

DOI: 10. 20040/j. cnki. 1000-7709. 2023. 20220722

# 变化水文条件下高原河流微量元素的分布及溯源

蒋超<sup>a</sup>, 燕文明<sup>b</sup>, 何翔宇<sup>a</sup>, 王小林<sup>a</sup>, 宋勇锋<sup>a</sup>, 吴斌<sup>a</sup>, 田玢<sup>a</sup>, 刘天杨<sup>a</sup>

(河海大学 a. 水文水资源学院; b. 水文水资源与水利工程科学国家重点实验室, 江苏南京 210098)

**摘要:** 为研究高原河流水体中砷(As 75)等微量元素之间的关联性与分布特征,于2021年7月(丰水期)和2021年11月(枯水期)对雅鲁藏布江的重要支流雅砻河水体开展微量元素调查分析。基于相关性分析、聚类分析及主成分分析等数理统计手段探究水体中的砷75(As 75)、硼11(B 11)、铁(Fe 57)、锶88(Sr 88)、锡118(Sn 118)、锂7(Li 7)、钒51(V 51)、钴59(Co 59)、镍60(Ni 60)、铜63(Cu 63)、锌66(Zn 66)、硒82(Se 82)、钼98(Mo 98)、铅208(Pb 208)等元素间的关系。结果表明,各元素之间在丰水期和枯水期差异显著,可分为丰水期和枯水期含量均较为稳定的元素(Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66)、季节性变化明显的元素(Sr 88、V 51、Mo 98、Li 7、Se 82、As 75、B 11、Pb 208)、与其他元素联系较少的元素(Sn 118)三类。此外,雅砻河流域水体大部分的微量元素均与 Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66 存在一定相关性。研究结果可为了解流域内水环境变化及后续环境保护提供依据。

**关键词:** 雅砻河; 微量元素; 丰水期; 枯水期; 溯源

**中图分类号:** X522; TV11

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1000-7709(2023)01-0055-04

## 1 概况

雅砻河流域(图1)位于西藏自治区中南部的山南地区,发源于乃东区、措美县、琼结县三县交界处的雅拉香布雪山,在泽当镇汇入雅鲁藏布江。雅砻河全长68 km,位于雅鲁藏布江中游河谷区,流域面积 $920 \times 10^4 \text{ m}^2$ ,高程范围为3 500~6 400 m之间<sup>[1]</sup>。该流域被大面积冰川覆盖,地表渗透能力较强,地下水补给多来源于降水与冰雪融水;

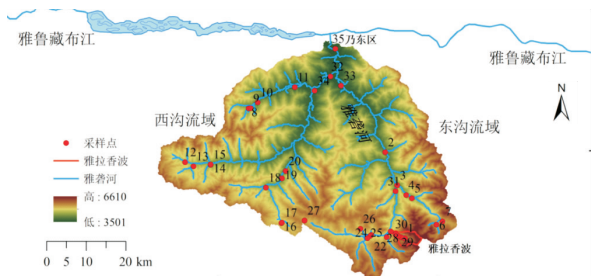


图1 研究区位置与采样点分布图

Fig. 1 Distribution map of study area location and sampling points

该流域南亚季风气候区中的南亚Ⅵ型气候区,为半干旱地区;降水受季风影响,降水量约占全年降水的85%<sup>[2]</sup>。雅砻河作为雅鲁藏布江流域的重要支流,在青藏高原中小河流中具有典型性<sup>[3]</sup>。雅砻河是藏文化最为重要的发源地和弘扬地之一,是西藏乃至全国重要的以水电为重点的清洁能源供给基地。研究雅砻河流域的微量元素分布特征有着重要意义。本文基于聚类分析(CA)<sup>[4,5]</sup>、主成分分析法(PCA)<sup>[2,6]</sup>探究雅砻河水体微量元素的区域分类特征,旨在理清雅砻河丰水期与枯水期水体各微量元素间聚类与关联,揭示微量元素间的相互关系。

## 2 材料与方法

### 2.1 样品采集与分析

结合雅砻河干支流分布特征,在雅砻河流域布设35个采样点(图1)。2021年7、11月使用3 L的采水器采集雅砻河水装于100 mL塑料瓶

收稿日期: 2022-04-12, 修回日期: 2022-05-15

基金项目: 中科院“西部之光”项目(E129030101);国家自然科学基金项目(41971047);江苏省高等学校大学生创新创业训练计划项目(202110294178Y);水文水资源与水利工程科学国家重点实验室“一带一路”水与可持续发展科技基金项目(2020491811)

作者简介: 蒋超(2001-),男,研究方向为水环境保护与生态修复,E-mail:1901010225@hhu.edu.cn

通讯作者: 燕文明(1982-),女,高级实验师,研究方向为水环境保护与生态修复,E-mail:ywm0815@163.com

中,并加入 3% 的 HNO<sub>3</sub> 固定。应用 ICP-MS (NEXION350 X,PerkinElmer,美国)测定水样中的 14 种微量元素(As 75、B 11、Fe 57、Sr 88、Sn 118、Li 7、V 51、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66、Se 82、Mo 98、Pb 208)。

### 2.2 数据处理与分析

利用主成分分析(PCA)与聚类分析(CA)统计丰水期和枯水期各元素之间的差异性。采用 Excel 处理表格,采用 Origin 2019 软件分析绘制图件。

## 3 结果与讨论

### 3.1 雅砻河微量元素的分布特征

雅砻河丰水期和枯水期微量元素的分布情况见图 2。由图 2 可知,雅砻河水体中的 B 11、Fe 57、Sr 88、Li 7、Mn、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66

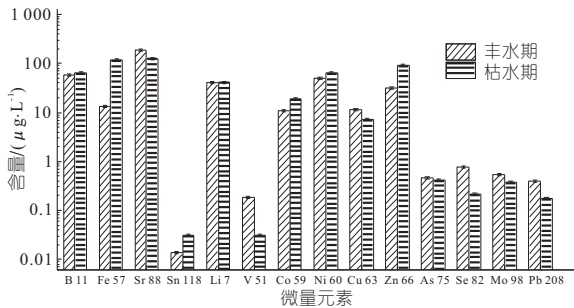


图 2 丰水期与枯水期雅砻河 14 种微量元素平均浓度

Fig. 2 Average concentrations of 14 trace elements in Yalong River during wet and dry seasons

等元素在丰水期和枯水期差异较大。雅砻河的主要微量元素(平均浓度>10 μg/L)为 B 11、Fe 57、Sr 88、Li 7、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66,中等微量元素(平均浓度 10~0.1 μg/L)<sup>[7]</sup>为 V 51、As 75、Se 82、Mo 98、Pb 208,低微量元素(平均浓度<0.1 μg/L)<sup>[7]</sup>为 Sn 118。丰水期不同元素含量的优势顺序为 Sn 118<V 51<Pb 208<As 75<Mo 98<Se 82<Co 59<Cu 63<Fe 57<Zn 66<Li 7<Ni 60<B 11<Sr 88。枯水期不同元素含量的优势顺序为 Sn 118<V 51<Pb 208<Se 82<Mo 98<As 75<Cu 63<Co 59<Li 7<Ni 60<B 11<Zn 66<Fe 57<Sr 88。通过对比丰水期与枯水期微量元素平均浓度发现 Fe 57、Zn 66、B 11、Sn 118、Li 7、Co 59、Ni 60 枯水期含量排序位次提升,同时 Fe 57(丰水期 13.07 μg/L,枯水期 116.86 μg/L)、Zn 66(丰水期 32.14 μg/L,枯水期 91.98 μg/L)枯水期含量排序位次显著提高;Sr 88、V 51、Cu 63、As 75、Se 82、Mo 98、Pb 208 在枯水期时含量排序位次降低。

### 3.2 雅砻河微量元素的聚类分析

雅砻河丰水期与枯水期微量元素的聚类分析结果表明,14 种元素可分三个簇,详见图 3。其

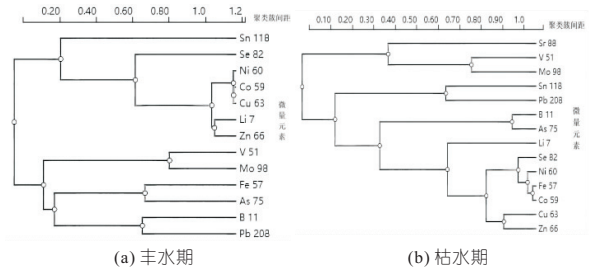


图 3 雅砻河 14 种微量元素层次聚类分析

Fig. 3 Hierarchical cluster analysis of 14 trace elements in Yalong River

中,丰水期第一簇元素有 Sn 118、Se 82、Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66,第二簇元素有 Sr 88、V 51、Mo 98,第三簇元素有 Fe 57、As 75、B 11、Pb 208;枯水期的第一簇元素为 Sr 88、V 51、Mo 98;第二簇元素为 Sn 118、Pb 208;第三簇元素为 B 11、As 75、Li 7、Se 82、Ni 60、Fe 57、Co 59、Cu 63、Zn 66。对比丰水期与枯水期微量元素分类发现,在两个不同时期被聚类到同一簇的元素有三组:①Sr 88、V 51、Mo 98;②Fe 57、As 75、B 11;③Se 82、Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66。说明这些组合的来源具有较高的相似性,也许是受到相同的因素影响,其来源方式也会有相似之处。Fe 57、As 75、B 11 组合中各元素的含量会随着丰、枯水季而发生变化,可能来自雅鲁藏布江流域特殊的地热系统或沉积物的释放<sup>[8]</sup>。孟俊伦<sup>[9]</sup>通过二元混合模型计算得出雅鲁藏布江流域温泉为 Li 7 的主要来源,同时 Li 7 与 Se 82、Ni 60、Co 59、Cu 63、Zn 66 被聚类到同一簇,而 Cu 63、Zn 66 又可能与地区地质条件、矿产资源开采等人为因素有关,故该六种元素可能也是受到温泉补给影响,也与丰富金属矿产资源有关。虽然该组看似与 Fe 57、As 75、B 11 三种元素来源相同,但在丰水期时受到季节、水量、流速等自然因素影响或人为因素影响下与 Fe 57、As 75、B 11 被聚类到不同种类,其更深层次的来源应该有所区别。Sr 88、V 51、Mo 98 可归因于地质、岩性等来源<sup>[10]</sup>。而在丰水期和枯水期聚类差异较大的 Sn 118、Pb 208 两种元素,其含量可能受到季节、流量、人类活动等因素的影响<sup>[10]</sup>。

### 3.3 主成分分析

通过对雅砻河的 14 种微量元素进行 Kaiser-Meyer-Olkin(KMO)检验与巴特利特球形检验,丰水期和枯水期的 KMO 统计量分别为 0.707、

0.688, 巴特利特球形检验的统计量分别为 496、641, 结果表明丰水期与枯水期均适合进行主成分分析。根据所计算的丰水期与枯水期方差解释率, 特征根大于 1 时的四个主成分分别可以解释总方差的 81.3%、88.9%。丰水期主成分 1 解释了总方差的 44.7%, 由 Li 7、V 51、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66、Mo 98、Sr 88 组成, 其中 Li 7、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66 有强的正载荷, V 51、Mo 98、Sr 88 有中等强度的负载荷, 可能与人类因素如尾气排放或自然粉尘有关<sup>[11]</sup>; 主成分 2 解释了总方差的 15.2%, 由 Fe 57、Pb 208、Se 82 组成, 有中等正载荷, 可能是受到人类活动如矿山开采或自然活动等一系列混合来源影响<sup>[9、10]</sup>; 主成分 3 解释了总方差的 11.9%, 由 B 11、Fe 57、As 75 组成, 其中 B 11 有中等负载荷, Fe 57、As 75 有中等正载荷, 可能与地热系统、水深层循环及其特殊的土壤岩石条件有关<sup>[12]</sup>; 主成分 4 解释了总方差的 9.6%, 只含 Sn 118 元素有强的负载荷, 与人类工业生产活动有关。枯水期主成分 1 解释了总方差的 44.7% 由 Li 7、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66、Fe 57、Se 82 组成; 主成分 2 解释了总方差的 20.7%, 由 B 11、As 75、Pb 208、V 51 组成; 主成分 3 解释了总方差的 12.4%, 由 Pb 208、Sn 118 组成有较强正载荷; 主成分 4 解释了总方差的 11.2%, 由 Mo 98、Sr 88、Sn 118 组成有较强正载荷。对比丰水期与枯水期主成分分析结果, 只有 Li 7、Co 59、Ni 60、Cu 63、Zn 66 与 B 11、As 75 两组微量元素同时在丰水期与枯水期中被分在同一主成分, 说明各组元素在来源上有着各自较强的关联性。而其他微量元素在丰水期和枯水期的差异较大。丰、枯水期 14 种微量元素载荷系数见表 1。

表 1 丰、枯水期 14 种微量元素载荷系数

Tab. 1 Load coefficient of 14 trace elements in wet and dry seasons

元素	丰水期				枯水期			
	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4	主成分 1	主成分 2	主成分 3	主成分 4
As 75	-0.415	0.480	<b>0.525</b>	0.452	0.344	<b>0.811</b>	0.209	-0.290
B 11	-0.213	0.440	<b>-0.676</b>	0.246	0.296	<b>0.796</b>	0.278	-0.347
Co 59	<b>0.957</b>	-0.109	0.017	0.095	<b>0.955</b>	0.111	-0.133	0.189
Cu 63	<b>0.977</b>	-0.100	0.043	0.041	<b>0.865</b>	-0.332	0.181	-0.033
Fe 57	0.270	<b>0.503</b>	<b>0.718</b>	0.080	<b>0.899</b>	0.199	-0.197	0.231
Li 7	<b>0.916</b>	0.071	-0.232	0.130	<b>0.741</b>	0.046	0.364	-0.389
Mo 98	<b>-0.622</b>	-0.489	0.007	0.239	-0.420	0.490	0.246	<b>0.607</b>
Ni 60	<b>0.978</b>	-0.104	-0.029	0.081	<b>0.979</b>	0.013	-0.085	0.134
Pb 208	-0.045	<b>0.607</b>	-0.471	0.336	0.381	<b>-0.526</b>	<b>0.671</b>	0.175
Se 82	0.406	<b>-0.680</b>	0.087	0.371	<b>0.863</b>	0.240	-0.195	0.257
Sn 118	0.163	0.260	0.147	<b>-0.750</b>	-0.075	-0.268	<b>0.662</b>	<b>0.544</b>
Sr 88	<b>-0.609</b>	-0.372	-0.246	-0.294	-0.032	0.475	-0.403	<b>0.576</b>
V 51	<b>-0.719</b>	-0.342	0.226	0.276	-0.338	<b>0.740</b>	0.484	0.084
Zn 66	<b>0.911</b>	-0.131	0	0.049	<b>0.939</b>	-0.122	0.025	0.058

### 3.4 微量元素的空间分布特征

雅砻河丰水期与枯水期微量元素的主成分分析和聚类分析结果表明, 主成分分析的稳定性弱于聚类分析的稳定性。因此, 基于聚类分析的结果研究雅砻河丰水期与枯水期微量元素空间分布特征, 主要是聚类到同一簇的三组元素 (Sr 88、V 51、Mo 98、Fe 57、As 75、B 11、Se 82、Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66)。对此三组微量元素的浓度进行归一化处理, 作出微量元素空间变化图 (图 4)。由图 4 可知, 丰、枯水期各采样点 As 75 和 B 11 的变化趋势相似。而丰、枯水期各采样点的 Fe 57 含量较低, 丰、枯水期 Fe 57 的最大值出现在不同采样点。对于 As 75 与 B 11, 丰水期时基本毫无相关性、枯水期高度相关, 则在丰水期时其来源或运输机理差异明显。Fe 57 只与 As 75 低度相关, 但又只在枯水期时与 Se 82、Ni 60、Co 59、Cu 63、Li 7、Zn 66 均具有较好的相关性, 所以 Fe 57 是一种季节性浓度变化元素。

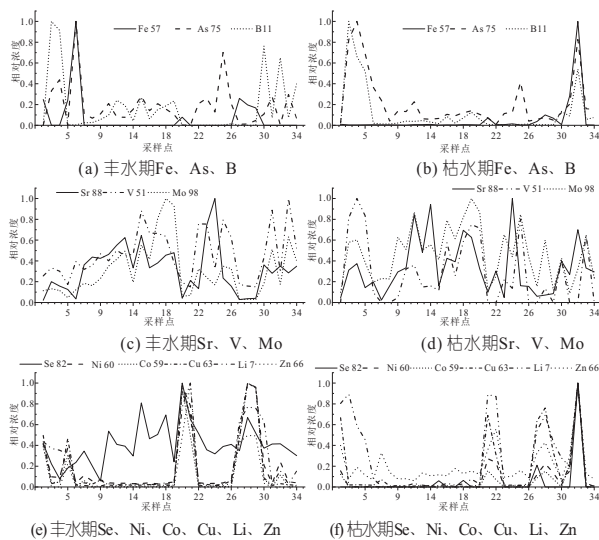


图 4 丰水期、枯水期聚类分析稳定分类元素空间分布  
Fig. 4 Spatial distribution of stable classification elements by cluster analysis in wet and dry seasons

在聚类分析中, Sr 88、V 51、Mo 98 三种微量元素在丰、枯水期均在同一簇中; 丰水期主成分分析时结果一致, 但到枯水期只有 V 51、Mo 98 为同一主成分。同时 Sr 88 与其他两种元素在丰、枯水期相关系数 (图 5) 均较低 (丰水期分别为 0.33、0.44, 枯水期分别为 0.18、0.44)。因此, Sr 88 与 V 51、Mo 98 的空间分布存在一定差异性。这可能是因为在丰、枯水期 # 6、# 22、# 23、# 24、# 25、# 31、# 32、# 33、# 34 采样点中 Sr 88 变化趋势与 V 51、Mo 98 的变化趋势差异很大 (图 4(c)、(d)), 而此部分区间的 Sr 88、V 51、Mo 98 浓度变化影响了整体主成分计算结果, 这一特定区间的



- [3] 刘伟, 王梦雨, 刘昕晔, 等. 1972~2017 年河北省夏季降水的时空变化特征[J]. 水电能源科学, 2021, 39(10):10-13,5.
- [4] 俞小鼎, 郑永光. 中国当代强对流天气研究与业务进展[J]. 气象学报, 2020, 78(3): 391-418.
- [5] 郝晓丽, 李妍敏, 刘舒. 北京市方庄区域暴雨积水模拟研究[J]. 水电能源科学, 2021, 39(6):60-63,115.
- [6] PAN HE, CHEN GUIXING. Diurnal variations of precipitation over North China regulated by the mountain plains solenoid and boundary-layer inertial oscillation[J]. Adv. atmos. sci., 2019, 36(8): 863-884.
- [7] YUANWEIHUA, SUN WEI, CHEN HAOMING, et al. Topographic effects on spatiotemporal variations of short-duration rainfall events in warm season of central North China[J]. J. geophys. res. atmos., 2014, 119(19): 223-234.
- [8] 沈艳, 潘畅, 宇婧婧, 等. 中国区域小时降水量融合产品的质量评估[J]. 大气科学学报, 2013, 36(1): 37-46.

## Comparison and Analysis of Hourly Precipitation in Warm Season over North China

WANG Qing-yu<sup>1</sup>, LI Yan<sup>1</sup>, LI Guo-cui<sup>2</sup>

(1. Key Laboratory of Meteorological Disaster, Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044, China; 2. Shijiazhuang Meteorological Bureau, Shijiazhuang 050081, China)

**Abstract:** Using the daily meteorological dataset of basic meteorological elements of China National Surface Weather Station (V3.0) as a control, the reproducibility of the spatial and temporal distribution characteristics of hourly precipitation in North China during the warm season (June-September) by the China Hourly Merged Precipitation Analysis (CHMPA) and the CPC MORPHing technique (CMORPH) were compared and analyzed. The hourly precipitation and daily variation characteristics of the warm season in North China were further investigated. Results show that the spatial and temporal distribution of precipitation in CHMPA and CMORPH during 2008-2018 is basically consistent with the observation, the estimation of precipitation by CHMPA is generally smaller than the observation, while CMORPH is larger than the observation. The CHMPA data has high spatial resolution and little difference with the actual observation, which is more conducive to the diagnosis analysis of strong convective weather. The overall warm season hourly precipitation in North China is characterized by more precipitation in the southeast and less in the northwest, with normal rain mostly occurring in the plateau area and flash heavy rain mostly occurring in the transition area between the plateau and the plain and the plain area. The warm season precipitation in North China has obvious daily variation characteristics. The large value of precipitation center appears in the afternoon near the mountains, then gradually moves southeast and causes large precipitation in the western part of the North China Plain at night, and the precipitation center reaches the central part of the plain in the early morning of the next day. The precipitation gradually weakened in North China from early morning to noon the next day. The peak of precipitation and precipitation frequency occurs mostly from midday to late afternoon in the plateau area and from midnight to early morning in the plain area. The results provide a theoretical reference for precipitation research and forecast in North China.

**Key words:** North China; hourly precipitation; CHMPA; CMORPH

\*\*\*\*\*  
(上接第 58 页)

## Distribution Characteristics and Source Analysis of Trace Elements in Plateau Rivers Under Variable Hydrological Conditions

JIANG Chao<sup>a</sup>, YAN Wen-ming<sup>b</sup>, HE Xiang-yu<sup>a</sup>, WANG Xiao-lin<sup>a</sup>, SONG Yong-feng<sup>a</sup>,  
WU Bin<sup>a</sup>, TIAN Bin<sup>a</sup>, LIU Tian-yang<sup>a</sup>

(a. College of Hydrology and Water Resources; b. State Key Laboratory of Hydrology-Water Resources and Hydraulic Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China)

**Abstract:** In order to study the correlation and distribution characteristics of arsenic (As 75) and other trace elements in the water of plateau rivers, the trace elements in the water of Yalong River in July 2021 (wet season) and November 2021 (dry season), an important tributary of the Yarlung Zangbo River, were investigated and analyzed. Based on correlation analysis, cluster analysis and principal component analysis, the relationships among arsenic 75 (As 75), boron 11 (B 11), iron (Fe 57), strontium 88 (Sr 88), tin 118 (Sn 118), lithium 7 (Li 7), vanadium 51 (V 51), cobalt 59 (Co 59), nickel 60 (Ni 60), copper 63 (Cu 63), zinc 66 (Zn 66), selenium 82 (Se 82), molybdenum 98 (Mo 98) and lead 208 (Pb 208) in water were explored. The results show that there are significant differences among the elements in wet season and dry season, which can be divided into three categories: The elements with stable contents in wet season and dry season (Ni 60, Co 59, Cu 63, Li 7, Zn 66); The elements with obvious seasonal variation (Sr 88, V 51, Mo 98, Li 7, Se 82, As 75, B 11, Pb 208); Elements less associated with other elements (Sn 118). In addition, most of the trace elements in the Yalong River Basin are related to Ni 60, Co 59, Cu 63, Li 7 and Zn 66. The study can provide scientific basis for understanding the changes of water environment in the basin and subsequent environmental protection.

**Key words:** Yalong River; trace elements; wet season; dry season; sources analysis