

王海江, 董天宇, 朱永琪, 等. 玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属剖面分布特征分析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(11): 2216–2225.

WANG Hai-jiang, DONG Tian-yu, ZHU Yong-qi, et al. Profile distribution of heavy metals in soil from long-term continuous cropping cotton field in Manas River Basin[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(11): 2216–2225.

玛纳斯河流域长期连作棉田土壤重金属剖面分布特征分析

王海江¹, 董天宇¹, 朱永琪¹, 宋江辉¹, 史晓艳¹, 赵馨玥²

(1.石河子大学农学院农业资源与环境系, 新疆 石河子 832000; 2.新疆石河子市第一中学, 新疆 石河子 832000)

摘要:以新疆玛纳斯河流域长期连作棉田土壤为材料,对长期连作棉花土壤 As、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Pb 的含量和剖面分布特征进行研究,旨在为该地区合理施肥和棉田土壤环境质量保护提供理论依据。选取研究区荒地和连作棉花 5、10、20、30 a 的土壤,分 5 层采集 1 m 土壤样品(每层 20 cm),分析土壤重金属 As、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Pb 的含量和垂直分布特征,并对土壤重金属的来源进行了解析。结果表明:研究区棉田和荒地土壤重金属 As、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Pb 含量均未超过国家土壤环境质量二级标准,Cr、Ni、Cu、Cd 和 As 的含量明显高于新疆土壤背景值,除 Pb 元素外,棉田其他 5 种重金属含量均显著高于荒地;变异系数棉田大于荒地,Cd 的变异系数最大为 0.46。棉田和荒地土壤剖面重金属含量都表现出表层略高于底层,随着连作年限的增加,土壤重金属含量显著增加且表现出更为明显的表层富集趋势,对比荒地和连作 30 a 的各层土壤,Cr、Cu、Ni、Pb、As 和 Cd 含量增加幅度分别在 36.68%~102.81%、43.31%~74.33%、21.85%~64.95%、2.12%~18.94%、23.03%~45.68%和 167.50%~269.19%之间,总体来看,棉田土壤重金属在 1 m 土体中均表现出不同程度的累积。棉田土壤重金属含量相关性分析表明,土壤 P 素含量与棉田土壤中 As、Cd、Cr、Cu 和 Ni 呈极显著和显著相关,其相关系数分别为 0.622、0.689、0.611、0.513 和 0.560,棉田因子载荷矩阵第一主成分 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 P 具有较大的载荷,分别为-0.875、-0.952、-0.868、-0.907、-0.964、-0.635 和-0.864,累积贡献率达到了 85.46%,说明化学磷肥的长期大量施入,是棉田土壤重金属含量累积的主要原因。

关键词:长期连作;棉田;土壤;重金属;剖面分布

中图分类号:X53 文献标志码:A 文章编号:1672-2043(2017)11-2216-10 doi:10.11654/jaes.2017-0743

Profile distribution of heavy metals in soil from long-term continuous cropping cotton field in Manas River Basin

WANG Hai-jiang¹, DONG Tian-yu¹, ZHU Yong-qi¹, SONG Jiang-hui¹, SHI Xiao-yan¹, ZHAO Xin-yue²

(1.Department of Resources and Environmental Sciences, College of Agronomy, Shihezi University, Shihezi 832000, China; 2.No.1 Secondary School, Shihezi City, Shihezi 832000, China)

Abstract: The content of heavy metals in soil is one of the best indicators for rational fertilization and environmental protection. The long-term continuous cropping of cotton is a common planting pattern in the Manas River Basin, Xinjiang Province, and it may increase the content of heavy metals in the soil. To gain a better understanding of heavy metal accumulation caused by this common planting pattern, soil samples were collected from wasteland and from continuous cropping cotton fields that had been cultivated for varying periods(5, 10, 20, or 30 years). Soils samples were taken for each cultivation period(20 cm square by 1 m vertical depth). We then determined the content, the

收稿日期:2017-05-24 录用日期:2017-07-17

作者简介:王海江(1980—),男,河南偃师人,副教授,博士,从事绿洲水土资源利用研究。E-mail:wanghaijiang@shzu.edu.cn

基金项目:国际科技合作项目(2015DFA11660);国家自然科学基金项目(31360301)

Project supported: International Scientific and Technological Cooperation Projects(2015DFA11660); The National Natural Science Foundation of China(31360301)

vertical distribution characteristics, and the source of the heavy metals (As, Cd, Cr, Ni, Cu, and Pb) in the soil samples. The results showed that the contents of heavy metals in the cotton fields and wasteland did not exceed the secondary standard of national soil quality. All the average contents of the heavy metals in the cotton fields were apparently higher than both the background values for the Manas River Basin and the wasteland values, with the exception of Pb content. The variable coefficient values for the cotton fields were higher than those for the wasteland, Cd was the maximum of the heavy metal elements, with a variable coefficient value of up to 0.46. The contents of the surface layer were only slightly higher than those of the under layer, and more heavy metals accumulated in the surface layer with increasing years of cultivation. Compared with the contents in every layer of wasteland, heavy metals accumulated in the cotton soil to varying degrees in the different soil layers, and the increased ranges were: 36.68%~102.81% (Cr); 43.31%~74.33% (Cu); 21.85%~64.95% (Ni); 2.12%~18.94% (Pb), and 23.03%~45.68% (As); Cd increased to the greatest extent, reaching 167.50%~269.19%. Correlation analysis revealed a highly significant correlation between the contents of P and As, Cd, Cr, Cu, and Ni, with correlation coefficients of 0.622, 0.689, 0.611, 0.513, and 0.560, respectively. In the cotton fields, the cumulative contribution rate of As, Cd, Cr, Cu, Ni, Pb, and P in the factor loading matrix was 85.46%, and the corresponding loadings in the first principal component were -0.875, -0.952, -0.868, -0.907, -0.964, -0.635, and -0.864, respectively. Our research indicates that extensive and long-term application of chemical phosphorus fertilizer is the main cause of heavy metal accumulation in the cotton fields of Xinjiang Province.

Keywords: long-term continuous cropping; cotton field; soil; heavy metals; profile distribution

随着全球农业经济化的快速发展,农业生态环境遭到严重的污染和破坏,其中土壤重金属污染问题已成为当今环境科学和土壤科学研究的热点问题^[1-2]。重金属污染不仅破坏土壤的正常功能,改变其原有的理化性状,对土壤微生物也起到抑制作用,最终导致土壤肥力和作物产量、品质下降,并通过食物链途径在人体内进行积累^[3]。

棉花是新疆的特色优势种植作物,为了解决气候干旱、春季气温低和病虫害发生问题,新疆在棉花种植上大量使用农膜和农药,使作物的产量和种植面积得到改善,2016—2017年度播种面积占了全国的53.46%,产量占了全国的67.3%,新疆棉花在全国的战略地位越发显著^[4]。但是,随之而来的化肥、农膜、农药残留造成的Cd、Pb、Hg、As等土壤重金属污染问题不断加剧^[5-8]。近些年,有报道指出,新疆天山北坡经济带博乐、精河、乌苏、奎屯、石河子、昌吉地区棉田个别样点土壤As、Cd已经超出国家土壤环境质量二级标准,其中Cd、As、Pb最为显著,呈现出累积趋势,各元素平均含量值均超过新疆土壤背景值^[9-11]。新疆棉花种植长年连作现象普遍,加上滴灌^[12]、农膜覆盖^[13]、污水灌溉^[14]以及化肥农药的大量投入,导致棉田耕层土壤重金属逐年累积日益凸显^[15]。有研究表明,在新疆棉区长期连作是土壤中Cd含量超标的重要原因^[9,11];赵芸晨等^[16]利用定点施肥试验,研究了长期连作制种玉米田表层土壤重金属含量变化,结果表明随着种植年限增加,土壤重金属Cd严重超标。不同土壤类型农田长期连续的定点观测也表明,施用无机化肥和有机肥是土壤重金属显著富集的重要原因,有机肥的质

量对土壤重金属的累积起重要作用^[17-19]。

目前,关于土壤重金属的分布特征、形态转化、修复效果等研究已经开展了大量工作,但对于长期连作的新疆棉田土壤剖面重金属分布特征和来源的研究还较为薄弱。因此,本研究选择新疆北疆玛纳斯河流域不同连作年限棉田为研究对象,分析连作棉田土壤剖面重金属的分布特征和来源,以期为该流域棉田土壤重金属污染防治和土壤环境质量健康发展提供理论参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区域位于新疆玛河流域莫索湾灌区,地处准葛尔盆地南缘,降雨稀少,蒸发强烈,光照充足,热量丰富,无霜期较短,昼夜温差大。地势为东南向西北倾斜,坡降在1/1000~2/1000之间。地形比较平坦,海拔为291~370 m。各年平均降雨量120.4 mm,且多集中在春夏季,占全年的65%~78%。多年平均蒸发量2 248.8 mm,是降雨量的18.7倍。灌区内土壤多为灰漠土、潮土、草甸土,土质多为砾质土、沙质土、壤质土。研究区自50年代开始植棉,为新疆北疆主要植棉区,棉花种植占灌区耕地面积85%~90%,长年连作现象普遍,栽培技术和产量水平位居新疆前列,农民的文化素质较高,对于化肥、农药、农膜和有机肥的投入意愿较为强烈,随着膜下滴灌技术的推广应用,化肥、农药的投入对产量的增加效益越发显著。研究区普遍施肥:化肥氮肥为尿素(含N 46%),磷肥为重过磷酸钙(含P₂O₅ 46%)和磷酸二铵(含P₂O₅ 46%、N 18%)、钾肥为硫酸钾(K₂O

50%),化肥每年均施用,其用量每年增加且增加幅度较大^[20];有机肥多为猪粪、牛粪和鸡粪,有机肥施用量人为主观性较大,新疆北疆地区用量较少,一般为 $30\sim 40\text{ m}^3\cdot\text{hm}^{-2}$ ^[21],主要施入时间为新垦农田的2~3 a。

1.2 样品采集与分析

新疆玛纳斯河流域莫索湾灌区农田均为荒地开垦而来,该灌区农业的发展主要依靠灌溉,由于受到灌溉水资源短缺和水质差的限制,部分农田周边仍有未开垦、无人工扰动的荒地存在。为了能够更好地比较棉花长期连作对土壤重金属含量和分布的影响,本研究依据灌区的土地利用方式、土壤类型及分布特点,有针对性地进行野外踩点调查,确保所选样点土壤类型和质地一致,最终选择出土壤类型为灰漠土,质地为中壤土的连作棉花 5、10、20 a 和 30 a 以上,当前棉花栽培品种一致的 4 块棉田,周边对应的未开垦荒地(面积 $>200\text{ m}^2$)样地 4 块。对每个棉田和荒地各取 5 个剖面,样地剖面随机采样,取样层为 0~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm,共采集 200 个土壤样品。采样时间为棉花生长结束、灌水和施肥停止的秋季,分别在 2015 年秋季 10—11 月和 2016 年秋季 10—11 月。采样、样品保存和样品处理过程中采用非金属容器,避免样品污染。样品经自然风干后,去除砂砾、石块等杂物,用木棒擗碎使之全部过 18 目尼龙筛,再进一步擗碎,过 100 目尼龙筛。

采用凯氏定氮法测定土壤全氮含量,氢氧化钠碱熔-钼锑抗比色法测定土壤全磷含量,火焰光度法测定土壤全钾含量,pH 计测定土壤 pH(土水比 1:5)。土样经过 HClO_4 、 HNO_3 和 HF 消解后,利用电感耦合等离子体光谱仪测定 As、Cd、Cr、Ni、Cu 和 Pb 元素含量。土样测定质量控制和保证通过平行样和标准样品(GBW07401)来评价,样品回收率为 95%~110%。

1.3 数据处理

数据的统计分析采用 SPSS 和 Excel 软件完成,制图采用 SigmaPlot 完成。

2 结果与分析

2.1 土壤属性描述性统计分析

表 1 为研究区土壤 pH 和养分含量统计值,从表中可以看出,荒地的 pH 值为 7.88,略高于棉田,全氮、全磷和有机质的含量低于棉田,分别为 $0.19\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 、 $0.53\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $10.25\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,全钾含量为 $24.33\text{ g}\cdot\text{kg}^{-1}$,低于连作 5 a 棉田,却高于连作 10、20、30 a 棉田土壤。随

表 1 研究区土壤理化属性描述性统计

Table 1 Descriptive statistics analysis of soil physical and chemical characteristics

连作年限	pH	全氮/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全磷/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	全钾/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$	有机质/ $\text{g}\cdot\text{kg}^{-1}$
5 a	7.81	0.21	0.57	26.17	10.36
10 a	7.75	0.33	0.63	22.34	10.32
20 a	7.79	0.48	0.75	18.79	12.65
>30 a	7.74	0.52	0.96	16.55	13.55
荒地	7.88	0.19	0.53	24.33	10.25

着棉花连作年限的增加,棉田土壤全氮、全磷和有机质含量呈现增加的趋势,全钾含量则呈现降低的趋势,土壤 pH 值略有降低。

棉田(不同连作年限棉田 1 m 土体均值)和荒地土壤 6 种重金属含量描述性统计见表 2。与国家《土壤环境质量标准》(GB 15618—1995)二级标准比较,研究区(荒地和棉田)土壤 6 种重金属 Cr、Ni、Cu、As、Pb 和 Cd 的平均含量都低于该标准,但与新疆土壤背景值比较,4 种重金属 Cr、Ni、Cu 和 As 的平均含量要高于其背景值,Pb 的平均含量低于新疆土壤背景值;棉田土壤 Cr、Ni、Cu、As 和 Cd 的平均含量分别为 90.65 、 32.22 、 52.64 、 $10.90\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 和 $0.21\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,分别高出背景值的 90.45%、46.46%、160.58%、23.89%和 108.68%,棉田土壤 Cr、Cu、As 和 Cd 的平均含量均明显高于荒地,Pb 的平均含量荒地略高于棉田,两者相差 $0.05\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$ 。变异系数在一定程度上可用于表示各元素的累积状况,变异程度可分为:弱变异性, $\text{CV}<0.1$;中等变异性, $0.1<\text{CV}<1$;强变异性, $\text{CV}>1$ 。如表 2 所示,棉田土壤 Cr、Ni、Cu、Pb、Cd 的变异系数均大于荒地,属于中等变异,其中 Cd 的变异系数最大为 0.46,Pb 的变异系数最小为 0.12;荒地中 As 的变异系数最大为 0.15,高于棉田,属于中等变异,其他土壤重金属的变异系数均小于 0.1,属于弱变异。

2.2 土壤重金属垂直分布特征

表 3 是棉田(不同连作年限棉田各层均值)和荒地的土壤剖面(1 m 土层)重金属含量垂直分布,棉田土壤中 Cr 含量由表层向底层逐渐减小,最大含量为 0~20 cm,为 $101.86\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低值出现在 80~100 cm,含量为 $79.62\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,土层 0~20、20~40、40~60 cm 间差异不显著,但显著高于 80~100 cm 土层,荒地 0~20 cm Cr 含量显著低于其他土层,20~100 cm 4 个土层间差异均不显著;棉田 Ni 的含量最大值出现在 0~20 cm,为 $36.55\text{ mg}\cdot\text{kg}^{-1}$,最低值出现在 60~80 cm,Ni 含量在 0~20、20~40、80~100 cm 土层间差异不显著,0~

20 cm 或 20~40 cm 显著高于 40~60 cm 和 60~80 cm 土层,荒地 Ni 含量在各个土层间差异不显著;棉田 Cu 的含量最大值出现在 0~20 cm,其值为 $55.16 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,与 20~40、40~60、80~100 cm 土层间差异不显著,最小值在 60~80 cm 土层,其含量为 $49.77 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,荒地 0~20 cm 土层 Cu 的含量显著高于其他土层,其他各土层间差异不显著;棉田中 Pb 的含量最大值在 0~20 cm 土层,为 $14.73 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,棉田和荒地各土层 Pb 的含量差异均不显著;棉田和荒地 As 的含量最大值均出现在 0~20 cm 土层,最小值均出现在 60~80 cm 土层,棉田 0~20、20~40、40~60、80~100 cm 土层间含量差异不显著,0~20、20~40 cm 显著高于 60~80 cm,荒地 0~20、20~40、40~60 cm 土层间差异不显著,但 0~20、40~60 cm 显著高于 60~80、80~100 cm 土层;棉

田和荒地中 Cd 的含量最大值也均出现在 0~20 cm 土层,其值分别为 $0.251 1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $0.112 5 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$,棉田 0~80 cm 深度的 4 个土层间差异不显著,但 0~60 cm 显著高于 80~100 cm,荒地 0~20、20~40、60~80 cm 土层间差异不显著,但显著高于最低值 40~60 cm 土层。

综合来看,棉田各土层重金属含量的最大值都出现在表层 0~20 cm,随着深度的增加重金属含量降低,其中 Cr 和 Cd 最小值出现在 80~100 cm 的底层, Ni、Cu、Pb 和 As 的最小值则出现在 60~80 cm 土层,荒地重金属含量在垂直分布上没有表现出较好的规律性;棉田和荒地土壤重金属含量在 1 m 土层垂直剖面上均表现出较小的差异性,尤其是人为耕作的棉田,与荒地相比在 1 m 耕层均表现出不同程度的富集。

表 2 研究区土壤重金属描述性统计分析

Table 2 Statistical analysis descriptive of soil heavy metals content in the study area

样地	元素	最小值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	均值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	最大值/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	标准差	变异系数	背景值(灰漠土)/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$	国家二级标准/ $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$
棉田	Cr	55.22	90.65	139.26	24.90	0.27	47.60	250.00
	Ni	16.91	32.22	51.08	10.02	0.31	22.00	60.00
	Cu	31.94	52.64	72.35	12.77	0.24	20.20	100.00
	As	8.95	10.90	13.96	1.44	0.13	8.80	25.00
	Pb	10.91	13.86	16.85	1.68	0.12	19.80	350.00
	Cd	0.08	0.21	0.38	0.10	0.46	0.10	0.60
荒地	Cr	68.67	78.21	85.50	7.17	0.09	47.60	250.00
	Ni	30.53	32.34	33.16	1.08	0.03	22.00	60.00
	Cu	41.50	44.16	49.59	3.30	0.07	20.20	100.00
	As	8.09	9.48	11.35	1.42	0.15	8.80	25.00
	Pb	13.27	13.91	14.25	0.43	0.03	19.80	350.00
	Cd	0.10	0.10	0.11	0.01	0.05	0.10	0.60

表 3 棉田和荒地土壤剖面重金属含量($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)Table 3 Heavy metals content in soil profiles of cotton fields and wastelands($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

土壤	深度/cm	Cr	Ni	Cu	Pb	As	Cd
棉田	0~20	$101.86 \pm 1.28\text{a}$	$36.55 \pm 1.03\text{a}$	$55.16 \pm 1.79\text{a}$	$14.73 \pm 0.32\text{a}$	$12.28 \pm 0.78\text{a}$	$0.251 1 \pm 0.007\text{a}$
	20~40	$96.99 \pm 3.78\text{a}$	$34.33 \pm 1.52\text{a}$	$54.43 \pm 1.24\text{a}$	$14.61 \pm 0.12\text{a}$	$11.81 \pm 0.75\text{a}$	$0.248 1 \pm 0.019\text{a}$
	40~60	$90.61 \pm 1.24\text{ab}$	$30.91 \pm 2.21\text{b}$	$52.53 \pm 2.33\text{ab}$	$13.35 \pm 0.68\text{a}$	$10.81 \pm 0.63\text{ab}$	$0.223 6 \pm 0.033\text{a}$
	60~80	$84.18 \pm 4.26\text{bc}$	$28.12 \pm 0.52\text{b}$	$49.77 \pm 1.06\text{b}$	$13.16 \pm 0.93\text{a}$	$9.56 \pm 0.52\text{b}$	$0.196 4 \pm 0.004\text{ab}$
	80~100	$79.62 \pm 7.52\text{c}$	$31.20 \pm 0.98\text{ab}$	$51.29 \pm 2.34\text{ab}$	$13.46 \pm 0.55\text{a}$	$10.05 \pm 0.66\text{ab}$	$0.170 8 \pm 0.013\text{b}$
荒地	0~20	$68.67 \pm 1.39\text{b}$	$33.16 \pm 1.23\text{a}$	$49.58 \pm 0.68\text{a}$	$14.23 \pm 0.14\text{a}$	$11.35 \pm 0.48\text{a}$	$0.112 5 \pm 0.016\text{a}$
	20~40	$78.56 \pm 2.07\text{a}$	$30.53 \pm 2.56\text{a}$	$41.5 \pm 0.82\text{b}$	$14.17 \pm 0.36\text{a}$	$9.32 \pm 0.63\text{ab}$	$0.093 6 \pm 0.008\text{a}$
	40~60	$85.50 \pm 3.11\text{a}$	$32.79 \pm 3.55\text{a}$	$44.58 \pm 1.18\text{b}$	$13.66 \pm 0.57\text{a}$	$10.45 \pm 0.47\text{a}$	$0.054 8 \pm 0.011\text{c}$
	60~80	$84.63 \pm 2.98\text{a}$	$33.03 \pm 4.72\text{a}$	$43.49 \pm 0.92\text{b}$	$13.26 \pm 0.63\text{a}$	$8.09 \pm 0.72\text{b}$	$0.081 9 \pm 0.006\text{ab}$
	80~100	$73.70 \pm 1.68\text{a}$	$32.17 \pm 3.18\text{a}$	$41.64 \pm 1.38\text{b}$	$14.24 \pm 0.54\text{a}$	$8.90 \pm 0.76\text{b}$	$0.073 4 \pm 0.008\text{b}$

注:同列不同字母表示处理间差异显著($P < 0.05$)。

Note: Different letters of the same column indicate significant differences between soil layers($P < 0.05$).

不同年限土壤重金属在各土层垂直剖面的分布特征见图1。研究区不同年限棉田和荒地各层土壤Cr、As、Cu的含量都超过新疆土壤背景值。荒地的Cd含量在0~20 cm土层为 $0.11 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，略高于新疆土壤背景值，在20~100 cm土层略低于新疆土壤背景值。连作5 a棉田土壤在0~20 cm土层Cd含量为 $0.1084 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，略高于新疆土壤背景值，20~40、40~60、60~80、80~100 cm土层Cd含量分别为0.098 1、0.092 1、0.086 2、0.081 1 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，均低于新疆土壤背景值，随着连作年限的增加，连作10、20、30 a的棉田土壤在各层土壤中Cd含量均明显高于背景值。荒

地和连作5、10、20、30 a的棉田Pb含量在各土层中均明显低于新疆土壤背景值，荒地各层含量高于连作5 a棉田土壤，低于连作20、30 a棉田土壤，随着连作年限的增加，Pb含量有微弱增加的趋势。Ni含量在连作5 a棉田0~20 cm和20~40 cm土层中分别为 $22.35 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 和 $23.74 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$ ，略高于土壤背景值，在40~100 cm土层均低于背景值。

分析各重金属含量在棉田土壤的垂直分布特征发现：棉田土壤重金属在各层中均表现出一定的积累趋势，连作棉田表层略高于底层，随着棉花种植年限的增加，土壤各层的重金属含量均明显增加，其中

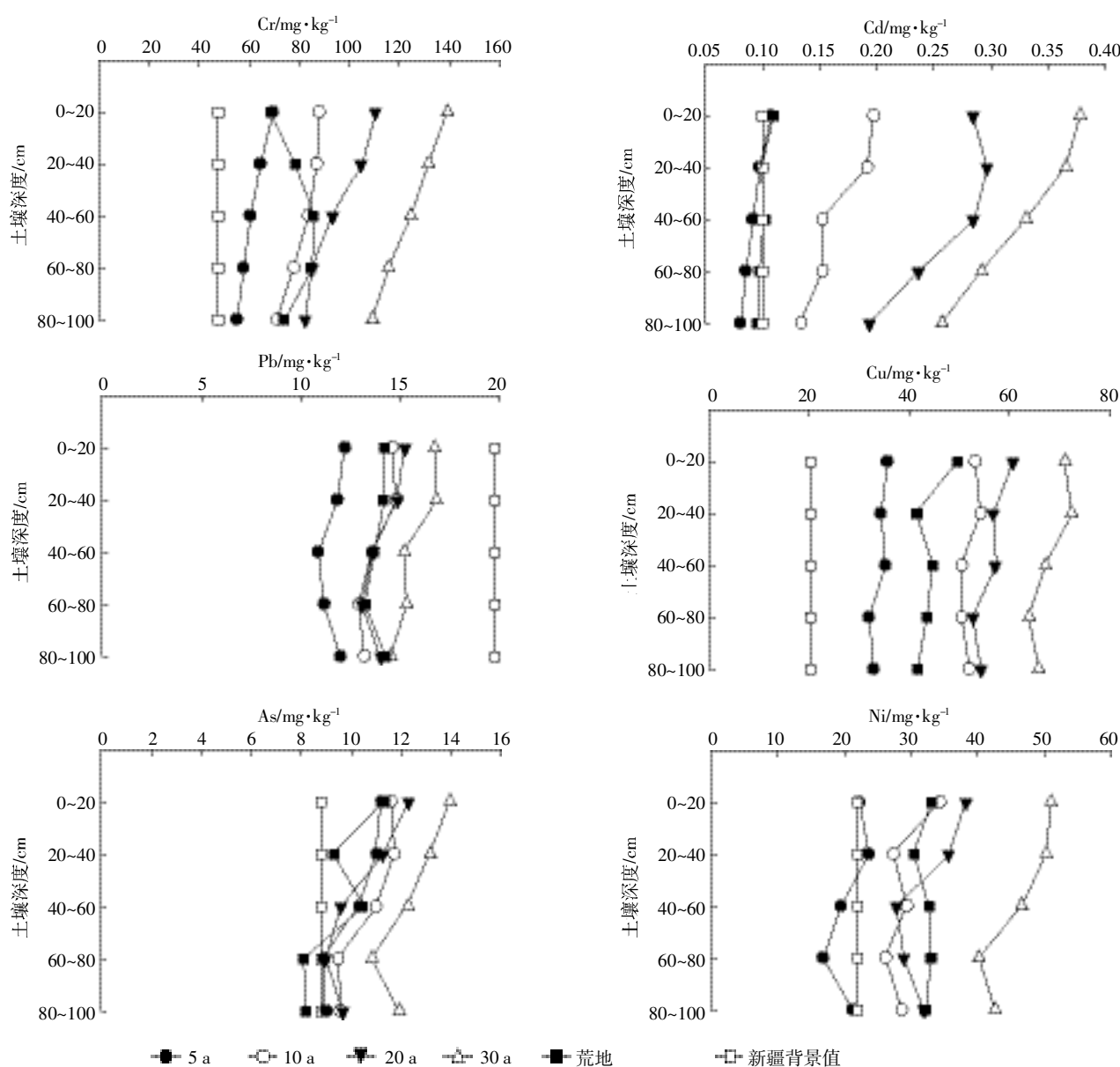


图1 土壤剖面重金属含量分布

Figure 1 Distribution of heavy metals in soil profiles

Cr、Cd 和 Ni 表聚趋势也更为明显。对比荒地和连作 30 a 的各层土壤,Cr 和 Cu 含量的增加幅度为 43.30%~102.81%,Ni 含量的增加幅度为 21.85%~64.95%,Pb 含量的增加幅度为 2.12%~18.94%,As 含量的增加幅度为 23.03%~45.68%,Cd 含量的增幅最大,达到 167.50%~269.19%。对比不同连作棉田和荒地土壤重金属含量发现,连作 5 a 的 Cr、Cd、Cu、Pb 和 Ni 含量均低于荒地各层土壤,连作 20 a 和 30 a 的均大于荒地,表现出较为一致的规律性。荒地的重金属分布在各土层的含量差异不大,垂直分布特征也不一致,Cu、As 和 Cd 的上层含量略大于底层,Cr 含量中间层含量最高,呈现先增加而后降低的趋势,Ni 和 Pb 含量在中间层出现最小值,上层和下层土壤含量较高。

2.3 土壤重金属污染来源分析

元素地球化学理论认为,来源相似的元素之间具有较好的相关性^[22],因此,在统计分析中重金属含量

相关性高,意味着元素之间具有一致性。荒地和棉田养分、重金属含量间的相关性见表 4 和表 5。棉田土壤重金属元素 As 与 Cr、Ni、Cd 与 Cr、Ni、Cr 与 Cu、Ni、Cu 与 Ni 之间具有较好的相关性,其中 Cr 与 As、Cu、Ni 之间达到极显著相关($P<0.01$),表明这几种重金属元素有共同的源,与 Pb 之间没有很好的相关性。重金属元素与土壤养分元素 N、P 和 K 之间的相关性表明,P 素含量与棉田土壤中 As、Cd、Cr、Cu 和 Ni 呈极显著和显著相关,其相关系数分别为 0.622、0.689、0.611、0.513 和 0.560,说明棉田磷肥的投入对土壤中 As、Cd、Cr、Cu 和 Ni 含量的积累有着明显的作用,而土壤中 N、K 元素与重金属含量间没有很好的相关性,这也从另一个层面说明研究区棉田土壤重金属含量的增加与磷肥长期的投入量有直接关系。pH 值是影响土壤重金属形态和迁移特性的主要限制因子^[23],由于本研究区土壤 pH 值较高($7.36<pH<8.14$),与土

表 4 棉田土壤不同元素间的相关性分析

Table 4 Correlation coefficient matrix between contents of soil heavy metals and other properties in cotton field

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	K	P	N	pH
As										
Cd	0.393									
Cr	0.699**	0.521*								
Cu	0.227	0.280	0.658**							
Ni	0.552*	0.514*	0.724**	0.501*						
Pb	0.318	0.450	0.212	-0.336	-0.126					
K	-0.204	0.186	-0.173	0.144	-0.287	0.172				
P	0.622**	0.689**	0.611*	0.513*	0.560*	0.421	0.041			
N	0.401	0.421	0.134	0.455	-0.298	0.234	0.024	0.128		
pH	0.386	0.494	0.470	0.248	-0.569*	0.256	0.144	0.320	0.366	

注:** 与 * 分别表示 0.01 与 0.05 水平下显著。下同。

Note: ** and * indicate significant correlations at 0.01 and 0.05 probability levels, respectively. The same below.

表 5 荒地土壤不同元素间的相关性分析

Table 5 Correlation coefficient matrix between contents of soil heavy metals and other properties in wasteland

	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	K	P	N	pH
As										
Cd	0.249									
Cr	0.501*	-0.157								
Cu	0.136	0.346	0.201							
Ni	0.616*	0.366	0.273	0.223						
Pb	0.679**	0.283	0.514*	0.167	0.677**					
K	0.304	0.340	0.166	0.364	0.265	0.374				
P	0.215	0.370	-0.098	0.216	0.374	0.214	0.677**			
N	0.097	0.050	-0.162	0.040	-0.022	-0.020	0.137	0.214		
pH	0.239	0.297	0.076	0.264	0.125	0.096	0.483*	0.314	0.048	

壤重金属元素相关性并不显著, 仅与 Ni 含量呈现显著的负相关关系($P<0.05$)。

荒地土壤重金属元素相关性分析结果与棉田土壤有较大的差异(表 5)。As 与 Cr、Ni、Pb, Cr 与 Pb 元素间具有较好的相关性, 其中 Pb 与 As、Ni 之间的相关系数分别为 0.679 和 0.677, 均达到极显著的相关性, 说明这 4 种元素有较为一致的来源, 与 Cd 和 Cu 元素间不具有显著相关性。重金属含量与土壤养分和 pH 值间的相关分析表明, 两者间不存在相关关系, 说明在荒地土壤中, 重金属含量与未经人为施肥的土壤养分含量、pH 值没有很好的因果关系, 这进一步说明了棉田土壤化肥的施用对土壤重金属含量有显著的影响。

表 6 是对数据集棉田和荒地主成分分析的结果, 可以看出, 荒地和棉田的主成分因子数差异较大。荒地有 4 个主成分因子, 其累计贡献率达到 81.16%, 棉田有 1 个主成分因子, 累计贡献率达到 85.46%。荒地的第一主成分 As、Cr、Ni 和 Pb 具有较大的载荷, 分别为 0.738、0.717、0.771 和 0.738, 贡献率为 36.25%, 表明 4 种重金属元素具有相同的源, 主要受自然成土母质影响; 第二主成分 Cu 和 Cd 具有较大的载荷, 分别为 0.688 和 0.614, 贡献率为 19.47%, 表明 Cu 和 Cd 具有相同的来源, 第三主成分 N 和 P 具有较大的载荷, 分别为 0.551 和 0.567, 贡献率为 14.22%, 第四主成分 K 和 pH 具有较大的载荷, 分别为 0.435 和 0.502, 贡献率为 11.22%, 表明同一主成分土壤元素或许是由类似的母岩发育而来。棉田土壤的因子载荷

矩阵仅有 1 个主成分, 其中 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 P 具有较大的载荷, 分别为 -0.875、-0.952、-0.868、-0.907、-0.964、-0.635 和 -0.864, 累积贡献率达到了 85.46%, 载荷数值大的元素具有相同的来源^[24], 说明棉田重金属跟人为因素化学磷肥的大量投入有密切关系。

3 讨论

3.1 土壤重金属含量与分布

对比国家土壤环境质量标准、新疆土壤背景值、研究区荒地重金属含量和连作棉田重金属含量表明, 新疆棉田土壤重金属含量本底值并不高, 远低于国家土壤环境质量标准, 但与荒地土壤比较, 肥料、农药、地膜大量投入的长期连作棉田, 土壤重金属含量积累趋势明显, 表 2 中 Cr、Cu、As 和 Cd 含量都高于荒地土壤, 其中 Cd 的含量(1 m 土层)增幅最为明显, 棉田土壤均值为 $0.2146 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 荒地土壤和新疆背景值都为 $0.1 \text{ mg} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其均值增幅超过了 100%。这与很多学者认为新疆天山北坡经济带地区棉田土壤重金属富集严重, 其中 Cd 最为显著, 呈现出累积趋势, 已经超出国家土壤环境质量二级标准, 其他各元素平均含量值均超过新疆土壤背景值的结论一致^[9-11]。

陈志凡等^[25]研究表明 Cu 和 Zn 具有明显的表聚现象, Pb 含量在表层土壤略高于底层, 表聚作用不明显, Cd 在土壤剖面的分布具有较大的变异性; 刘再冬等^[26]研究认为在流域的下游平原区, As、Cu 和 Ni 在 30 cm 土层以下随着深度的增加而升高, Pb 和 Cd 随着土壤深度的变化呈现逐渐降低的趋势; 郑国璋^[27]指出, 土壤环境中重金属元素迁移能力较差, 且主要在土壤 0~20 cm 表层积累。本研究中, 棉田重金属 Cr、Ni、Cu、As、Pb 和 Cd 在土壤剖面分布上也表现出不同程度的表聚特征, 其中 As、Cu 和 Pb 表聚趋势微弱, 上下层含量差异不大, Cr、Cd 和 Ni 表聚趋势较为明显, 并且随着连作年限的增加表聚特征更为显著, 不同连作年限棉田在耕层土壤(1 m)深度均表现出积累趋势, 这或许由土壤重金属的自身性质、耕作特征与当地农业种植管理措施共同决定^[28]。研究区的滴灌方式、施肥和耕作措施影响着土壤重金属的分布, 新疆棉田秋季收获后普遍存在着深耕、深施肥现象, 深耕深度一般 > 60 cm, 再加上化肥用量大, 磷肥利用率低导致棉田土壤中磷含量丰富^[29], 而磷肥中重金属含量较高^[30], 其共同作用造成棉花 1 m 耕层土壤重金属含量表现出累积趋势。膜下滴灌方式主要湿润峰在 1

表 6 荒地和棉田土壤元素的因子载荷矩阵分析

Table 6 Factor loading matrix of soil elements in the wasteland and cotton field

土壤元素	荒地				棉田
	PC1	PC2	PC3	PC4	PC1
As	0.738	0.208	0.132	-0.272	-0.875
Cd	0.363	0.614	0.378	0.337	-0.952
Cr	0.717	0.550	0.058	-0.248	-0.868
Cu	0.366	0.688	-0.223	0.097	-0.907
Ni	0.771	0.214	-0.067	0.235	-0.964
Pb	0.738	0.297	-0.311	-0.097	-0.635
K	0.258	0.365	0.189	0.435	0.314
P	-0.182	0.234	0.567	0.374	-0.864
N	0.206	-0.487	0.551	0.239	0.187
pH	-0.154	-0.421	-0.347	0.502	-0.194
方差贡献率/%	36.25	19.47	14.22	11.22	85.46
累计贡献率/%	36.25	55.72	69.94	81.16	85.46

m 土体内且深层淋洗微弱^[31],随着地表水分的强烈蒸发,土壤中各元素均有着随水向上运移的外在环境,这或许是表层土壤重金属含量高于底层的主要原因。本试验中连作 5 a 的土壤各重金属含量普遍存在着低于荒地的趋势,这或许是因为该地区新开垦农田为了更好地减少耕层土体盐分含量,2~3 a 内每年采用的大水洗盐措施的原因。

3.2 重金属的来源分析

农业生产环境中的重金属主要来自人为源和自然源。自然源主要来自于天然地球化学过程,是成土母质决定的,而人为源则主要来自于工业活动的排放和农事活动等^[32]。新疆棉花产量占我国棉花产量的 67.3%,化肥施用对提高作物产量起到非常重要的作用,随着氮肥和磷肥的大量施用,新疆棉田土壤碱解氮含量升高,速效磷含量大幅增加,速效钾的含量有所降低^[33-34]。本研究采用了棉田与周边荒地进行对比,从土壤各元素的相关性分析发现,棉田和荒地差异明显。荒地分析中 As、Cr、Ni 和 Pb 元素间具有较好的相关性,Cd 和 Cu 元素间不具有显著相关性,土壤重金属与土壤中 N、P、K 均不具有显著相关性;棉田中 As、Cr、Cd、Ni 和 Cu 之间均具有较好的相关性,且 As、Cr、Cd、Cu、Ni 与土壤 P 的含量达到极显著和显著相关,其差异主要是由人为的耕作施肥和种植管理措施造成。肥料中含有多种重金属元素,主要原因就是生产肥料的原料工艺,尤其是磷肥,重金属的种类和含量远高于氮肥和钾肥^[35]。有机肥料是以畜禽粪便、动植物残体等富有有机质的副产品资源为主要原料,而很多饲料厂和养殖场普遍使用含有 Cd、Pb、Cu、As 等重金属元素的饲料添加剂,由于生物的重金属富集作用,畜禽粪便中的重金属含量要比饲料中高^[36]。

王美等^[28]连续施肥 25 a 后测定土壤中 Cd、Cu、Zn 和 Pb 的含量,不同施肥处理土壤重金属都有不同程度的富集,有机肥处理下 Cu 的富集程度高于化肥处理,化学磷肥处理中 Cd、Zn 和 Pb 富集高于有机肥,其中 Cd 富集程度最高;刘树堂等^[19]在潮土上 25 a 连续施用磷肥(过磷酸钙)的研究表明,土壤 Cd 和 Pb 分别比施用前增加近 40 倍和 6 倍,而有机肥处理与初始接近,证明土壤 Cd、Pb 积累主要来自磷肥;赵芸晨等^[16]研究发现,长期施用肥料能够改变土壤的理化性质,化学磷肥的施入能够造成农田 Cd 的严重污染;徐明岗等^[17]在灰漠土上连续施肥 17 a,认为 3 种磷肥施用都没有造成重金属明显的积累,有机肥的长期施用是 Cd 和 Cu 含量增加的主要原因;苏姝

等^[37]、李双异等^[38]利用 20 多年的连续施肥和耕作证实,化肥不会引起土壤重金属积累,有机肥(猪粪、牛粪)是造成土壤重金属积累的主要原因。以上相关研究的土壤类型、区域、肥料种类、施肥方式以及用量等都存在差异,所得出的结论也并不一致,农田土壤长期施肥造成重金属积累得到广泛认可,但重金属富集是由于化学肥料还是有机肥存在分歧,本研究中有有机肥用量较少,多种土壤重金属元素与 P 素含量显著相关,说明长期连作棉田化肥施用对土壤重金属的富集起到关键作用,而在特定的土壤类型、气候条件和人为耕作措施下,本研究区有机肥施用对土壤重金属累积的作用机制如何?在新疆土壤环境背景下,化肥的长期大量施用如何影响重金属的有效态和活化度?这些问题还需要进一步深入研究。

4 结论

(1)研究区棉田土壤重金属 Cr、Ni、Cu、As、Pb 和 Cd 的平均含量都低于国家二级标准,Cr、Ni、Cu、As 和 Cd 的平均含量(1 m 土层)要明显高于新疆灰漠土背景值。

(2)棉田土壤 6 种重金属在 1 m 土层垂直分布的变幅均较小,各土层间重金属含量差异不大,其中 Cd 垂直分布变异系数最大为 0.17;棉田土壤重金属含量均表现出表层大于底层,随着连作年限的增加耕层土壤中重金属含量明显升高,在 1 m 土层均有不同程度的累积趋势。

(3)荒地 As、Pb、Cr 和 Ni 元素间表现出显著或极显著的相关性,意味其有相似来源途径;棉田土壤 As、Cd、Cr、Cu、Ni 与土壤 P 素含量均呈现显著或极显著相关关系,因子载荷矩阵第一主成分 As、Cd、Cr、Cu、Ni、Pb 和 P 具有较大的载荷,累积贡献率达到了 85.46%,进一步证明了研究区棉田土壤中的重金属含量与化学磷肥的大量施用有紧密的关系。

参考文献:

- [1] Martinuzzi S, Januchowski-Hartley S R, Pracheil B M. Threats and opportunities for freshwater conservation under future land use change scenarios in the United States[J]. *Global Change Biology*, 2014, 20(1): 113-124.
- [2] 章海波,骆永明,李 远. 中国土壤环境质量标准中重金属指标的筛选研究[J]. *土壤学报*, 2014, 51(3): 429-438.
ZHANG Hai-bo, LUO Yong-ming, LI Yuan. China's index of heavy metals in soil environment quality standard screening study[J]. *Acta Pedagogica Sinica*, 2014, 51(3): 429-438.
- [3] Bose S, Bhattacharyya A K. Heavy metal accumulation in wheat plant

- grown in soil amended with industrial sludge[J]. *Chemosphere*, 2008, 70:1264-1272.
- [4] 新疆维吾尔自治区统计局:新疆统计年鉴(2016)[M]. 北京:中国统计出版社.
Statistic Bureau of Xinjiang Uygur Autonomous Region: Xinjiang statistical yearbook (2016)[M]. Beijing: China Statistics Press.
- [5] 邓红, 林海荣, 张泽, 等. 绿洲连作棉田土壤重金属富集特征及评价[J]. 西北农业学报, 2014, 23(8):92-98.
DENG Hong, LIN Hai-rong, ZHANG Ze, et al. Evaluation on enrichment characteristics of heavy metal in the oasis cropping cotton field[J]. *Acta Agriculturae Poreali-occidentalis Sinica*, 2014, 23(8):92-98.
- [6] 严昌荣, 王序俭, 何文清, 等. 新疆山河子地区棉田土壤中地膜残留研究[J]. 生态学报, 2008, 28(7):3470-3474.
YAN Chang-rong, WANG Xu-jian, HE Wen-qing, et al. The residue of plastic film in cotton fields in Shihezi, Xinjiang[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(7):3470-3474.
- [7] 马子龙, 毛潇萱, 丁中原, 等. 新疆哈密地区有机氯农药大气、土壤残留特征、气-土交换及潜在生态风险[J]. 环境科学, 2013, 34(3):1120-1128.
MA Zi-long, MAO Xiao-xuan, DING Zhong-yuan, et al. Residual levels in air, soil and soil-air exchange of organochlorine pesticides in Hami Region of Xinjiang and its potential ecological risk[J]. *Environmental Science*, 2013, 34(3):1120-1128.
- [8] 冉聃, 鲁建江, 姚晓瑞, 等. 新疆典型农业地区土壤中有机氯农药(OCs)分布特征及风险评价[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3):225-229.
RAN Dan, LU Jian-jiang, YAO Xiao-rui, et al. Distribution and risk assessment of organochlorine pesticides (OCs) in soils of typical agricultural regions in Xinjiang[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3):225-229.
- [9] 任力民, 贾登泉, 王飞. 新疆农田土壤重金属含量调查与评价[J]. 新疆农业科学, 2014, 51(9):1760-1764.
REN Li-min, JIA Deng-quan, WANG Fei, et al. Preliminary survey and evaluation of heavy metal content in farmland soil[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2014, 51(9):1760-1764.
- [10] 穆叶赛尔·吐地, 吉力力·阿布都外力, 姜逢清. 天山北坡土壤重金属含量的分布特征及其来源解释[J]. 中国生态农业学报, 2013, 21(7):883-890.
Muyessar·T D, Jilili·A B D W L, JIANG Feng-qing. Distribution characteristics of soil heavy metal content in northern slope of Tianshan Mountains and its source explanation[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2013, 21(7):883-890.
- [11] 王晓军, 刘忠, 王化兵, 等. 新疆天山北坡经济带土壤重金属环境质量评价[J]. 农业工程, 2016, 6(1):65-73.
WANG Xiao-jun, LIU Zhong, WANG Hua-bing, et al. Environmental quality evaluation of soil heavy metals in Xinjiang Tianshan Northern Slope Economic Zone[J]. *Agricultural Engineering*, 2016, 6(1):65-73.
- [12] 陈芳, 董元华, 安琼, 等. 长期肥料定位试验条件下土壤中重金属的含量变化[J]. 土壤, 2005, 37(3):308-311.
CHEN Fang, DONG Yuan-hua, AN Qiong, et al. Variation of soil heavy metal contents in a long-term fertilization experiment soils[J]. *Soil*, 2005, 37(3):308-311.
- [13] 于立红, 王鹏, 于立河, 等. 地膜中重金属对土壤-大豆系统污染的试验研究[J]. 水土保持通报, 2013, 33(3):86-90.
YU Li-hong, WANG Peng, YU Li-he, et al. Mulch on the soil heavy metals in soybean system pollution of experimental research[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2013, 33(3):86-90.
- [14] 吴文勇, 尹世洋, 刘洪禄, 等. 污灌区土壤重金属空间结构与分布特征[J]. 农业工程学报, 2013, 29(4):165-173.
WU Wen-yong, YI Shi-yang, LIU Hong-lu, et al. Sewage irrigation area of soil heavy metal spatial structure and distribution[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2013, 29(4):165-173.
- [15] 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.
WANG Mei, LI Shu-tian. Fertilizer on soil heavy metal content and fertilization and crop the influence of heavy metal enrichment[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2):466-480.
- [16] 赵芸晨, 秦嘉海, 肖占文. 长期定点施肥对制种玉米土壤理化性状及重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):204-208.
ZHAO Yun-chen, QIN Jia-hai, XIAO Zhan-wen. Effects of continuous cropping system of maize seed production on soil physical chemical properties and content of heavy metal in Hexi Corridor[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2012, 26(6):204-208.
- [17] 徐明岗, 武海雯, 刘景. 长期不同施肥下我国3种典型土壤重金属的累积特征[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(12):2319-2324.
XU Ming-gang, WU Hai-wen, LIU Jing. Evolution of heavy metal contents of three soils under long-term fertilizations[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(12):2319-2324.
- [18] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤重金属含量的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(4):96-99.
REN Shun-rong, SHAO Yu-cui, GAO Bao-yan, et al. Effects of long-term located fertilization on heavy-metal content of soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(4):96-99.
- [19] 刘树堂, 赵永厚, 孙玉林, 等. 25年长期定位施肥对非石灰性潮土重金属状况的影响[J]. 水土保持学报, 2005, 19(1):164-167.
LIU Shu-tang, ZHAO Yong-hou, SUN Yu-lin, et al. Effects of 25 years long-term located fertilization on status of heavy metals in non-calcareous fluvo-aquic soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2005, 19(1):164-167.
- [20] 张炎, 史军辉, 罗广华, 等. 新疆农田土壤养分与化肥施用现状及评价[J]. 新疆农业科学, 2006, 43(5):375-379.
ZHANG Yan, SHI Jun-hui, LUO Guang-hua, et al. The status and evaluation on soil nutrient and fertilization in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2006, 43(5):375-379.
- [21] 王海江, 石建初, 李保国, 等. 不同改良措施下新疆重度盐渍土壤盐分变化与脱盐效果[J]. 农业工程学报, 2014, 30(22):102-111.
WANG Hai-jiang, SHI Jian-chu, LI Bao-guo, et al. Soil salinity dynamic change and desalting effect under different improvement measures in severe salinity soil in Xinjiang[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(22):102-111.
- [22] 窦衍光, 李军, 李炎. 北部湾东部海域表层沉积物稀土元素组

- 成及物源指示意义[J]. 地球化学, 2013, 67(2): 137-145.
- DOU Yan-guang, LI Jun, LI Yan, et al. Distribution, enrichment and source of heavy metals in surface sediments of the Eastern Beibu Bay, South China Sea[J]. *Marine Pollution Bulletin*, 2013, 67(2): 137-145.
- [23] Sun B, Zhao F J, Lombi E, et al. Leaching of heavy metals from contaminated soils using EDTA[J]. *Environment Pollution*, 2001, 113(2): 111-120.
- [24] 宁翠萍, 李国琛, 王颜红, 等. 细河流域农田土壤重金属污染评价及来源解析[J]. 农业环境科学学报, 2017, 36(3): 487-495.
- NING Cui-ping, LI Guo-chen, WANG Yan-hong, et al. Evaluation and source apportionment of heavy metal pollution in Xihe watershed farmland soil[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2017, 36(3): 487-495.
- [25] 陈志凡, 王岩松, 段海静, 等. 开封黑岗口引黄灌区稻麦轮作下农田土壤剖面重金属分布特征[J]. 中国生态农业学报, 2012, 20(4): 480-487.
- CHEN Zhi-fan, WANG Yan-song, DUAN Hai-jing, et al. Vertical distribution characteristics of heavy metals in agricultural soil profiles under rice-wheat system in Heigangkou Yellow River Irrigation Region [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2012, 20(4): 480-487.
- [26] 刘再冬, 黄 艺, 陈 莹, 等. 攀枝花西区巴关河流域土壤剖面重金属元素形态分析研究[J]. 科学技术与工程, 2015, 15(32): 79-86.
- LIU Zai-dong, HUANG Yi, CHEN Ying, et al. Heavy metal elements form analysis of soil profile in Baguanhe Basin Xiqu Panzhihua[J]. *Science Technology and Engineering*, 2015, 15(32): 79-86.
- [27] 郑国璋. 关中娄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(1): 109-115.
- ZHENG Guo-zhang. The vertical distribution regularity of heavy metal elements in Guanzhong tier soil profile[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 2008, 29(1): 109-115.
- [28] 王 美, 李书田, 马义兵, 等. 长期不同施肥措施对土壤和作物重金属累积的影响[J]. 农业环境科学学报, 2014, 33(1): 63-74.
- WANG Mei, LI Shu-tian, MA Yi-bing, et al. Effect of long-term fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2014, 33(1): 63-74.
- [29] 赖 波, 汤明尧, 柴仲平, 等. 新疆农田化肥施用现状调查与评价[J]. 干旱区研究, 2014, 31(6): 1024-1030.
- LAI Bo, TANG Ming-yao, CHAI Zhong-ping, et al. Investigation and evaluation of the chemical fertilizer application situation of farmland in Xinjiang[J]. *Aris Zone Research*, 2014, 31(6): 1024-1030.
- [30] 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.
- WANG Mei, LI Shu-tian. Heavy metals in fertilizers and effect of the fertilization on heavy metal accumulation in soils and crops[J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizer*, 2014, 20(2): 466-480.
- [31] 李明思, 贾宏伟. 棉花膜下滴灌湿润峰的试验研究[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2001, 5(4): 316-319.
- LI Ming-si, JIA Hong-wei. Experimental research about the wetted front of mulch-trickle irrigation for cotton[J]. *Journal of Shihezi University(Natural Science)*, 2001, 5(4): 316-319.
- [32] 咏 梅, 张 漫, 王圣伟, 等. 山东省滨城区农田土壤重金属来源解析及评价[J]. 中国农业大学学报, 2014, 19(6): 119-125.
- YONG Mei, ZHANG Man, WANG Sheng-wei, et al. Marina city in Shandong Province farmland soil heavy metal source analysis and evaluation[J]. *Journal of China Agricultural University*, 2014, 19(6): 119-125.
- [33] 汤明尧, 王 骞. 新疆棉区耕地土壤养分现状分析[J]. 新疆农业科技, 2014(5): 43-45.
- TANG Ming-yao, WANG Qian. Analysis status of cotton farmland soil nutrient in Xinjiang[J]. *Xinjiang Agricultural Science and Technology*, 2014(5): 43-45.
- [34] 朱 敏, 梁 智, 徐万里, 等. 新疆绿洲棉田土壤养分时空分布特点[J]. 新疆农业科学, 2009, 46(5): 1076-1081.
- ZHU Min, LIANG Zhi, XU Wan-li, et al. Characteristics of spatial distribution in soil nutrition of cotton field in Xinjiang oasis[J]. *Xinjiang Agricultural Sciences*, 2009, 46(5): 1076-1081.
- [35] 陈林华, 倪吾钟, 李雪莲, 等. 常用肥料重金属含量的调查分析[J]. 浙江理工大学学报, 2009, 22(2): 223-227.
- CHEN Lin-hua, NI Wu-zhong, LI Xue-lian, et al. Investigation of heavy metal concentrations in commercial fertilizers commonly-used [J]. *Journal of Zhejiang Sci-Tech University*, 2009, 22(2): 223-227.
- [36] 李书田, 刘荣乐, 陕 红. 我国主要畜禽粪便养分含量及变化分析[J]. 农业环境科学学报, 2009, 28(1): 179-184.
- LI Shu-tian, LIU Rong-le, SHAN Hong. Nutrient contents in main animal manures in China[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2009, 28(1): 179-184.
- [37] 苏 姝, 王 颖, 刘 景, 等. 长期施肥下黑土重金属的演变特征[J]. 中国农业科学, 2015, 48(23): 4837-4845.
- SU Shu, WANG Ying, LIU Jing, et al. Evolution characteristics of heavy metals in the black soil under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2015, 48(23): 4837-4845.
- [38] 李双异, 刘 赫, 汪景宽. 长期定位施肥对棕壤重金属全量及其有效性影响[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(6): 1125-1129.
- LI Shuang-yi, LIU He, WANG Jing-kuan. Effects of long-term located fertilization on heavy metals and their availability in brown earth[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2010, 29(6): 1125-1129.