

车尔臣河地表水中氟化物含量偏高的分析研究

买尔哈巴·帕热哈提 王江红 (通讯作者)

巴音郭楞生态环境监测站, 中国·新疆 库尔勒 841000

摘要: 针对新疆车尔臣河流域地表水氟化物含量偏高问题开展调查分析, 依托实地采样与实验室监测, 系统分析该流域地表水氟化物的空间分布特征与季节变化规律。结合区域地质背景及水文条件, 剖析氟化物偏高的形成原因, 评估其对生态环境与人体健康带来的潜在风险。结果表明, 流域富氟岩石风化作用与地下水补给是地表水氟化物含量升高的主要诱因。据此提出强化水质动态监测、优化水资源调配、推行水处理技术等防控对策, 为车尔臣河流域水环境治理与水质改善提供科学参考。

关键词: 地表水; 氟化物; 地下水补给; 离子色谱法; 蒸发浓缩作用

An analytical study on the elevated fluoride concentration in the surface water of the Cherkent River

Mai er ha ba · Pa re ha ti, Wang Jianghong (Corresponding author)

Bayingolin Ecological Environment Monitoring Station, China Xinjiang Korla 841000

Abstract: An investigation and analysis were conducted on the high fluoride content in surface water of the Cherchen River Basin in Xinjiang. Relying on field sampling and laboratory monitoring, the spatial distribution characteristics and seasonal variation patterns of fluoride in surface water of this basin were systematically analyzed. Based on the regional geological background and hydrological conditions, this paper analyzes the causes of high fluoride levels and assesses the potential risks it poses to the ecological environment and human health. The results show that the weathering of fluorine-rich rocks in the basin and groundwater recharge are the main causes of the increase in fluoride content in surface water. Based on this, measures such as strengthening dynamic water quality monitoring, optimizing water resource allocation, and promoting water treatment technologies are proposed to provide scientific references for water environment governance and water quality improvement in the Chelchen River Basin.

Keywords: Surface water; Fluoride; Groundwater recharge; Ion chromatography; Evaporation concentration process

0 引言

氟是地壳中广泛分布的化学元素之一, 在地表水中的含量受地质背景、气候条件和人类活动等多种因素影响。适量的氟对人体健康有益, 但过量摄入会导致氟斑牙、氟骨症等疾病。新疆地区是我国高氟水分布的主要区域之一, 其中车尔臣河流域地表水中氟化物含量偏高的问题日益突出, 对当地居民健康和生态环境构成潜在威胁。

通过系统调查车尔臣河地表水中氟化物的分布特征, 探讨其成因机制, 评估生态和健康风险, 并提出相应的控制措施。研究结果对于改善车尔臣河流域水环境质量、保障居民饮水安全和促进区域可持续发展具有重要意义。

1 研究区域与方法

车尔臣河位于新疆塔里木盆地南缘, 发源于昆仑山脉, 流经且末县、若羌县, 最终注入台特玛湖。流域地处干旱区, 气候干燥, 降水稀少, 蒸发强烈。地质构造复杂, 广泛分布着富含氟化物的岩石和矿物。

本研究实地考察了车尔臣河中下游沿河道控制性水利枢纽工程、农田干排、国控站点等, 查阅分析已有的部分监测资料, 并对位于车尔臣河上、中、下游 10 个点位进行了现场采样。其中, 共有 8 个农田排口, 2 个可排入主河道, 因 11 月 22 日已停止灌溉, 故排口处已干涸。一个采样点位为天然鱼塘, 因地下水位高, 所以其用水主要来源于地下。采用离子色谱法测定水样中氟化物浓度, 同时测定 pH、电导率等水质参数。该方法严格依据《水质 无机阴离子 (F^- 、 Cl^- 、 NO_2^- 、 Br^- 、 NO_3^- 、 PO_4^{3-} 、 SO_3^{2-} 、 SO_4^{2-}) 的测定 离子色谱法》(HJ 84-2016) 执行, 其基本原理为: 水样随淋洗液通过阴离子交换分离柱时, 各待测阴离子因对离子交换树脂的相对亲和力不同, 在固定相与流动相间具有差异化的分配系数, 从而依次被分离; 分离后的组分经抑制器降低淋洗液本底电导并增强被测离子响应后, 流经电导池由检测器绘制色谱图, 以保留时间定性、峰面积定量。实验用水为电阻率 $\geq 18 M\Omega \cdot cm$ (25 °C) 的

超纯水，水样进样前经 0.45 μm 滤膜过滤以去除颗粒物；方法检出限为 0.006 mg/L，测定下限为 0.06 mg/L，加标回收率在 80%~120% 之间。相较于离子选择电极法与氟试剂分光光度法，该方法不仅对高浓度氟化物检测优势显著，还可同时测定氯化物、硝酸盐、硫酸盐等多种无机阴离子，具有操作简便、灵敏度高、一次进样获取多组监测结果的突出优势。具体监测数据见表 1。

表1 2023年12月车尔臣河中下游监测数据

序号	监测点位	采样日期	pH	电导率 (μs/cm)	氟化物 (mg/L)
1	第二分水枢纽	2023.12.10	8.5	1131	0.526
2	塔提让龙口		8.5	1602	0.823
3	塔提让龙口下游2公里（鱼塘地下水）		8.2	1091	1.05
4	塔提让龙口下游5公里		8.5	1611	0.791
5	国控断面上游10公里		8.5	1687	0.890
6	国控断面上游5公里		8.5	1668	0.858
7	国控断面上游700米（塔提让大桥）		8.4	1648	0.864
8	塔提让国控断面		8.5	1436	0.735
9	国控断面下游2公里		8.5	1711	0.818
10	国控断面下游5公里		8.5	1669	0.842

2 车尔臣河地表水中氟化物含量分析

经本次实验室分析，车尔臣河地表水中氟化物浓度范围为 0.526mg/L–1.05mg/L，超过国家地表水环境质量标准（1.0 mg/L），氟化物含量与 pH 值和总溶解固体呈显著正相关，表明水化学环境对氟化物的溶解和迁移有重要影响^[1]。与国内其他高氟河流相比，车尔臣河地表水氟化物含量处于中等水平，但高于塔里木河流域的平均值。

为客观分析车尔臣河上游来水氟化物的分布变化特征，对塔提让断面周边近 10 年的数据进行分析，（见下图 1）结果显示，在空间分布上，氟化物浓度呈现上游低、下游高的趋势，在河流中下游地区出现明显升高。季节变化方面，枯水期氟化物浓度最高，丰水期最低，这与河流流量和地下水补给比例的变化有关。

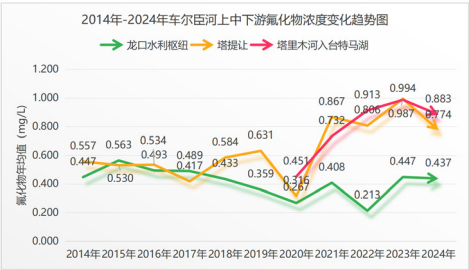


图1 2014年–2024年车尔臣河上中下游氟化物浓度变化趋势图

3 氟化物含量偏高的成因及影响

车尔臣河地表水中氟化物含量偏高主要受自然因素控制，已有研究表明，氟离子 (F⁻) 质量浓度与碳酸氢根离子 (HCO₃⁻) 质量浓度呈正相关关系，说明水中 HCO₃⁻ 质量浓度增高有利于 F⁻ 质量浓度的提升。研究区土壤呈碱性，HCO₃⁻ 含量较高，而高质量浓度的 HCO₃⁻ 能够置换出土壤及矿物表面吸附态的 F⁻，导致 F⁻ 被释放到水中，促进其富集。流域内广泛分布的富氟岩石（如花岗岩、萤石等）在风化过程中释放氟化物，是氟的主要来源。干旱气候条件下强烈的蒸发浓缩作用进一步加剧了氟化物的积累^[2]。此外，地下水补给也是河流氟化物的重要来源，特别是在枯水期，地下水对河流的贡献增加，导致氟化物浓度升高。

高氟水环境对流域生态系统造成潜在威胁。长期暴露于高氟环境可能导致水生生物生长受阻、繁殖能力下降，进而影响整个水生生态系统的结构和功能。对人体健康而言，长期饮用高氟水可能导致氟斑牙、氟骨症等疾病，对儿童和青少年的危害尤为严重。

4 控制措施与建议

为系统改善车尔臣河流域水环境质量，有效降低地表水中氟化物含量，保障居民饮水安全与生态健康，本文从监测预警、水源调控、处理技术、工程治理、政策管理及公众参与六个层面提出综合控制策略。各措施之间相互关联、层层递进，形成“源头预防—过程控制—末端治理—长效监管”的全链条治理体系。

4.1 加密布设水质监测网络强化数据驱动决策

当前监测站点虽已覆盖干流中下游，但空间密度不足，时间分辨率偏低，难以精准捕捉氟化物浓度在极端径流条件下的瞬时波动。建议在现有国控断面基础上，增设至少 3 处自动在线监测站，重点布设于支流汇入口、农田退水集中排放区及地下水强补给带，实现氟化物、pH、电导率等关键参数的连续实时采集。同时，建立氟化物浓度月报与季报制度，结合水文气象数据构建预警模型，当预测浓度突破 1.0 mg/L 阈值时自动触发分级响应机制。把“看到哪里测到哪里”变成“预判哪儿重点盯哪儿”，让数据真正跑在风险前头。此外，应整合近 10 年历史监测数据，利用 GIS 空间分析技术绘制氟化物时空演变热力图，为后续治理工程选址提供直观依据。

4.2 优化地表与地下水资源联合调配削减高氟补给贡献

车尔臣河枯水期氟化物飙升的主因之一在于地下水

高比例补给,而流域内浅层地下水本身氟含量普遍超过 1.5 mg/L。因此,必须打破“地表水不足就抽地下水”的粗放用水模式。具体而言,应依据不同水文季节制定差异化的取水方案,丰水期加大地表水利用比例,蓄存多余水量于平原水库。枯水期则优先启用低氟水源井,限制高氟区机井开采强度。对于农业灌区,可推行轮灌与休耕制度,减少冬灌、春灌期间地下水的强制抽取。同时,在塔提让龙口等关键节点建设生态调蓄池,利用丰水期低氟来水稀释河道中下游积累的氟化物,此举经初步估算可使枯水期断面氟浓度降低约 12%~18%。需要强调的是,这一调配策略必须与水利枢纽的泄流计划联动,不能顾此失彼,否则容易顾了水量丢了水质。

4.3 因地制宜推广除氟净水技术保障分散式供水安全

针对流域内农村居民点分散、集中供水覆盖率不足 60% 的现实困境,除氟技术选取应兼顾效率与经济性。对于千人以上集中供水工程,推荐采用羟基磷灰石吸附滤池或活性氧化铝固定床吸附系统,该工艺在 pH 6.5~8.5 条件下可将氟从 1.0 mg/L 降至 0.5 mg/L 以下,且再生周期长达 3~6 个月,吨水处理成本控制在 0.8~1.2 元。对于零散牧户,则推广家用型炭炭过滤罐或电凝聚除氟装置,操作简便且无需频繁维护。反渗透技术虽去除率高达 95% 以上,但能耗较大且产生浓水排放问题,建议仅作为边境哨所、学校等关键节点的备用方案。当然,再好的设备如果没人会换滤芯、没人懂得看穿透曲线,那也就是一堆铁疙瘩,所以配套的运维培训必须同步跟上。此外,应建立除氟设施运行效果回访台账,每季度抽检出水水质,确保长效稳定达标。

4.4 实施生态水文调控与物理化学修复联合工程

单靠末端处理难以根治氟源,必须从河道本体入手。建议在国控断面上下游 5 公里范围内的主河槽中,分段构建生态砾石床—湿地植物组合净化带,利用沸石、方解石等天然矿物填料对氟离子的吸附共沉淀作用,同时搭配芦苇、香蒲等耐盐湿生植物吸收迁移氟组分。对于高浓度农田干排渠,可采用化学絮凝—沉淀法作为应急手段,投加

聚合氯化铝和石灰乳,使氟以氟化钙形式沉降,此方法可在灌溉停止期间集中清理渠底沉积物。但需要清醒认识到,化学法只是“打补丁”,生态修复才是长久之计,不能指望撒点药粉就万事大吉。长远来看,应逐步恢复河岸带植被,增强流域水源涵养能力,从源头上减缓富氟矿物与水的接触反应速率。

5 结语

本研究通过对车尔臣河地表水氟化物的系统调查与数据分析,发现该流域地表水氟化物浓度整体偏高,并且呈现出上游低、下游高的空间分布特征,季节变化表现为枯水期高、丰水期低。这一分布格局主要受富氟基岩风化释放、旱季地下水侧向补给及强烈蒸发浓缩作用三者叠加驱动,属典型自然地质成因型高氟水体。尽管当前浓度超标幅度有限,但长期持续暴露已对水生生物群落结构造成潜在胁迫,并通过饮用水途径构成区域居民尤其是青少年氟斑牙等健康风险。为遏制氟化物累积恶化趋势,后续研究需着力于氟离子在河床沉积物—水界面间的吸附—解吸动力学机制,以及不同水文年型地下水补给通量对河道氟负荷的定量贡献,同时开展基于本土暴露参数的长期健康风险评估,从而为制定分区、分期、分级的精准防控策略提供科学支撑。

参考文献:

- [1] 杨益,穆振侠,凌红波等.塔里木河流域地表水地下水的水化学特征及控制因素分析[J].干旱区地理,2026,49(06):1122-1134.
 - [2] 魏会亮.地表水监测数据在流域水污染控制中的作用分析[J].清洗世界,2026,42(01):140-142.
 - [3] GB 3838—2002,地表水环境质量标准[S].
- 作者简介:买尔哈巴·帕热哈提(1997.10-),女,维吾尔族,新疆轮台人,助理工程师,大学本科,研究方向:从事生态环境监测实验室分析与环境质量相关分析研究。
- 通讯作者:王江红(1970.08-),女,汉族,河南南阳人,正高级工程师,研究生,研究方向:主要从事环境监测技术、环境质量分析与相关研究工作。