

杨 军,陈同斌,郑袁明,等.北京市凉凤灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析[J].环境科学学报,2005,25(12):1661-1668
YANG Jun, CHEN Tongbin, ZHENG Yuanming, et al. Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2005, 25(12): 1661-1668
[免审稿件]责任编辑提示:本刊欢迎广大读者针对免审稿件提出各种意见

北京市凉凤灌区小麦重金属含量的动态变化及健康风险分析

——兼论土壤重金属有效性测定指标的可靠性

杨 军^{1,2}, 陈同斌^{1,*}, 郑袁明¹, 罗金发¹, 刘洪禄³, 吴文勇³, 陈玉成⁴

1. 中国科学院地理科学与资源研究所环境修复中心, 北京 100101
 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049
 3. 北京市水利科学研究所, 北京 100044
 4. 西南农业大学资源与环境学院, 重庆 400716
- 收稿日期: 2005-07-28 修回日期: 2005-10-19 录用日期: 2005-10-20

摘要:通过对北京市凉凤灌区小麦籽粒及其相对应土壤样品的调查发现,小麦籽粒中的 Ni、Pb、Zn 超标率分别为 38.1%、28.6%、4.8%;Hg、Cd 虽然未发现超标现象,但也有部分样品接近国家食品卫生标准(GB 2762—1994 和 GB 15201—1994);与 1976 年的调查结果相比,在过去的 30 年中,小麦籽粒中 Hg、Pb、Cu 含量呈显著增加的趋势. 研究结果表明,北京凉凤灌区的小麦存在 Hg、Pb、Zn 等污染的潜在风险. 无论是测定的土壤重金属全量,还是测定的土壤重金属的可提取态含量,都与小麦籽粒的重金属含量无显著的相关性. 因此,在评价土壤重金属污染是否对农作物(小麦籽粒)影响时,采用目前通用的土壤可提取态重金属并不一定会优于土壤重金属全量.

关键词:重金属; 小麦籽粒; 可提取态; 有效性; 污灌; 北京

文章编号: 0253-2468(2005)12-1661-08 **中图分类号:** X53 **文献标识码:** A

Dynamic of heavy metals in wheat grains collected from the Liangfeng Irrigated Area, Beijing and a discussion of availability and human health risks

YANG Jun^{1,2}, CHEN Tongbin^{1,*}, ZHENG Yuanming¹, LUO Jinfa¹, LIU Honglu³, WU Wenyong³, CHEN Yucheng⁴

1. Center for Environmental Remediation, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101
2. Graduate School of the Chinese Academy of Science, Beijing 100049
3. Beijing Institute of Water Resource, Beijing 100044
4. School of Environment and Resources, Southwest Agricultural University, Chongqing 400716

Received 28 July 2005; **received in revised form** 19 October 2005; **accepted** 20 October 2005

Abstract: Irrigation using wastewater containing elevated levels of heavy metals can result in steadily increasing soil concentrations which, in turn, can contribute to elevated tissue levels in crops. A field experiment was conducted in the Liangfeng Irrigated Area in Beijing to investigate the effects of wastewater irrigation on heavy metal concentrations in wheat grain. In addition, the study explored the relationship between total and extractable concentrations of heavy metals in soil and concentrations in grain. Twenty-one soil samples and corresponding wheat grain samples were collected, and the concentration of As, Cr, Cd, Cu, Hg, Ni, Pb and Zn were measured. The concentrations of Ni, Pb, and Zn in wheat grain were 38.1, 28.6 and 4.8% higher, respectively, than the China National Hygienic Standards for Food. The concentrations of Hg and Cd in some samples were near, although still lower than, the China National Hygienic Standards for Food. Concentrations of Hg, Pb and Cu in wheat grain were significantly higher than concentrations measured during investigations in the same area in the 1970s. These data indicate that the accumulation of some heavy metals has accelerated and there may be human health risks associated with consumption of the grain of wheat

基金项目: 国家杰出青年基金项目(No. 40325003);北京市重大科技攻关项目(No. H030730040330)

作者简介: 杨 军(1979—),男,博士生, E-yangj@igsrr.ac.cn; * 通讯作者(责任作者), E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

Foundation item: National Science Fund of China for Distinguished Young Scholars (No. 40325003); Core Scientific and Technological Project of Beijing (No. H030730040330)

Biography: YANG Jun (1979—), male, Ph. D. candidate, E-mail: yangj@igsrr.ac.cn; * **Corresponding author**, E-mail: chentb@igsrr.ac.cn

grown in the Liangfeng Irrigated Area. Despite the elevated levels of some metals in wheat, there were no significant correlations between either the total or the extractable metal concentrations in soils and metal concentrations in wheat grains. It might indicate that using the extractable heavy metal to evaluate the effect of heavy metal to the crop in soil was not more convictive than total heavy metals.

Keywords: heavy metal; wheat grains; extractable; availability; wastewater irrigation; Beijing

污水灌溉曾被认为是缓解农业水资源紧张状况的重要途径. 但如果长期使用未经处理的污水进行灌溉, 则可能由于污水中重金属等污染物浓度过高 (Aleem *et al.*, 2003; Bansal, 1998) 而使其在土壤中不断积累, 导致土壤污染 (Adriano *et al.*, 1998; Cameron *et al.*, 1997; Möller *et al.*, 2005), 进而影响农产品的卫生品质.

研究表明, 不同农作物对重金属的吸收存在差异 (Arun *et al.*, 2005), 而且同一农作物的不同品种对重金属的吸收也存在差异 (南忠仁等, 2001). 土壤中重金属浓度不太高时, 通常不会造成作物的生理障碍; 但当重金属达到一定浓度时就会引发作物减产, 或造成作物体内重金属浓度超过食品卫生标准而影响农产品质量 (夏增禄, 1988). 国内一些学者对污灌区农作物重金属污染的调查发现, 污灌会导致土壤重金属污染和农作物中重金属含量超标, 但不同水质的污水造成的污染程度各异. 例如, 用工业废水灌溉对农作物的重金属污染程度 (廖金凤, 1999; 张勇, 2001) 要高于用城市生活污水灌溉 (南忠仁等, 2002; 孙志强等, 1998; 周海红等, 2001).

目前, 关于土壤-农作物系统中重金属含量调查的研究已经很多 (冯绍元等, 2003; 宋菲等, 1996; 夏增禄, 1988; 杨居荣等, 1995), 并从土壤重金属全量及“有效性”等角度探讨了影响农作物重金属含量的因素, 但至今仍没有得到一致性的规律 (柴世伟等, 2003a; 陈晓婷等, 2002). 相关研究大多以室内栽培试验 (陈晓婷等, 2002; 丁园等, 2003; 孙波等, 2004; 温琰茂等, 1999) 为基础, 与大田的实际情况存在差别.

污灌条件下土壤及农作物的重金属污染情况已有报道 (Hussain *et al.*, 1999; Kunwar *et al.*, 2004; Mireles *et al.*, 2004; Rattan *et al.*, 2005; Yadav *et al.*, 2002). 近年来受到环境保护技术水平和工业污水处理率的不断提高以及化工企业的搬迁等因素的影响, 城市污水中的重金属含量已呈现出明显下降的趋势 (陈同斌等, 2003). 例如, 北京市高碑店

污水厂的出水中 Hg 由 1976¹⁾ 年的 $8.25 \mu\text{g L}^{-1}$ 下降到 1990²⁾ 年的 $0.35 \mu\text{g L}^{-1}$. 天津纪庄子污水厂的污泥重金属含量在 1988 ~ 1999 年期间每年的下降幅度在 0.1% ~ 2.4% 左右 (陈同斌等, 2003), 这些研究结果从不同方面反应了污水中重金属含量下降的趋势. 经过近 30 年的污水灌溉, 北京凉凤灌区土壤中的主要污染物 Hg 增加了 11.4% (杨军等, 2005). 而近年来农作物中的重金属积累情况究竟有何变化, 目前仍缺乏相关的报道. 本研究选取已有 50 多年污灌历史的北京市凉凤灌区, 开展污灌条件下作物 (小麦籽粒) 重金属含量动态变化的初步研究, 并结合实验结果讨论了目前有关土壤重金属有效性测定的可行性问题.

1 实验材料与方法 (Materials and methods)

1.1 样品采集

调查区域为北京凉凤灌区. 该调查区以种植小麦/玉米为主, 调查中选择小麦作为主要对象. 在 2004 年 6 月中旬小麦收割时进行采样, 并在同一位置采集土壤样品. 每个样点在 $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 的区域内随机采集小麦麦穗约 150 g, 共采集小麦/土壤样品各 21 个.

1.2 小麦样品的处理及测定

麦穗经过自然风干后, 手工搓掉外皮得到籽粒部分, 用粉碎机粉碎. 称取粉碎后的样品 15.0 g, 用 $\text{HNO}_3\text{-HClO}_4$ 法 (体积比 4 : 1) 消煮 (Parida *et al.*, 2003; 杨惠芬等, 1997), 消煮液定容至 50 mL. 石墨炉-原子吸收光谱法 (Analytic Jena 公司, Vario 6.0 AAS) 测定 Cd、Cr、Ni、Pb 浓度, 火焰-原子吸收光谱法 (Analytic Jena 公司, Vario 6.0 AAS) 测定 Cu、Zn 浓度, 氢化物发生-原子荧光光谱法 (北京海光仪器公司, AFS2202) 测定 As、Hg 浓度 (杨惠芬等, 1997). 分析过程所用试剂均为优级纯, 所用的水均为超纯水 (亚沸水). 分析中加入国家标准植物样品 (GSV-3) 进行质量控制, 各重金属的回收率均在国家标准参比物质的允许范围内.

1) 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究 (报告集). 1980: 627

2) 北京市通县水利志编辑委员会. 北京市区县水利志丛书: 通县水利志. 1993: 16 - 47

1.3 土壤重金属可提取态测定

土壤中可提取态 Cd、Cu、Ni、Pb、Zn 采用 DTPA 提取剂(0.005 mol L⁻¹ DTPA-0.01 mol L⁻¹ CaCl₂-0.1 mol L⁻¹ TEA, pH = 7.3)提取,水土比为 2 1 (Chen, 1993; 鲍士旦, 2003);可提取态 As 用 0.5 mol L⁻¹ 的 NaHCO₃提取,水土比为 10 1 (中国环境监测总站, 1992; 肖玲等, 1996);可提取态 Hg 含量用NH₄OAc 提取,水土比为 5 1 (尹军等,2000). 提取态 Cd、Ni、Pb 浓度用石墨炉-原子吸收光谱法 (Analytic Jena 公司, Vario 6.0 AAS)测定 ,Cu、Zn 浓度用火焰-原子吸收光谱法 (Analytic Jena 公司, Vario 6.0 AAS)测定 ,可提取态 As、Hg 浓度用氢化物发生-原子荧光光谱法 (北京海光仪器公司, AFS2202)测定.

1.4 数据处理与计算方法

文中的重金属可提取态系数是指用 1.3 节方法测定的土壤可提取态重金属与相应重金属全量之比 (柴世伟等, 2003b). 土壤重金属的有效性 (有效性系数)是指作物重金属吸收量与土壤重金属全量之比 (孟昭福等, 2004). 本研究中采用小麦籽粒的重

金属含量与土壤重金属全量之比计算土壤重金属的有效性 (有效性系数).

在进行统计分析前,所有分析数据均进行正态分布检验. 正态分布检验用 Origin pro 7.5 完成. 其余统计分析 (包括参数及非参数检验方法) 用 SPSS 11.5 完成.

2 结果 (Results)

2.1 灌区小麦籽粒重金属含量

小麦籽粒样品中 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb、Zn 等重金属的含量统计及超标率如表 1 所示. 与国家食品卫生标准 (杨惠芬等, 1997) 相比, Ni 的超标率最高, 达 38.1 %; 其次是 Pb 和 Zn, 超标率分别为 28.6 %和 4.8 %;样品中的 Cd、Hg 虽然没有超标,但其最大值分别为 0.096 mg · kg⁻¹、0.0168 mg · kg⁻¹,已接近卫生标准的临界值. 在本调查中,所有样品的累计超标率高达 66.7 %,大部分样品由于重金属超标而不宜食用. 因此,调查区域内农作物的卫生品质 (重金属超标问题) 问题仍值得进一步关注.

表 1 北京凉凤灌区小麦籽粒的重金属含量
Table 1 Concentrations of heavy metals in wheat grains in Liangfeng Irrigated Area, Beijing

重金属 Heavy metals	样本数 /个 No. of samples	重金属浓度 Heavy metal concentrations/(mg · kg ⁻¹)					国家食品卫生标准 ¹⁾ China National Hygienic Standard for Food/(mg · kg ⁻¹)	超标率 Percent exceeded standards
		最小值 Min	最大值 Max	中值 Median	平均值 Mean	标准差 S. D		
As	21	0.02	0.08	0.031	0.036	0.016	0.7	0
Cd	20	0.003	0.096	0.015	0.020	0.020	0.1	0
Cr	20	0.10	0.30	0.13	0.13	0.04	1.0	0
Cu	21	5.10	8.10	6.12	6.29	0.75	10	0
Hg	15	0.002	0.017	0.003	0.004	0.004	0.02	0
Ni	21	0.20	0.50	0.39	0.39	0.08	0.4 ³⁾	38.1 %
Pb	14	n. d. ²⁾	1.20	0.21	0.39	0.43	0.5	28.6 %
Zn	21	24.6	50.7	38.2	37.6	6.32	50	4.8 %

注 :1)《食品卫生理化检验标准手册》(杨惠芬等,1997); 2) n. d. :未检出; 3) 内控标准:全国食品卫生标准分委会推荐标准

2.2 灌区土壤重金属的有效性

土壤重金属的有效性 (有效性系数)是衡量土壤重金属被植物吸收难易程度的指标之一. 其有效性系数越大,则表明土壤中的重金属愈容易被该作物吸收. 从农学领域来看,粮食作物一般以作物的可食部分 (籽粒) 的吸收量 (浓度) 来评价土壤重金属有效性的强弱. 如表 2 所示,在调查区土壤中 Zn 的有效性系数最高,达到 0.577;其次是 Cu、Cd,其有效性系数分别为 0.232、0.109;As、Cr 的有效性系数最小. 本研究表明,凉凤灌区的 Zn、Cu、Cd 等重金属容易被小麦籽粒吸收,而土壤中的 As、Cr 不易吸收. 通过对小麦籽粒中 8 种重金属的有效性系数进行相

表 2 重金属的有效性系数

重金属 Heavy metals	样本数 /个 No. of samples	重金属有效性系数 Coefficients of availability of heavy metal				
		最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	几何均值 Geom. mean	标准差 S. D.
As	21	0.002	0.008	0.004	0.004	0.002
Cd	20	0.018	0.351	0.137	0.109	0.086
Cr	20	0.002	0.005	0.003	0.003	0.001
Cu	21	0.107	0.378	0.243	0.232	0.071
Hg	15	0.008	0.055	0.024	0.021	0.014
Ni	21	0.007	0.020	0.014	0.014	0.003
Pb	14	0.004	0.046	0.019	0.014	0.014
Zn	21	0.353	0.794	0.590	0.577	0.122

注:有效性系数为小麦籽粒中重金属含量与土壤重金属全量之比

关分析,发现,Hg 与 Ni、Cu 与 Zn 显著正相关 ($p < 0.05$) (表 3).

表 3 重金属的有效性系数的相关性分析

Table 3 Correlationship between different coefficients of availability of heavy metal								
相关系数 Correlationship								
	Ni	Cu	Hg	Pb	Zn	Cd	Cr	As
Ni	1	0.220	0.511 *	0.156	0.411	- 0.255	0.376	0.208
Cu		1	- 0.021	- 0.036	0.457 *	- 0.212	0.116	0.124
Hg			1	- 0.421	0.063	- 0.019	0.197	0.058
Pb				1	- 0.092	- 0.070	- 0.187	0.188
Zn					1	- 0.203	- 0.028	0.324
Cd						1	- 0.340	- 0.061
Cr							1	0.239
As								1

*表示 $p < 0.05$ (样本数 :n = 14 ~ 21)

2.3 土壤的重金属全量及其可提取态

通常采用化学浸提法从土壤中提取重金属,并用可提取态的多少表征土壤重金属的“有效性”.这种方法具有简便、快捷、费用少(孟昭福等,2001)等特点.但是,同一土壤中不同种类重金属的可提取态会存在数量级上的差异,导致彼此之间的浓度比较不能真实反映重金属之间“有效性”的差异,因此,本研究采用土壤重金属的可提取态系数来表征不同种类重金属“有效性”的强弱.如表 4 所示,在所有土壤重金属中,Cd 的可提取态系数最大,其次是 Cu、Pb,而 As 的可提取态系数最小.

表 4 北京凉风灌区土壤重金属的可提取态系数

Table 4 Ratio of extractable heavy metal to total heavy metal in soils from Liangfeng Irrigated Area, Beijing						
重金属 Heavy metals	样本数 /个 No. of samples	重金属的可提取态系数 Retio of extractable heavy metal to total heavy metal				
		最小值 Min	最大值 Max	平均值 Mean	几何均值 Geom. mean	标准差 S. D.
As	20	0.002	0.004	0.003	0.003	0.001
Cd	21	0.092	0.414	0.263	0.245	0.092
Cu	13	0.050	0.363	0.167	0.144	0.096
Hg	21	0.005	0.049	0.024	0.022	0.012
Ni	21	0.018	0.033	0.026	0.025	0.004
Pb	20	n. d.	0.157	0.110	0.107	0.022
Zn	20	0.012	0.041	0.023	0.022	0.008

注:可提取态系数为土壤可提取态重金属与相应土壤重金属全量之比;n. d.: 未检出

3 讨论(Discussion)

3.1 小麦籽粒重金属含量的变化趋势及其健康风险

1976 年,北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组对东南郊污灌区小麦、玉米、水稻等农

作物的重金属含量进行过调查,作物中 7 种重金属的含量几乎都没有超过食品卫生标准,只有少量糙米样品的 Hg 含量超标(超标率约占 10 %) ¹⁾. 图 1 列出了本研究中小麦籽粒的重金属含量与 1976 年调查结果的相对值(设 1976 年的调查结果为 1). 比较 2 次调查的结果可以发现,除 As、Cd、Cr 外,其余 4 种重金属的含量都有所增加. 进一步的统计分析表明(独立样本 t 检验),小麦籽粒中的 Hg、Cu、Pb、Zn 含量比 30 年前均有显著提高 ($p < 0.05$),其中 Cu、Pb、Zn 达极显著 ($p < 0.01$),上升趋势明显;小麦籽粒中的 As、Cd、Cr 含量都显著低于 1976 年的调查值,呈下降趋势. 由于 30 年前没有测定小麦籽粒的 Ni 含量,因此无法判断土壤以及小麦籽粒中 Ni 的变化趋势.

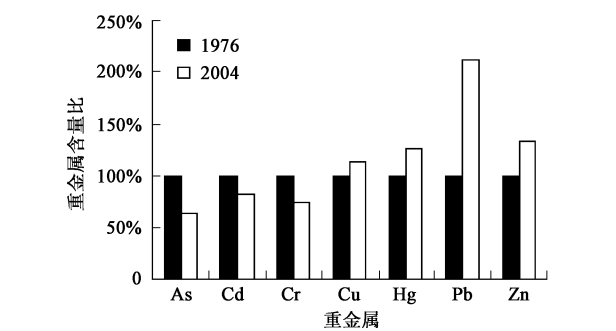


图 1 北京凉风灌区 1976 年与 2004 年小麦籽粒重金属含量之间的比较

g. 1 Comparison of heavy metals in wheat grains between 2004 and 1976 in Liangfeng Irrigated Area, Beijing

据中国营养学会推荐的理想膳食结构,每人每日食用谷类食物 300 ~ 500 g ¹⁾. 本研究以平均值 400 g 计,估算每人每日摄入 (Estimated Daily Absorption)

1) 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究(报告集) [M]. 1980: 665—666

的重金属 (Dóportes, 1995), 与日允许摄入量 (Acceptable Daily Intake) (FAO/WHO, 1991) 值相比, Ni, Pb 的摄入量非常高, As 最低 (0.5 %). 对于 Pb 而言, 仅通过食用谷物这一单一渠道, Pb 的摄取量已达到日允许摄入量的 72.9 %. Pb 对人体具有极强的毒性, 过量摄取 Pb 将会损害人体中枢神经组织

(Needleman and Landrigan, 1981), 对儿童的智能发育造成不可逆转的损伤 (Osman *et al.*, 1998; 1999). 因此, 灌区土壤中的 Pb 对人体健康存在比较严重的潜在威胁, 应该关注凉凤灌区农作物的 Pb、Hg 等重金属污染问题及其对人体健康的潜在危害.

表 5 膳食摄入重金属量与 ADI 比较

	As	Cd	Cr	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
估算日摄入量 (EDA) /mg	0.014	0.008	0.052	2.52	0.002	0.156	0.156	15.04
日允许摄入量 * (ADI) /mg	3.00	0.06	0.20 ~ 0.50	30.0	0.043	0.020	0.214	60.0
EDA/ADI	0.5 %	13.3 %	10.4 % ~ 26.0 %	8.4 %	780 %	3.7 %	72.9 %	25.1 %

* :WHO/FAO 食品添加剂联合专家委员会建议的成人 (以体重 60kg 计) 每日重金属允许摄入量 (ADI) (杨惠芬, 1997)

3.2 小麦籽粒重金属含量与土壤重金属含量的相关性

本研究的田间调查发现, 小麦籽粒中的重金属含量与土壤重金属全量以及可提取态之间都没有显著的相关性. 从可提取态系数与有效性系数的相关性看, 除 Cd、Hg, 其余重金属均不相关 (表 6). 1976 年的野外调查结果显示, 糙米中 Hg 污染的分布与

土壤汞污染的分布也不一致²⁾. 但是前人的某些室内盆栽试验发现, 植物体内重金属含量与土壤重金属全量以及可提取态之间具有良好的相关性 (丁园等, 2003; 陈晓婷等, 2002; 温琰茂等, 1999; Wang *et al.*, 2002). 田间条件下, 其相关性往往会明显减弱, 甚至没有明显的相关性, 导致室内的盆栽试验结果与野外实际调查结果不符.

表 6 重金属不同表征指标之间的相关分析

	相关系数 Correlationship						
	As	Cd	Cu	Hg	Ni	Pb	Zn
土壤重金属可提取态/土壤重金属全量 Extractable soil heavy metal/soil total heavy metal	0.587 **	0.206	0.449 **	0.486 **	0.593 **	0.709 **	0.609 **
小麦籽粒重金属含量/土壤重金属可提取态 Grain heavy metal /Extractable soil heavy metal	0.089	- 0.045	0.038	0.010	0.091	0.040	0.177
小麦籽粒重金属含量/土壤重金属全量 Grain heavy metal / soil total heavy metal	0.059	0.050	- 0.105	0.041	0.070	- 0.272	0.195
可提取态系数/有效性系数 Ratio of Extractable soil heavy metal to total soil heavy metal / coefficients of availability	0.053	0.499 *	0.225	0.636 **	0.058	- 0.041	- 0.094

* *: $p < 0.01$; *: $p < 0.05$.

3.3 利用土壤重金属及其可提取态含量评价植物重金属含量的适宜性

从本研究的结果可以看出, 土壤重金属全量与其可提取态之间存在一定的相关性; 除 Cd 外, 其余 7 种重金属之间的相关性达极显著 ($p < 0.01$). 张民等人的野外调查也发现类似的现象 (张民等, 1996; 李永涛等, 2004; 柴世伟等, 2004). 这意味着, 土壤可提取态重金属会随着土壤重金属全量的增加而增加, 二者之间大致呈一定的比例关系 (表 6).

长期以来, 一些学者在探索土壤可提取态重金属的化学测试结果与该土壤中所生长的植物重金属吸收量之间的相关性, 并提出了“有效性 (availability)”或“生物有效性 (bio-availability)”之类的概念 (Davies, 1978; Belotti, 1998). 由于并没有适宜的方法真正快捷、准确地测定土壤中的重金属“生物有效性”, 目前多通过将土壤重金属用化学手段分成不同形态, 用其中的某种形态来替代描述“生物有效性” (Morera *et al.*, 2001). 用某种试剂从土壤重金

1) 参考中国营养学会平衡膳食宝塔说明 (<http://www.cnsoc.org>:80 膳食宝塔 2005 年 3 月 26 日)
2) 北京东南郊环境污染调查及其防治途径研究协作组. 北京东南郊环境污染调查及防治途径研究 (报告集). 1980: 666

属全量中提取的那部分重金属,即可提取态并不等同于生物从土壤吸收的部分.因此,有一些研究者将其称为潜在可能性(potential)(Remon *et al.*, 2005).其实,用可提取态方法表征土壤重金属有效性的强弱,只是一个操作定义而已.土壤重金属的有效性受多种因素的制约,包括土壤的理化性质(土壤的结构、通透性、氧化还原电位、pH 等)、生物因素等(Ernst, 1996; 夏增禄, 1988),在不同土壤、不同作物类型条件下,土壤重金属有效性的强弱不一,仅仅用土壤重金属可提取态的多少也很难表征土壤重金属的有效性.

综上所述,土壤可提取态重金属虽然是影响植物体内重金属吸收量的重要因素之一,但重金属的生物有效性与其总量、土壤本身的理化性质、有机质含量等因素都有密切关系(Sauvé *et al.*, 1997; 廖敏等, 1999).因此,在进行农作物的重金属污染风险评价时,除了考虑土壤中可提取态重金属的含量之外,还需要考虑土壤和影响作物生长发育的诸多因素.采用土壤重金属可提取态指标作为土壤污染的评价指标是否一定会优于采用土壤重金属全量,目前仍是一个有待进一步研究和证实的科学问题.

4 结论(Conclusions)

1) 北京凉凤灌区的小麦籽粒存在明显的重金属污染问题.与《国家食物卫生标准》的临界值比较,其 Ni、Pb、Zn 的超标率分别为 38.1%、28.6%、4.8%,同时 Hg、Cd 也有部分样品接近《国家食品卫生标准》的临界值.

2) 与 30 年前的调查结果相比,小麦籽粒中 Hg、Pb、Cu 含量显著增加,总体来看其重金属污染情况呈加重的趋势.

3) 小麦对 Zn、Cu、Cd 的吸收能力较强,对 Hg、Pb、Ni,对 As 和 Cr 的吸收能力较弱.

通讯作者简介:陈同斌(1963—),男,博士,研究员,博士生导师.主要研究方向为污染土壤的植物修复,固体废弃物资源化利用,区域土壤环境质量与风险评价.

参考文献(References):

- Adriano D C, Chlopecka A, Kaplan D I, *et al.* 1998. Soil contamination and remediation: philosophy, science and technology, in Contaminated Soil [M]. Paris: NRA, 465—504
- Aleem A, Isar J, Malik A. 2003. Impact of long-term application of industrial wastewater on the emergence of resistance traits in *Azotobacter chroococcum* isolated from rhizospheric soil [J]. *Bioresource Technology*, 86: 7—13
- Antolín M C, Pascual I, García C, *et al.* 2005. Growth, yield and solute content of barley in soils treated with sewage sludge under semiarid Mediterranean conditions [J]. *Field Crops Research*, 94: 224—237
- Arun K. Shanker, Carlos Cervantes, Herminia Loza-Tavera, *et al.* 2005. Chromium toxicity in plants [J]. *Environment International*, 37: 739—753
- Bansal O P. 1998. Heavy metal pollution of soils and plants due to sewage irrigation [J]. *Indian Environmental Health*, 40: 51—52
- Bao S D. 2000. Soil Chemical Analysis [M]. Beijing: China Agriculture Press: 132—135, 373 (in Chinese)
- Belotti E. 1998. Assessment of a soil quality criterion by means of a field survey [J]. *Applied Soil Ecology*, 10: 51—63
- Cameron K C, Di J, McLaren R G. 1997. Is soil an appropriate dumping ground for our wastes? [J]. *Australian Journal of Soil Research*, 35: 995—1035
- Chai S W, Wen X M, Wei X G, *et al.* 2004. Heavy metal content characteristics of agricultural soils in the Pearl River Delta [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 43(4): 90—94 (in Chinese)
- Chai S W, Wen Y M, Zhang Y N, *et al.* 2003a. Bio-availability of heavy metal of agriculture soil in Guangzhou Suburb [J]. *Urban Environmental & Ecology*, 16(6): 123—125 (in Chinese)
- Chai S W, Wen Y M, Zhang Y N, *et al.* 2003b. The heavy metal content character of agriculture soil in Guangzhou suburbs [J]. *China Environmental Science*, 23(6): 592—596 (in Chinese)
- Chen T B, Huang Q F, Gao D, *et al.* 2003. Heavy metal concentrations and their decreasing trends in sewage sludges of china. *Acta Scientiae Circumstantiae* [J], 23(5): 561—569 (in Chinese)
- Chen T B. 1993. Application of NaHCO₃-DTPA extractant-ICP spectrometry technique in soil test for availability of nutrients and heavy metals [J]. *Pedosphere*, 3(4): 377—382
- Chen X T, Wang G, Liang L Z, *et al.* 2002. Effect of lime with peat addition on heavy metal uptake by pakchoi [J]. *Journal of Fujian Agriculture and Forestry University (Natural Science Edition)*, 31(3): 392—396 (in Chinese)
- Davies B E. 1978. Plant-available lead and other metals in British garden soils [J]. *The Science of the Total Environment*, 9: 243—262
- Déportes I, Benoit-Guyod J L, Zamirou D. 1995. Hazard to man and the environment posed by the use of urban waste compost: A review [J]. *The Science of the Total Environ*, 173: 197—222
- Ding Y, Zong L G. 2003. Expression of heavy metals contamination by available ion impulse in different soils [J]. *Environmental Pollution & control*, 25(3): 173—178 (in Chinese)
- Environmental Monitoring Chief Station of China. 1992. The Latter-day Analysis Method for the Elements in the Soil [M]. Beijing: China Environmental Science Press, 69—70 (in Chinese)
- Ernst W H O. 1996. Bioavailability of heavy metals and decontamination of soils by plants [J]. *Applied Geochemistry*, 11: 163—167
- FAO/WHO. 1991. Evaluation of certain veterinary drug residues in food. Thirty-eight report of the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives[R]. WHO Technical Report Series, No.815, Geneva

- Feng S Y, Qi Z M, Huang G H, *et al.* 2003. Field experimental study on the residue of heavy metal in summer corn [J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 22(6): 9—13 (in Chinese)
- Hussain G, Adnan J. Al-Saati. 1999. Wastewater quality and its reuse in agriculture in Saudi Arabia [J]. *Desalination*, 123: 241—251
- Kunwar P Singh, Dinesh Mohan, Sarita Sinha, *et al.* 2004. Impact assessment of treated/untreated wastewater toxicants discharged by sewage treatment plants on health, agricultural, and environmental quality in the wastewater disposal area [J]. *Chemosphere*, 55: 227—255
- Li Y T, Liu K X, Zhang C, *et al.* 2004. Relationships between total and DTPA extractable contents of Cu, Pb, Zn, Cd in trace metal contaminated Paddy Soils of Dabaoshan, Guangdong [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 23(6): 1110—1114 (in Chinese)
- Liao J F. 1999. Effect of Cu, Zn, Cr and Ni in electroplating wastewater on agricultural environment [J]. *Rural Eco-Environment*, 15(4): 52—55 (in Chinese)
- Liao M, Huang Z Y, Xie Z M. 1999. Effect of pH on transport and transformation of Cd in soil-water system [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 19(1): 81—86 (in Chinese)
- Meng Z F, Zhang Z Q, Zhang Y P, *et al.* 2004. Bioavailability of heavy metals and affecting in sewage sludge [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 23(1): 115—118 (in Chinese)
- Meng Z F, Zhang Z Q, Xue C Z, *et al.* 2001. Determination of bioavailability of heavy metals in soil by wheat young seedlings in stead of Rye [J]. *Agro-environmental Protection*, 20(5): 337—340 (in Chinese)
- Mireles A, Solís C, Andrade E, *et al.* 2004. Heavy metal accumulation in plants and soil irrigated with wastewater from Mexico city [J]. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 219—220: 187—190
- Möller A, Müller H W, Abdullah A, *et al.* 2005. Urban soil pollution in Damascus, Syria: concentrations and patterns of heavy metals in the soils of the Damascus Ghouta [J]. *Geoderma*, 124: 63—71
- Morera M T, Echeverría J C, Mazkarián C, *et al.* 2001. Isotherms and sequential extraction procedures for evaluating sorption and distribution of heavy metals in soils [J]. *Environmental Pollution*, 113: 135—144
- Nan Z R, Cheng G D. 2001. Behaviors of heavy metals (Cd and Pb) in crops grown in land of arid regions irrigated by wastewater [J]. *Agro-environmental Protection*, 20(4): 210—213 (in Chinese)
- Nan Z R, Li J J, Zhang J M, *et al.* 2002. Research on the soil-crop system pollution of trace metals and its control strategies in the suburb of Bayin city [J]. *Environmental Pollution & Control*, 24(3): 170—173 (in Chinese)
- Needleman H L, Landrigan P J. 1981. The health effects of low level exposure to lead [J]. *Annu Rev Public Health*, 2: 277—298
- Osman K, Pawlas K, Schutz A, *et al.* 1999. Lead exposure and hearing effects in children in Katowice, Poland [J]. *Environmental Research*, 1999, 80(1): 1—8
- Osman K, Schutz A, Akesson B, *et al.* 1998. Interactions between essential and toxic elements in lead exposed children in Katowice, Poland [J]. *Clinical Biochemistry*, 31: 657—665
- Parida B K, Chhibba I M, Nayyar V K. 2003. Influence of nickel-contaminated soils on fenugreek (*Trigonella corniculata* L.) growth and mineral composition [J]. *Scientia Horticulturae*, 98: 113—119
- Rattan R K, Datta S P, Chhonkar P K, *et al.* 2005. Long-term impact of irrigation with sewage effluents on heavy metal content in soils, crops and groundwater—a case study. *Agriculture [J]. Ecosystems & Environment*, 109: 310—322
- Remon E, Bouchardon J L, Cornier B, *et al.* 2005. Soil characteristics, heavy metal availability and vegetation recovery at a former metallurgical landfill: Implications in risk assessment and site restoration [J]. *Environmental Pollution*, 137: 316—323
- Sauvé S, McBride M, Norvell W A, Hendershot W. 1997. Copper solubility and speciation of in situ contaminated soils: Effects of copper level, pH and organic matter [J]. *Water, Air and Soil Pollution*, 100: 133—149
- Song F, Guo Y W, Liu X Y, *et al.* 1996. Pollution of Cd, Zn and Pb in brown earth [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 16(4): 432—436 (in Chinese)
- Sun B, Sun H, Zhang T L. 2004. Bio-environmental effects and index of remediation of multi-heavy metals pollution Red Soils [J]. *Environmental Science*, 25(2): 104—110 (in Chinese)
- Sun Z Q, Zhang L Z, Cao J, *et al.* 1998. Effects of sewage irrigation on agro-environment - A case study from Shijiazhuang Sewage Irrigation Areas [J]. *Eco-Agriculture Research*, 6(4): 68—71 (in Chinese)
- Wang Z W, Shan X Q, Zhang S Z. 2002. Comparison between fractionation and bioavailability of trace elements in rhizosphere and bulk soils [J]. *Chemosphere*, 46: 1163—1171
- Wen Y M, Lu Y B. 1999. Study on availability control of heavy metals in soil applied with municipal sewage sludge [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni*, 38(4): 97—101 (in Chinese)
- Xia Z L. 1988. Soil Environmental Capacity and Application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 22—66 (in Chinese)
- Xiao L, Zhao Y G. 1996. Selection of the extractants for available As in calcareous soil [J]. *Shaanxi Environment*, 3(3): 17—21 (in Chinese)
- Yadav R K, Goyal B, Sharma R K, *et al.* 2002. Post-irrigation impact of domestic sewage effluent on composition of soils, crops and ground water—A case study [J]. *Environment International*, 28: 481—486
- Yang H F, Li M Y, Shen W. 1997. The Manual of Standard in Food Health and Its Physics-chemical Test [M]. Beijing: China Standard Press, 103—113 (in Chinese)
- Yang J R, He J Q, Zhang G X, *et al.* 1995. Tolerance mechanism of crops to Cd pollution [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 6(1): 87—91 (in Chinese)
- Yang J, Zheng Y M, Chen T B, *et al.* 2005. Accumulation and temporal variation of heavy metals in the soils from the Liangfeng Irrigated Area of Tongzhou, Beijing City [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 25(9): 1175—1181 (in Chinese)
- Yin J, Liu W J, Xie J Z, *et al.* 2000. The study on extractions and extractants of soil available Cd, Hg [J]. *Journal of Agricultural University of Hebei*, 23(2): 25—28 (in Chinese)
- Zhang M, Gong Z T. 1996. Contents and distribution of some heavy metal elements in the vegetable cultivated soils in China [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 33(1): 85—93 (in Chinese)
- Zhang Y. 2001. Heavy metal pollution of soil and agricultural products in Shenyang suburbs current situation [J]. *Chinese Journal of Soil*

Science, 32(4): 182—186 (in Chinese)

Zhou H H, Zhang Z J. 2001. Research on agro-ecosystem pollution in Guanzhong Irrigation District [J]. Environmental Pollution & Control, 23(6): 309—328 (in Chinese)

中文参考文献:

- 鲍士旦. 2000. 土壤农化分析(第三版)[M]. 北京: 中国农业出版社, 132—135, 373
- 柴世伟, 温琰茂, 韦献革, 等. 2004. 珠江三角洲主要城市郊区农业土壤的重金属含量特征[J]. 中山大学学报(自然科学版), 43(4): 90—94
- 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 2003a. 广州市郊区农业土壤重金属生物有效性[J]. 城市环境与城市生态, 16(6): 123—125
- 柴世伟, 温琰茂, 张云霓, 等. 2003b. 广州市郊区农业土壤重金属含量特征[J]. 中国环境科学, 23(6): 592—596
- 陈同斌, 黄启飞, 高 定, 等. 2003. 中国城市污泥的重金属含量及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 23(5): 561—569
- 陈晓婷, 王 果, 梁林洲, 等. 2002. 石灰与泥炭配施抑制小白菜对重金属的吸收[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 31(3): 392—396
- 丁 园, 宗良纲. 2003. 不同土壤重金属复合污染的有效态离子冲量表征[J]. 环境污染与防治, 2003, 25(3): 173—178
- 冯绍元, 齐志明, 黄冠华, 等. 2003. 重金属在夏玉米作物体中残留特征的田间试验研究[J]. 灌溉排水学报, 22(6): 9—13
- 李永涛, 刘科学, 张 池, 等. 2004. 广东大宝山地区重金属污染水田土壤的 Cu, Pb, Zn, Cd 全量与 DTPA 浸提态含量的相互关系研究[J]. 农业环境科学学报, 23(6): 1110—1114
- 廖金凤. 1999. 电镀废水中铜锌铬镍对农业环境的影响[J]. 农村生态环境, 15(4): 52—55
- 廖 敏, 黄昌勇, 谢正苗. 1999. pH 对镉在土水系统中的迁移和形态的影响[J]. 环境科学学报, 19(1): 81—86
- 孟昭福, 张增强, 张一平, 等. 2004. 几种污泥中重金属生物有效性及其影响因素的研究[J]. 农业环境科学学报, 23(1): 115—118
- 孟昭福, 张增强, 薛澄泽, 等. 2001. 替代黑麦幼苗测定土壤中重金

- 属生物有效性的研究[J]. 农业环境保护, 20(5): 337—340
- 南忠仁 程国栋. 2001. 干旱区污灌农田作物系统重金属 Cd、Pb 生态行为研究[J]. 农业环境保护, 20(4): 210—213
- 南忠仁 李吉均 张建明, 等. 2002. 白银市区土壤作物系统重金属污染分析与防治对策研究[J]. 环境污染与防治, 24(3): 170—173
- 宋 菲, 郭玉文, 刘孝义, 等. 1996. 土壤中重金属镉锌铅复合污染的研究[J]. 环境科学学报, 16(4): 432—436
- 孙 波, 孙 华, 张桃林. 2004. 红壤重金属复合污染修复的生态环境效应与评价指标[J]. 环境科学, 25(2): 104—110
- 孙志强 张灵芝 曹 健, 等. 1998. 污水灌溉对农业环境影响的研究[J]. 生态农业研究, 6(4): 68—71
- 温琰茂, 鲁艳兵. 1999. 施用城市污泥的土壤重金属生物有效性[J]. 中山大学学报(自然科学版), 38(4): 97—101
- 夏增禄(主编). 1988. 土壤环境容量及其应用[M]. 北京: 气象出版社, 22—66
- 肖 玲, 赵允格. 1996. 石灰性土壤中有效砷提取剂的选择[J]. 陕西环境, 3(3): 17—21
- 杨惠芬, 李明元, 沈 文. 1997. 食品卫生理化检验标准手册[M]. 北京: 中国标准出版社, 103—113
- 杨 军, 郑袁明, 陈同斌, 等. 2005. 北京市凉风灌区土壤重金属的积累及其变化趋势[J]. 环境科学学报, 25(9): 1175—1181
- 杨居荣, 贺建群, 张国祥, 等. 1995. 农作物对 Cd 毒害的耐性机理探讨[J]. 应用生态学报, 6(1): 87—91
- 尹 军, 刘文菊, 谢建治, 等. 2000. 土壤中有有效态镉、汞浸提剂和浸提条件研究[J]. 河北农业大学学报, 23(2): 25—28
- 张 民, 龚子同. 1996. 我国菜园土壤中某些重金属元素的含量与分布[J]. 土壤学报, 33(1): 85—93
- 张 勇. 2001. 沈阳郊区土壤及农产品重金属污染的现状评价[J]. 土壤通报, 32(4): 182—186
- 中国环境监测总站. 1992. 土壤元素的近代分析方法[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 69—70
- 周海红 张志杰. 2001. 关中清灌区农田生态系统污染现状研究[J]. 环境污染与防治, 23(6): 309—328