

# 天山地表水重金属的赋存特征和来源分析

张兆永<sup>1,2</sup>, 吉力力·阿不都外力<sup>1\*</sup>, 姜逢清<sup>1</sup>, 木叶赛尔·吐地<sup>1,2</sup>, 王少平<sup>1,2</sup> (1.中国科学院新疆生态与地理研究所, 新疆 乌鲁木齐 830011; 2.中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 2011年8月1日~15日,在天山山地以约50km的间距取51个水样品,并对代表性Pb、Ni、Cd、Co、Hg、As、Cu、Mn、Zn、Cr 10种重金属元素进行测试,然后运用相关分析、主成分分析和聚类分析等方法对这些重金属的赋存特征与来源做了探讨,结果表明:10种重金属变化范围为0~91.876 $\mu\text{g/L}$ .在所有水样中10种重金属元素平均浓度顺序为: Ni>As>Cu>Zn>Co>Mn>Hg>Cd>Pb;不同类型样品中重金属赋存特征为:灌溉渠道>河流支流>河流干流>湖泊>机井.相关分析结果显示,Cu、Mn、Hg、Zn、Ni和其他元素相关性较强.主成分分析表明,样品中重金属指标第1主成分Cu、Ni、Cr、Cd、As、Co和Cr来源于河流底部母岩矿物的风化及沿岸陆源碎屑矿物的自然风化侵蚀作用,第2主成分Mn、Hg、Zn、Pb来源于城镇附近的污染工厂及道路附近含铅污染物,第3主成分Hg、Pb、Cr主要来源于工农业排污.聚类分析表明:样品中重金属元素可归为4类,其中Co、Ni、Cr为一类,Cd、Cu、As为一类,Pb、Zn、Mn为一类,Hg单独为一类.单一来源如,锌、铜矿开采、河流底部母岩重金属迁移等因素对样品中重金属浓度影响较大.

**关键词:** 天山; 地表水; 重金属; 赋存特征; 统计分析

中图分类号: X522 文献标识码: A 文章编号: 1000-6923(2012)10-1799-08

**Contents and sources of heavy metals in surface water in the Tianshan Mountain.** ZHANG Zhao-yong<sup>1,2</sup>, Jilili·Abuduwaili<sup>1</sup>, JIANG Feng-qing<sup>1</sup>, Muysal-Tud<sup>1,2</sup>, WANG Shao-ping<sup>1,2</sup> (1.Xinjiang Institute of Ecology and Geography, Chinese Academy of Sciences, Urumqi 830011, China; 2.University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China). *China Environmental Science*, 2012,32(10): 1799~1806

**Abstract:** During August 1~15, 2011, 51 surface water samples were collected from the northern slope of Tianshan Mountains. Contents of ten heavy metals, i.e., Pb, Ni, Cd, Co, Hg, As, Cu, Mn, Zn and Cr were tested in the laboratory by using ICP-MS. The statistical methods, such as correlation analysis, principal component analysis and cluster analysis were then employed to identify the sources of these heavy metals. contents of 10 heavy metals ranged from 0 to 91.876  $\mu\text{g/L}$ . The order of heavy metals in the same samples was: Ni>As>Cu>Zn>Co>Mn>Hg>Cd>Pb. The correlation analysis shows a closer correlation between Cu, Mn, Hg, Zn, Ni and other elements. The principal component analysis shows that heavy metals in the samples can be divided into the first principal component of Cu, Ni, Cr, Cd, As, Co and Cr, which comes from the natural weathering erosion of the bed parent rock and granular minerals at the bottom and bank of the river and stream; the second principal component includes Mn, Hg, Zn, Pb, indicating a source from factories and traffics; and the third principal component of Hg, Pb and Cr, which comes from industrial and agriculture pollution. These heavy metals can be classified into four clusters, i.e., cluster one (Co, Ni, Cr), cluster two (Cd, Cu), cluster three (Pb, Zn, Mn) and cluster four (Hg).

**Key words:** Tianshan Mountain; surface water; heavy metals; contents characteristics; statistical analysis

水环境中重金属有多种来源,主要包括天然来源和人为来源.天然来源指重金属通过生物地球化学循环,包括岩石风化、水动力作用、陆地径流、大气沉降等方式进入水环境中,构成水环境中重金属本底值<sup>[1]</sup>.人为来源是指重金属由人类排放而进入水体.20世纪70年代以来,有关水体重金属污染的研究得到广泛开展.这些研究涉及到

重金属的形态、分布、来源、迁移与积累以及污染效应等诸多方面<sup>[2-6]</sup>.在水资源短缺的西北干旱半干旱地区,也开展了一些相关研究,如在石羊

收稿日期: 2012-02-03

基金项目: 中国科学院知识创新工程重要方向项目(KZCX2-YW-GJ04)资助

\* 责任作者, 研究员, Jili@ms.xjb.ac.cn

河流域昌宁盆地、新疆巩乃斯河流域等<sup>[7-8]</sup>.从水体类型上看,这些研究涉及到了地表水(包括受人类活动影响的灌溉、机井)、地下水的各个方面.

天山山地是中亚干旱区的湿岛,发源于该山地的河、溪流所产生的地表水资源占新疆总地表水资源的近一半.近年来,随着天山山地人类活动(采矿、旅游等)的加剧,天山山地地表水水质由于受人类污染的影响而有些下降,水安全受到威胁<sup>[9-12]</sup>.然而,目前人们对天山山地整体水环境质量状况还缺乏了解,有关水体重金属污染状况依

然不明.本研究通过采集近等间距的地表水水样,并利用多种分析方法,从整体角度探明天山山地地表水环境重金属污染状况,为天山山地区域水资源利用及水环境保护提供依据.

### 1 材料与方法

#### 1.1 研究区概况

天山是中亚地区的高大山系,东西长约2500km,南北宽约250-300km,其中2/3在我国新疆境内,横贯其中部.山体平均海拔约500m,天山山地地表水系众多,水资源丰富.

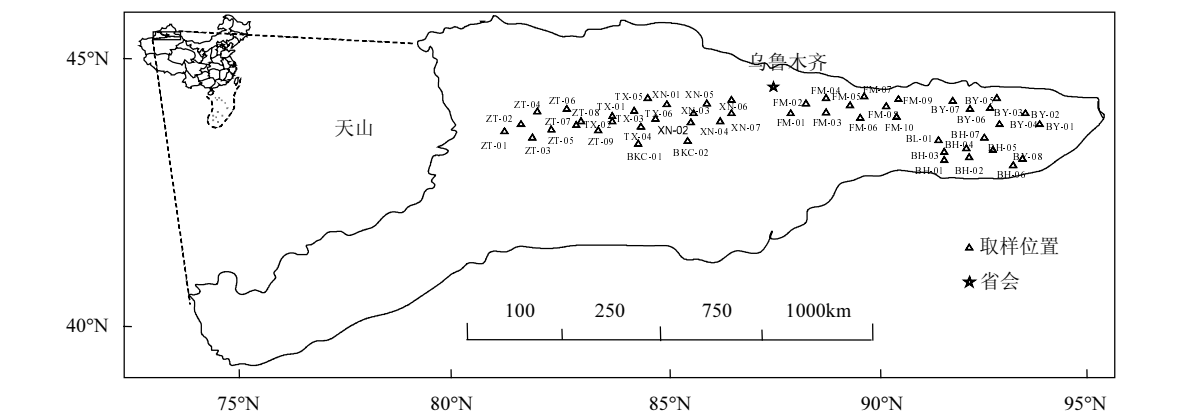


图 1 研究区及样点分布  
Fig 1 Distribution of sampling sites

#### 1.2 样品采集与处理

采样日期为2011年8月1~15日,以近50km等间距,取各种水体(包括河流干流、河流支流、湖泊、灌溉渠道、机井)水样51个(表1)

(图1).样品均记载取样点、取样日期、样点经纬度、样品温度、样点海拔、附近植被类型等背景情况.样品用净化过的聚乙烯塑料采样瓶盛装.

表 1 样点统计及描述  
Table 1 Descriptive of the samples

| 编号    | 经纬度                         | 采样地点                  | 水样描述            |
|-------|-----------------------------|-----------------------|-----------------|
| ZT-01 | 42°41'33.37"N 80°13'25.18"E | 谷地内西沟边                | 水温 4℃ 颜色乳白色     |
| ZT-02 | 42°41'23.11"N 80°16'47.26"E | 木扎尔特河                 | 水温 4-5℃ 乳白色     |
| ZT-03 | 42°39'29.36"N 80°27'49.32"E | 林边沟                   | 颜色透明 无杂质 水温 4℃. |
| ZT-04 | 42°40'34.28"N 80°34'30.79"E | 夏特尔乡桥下河               | 颜色乳白色 无味 水温 4℃  |
| ZT-05 | 42°41'28.37"N 80°46'11.28"E | 阿克苏的南山河               | 水温 4℃ 无色无味 稍混浊  |
| ZT-06 | 42°57'08.34"N 80°57'59.21"E | 特克斯河解放大桥下游 20m 左右     | 水质混浊 水温 20℃     |
| ZT-07 | 43°08'40.82"N 81°25'24.42"E | 塔什布拉克缓丘地带的小沟          | 清澈 无色无味 水温 25℃  |
| ZT-08 | 43°09'47.36"N 81°32'28.64"E | 昭苏到特克斯途中              | 水温 25℃ 稍混浊 无味   |
| ZT-09 | 43°10'02.03"N 81°45'30.35"E | 特克斯三乡省道 220 旁离特克斯 7km | 浑浊 水温 10℃ 无味    |
| TX-01 | 43°20'34.40"N 81°48'21.60"E | 特克斯去巩留途中南向沟谷的小西沟      | 水温 7℃ 无色无味 无杂质  |

续表

| 编号     | 经纬度                         | 采样地点                     | 水样描述               |
|--------|-----------------------------|--------------------------|--------------------|
| TX-02  | 42°34'58.34"N 81°52'53.81"E | 特克斯去巩留途中南北方向的小溪沟         | 无色无味 无杂质 水温 10℃    |
| TX-03  | 43°10'12.36"N 82°59'59.92"E | 巩留恰西风景区东北方向溪沟里           | 浑浊 颜色灰 水温 15℃      |
| TX-04  | 43°21'39.82"N 82°29'43.30"E | 特克斯河恰不其海水库               | 浑浊 色灰 水温 28℃ 无味    |
| TX-05  | 43°24'15.10"N 82°28'56.40"E | 特克斯河恰不其海坝下游 2km 处        | 水温 30℃ 无色无味 无杂质    |
| TX-06  | 43°20'27.54"N 83°14'38.61"E | 恰甫河中                     | 浑浊 无味 水温 25℃       |
| XN-01  | 43°25'48.76"N 83°37'40.38"E | 阿勒马勒乡距新源 30km 的渠道        | 浑浊 无味 水温 18℃       |
| XN-02  | 43°25'00.61"N 83°43'33.61"E | 阿勒马勒乡阿勒马勒村巩乃斯河桥头         | 浑浊 无味 水温 20℃       |
| XN-03  | 43°18'22.23"N 84°10'39.58"E | 巩乃斯沟桥头                   | 清澈 无味 水温 15℃       |
| XN-04  | 43°15'32.98"N 84°20'33.53"E | 巩乃斯沟桥头                   | 清澈 无味 水温 7~8℃      |
| XN-05  | 43°16'02.12"N 84°32'46.47"E | 阿尔龙沟国道 218 跨沟桥头          | 清澈 无味 水温 16℃       |
| XN-06  | 43°15'56.41"N 84°34'45.89"E | 离巩乃斯河大桥 1km 上游的 溪沟       | 清澈 无味 水温 20℃       |
| XN-07  | 43°12'15.76"N 84°48'10.67"E | 艾峰达坂下沟谷                  | 清澈 无味无色 无杂质 水温 15℃ |
| FM-01  | 44°09'40.60"N 88°11'16.20"E | 阜康重化工业园                  | 水温 15℃ 水质清澈 无浑浊    |
| FM-02  | 44°28'53.15"N 88°28'53.15"E | 阜康煤焦化基地 2km 处国道小冲沟       | 水温 18℃ 水浑浊 无味      |
| FM-03  | 44°05'38.81"N 88°31'23.30"E | 白杨河                      | 水温 20℃ 稍混浊 浅乳白色 无味 |
| FM-04  | 43°56'42.63"N 89°29'29.42"E | 吉木萨尔到奇台(180 团三连)的路口机井    | 水温 12℃ 无色无味        |
| FM-05  | 43°57'58.69"N 89°44'20.50"E | 奇台约 4km 机井               | 无色 无味 清澈           |
| FM-06  | 43°52'48.03"N 90°15'43.11"E | 木垒县取水样                   | 无色 无味 清澈           |
| FM-07  | 43°44'18.08"N 90°41'17.49"E | 三个泉子公路边                  | 清澈、水塘中有水生植物 水温 21℃ |
| FM-08  | 43°44'51.57"N 91°13'5.06"E  | 省道 303 旁山区路段小溪沟          | 颜色稍浑浊 水温 25℃ 有青苔   |
| FM-09  | 43°43'15.99"N 91°16'50.54"E | 省道 303 298.5 公里处桥边小溪沟    | 清澈含杂质无味、水温 26℃ 有青苔 |
| FM-10  | 43°46'44.16"N 91°34'44.49"E | 省道 303 256km 旁小冲沟        | 水质清澈 无味 周围是石质山地    |
| BH-01  | 43°30'44.10"N 93°19'14.20"E | 巴里坤县江山水电站                | 水质清澈 无味 水温 12℃     |
| BH-02  | 43°32'52.67"N 93°23'43.81"E | 奎苏乡小冲沟                   | 水温 5℃ 无浑浊 无味       |
| BH-03  | 43°32'54.24"N 93°23'44.18"E | 奎苏乡西机井外                  | 水温 6℃ 无色无味         |
| BH-04  | 43°30'37.54"N 93°27'31.12"E | 奎苏乡 2km 东向水沟             | 水温为 11~12℃ 无味 稍浑浊  |
| BH-05  | 43°27'35.80"N 93°28'9.71"E  | 乌沟水库                     | 水质清澈 无味 水温 5℃      |
| BH-06  | 43°19'32.57"N 93°39'59.67"E | 到哈密去的老公路的入口处小冲沟          | 水清澈 无味水温 5℃ 偶见杂质   |
| BH-07  | 43°18'19.83"N 93°48'29.49"E | 寒气沟附近小溪沟                 | 稍浑浊 偶见杂质 水温 14℃    |
| BY-01  | 43°31'33.46"N 93°29'12.66"E | 奎苏镇边                     | 水清澈 水温 7~8℃        |
| BY-02  | 43°14'38.77"N 94°41'11.75"E | 伊吾县小溪沟                   | 水清澈 无味 水温 8~9℃     |
| BY-03  | 43°14'24.69"N 94°38'12.34"E | 伊吾县西边的湿地                 | 水稍浑浊 无味 水温 15℃     |
| BY-04  | 43°15'34.26"N 94°29'28.86"E | 距伊吾县 18km 的机井外           | 水温 6~7℃ 无色无味       |
| BY-05  | 43°19'11.91"N 94°19'38.67"E | 盐池乡 3~4km(距伊吾县城 33km)处小溪 | 清澈无味水温 7℃          |
| BY-06  | 43°19'41.20"N 94°18'03.00"E | 盐池乡东向出口水渠                | 水温 22℃ 含杂质 水质浑浊    |
| BY-07  | 43°24'09.89"N 93°59'49.27"E | 铁日勒尕村 山地中北向沟的小溪          | 稍浑浊 无味 水温 22℃      |
| BY-08  | 43°24'26.79"N 93°43'29.78"E | 鸣沙山公园小冲沟                 | 稍浑浊 无味 水温 20℃      |
| BY-09  | 43°22'07.00"N 93°43'01.24"E | 柳条河小桥                    | 水清澈 无味 温度 21℃      |
| BL-01  | 43°32'51.61"N 92°55'56.71"E | 巴里坤西黑沟风景区                | 水清澈无味 水温 5℃        |
| BKC-01 | 42°27'00.96"N 83°18'23.35"E | 巴音布鲁克到库车的大龙池             | 水温 9℃ 无味 稍浑浊       |
| BKC-02 | 42°26'45.34"N 83°15'33.41"E | 巴音布鲁克到库车过大龙池约 2km 路上     | 水温 10℃ 无味 无浑浊      |

在实验室,选取指示水环境健康状况的 Ni、Cr、Pb、Ni、Cd、Co 等采用石墨炉/火焰原子吸收光谱法测定;Hg 和 As 采用原子荧光光谱法测定.所有的样品均设置 2 个平行样,数据自动读取 3 次取平均值,实验所用化学试剂均为优级,水为超纯水.样品测试结果个别元素低于检测范围时,

其值取为零.

1.3 研究方法

采用相关分析、主成分分析、聚类分析和地统计分析方法,定量描述、比较天山山地地表水环境中重金属赋存特征,识别重金属的来源.采用 Pearson 相关系数来衡量样品中重金属的相关关系.在相关分析基础上,采用主成分分析对天山山地地表水中重金属含量指标进行归纳、评价.采用 spss19.0 软件组间联接(Between-Groups Linkage)进行变量标准化.基本步骤如下:(1)原始数据的预处理.(2)选择初始聚核,归聚.(3)计算各类重心,修正聚核,重新归聚.设 F 为 n 维空间的一个点集,求自然数)( $k \leq n$  及集合  $G_i \subset F, i=1.2.3 \cdots k$ ,使得

$$\begin{cases} \bigcup_{i=1}^k G_i = F \\ G_i G_j = \phi, i \neq j, i, j = 1.2 \cdots k \end{cases}$$

2 结果与讨论

2.1 天山山地地表水重金属特征统计分析

将样品重金属含量测试结果依采样水体:河流干流、河流支流、湖泊、农田灌溉渠道及机井进行分类,主要统计结果见表 2.

重金属描述性统计分析(表 2)表明,Mn、Cu、Zn、Cr、Pb、Ni、Cd、Co、Hg、As,10 重金属分布范围分别是 0.036~1.91μg/L,0.271~11.414μg/L,0~12.568μg/L,0.358~4.598μg/L,0~0.277μg/L,5.375~

91.876μg/L,0~0.282μg/L,0.159~2.546μg/L,0~0.559μg/L 和 0.705~22.672μg/L. 变异系数为 0.451%~811.4%.各采样点之间重金属含量差异较大,样品异常值的出现,反映了天山地表水环境各重金属的离散程度和可能存在的污染源.在所有水样中重金属元素平均浓度顺序为 Ni > As > Cu > Zn> Co > Mn > Hg > Cd > Pb.其中 As、Pb 和 Mn、Cu 分别在样点 BY-07、XN-01 和样点 XN-01、FM-10 出现较高值.原因在于:样品 BY-07 取自铁日勒嘎村的溪流,样品 XN-01 取自灌溉渠道,FM-10 取自省道 303,这些样点都位于人类活动较多的区域,受人类活动影响较大,可能是因为人为污染物汇集,导致样品中重金属元素含量偏高.其中,在人类活动影响较大区域个别样点 Cu、Cd 的最大值、中值、标准差和 Ni、Co 元素的最大值及标准差略低于人类干扰较少区域样点.原因可能是个别样品测试误差,其余样品中重金属浓度的最大值、最小值以及中值和标准差都高于人类活动少的区域.结合样点分析 Cu 和 Ni 浓度较高区域主要来源于样点附近铜矿和镍黄铁矿等;Cd、Co 主要来源于自然环境中铜铅锌矿石和硫钴矿矿物中,Pb、Hg、Zn、Mn 主要来源于工业生产污染金属排放和农业灌溉的化肥农药污染,As、Cr 主要来源于自然状况下岩石和碎屑物质的重金属风化、迁移.

表 2 天山地表水中重金属元素浓度(μg/L)  
Table 2 Descriptive statistics of heavy metals (μg/L)

| 分类   | 项目    | Mn    | Cu    | Zn    | Cr    | Pb    | Ni     | Cd    | Co    | Hg    | As     |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 河流干流 | ZT-06 | 0.173 | 1.050 | 0.659 | 0.849 | 0.000 | 22.621 | 0.016 | 0.589 | 0.203 | 2.709  |
|      | XN-04 | 0.114 | 1.227 | 0.559 | 0.973 | 0.025 | 18.130 | 0.011 | 0.484 | 0.025 | 2.909  |
|      | XN-06 | 0.696 | 1.242 | 1.882 | 0.671 | 0.005 | 27.363 | 0.027 | 0.733 | 0.152 | 7.563  |
|      | ZT-04 | 0.160 | 0.412 | 0.000 | 0.551 | 0.001 | 15.910 | 0.037 | 0.447 | 0.178 | 2.004  |
|      | ZT-02 | 0.122 | 0.691 | 0.340 | 1.022 | 0.003 | 17.658 | 0.053 | 0.461 | 0.127 | 1.649  |
|      | ZT-05 | 1.262 | 0.627 | 2.052 | 0.573 | 0.012 | 15.321 | 0.027 | 0.400 | 0.203 | 11.406 |
|      | BY-09 | 1.317 | 1.132 | 5.397 | 0.823 | 0.001 | 30.967 | 0.128 | 0.873 | 0.051 | 13.78  |
|      | TX-06 | 0.077 | 0.708 | 0.170 | 0.956 | 0.002 | 25.300 | 0.053 | 0.649 | 0.076 | 1.592  |
|      | FM-03 | 0.525 | 0.759 | 0.544 | 0.504 | 0.004 | 13.59  | 0.016 | 0.359 | 0.102 | 1.04   |
|      | 最大值   | 1.317 | 1.242 | 5.397 | 1.022 | 0.025 | 30.967 | 0.128 | 0.873 | 0.203 | 13.78  |
|      | 最小值   | 0.077 | 0.412 | 0.000 | 0.504 | 0.000 | 13.590 | 0.011 | 0.359 | 0.025 | 1.040  |
|      | 平均值   | 0.494 | 0.872 | 1.289 | 0.769 | 0.006 | 20.762 | 0.041 | 0.555 | 0.124 | 4.961  |
|      | 标准差   | 0.498 | 0.297 | 1.700 | 0.199 | 0.008 | 6.051  | 0.036 | 0.170 | 0.065 | 4.767  |
|      | 变异系数  | 0.248 | 0.088 | 2.889 | 0.039 | 6.411 | 36.614 | 0.001 | 0.029 | 0.004 | 22.725 |

续表

| 分类   | 项目     | Mn    | Cu     | Zn     | Cr     | Pb    | Ni      | Cd     | Co    | Hg    | As     |
|------|--------|-------|--------|--------|--------|-------|---------|--------|-------|-------|--------|
| 河流支流 | ZT-03  | 0.063 | 0.271  | 0.085  | 0.692  | 0.002 | 20.241  | 0.000  | 0.524 | 0.102 | 0.705  |
|      | XN-02  | 0.485 | 1.322  | 1.373  | 3.462  | 0.061 | 17.841  | 0.043  | 0.495 | 0.229 | 3.902  |
|      | XN-05  | 1.571 | 0.716  | 0.235  | 0.491  | 0.016 | 9.868   | 0.032  | 0.249 | 0.102 | 1.951  |
|      | FM-02  | 0.394 | 1.007  | 0.809  | 0.498  | 0.005 | 14.308  | 0.011  | 0.403 | 0.102 | 2.286  |
|      | FM-10  | 0.177 | 11.414 | 3.65   | 4.342  | 0.000 | 91.876  | 0.144  | 2.546 | 0.025 | 14.674 |
|      | BY-08  | 0.288 | 1.094  | 1.418  | 0.781  | 0.000 | 28.755  | 0.027  | 0.755 | 0.025 | 3.250  |
|      | BH-06  | 0.214 | 1.512  | 2.457  | 0.732  | 0.000 | 36.852  | 0.037  | 1.039 | 0.025 | 2.903  |
|      | BH-07  | 0.259 | 1.485  | 1.952  | 0.885  | 0.001 | 24.241  | 0.107  | 0.754 | 0.127 | 4.736  |
|      | ZT-07  | 0.274 | 2.675  | 0.609  | 2.350  | 0.000 | 21.706  | 0.064  | 0.701 | 0.000 | 8.245  |
|      | ZT-08  | 0.201 | 1.990  | 0.694  | 1.728  | 0.001 | 31.339  | 0.085  | 0.808 | 0.051 | 2.715  |
|      | XN-03  | 0.173 | 0.715  | 0.205  | 1.597  | 0.029 | 17.114  | 0.053  | 0.485 | 0.076 | 3.967  |
|      | TX-02  | 0.083 | 2.487  | 0.784  | 1.121  | 0.004 | 37.842  | 0.149  | 0.999 | 0.127 | 2.668  |
|      | FM-08  | 0.381 | 7.860  | 1.867  | 1.496  | 0.001 | 26.938  | 0.282  | 0.781 | 0.127 | 13.945 |
|      | FM-09  | 0.401 | 9.616  | 3.885  | 1.580  | 0.001 | 51.654  | 0.219  | 1.404 | 0.025 | 10.319 |
|      | ZT-01  | 0.360 | 1.191  | 0.509  | 0.597  | 0.013 | 12.108  | 0.032  | 0.327 | 0.127 | 1.939  |
|      | ZT-09  | 0.074 | 0.900  | 0.429  | 0.721  | 0.000 | 21.220  | 0.016  | 0.538 | 0.229 | 2.897  |
|      | TX-03  | 1.332 | 0.283  | 4.903  | 0.555  | 0.000 | 5.375   | 0.000  | 0.159 | 0.381 | 11.124 |
|      | XN-05  | 1.571 | 0.716  | 0.235  | 0.491  | 0.016 | 9.868   | 0.032  | 0.249 | 0.102 | 1.951  |
|      | FM-02  | 0.394 | 1.007  | 0.809  | 0.498  | 0.005 | 14.308  | 0.011  | 0.403 | 0.102 | 2.286  |
|      | BH-02  | 0.144 | 0.404  | 1.203  | 1.187  | 0.001 | 15.441  | 0.091  | 0.393 | 0.102 | 3.849  |
|      | BH-04  | 0.177 | 0.602  | 1.313  | 0.463  | 0.000 | 14.955  | 0.032  | 0.418 | 0.051 | 2.280  |
|      | BY-07  | 0.116 | 1.075  | 0.939  | 0.828  | 0.003 | 40.958  | 0.021  | 1.099 | 0.076 | 22.672 |
|      | FM-02  | 0.394 | 1.007  | 0.809  | 0.498  | 0.005 | 14.308  | 0.011  | 0.403 | 0.102 | 2.286  |
|      | BY-02  | 0.090 | 0.877  | 0.569  | 1.115  | 0.002 | 24.012  | 0.037  | 0.672 | 0.051 | 2.380  |
|      | BH-05  | 0.353 | 0.588  | 1.583  | 0.505  | 0.000 | 8.052   | 0.011  | 0.234 | 0.076 | 4.325  |
|      | 最大值    | 1.571 | 11.414 | 4.903  | 4.342  | 0.061 | 91.876  | 0.282  | 2.546 | 0.381 | 22.672 |
|      | 最小值    | 0.063 | 0.271  | 0.085  | 0.463  | 0.000 | 5.375   | 0.000  | 0.159 | 0.000 | 0.705  |
|      | 平均值    | 0.399 | 2.113  | 1.333  | 1.169  | 0.007 | 24.447  | 0.062  | 0.674 | 0.102 | 5.370  |
|      | 标准差    | 0.431 | 2.940  | 1.228  | 0.966  | 0.013 | 18.014  | 0.070  | 0.496 | 0.081 | 5.277  |
|      | 变异系数   | 0.186 | 8.644  | 1.508  | 0.932  | 0.000 | 324.493 | 0.005  | 0.246 | 0.007 | 27.843 |
| 湖泊   | TX-04  | 0.152 | 1.183  | 1.248  | 0.914  | 0.001 | 28.171  | 0.043  | 0.771 | 0.178 | 6.887  |
|      | TX-05  | 0.107 | 0.790  | 0.290  | 0.730  | 0.001 | 20.393  | 0.005  | 0.541 | 0.051 | 2.509  |
|      | FM-07  | 0.161 | 8.469  | 2.272  | 1.425  | 0.000 | 29.693  | 0.080  | 0.907 | 0.000 | 11.248 |
|      | BH-01  | 0.123 | 0.511  | 2.127  | 0.358  | 0.001 | 9.022   | 0.021  | 0.222 | 0.127 | 1.310  |
|      | BH-05  | 0.353 | 0.588  | 1.583  | 0.505  | 0.000 | 8.052   | 0.011  | 0.234 | 0.076 | 4.325  |
|      | BY-03  | 0.115 | 2.323  | 1.623  | 0.725  | 0.004 | 13.390  | 0.069  | 0.394 | 0.152 | 7.193  |
|      | BKC-01 | 0.258 | 0.873  | 2.457  | 1.494  | 0.000 | 46.738  | 0.112  | 1.181 | 0.000 | 1.739  |
|      | BL-01  | 0.341 | 0.791  | 1.558  | 0.469  | 0.000 | 10.466  | 0.101  | 0.293 | 0.102 | 4.495  |
|      | 最大值    | 0.353 | 8.469  | 2.457  | 1.494  | 0.004 | 46.738  | 0.112  | 1.181 | 0.178 | 11.248 |
|      | 最小值    | 0.107 | 0.511  | 0.290  | 0.358  | 0.000 | 8.052   | 0.005  | 0.222 | 0.000 | 1.310  |
|      | 平均值    | 0.201 | 1.941  | 1.645  | 0.8275 | 0.001 | 20.741  | 0.055  | 0.568 | 0.086 | 4.963  |
|      | 标准差    | 0.102 | 2.699  | 0.686  | 0.428  | 0.001 | 13.466  | 0.041  | 0.353 | 0.066 | 3.350  |
|      | 变异系数   | 0.010 | 7.286  | 0.470  | 0.183  | 1.839 | 181.324 | 0.002  | 0.124 | 0.004 | 11.223 |
| 灌溉渠道 | FM-06  | 0.168 | 0.760  | 1.418  | 1.620  | 0.003 | 54.069  | 0.027  | 1.391 | 0.000 | 2.327  |
|      | XN-01  | 1.910 | 2.986  | 12.568 | 2.850  | 0.227 | 10.048  | 0.171  | 0.651 | 0.550 | 15.502 |
|      | BY-06  | 0.632 | 2.899  | 4.858  | 0.871  | 0.002 | 15.478  | 0.037  | 0.470 | 0.076 | 3.379  |
|      | BH-03  | 0.189 | 0.723  | 1.273  | 2.695  | 0.000 | 43.676  | 0.016  | 1.268 | 0.076 | 3.726  |
|      | 最大值    | 1.910 | 2.986  | 12.568 | 2.850  | 0.227 | 54.069  | 0.171  | 1.391 | 0.550 | 15.502 |
|      | 最小值    | 0.168 | 0.723  | 1.273  | 0.871  | 0.000 | 10.048  | 0.016  | 0.470 | 0.000 | 2.327  |
|      | 平均值    | 0.725 | 1.842  | 5.029  | 2.009  | 0.058 | 30.818  | 0.063  | 0.945 | 0.176 | 6.234  |
|      | 标准差    | 0.819 | 1.271  | 5.292  | 0.935  | 0.113 | 21.390  | 0.0734 | 0.453 | 0.252 | 6.208  |
|      | 变异系数   | 0.670 | 1.616  | 28.004 | 0.875  | 0.013 | 457.549 | 0.0051 | 0.205 | 0.064 | 38.534 |

| 续表 |       |       |       |       |       |       |        |       |       |       |       |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 分类 | 项目    | Mn    | Cu    | Zn    | Cr    | Pb    | Ni     | Cd    | Co    | Hg    | As    |
| 机井 | FM-01 | 0.250 | 0.683 | 0.954 | 0.587 | 0.004 | 27.004 | 0.075 | 0.725 | 0.051 | 3.902 |
|    | FM-04 | 0.246 | 0.448 | 0.814 | 4.598 | 0.003 | 26.246 | 0.032 | 0.726 | 0.102 | 3.238 |
|    | FM-05 | 0.17  | 0.613 | 0.704 | 3.314 | 0.002 | 33.502 | 0.027 | 0.939 | 0.051 | 2.897 |
|    | BY-01 | 0.099 | 0.414 | 0.704 | 1.859 | 0.001 | 25.188 | 0.096 | 0.668 | 0.330 | 5.259 |
|    | BY-04 | 0.312 | 1.126 | 1.178 | 1.178 | 0.000 | 42.78  | 0.080 | 1.140 | 0.000 | 2.374 |
|    | 最大值   | 0.312 | 1.126 | 1.178 | 4.598 | 0.004 | 42.78  | 0.096 | 1.140 | 0.330 | 5.259 |
|    | 最小值   | 0.099 | 0.414 | 0.704 | 0.587 | 0.000 | 25.188 | 0.027 | 0.668 | 0.000 | 2.374 |
|    | 平均值   | 0.215 | 0.657 | 0.871 | 2.307 | 0.002 | 7.372  | 0.062 | 0.840 | 0.107 | 3.534 |
|    | 变异系数  | 0.007 | 0.081 | 0.040 | 2.674 | 0.000 | 54.340 | 0.001 | 0.039 | 0.017 | 1.238 |

2.2 相关分析

相关分析表明,样品中重金属之间的相关关系较复杂,其中:Cu、Mn、Hg、Zn、Ni 和其他元素相关性较强(表 3).Cu 和 Ni、Cd、As、Co 在  $P<0.01$  水平上相关系数分别为 0.558、0.668、0.518、0.593,Cu 和 Zn、Cr 在  $P<0.05$  水平上相关系数:为 0.324、0.341 是正相关.结合样点分析,样点 FM-08、FM-10、BY-07 位于省道附近村镇,表明这种相关关系可能与人类活动有关.Mn 和 Hg、Zn、Pb、Cd、As 在  $P<0.01$  水平上相关系数分别为 0.497、0.688、0.557、0.155、0.405.在样点 FM-06 和 FM-10 附近,Mn 和 Hg、Zn、Pb、Cd 浓度都较高,FM-06 位于木垒县县城,样点 FM-10 位于省道 303 旁,表明共同受人类生产、生活的影响.Hg 和 Zn、Pb、Cd、Co 在  $P<0.01$  水平上相关系数为 0.487、0.620、0.041 是正相关,但和 Ni、Co 相关系数为-0.402 是负相关,表明 Hg 和 Ni、Co 的来源不同或者两类间相互抑制.从取样位置来看,Hg 元素浓度较高的样品 XN-01 和 XN-06 取自城镇,受人类生产、生活的影响较大;Ni、Co 较高浓度样点 ZT-06、XN-06 位于伊

吾湿地,人类影响少,二者差异说明其来源不同.Zn 和 Pb、Cd、As 在  $P<0.01$  水平上相关系数为 0.712、0.421、0.545.样点 BY-09 位于阜康市工业园,其 Zn、Pb、Cd 含量高,来源具有一致性,相关关系密切.Pb 和 As 在  $P<0.05$  水平上相关系数为 0.277.在样品 XN-01 和 BY-06 中,Zn 和 Pb、Cd、As 浓度较高,两者均取自灌溉渠道,受人类生产活动影响明显.Ni 和 Cr、Cd、Co 在  $P<0.01$  水平上相关系数分别为 0.528、0.392、0.995.从样点位置来看,FM-10 和 BY-07 受人类活动影响较大.Ni 和 As 在  $P<0.05$  水平上相关系数为 0.294,在 BY-08 样点(伊吾鸣沙山公园),二者浓度都较高,表明二者可能有共同的自然来源.Cr 和 Co 在  $P<0.01$  水平上正相关,样点位于灌溉渠道,表明两种元素可能共同受农业生产活动影响.Cd 和 As、Co 在  $P<0.01$  水平上正相关,样点 BY-03 和 BL-01 位于伊吾湿地和巴里坤西黑沟风景区,共同受环境影响较大.As 和 Co 在  $P<0.05$  水平上呈正相关,样品 FM-10、BY-09 取自柳条河,河流沿岸城镇密集,表明共同受城镇生产、生活的污染物排放的影响,来源具有一致性,元素间相关性较强.

表 3 重金属相关关系矩阵  
Table 3 Correlation matrix of heavy metals

| 重金属 | Cu      | Mn      | Hg       | Zn      | Pb     | Ni       | Cr      | Cd      | As     | Co    |
|-----|---------|---------|----------|---------|--------|----------|---------|---------|--------|-------|
| Cu  | 1.000   |         |          |         |        |          |         |         |        |       |
| Mn  | 0.007   | 1.000   |          |         |        |          |         |         |        |       |
| Hg  | -0.159  | 0.497** | 1.000    |         |        |          |         |         |        |       |
| Zn  | 0.324*  | 0.688** | 0.487**  | 1.000   |        |          |         |         |        |       |
| Pb  | 0.039   | 0.557** | 0.620**  | 0.712** | 1.000  |          |         |         |        |       |
| Ni  | 0.558** | -0.218  | -0.402** | 0.109   | -0.123 | 1.000    |         |         |        |       |
| Cr  | 0.341*  | -0.031  | -0.015   | 0.194   | 0.270  | 0.528**  | 1.000   |         |        |       |
| Cd  | 0.668** | 0.155** | 0.041**  | 0.421** | 0.228  | 0.392**  | 0.241   | 1.000   |        |       |
| As  | 0.518** | 0.405** | 0.223    | 0.545** | 0.277* | 0.294*   | 0.199   | 0.440** | 1.000  |       |
| Co  | 0.593** | -0.208  | -0.402** | 0.131   | -0.114 | 0+.995** | 0.550** | 0.411** | 0.325* | 1.000 |

注:\*\*表示在0.01的水平上显著;\*表示在0.05的水平上显著

2.3 主成分分析

主成分分析提取出 3 个主成分,累计解释了总因子的 36.852%,67.847%,和 77.927%(图 2),累计贡献率达到 77.927%.对于影响因素复杂的天山山地地表水环境,3 个主成分揭示了可能存在的 3 种来源.同时这 3 种因子的变异系数分别达 77.7%、45.1%和 363.33%,说明其变化情况复杂,差别较大,在自然状况下含量较低,在污染源附近含量极高.在第 1 主成分上 Cu、Ni、Cr、Cd、As、Co 和 Cr 都具有较大的正载荷,相关样品大多取于河流和城镇,表明可能共同受人类生产、生活排放的污染物和和流水运输的河流底部母岩矿物.第 2 主成分上,Mn、Hg、Zn、Pb 相关样品大多取自风景区及山间小溪,这些区域人类活动较少,自然环境好,其重金属元素可能来自来源于河流沿岸自然风化的碎屑矿物和底部母岩矿物.第 3 主成分中,Hg、Pb、Cr 相关样品取自巴里坤湖和阜康市重工业园区及国道附近,样品中高浓度的 Hg、Pb 等重金属来源于阜康市重工业园区的污染工厂及国道的汽车尾气排放沉淀的含铅污染物.Pb、Hg、Cr 元素在 2 个以上主成分中都有正载荷量,这说明这两种元素来源比较复杂,可能受人类活动和地质环境元素迁移共同影响.

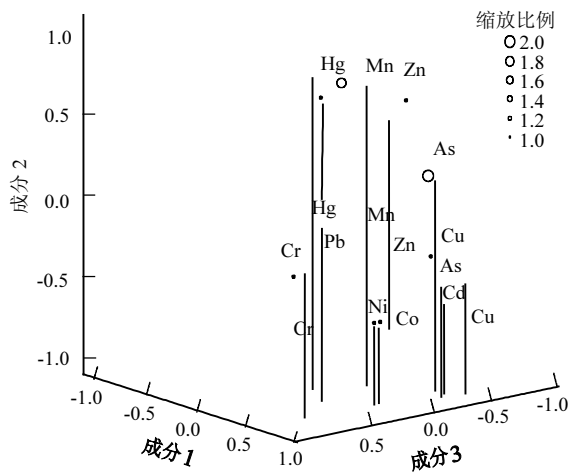


图2 主成分因子载荷  
Fig.2 Principal component factor Scatter

2.4 聚类分析

采用 spss19.0 软件,以平方欧氏距离(Squared

Euclidean distance)2 为组间距离标准,对 51 个样品 10 种重金属含量值做聚类分析,结果见图 3,可见,天山山地地表水重金属元素受共同因素影响重金属元素之间具有聚合性,样品中总重金属综合分为 4 类:其中 Co、Ni、Cr 为一类,Cd、Cu、As 为一类,Pb、Zn、Mn 为一类,Hg 单独为一类.结合样点分析其来源单独受某一种控制,如 Zn 和 Pb 主要受样点附近铅锌矿开采导致的重金属元素浓度增加;Co 和 Ni 主要来源于河流沿岸碎屑物质和河流底母岩重金属迁移.另外,人类活动密集地区的城镇、道路和农田排渠中附近样点重金属聚类距离大大短于山地溪流及河流、小溪等,表明人类活动影响较大的城镇和道路附近由于工农业生产的污染物排放和道路附近含铅汽油污染,各种金属元素浓度受其影响大.自然状况较好的区域高浓度重金属主要来源于沿岸及河流底部含高浓度的重金属元素的碎屑和母岩.

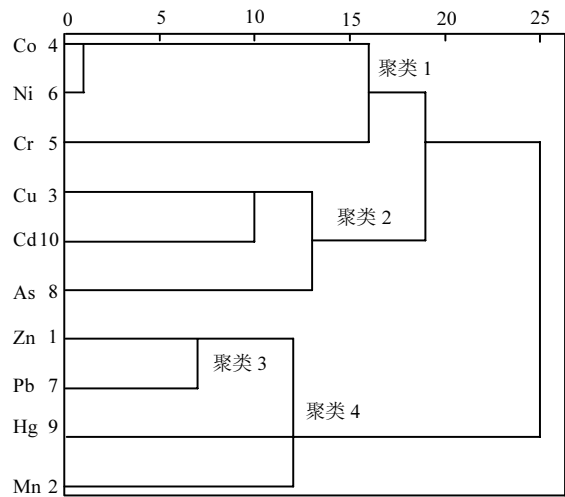


图3 重金属组间聚类分析  
Fig.3 Heavy metal group cluster analysis tree

总体上看,天山山地水环境重金属浓度值明显低于国外莱茵河、洛杉矶湾以及我国东部地区红枫湖、洞庭湖、淀山湖、镜泊湖以及长江下游地区等河流、湖泊重金属浓度,原因在于天山山地区域相对受人类活动影响较少,水体的自然状况较好.但近年来,随着天山经济带经济活动增加,人类活动强度的增大,已经对天山水环境重金属

元素平衡产生了影响甚至造成了重金属污染。

### 3 结 论

3.1 51 个水样重金属元素赋存特征分析表明,所有水样中重金属浓度的平均顺序为:  $\text{Ni} > \text{As} > \text{Cu} > \text{Zn} > \text{Co} > \text{Mn} > \text{Hg} > \text{Cd} > \text{Pb}$ 。不同类型取样点重金属浓度特征为:灌溉渠道>河流支流>河流干流>湖泊>机井。人类生产活动对污染性重金属元素富集具有重要作用,受人类活动影响大的样点重金属浓度范围、中值、标准差等统计特征大大高于自然区域。

3.2 天山山地地表水中相关关系较强的重金属元素来源往往具有一致性:受人类活动或自然环境影响差异明显。个别重金属元素间呈负相关主要原因在于其来源不同。主成分分析的 3 种元素的变异系数分别达 77.7%、45.1%和 363.33%,说明其变化情况复杂,在自然背景下含量低,在污染源附近含量高。3 个主成分因子受人类活动和自然因素共同影响。

3.3 天山山地地表水重金属元素受共同因素影响重金属元素之间具有聚合性,样品中总重金属综合分为 4 类:其中 Co、Ni、Cr 为一类,Cd、Cu、As 为一类,Pb、Zn、Mn 为一类,Hg 单独为一类。结合样点分析其来源单独受某一种控制,如 Zn 和 Pb 主要受样点附近铅锌矿开采导致的重金属元素浓度增加;Co、Ni 和 Ni 主要来源于河流沿岸碎屑物质和河流底母岩重金属迁移。Pb、Hg、Cr 元素来源较复杂,同时受人类活动和自然因素共同作用影响。

### 参考文献:

- [1] 朱映川,刘 雯,周逸品,等.水体重金属污染现状及其治理方法研究进展 [J]. 广东农业科学, 2008,3(8):48-52.
- [2] 田林锋,胡继伟,秦樊鑫,等.重金属元素在贵州红枫湖水体中的分布特征 [J]. 中国环境科学, 2011,31(3):481-489.
- [3] 张鸿龄,孙丽娜,罗 庆,等.浑河流域水体污染的季节性变化及来源 [J]. 生态学杂志, 2011,30(1):119-125.
- [4] 卢少勇,焦 伟,金相灿,等.滇池内湖滨带沉积物中重金属形态分析 [J]. 中国环境科学, 2010,30(4):487-492.
- [5] 李 梁,胡小贞,刘娉婷,等.滇池外海底泥重金属污染分布特征及风险评价 [J]. 中国环境科学, 2010,30(z1):46-51.
- [6] 陈春霄,姜 霞,战玉柱,等.太湖表层沉积物中重金属形态分布及其潜在生态风险分析 [J]. 中国环境科学, 2011,31(11):1842-1848.
- [7] 田林锋,胡继伟,秦樊鑫,等.基于统计的百花湖表层水中重金属分布特征 [J]. 环境科学研究, 2011,24(3):259-267.
- [8] Kar D, Sur P, Mandal S K. Assessment of heavy metal pollution in surface water [J]. International Journal of Environmental Science and Technology, 2008,5(1):36-45.
- [9] 黎 涛,杨俊仓.重金属在干旱内陆盆地浅层地下水中的迁移特征——以石羊河流域昌宁盆地为例 [J]. 冰川冻土, 2008,30(1):52-56.
- [10] 李梅英,徐俊荣,刘志兴,等.新疆巩乃斯河水中微量重金属元素的特征分析 [J]. 水资源保护, 2009,25(5):44-48.
- [11] 李新贤,党新成,高建芳,等.新疆河流洪水水污染分析 [J]. 干旱环境监测, 2003,17(3):139-142.
- [12] 孙振军.青格达湖北段底泥中重金属分布规律研究 [J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2010,27(3):363-367.
- [13] 付树卿,刘南列.玛纳斯河水质调查评价 [J]. 吉林水利, 2010, (8):4-6.
- [14] 王 钢,王 灵,郑春霞,等.乌鲁木齐乌拉泊水库水体中重金属健康风险评价 [J]. 干旱环境监测, 2010,24(1):22-26,30.
- [15] 李梅英,徐俊荣,史志文,等.浅析新疆巩乃斯河重金属时空分异特征 [J]. 环境化学, 2009,28(5):716-720.
- [16] Atsuko Amano. Effects of environmental regulations on heavy metal pollution decline in core sediments from Manila Bay [J]. Marine Pollution Bulletin, 2010,60(5):780-785.
- [17] Nasrullah Idris, Kiichiro Kagawa, Fujio Sakan, et al. Analysis of heavy metal pollution in soil using transversely excited atmospheric  $\text{CO}_2$  laser-induced plasma by trapping the soil in microstructured holes on metal subtargets [J]. Applied Spectroscopy, 2007,61(12):1344-1351.
- [18] Gaudry A, Zeroual S, Gaie-levelle F, et al. Heavy metals pollution of the Atlantic marine environment by the moroccan phosphate industry, as observed through their bioaccumulation in ulva lactuca [J]. Water, Air, and Soil Pollution, 2007,178(1-4):267-285.
- [19] Song Yinxian, Ji Junfeng, Mao C, et al. Heavy metal contamination in suspended solids of Changjiang River-environmental implications [J]. Geoderma, 2010,159(3/4):286-295.
- [20] 刘文新,李向东.深圳湾水域中重金属在不同相间的分布特征 [J]. 环境科学学报, 2002,22(3):305-309.
- [21] 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, 2009,22(1):60-65.

**作者简介:** 张兆永(1985-),男,山东临沂人,中国科学院新疆生态与地理研究所博士研究生,主要从事环境演变与生态安全方面的研究。发表论文 3 篇。