张芳,常春平,李静,等. 胶东半岛农村地区地下水重金属健康风险评价—以山东省莱阳市为例[J]. 环境科学与技术,2013,36(9):180-186. Zhang Fang, Chang Chun-ping, Li Jing, et al. Health risk assessment of heavy metals in groundwater in rural area of Jiaodong Peninsula:a case study in Laiyang City, Shandong Province[J]. Environmental Science & Technology,2013,36(9):180-186.

胶东半岛农村地区地下水重金属健康风险评价
—以山东省莱阳市为例

张芳[1,2], 常春平[1*], 李静[2], 宋帅[2], 蔡文静[1,2], 赵广帅[2], 李发东[2*]
(1.河北师范大学资源与环境科学学院 河北省环境演变与生态建设重点实验室,河北 石家庄 050024;
2.中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室,北京 100101)

摘 要:重金属健康风险评价对居民身体健康具有重要意义。使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)测定了莱阳市农村的 31 个地下水体中重金属 Cu、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Cr 的含量水平,阐明了该地区重金属的空间分布特征、来源及其迁移规律,并运用美国环保局推荐的健康风险评价模型对其引起的健康风险进行了评价。结果表明,该地区地下水中 Cr 未检出,Cu、Fe、Zn、Mn 和 Cd 的浓度范围分别是 0~59、23~905、29~50 700、3~2 999、0~1 μg/L。根据我国饮用水质量标准,所有样点中 Cu 和 Cd 的浓度未超标,Zn、Mn 和 Fe 的超标率分别为 22.58%、16.13%和 6.45%,个别样点超标倍数甚高。健康风险评价结果表明,Cu、Fe、Zn、Mn 通过饮用水途径产生的健康风险平均值分别为 3.49×10^{-10}、1.91×10^{-10}、100.50×10^{-10}、37.40×10^{-10} a^{-1},均远低于 ICRP(5×10^{-5} a^{-1})和 USEPA(1×10^{-4} a^{-1})的最大可接受风险水平。但是 Zn 和 Mn 对人体健康危害的平均个人年风险明显高于其他地区,因此,该研究区非致癌物 Zn 和 Mn 的污染来源及其环境行为应该引起重视。该研究为该区域水质污染状况研究及治理监管工作提供理论依据,为其他地区重金属的监测和质量控制提供参考。

关键词:胶东半岛; 农村; 地下水; 重金属; 健康风险评价
中图分类号:X820 **文献标志码**:A doi:10.3969/j.issn.1003-6504.2013.09.036 **文章编号**:1003-6504(2013)09-0180-07

Health Risk Assessment of Heavy Metals in Groundwater in Rural Area of Jiaodong Peninsula:A Case Study in Laiyang City, Shandong Province

ZHANG Fang[1,2], CHANG Chun-ping[1*], LI Jing[2], SONG Shuai[2], CAI Wen-jing[1,2], ZHAO Guang-shuai[2], LI Fa-dong[2*]
(1.College of Resource and Environment Science, Hebei Key Laboratory of Environmental Change and Ecological Construction, Hebei Normal University, Shijiazhuang 050024, China;
2.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Research Institute of Geographic Science and Natural Resource, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China)

Abstract: Health risk assessments of heavy metal are significant for resident health. Concentrations of Cu, Fe, Zn, Mn, Cd, and Cr in 31 groundwaters in rural areas of Laiyang City, Shandong Province were determined by inductively coupled plasma-optical emission spectrometer (ICP-OES). The spatial distribution, sources and migration of the heavy metals in this area were studied, and health risk assessments in groundwaters were conducted using the US-EPA health risk assessment model. Results showed that Cr was not detected, and the concentrations of Cu, Fe, Zn, Mn and Cd were 0~59, 23~905, 29~50 700, 3~2 999 and 0~1 μg/L respectively. According to drinking water standard of China, the exceeding standard rate of Zn, Mn and Fe were 22.58%, 16.13% and 6.45%, far beyond the standard limits, while the concentration of Cu and Cd were lower than the standard. Average health risk values of non-carcinogenic pollutant Cu, Fe, Zn and Mn were 3.49×10^{-10}, 1.91×10^{-10}, 100.50×10^{-10}, 37.40×10^{-10} a^{-1} respectively, which were much lower than the maximum allowance levels

《环境科学与技术》编辑部:(网址) http://fjks.chinajournal.net.cn (电话) 027-87643502 (电子信箱) hjkxyjs@126.com
收稿日期:2012-11-01;修回 2012-12-27
基金项目:中国科学院"百人计划"项目
作者简介:张芳(1987-),女,硕士研究生,主要研究方向为水资源管理与水环境评价,(电子信箱) zhang870515@126.com;* 通讯作者,常春平,副教授,硕士生导师,主要从事生态建设与灾害防治;李发东,研究员,博士生导师,主要研究方向为生态水文与水环境,(电子信箱) lifadong@igsnrr.ac.cn。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

recommended by ICRP (5×10^{-5} a^{-1}) and by USEPA (1×10^{-4} a^{-1}). Nevertheless, the risk values of Zn and Mn were higher than some areas in China, suggesting their pollution in groundwater should be paid more attentions. The study would provide theoretical basis for deliberating of water pollution and prevention, and also give reference for monitoring and controlling heavy metals in other areas.

Key words: Jiaodong Peninsula; rural area; groundwater; heavy metals; health risk assessment

重金属污染物可以通过工农业及生活废水的排放、降水径流、受污染沉积物的释放及大气沉降等途径进入天然水体，在水体中累积到一定程度会对水生生态系统产生严重危害，并可通过饮水、食物链等途径直接或间接地影响到人类自身的健康[1-2]。对人体来说，饮用水中的 Cr、Cd、Cu 和 Zn 等重金属污染被认为是一种很重要的暴露途径[3-4]，过量的摄入会严重损害人体肝、肾、消化系统[5]和神经系统等[6]。Fe、Mn 是人体生理代谢中不可或缺的元素，但是，这 2 种元素浓度过大都会导致人体代谢紊乱，诱发各种疾病。特别是长期饮用重金属 Mn 含量过高的水，会造成人体多种系统及器官的毒性损害。

由于重金属在水环境中不可降解[7]，同时在一定诱导条件下可以发生各种形态的转化以及离散富集过程[8]，参与生物地球化学循环过程[9]，致使其环境危害不断放大，由此引发的环境问题已受到国际国内社会的广泛关注[10-11]。目前，国际上许多国家对水体重金属的健康评价都沿用美国的健康风险评价方法[5,12]。随着水环境污染日益严重，国内已有不少关于饮用水源健康风险评价的研究[1,13-17]，如高继军等对北京市饮用水源进行的重金属健康风险评价，李祥平等对广州市主要饮用水源中重金属健康风险做的初步评价，孙超等对上海市主要饮用水源地水体重金属健康风险进行的初步评价。但是大多数健康风险评价都是针对城市饮用水源，关于农村地区饮用水源的重金属健康风险评价还不多。在大部分农村地区，居民的饮用水一般直接来源于地下水的潜水层，易受污染，通常未经过滤消毒处理，直接饮用，常导致各种疾病的发生[18]。

莱阳市位于胶东半岛中部，目前只有代杰瑞等对山东省东部地区（青岛、烟台、威海、潍坊、日照、临沂）浅层地下水中的地球化学特征的研究[19]，关于莱阳市地下水中重金属的研究还未见报道。本研究通过对莱阳市农村地区主要饮用水源地水（即地下水）中 Cu、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Cr 的浓度分布进行调查，并采用美国环保署（USEPA）推荐的健康风险评价模型对饮用水源地水中的重金属进行健康风险评价，旨在掌握莱阳市乃至整个胶东半岛主要饮用水源地水体的健康风险状况，明确将会污染因子的污染程度，为环境风险管理提供定量依据。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

莱阳市（120°31′00″~120°59′12″E，36°34′10″~37°9′52″N）辖区面积 1 734 km^2，人口 87.2 万，海岸线长 27.5 km。主要为低山丘陵区，山丘起伏和缓，沟壑纵横交错，因受胶东脊背地形影响，地势由北向南倾斜。境内河流，因地势北高南低，多为北源南流。境内矿产资源较为丰富，种类多，分布广，以非金属矿产为主，不均匀分布于全市 18 个镇[20]。研究区内具有供水意义的含水层为河谷地区的砂砾石层和中砂层，砂砾石层遍布盆地，埋深 1~4 m，厚度变化较大，在清水河、岘河汇合处最大，渗透系数一般在 100 m/d 以上；中砂层沿岘河、清水河、白龙河呈条带状分布，厚度 10 m 左右，渗透系数在 200 m/d 以上，水质较好，水量较丰富[21]。

1.2　样品采集与分析方法

于 2011 年 9 月底采集了莱阳市 31 个村庄（图 1）的地下水样，所有水样经 0.45 μm 滤膜过滤后，加优级纯硝酸酸化至 pH<2，确保重金属呈离子状态而不被吸附或产生沉淀，存储于聚乙烯塑料瓶中，密封保存，运回实验室置于冰箱（4 ℃）保存。

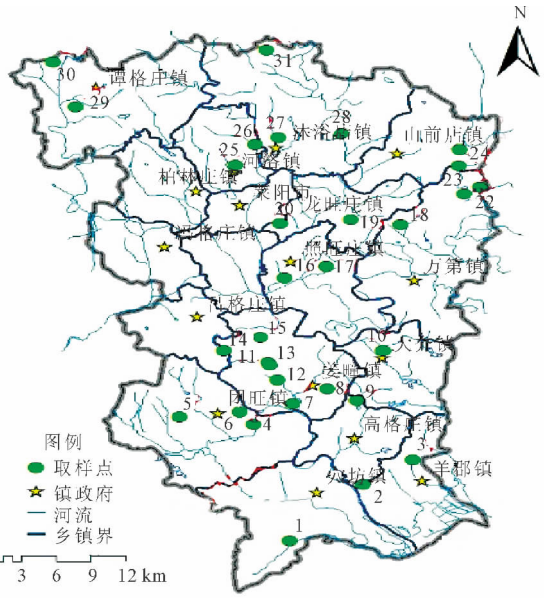

图1 地下水样点分布图

Fig.1 Location of groundwater sampling sites in Laiyang City

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES，Optima 5300DV，美国珀金埃尔默仪器有限公司)测定所有水样中Cu、Fe、Zn、Mn、Cd和Cr的浓度，该仪器可测得的Cu、Fe、Zn、Mn、Cd和Cr的极限值分别为0.000 1~1 000 mg/L、<0.000 1 mg/L、0.000 1~1 000 mg/L、0.000 1~1 000 mg/L、<0.000 1 mg/L、0.000 1~1 000 mg/L，实验中超纯水，空白及样品的处理测定6次，取后3次的平均值作为分析结果。样品测定完毕后再次测定标准样品，以确保数据的分析误差控制在3%以内。

1.3 健康风险评价模型

重金属污染物通过饮用水进入人体后，其引起的健康风险主要包括基因毒性物质(致癌物)健康风险和躯干毒性物质(非致癌物)健康风险。美国环保局在1989年提出了健康风险评价的4个步骤，即数据收集和数据评估、毒性评估、暴露评估、风险表征。健康风险评价在饮用水源水质健康危害方面的研究日益受到重视。目前，国际上许多国家都沿用美国的健康风险评价方法。本研究采用美国环保局推荐的暴露计算方法和健康风险评价模型，计算公式[22-23]分别为：

$$R_i^c=[1-\exp(D_i\times q)]/75 \quad (1)$$

$$R_i^n=(D_i/RfD)\times10^{-6}/75 \quad (2)$$

式(1)为致癌物i所致健康危害的风险模型，其中R_i^c为化学致癌物i经食入途径产生的平均个人致癌年风险(a^{-1})；D_i为化学致癌物i经食入途径的单位体重日均暴露剂量[mg/(kg·d)]，q_i为化学致癌物i经食入途径致癌强度系数[mg/(kg·d)]；75为2009年山东省人均寿命(a)。

式(2)为非致癌物i所致健康危害的风险模型，其中R_i^n为非致癌物i通过食入途径所致健康危害的个人平均年风险(a^{-1})；RfD_i为非致癌物i经食入途径的单位体重日均暴露剂量[mg/(kg·d)]。

饮水途径的单位体重日均暴露剂量D_i可按式(3)计算：

$$D_i=2.2\times C_i/70 \quad (3)$$

式(3)中，2.2为成年人每日平均饮水量；C_i为化学致癌物或非致癌物实际浓度(mg/L)；70为人均体重(kg)[24]。

对于饮用水中各有毒物质所引起的整体健康风险，假设各有毒物质对人体健康危害的毒性作用呈相加关系，而不是协同或拮抗关系，则饮用水总的健康危害风险R总计算公式为[17]：

$$R_{总}=R_i^c+R_i^n \quad (4)$$

根据国际癌症研究机构(IARC)和世界卫生组织(WHO)通过全面评价化学物质致癌性可靠程度而编制的分类系统，并参考有关资料[23,25-27]查得与评价有关的化学致癌物和非致癌物质参考剂量值见表1。

表1 非致癌物和致癌物i经食入途径的单位体重日均暴露剂量RfD_i和q_i的值

Table 1 The values of RfD_i and q_i of model parameters (mg·kg^{-1}·d^{-1})

非致癌物质	Cu	Fe	Zn	Mn	致癌物质	Cr	Cd
饮水途径 RfD_i	5×10^{-3}	0.3	0.3	0.02	q_i	41	6.1

2 结果与讨论

2.1 地下水中各重金属浓度分布

莱阳市地下水中重金属浓度分布见表2，Cr未检出，Cd的检出率为9.6%，且被检出点的含量都较低(均为1 μg/L)，Cu的检出率为48.39%，其他3种重金属的检出率均为100%。实验结果显示Zn的含量超标率最高(7个样点超标)，样点20(文翘泊村)的超标倍数高达49.7，大部分超标的样点都集中在姜疃镇(点15岚子村、点11新庄村、点13塔南泊)。所有取样点中，5个样点Mn含量超标，其中超标倍数最高的样点是点31(韦家沟村)(28.99倍)，其次是点24(北夏各庄村)(15.34倍)，其他3个超标样点超标倍数均小于1。研究区内只有2个样点，即：点19、点6(南龙旺庄、崔疃村)Fe含量超标，超标倍数分别是2.02倍、0.44倍。

表2 地下水中重金属浓度统计结果

Table 2 Heavy metals concentrations of groundwater samples (μg/L)

重金属	地区	检出率/%	超标率/%	最大值	最小值	平均值	国家饮用水标准(GB 5749-2006)	EPA标准
Cu	莱阳市	48.39	0	59.00	0	4.16	1 000.00	1 000.00
	山东省东部地区			236.40	0.01	3.57		
Fe	莱阳市	100	6.45	905.00	23.00	136.84	300.00	300.00
	山东省东部地区			26 860.00	0.10	104.90		
Zn	莱阳市	100	22.58	50 700.00	29.00	7 194.61	1 000.00	5 000.00
	山东省东部地区			1 778.00	0.01	17.10		
Mn	莱阳市	100	16.13	2 999.00	3.00	178.48	100.00	50.00
	山东省东部地区			15 185.00	0.06	86.90		
Cd	莱阳市	9.6	0	1	0	0.097	5.00	5.00
	山东省东部地区			5.52	0.01	0.04		

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

通过与山东省东部地区（青岛、烟台、威海、潍坊、日照、临沂）地下水中重金属浓度[19]进行比较可以看出（表2），莱阳市地下水中 Cu、Fe、Zn、Mn、Cd 和 Cr 的平均浓度均高于山东省东部地区。在水文地质条件相似的条件下，重金属含量较高的原因可能与人为污染有关。

2.2　水中重金属污染物健康风险评价

由于莱阳市地下水中 Cr 未检出，Cd 的检出率和含量均较低，所以本研究只对 Cu、Fe、Zn 和 Mn 4 种非致癌重金属的浓度进行健康风险评价，评价结果见表 3。

由表 3 可知，莱阳市地水体中非致癌有毒化学物质 Cu、Fe、Zn、Mn 通过饮用水途径产生的健康风险平均值分别为 3.49×10^{-10}、1.91×10^{-10}、100.50×10^{-10}、37.40×10^{-10} a^{-1}，风险等级从高到低依次为 Zn>Mn>Cu>Fe。但是，各重金属的健康风险平均值集中在 10^{-10}~10^{-8} a^{-1} 之间，即每千万人口中通过饮用水途径摄入非致癌污染物而受到健康危害（死亡）的人数不到 1 人，远低于 ICRP 和 USEPA 的最大可接受风险水平，这表明通过饮水途径非致癌化学物质（Zn、Mn、Cu、Fe）所引起的健康风险甚微，暂不会对暴露人群构成危害。

表 3　重金属污染物的平均个人年健康风险

Table 3　Health risk caused by heavy metal pollutants in the study area　　(a^{-1})

	Cu	Fe	Zn	Mn
最大值($\times10^{-10}$)	49.45	12.64	708.19	628.36
最小值($\times10^{-10}$)	0	0.32	0.41	0.63
平均值($\times10^{-10}$)	3.49	1.91	100.50	37.40
ICRP 标准 ($\times10^{-8}$)	5.0	5.0	5.0	5.0
USEPA 标准 ($\times10^{-8}$)	1.0	1.0	1.0	1.0

2.3　重金属健康风险空间分布特征及来源分析

由图 2 可以看出，莱阳市地下水中 Zn 的健康风险

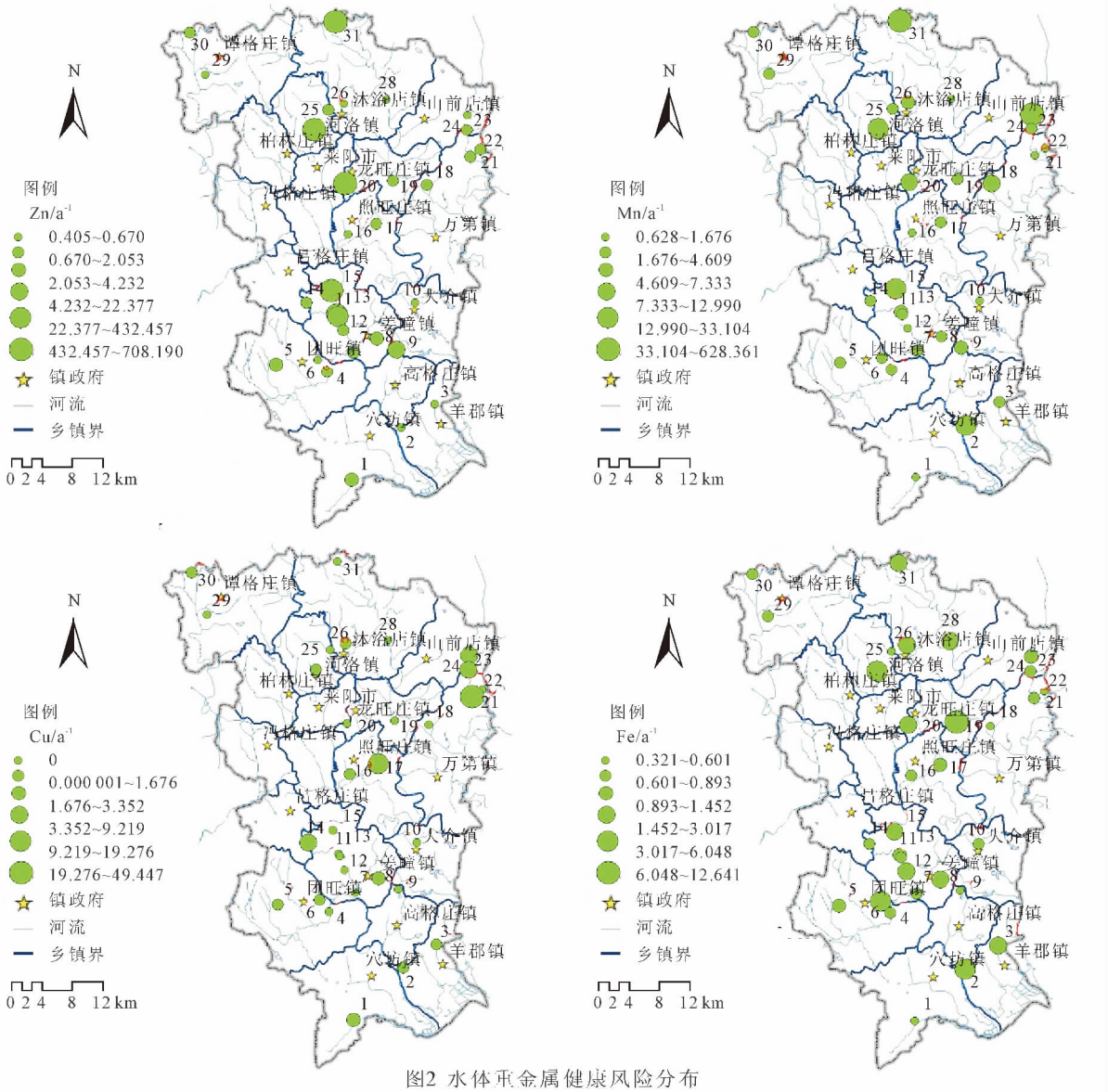

图2 水体重金属健康风险分布

Fig.2 The distribution of health risk of heavy metal

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

等级最高的几个样点分别为：点20（文翘泊）>点31（韦家沟村）>点15（岚子村）>点25（观音庙）>点11（新庄村）>点13（塔南泊）>点9（大泊子），风险等级较高的样点在姜疃镇比较密集（点15岚子村、点11新庄村、点13塔南泊）。文翘泊所在的龙旺庄镇属于准平原地，主要矿产为膨润土和粘土，所以该点地下水中Zn含量高的原因可能主要来源于人为影响，与该村食品工业园有关。莱阳市食品工业园位于文翘泊村所在的龙旺庄镇，该园区不仅加工蔬菜、水果、海产品，还有配套的机械加工、有色金属冶炼、纺织印染、铝塑纸质包装等工业，莱阳市中益食品有限公司坐落于文翘泊村，所以该村地下水中Zn的主要来源为食品加工[31]和有色金属冶炼产生的废水和废渣。姜疃镇是胶东最大的蛋鸡养殖产销基地，集约化养殖使用大量饲料添加剂，使禽畜粪便中含有大量的Zn、Cu等重金属元素[32]，造成地下水的污染，这可能是该镇地下水中Zn含量超标的主要原因。

重金属Mn的健康风险高的样点分布较分散，其中风险最高的2个样点分别是：点31（韦家沟村：628.36×10^{-10} a^{-1}）>点24（北夏各庄村：342.36×10^{-10} a^{-1}）（图2）。调查发现韦家沟村所在的沐浴店镇有多家机械加工厂和水果蔬菜加工企业，在韦家沟村附近有一家饲料加工厂，大量废水和废渣的排出，可能是造成该村地下水中Mn含量超标的主要原因。北夏格庄村Mn含量超标的原因与韦家沟村相似，也是由工业生产导致的。

由图2可知，莱阳市地下水中Cu的健康风险较高的样点大多集中在山前店镇和万第镇的交界处（点22、点23、点24），调查发现该区域没有工业污染，所以该区Cu的健康风险较高的原因可能与该区域水体的本底值有关。

莱阳市地下水中Fe的健康风险在4种重金属中最小，研究区内Fe的健康风险最高的2个样点分别是点19、点6（南龙旺庄、崔疃村）（图2）。南龙旺庄紧邻莱阳市金华铁器制造厂，附近还有多家铝塑钢窗厂，崔疃村除了汇丰塑钢门窗异型材厂，周边还有多家机械加工厂，这可能是造成这2个样点Fe的健康风险高的主要原因。

2.4 不同地区水体中重金属污染物的平均个人年健康风险

与其他地区饮用水源水体重金属健康风险评价相比（表4），该研究区Cu对人体健康危害的平均个人年风险与北京市[17]、天津市[28]基本处于同一个数量级别，低于广州市[13]、宁波市[29]一个或数个数量级别，但是略高于环鄱阳湖农村地区[18]；Fe对人体健康危害的平均个人年风险低于宁波市[29]和武汉市农村地区[30]；Zn对人体健康危害的平均个人年风险的平均值比广州市高3个数量级，但是低于宁波市至少3个数量级；Mn对人体健康危害的平均个人年风险的平均值高一个数量级。总体来说，Zn和Mn对人体健康危害的平均个人年风险明显高于其他地区，这就说明，该研究区非致癌物Zn和Mn的污染应该引起重视。

表4 各地区水体中重金属污染物的平均个人年健康风险

Table 4 Health risk caused by heavy metal pollutants in water of different regions (a^{-1})

	Cu/$\times10^{-9}$	Fe/$\times10^{-9}$	Zn/$\times10^{-10}$	Mn/$\times10^{-9}$
北京市[17]	1~7			
广州市[13]	29~281		0.13~9.28	
天津市[28]	2.2			
宁波市[29]	13~88	0.2~4.4	300.00~172 000	
环鄱阳湖农村[18]	0.1~1			
武汉市农村[30]		7.9~31.7		1.19~7.14
本研究	0~4.95	0.032~1.26	0.41~708.19	0.063~62.84

完整的健康风险评价应包括对大气、土壤、水和食物链4种介质携带的污染物通过食入、吸入和皮肤接触3种暴露途径进入人体对人体健康产生危害的评价。本研究沿用了美国环保局饮用水中重金属污染物对人体健康暴露风险评价方法，暴露途径仅考虑了平均饮水摄入，没有考虑其它有毒物质和暴露途径，导致评价出的重金属暴露风险值偏低。此外，对饮用水中其它重金属如As、Hg、Pb等质量浓度、分布等情况还有待于进一步研究调查。因此，本文关于莱阳市的饮用水重金属Cu、Fe、Zn、Mn暴露风险的研究是初步的，关于环境污染物与人群健康受损的相关联性问题及环境健康风险模型的构建，还需要在以后的工作中进一步探讨和完善。

3 结论

（1）莱阳市地下水中Cr未检出，Cd的检出率为9.6%，且被检出点的含量都较低（1 μg/L），Cu的检出率为48.39%，其他4种重金属的检出率均为100%，且检出重金属的浓度大小为Zn>Mn>Fe>Cu>Cd。

（2）检出5种重金属中，Zn超标率最高（22.58%），Mn和Fe的超标率分别为16.13%和6.45%，其中个别样点超标倍数过高，应加强治理。Cd含量较低，所有检出样点的浓度均未超标。

（3）健康风险评价结果显示，Cu、Fe、Zn、Mn通过饮用水途径产生健康风险平均值分别为3.49×10^{-10}、1.91×10^{-10}、100.50×10^{-10}、37.40×10^{-10}，均远低于ICRP和USEPA的最大可接受风险水平（5×10^{-5}）。但是Zn和Mn的对人体健康危害的平均个人年风险明显高于其他地区，所以，该研究区非致癌物Zn和Mn的污染应该引起重视。

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

[参考文献]

[1] 孙超，陈振楼，张翠，等. 上海市主要饮用水源地水重金属健康风险初步评价[J]. 环境科学研究，2009 (1)：60–65.
Sun Chao，Chen Zhen–lou，Zhang Cui，et al. Health risk assessment of heavy metals in drinking water sources in Shanghai，China[J]. Research of Environmental Science，2009 (1)：60–65. (in Chinese)

[2] Demirak A，Yilmaz F，Levent Tuna A，et al. Heavy metals in water，sediment and tissues of *Leuciscus cephalus* from a stream in southwestern Turkey[J]. Chemosphere，2006，63 (9)：1451–1458.

[3] Borum D，Abernathy C. Human oral exposure to inorganic arsenic[J]. Arsenic Exposure and Health，1994 (16)：21–30.

[4] Friberg L，Elinder C，Kjellstrom T，et al. Cadmium and Health：A Toxicological and Epidemiological Appraisal Volume 1：Exposure，Dose and Metabolism[M]. United States，Boca Raton, FL: CRC Press，Inc，1985.

[5] Wcislo E，Ioven D，Kucharski R，et al. Human health risk assessment case study：an abandoned metal smelter site in Poland[J]. Chemosphere，2002，47 (5)：507–515.

[6] Kavcar P，Sofuoglu A，Sofuoglu S C. A health risk assessment for exposure to trace metals via drinking water ingestion pathway[J]. International Journal of Hygiene and Environmental Health，2009，212 (2)：216–227.

[7] Wu G，Kang H，Zhang X，et al. A critical review on the bio–removal of hazardous heavy metals from contaminated soils：issues，progress，eco–environmental concerns and opportunities[J]. Journal of Hazardous Materials，2010，174 (1–3)：1–8.

[8] Liu J，Li Y，Zhang B，et al. Ecological risk of heavy metals in sediments of the Luan River source water[J]. Ecotoxicology，2009，18 (6)：748–758.

[9] Malec P，Mysliwa–Kurdziel B，Prasad M，et al. Role of Aquatic Macrophytes in Biogeochemical Cycling of Heavy Metals，Relevance to Soil–sediment Continuum Detoxification and Ecosystem Health[C]. Detoxification of Heavy Metals，2011: 345–368.

[10] 赵其国. 现代生态农业与农业安全[J]. 生态环境，2003，12 (3)：253–259.
Zhao Qi–guo. Modern ecological agriculture and agricultural safety[J]. Ecology and Environment，2003，12 (3)：253–259. (in Chinese)

[11] Muhammad S，Shah M T，Khan S. Health risk assessment of heavy metals and their source apportionment in drinking water of Kohistan region，northern Pakistan[J]. Microchemical Journal，2011, 98(2):334–343.

[12] Krishnan K，Paterson J，Williams D T. Health risk assessment of drinking water contaminants in Canada：the applicability of mixture risk assessment methods[J]. Regulatory Toxicology and Pharmacology，1997，26 (2)：179–187.

[13] 李祥平，齐剑英，陈永亨. 广州市主要饮用水源中重金属健康风险的初步评价[J]. 环境科学学报，2011，31 (3)：547–553.
Li Xiang–ping，Qi Jian–ying，Chen Yong–heng. Preliminary health risk assessment of heavy metals in the main drinking water sources of Guangzhou[J]. Acta Scientiae Circumstantiae，2011，31 (3)：547–553. (in Chinese)

[14] 王大坤，李新建. 健康危害评价在环境质量评价中的应用[J]. 环境污染与防治，1995，17 (6)：9–12.
Wang Da–kun，Li Xin–jian. The application of health risk assessment in environmental quality assesssement[J]. Environmental Pollution & Control，1995，17 (6)：9–12. (in Chinese)

[15] 曾光明，李新民. 水环境健康风险评价模型[J]. 水科学进展，1998，9 (3)：212–217.
Zeng Guang–ming，Li Xin–min. Assessment models for water environmental health risk analysis[J]. Advances in Water Science，1998，9 (3)：212–217. (in Chinese)

[16] 黄奕龙，王仰麟，谭启宇，等. 城市饮用水源地水环境健康风险评价及风险管理[J]. 地学前缘，2006，13 (3)：162–167.
Huang Yi–long，Wang Yang–lin，Tan Qi–yu，et al. Environmental health risk assessment and management for urban water supply sources[J]. Earth Science Frontiers，2006，13 (3)：162–167. (in Chinese)

[17] 高继军，张力平，黄圣彪，等. 北京市饮用水源水重金属污染物健康风险的初步评价[J]. 环境科学，2004，25 (2)：47–50.
Gao Ji–jun，Zhang Li–ping，Huang Sheng–biao，et al. Preliminary health risk assessment of heavy metals in drinking waters in Beijing[J]. Environmental Science，2004，25 (2)：47–50. (in Chinese)

[18] 胡春华，周文斌，黄宗兰，等. 环鄱阳湖区农村饮用水重金属健康风险评价[J]. 江西师范大学学报：自然科学版，2010 (1)：102–106.
Hu Chun–hua，Zhou Wen–bin，Huang Zong–lan，et al. Health risk assessment of heavy metals in rural drinking waters around the district of Poyang Lake[J]. Journal of Jiangxi Normal University:Natural Science Edition，2010 (1)：102–106. (in Chinese)

[19] 代杰瑞，王存龙，庞绪贵，等. 山东省东部地区浅层地下水地球化学特征及环境质量评价[J]. 物探与化探，2012，36 (2)：277–282.
Dai Jie–rui，Wang Cun–long，Pang Xu–gui，et al. The evaluation of the geochemical environment quality of shallow underground water in east Shandong Province[J]. Geophysical & Geochemical Exploration，2012，36 (2)：277–282. (in Chinese)

[20] 烟台市统计局. 烟台统计年鉴[M]. 2008.
Bureau of Statistics of Yantai. Statistical Yearbook of Yantai [M]. 2008. (in Chinese)

[21] 陈振鹏. 山东省莱阳县供水水文地质勘探报告书[R]. 1959.

[22] USEPA. Edition of the Drinking Water Standards and Health

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

Advisories[R]. 2006.

[23] Forum USEPARA. Guidelines for Carcinogen Risk Assessment[R]. DIANE Publishing, 1999.

[24] 王铁军,查学芳,熊威娜,等. 贵州遵义高坪水源地岩溶地下水重金属污染健康风险初步评价[J]. 环境科学研究, 2008, 21(1): 46-50.
Wand Tie-jun, Zha Xue-fang, Xiong Wei-na, et al. Primary study on health risk assessment of heavy metals in rarst groundwater in Gaoping area in Zunyi City, Guizhou Province [J]. Research of Environmental Science, 2008, 21(1): 46-50. (in Chinese)

[25] Song S, Li F, Li J, et al. Distribution and contamination risk assessment of dissolved trace metals in surface waters in the Yellow River Delta[J]. Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal, 2012.

[26] 钱家忠,李如忠,汪家权,等. 城市供水水源地水质健康风险评价[J]. 水利学报, 2004, 8(8): 90-93.
Qian Jia-zhong, Li Ru-zhong, Wang Jia-quan, et al. Environmental health risk assessment for urban water supply source [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2004, 8(8): 90-93. (in Chinese)

[27] USEPA. Risk Assessment Guidance for Superfund Volume I Human Health Evaluation Manual: Part A[S]. 2009.

[28] 王秋莲,张震,刘伟. 天津市饮用水源地水环境健康风险评价[J]. 环境科学与技术, 2009, 32(5): 187-190.
Wang Qiu-lian, Zhang Zhen, Liu Wei. Environmental health risk assessment of drinking water source in Tianjin[J]. Environmental Science & Technology, 2009, 32(5): 187-190. (in Chinese)

[29] 滕丽华. 宁波市饮用水中重金属铁锌铜健康风险度评价[J]. 广东微量元素科学, 2007, 14(6): 33-36.
Teng Li-hua. Health risk assessment of Fe, Zn and Cu on drinking waters in Ningbo[J]. 2007, 14(6): 33-36. (in Chinese)

[30] 黄艳红,常薇,何振宇. 武汉市农村地区地下水健康风险评价[J]. 环境与健康杂志, 2010(10).

[31] 肖敏,刘宇明. 食品加工业污染预防技术[J]. 科技资讯, 2008(7).

[32] 索超,李艳霞,张增强,等. 北京集约化养殖畜禽饲料 Zn 含量及粪便 Zn 残留特征研究[J]. 农业环境科学学报, 2009(10): 2173-2179.
Suo Chao, Li Yan-xia, Zhang Zeng-qiang, et al. Residual character of Zn in feeds and their feces from intensive livestock and poultry farms in Beijing[J]. Journal of Agro-Environment Science, 2009(10): 2173-2179. (in Chinese)

※ 致谢:感谢张妍、柳强、柯琳、朱乐奎等在野外取样及室内实验分析中给予的帮助!

(上接第179页)

Zhou Cheng-hu, Luo Jian-cheng, Yang Xiao-mei, et al. Geological Understanding and Analysis on the Remote Sensing[M]. Beijing: Science Press, 1999,

[10] 陈华芳,王金亮.陈忠,等.山地高原地区 TM 影像水体信息提取方法比较[J].遥感技术与应用,2004,19(6): 479-484.
Chen Hua-fang, Wang Jin-liang, Chen Zhong, et al. Comparison of water extraction methods in mountainous plateau region from TM image[J]. Remote Sensing Technology and Application, 2004,19(6): 479-484. (in Chinese)

[11] 李小曼,王刚,田杰. TM 影像中水体提取方法研究[J].西南农业大学学报:自然科学版,2006,28(4): 580-582.
Li Xiao-man, Wang Gang, Tian Jie. Study on the method of picking-up small water-bodies in Landsat TM remote sensing image[J]. Journal of Southwest Agricultural University: Natural Science, 2006, 28(4): 580-582. (in Chinese)

[12] 王刚,李小曼,田杰.几种 TM 影像的水体自动提取方法比较[J].测绘科学,2008,33(3): 141-142.
Wang Gang, Li Xiao-man, Tian Jie. Research on the methods of city traffic network features visualization based on GIS [J]. Science of Surveying and Mapping, 2008, 33(3): 141-142. (in Chinese)

[13] RAFAELCGONZALEZ,RICHARDEWOODS. 数字图像处理[M]. 第二版. 阮秋琦,阮宇智译.北京:电子工业出版社, 2003,233-240.

[14] 程磊,徐宗学,左德鹏,等.基于 Landsat TM 数据的黄土高原区水体识别方法研究[J].北京师范大学学报:自然科学版,2010,46(3): 424-430.
Cheng Lei, Xu Zong-xue, Zuo De-peng, et al. Identification of water bodies in the loess plateau based on landsat TM datase t[J]. Journal of Beijing Normal University:Natural Science, 2010, 46(3): 424-430. (in Chinese)

[15] 张洁,王心源,高超,等.基于 Landsat TM 数据的东平湖水体提取方法研究[J]. 测绘与空间地理信息, 2012, 35(4): 23-27.
Zhang Jie, Wang Xin-yuan, Gao Chao, et al. Research on the method of extracting water information in Dongping Lake by using landsat TMimage[J]. Geomatics & Spatial Information Technology, 2012, 35(4): 23-27. (in Chinese)

© 1994-2013 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net