

长期污灌农田土壤重金属污染及潜在环境风险评价

陈涛^{1,2}, 常庆瑞^{1,2*}, 刘京^{1,2}, 刘钊^{1,2}, 刘海飞^{1,2}

(1.西北农林科技大学资源环境学院, 陕西 杨凌 712100; 2.农业部黄土高原农业资源与环境修复重点开放实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:以西安市某典型污灌区农田土壤为研究对象,分析长期污水灌溉对表层土壤重金属含量及富集状况的影响,采用内梅罗指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法对其污染现状及潜在环境风险进行评价。结果表明:长期污灌已导致农田土壤 Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 7 种重金属相对自然背景有不同程度累积,其富集比例依次为 100%、82.69%、100%、100%、80.77%、98.08% 和 100%,仅有土壤 As 平均含量低于其背景水平;以国家土壤环境质量标准二级限量值作为污染评价阈值,其中 Cd 和 Hg 污染表现突出,按其污染指数平均值排序为 Cd>Hg>Ni>Cu>Zn>As>Cr>Pb;土壤重金属综合潜在环境风险为“强”等级,Hg、Cd 的环境影响占据主导;随污灌年限增长,离灌渠越近,农田土壤重金属的污染水平和环境风险越高。鉴于该区土壤重金属已呈现较强生态危害性,应及时采取必要防治措施,调整土地利用结构,确保农田环境及农产品安全生产。

关键词:污水灌溉;土壤重金属;污染评价;潜在环境风险评价

中图分类号:X825 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2012)11-2152-08

Pollution and Potential Environment Risk Assessment of Soil Heavy Metals in Sewage Irrigation Area

CHEN Tao^{1,2}, CHANG Qing-ru^{1,2*}, LIU Jing^{1,2}, LIU Zhao^{1,2}, LIU Hai-fei^{1,2}

(1.College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China; 2.Key Lab for Agricultural Resources and Environmental Remediation in Loess Plateau of Agriculture Ministry of China, Yangling 712100, China)

Abstract: In a typical sewage irrigation area, 52 surface soil samples were collected to determine total concentrations of arsenic (As), cadmium (Cd), chromium (Cr), copper (Cu), mercury (Hg), nickel (Ni), lead (Pb) and zinc (Zn). The Nemerow Synthesis Index and Hakanson's Environment Risk Index of soil heavy metals were evaluated and compared at different wastewater irrigation histories and distances from irrigation canal. The results showed that some soil heavy metals had been enriched in the topsoil due to long-term sewage irrigation. The mean concentrations of As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn were 9.88 mg·kg⁻¹, 1.45 mg·kg⁻¹, 88.41 mg·kg⁻¹, 52.24 mg·kg⁻¹, 1.38 mg·kg⁻¹, 34.14 mg·kg⁻¹, 55.01 mg·kg⁻¹ and 151.16 mg·kg⁻¹, respectively. In nearly half of samples, Cd and Hg concentrations have exceeded the pollution levels based on Chinese Environment Quality Standard for Soils, which have exhibited a very serious pollution trend. Based on the pollution index of eight elements, they followed: Cd>Hg>Ni>Cu>Zn>As>Cr>Pb. In addition, there existed extremely strong comprehensive environment risks for soil heavy metals, in which slight-strong ecological risk for Cd and strong ecological risk for Hg. The risk order of soil heavy metals is Hg>Cd>Pb>Cu>As>Ni>Cr>Zn. The comprehensive pollution index and ecological risk index of heavy metal increased with the increasing sewage irrigation histories and decreasing distances from irrigation canal. It is concluded that long-term wastewater irrigation was harmful to the ecological environment of farmland soils. In order to protect agricultural production safety and promote soil resource sustainable utilization, some necessary measures against soil heavy metal pollution in sewage irrigation farmland should be taken as soon as possible.

Keywords: sewage irrigation; soil heavy metal; pollution evaluation; potential environment risk assessment

收稿日期:2012-05-10

基金项目:国家教育部博士点专项基金(20090204120035);中国博士后科学基金(20090451399);西北农林科技大学“青年学术骨干支持计划”

作者简介:陈涛(1977—),男,河南鹤壁人,博士,讲师,主要从事农业资源与信息技术应用研究。E-mail:davidlp77@zju.edu.cn

通信作者:常庆瑞 E-mail:changqr@nwsuaf.edu.cn

中国是世界公认的 13 个贫水国之一，同时也是水污染较为严重的国家。为缓解农业用水，引污水灌溉农田在我国北方缺水地区非常普遍^[1]。污灌不仅能显著提高土壤肥力、促进粮食生产，还能有效缓解农业用水紧张，解决城市污水排放等问题。但与此同时，伴随污灌，也造成各种重金属元素在土壤中富集，通过土壤-作物系统中迁移和食物链传输，对人体健康构成严重威胁^[2-4]。

为促进区域生态环境建设和保障农产品安全，众多学者围绕污灌区土壤重金属环境容量^[5-7]、重金属在土壤-作物系统中赋存形态^[8-10]及迁移转化^[11-12]、土壤生物及上覆植被重金属污染响应^[13-16]、土壤重金属复合污染评价^[17-18]等方面开展了一系列研究，并取得丰硕成果。但相比较而言，针对我国西北干旱半干旱地区开展污灌农田土壤重金属潜在环境风险的研究则相对较少^[19]。为此，本文以西安市某典型污灌区为研究对象，系统分析长期污灌条件下土壤重金属 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 的含量及富集状况，并采用内梅罗指数法和 Hakanson 潜在生态危害指数法对该区土壤重金属污染现状与潜在环境风险进行评价，旨在为西北地区污灌农田土壤重金属污染防治、区域环境保护，以及土地利用结构调整提供必要理论及决策依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况及数据采集

研究区位于西安市西北郊沣惠渠灌区，面积

14.27 km²，介于北纬 34°18'~34°20'，东经 108°20'~108°50'之间，属暖温带半干旱大陆季风性气候，年均气温 13.4℃，平均降水量 580.17 mm，全年盛行东北风和西南风；该区地势平坦，海拔 380~385 m，成土母质为冲积性次生黄土，土层深厚，质地匀细，以黄绵土（按中国土壤系统分类为石灰干润锥形土，*Calcaric Ustic Cambosols*）为主，土壤养分含量较高。

本研究经多次实地走访、查阅相关资料，在当地农户协助下确定农田污灌年限及离灌渠距离，于 2010 年 5 月小麦收获前，按随机均匀布点方式采集农田土壤样品 52 份。在每个样点周围 5 m×5 m 正方形范围内设置 6~8 个样品采集点，在每个采集点用塑料铲取表层土壤（0~20 cm）0.5 kg，均匀混合后取 2 kg 装袋带回，并用 GPS 记录正方形中心位置为该采样点坐标，样点分布见图 1。采集土样在室内阴凉处自然风干，捡出石块、根须等异物，用木棒、玛瑙研钵等工具磨碎后过 100 目尼龙网筛，装瓶备用。土壤重金属含量（As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn）参照国家土壤环境质量标准（GB 15618—1995）^[20]进行测定，并在测试过程中加入标准土壤样品（GSS17 和 GSS19）进行质量控制，分析过程所用试剂为优级纯；土壤 pH 值按土水比 1:2.5 比例混合、搅拌、静置，pH 计测定。

1.2 土壤重金属污染及潜在环境风险评价方法

1.2.1 土壤重金属污染质量评价

本文以国家《土壤环境质量标准》（GB 15618—1995）中二级限量值作为污染评价参考值（表 1），采用单因子污染指数和综合污染指数，对 8 种土壤重金

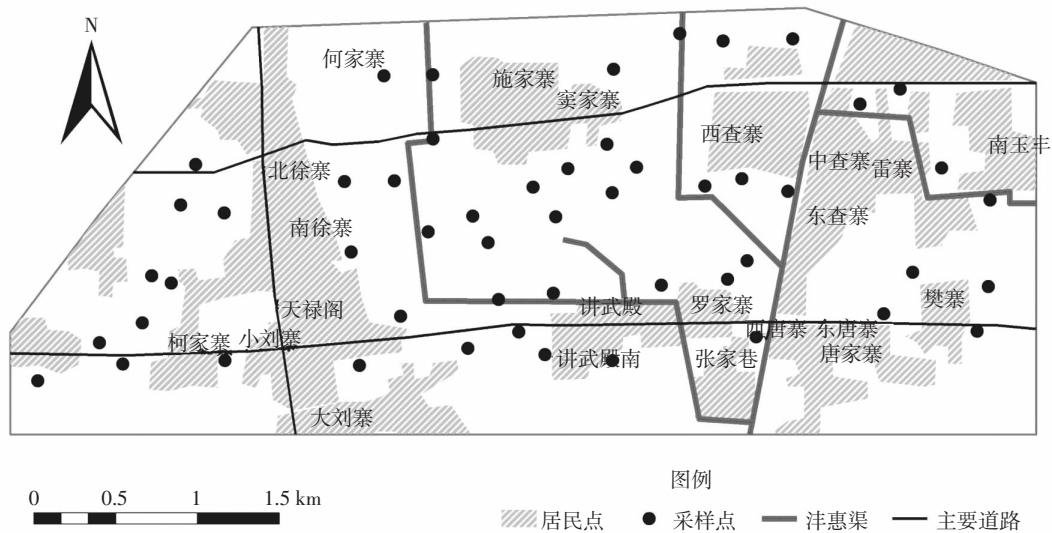


图 1 研究样区与采样点分布

Figure 1 The study area and sampling point distribution map

属污染进行评估。计算公式如下:

$$\text{单因子污染指数: } P_i = \frac{C_i}{S_i} \quad (1)$$

式中: P_i 为土壤重金属 i 的单项污染指数; C_i 是土壤重金属 i 的实测值; S_i 是重金属 i 的评价标准值。

$$\text{综合污染指数: } P_{\text{综}} = \sqrt{\frac{(\frac{C_i}{S_i})_{\text{mean}}^2 + (\frac{C_i}{S_i})_{\text{max}}^2}{2}} \quad (2)$$

式中 $(C_i/S_i)_{\text{mean}}$ 和 $(C_i/S_i)_{\text{max}}$ 分别为平均单因子污染指数和最大污染指数。

污染评价等级划分见表 2^[21]。

1.2.2 土壤重金属潜在环境风险评价

本研究采用 Hakanson 潜在生态危害指数法进行土壤环境风险评价。该方法综合考虑了多元素协同作用、毒性水平、污染浓度以及环境对重金属污染敏感性等因素,在环境风险评价中得到广泛应用^[19]。计算公式如下。

$$C_f^i = C_s^i / C_n^i \quad (3)$$

$$E_r^i = T_r^i \times C_f^i \quad (4)$$

$$RI = \sum_{i=1}^n E_r^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times C_f^i = \sum_{i=1}^n T_r^i \times \frac{C_i}{C_n^i} \quad (5)$$

式中: RI 为多元素环境风险综合指数; E_r^i 为第 i 种重金属环境风险指数; C_f^i 为重金属 i 相对参比值的污染

系数; C_i 为重金属 i 的实测浓度; C_n^i 为重金属 i 的评价参比值; T_r^i 为重金属 i 毒性响应系数,它主要反映重金属毒性水平和环境对重金属污染的敏感程度^[22]。在本研究中,8种土壤重金属毒性响应系数 T_r^i 参照 Hakanson^[23]和徐争启等^[24]研究结果设定(表3);为方便同类研究结果间比较,评价参比值 C_n^i 采用 Hakanson 提出的工业化前全球土壤(沉积物)最高背景值,由于 Hakanson 未提供元素 Ni 的评价参比值,本文以西安地区自然背景值替代。

潜在环境风险指数评价结果分级见表 4^[24]。

1.3 数据处理

在本研究中,对土壤重金属数据整理和描述统计用 Excel 2010 完成,统计分析用 SPSS 19.0 软件完成,研究区及样点分布图用 ArcGIS 9.3.1 软件完成。

2 结果与讨论

2.1 土壤重金属含量及富集状况

表 5 为研究区污灌农田土壤重金属描述统计结果。8种土壤重金属平均含量分别为 As 9.88 mg·kg⁻¹、Cd 1.45 mg·kg⁻¹、Cr 88.41 mg·kg⁻¹、Cu 52.24 mg·kg⁻¹、Hg 1.38 mg·kg⁻¹、Ni 34.14 mg·kg⁻¹、Pb 55.01 mg·kg⁻¹ 和 Zn 151.16 mg·kg⁻¹。经与当地背景值比较发现,Cd、Cr、

表 1 国家土壤环境质量标准二级限量值

Table 1 The limited values of soil heavy metal in Chinese Soil Environmental Quality Standard

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
标准限量值/mg·kg ⁻¹	25	0.6	250	100	1	60	350	300

表 2 土壤重金属污染评价分级标准

Table 2 The classification standards of soil heavy metal pollution evaluation

分级	$P_{\text{综}}$	污染等级	污染水平
1	$P_{\text{综}} \leq 0.7$	安全	清洁
2	$0.7 < P_{\text{综}} \leq 1$	警戒	尚清洁
3	$1 < P_{\text{综}} \leq 2$	轻度污染	土壤作物开始受到污染
4	$2 < P_{\text{综}} \leq 3$	中等污染	土壤作物均受中度污染
5	$P_{\text{综}} > 3$	严重污染	土壤作物均受污染相当严重

注:1级、2级适宜发展无公害食品生产。

表 3 重金属的毒性响应系数和评价参比值

Table 3 Reference C_n^i and toxic coefficient T_r^i of different heavy metals

元素	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
C_n^i /mg·kg ⁻¹	15	0.5	60	30	0.25	31.2	25	80
T_r^i	10	30	2	5	40	5	5	1

注: Ni 的评价参比值 C_n^i 采用西安土壤背景值替代,其余元素采用 Hakanson 提出的工业化前土壤(沉积物)最高背景值。

Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 7 种元素的平均含量均高于自然背景水平, 其中 Cd、Cu、Hg 和 Zn 的富集比例达到 100%, Cr、Ni 和 Pb 的样品富集个数也分别有 43、42 和 51 个; 在 8 种土壤元素中, 仅有 As 的平均含量略低于背景水平; 按富集比例排序为 $Cd=Cu=Hg=Zn>Pb>Cr>Ni>As$, 前 7 种元素在表层土壤中已呈现不同程度累积, 仅有 As 保持相对清洁。此外, 通过比较各元素富集倍数还发现, 土壤 Hg 和 Cd 的平均含量分别达到西安地区背景含量的 10 倍和 5 倍, 表明该区由于长期污水灌溉, 已导致农田土壤 Hg、Cd 元素的显著富集, 应引起农业环境部门重视。

在地球环境化学中, 土壤元素的累积通常伴随变异性的增强^[27]。因此, 作为反映环境变量总体波动特征的参数——变异系数, 在一定程度上可用于表征各元素的累积状况^[27]。由表 5 可知, 8 种土壤重金属变异系数介于 10%~90% 之间, Cd 的变异系数最大, 为 85.84%, 其次为 Zn 和 Hg, 分别为 64.29% 和 61.68%, As 的变异系数最小, 仅为 12.86%。土壤重金属按其变异系数大小可排序为 $Cd>Zn>Hg>Cu>Cr>Pb>Ni>As$ 。其中, Ni 和 As 的变异系数介于 10%~15% 之间, 属弱变异, 反映该两种元素可能受自然成土因素长期均一化作用, 所受人干扰较少, 致使其变幅较小; 其

余 6 种元素的变异系数主要集中在 25%~100% 之间, 属中等强度变异。由此不难发现 Cd、Cr、Cu、Hg、Pb 和 Zn 除了具有较高富集系数外, 同时还具有较大变异性, 这预示着长期污灌对其含量分布存在更多人为因素的扰乱。

2.2 土壤重金属污染评价

经上述统计, 发现 Hg、Cd、Zn、Cu、Pb、Cr 和 Ni 已在表层土壤中有不同程度富集。为合理规划农业生产结构, 保障土壤资源可持续利用, 本研究选用国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995) 作为污染评价阈值, 对 8 种重金属污染现状进行评价, 结果见表 6。

由于该区土壤 pH 值介于 7.91~8.89 之间, 呈微碱性环境, 故选择国家土壤环境质量标准 $pH > 7.5$ 的二级限量值作为污染判断阈值(表 1)。由表 6 可知, 8 种土壤重金属中, 仅有 Cd、Hg 的单项污染指数平均值大于 1, 分别为 2.42 和 1.38, 属中度污染和轻度污染; 其余 6 种元素的污染指数均低于 0.70, 总体为清洁水平。按单因子污染指数平均值依次排序为 $Cd>Hg>Ni>Cu>Zn>As>Cr>Pb$ 。

分别将 52 份土壤样品的重金属含量与污染限量值比较后发现: ①所有样品 As、Ni、Pb 含量均低于国家土壤环境质量二级标准 25、60 $mg \cdot kg^{-1}$ 和 350 $mg \cdot$

表 4 环境风险指数 E_i^i 和 RI 的分级标准

Table 4 Classification standard of E_i^i and RI

E_i^i	单污染物环境风险程度	RI	综合环境风险程度
$E_i^i \leq 40$	轻微	$RI \leq 150$	轻微
$40 < E_i^i \leq 80$	中等	$150 < RI \leq 300$	中等
$80 < E_i^i \leq 160$	强	$300 < RI \leq 600$	强
$160 < E_i^i \leq 320$	很强	$RI > 600$	极强
$E_i^i > 320$	极强		

表 5 污灌区农田土壤重金属含量描述统计

Table 5 Descriptive statistics of farmland soil heavy metal contents in sewage irrigation area

元素	平均值±标准差/ $mg \cdot kg^{-1}$	最小值/ $mg \cdot kg^{-1}$	最大值/ $mg \cdot kg^{-1}$	变异系数/%	背景值/ $mg \cdot kg^{-1}$	富集个数/ 个	富集比例/%	富集倍数
As	9.88±1.27	6.28	12.96	12.86	11.70	5	9.62	0.84
Cd	1.45±1.24	0.37	5.60	85.84	0.29	52	100	5.00
Cr	88.41±42.14	66.57	313.94	42.67	70.80	43	82.69	1.25
Cu	52.24±22.82	30.23	145.36	43.69	26.00	52	100	2.01
Hg	1.38±0.85	0.52	5.05	61.68	0.13	52	100	10.62
Ni	34.14±4.80	27.92	49.87	14.05	31.20	42	80.77	1.09
Pb	55.01±14.48	37.69	117.62	26.32	38.80	51	98.08	1.42
Zn	151.16±97.18	88.83	600.59	64.29	64.00	52	100	2.36

注: 土壤背景值来源于文献[25-26]; 富集比例为超过自然背景值的样品个数占总样品个数的比例; 富集倍数=平均值/背景值。

表6 污灌区土壤重金属污染状况

Table 6 The pollution status of farmland soil heavy metals in sewage irrigation area

元素	污染指数平均值	污染指数变幅	样品污染指数的分级/个				
			$P_i \leq 0.7$ 安全	$0.7 < P_i \leq 1$ 警戒	$1 \leq P_i < 2$ 轻度污染	$2 \leq P_i < 3$ 中度污染	$P_i \geq 3$ 重度污染
As	0.40	0.25~0.52	52	0	0	0	0
Cd	2.42	0.61~9.33	6	4	20	10	12
Cr	0.35	0.27~1.26	50	0	2	0	0
Cu	0.52	0.30~1.45	47	2	3	0	0
Hg	1.38	0.52~5.05	8	14	22	4	4
Ni	0.57	0.47~0.83	48	4	0	0	0
Pb	0.16	0.11~0.34	52	0	0	0	0
Zn	0.50	0.30~2.00	47	3	1	1	0
$P_{\text{综}}$	1.99	0.53~6.70	2	10	23	8	9

kg^{-1} ,属清洁或警戒水平;②所有样品中,有2~3份土样的Cr、Cu和Zn含量高于其对应限量值,达到污染水平,其中有1份样品的Zn含量超过污染标准($300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)2倍,属中度污染,其余为轻度污染;③对于Cd、Hg而言,则分别有42份和30份样品的污染指数大于1,其余未超过污染标准,在所有已污染样品中,分别有38.46%和42.31%的样品Cd、Hg含量达到表2所规定的轻度污染,19.23%和7.69%处于中度污染,剩余23.08%和7.69%达到重度污染;④由于该区土壤Cd、Hg污染较为普遍,已导致所有样品综合污染指数较高,其中76.92%的样品受到不同程度污染,仅有不足5%的样品综合污染指数低于0.7,处于安全水平。

从评价结果来看,该区农田土壤Cd、Hg、Cr、Cu、Zn 5种元素已表现出不同程度污染,其中Cd和Hg污染尤为严重。由于国家《土壤环境质量标准》中Pb、Cu和Zn的污染限量值分别为 350 、 $100 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $300 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,尽管此3种元素的富集比例均已超过98%,但其含量仍远低于污染限量值,从而导致其污染指数普遍较低;而对于Ni而言,即使其富集倍数仅为自然背景水平的1.09倍,但由于其污染限量值仅为 $60 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,从而导致其平均污染指数仍较高于Cu、Zn、Pb等元素。

2.3 土壤重金属环境风险评价

8种土壤重金属的环境风险系数(E_i^r)及综合危害指数(RI)如表7所示。由表可知:①As、Cr、Cu、Ni、Pb和Zn 6种元素的环境风险指数 E_i^r 均低于40,其污染风险轻微;②而对于Cd元素而言,仅有30.77%的土样污染风险处于轻微水平,其余69.23%的 $E_i^r \geq 40$,其中, $80 \leq E_i^r < 160$ 的样品占25.00%, $E_i^r \geq 160$ 的样品

达到13.46%,总体上讲该区土壤Cd具有较强环境风险;③相对元素Cd、Hg的毒性响应系数则更高($T_i^r = 40$),其平均 E_i^r 值达到了221.57,具有强污染风险,在52份土壤样品中,Hg的 E_i^r 均大于80,其中介于80~160之间的样品占42.31%,而大于160的样品则有57.69%,可见该区土壤具有极强Hg污染风险,应高度重视;④按照各元素平均 E_i^r 大小排序为 $\text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb} > \text{Cu} > \text{As} > \text{Ni} > \text{Cr} > \text{Zn}$ 。

本区土壤Cd、Hg具有较强污染风险,从而导致其综合环境风险增强,平均RI值达到335.16,总体处于强风险水平;在52份土壤样品中,51.93%的样品呈现“强”或“极强”环境危害。可见,长期污水灌溉已对当地农业安全生产构成严重威胁。

在本研究中,土壤重金属污染评价结果与环境风险评价结果之间存在一些差异,主要区别在As、Pb和Zn 3种元素。As虽在本研究中富集倍数最低,尚未受到污染,但由于其生物毒性效应较高($T_i^r = 10$),其环境风险也随之上升;反之,由于Zn是一种重要的植物营养元素,其毒性响应系数最小(仅为1),其环境风险亦降至最低;而元素Pb由于其风险评价参比值较低($C_n^i = 25 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$),导致其在环境风险中的排序相对污染排序有所上升。

在本研究中,污染评价是通过实测值与国家土壤环境质量标准限量值比较而实现的,主要侧重揭示外源重金属的土壤累积程度,强调农田土壤按照国家限量标准是否达到污染水平;而环境风险评价则除了考虑工业化以来各种人为因素引起表层土壤重金属累积程度外,还侧重考虑了不同元素对生物的毒性影响,并通过加权求和突出了多元素污染风险的协同效应,这为决策者从作物安全角度理解重金属污染、进

行科学决策提供了更丰富的信息^[28-29]。

2.4 污灌年限及距离灌渠远近的影响

由于污灌历史长短不同,土壤重金属污染及其环境风险存在较大差异。图 2 为不同污灌年限的农田土壤重金属污染指数及风险指数的多重比较结果。由图可知,污灌 20 年的土壤重金属平均污染指数仅为 1.04,远低于污灌 40 年和 50 年的土壤重金属污染指数 1.68 和 2.58,并且存在显著性差异;同样,具有 20 年污灌历史的农田土壤重金属也仅表现出“中等”环境风险,而污灌 40 年、50 年的农田土壤则表现出“强”等级生态危害。可见,污灌历史长短对土壤重金属的累积及环境风险存在明显差异性影响。

除污灌年限外,离灌渠远近也对土壤重金属污染及其环境风险存在显著影响。图 3 为土壤重金属污

染、环境风险与灌渠距离间的相关性分析结果。由图可知,该区土壤重金属污染指数、环境风险指数分别与灌渠距离远近之间存在显著或极显著负相关,相关系数分别为-0.307* 和-0.385** (** 为 0.05 显著水平);并且与灌渠距离之间存在显著的指数非线性回归关系(图 3)。这表明距离污灌渠越近,农田土壤的污染程度及环境风险越高,当距离灌渠大于 1200 m 时,其污染指数接近于 1,具有“中等程度”潜在生态危害。

3 结论

(1)在长期污灌条件下,灌区土壤重金属按污染指数由强至弱依次为 Cd>Hg>Ni>Cu>Zn>As>Cr>Pb,其中,Cd 和 Hg 污染尤为严重。

表 7 污灌区各土壤重金属的潜在环境风险指数统计

Table 7 Potential ecological risk index for each soil heavy metal in sewage irrigation area

元素	平均值	变幅	单污染物环境风险指数分布/个				
			$E_i < 40$ 轻微	$40 \leq E_i < 80$ 中等	$80 \leq E_i < 160$ 较强	$160 \leq E_i < 320$ 强	$E_i \geq 320$ 极强
As	6.59	4.19~8.64	52	0	0	0	0
Cd	86.99	21.98~335.87	16	16	13	6	1
Cr	2.95	2.22~10.46	52	0	0	0	0
Cu	8.71	5.04~24.23	52	0	0	0	0
Hg	221.57	82.48~808.08	0	0	22	23	7
Ni	5.47	4.47~7.99	52	0	0	0	0
Pb	11.00	7.54~23.52	52	0	0	0	0
Zn	1.89	1.11~7.51	52	0	0	0	0

项目	平均值	变幅	综合环境风险指数分布/个			
			$RI < 150$ 轻微	$150 \leq RI < 300$ 中等	$300 \leq RI < 600$ 强	$RI \geq 600$ 极强
RI	335.16	153.75~885.68	0	25	22	5
比例			0	48.08%	42.31%	9.62%

注: E_i 为土壤单污染物潜在环境风险指数; RI 为重金属污染的综合环境风险指数。

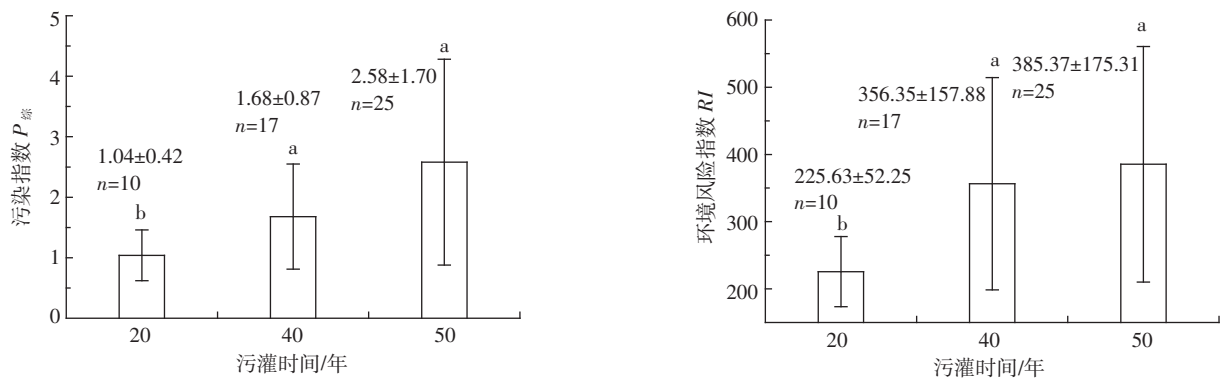


图 2 不同污灌年限农田土壤重金属污染及环境风险比较

Figure 2 The pollution status and its environment risk of soil heavy metals under different sewage irrigation history

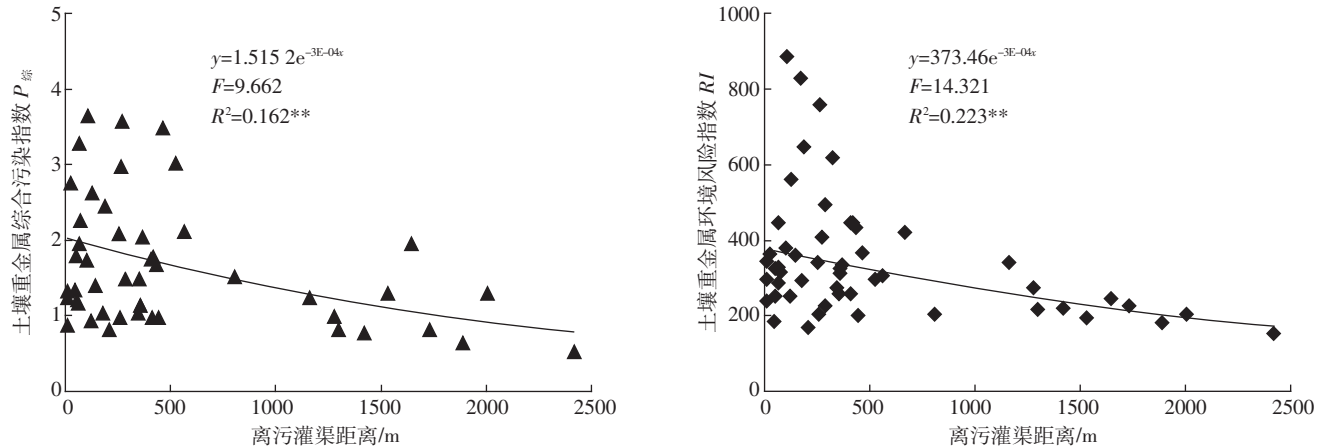


图3 不同离渠距离农田土壤重金属污染及环境风险

Figure 3 The pollution status and its environment risk of soil heavy metal under different distances from sewage irrigation canal

(2)各种重金属污染对灌区农田土壤构成潜在环境风险由强至弱排序为 $Hg > Cd > Pb > Cu > As > Ni > Cr > Zn$;其中 Cd 和 Hg 的影响占据主导,导致该区总体上具有很强环境风险,对农业安全生产构成严重威胁。

(3)污灌历史、与渠距离远近均对土壤重金属的污染状况及潜在环境风险构成显著影响。鉴于该区土壤重金属已表现出较强生态危害性,应及时采取必要防治措施,调整土壤利用结构,确保农田环境及农产品安全生产。

参考文献:

- 辛术贞,李花粉,苏德纯.我国污灌污水中重金属含量特征及年代变化规律[J].农业环境科学学报,2011,30(11):2271-2278.
XIN Shu-zhen, LI Hua-fen, SU De-chun. Concentration characteristics and historical changes of heavy metals in irrigation sewage in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2011, 30(11):2271-2278.
- Angelakisa A N, Bontoux B L. Waste water reclamation and reuse in Europe countries[J]. *Water Policy*, 2001, 3:47-59.
- 宋玉芳,周启星,宋雪英,等.沈阳西部污灌渠沉积物中污染物积累与生态毒性研究[J].应用生态学报,2004,15(10):1926-1930.
SONG Yu-fang, ZHOU Qi-xing, SONG Xue-ying, et al. Accumulation of pollutants in sediments and their eco-toxicity in the wastewater irrigation channel of western Shenyang[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2004, 15(10):1926-1930.
- 周启星.土壤健康质量与农产品安全[M].北京:科学出版社,2005:344-360.
ZHOU Qi-xing. Soil health quality and agricultural products safety[M]. Beijing: Science Press, 2005:344-360.
- 孟凡乔,巩晓颖,葛建国,等.污灌对土壤重金属含量的影响及其定量估算:以河北省汶河和府河灌区为例[J].农业环境科学学报,2004,23(2):277-280.
MENG Fan-qiao, GONG Xiao-ying, GE Jian-guo, et al. Impacts of irrigation by wastewater on quantitative contents of heavy metals in soils: A case study for Xiaohe irrigated area and Fuhe irrigated area[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2004, 23(2):277-280.
- 姜勇,梁文举,张玉革,等.污灌对土壤重金属环境容量及水稻生长的影响研究[J].中国生态农业学报,2004,12(3):124-127.
JIANG Yong, LIANG Wen-ju, ZHANG Yu-ge, et al. Influence of wastewater irrigation on environmental capacity of soil heavy metals and rice growth[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(3):124-127.
- 冯绍元,马素英,杨华锋.北京地区3种污灌土壤最大吸附容量的推求[J].生态毒理学报,2006,1(4):343-349.
FENG Shao-yuan, MA Su-ying, YANG Hua-feng. Maximum cadmium adsorption capacities of three sewage-irrigation soil types in Beijing[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2006, 1(4):343-349.
- 丁成,王世和,严金龙,等.污灌湿地系统土壤-植物中铬的赋存形态研究[J].生态环境,2005,14(6):835-837.
DING Cheng, WANG Shi-he, YAN Jin-long, et al. The species of chromium in wetland soil and plant irrigated by wastewater[J]. *Ecology and Environment*, 2005, 14(6):835-837.
- Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, et al. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater: A case study[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2005, 109(3-4):310-322.
- Pradip B, Subhasish T, Kalyan C, et al. Fractionation and bioavailability of metals and their impacts on microbial properties in sewage irrigated soil[J]. *Chemosphere*, 2008, 72(4):543-550.
- Sridhara C N, Kamala C T, Samuel S R. Assessing risk of heavy metals from consuming food grown on sewage irrigated soils and food chain transfer[J]. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 2008, 69(3):513-524.
- Surdyk N, Cary L, Blagojevic S, et al. Impact of irrigation with treated low quality water on the heavy metal contents of a soil-crop system in Serbia[J]. *Agricultural Water Management*, 2010, 98(3):451-457.
- Zhang Y L, Dai J L, Wang R Q, et al. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characterizations in Shandong, China[J]. *European Journal of Soil*

- Biology*, 2008, 44(1):84-91.
- [14] Chung B Y, Song C H, Park B J, et al. Heavy metals in brown rice (*Oryza sativa* L.) and soil after long-term irrigation of wastewater discharged from domestic sewage treatment plants[J]. *Pedosphere*, 2011, 21(5):621-627.
- [15] 杜习乐, 马建华, 吕昌河, 等. 污灌农田土壤动物及其对重金属污染的响应: 以开封市化肥河污灌区为例 [J]. *地理研究*, 2010, 29(4):617-628.
- DU Xi-le, MA Jian-hua, LÜ Chang-he, et al. Soil animals and their responses to soil heavy metal pollution in sewage irrigated farmland: A case study of the sewage irrigated area of Huafei River, Kaifeng City[J]. *Geographical Research*, 2010, 29(4):617-628.
- [16] 崔宏莉, 解静芳, 杨 彪, 等. 污灌与镉胁迫对菠菜几种抗氧化酶活性的影响[J]. *生态毒理学报*, 2010, 5(2):274-279.
- CUI Hong-li, XIE Jing-fang, YANG Biao, et al. Effects of sewage irrigation and cadmium stresses on the activities of several antioxidant enzymes of spinach[J]. *Asian Journal of Ecotoxicology*, 2010, 5(2):274-279.
- [17] 曹 靖, 贾红磊, 徐海燕, 等. 干旱区污灌农田土壤 Cu、Ni 复合污染与土壤酶活性的关系[J]. *农业环境科学学报*, 2008, 27(5):1809-1814.
- CAO Jing, JIA Hong-lei, XU Hai-yan, et al. Relationships between soil enzymatic activities and Cu-Ni compounds pollution in the wastewater irrigated farmland in arid region[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2008, 27(5):1809-1814.
- [18] Siemens J, Huschek G, Siebe C, et al. Concentrations and mobility of human pharmaceuticals in the world's largest wastewater irrigation system, Mexico City-Mezquital Valley[J]. *Water Research*, 2008, 42(8-9):2124-2134.
- [19] 于云江, 胡林凯, 杨 彦, 等. 典型流域农田土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境科学研究*, 2010, 23(12):1523-1527.
- YU Yun-jiang, HU Lin-kai, YANG Yan, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in farmland soils of a typical basin[J]. *Research of Environmental Sciences*, 2010, 23(12):1523-1527.
- [20] 中国环境保护部. GB 15618—1995 土壤环境质量标准[S]. State Environmental Protection Administration of China. GB 15618—1995 Chinese environmental quality standard for soils[S].
- [21] 李 静, 俞天明, 周 洁, 等. 铅锌矿区及周边土壤铅、锌、镉、铜的污染健康风险评价[J]. *环境科学*, 2008, 29(8):2327-2330.
- LI Jing, YU Tian-ming, ZHOU Jie, et al. Assessment of health risk for mined soils based on critical thresholds for lead, zinc, cadmium and copper[J]. *Environmental Science*, 2008, 29(8):2327-2330.
- [22] 叶玉瑶, 张虹鸥, 谈树成. 个旧城区土壤中重金属潜在生态危害评价[J]. *热带地理*, 2004, 24(1):14-17, 54.
- YE Yu-yao, ZHANG Hong-ou, TAN Shu-cheng. A study on the potential ecological risk of heavy metals in soils of Gejiu urban area[J]. *Tropical Geography*, 2004, 24(1):14-17, 54.
- [23] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control: A sedimentological approach[J]. *Water Research*, 1980, 14(8):975-1001.
- [24] 徐争启, 倪师军, 虞先国, 等. 潜在生态危害指数法评价重金属毒性系数计算[J]. *环境科学与技术*, 2008, 31(2):112-115.
- XU Zheng-qi, NI Shi-jun, TUO Xian-guo, et al. Calculation of heavy metals' toxicity coefficient in the evaluation of potential ecological risk index[J]. *Environmental Science & Technology*, 2008, 31(2):112-115.
- [25] 陈 敏, 梅凡民, 朱海波. 西安市郊区农业土壤中重金属污染状况研究[J]. *纺织高校基础科学学报*, 2007, 20(1):88-91.
- CHEN Min, MEI Fan-min, ZHU Hai-bo. The research of heavy metal pollution from agricultural soils in the suburb of Xi'an region [J]. *Basic Sciences Journal of Textile Universities*, 2007, 20(1):88-91.
- [26] 庞奖励, 黄春长, 孙根年. 西安污灌区土壤重金属含量及对西红柿影响研究[J]. *土壤与环境*, 2001, 10(2):94-97.
- PANG Jiang-li, HUANG Chun-chang, SUN Gen-nian. Heavy metal content of sewage irrigated soil in Xi'an and its influence to tomato[J]. *Soil and Environmental Sciences*, 2001, 10(2):94-97.
- [27] Manta D S, Angelone M, Bellanca A, et al. Heavy metals in urban soils: A case study from the city of Palermo (Sicily), Italy[J]. *The Science of the Total Environment*, 2002, 300(1-3):229-243.
- [28] 刘 勇, 岳玲玲, 李晋昌. 太原市土壤重金属污染及其潜在生态风险评价[J]. *环境科学学报*, 2011, 31(6):1285-1293.
- LIU Yong, YUE Ling-ling, LI Jin-chang. Evaluation of heavy metal contamination and its potential ecological risk to the soil in Taiyuan, China[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2011, 31(6):1285-1293.
- [29] 许振成, 杨晓云, 温 勇, 等. 北江中上游底泥重金属污染及其潜在生态危害评价[J]. *环境科学*, 2009, 30(11):3262-3268.
- XU Zhen-cheng, YANG Xiao-yun, WEN Yong, et al. Evaluation of the heavy metals contamination and its potential ecological risk of the sediments in Beijiang river's upper and middle reaches[J]. *Environmental Science*, 2009, 30(11):3262-3268.