

# 黄河上游重金属元素分布特征及生态风险评价

张倩<sup>1,2</sup> 刘湘伟<sup>3</sup> 税勇<sup>3</sup> 王婷<sup>2,†</sup>

1. 北京大学深圳研究生院环境与能源学院, 深圳 518055; 2. 北京大学环境工程系, 北京市新型污水深度处理工程技术研究中心, 北京 100871; 3. 西藏自治区水文水资源勘测局, 拉萨 850000; † 通信作者, E-mail: wang\_ting@pku.edu.cn

**摘要** 选取黄河沿至三湖河口14个采样断面, 分析溶解态、悬浮态和沉积态As, Zn, Cu, Cr, Pb和Cd的分布特征及影响因素, 并评估其生态风险。黄河上游溶解态金属含量为ND(not detected)~5.496 μg/L (I类水), 悬浮态重金属含量为ND~1097.995 μg/g, 沉积态重金属含量为ND~75.524 μg/g。非度量多维尺度分析(NMDS)结果表明, 黄河上游溶解态重金属空间差异性显著, 悬浮态和沉积态重金属季节差异性显著。相关性分析结果表明, 黄河上游沉积物中Zn, Cu, Cr和Pb主要来源于自然作用, As和Cd存在一定程度的人为污染。水库的建立运行也影响黄河上游重金属分布趋势, 主要与大坝对悬浮物的截留作用、蓄水的稀释作用以及重金属在泥-水表面的分配作用有关。潜在生态风险指数评估结果表明, 黄河上游重金属生态风险整体上偏低, Cd和As贡献较大。

**关键词** 黄河上游; 重金属; 上地壳金属浓度; 大坝; 生态风险

## Distribution of Heavy Metals in the Upstream of Yellow River and Ecological Risk Assessment

ZHANG Qian<sup>1,2</sup>, LIU Xiangwei<sup>3</sup>, SHUI Yong<sup>3</sup>, WANG Ting<sup>2,†</sup>

1. School of Environment and Energy, Peking University Shenzhen Graduate School, Shenzhen 518055; 2. Beijing New Advanced Treatment Technology Research Center, Department of Environmental Engineering, Peking University, Beijing 100871; 3. Hydrographic Survey Bureau of Tibet Autonomous Region, Lhasa 850000; † Corresponding author, E-mail: wang\_ting@pku.edu.cn

**Abstract** 14 sampling sections in the upstream of Yellow River were selected to detect concentrations of As, Zn, Cu, Cr, Pb and Cd, followed by ecological risk assessment. The metal content in water ranged among ND to 5.496 μg/L, while ND to 1097.995 μg/g in suspended solids (SS) and ND to 75.524 μg/g in sediment. NMDS results proved that metal contents in water displayed significant difference in spatial scale, while that in SS and sediments were remarkably diverse in different season. Correlation analysis proved that Zn, Cu, Cr and Pb were mainly from natural process, while As and Cd were partially from man-made pollution. Meanwhile, establishment and operation of reservoirs also impacted metal distributions, which could be the combined actions of interception to SS by big dams, dilution by impounding, and distribution effect in mud-water interface. Results by potential ecological risk index proved that heavy metals in the upstream of Yellow River showed low risk, and Cd and As played the important role.

**Key words** upstream of Yellow River; heavy metal; upper crust metal concentration; dam; ecological risk

随着工农业的迅速发展, 重金属污染问题越来越严重, 受到广泛的关注<sup>[1]</sup>。重金属污染具有不可降解性、高毒性以及持久性等特点, 可以通过食物链放大, 传递到人体中, 威胁人类健康<sup>[2]</sup>。河流中

重金属的来源包括自然作用和人类活动的输入。自然因素包括河床岩石的化学浸出<sup>[3]</sup>、源岩的侵蚀和风化作用<sup>[4-7]</sup>、大气沉降<sup>[8]</sup>和沉积物释放<sup>[9]</sup>等; 人为因素包括城市与工业废水的排放、采矿与冶炼

活动等<sup>[10-12]</sup>。重金属进入河流后,可在水相、悬浮物和沉积物中进行分配,进而威胁水生生物及人类饮水安全。溶解态和悬浮态是重金属随河流迁移和运输的主要形态;沉积态虽然迁移能力较弱,但当外界环境条件(pH、氧化还原电位和水动力条件等)发生改变时,沉积态重金属可再次释放到上覆水体中,造成二次污染<sup>[13-14]</sup>。因此,研究流域河流溶解态、悬浮态和沉积态重金属的分布特征及污染状况,对评估流域生态系统的健康具有重要意义。

黄河是世界上含沙量最大的河流,也是中国第二长河流。黄河上游从河源至内蒙古托克托县河口镇,是其主要来水区域,径流量占全年径流总量的60%以上<sup>[15]</sup>。黄河兰州段地处青藏高原地区,生态环境脆弱,地理气候复杂。宁蒙河段位于兰州段下游,是典型的沙漠宽谷河段,河道形态演变剧烈。黄河上游分布着兰州、白银、银川和包头等工业基地和新兴城市,沿程有色金属开采、选矿和冶炼工业兴盛,水资源供需矛盾突出,水体重金属污染问题日渐严重。近年来,已有大量研究者调查黄河兰州段到黄河三角洲<sup>[16-21]</sup>的重金属分布特征和成因。

本研究基于上述背景,选取黄河上游从黄河沿至三湖河口共 14 个采样断面,分析黄河上游溶解态、悬浮态和沉积态重金属的分布特征及来源,并通过数据模型评估潜在的生态风险,以为黄河流域的污染治理、生态恢复以及生态安全保护等提供

科学依据。

## 1 研究方法

### 1.1 采样点布置与样品采集

自黄河沿至三湖河口设置 14 个采样点,分别为:黄河沿(HHY)、玛曲(MQ)、贵德(GD)、循化(XH)、小川(XC)、新城桥(XCQ)、兰州(LZ)、安宁渡(AND)、下河沿(XHY)、青铜峡(QTX)、临河(LH)、石嘴山(SZS)、巴彦高勒(BYGL)和三湖河口(SHHK),采样点分布如图 1 所示。

于 2015 年春季(5 月)和秋季(10 月)采集上覆水体和沉积物样本。水样采集于河道中央 0~40 cm 表层水体,并于对应断面下采集 0~10 cm 表层沉积物样品。采样流程参考 HJ 494—2009《水质 采样技术指导》、HJ/T 91—2002《地表水和污水监测技术规范》、HJ 493—2009《水质 样品的保存和管理技术规定》、HJ/T 372—2007《水质 自动采样器技术要求及检测方法》。采集的样品于 4℃ 条件下保存,运输至实验室待测。

### 1.2 样品前处理与分析

准确地量取一定体积的原水,经 0.45 μm 滤膜(烘干恒重)过滤后,向滤液中加浓硝酸(65%~68%),每 10 mL 滤液中加一滴,用于测定溶解态重金属含量。将截留了悬浮物的滤膜烘干至恒重,保存于塑料离心管中。采集的沉积物经挑选、风干和研磨后,过 250 目的尼龙筛,保存于塑料瓶中。准确地

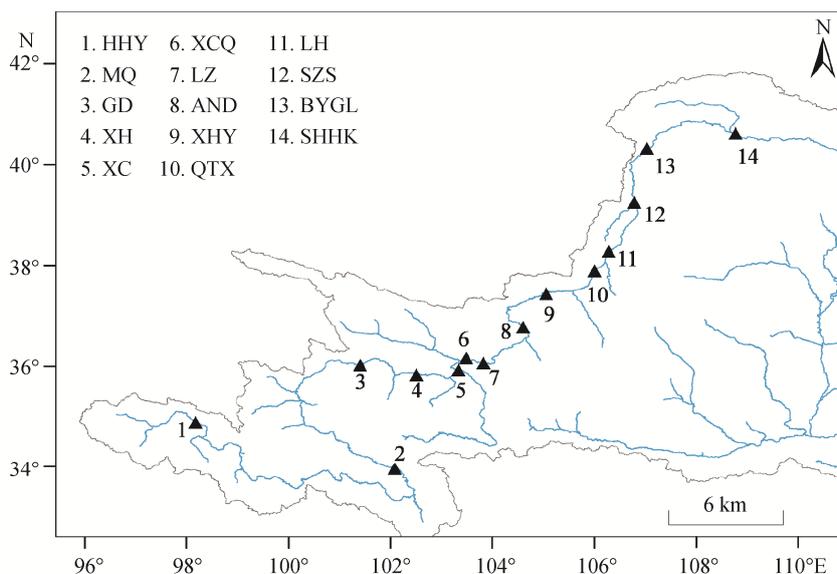


图 1 采样点位置分布  
Fig. 1 Distribution of sampling sites

称量悬浮物和沉积物样品,经 $\text{HNO}_3\text{-HF-HClO}_4$ 系统消解。

主要检测指标包括As, Zn, Cu, Cr, Pb和Cd。采用电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS, X Series II, Thermo Scientific, 美国)、电感耦合等离子体原子发射光谱仪(ICP-OES, Prodigy, Leeman, 美国)和原子荧光光度计(AFS, AFS-9130, 北京吉天仪器有限公司)测定水体及消解液中重金属浓度。测试过程中,插入空白样品、质控样品和平行样品,用以保证测试结果的准确度和精密度。

### 1.3 数据分析方法

#### 1.3.1 数据处理与分析

通过绘制箱线图、气泡图(bubble diagram)来分析黄河上游金属元素的含量及沿程变化。气泡图的绘制需要将数据归一化,计算公式如下:

$$X = \frac{(X_i - X_{\min})}{(X_{\max} - X_{\min})}, \quad (1)$$

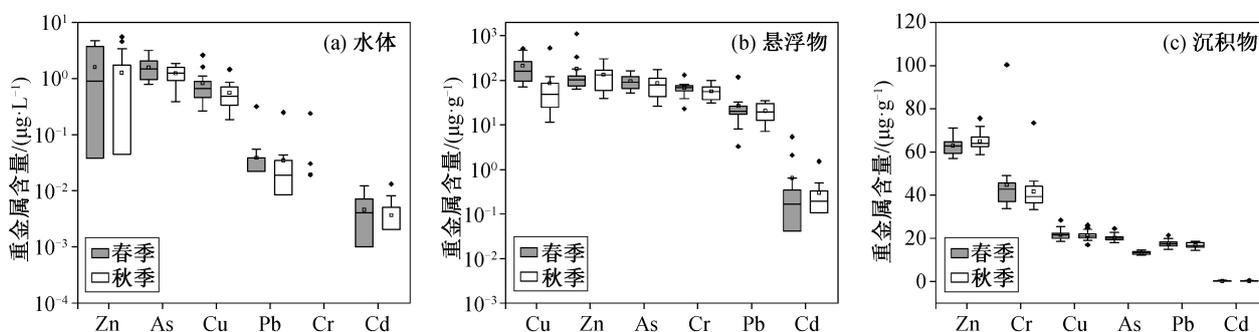
其中,  $X$ 表示标准化之后第 $i$ 个点的数值,  $X_i$ 表示单一金属第 $i$ 个点的金属含量,  $X_{\max}$ 表示该金属元素在所有站点中的最大含量,  $X_{\min}$ 表示该金属元素的最小含量。

采用非度量多维尺度分析(non-metric multidimensional scaling, NMDS)的方法,分析所有样品两两间的 Unweighted-UinFrac 距离,进而分析重金属元素组成时空差异。

#### 1.3.2 生态风险评价

采用地累计指数法<sup>[22]</sup>,对黄河上游重金属的污染情况进行评估,计算公式为

$$I_{\text{geo}} = \log_2 \left[ \frac{C_i}{K \times B_i} \right], \quad (2)$$



箱体内部横线表示中位数,空心方形点表示平均值,箱顶和箱底分别表示25%和75%分位数,箱体外部上下端的线长为1.5倍的四分位数全距(即第3个与第1个四分位数之差的1.5倍),上下端线以外的菱形点为超出该范围的数据

图2 黄河上游河段重金属含量箱线图

Fig. 2 Metal boxplots of the upstream of Yellow River

其中,  $C_i$ 为重金属实测值(mg/kg);  $K$ 为由于不同地区岩石性质差异而取的修正系数(一般为1.5);  $B_i$ 为重金属背景值(mg/kg),本研究参考甘肃的土壤元素背景值<sup>[23]</sup>;  $I_{\text{geo}} \leq 0$ 代表无污染,  $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ 为轻度-中度污染,  $1 < I_{\text{geo}} \leq 2$ 为中度污染,  $2 < I_{\text{geo}} \leq 3$ 为中度-强污染,  $3 < I_{\text{geo}} \leq 4$ 为强污染,  $4 < I_{\text{geo}} \leq 5$ 为强-极强污染,  $I_{\text{geo}} > 5$ 为极强污染。

采用潜在生态危害指数对黄河上游重金属生态风险进行评价,计算公式如下:

$$R_i = \sum E_i^i, \quad (3)$$

$$E_i^i = T_i^i C_i^i, \quad (4)$$

$$C_i^i = C_0^i / C_n^i, \quad (5)$$

其中,  $R_i$ 代表沉积物重金属所有风险因子的总和,  $E_i^i$ 代表单一元素的潜在生态风险因子,  $T_i^i$ 代表给定物质的毒性响应因子<sup>[24]</sup>,  $C_i^i$ 代表单一重金属的毒性系数,  $C_0^i$ 代表沉积物中重金属的浓度,  $C_n^i$ 代表重金属浓度的参考值。对于单项潜在生态风险因子 $E_i^i$ ,  $E_i^i < 40$ 代表轻度生态风险,  $40 \leq E_i^i < 80$ 为中等风险,  $80 \leq E_i^i < 160$ 为较强风险,  $160 \leq E_i^i < 320$ 为很强风险,  $E_i^i \geq 320$ 为极强风险。对于潜在生态风险指数 $R_i$ ,  $R_i < 150$ 代表轻度生态风险,  $150 \leq R_i < 300$ 为中等风险,  $300 \leq R_i < 600$ 为较强风险,  $R_i \geq 600$ 为很强风险。

## 2 结果与讨论

### 2.1 黄河上游重金属浓度特征

图2为黄河上游水体、悬浮物的沉积物中6种重金属元素As, Zn, Cu, Cr, Pb和Cd的含量分布箱线图。水体溶存态重金属含量为ND~5.50  $\mu\text{g/L}$  (ND表示未检出(not detected)),其中As (1.40  $\mu\text{g/L}$ ) > Zn

(1.43 μg/L)>Cu(0.69 μg/L)>Pb(0.04 μg/L)>Cd(0.004 μg/L)>Cr(ND)(图 2(a))。所有断面重金属含量均达到地表水 I 类水质标准(表 1)。对比国内外大河水体重金属分布情况可知,黄河上游水体溶解态重金属均值高于 Syr Darya 河<sup>[25]</sup>、亚马逊河(ND~0.45 μg/L)、澜沧江(0.11~0.86 μg/L)和长江(ND~0.67 μg/L), 低于密西西比河上游(ND~1.85 μg/L)<sup>[26-27]</sup>和赣江(0.21~7.61 μg/L)<sup>[28]</sup>(表 1), 这与所处的地质环境有关。从季节分布看, 溶解态金属春季变化范围小于秋季, 可能是由于秋季为汛期, 河水流量大且流速快, 导致更多金属被冲刷进入河流; 另一方面, 流速增加使得沉积物表面的金属通过再悬浮-解吸作用重新进入水体。

由图 2(b)和(c)可知, 黄河上游悬浮物重金属含量为 ND~1097.995 μg/g, 其中 Zn(156.35 μg/g)>Cu(148.57 μg/g)>As(90.45 μg/g)>Cr(61.87 μg/g)>Pb(23.46 μg/g)>Cd(0.47 μg/g); 沉积物重金属含量为 ND~75.524 μg/g, 其中 Zn(63.90 μg/g)>Cr(43.25 μg/g)>Cu(21.54 μg/g)>Pb(17.17 μg/g)>As(16.78 μg/g)>Cd(0.33 μg/g), 与田梦靖<sup>[29]</sup>的研究结果相近。由表 2 可知, 黄河上游沉积物 As, Zn, Cu, Pb, Cr 和 Cd 平均含量分别是中国水系沉积物平均值<sup>[31]</sup>的 1.845, 0.998, 1.026, 0.687, 0.746 和 2.357 倍, 是土壤重金属背景值<sup>[23]</sup>的 1.332, 0.933, 0.894, 0.913, 0.616 和 2.845 倍。初步推断, 该区域存在一定程度的 As 和 Cd 污染。从季节分布看, 重金属含量在悬浮物中春季小于秋季, 沉积物中春季高于秋季。悬浮物重金属含量大于沉积物。这是由于秋季为汛期, 再悬浮作用导致部分沉积物重金属释放, 因此悬浮物金属浓度增加。与国内外其他河流相比, 黄河上游

表 1 国内外河流溶解态重金属含量分布状况(μg/L)  
Table 1 Comparisons of metal contents in water of various rivers (μg/L)

项目	As	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd	文献
地表 I 级水质标准	50	50	10	10	10	1	
黄河上游(春)	1.57	1.58	0.83	0.02	0.04	0.00	本研究
黄河上游(秋)	1.23	1.27	0.56	0.00	0.03	0.00	本研究
澜沧江		0.86	0.67	0.11	0.23		[26]
长江	0.12	0.67	0.08	ND	0.09	0.05	[26-27]
赣江	5.62	7.61	3.06	4.74	0.83	0.21	[28]
亚马逊河		0.45	ND	ND	0.06		[26]
密西西比河上游		0.21	1.85	ND	0.01		[26]
Syr Darya 河		0.08	0.02		0.00	0.01	[25]

表 2 国内外河流沉积物中重金属分布情况(μg/g)  
Table 2 Comparisons of metal contents in sediments of various rivers (μg/g)

项目	As	Zn	Cu	Cr	Pb	Cd	文献
黄河上游(春)	20.29	62.93	21.72	44.77	17.57	0.33	本研究
黄河上游(秋)	13.28	64.86	21.36	41.72	16.76	0.33	本研究
上地壳金属浓度(UCC)	1.50	71.00	25.00	35.00	20.00	0.10	[30]
中国水系沉积物平均值	9.10	64.00	21.00	58.00	25.00	0.14	[31]
土壤元素背景值(甘肃)	12.6	68.5	24.1	70.2	18.8	0.116	[23]
长江	0.01	1.00	0.60		2.00	0.09	[27]
湘江	186.80	257.17	71.29	59.71	102.52	23.31	[32]
松花江		175.76	14.57	63.97	16.84	0.28	[33]
吉兰丹河	7.38	32.95	11.40	17.71	22.61	1.31	[34]
Koshi 河		49.46	21.06	47.18	21.36	0.20	[35]

沉积物中重金属含量低于湘江(23.31~257.17 μg/g)<sup>[32]</sup>和松花江(0.28~175.76 μg/g)<sup>[33]</sup>, 高于 Koshi 河(0.20~49.46 μg/g)<sup>[35]</sup>、吉兰丹河(1.31~32.95 μg/g)<sup>[34]</sup>以及长江(0.01~1.00 μg/g)<sup>[27]</sup>。

## 2.2 黄河上游重金属时空差异

采用 NMDS 图进一步分析黄河上游重金属的季节差异, 如图 3 所示。NMDS 分析的胁强系数(Stress 值)小于 0.2, 证明该分类结果可靠。

由图 3 可知, 水体空间差异性显著, 悬浮物和沉积物季节差异性显著。对水体而言, 重金属浓度受水文水质参数、地质环境和人类活动等因素的显著影响, 因此空间差异性大于时间差异。XH-S 和 MQ-S 显著离散, 这是由于循化和玛曲地处高原过渡带, 气候垂直变化明显, 春季干燥水少, 且玛曲是丰富的矿集区, 导致春季金属含量偏高<sup>[36-37]</sup>。与之相比, 沉积物迁移能力较差, 受自然及人类活动的影响显著小于水体, 因此季节差异性大于空间差异性。BYGL-S 较为离散, 与巴彦高勒地处乌兰布和沙漠西侧有关, 春季风大使得风沙被带入河道中<sup>[38]</sup>, 导致该地区的空间差异性较大。由于泥-水相互作用, 悬浮物表现出明显的季节差异性及一定的空间差异性。XC-S 显著离散于春季其他断面, 与小川断面位于坝后有关。辛成林等<sup>[39]</sup>在调查黄河下游水体悬浮颗粒物重金属元素的地球化学行为时, 发现颗粒物存在显著的季节差异, 本文结论与之吻合。

## 2.3 自然及人类活动的影响

上地壳金属浓度可以反映区域地球化学背景,

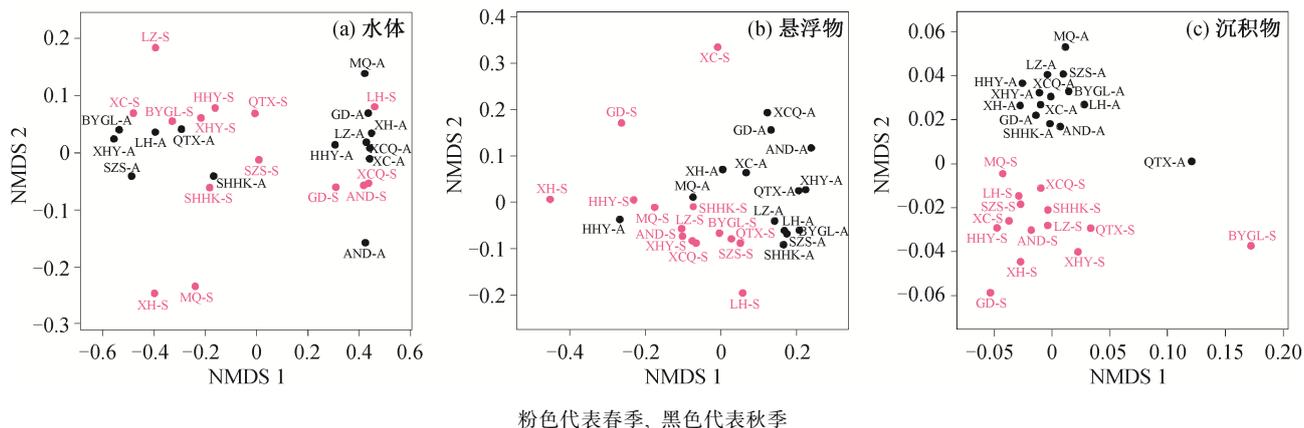


图 3 黄河上游重金属元素的 NMDS 图  
Fig. 3 NMDS plots of metals in the upstream of Yellow River

即岩石风化和迁移沉积的本底含量特征。本研究对上地壳金属浓度(UCC)和黄河上游沉积物重金属浓度进行相关性分析。从图4可以看出,两者呈现正相关关系,  $R^2 \approx 0.70$ 。本研究测定的6种元素中, Cu, Cr, Zn和Pb落在直线上,表明这4种元素主要是自然来源; As和Cd落在相关性拟合直线以上,推测除岩石风化外,可能还存在一定程度的人为输入。

黄河沿程有刘家峡水库<sup>[40]</sup>、青铜峡水库<sup>[41]</sup>、三门峡水库<sup>[42]</sup>和小浪底水库<sup>[43]</sup>等,水库的建设与运行、调水调沙工程改变了水体流速、水深及悬浮物含量,进而影响水化学过程。这些因素都有可能影响黄河重金属的时空分布特征。图5为水体、悬浮物和沉积物重金属元素的含量变化气泡图,黄线所处的位置分别为刘家峡水库和青铜峡水库。由图5(a)可以发现,春季坝后重金属含量比坝前低,尤其是Cu和Pb,循化春季Cu和Pb含量分别为2.588和

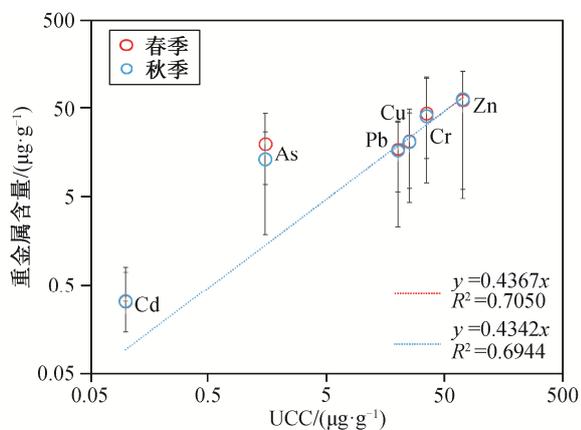


图 4 黄河上游金属浓度与 UCC 相关性分析  
Fig. 4 Correlations of metal concentrations in the upstream of Yellow river and UCC

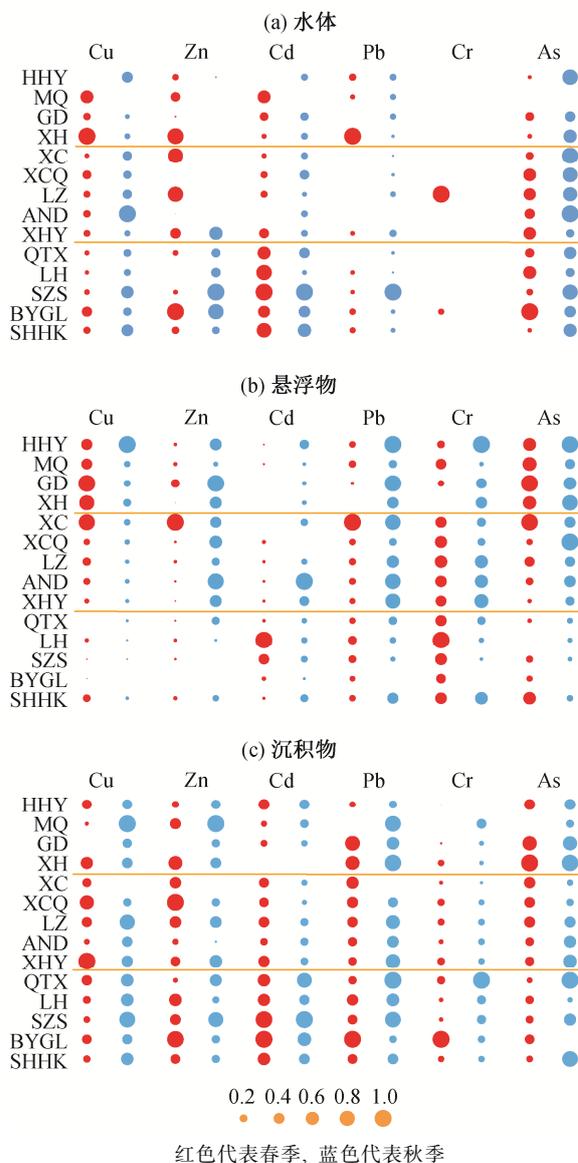


图 5 黄河上游河段春秋金属含量气泡图  
Fig. 5 Bubble diagrams of metals in spring and autumn

0.315  $\mu\text{g/L}$ , 流经刘家峡水库至小川后, 分别下降至 0.438 和 0.000  $\mu\text{g/L}$ , 可能与大坝蓄水的稀释作用及对悬浮物的截留作用有关。秋季坝后重金属含量比坝前略微增大, 与丰水期冲刷作用导致水体重金属含量增加有关。悬浮物中刚好相反, 春季坝后重金属含量略微增大, 秋季略微降低(图 5(b))。金属离子在水沙界面存在吸附-解吸平衡, 春季坝后悬浮物减少导致单位悬浮物吸附的金属离子增多, 因此悬浮物重金属含量升高。与水体和悬浮物相比, 大坝扰动作用对沉积物重金属含量的影响相对较小(图 5(c))。

### 2.4 黄河上游沉积物重金属生态风险评价

由于黄河上游水体重金属含量均达到地表 I 类水质标准, 本文仅对沉积物进行风险评价。利用地

累计指数法( $I_{\text{geo}}$ ), 对黄河上游重金属污染情况进行评估。从图 6 可以看出, 黄河上游沉积物 As, Zn, Cu, Pb, Cr 和 Cd 的  $I_{\text{geo}}$  平均值春季分别为 0.10, -0.71, -0.74, -0.69, -1.30 和 0.80, 秋季分别为 -0.51, -0.67, -0.77, -0.75, -1.36 和 0.86。其中, 春季 As, Cd 和秋季 Cd 为轻度-中度污染( $0 < I_{\text{geo}} \leq 1$ ), 其余均属于无污染水平( $I_{\text{geo}} \leq 0$ ), 与 2.1 节的结论相吻合。

黄河上游沉积物重金属生态风险的评价结果如图 7 所示。可以看出, 除春季的石嘴山和巴彦高勒  $R_1$  值在 150~300 之间(中等风险)外, 其余站点的  $R_1$  值均低于 150, 为低生态风险。石嘴山和巴彦高勒地处沙漠区域, 风沙易被带入河道中, 造成沉积物中重金属含量偏高, 生态风险偏大。从季节角度看, 春季生态风险高于秋季。黄河上游重金属的潜

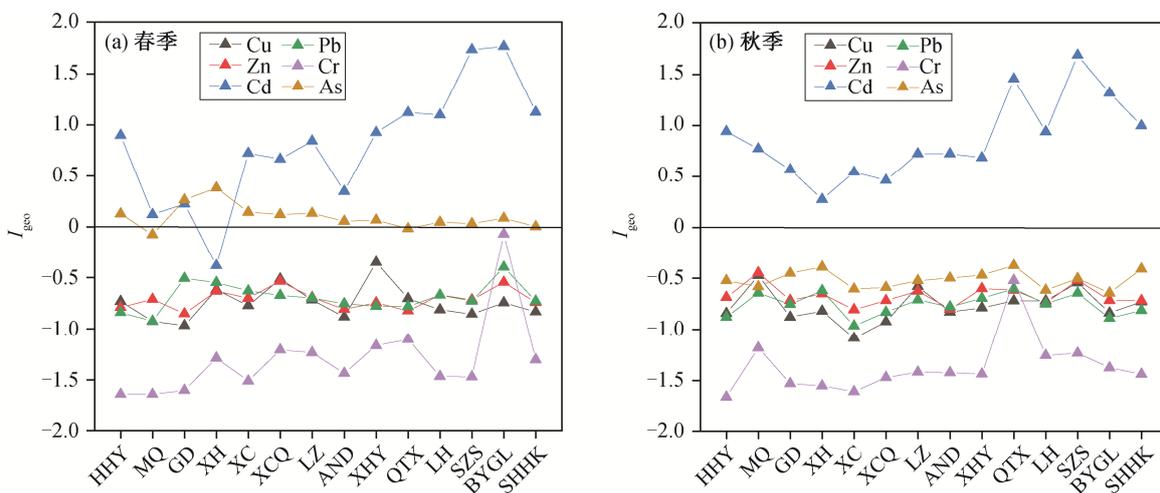


图 6 黄河上游沉积物重金属的  $I_{\text{geo}}$  值  
Fig. 6  $I_{\text{geo}}$  of sidement metals in the upstream of Yellow River

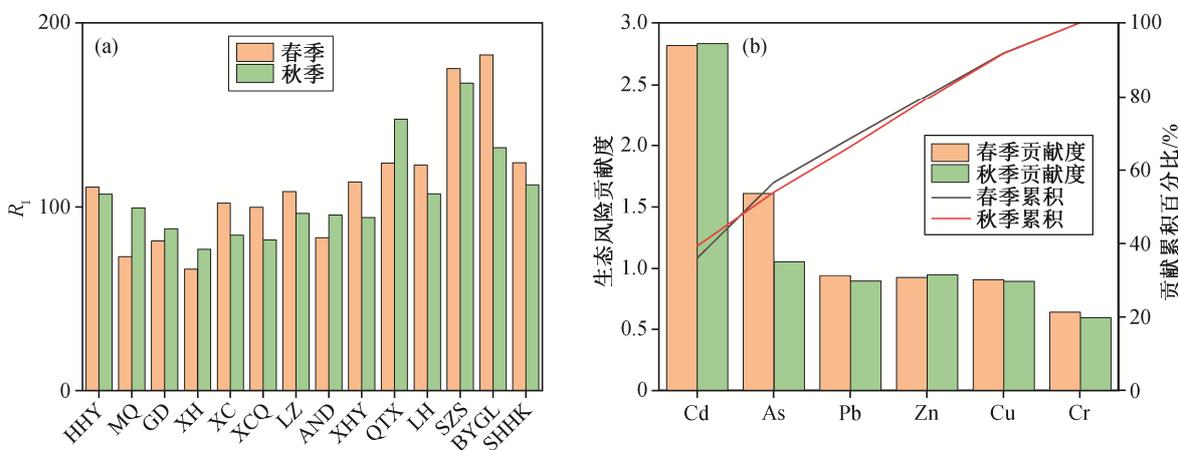


图 7 黄河上游沉积物重金属浓度生态风险评价结果(a)及各金属的贡献(b)  
Fig. 7 Results of ecological risk assessment (a) and contributions of various metals in the sediment (b)

在生态风险构成中, Cd和As的贡献度最高, 接近50%(图7(b))。

### 3 结论

黄河上游水体中6种金属As, Zn, Cu, Cr, Pb和Cd的含量为ND~5.496  $\mu\text{g/L}$ (I类水), 悬浮物重金属含量为ND~1097.995  $\mu\text{g/g}$ , 沉积物重金属含量为ND~75.524  $\mu\text{g/g}$ 。悬浮物重金属含量显著大于沉积物。黄河上游水体重金属空间差异性显著, 悬浮物和沉积物季节差异性显著。

黄河上游沉积物中Zn, Cu, Cr和Pb主要受自然因素影响, As和Cd存在一定程度的人为污染。水库的建立和运行也影响黄河上游的金属分布趋势, 主要与大坝对悬浮物的截留作用、蓄水的稀释作用以及重金属在泥-水表面的分配作用有关。

黄河上游As和Cd存在轻度-中度污染, 而Zn, Cu, Cr和Pb为无污染水平。黄河上游重金属生态风险整体上偏低, 石嘴山和巴彦高勒断面表现出中等风险。Cd和As对潜在生态风险贡献较大。

### 参考文献

- [1] 徐嗣林, 赵文, 张鹏, 等. 北京市五大水系重金属污染特征及生态风险评估. 吉林水利, 2020(1): 1-6
- [2] 谢元, 蒋晓辉, 王婷, 等. 黄河典型支流入干区底栖动物群落结构特征比较研究. 北京大学学报, 2018, 54(9): 1067-1076
- [3] Soares H, Boaventura R A R, Machado A, et al. Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave river basin (Portugal): multivariate analysis of data. Environmental Pollution, 1999, 105(3): 311-323
- [4] Chen J S, Wang F Y, Li X D, et al. Geographical variations of trace elements in sediments of the major rivers in eastern China. Environmental Geology, 2000, 39(12): 1334-1340
- [5] Wen Y, Yang Z, Xia X. Dissolved and particulate zinc and nickel in the Yangtze River (China): distribution, sources and fluxes. Applied Geochemistry, 2013, 31: 199-208
- [6] Yang S Y, Li C X, Jung H S, et al. Discrimination of geochemical compositions between the Changjiang and the Huanghe sediments and its application for the identification of sediment source in the Jiangsu coastal plain, China. Marine Geology, 2002, 186(3/4): 229-241
- [7] Wang L, Wang Y, Xu C, et al. Analysis and evaluation of the source of heavy metals in water of the River Changjiang. Environmental Monitoring and Assessment, 2011, 173: 301-313
- [8] Liu M, Yang Y, Yun X, et al. Concentrations, distribution, sources, and ecological risk assessment of heavy metals in agricultural topsoil of the Three Gorges Dam region, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3): 147
- [9] Sun Z, Xu G, Hao T, et al. Release of heavy metals from sediment bed under wave-induced liquefaction. Marine Pollution Bulletin, 2015, 97(1): 209-216
- [10] Ghrefat H, Yusuf N. Assessing Mn, Fe, Cu, Zn, and Cd pollution in bottom sediments of Wadi Al-Arab Dam, Jordan. Chemosphere, 2006, 65(11): 2114-2121
- [11] Yang Z S, Wang H J, Saito Y, et al. Dam impacts on the Changjiang (Yangtze) River sediment discharge to the sea: the past 55 years and after the Three Gorges Dam. Water Resources Research, 2006, 42(4): 1-10
- [12] Koshikawa M K, Takamatsu T, Takada J, et al. Distributions of dissolved and particulate elements in the Yangtze estuary in 1997-2002: background data before the closure of the Three Gorges Dam. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 2007, 71(1/2): 26-36
- [13] 张杰, 郭西亚, 曾野, 等. 太湖流域河流沉积物重金属分布及污染评估. 环境科学, 2019, 40(5): 2202-2210
- [14] 徐金英, 郑利林, 徐力刚, 等. 南方丘陵区河流表层沉积物重金属污染评价. 中国环境科学, 2019, 39(8): 3420-3429
- [15] 金文婷, 王义民, 白涛, 等. 黄河上游梯级水库联合调水调沙及合理库容研究. 水利水运工程学报, 2018(6): 19-29
- [16] Cheng Q, Lou G, Huang W, et al. Assessment and potential sources of metals in the surface sediments of the Yellow River Delta, Eastern China. Environmental Science and Pollution Research, 2017, 24(21): 17446-17454
- [17] Shang Z, Ren J, Tao L, et al. Assessment of heavy metals in surface sediments from Gansu section of Yellow River, China. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(3): 1-10
- [18] Ma X, Zuo H, Liu J, et al. Distribution, risk assessment, and statistical source identification of heavy metals in aqueous system from three adjacent regions

- of the Yellow River. *Environmental Science and Pollution Research*, 2016, 23(9): 8963–8975
- [19] Chen B, Fan D, Li W, et al. Enrichment of heavy metals in the inner shelf mud of the East China Sea and its indication to human activity. *Continental Shelf Research*, 2014, 90: 163–169
- [20] Wang G, Oldfield F, Xia D, et al. Magnetic properties and correlation with heavy metals in urban street dust: a case study from the city of Lanzhou, China. *Atmospheric Environment*, 2012, 46: 289–298
- [21] Nan Z, Zhao C. Heavy metal concentrations in gray calcareous soils of Baiyin region, Gansu province, PR China. *Water, Air, and Soil Pollution*, 2000, 118(1/2): 131–142
- [22] 伍娟丽, 王永刚, 王旭, 等. 通州区河流沉积物重金属污染评价. *水生态学杂志*, 2020, 41(1): 71–78
- [23] 王生朴, 连兵. 甘肃省土壤环境背景值特征及其分布规律. *甘肃环境研究与监测*, 1993, 6(3): 1–7
- [24] 李壮, 王志忠, 张金路, 等. 黄河口牡蛎产卵场及邻近海域沉积物中重金属分布及生态风险评价. *水产学杂志*, 2019, 32(6): 18–22
- [25] Zhang W Y, Ma L, Abuduwaili J, et al. Distribution characteristics and assessment of heavy metals in the surface water of the Syr Darya River, Kazakhstan. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(1): 979–988
- [26] Liang B, Han G L, Zeng J, et al. Spatial variation and source of dissolved heavy metals in the Lancangjiang River, Southwest China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(3): 1–15
- [27] Li R, Tang X Q, Guo W J, et al. Spatiotemporal distribution dynamics of heavy metals in water, sediment, and zoobenthos in mainstream sections of the middle and lower Changjiang River. *Science of the Total Environment*, 2020, 714: 136779
- [28] Shu W, Wang P, Zhao J, et al. Characteristics, sources and risk assessment of heavy metals in the Ganjiang River Basin, China. *Polish Journal of Environmental Studies*, 2020, 29(2): 1849–1868
- [29] 田梦靖. 黄河甘宁蒙省界处不同介质中重金属含量水平及行为研究[D]. 北京: 中央民族大学, 2017
- [30] Armstrong R L, Taylor S R, Tarney J. The composition and evolution of the continental crust: rare earth element evidence from sedimentary rocks: discussion. *Philosophical Transactions of the Royal Society B: Biological Sciences*, 1981, 301: 398–399
- [31] 鄯明才, 王春书. 地质标准物质的回顾与展望. *物探与化探*, 1995, 19(2): 96–103
- [32] Huang Z F, Liu C Y, Zhao X R, et al. Risk assessment of heavy metals in the surface sediment at the drinking water source of the Xiangjiang River in South China. *Environmental Sciences Europe*, 2020, 32(1): 1–9
- [33] Li K Y, Cui S, Zhang F X, et al. Concentrations, possible sources and health risk of heavy metals in multi-media environment of the Songhua River, China. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 2020, 17(5): 1–16
- [34] Pooveneswary N, Bakar A F B A, Wei B C, et al. Contamination status and ecological risk of heavy metals in surface sediment of Kelantan River and its nearshore area, Malaysia. *Water Supply*, 2020, 20(1): 103–117
- [35] Li M Y, Zhang Q G, Sun X J, et al. Heavy metals in surface sediments in the trans-Himalayan Koshi River catchment: Distribution, source identification and pollution assessment. *Chemosphere*, 2020, 244: 125410
- [36] 田勇, 赵久渊, 韩莉瑛. 近 57 年青海循化地区降水变化特征分析. *青海气象*, 2019(2): 36–41
- [37] 刘斌. 甘肃省玛曲矿集区金矿成矿模式及找矿方向 // 第九届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会. 南京, 2019: 421–422
- [38] 李振全. 黄河石嘴山至巴彦高勒段风沙入黄量研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2019
- [39] 辛成林, 任景玲, 张桂玲, 等. 黄河下游水体悬浮颗粒物中金属元素的地球化学行为. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3127–3134
- [40] 王建丰, 雷天柱, 张生银, 等. 刘家峡水库表层沉积物微量元素地球化学特征. *沉积与特提斯地质*, 2018, 38(3): 53–61
- [41] 孙赞盈, 王育杰, 郑艳爽, 等. 青铜峡水库排沙对下游河道冲淤的影响. *人民黄河*, 2014, 36(10): 9–11
- [42] 谈皓, 潘明强, 李继伟, 等. 黄河潼关至三门峡大坝河段治理措施探讨. *水利与建筑工程学报*, 2007, 5(4): 83–86
- [43] 刘欣, 刘远征. 小浪底水库调水调沙以来黄河下游游荡河段河床演变研究. *泥沙研究*, 2019, 44(5): 56–60