽粒主要用作食品出口,因此,对食用向日葵的重金属健康风险评估极其必要。该地区 As 和 Cr 的健康风险指数显示,这两种重金属可能会对成人和儿童的健康产生危害。且当地采取连作的方式,会造成重金属积累,导致最终进入人体内的重金属含量更高。如不积极采取措施,该地种植的作物将对食用人群的健康产生危害。除了更换种植方式外,建议收割植物时将植物根部也移除,避免秸秆还田的情况,以免秸秆或根部枯萎后重金属元素再次回到土壤中,被下一轮种植的作物再次吸收。

4 结论

(1) 重金属元素在大田土壤的含量为 Cr>Zn>Cu>As>Cd。5 种重金属元素的含量均超过阿勒泰地区的本底值。向日葵的毛根和籽粒对各个重金属的吸收能力较强,在籽粒中 Cd 与 Cr 的含量较高,入口的风险极大,易对人体健康造成威胁。在后续耕作中建议采用轮作方式,减少重金属在土壤中的积累。

(2) 大田土壤和根际土壤中 As、Cu 和 Cr 元素的污染等级主要为警戒级和轻微污染。向日葵对 Cu、Zn、Cd、Cr 4 种

元素的转移能力较强,能够从根部转移至地上部分,其中,向日葵地上部对 Cr 和 Cd 的富集系数较高,受这两种元素的影响较大。

(3) 向日葵中 As 和 Cr 元素的健康风险指数较高,会对人体造成负担,其中成人日常平均食用含量较高,对成人的健康威胁更大。根据危害指数的估算,重金属的累积对人体造成的危害较大,尤其是儿童。该地区的连作方式可能会造成重金属积累,最终使得通过食物链进入人体的重金属总量增加,危害人体健康。因此,该地区应更加重视化肥和农药的合理使用,向日葵的籽粒作为农产品外销时应注重对产品中重金属含量的监测,并且应注明其产地的土壤健康状况。

参考文献

- [1] 刘清,师建芳,赵威,等.向日葵副产物资源的综合利用[J].农业工程学报,2011,27(S2):336-340.
- [2] 王燕燕,徐镜波,盛连喜.不同作物种苗对水中重金属镉去除的比较研究[J].环境科学,2007,28(5):987-992.
- [3] 牛之欣,孙丽娜,孙铁珩.水培条件下四种植物对 Cd、Pb 富集特征[J].生态学杂志,2010,29(2):261-268.
- [4] AL-DHAIBANI A N, EL-NAKHLAWY F S, ALSOLAIMANI S G, et al. Phytoremediation of cadmium contaminated soil by sunflower [J]. Australian journal of basic & applied sciences, 2013, 7(7): 888-894.
- [5] 陈昌东,张安宁,腊明,等.平顶山矿区矸石山周边土壤重金属污染及优势植物富集特征[J].生态环境学报,2019,28(6):1216-1223.
- [6] 何东,邱波,彭尽晖,等.湖南下水湾铅锌尾矿库优势植物重金属含量及富集特征[J].环境科学,2013,34(9):3595-3600.
- [7] BENNETT D, KASTENBERG W E, MCKONE T E. A multimedia, multiple pathway risk assessment of atrazine: The impact of age differentiated exposure including joint uncertainty and variability [J]. Reliability engineering & system safety, 1999, 63(2): 185-198.
- [8] US EPA Region 3 Hazardous Site Division. Risk-Based Concentration Table FAQs [R]. Washington, DC: US EPA, 2000.
- [9] 陈鸿汉, 谏宏伟, 何江涛, 等. 污染场地健康风险评价的理论和方法[J]. 地学前缘, 2006, 13(1): 216-223.
- [10] 王宗爽, 段小丽, 王贝贝, 等. 土壤/尘健康风险评价中的暴露参数[J]. 环境与健康杂志, 2012, 29(2): 114-117.
- [11] 马添翼. 新疆阿勒泰地区土壤重金属空间分布特征与敏感性评价[D]. 长春: 吉林大学, 2019.
- [12] OLIVEIRA H. Chromium as an environmental pollutant: Insights on induced plant toxicity[J]. Journal of botany, 2012, 2012: 1-8.
- [13] 曾小颀, 黄开腾, 唐鑫, 等. 砷胁迫对向日葵幼苗生长影响的研究[J]. 安徽农学通报, 2020, 26(16): 28-29, 163.
- [14] 吴运东, 郭旭丽, 李朋朋, 等. 向日葵对重金属复合污染土壤中 Cd、Zn、Pb、Cr 的吸收和转运特性研究[J]. 湖南农业科学, 2020(9): 47-51.
- [15] RIVELLI A R, DE MARIA S, PUSCHENREITER M, et al. Accumulation of cadmium, zinc, and copper by *Helianthus annuus* L.: Impact on plant growth and uptake of nutritional elements [J]. International journal of phytoremediation, 2012, 14(4): 320-334.
- [16] STOIKOU V, ANDRIANOS V, STASINOS S, et al. Metal uptake by sunflower (*Helianthus annuus*) irrigated with water polluted with chromium and nickel [J]. Foods, 2017, 6(7): 1-14.
- [17] 马灏. 蓖麻、向日葵对 Cd 和 Zn 污染场地的原位修复试验研究[D]. 上海: 上海大学, 2015.
- [18] 龙婵, 王丹, 陈立, 等. 4 种植物激素对向日葵富集 U 和 Cd 的影响[J]. 环境工程学报, 2017, 11(5): 3251-3257.
- [19] 王永芬, 席磊. 向日葵对土壤中铜的积累作用研究[J]. 中国生态农业学报, 2006, 14(4): 131-133.
- [20] 杨翠凤, 滕峰, 李荣峰, 等. 向日葵对重金属胁迫的防御机制及其土壤修复效率提高途径[J]. 河南农业科学, 2018, 47(4): 1-7.
- [21] 陈志良, 黄玲, 周存宇, 等. 广州市蔬菜中重金属污染特征研究与评价[J]. 环境科学, 2017, 38(1): 389-398.
- [22] 穆虹宇, 庄重, 李彦明, 等. 我国畜禽粪便重金属含量特征及土壤累积风险分析[J]. 环境科学, 2020, 41(2): 986-996.
- [23] 王美, 李书田. 肥料重金属含量状况及施肥对土壤和作物重金属富集的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(2): 466-480.

表7 成分得分系数

Table 7 Component score coefficient

因子 Factor	主成分 1 Main component 1	主成分 2 Main component 2
X_1	0.077	0.047
X_2	0.077	0.047
X_3	0.075	-0.248
X_4	0.076	-0.149
X_5	0.076	0.102
X_6	0.077	-0.042
X_7	0.070	-0.421
X_8	0.074	-0.249
X_9	0.076	-0.167
X_{10}	0.072	0.347
X_{11}	0.077	0.027
X_{12}	0.075	0.201
X_{13}	0.056	0.699
X_{14}	0.770	-0.370

3 结论与建议

3.1 结论

(1) 合肥市土地利用信息熵上升,土地利用的有序程度降低,主要是由耕地景观转向了建设用地景观,主要原因是经济驱动力,同时人口驱动力起着协同作用。

(2) 根据分离度(SPLIT)、蔓延度指数(CONTAG)、聚合度(AI)3个方面相关指数变化,合肥市土地利用景观格局的碎片化程度是不断上升的,同时集散程度呈现集聚—扩散—集聚的变化特征。

(3) 根据最大斑块所占景观面积的比例(LPI)、香农多样性指数(SHDI)、香农均度指数(SHEI)3个方面相关指数的变化,合肥市土地利用景观格局的稳定性呈不稳定—稳定—不稳定的变化特征。

(4) 根据平均形状指数分布(SPAPE_MN)、平均分维数(FRAC_MN)、边缘面积分维(PAFRAC)3个方面相关指数变化,合肥市土地利用景观格局形状呈复杂—简单—复杂的变化特征。

3.2 建议

(1) 合肥市景观格局主要是由耕地景观转向了建设用地

景观,政府要保证耕地景观格局的稳定,实现保质保量的占补平衡,提高土地利用结构的有序性,保障土地利用信息熵的均衡。

(2) 从分离度(SPLIT)可以看出,由2010年的3.4765上升至2018年的3.7662,这体现着合肥市土地利用景观破碎化不断加剧,景观格局正在向着不利的方向演变,政府应该加大对土地集约、土地规模方向的发展。同时合肥市的最大斑块所占景观面积的比例(LPI)从2010年的50.9218%降低至2018年的48.4587%,土地景观的稳定性正在下降,政府保护产权的稳定,刺激单位和个人对土地的持续投入,保证土地利用的稳定性。并通过土地利用规划,结合国民经济计划,合理地规划土地利用的格局和结构。

(3) 引起格局转变的驱动力主要是经济因素和人口因素,经济驱动力和人口驱动力主要是外部驱动力,在发展经济的过程中要注意这些外部的人为演替对景观格局的影响,从而保证土地利用景观格局向稳定健康的方向发展。

参考文献

- [1] VAN JAARSVELD A S, BIGGS R, SCHOLES R J, et al. Measuring conditions and trends in ecosystem services at multiple scales: The Southern African Millennium Ecosystem Assessment (SAfMA) experience [J]. *Philosophical transactions of the royal society B*, 2005, 360(1454): 425–441.
- [2] 陈文波, 肖笃宁, 李秀珍. 景观指数分类、应用及构建研究 [J]. *应用生态学报*, 2002, 13(1): 121–125.
- [3] 黄玲. 乌鲁木齐县景观格局变化及其驱动力研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [4] 陈利顶, 刘洋, 吕一河, 等. 景观生态学中的格局分析: 现状、困境与未来 [J]. *生态学报*, 2008, 28(11): 5521–5531.
- [5] 刘颂, 郭菲菲, 李倩. 我国景观格局研究进展及发展趋势 [J]. *东北农业大学学报*, 2010, 41(6): 144–152.
- [6] 黄木易. 快速城市化地区景观格局变异与生态环境效应互动机制研究: 以杭州市为例 [D]. 杭州: 浙江大学, 2008.
- [7] 谭永忠, 吴次芳. 区域土地利用结构的信息熵分异规律研究 [J]. *自然资源学报*, 2003, 18(1): 112–117.
- [8] 王盼盼. 东北区县域土地利用景观格局演变及驱动机制研究 [D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2015.
- [9] 王玉明, 王瑞康. 城市化时期郊区土地利用结构信息熵上升的原因 [J]. *地理学报*, 2018, 73(9): 1647–1657.
- [10] 邵景安, 李阳兵, 魏朝富, 等. 区域土地利用变化驱动力研究前景展望 [J]. *地球科学进展*, 2007, 22(8): 798–809.
- [29] BAHADUR A, AHMAD R, AFZAL A, et al. The influences of Cr-tolerant rhizobacteria in phytoremediation and attenuation of Cr(VI) stress in agronomic sunflower (*Helianthus annuus* L.) [J]. *Chemosphere*, 2017, 179: 112–119.
- [30] RAHMAN M M, AZIRUN S M, BOYCE A N. Enhanced accumulation of copper and lead in amaranth (*Amaranthus paniculatus*), Indian mustard (*Brassica juncea*) and sunflower (*Helianthus annuus*) [J]. *PLoS One*, 2013, 8(5): 1–9.
- [31] MADEJÓN P, MURILLO J M, MARAÑÓN T, et al. Trace element and nutrient accumulation in sunflower plants two years after the Aznalcóllar mine spill [J]. *Science of the total environment*, 2003, 307(1/2/3): 239–257.
- [32] VAN DER LELIE D, SCHWITZGUÉBEL J P, GLASS D J, et al. Assessing phytoremediation's progress in the United States and Europe [J]. *Environmental science & technology*, 2001, 35(21): 446A–452A.
- [33] 郭平, 刘畅, 张海博, 等. 向日葵幼苗对 Pb、Cu 富集能力与耐受性研究 [J]. *水土保持学报*, 2007, 21(6): 92–95, 113.

(上接第87页)

- [24] 刘岫, 秦鱼生, 赵秀兰. 长期不同施肥对钙质紫色水稻土重金属累积及有效性的影响 [J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(7): 1494–1502.
- [25] NING C C, GAO P D, WANG B Q, et al. Impacts of chemical fertilizer reduction and organic amendments supplementation on soil nutrient, enzyme activity and heavy metal content [J]. *Journal of integrative agriculture*, 2017, 16(8): 1819–1831.
- [26] UPRETY D, HEJCMAN M, SZÁKOVÁ J, et al. Concentration of trace elements in arable soil after long-term application of organic and inorganic fertilizers [J]. *Nutrient cycle agroecosystem*, 2009, 85(3): 241–252.
- [27] 桑爱云, 张黎明, 曹启民, 等. 土壤重金属污染的植物修复研究现状与发展前景 [J]. *热带农业科学*, 2006, 26(1): 75–79.
- [28] TIWARI K K, DWIVEDI S, SINGH N K, et al. Chromium(VI) induced phytotoxicity and oxidative stress in pea (*Pisum sativum* L.): Biochemical changes and translocation of essential nutrients [J]. *Journal of environmental biology*, 2009, 30(3): 389–394.