Vol. 33 ,No. 3 Mar. , 2013

蔡文静,常春平,宋帅,等. 2013. 德州灌区地表水中溶解态痕量金属的空间分布及来源研究[J]. 环境科学学报 33(3):754-761 Cai W J, Chang C P, Song S, *et al.* 2013. Spatial distribution and sources of dissolved trace metals in surface water of Dezhou Irrigation District[J]. Acta Scientiae Circumstantiae 33(3):754-761

## 德州灌区地表水中溶解态痕量金属的空间分布及来 源研究

蔡文静<sup>12</sup> 常春平<sup>2</sup> 宋帅<sup>1</sup> 李静<sup>1</sup> 张芳<sup>12</sup> 李发东<sup>1,\*</sup>

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
河北师范大学,资源与环境科学学院,石家庄 050024
收稿日期: 2012-07-07
修回日期: 2012-09-17
录用日期: 2012-09-27

摘要:以黄河下游德州引黄灌区主要水系为研究对象 采集了灌区内 36 个地表水样,分析了水体中溶解态痕量金属元素 Ba、Fe、Li、Mn、Sr、Zn 和非金属元素 B 的含量及其污染状况.借助于空间分析与相关性分析,探讨了其空间分布及来源.结果表明,这几种元素含量的大小顺序为:Sr > B > Ba > Mn > Li > Fe > Zn.根据国家生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)和美国环境保护局(EPA)饮用水标准,B、Fe、Mn 的超标率分别为 50%、2.78%、27.78%. 变异系数结果表明各元素都具有显著的空间差异性. 漳卫新河 B、Fe、Li、Mn 含量均最高,重金属污染较为严重.相关性分析结果表明,Li-B、Li-Fe、Li-Mn 及 Fe-Mn 之间呈显著相关,说明这几种元素污染源可能相同.本研究为评价痕量金属污染对地表水环境及人类健康的影响提供科学依据.

关键词:引黄灌区;地表水;溶解态痕量金属;空间分布;来源

文章编号: 0253-2468(2013) 03-754-08 中图分类号: X522 文献标识码: A

# Spatial distribution and sources of dissolved trace metals in surface water of Dezhou Irrigation District

CAI Wenjing<sup>1,2</sup>, CHANG Chunping<sup>2</sup>, SONG Shuai<sup>1</sup>, LI Jing<sup>1</sup>, ZHANG Fang<sup>1,2</sup>, LI Fadong<sup>1,\*</sup>

1. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101

2. Hebei Normal University , College of Resources and Environmental Science , Shijiazhuang 050024

Received 7 July 2012; received in revised form 17 September 2012; accepted 27 September 2012

**Abstract**: In this study ,36 water samples were collected from the surface water system of the Dezhou Irrigation District located in the lower reaches of the Yellow River. The samples were analyzed for the concentrations and contamination levels of dissolved trace metals including Ba , Fe , Li , Mn , Sr , Zn , and non-metal of B by Inductively Coupled Plasma-Optical Emission Spectroscopy (ICP-OES). The spatial distribution and sources of the chemical elements were identified using spatial statistical analysis and correlation analysis methods. Results showed that the concentrations of these elements were in the order of Sr > B > Ba > Mn > Li > Fe > Zn. The concentrations of B , Fe , and Mn exceeded the drinking water standards of China (GB5749—2006) and the Environmental Protection Agency(EPA) by 50% , 2.78% , and 27.78% , respectively. The coefficients of variation indicated significant spatial variation for the concentrations of all elements. The concentrations of B , Fe , Li , and Mn from Zhangweixin River were the highest among the samples. The correlation analysis showed that there was positive correlations for the Li-B , Li-Fe , Li-Mn , and Fe-Mn pairs , suggesting that these elements might have a similar source. This study provides scientific information for assessing the impacts of dissolved trace metals on surface water environment and human health in the Dezhou Irrigation District.

Keywords: Dezhou Irrigation District; surface water; dissolved trace metals; spatial distribution; sources

Supported by the "100 Talents Project" of Chinese Academy of Sciences

作者简介: 蔡文静(1987—) 友, E-mail: jing870822@126.com; \* 通讯作者(责任作者) E-mail: lifadong@igsnrr.ac.cn

Biography: CAI Wenjing(1987----), female, E-mail: jing870822@126.com; \* Corresponding author, E-mail: lifadong@igsnrr.ac.cn

基金项目:中国科学院"百人计划"项目

#### 1 引言(Introduction)

随着现代工业的快速发展,向环境排放含有重 金属的废水逐年增加,大量河流被污染,水生生态 系统的结构和功能受到了严重危害(Kaushik et al., 2009; 耿雅妮 2012). 水体中的重金属含量受城市、 工业及农业行为的影响较大,可通过工业和城市废 水、地表径流和大气沉降等多种方式累积(Luo et al. 2010),并且能够产生生物毒性效应,具有生 物富集和生物放大作用,由食物链直接或间接进入 人体,严重威胁人类健康(燕姝雯等,2011).水体中 的重金属既可能来源于岩石的自然风化和侵蚀,也 可能来源于很多分散的污染源(如灰尘、降雨或水 质交换过程等),同时还可能来源于受污染的上游 河流、居民生活废水和工农业污水的排放等 (Vukovic et al. 2011; 胡成等 2012). 水体重金属污 染已成为当今世界最严重的环境问题之一(Behra et al. 2002).

国内外已有的关于溶解态重金属的研究主要 集中于海湾、水库、河口等区域(黄清辉等 2001; Li et al. 2008; Dai et al. 2009; 赵军等 2009) ,分析其 空间分布特征及行为影响. 国外对于河流重金属的 研究中 Kar 等(2008) 探讨了各种溶解态重金属在 恒河水中的分布以及重金属之间 / 重金属与 pH、氧 化还原电位之间的关系.国内更多集中于对地下水 或河流沉积物和悬浮物中重金属的研究(黄冠星 等 2011; 敖亮等 2012; 胡春华等 2012; 赵锁志等, 2008) 而对河流水体重金属的报道则相对较少,冯 启言等(2004)分析了荆马河水体中溶解态重金属 的含量. 胡成等(2012) 研究了辽河水体中溶解态重 金属的含量和空间分布特征,并应用主成分分析法 (PCA) 分析了金属的可能来源. 杜晓丽等(2012) 利 用错流超滤技术对采集的温榆河水样中 Fe、Mn、Al、 Zn、Cu、Cr 和 Pb 等金属元素进行了分离,并研究了 温榆河重金属的含量分布及赋存状态的变化.

在引黄灌区,地表水是重要的生活用水补给来 源,引黄水占城市供水水源的33.7%,部分农村的 饮用水也来源于地表水.因此,研究河流中重金属 的含量具有非常重要的意义.近年来,众多学者对 引黄灌区做了大量研究,如 Yang 等(2009)探讨了 宁夏引黄灌区农业非点源污染的来源及灌区的污 染现状,并进一步研究了其对黄河水质造成的影 响. Zhang 等(2008)对黄河下游引黄灌区的泥沙灾 害进行了评估. 吴向东等(2011)分析了黄河下游引 黄灌区主要河流硝态氮和铵态氮的污染情况,并评 价了河流的水质安全. 本研究以引黄灌溉工程── 黄河下游德州引黄灌区为例,对灌区主要河流的36 个地表水样中溶解态痕量金属的空间分布状况进 行了分析,探究了灌区主要河流的痕量金属污染现 状及污染来源,为灌区痕量金属污染防控提供理论 依据.

2 材料与方法(Materials and methods)

#### 2.1 研究区概况

德州灌区位于山东省德州市境内,东经115°45′ ~117°36′、北纬 36°24′~38°0′(图1).主要水系由 黄河、卫运河、漳卫新河、马颊河、德惠新河及徒骇 河组成. 除此以外, 还包括众多支流, 其中有两条大 于1000 km<sup>2</sup>的较大支流:一是新赵牛河,属徒骇河 流域;二是六五河 属漳卫新河流域.300~1000 km<sup>2</sup> 的支流有 12 条 徒骇河流域的有苇河、四新河、老赵 牛河等;马颊河流域的有宋家河、宁津河、跃进河 等;德惠新河流域的禹临河、临商河、跃进河.该研 究区地处黄河冲积平原,地势西南高、东北低.属于 暖温带半湿润半干旱区,四季分明,降水时空分布 极不均匀,水资源十分短缺,境内河流均属雨源型 河流 其水量与本市降水量分布不均的气候特点密 切相关. 自 20 世纪 70 年代以来 德州市大力发展引 黄供水 先后建成了潘庄引黄灌区和李家岸引黄灌 区.引黄水成为该区主要水源,截至2009年底,有效 灌溉面积达 441600 hm<sup>2</sup>,其中地表水供水总量达





13.93 亿 m<sup>3</sup>( 吴向东等 2011).

在该研究区域内,工厂企业众多,且类型多样. 有如钢铁厂、石油加工厂、机械加工厂、橡塑铝塑制 品厂、造纸厂、印刷厂等制造业;还有化工厂、养殖 厂等企业,这些企业都是造成该区域水体污染的重 要污染源.

2.2 样品采集

于 2011 年 4 月采集了研究区内主要河流 漳卫新河、马颊河、德惠新河及徒骇河的地表水样, 共计 36 个(图 1),图中数字即代表采样点的编号. 使用采水器于河流中央取表层水体( < 0.5 m),记 录 GPS 信息.水样现场经 0.45 μm 微孔滤膜过滤, 加优质纯硝酸酸化至 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,带回实验室密封低温保存待分析.

2.3 样品分析

溶解态重金属是指水样经0.45 μm 或0.22 μm 孔径滤膜过滤后,残留于水中的重金属(龚玲兰等, 2006).本文主要讨论水样中主要的溶解态痕量金 属元素 Ba、Fe、Li、Mn、Sr、Zn 和非金属元素 B 的含 量变化,使用电感耦合等离子体发射光谱仪(ICP-OES)来测定,而同一样品,由于上个样品离子浓度 过大可能会对下个样品造成污染,所以超纯水,空 白(超纯水加入硝酸,使其 pH 为1~2,作为空白样 品)及样品测定了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.

应用统计软件 SPSS 17.0 完成斯皮尔曼相关分 析和空间分析.相关分析是研究现象之间是否存在 某种依存关系,并对具体有依存关系的现象探讨其 相关方向和相关程度,是研究变量间密切程度的一 种统计方法.斯皮尔曼等级相关是根据等级资料研 究两个变量间相关关系的方法,它是依据两列成对 等级的各对等级数之差来进行计算的,又称为"等 级差数法".

3 结果与讨论(Results and discussion)

 3.1 德州灌区地表水中 B、Ba、Fe、Li、Mn、Sr、Zn 的 空间分布特征

灌区地表水溶解态痕量金属和 B 元素平均含 量的大小顺序为: Sr > B > Ba > Mn > Li > Fe > Zn(表1). Sr 的含量在整个研究区中最高,而 Zn 最 低. 变异系数反应了元素空间变化的大小. 由表1 可 知,Fe、Mn、Zn 空间变化较大,尤其以 Fe 的空间变 异性最为显著,Sr 的空间变异性最小. 图 2 展示了7 种元素的空间分布特征,由图可以看出各种元素的 空间分布都存在不同程度的差异性. 根据国家生活 饮用水卫生标准(GB5749—2006)和 Environmental Protection Agency(EPA)饮用水水质标准,Ba、Li、Sr 和 Zn 均未超标,而 B、Fe 和 Mn 有不同程度的超标.

Table 1     Statistical analysis of dissolved trace metals in Dezhou Irrigation District								
元素		重	标准 I <sup>1)</sup>	标准 II <sup>2)</sup>				
	最低检出限	最大值	最小值	平均值	变异系数	- /( mg•L <sup>-1</sup> )	$/(mg \cdot L^{-1})$	
В	0.001	0.90	0.31	0.55	29.18%	0.50	—	
Ba	< 0.0001	0.26	0.02	0.13	35.34%	0.70	—	
Fe	< 0.0001	0.40	0.00	0.03	228.23%	0.30	0.30	
Li	< 0.0001	0.07	0.02	0.04	31.46%	—	0.73	
Mn	0.0001	0.81	0.00	0.08	205.44%	—	0.05	
Sr	< 0.0001	2.98	0.79	1.48	28.77%	—	4.00	
Zn	0.0001	0.11	0.00	0.02	116.59%	1.00	5.00	

表1 德州灌区溶解态痕量金属含量统计

注:	"国家生活饮用水卫生标准(	GB5749 – 2006) ; <sup>2</sup>	"美国环境保护局(	Environmental	Protection Agen	cy,EPA) 饮	(用水水质标准;	"—"代	表没
有相应的	的标准.								

灌区内漳卫新河、马颊河、德惠新河和徒骇河4 条主要河流溶解态痕量金属和 B 元素污染情况如 表2 所示.可以看出 ,各河流 Ba 和 Zn 的含量差别不 大;除 Sr 外 ,漳卫新河 B、Fe、Li、Mn 含量均最高; Sr 含量最高出现在徒骇河 ,呈现徒骇河 > 漳卫新河 > 德惠新河 > 马颊河的状态.由此可见 德州灌区 4 条 主要河流中 ,漳卫新河各种溶解态痕量金属的含量 普遍较高 ,重金属污染较为严重.已有研究表明 ,漳 卫南运河近 20 年来水污染形势严峻 ,工业污水排放 量占排污总量的近 90%.工业废水中 ,化工厂、造纸 厂、煤矿、电厂、钢铁厂、屠宰厂等排出大量污水,对 河流都造成严重影响.对漳卫南运河的评价结果显 示,卫运河、漳卫新河水质均劣于V类,中下游河道 已经成为排污沟(于伟东 2008).





图 2 德州灌区地表水溶解态痕量金属的空间分布

Fig. 2 Spatial distribution of dissolved trace metals of surface water in Dezhou Irrigation District

表 2	德州灌区主要河流溶解态痕量金属平均含量

	Table 2     The average concentration of dissolved trace metals in main rivers of Dezhou Irrigation District						
河流名称	В	Ba	Fe	Li	Mn	Sr	Zn
漳卫新河	0.65	0.11	0.07	0.05	0.18	1.58	0.01
马颊河	0.51	0.16	0.01	0.03	0.05	1.41	0.03
德惠新河	0.54	0.12	0.01	0.03	0.09	1.53	0.02
徒骇河	0.50	0.14	0.01	0.03	0.01	1.67	0.01

### 3.2 相关分析

对德州灌区地表水中溶解态痕量金属 Ba、Fe、 Li、Mn、Sr、Zn 和非金属元素 B 的相关性分析(见表 3) 表明,Li-B,Li-Fe,Li-Mn 及 Fe-Mn 之间呈显著相 关 表明各元素之间有着相似的生物地球化学行为 (方圣琼等 2004). Li 是典型的亲岩元素,在许多偏 硅酸盐矿物中均有存在(曾昭华,1997),而 B、Fe、 Mn 在岩石矿石中也均存在,它们与 Li 之间良好的 相关性说明这几种元素可能具有相同的自然来源. Yalcin 等(2008)研究表明,具有正相关性的重金属, 其可能的污染源可认为是相同的,并且浓度之间存 在着一定的关系. 但是在该研究区中,河流中溶解 态痕量金属和非金属元素 B 并不主要来源于岩石 矿石,更多是由工业废水、生活污水的任意排放以 及农业面源污染等人为原因造成的. Fe 和 Mn 也具 有较高的相关性,这两种元素在地壳中均广泛存 在. 有研究表明,在地质作用过程中 Fe 和 Mn 有着 相似的迁移和富集规律,其空间分布特征主要与土 壤母质、土壤类型和人为活动等因素有关(姜勇等, 2003). 而 Sr-Ba 之间存在显著负相关,说明它们同 源性很低.

表 3 溶解态痕量金属元素含量关联分析

Table 3     Relationship between dissolved trace metals								
	В	Ba	Fe	Li	Mn	Sr	Zn	
В	1							
Ba	0.123	1						
Fe	0.031	-0.215	1					
Li	0.65 **	-0.239	0.463**	1				
Mn	0.128	-0.23	0.791**	0.451 **	1			
Sr	0.156	-0.513 **	0.112	0.307	0.241	1		
Zn	-0.109	-0.237	-0.23	-0.253	-0.22	-0.343*	1	

注: \* \* 表示显著性水平为 0.01(显著相关); \* 表示显著性水平为 0.05(显著相关).

3 期

由图2可知,溶解态 B的空间分布差异较小. 漳卫新河 B 的含量要高于其它河流与引黄干渠. 整 个研究区 B 含量最高的点为 No. 24,为 0.90 mg•L<sup>-1</sup> (表1);其次为 No. 19、No. 29 和 No. 11 这些点均位 于漳卫新河. B 在地壳中含量较小,在硼矿中有存 在,自然界中主要以其化合物形式存在,如在硼砂、 硼酸中.B在油田卤水中含量丰富(Tan et al., 2011). No. 24 位于乐陵县西段乡 附近有制砖厂 其 产生的工业废水废渣排入河流 ,是造成其含量高的 主要原因. 除此以外,马颊河的 No. 8 和德惠新河的 No.5 溶解态 B 的含量同样较高, No. 19、No. 29, No. 11 和 No. 5、No. 8 都位于人口密集的市区、乡镇,因 此受人为影响较大,例如生活污水的任意排放以及 含硼酸杀虫剂和含硼肥料的使用等. 根据国家生活 饮用水卫生标准(GB5749-2006)和 EPA 饮用水水 质标准 整个研究区溶解态 B 含量超标的样点达到 50% B 污染较严重 尤其漳卫新河最为明显.

溶解态 Ba 含量较高的点明显集中分布于黄河 及禹城市境内的引黄干渠; 其余河流 Ba 含量的空 间差异不大. Ba 是一种碱土金属,广泛存在于自然 界,多以不溶性钡盐存在,天然矿石含有大量的氧 化钡. 同时,Ba 的应用领域广泛,可作为陶瓷工业、 纺织工业、橡胶工业、塑料工业、农药及制备特种玻 璃、油漆、纸张的填充剂等,这些企业在生产过程中 又会排放含 Ba 的废水或固体废物,对环境造成污 染(帅星等,2011).全区 Ba 含量最高的点为马颊河 的 No. 30,为 0. 26 mg·L<sup>-1</sup>. 此点位于平原县王大褂 乡 ,其附近有王大褂造纸厂,造纸产生的废水对河 流造成重要污染. 其次 No. 13, No. 8 和 No. 3 溶解态 Ba 的含量也相对较高. 但溶解态 Ba 的含量均低于 国家生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)和 EPA 规定的标准值指标,并没有超标样点.

溶解态 Fe 的含量与其它几种重金属相比,空间 分布变异性最大. 漳卫新河总体含量最高,其它河 流均较低. No. 15 是全区 Fe 含量最高的点,也是唯 一一个超标的点,其含量值为 0. 40 mg•L<sup>-1</sup>. 通过实 验分析可知,整个研究区中,该点除 Ba 和 Zn 两种 元素以外,Fe、Li、Mn、Sr 和 B 的含量都很高. 其中, Li 含量为 0. 07 mg•L<sup>-1</sup>,Mn 含量为 0. 81 mg•L<sup>-1</sup>,该 点这两种元素含量在整个研究区中也是最大值;而 Sr 和 B 的含量分别为 1. 50 mg•L<sup>-1</sup>和 0. 57 mg•L<sup>-1</sup>, 与它们的最大值 2. 98 mg•L<sup>-1</sup>和 0.90 mg•L<sup>-1</sup>相比, 含量仍相对较高(见表1).由此可见,此点河水重金 属污染较重.铁主要存在于地壳中(Pekey et al., 2004),是地壳中含量第二高的金属元素.No.15位 于漳卫新河的卫运河段,其Fe 含量高的原因一方面 是其自然来源,即与水文地质条件有关,如地表水 体通过溶滤作用带走土壤和岩石中的Fe 元素.另一 方面,此点位于为武城县甲马营乡卫运河浮桥,该 乡汽车零部件加工业发达,橡塑企业众多,在橡胶 制品生产过程中会产生大量废水,污水排入河内, 致使河流污染严重.

溶解态 Li 在整个研究区中含量并不高,空间变 异性也较小. 高值集中出现在漳卫新河,而黄河及 引黄干渠的 Li 的含量均较低. 马颊河、德惠新河和 徒骇河 Li 的含量差异较小. Li 在一些岩石中广泛存 在,石油卤水中含有较丰富的 Li 元素,但是仍属于 比较稀有的元素(Chan *et al.*,2002; Krebs,2006), 所以研究区内 Li 含量较低. 全区溶解态 Li 的含量 都远远低于国家生活饮用水卫生标准(GB5749— 2006)和 EPA 规定的标准值指标.

溶解态 Mn 的含量空间变异性较大,仅次于 Fe. 锰是自然界中较丰富的元素之一,广泛存在于土 壤、岩石、沉积物和水体中. 矿山开采、爆破、粉碎、 筛选等过程都会产生锰尘,如果不采取积极措施, 不仅会污染水体,还会危害人类健康( 荆俊杰等, 2008).整体来看,其空间分布与 Fe 类似,漳卫新河 Mn 含量依然较高,尤其以卫运河段最为显著,最大 值为该河段的 No. 15; 其次为德惠新河; 黄河及引黄 干渠 Mn 的含量相对较低; 而徒骇河 Mn 的含量最 低.全区超标的样点为 27. 78%,表明整个灌区地表 水已受到了一定程度的 Mn 污染.

溶解态 Sr 的空间差异性最小,且均低于国家生活饮用水卫生标准(GB5749—2006)和 EPA 规定的标准值指标,无超标的样点.由图 2 可知,漳卫新河和徒骇河 Sr 的含量较高,黄河及引黄干渠的分布同Fe、Li、Mn 相似,都较低;马颊河和德惠新河 Sr 的高值区集中分布在下游地区的庆云县,即 No.8 、No.17和 No.26、No.34,而除 Sr 外,这些点的 Ba、Li、Zn 的含量也相对较高.这可能与上游地区城市工业污染、生活污水、农业施肥的输入、以及动物排泄物等的不断增加有关(王兵等,2009; Zhang *et al.*, 2007).王兵等(2009)对西江干流水体中溶解物质及 Sr 的主要来源的研究表明,西江干流的污染源可能来源于上游支流地区人类活动输入的影响.天然

Sr 多存储于天青石和菱锶矿中,原油中也存在 Sr、B 等元素(Duyck *et al.*,2002; Obut,2007).在采样过 程中发现,徒骇河沿途工厂企业众多,包括砖瓦厂, 石油化工厂、玻璃厂,造纸厂等,这些工厂企业排放 的废水废渣是造成徒骇河 Sr 含量高的主要污染源. 整个研究区 Sr 含量的最大值为 No.9,为2.98 mg·L<sup>-1</sup>,其位于齐河县,靠近城镇,Sr 浓度的高低与 居民生活活动密切相关;周围有齐河县砖瓦二厂、 齐河县胡官屯镇沙张奶牛场及胡官屯镇周苏养猪 小区等工厂企业.相关研究指出,牛奶及奶牛排泄 物中富含 Sr 元素(Gastberger *et al.*,2001;范伟等, 2010),由此推断,奶牛场对此点 Sr 的含量具有重要 影响.

整个研究区溶解态 Zn 最低(表1),其空间分布 与 Ba 相似,黄河及禹城市境内的引黄干渠含量较 高;漳卫新河和徒骇河 Zn 的含量较低. Zn 属于对生 物圈有潜在威胁的痕量金属,其污染源主要来自于 工业废水废渣、液体肥料、堆肥以及农药的使用 (Romic *et al.* 2003). 禹城市内引黄干渠都紧靠农 村,因此农业施肥和农药的使用造成较高的含 Zn 量.全区 Zn 含量的最大值为马颊河的 No.17,该点 位于庆云县,在采样过程中发现,贵和新型建筑材 料厂紧靠此点,其工业废水的排放可能是造成 Zn 含量较高的原因.全区 Zn 的含量要远低于国家生 活饮用水卫生标准(GB5749—2006)和 EPA 规定的 标准值指标.

4 结论(Conclusions)

1) 受自然和人为因素的影响,整个灌区地表水 中7种元素的空间分布存在较大差异,Sr的含量最 高,而Zn最低;且每种元素都存在空间差异性,尤 其以Fe、Mn、Zn空间变化最为显著.

2) 整个研究区 Ba、Li、Sr 和 Zn 均未超标 ,而 B、 Fe 和 Mn 均有不同程度的超标 ,特别是 B 污染最为 严重.

3) 灌区内4条主要河流中,Ba和Zn的含量差 别不大; 而漳卫新河 B、Fe、Li、Mn含量均最高. 由此 可见,漳卫新河受到较严重的痕量金属污染.

4) Li-B, Li-Fe, Li-Mn及Fe-Mn之间存在显著 相关,推测具有相同的地球化学行为或共同的污染 来源.而Sr-Ba之间存在显著负相关.

本文主要研究的是水体中溶解态痕量金属的 空间分布特征,并没有考虑痕量金属的存在形态及 其生态效应.水体中重金属的存在形态可分为溶解 态和颗粒态(包括悬浮于水相的悬浮颗粒态和底泥 的沉积颗粒态)两大类.重金属的存在形态直接影 响着它的迁移转化规律及其生态效应.因此为了更 好地研究水体中痕量金属的分布特征及其迁移转 换规律,应该进一步研究痕量金属的存在形态及其 物理化学过程,例如悬浮质与沉积物对金属离子的 吸附与解吸规律、痕量金属存在形态与微生物富集 效应、有机质含量与金属离子迁移转化规律等.

致谢:感谢柳强,张妍、赵广帅等人在野外采样和室内分析实 验过程中给予的帮助。

责任作者简介:李发东,男,研究员,博士,中国科学院百人计 划入选者,主要研究方向:生态水文与水环境. E-mail lifadong @igsnrr.ac.cn.

参考文献(References):

- 敖亮,单保庆,张洪,等.2012. 三门峡库区河流湿地沉积物重金属 赋存形态和风险评价[J].环境科学,33(4):1176-1181
- Behra R , Landwehrjohann R , Vogal L , et al. 2002. Copper and zinc content of periphyton from two rivers as a function of dissolved metal concentration [J]. Aquatic Sciences , 64 (3): 300–306
- Chan L H , Starinsky A , Katz A. 2002. The behavior of lithium and its isotopes in oilfield brines: Evidence from the Heletz-Kokhav field , Israel [J]. Geochimica Et Cosmochimica Acta , 66 (4) 615-623
- Dai M X , Peng S T , Xu J , et al. 2009. Decennary variations of dissolved heavy metals in seawater of Bohai Bay , North China [J].
  Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology , 83 (6) 907–912
- Duyck C , Miekeley N , da Silveira C L P , et al. 2002. Trace element determination in crude oil and its fractions by inductively coupled plasma mass spectrometry using ultrasonic nebulization of toluene solutions [J]. Spectrochimica Acta Part B-Atomic Spectroscopy ,57 (12): 1979–1990
- 杜晓丽,曲久辉,刘会娟,等.2012. 温榆河水体中重金属含量分布及 赋存状态解析[J]. 环境科学学报,32(1):37-42
- Environmental Protection Agency. 2012. Drinking Water Contaminants [OL]. 2012–06–05. http://water.epa.gov/drink/contaminants / index.cfm
- 范伟,杨悦锁,冶雪艳,等.2010.青肯泡地区地下水中锶富集的水 文地球化学环境特征及成因分析[J].吉林大学学报(地球科学 版),40(2):349-355;367
- 方圣琼,胡雪峰,秦荣,等. 2004. 长江口污染物累积运移规律的初步研究[J]. 环境科学研究,17(4): 14-17
- 冯启言,孟庆俊,韩宝平,等. 2004. 荆马河水体 Cu、Cd、Pb、Cr 污染 及其对土壤的影响 [J]. 环境科学与技术, 27 (1): 46-47; 61-113

Gastberger M , Steinhausler F , Gerzabek M H , et al. 2001. Fallout

strontium and caesium transfer from vegetation to cow milk at two lowland and two Alpine pastures [J]. Journal of Environmental Radioactivity , 54(2): 267-273

- 耿雅妮. 2012. 河流重金属污染研究进展[J]. 中国农学通报, 28 (11): 262-265
- 龚玲兰,奚小双.2006.河流重金属的分布与迁移转化研究进展[J].广东微量元素科学,13(11):1-6
- 胡成,苏丹,张利红,等.2012.基于主成分分析法的辽河水体中溶 解性金属来源分析[J].环境污染与防治,34(4):22-27
- 胡春华,于婷,周文斌. 2012. 鄱阳湖悬浮物重金属污染及潜在生态风险评价[J]. 人民长江,43(10):58-61
- 黄冠星,孙继朝,张英,等.2011.珠江三角洲污灌区地下水重金属 含量及其相互关系[J].吉林大学学报(地球科学版),41(1): 228-234
- 黄清辉,沈焕庭,茅志昌.2001.长江河口溶解态重金属的分布和行 为[J].上海环境科学,20(8):372-374;377-406
- 姜勇,张玉革,梁文举,等. 2003.耕地土壤中交换态钙镁铁锰铜锌 相关关系研究[J].生态环境,12(2):160-163
- 荆俊杰,谢吉民. 2008. 微量元素锰污染对人体的危害[J]. 广东微量元素科学,15(2): 6-9
- Kar D , Sur P , Mandal S K , et al. 2008. Assessment of heavy metal pollution in surface water [J]. International Journal of Environmental Science and Technology , 5 (1): 119–124
- Kaushik A , Kansal A , Santosh , et al. 2009. Heavy metal contamination of river Yamuna , Haryana , India: Assessment by Metal Enrichment Factor of the Sediments [J]. Journal of Hazardous Materials , 164 (1): 265–270
- Krebs R E. 2006. The History and Use of Our Earth's Chemical Elements: A Reference Guide , 2nd Edition [M]. Westport , USA: Greenwood Press. 47–50
- Li S , Xu Z , Cheng X , et al. 2008. Dissolved trace elements and heavy metals in the Danjiangkou Reservoir , China [J]. Environmental Geology , 55 (5) : 977–983
- Luo W , Lu Y , Wang T , et al. 2010. Ecological risk assessment of arsenic and metals in sediments of coastal areas of northern Bohai and Yellow Seas , China [J]. Ambio , 39 (5/6) : 367-375
- Obut A. 2007. Direct conversion of celestine to SrS by microwave heating [J]. Minerals Engineering , 20 (14) : 1320–1322
- Pekey H , Karakas D , Bakoglu M. 2004. Source apportionment of trace metals in surface waters of a polluted stream using multivariate statistical analyses [J]. Marine Pollution Bulletin , 49 (9/10): 809–818
- Romic M, Romic D. 2003. Heavy metals distribution in agricultural topsoils in urban area [J]. Environmental Geology, 43 (7):

795-805

- 帅星,谢家理. 2011. 工业废水中钡的排放限值研究[J]. 环境保护 科学,37(4): 10-12; 21
- Tan H B , Rao W B , Ma H Z , et al. 2011. Hydrogen , oxygen , helium and strontium isotopic constraints on the formation of oilfield waters in the western Qaidam Basin , China [J]. Journal of Asian Earth Sciences , 40 (2): 651-660
- Vukovic Z , Radenkovic M , Stankovic S J , et al. 2011. Distribution and accumulation of heavy metals in the water and sediments of the river Sava [J]. Journal of The Serbian Chemical Society , 76 (5): 795–803
- 王兵,李心清,袁洪林,等. 2009.西江干流河水主要离子及锶同位 素地球化学组成特征[J].地球化学,38(04):345-353
- 吴向东,李发东,郭建青,等.2011.黄河下游引黄灌区主要河系硝 态氮及铵态氮安全评价[J].水资源与水工程学报,22(4): 114-117
- Yalcin M G , Ilhan S. 2008. Multivariate analyses to determine the origin of potentially harmful heavy metals in beach and dune sediments from KizKalesi Coast (Mersin), Turkey [J]. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology ,81 (1): 57–68
- Yang S J , Zhang A P , Yang S Q , et al. 2009. Investigation of agricultural non-point source pollution in Ningxia irrigation district and analysis of its factors [J]. Agricultural Research in the Arid Areas ,27 (5): 256–260
- 于伟东. 2008. 漳卫南运河流域水污染趋势与控制[J]. 水资源保 护,24(4):83-86
- 燕妹雯,余辉,李焕利,等. 2011. 枯水期环太湖河流溶解态重金属 空间分布[J]. 环境科学与技术,34(11):6-10;63
- 曾昭华. 1997. 江西省鄱阳湖地区地下水中 Li 元素的背景特征及其形成[J]. 江西科学, 15(1): 39-42
- Zhang S R , Lu X X , Higgitt D L , et al. 2007. Water chemistry of the Zhujiang (Pearl River): Natural processes and anthropogenic influences [J]. Journal of Geophysical Research-Earth Surface , 112 (F1) , DOI: 10. 1029/2006 JF000493
- Zhang Y J , Hu C H , Zhang Z H , et al. 2008. Evaluation on sediment disaster in Yellow River Diversion Irrigation District of Lower Yellow River [J]. Water Resources and Hydropower Engineering , 39 (10): 29–32
- 赵军,于志刚,陈洪涛,等.2009. 三峡水库156m 蓄水后典型库湾 溶解态重金属分布特征研究[J].水生态学杂志,2(2):9-14
- 赵锁志,刘丽萍,王喜宽,等.2008.黄河内蒙古段上覆水、悬浮物 和底泥重金属特征及生态风险研究[J].现代地质,22(2): 304-312