金沙江云南段不同地貌条件下地表径流水源水金 属元素分布特征研究

施凤宁,李睿淼*

云南省水文水资源局,云南 昆明

收稿日期: 2025年3月18日; 录用日期: 2025年3月27日; 发布日期: 2025年4月28日

摘要

为揭示金沙江云南段不同地貌区地表径流形成过程中金属元素的含量及空间分异规律,本研究基于深切割高山、 红岩丘原、岩溶高原等6种地貌类型,选取7条金沙江一级支流布设18个河流源头水监测点和6个降雨水质监测 点,于2022~2024年开展3次66项金属元素的连续监测,共采集144个水质样本。结合热图聚类、克鲁斯卡尔 -沃利斯(Kruskal-Wallis)检验及斯皮尔曼(Spearman)相关性分析,解析数据特征。结果显示:66种目标金属 元素中,42种被检出,其中钙(Ca)、镁(Mg)、钠(Na)等12种元素普遍存在(检出率100%),砷(As)、镉(Cd)、 铅(Pb)在红岩丘原与混合丘原显著富集(As最高0.018 mg/L,Cd最高0.00018 mg/L)。热图分析表明:混合丘 原为高浓度元素聚集区(Ca均值33.67 mg/L,Mg均值13.77 mg/L),深切割高山与岩溶高原为低浓度自然背景 区(Ca均值11.67~16.43 mg/L)。金属元素分布受地貌类型与人类活动共同驱动,岩溶区As、Cd风险突出,混合 丘原Zn、Pb受人为活动显著影响。建议构建"地貌-元素"响应模型,开展溶出机制研究,实施分区管控策略。

关键词

金沙江,地表径流,金属元素,空间分异,地貌响应

Study on the Distribution Characteristics of Metal Elements in Surface Runoff Source Water under Different Geomorphological Conditions in the Yunnan Section of the Jinsha River

Fengning Shi, Ruimiao Li*

Yunnan Provincial Bureau of Hydrology and Water Resources, Kunming Yunnan

作者简介:李睿淼,女,工程师,主要从事水质水生态监测评价。 *通讯作者 Email: 176501420@qq.com Received: Mar. 18th, 2025; accepted: Mar. 27th, 2025; published: Apr. 28th, 2025

Abstract

To reveal the content and spatial differentiation patterns of metal elements during the formation of surface runoff in different geomorphological regions of the Yunnan section of the Jinsha River, this study selected 7 first-order tributaries of the Jinsha River across six geomorphological types, including deeply incised high mountains, red rock hill-plateau, and karst plateau, and established 18 river source water monitoring points and 6 rainfall water quality monitoring points. From 2022 to 2024, three rounds of continuous monitoring for 66 metal elements were conducted, yielding 144 water quality samples. Data characteristics were analyzed using heatmap clustering, Kruskal-Wallis tests, and Spearman correlation analysis. The results showed that 42 out of 66 target metal elements were detected, with 12 elements—calcium (Ca), magnesium (Mg), sodium (Na), etc.—being universally present (100% detection rate). Arsenic (As), cadmium (Cd), and lead (Pb) were significantly enriched in the red rock hill-plateau and mixed hill-plateau regions (maximum As: 0.018 mg/L; Cd: 0.00018 mg/L). Heatmap analysis indicated that the mixed hillplateau was a high-concentration aggregation zone for elements (mean Ca: 33.67 mg/L; Mg: 13.77 mg/L), while deeply incised high mountains and karst plateaus served as low-concentration natural background areas (mean Ca: 11.67~16.43 mg/L). The distribution of metal elements was jointly driven by geomorphological types and human activities, with karst regions showing prominent risks of As and Cd, and Zn and Pb in mixed hill-plateau areas being significantly influenced by anthropogenic activities. The study recommends constructing a "geomorphology-element" response model, investigating dissolution mechanisms, and implementing zoned control strategies.

Keywords

Jinsha River, Surface Runoff, Metal Elements, Spatial Differentiation, Geomorphological Response

Copyright © 2025 by author(s) and Wuhan University & Bureau of Hydrology, Changjiang Water Resources Commission. This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0). http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/

CC O Open Access

1. 引言

近年来,随着河湖长制的深入推进与生态文明建设的持续发展,我国水体环境治理已从"监测断面达标" 的末端管控模式,逐步向"污染源解析及源头水水质元素构成研究"的精细化治理阶段转型[1]。这一转变背景 下,农村供水安全保障与饮用水水源地保护工程对区域降雨后地表径流水质监测提出了更高要求,尤其亟需系 统性开展河流源水的水质本底特征研究。云南省作为横断山脉与云贵高原的过渡地带,其复杂地貌体系与特殊 地质构造共同塑造了"有色金属王国"的独特禀赋[2]。研究表明,区域丰沛的降雨过程可加速金属元素从矿化 地层向水体的迁移[3],而地表径流中元素的溶出 - 迁移过程受控于降雨动力学特征、地形侵蚀模数及基质渗透 性的多尺度耦合作用,形成具有显著时空异质性的复杂水化学响应机制。本研究创新性选取汛期结束后(9~10月) 这一关键水文窗口期,对金沙江流域云南段实施系统性源头水采样监测。该时段选择基于双重考量:其一有效 规避雨季强降水对水体的稀释扰动,其二最大程度降低农业面源污染与人类活动输入的叠加影响。针对金沙江 流域作为云南省六大水系中地貌类型最完备(涵盖高山峡谷、岩溶盆地等7种地貌亚类)的典型代表,系统解析不 同地貌单元金属元素的分布状况及地质背景 - 水文过程耦合作用下元素的迁移通量特征。研究成果可为高原复 杂地貌区水环境重金属溯源防控提供基础支撑,以期为流域水资源保护提供理论支撑。

2. 研究区概况与监测点布设

2.1. 研究区概况

金沙江云南段全长 1560 km, 流域面积 109,061 km², 涵盖 6 类典型地貌。

1) 深切割高山地貌:基岩为三叠系砂板岩,径流短促,人类干扰少。选取硕多岗河为代表,其发源于香格 里拉县格咱乡娘果附近,河流长度为147 km,集水面积1954 km²,源地高程4000 m 左右。

2) 山原地貌:地表覆盖冰川沉积物。选取漾弓江为代表,其发源于丽江市白沙乡玉龙雪山,河流长度 122 km,集水面积 1687 km²,源地高程 3000 m 左右。

3) 红岩丘原地貌: 红壤与紫色土发育,农业与磷矿开采密集。选取龙川江为代表,其发源于南华县五街乡 米黑们村附近,河流长度 244 km,省内集水面积 9225 km²,源地高程 2500 m 左右。

4) 混合丘原地貌: 地形复杂, 含梁王山脉与滇池流域。选取普渡河为代表, 其发源于嵩明县大哨乡梁王山, 河流长度 363 km, 集水面积 11,657 km², 源地高程 2700 m 左右。

5) 深切割中高山地貌: 基岩风化显著。选取小江与以礼河流域为代表,小江发源于寻甸县金所乡大沟毛箐, 河流长度 141 km,集水面积 3049 km²,源地高程 2800 m 左右;以礼河发源于会泽县大海乡黄花药脑包附近, 河流长度 121 km,集水面积 2645 km²,源地高程 3600 m 左右。

6) 岩溶高原地貌: 石灰岩广布, 溶洞与地下河发育。选取横江为代表, 其发源于贵州省威宁县草海。

2.2. 监测点布设

2022~2024年,按地貌类型布设6个降雨水质监测点和18个河流源头水监测点(图1)。



图 1. 监测点布设分布图

降雨水质监测点布设:在深切割高山地貌区域的迪庆州香格里拉县、山原地貌区域的丽江市古城区、红岩 丘原地貌区域的楚雄州楚雄市、混合丘原地貌区域的昆明市五华区、深切割中高山地貌区域的曲靖市会泽县、 岩溶高原地貌区域的昭通市昭阳区分别布设1个监测点。

源头水监测点布设:根据金沙江一级支流水系分布和其二级支流源头水高程及植被土壤情况,选择区域下 垫面占比高的类型布设监测点。硕多岗河布设2个、漾弓江布设3个、龙川江布设3个、普渡河布设5个、小 江与以礼河布设2个、横江布设2个。

3. 材料与方法

样品采集与检测

样品采集:于每年汛期(9~10月)选择一次代表性降雨过程,在连续降雨持续时间达2小时后进行样品采集,确保获得反映区域大气湿沉降特征的典型样品。

在汛期结束后的 11 月上旬(枯水期起始阶段),于河流源头断面采集表层水样,现场测定 pH、电导率。水样 经 0.45 μm 混合纤维素酯滤膜过滤后,分装至棕色硼硅酸盐玻璃瓶中,添加相应保存剂低温保存,于 12 小时内 运送至实验室进行痕量组分分析。

分析项目:依据《水质 65 种元素的测定 电感耦合等离子体质谱法》(HJ 700-2014)、《水质 汞的测定 原子 荧光光度法》(SL 327.2-2005),使用安捷伦 7900 型电感耦合等离子体质谱仪(ICP-MS)和北京瑞利 AF-640A 双道 原子荧光光谱仪检测 66 种金属元素。

质量控制:每个地貌类型选取一个站点采集全程序空白样、现场平行样;实验室检测每批次样品采集室内 平行样、加标样、插标样各2个,按原子量分段选择4个元素的质控样品各1个。

4. 结果与分析

4.1. 金属元素检出概况

66 种元素监测结果显示, 18 个样本共有 42 种元素检出。

其中 12 种元素(硼 B、钠 Na、镁 Mg、钾 K、钙 Ca、钒 V、铜 Cu、锌 Zn、铷 Rb、锶 Sr、钼 Mo、钡 Ba)在 所有样本中稳定检出(检出率 100%),锂(Li)、铝(Al)、锰(Mn)、铁(Fe)等 5 种元素在 17 个样本中检出(检出率 94.4%),两者占检出元素总量的 40.5%(图 2),上述元素在金沙江云南段水体中具有普遍性。检出 1~2 个元素的 站点为 10 个,不同地貌单元之间、单个地貌单元内不同下垫面条件下也有差异,说明地貌对元素溶出的影响较 大[4] [5]。



风险元素: 砷(As)、镉(Cd)、铅(Pb)在红岩丘原与混合丘原显著富集[6]-[8](表 1)。

地貌类型	As (最大值)	Cd (最大值)	Pb (最大值)
深切割高山	未检出	0.00010	0.00014
红岩丘原	0.00190	0.00023	0.00038
混合丘原	0.00303	0.00018	0.00039
岩溶高原	未检出	0.00005	0.00012

表1. 风险元素浓度分布(单位: mg/L)

4.2. 空间分异特征

4.2.1. 地形地貌的影响

深切割高山: 铁(Fe: 0.107~0.138 mg/L)、锰(Mn: 0.227~0.222 mg/L)浓度较高(p<0.05),与腐殖质冲刷和氧化环境相关[9];

混合丘原: 锌(Zn: 0.0052~0.0217 mg/L)、铅(Pb: 0.00013~0.00039 mg/L)区域矿产采集加工程度高,受人为活 动影响显著;

红岩丘原:铝(Al: 0.053~0.057 mg/L)、钛(Ti: 0.00080~0.00075 mg/L)浓度突出,与红壤黏土矿物富集相关。

4.2.2. 元素相关性分析

钙与镁高度正相关(*ρ*=0.89, p<0.01),印证碳酸盐岩溶解主导溶出过程;铁与锰协同变化(*ρ*=0.82),反映氧 化环境下金属氧化物迁移规律;锌与铅在混合丘原呈弱相关(*ρ*=0.32),提示多源性污染输入[10]。

4.2.3. 热图聚类分析

高浓度集群:混合丘原(Ca, Mg, Na)与红岩丘原(Fe, Al)形成独立聚类;

低浓度集群:深切割高山(Li, B)与岩溶高原(Sr, Ba)归为自然背景区。

按地貌类型统计,检出元素数量从低到高分别为深切割高山、岩溶高原、深切割中高山、山原地貌、混合 丘原、红岩丘原(图 3)。



图 3. 金属热聚类分析图

4.3. 结果分析

4.3.1. 地形地貌的影响

通过克鲁斯卡尔 - 沃利斯检验发现显著差异(p < 0.05)。深切割高山的铁(Fe)、锰(Mn)浓度较高,可能与地表 径流冲刷表层腐殖质及氧化环境下溶出有关;砷(As)、硒(Se)浓度显著低于其他地貌,或因快速径流减少吸附时 间。混合丘原的锌(Zn)、铅(Pb)浓度较高,可能与农业、采矿活动叠加地下水渗透作用有关;钙(Ca)、镁(Mg)因 碳酸盐岩广泛分布,溶出量最大。红岩丘原的铝(Al)、钛(Ti)浓度突出,可能因红壤中黏土矿物富集及径流携带表层颗粒导致[11]-[13]。

4.3.2. 元素相关性分析

通过斯皮尔曼相关系数(*ρ* > 0.7)发现,钙与镁高度正相关(*ρ* = 0.89, p < 0.01),印证碳酸盐岩溶解主导溶出过程;铁与锰协同变化(*ρ* = 0.82),反映氧化环境下金属氧化物迁移规律;铜与锌呈现中度协同变化趋势(*ρ* = 0.65),可能受矿源影响;锌与铅在混合丘原呈弱相关(*ρ* = 0.32),提示多源性污染输入。

4.3.3. 元素共现性

红岩丘原 Fe-Mn-Al 同步升高(R² = 0.76), 混合丘原 Cd-Pb 微弱相关(R² = 0.32)。

4.3.4. 元素空间分布特征

通过"热图分析",元素的平均浓度分布显示出高浓度元素的钙、镁、钠在混合丘原中浓度最高,红岩丘原 次之。钙在所有站点中浓度最高(均值约 30~50 mg/L),尤其在混合丘原区浓度显著偏高,可能与碳酸盐岩风化 溶出有关。钠、镁的浓度普遍较高(均值 1~10 mg/L),在红岩丘原和山原区更突出,可能与基岩矿物溶解和径流 冲刷有关。而岩溶高原最低,可能与过水速度有关。砷在山原(均值 0.0095 mg/L)和混合丘原(均值 0.0014 mg/L) 中局部高值,可能与地质状况有关。地形聚类模式显示混合丘原&红岩丘原的钙、镁、钠、砷、硼的浓度较高, 可能区域人类农业活动密集。深切割高山&岩溶高原的元素种类及对应浓度较低,为自然背景主导区,受人为干 扰较少。红岩丘原中铁-锰-铝同步升高,可能与氧化环境相关。镉-铅在混合丘原中微弱相关,可能与交通 或工业相关。

5. 讨论

5.1. 地貌与元素的响应机制

1) 降雨冲刷效应:深切割高山地貌因海拔落差大,表层腐殖质较厚,地表径流短促,降雨与土壤岩石接触时间短且少,且人类干扰较少,元素种类最少且浓度最低。岩溶高原地貌以石灰岩为主,水土流失高,岩石裸露面积大,过水速度快,元素种类和浓度相对较低。

2) 金属溶出差异: 红岩丘原发育红壤与紫色土,渗透性差,元素种类溶出最多,浓度整体偏高。混合丘原 下渗率高,元素通过地下水迁移,在地表径流中表现出浓度稳定,均匀。

3) 地质背景主导元素溶出: 砷在山原和混合丘原中局部高值,同时区域地下水监测出砷,可能与地质状况 有关。而岩溶高原区未检出砷,与程琰勋等[4]在西南岩溶区的研究不一致,可能原因是监测站点的下垫面不一 致,且本研究主要针对源头水。红岩丘原 Fe、Mn、Al 的高浓度(Fe 均值 0.066 mg/L, R²=0.76)源于红壤黏土矿 物的径流携带,反映氧化环境下金属氧化物的迁移特征。

4) 人类活动叠加效应: 混合丘原 Zn (0.010 mg/L)、Pb (0.00016 mg/L)的富集与农业灌溉、磷矿开采及交通 排放直接相关,其空间分布与经济活动强度呈显著正相关(p < 0.05)。深切割高山区元素种类最少(16 种),表明 低人类干扰下自然风化主导溶出过程。

5) 水文条件调控元素迁移: 岩溶高原区因过水速度快(电导率均值 25 μS/cm),元素吸附时间短,导致 Ca、 Mg 浓度显著低于混合丘原(p<0.01)。红岩丘原径流渗透性差,表层颗粒物携带金属元素进入水体,加剧了 Al、 Ti 的富集(Al 均值 0.053 mg/L)。

5.2. 管理启示

1) 高敏感区管控: 混合丘原需加强监测与监管, 重点监控 As、Cd、Pb 的动态变化。红岩丘原应推广生态 农业,减少化肥使用, 控制面源污染输入。 2) 自然背景区保护:深切割高山与岩溶高原需纳入生态保护区,禁止大规模开发,维持自然水文循环。

3) 技术支撑体系:建立"地貌-元素"数据库,结合 GIS 技术实现污染源精准定位;开发水质预警模型,动态评估降雨径流对金属溶出的影响。

6. 结论与建议

6.1. 结论

1) 金沙江云南段地表径流金属元素分布呈现显著地貌分异性。在高浓度区,混合丘原(Ca,Mg,Na)与红岩丘原(Fe、Al、Ti)受地质风化与人类活动双重驱动;在低浓度区,深切割高山(16种元素)与岩溶高原(21种元素)以自然背景为主导。

2) 风险元素空间异质性显著。砷在山原地貌区和混合丘原地貌区中局部高值,山原地貌区区域地下水监测 出砷,混合丘原地貌区磷矿企业众多,潜在生态风险需重点关注;混合丘原地貌区 Zn、Pb 受工农业活动影响显 著,需纳入重点管控清单。

6.2. 建议

 分区管控策略:划定混合丘原为"重金属防控优先区",实施工业准入限制;红岩丘原纳入"农业面源 重点治理区"。

2)长期监测网络优化:山原和混合丘原局部增设地下水监测点,追踪砷的垂向迁移规律;结合遥感技术,动态评估土地利用变化对金属元素分布的影响。

3) 跨学科研究深化:联合水文地质与生态学团队,解析金属元素在"土壤-水-生物"链中的迁移机制; 开展重金属复合污染研究,评估流域生态系统的协同效应。

参考文献

[1] 中国金属新闻网. 有色金属的中国分布[J]. 新疆有色金属, 2016, 39(1): 92.

- [2] 王翼文. 模拟酸雨条件下硫化矿尾矿中重金属的溶出特性及其固化研究[D]: [硕士学位论文]. 南宁: 广西大学, 2025.
- [3] 何雨菁. 酸雨形成机制与阳离子组成特征的综合分析[J]. 黑龙江环境通报, 2025, 38(1): 50-52.
- [4] 程琰勋, 徐磊, 吴亮, 等. 金沙江流域底泥重金属污染特征及来源解析——以蜻蛉河为例[J]. 物探与化探, 2025, 49(2): 500-509.
- [5] 李振雄, 胡博文, 王振华, 等. 霍山县表层土壤重金属影响因素及来源辨析[J]. 地下水, 2024, 46(5): 134-138.
- [6] 张连凯,杨慧.岩溶地下河中砷迁移过程及其影响因素分析——以广西南丹县里湖地下河为例[J].中国岩溶,2013, 32(4):377-383.
- [7] 李先琨, 苏宗明. 桂西南不同地层土壤的元素地球化学特征[J]. 广西科学, 2001(4): 301-307.
- [8] 黄艺. 酸雨条件下成都市区土壤镉的释放及固液相平衡研究[D]: [博士学位论文]. 成都: 成都理工大学, 2007.
- [9] 王强. 腐殖酸与铁锰铝及其氧化物的相互作用机理研究[D]: [博士学位论文]. 重庆: 西南农业大学, 2005.
- [10] 陈怀满, 等. 土壤中化学物质的行为与环境质量[M]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [11] 祁超,李闯,梁胜跃,等. 安徽池州地区土壤重金属污染特征和源解析[J]. 地质学刊, 2025, 49(1): 69-77.
- [12] 景丽洁, 王敏. 不同类型土壤对重金属的吸附特性[J]. 生态环境, 2008(1): 245-248.
- [13] 徐璐, 周洪印, 赵炫越, 等. 云南某矿区周边耕地土壤重金属污染特征及来源解析[J/OL]. 农业环境科学学报: 1-15. https://link.cnki.net/urlid/12.1347.S.20250220.1434.002, 2025-03-13.