

# 典型燃煤污染型氟中毒病区氟斑牙流行程度与饮用水源化学元素组成的空间关联性

王建莹<sup>1</sup> 程建中<sup>2</sup> 杨娜<sup>1</sup> 张江慧<sup>1</sup> 涂成龙<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>贵州医科大学公共卫生与健康学院/环境污染与疾病监控教育部重点实验室, 贵阳 550025; <sup>2</sup>中国科学院地球化学研究所/环境地球化学国家重点实验室, 贵阳 550081; <sup>3</sup>贵州医科大学毒性检测中心, 贵阳 550025

通信作者: 涂成龙, Email: chenglongtu@163.com

**【摘要】** 目的 探讨燃煤污染型氟中毒病区氟斑牙流行程度与饮用水源化学元素组成的空间分布特征及其关联性。方法 2022 年基于贵州省 CDC 氟斑牙流行程度的调查资料, 在典型燃煤污染型氟中毒区域采集 274 份原有地表饮用水源, 测定水中氟、钙、镁、铝、钛、铬、锰、铁、镍、铜、锌、砷、硒、钼、镉、钡、铅 17 种元素的含量; 应用 Moran's *I* 指数、Getis-Ord *G*<sup>\*</sup> 热点分析饮用水中化学元素的全局空间自相关性以及各元素在局部区域上聚集程度, 并与该区域氟斑牙流行程度进行关联分析。结果 除铜、锌、镉元素全局空间自相关 Moran's *I* 指数为负值外, 其他元素均为正值; 氟、钙、铝、钛、砷、钼、镉、铜元素在东南部低海拔地区呈高值聚集; 镁、钡、铅、铬、锰、铁元素主要在中部海拔地势过渡区聚集, 锌、硒元素则主要聚集在西南部高海拔地区; 水源中锌、硒元素与氟斑牙流行程度呈显著正相关 ( $P < 0.05$ ), 而氟、镁、铝、钛、砷、钼、钡、铅元素与之呈显著负相关 ( $P < 0.05$ )。氟、钙、铝、钛、砷、钼元素在东南部地区及锰、铁、钡元素在中部地区呈高-高聚集, 为疾病高发的热点聚集区, 而氟、铝、锰、钼、钡元素在西部地区呈低-低聚集, 为氟中毒发病率较低冷点聚集区。结论 地表饮用水源中人群氟暴露风险非常低, 但燃煤污染型地方性氟中毒地区饮用水源化学元素含量具有明显的空间地域分布特征, 且与氟斑牙的流行程度存在显著的空间聚集效应, 可能对氟斑牙的发生与流行程度起协同或拮抗效应。

**【关键词】** 地表饮用水源; 空间相关性; 化学元素; 水文地质; 氟斑牙

基金项目: 国家自然科学基金 (42167059)

## Spatial correlation between the prevalence of dental fluorosis and the chemical elemental composition of drinking water sources in a typical coal-fired pollution fluorosis area

Wang Jianying<sup>1</sup>, Cheng Jianzhong<sup>2</sup>, Yang Na<sup>1</sup>, Zhang Jianghui<sup>1</sup>, Tu Chenglong<sup>1,3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Environmental Pollution and Disease Surveillance/Ministry of Education, School of Public Health and Health, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China; <sup>2</sup>State Key Laboratory of Environmental Geochemistry/Institute of Geochemistry, Chinese Academy of Sciences, Guiyang 550081, China; <sup>3</sup>Toxicity Testing Center, Guizhou Medical University, Guiyang 550025, China

Corresponding author: Tu Chenglong, Email: chenglongtu@163.com

**【Abstract】** **Objective** To investigate the spatial distribution characteristics and correlation between the prevalence of dental fluorosis and the chemical elemental composition of drinking water sources in coal-fired fluorosis areas. **Methods** Based on the survey data on the

DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221206-01042

收稿日期 2022-12-06 本文编辑 张婧

引用格式: 王建莹, 程建中, 杨娜, 等. 典型燃煤污染型氟中毒病区氟斑牙流行程度与饮用水源化学元素组成的空间关联性[J]. 中华流行病学杂志, 2023, 44(6): 891-898. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221206-01042.

Wang JY, Cheng JZ, Yang N, et al. Spatial correlation between the prevalence of dental fluorosis and the chemical elemental composition of drinking water sources in a typical coal-fired pollution fluorosis area[J]. Chin J Epidemiol, 2023, 44(6): 891-898. DOI: 10.3760/cma.j.cn112338-20221206-01042.



prevalence of dental fluorosis at CDC in Guizhou Province in 2022, 274 original surface drinking water sources were collected in typical coal-fired fluorosis areas, and fluoride (F), calcium (Ca), magnesium (Mg), aluminum (Al), titanium (Ti), chromium (Cr), manganese (Mn), iron (Fe), nickel (Ni), copper (Cu), zinc (Zn), arsenic (As), selenium (Se), molybdenum (Mo), cadmium (Cd), barium (Ba), lead (Pb) 17 elements; apply Moran's  $I$  index, Getis-Ord  $G_i^*$  hotspot analysis of the global spatial autocorrelation of chemical elements in drinking water and the degree of aggregation of each element on the local area, and correlation analysis with the prevalence of dental fluorosis in the region. **Results** Except for Cu, Zn, and Cd, global spatial autocorrelation Moran's  $I$  was negative, and all other elements were positive. F, Ca, Al, Ti, As, Mo, Cd, and Cu elements showed high values of aggregation in the southeastern low-altitude area; Mg, Ba, Pb, Cr, Mn, and Fe elements were mainly aggregated in the central altitude terrain transition area, Zn and Se elements in water sources are significantly positively correlated with the prevalence of dental fluorosis ( $P < 0.05$ ). In contrast, F, Mg, Al, Ti, As, Mo, Cd, Ba, and Pb elements negatively correlate ( $P < 0.05$ ). Elements in the central region were high-high aggregation, as a hot spot aggregation area with high disease incidence, while F, Al, Mn, Mo, Cd, and Ba elements in the western region were low-low aggregation, as a cold spot aggregation area with a low incidence of fluorosis. **Conclusions** The risk of population fluoride exposure in surface drinking water sources is shallow. However, the chemical element content of drinking water sources in coal-fired polluted endemic fluorosis areas has prominent spatial geographical distribution characteristics. There is a significant spatial aggregation effect with the prevalence of dental fluorosis, which may play a synergistic or antagonistic effect on the occurrence and prevalence of dental fluorosis.

**【Key words】** Surface drinking water sources; Spatial correlation; Chemical elements; Hydrogeology; Dental fluorosis

**Fund program:** National Natural Science Foundation of China (42167059)

地方性氟中毒(地氟病)是一种常见的地球化学性疾病,也称“水土病”。该病是由于居民长期暴露在高氟环境中,通过空气、食物、饮水等介质摄入过量的氟元素所致的慢性蓄积性中毒;氟斑牙是其常见且突出的临床表现,对患者身心健康影响非常突出<sup>[1-2]</sup>。据已有的研究结果显示,氟中毒与氟化物的摄入程度呈正相关关系<sup>[3-4]</sup>;亦有资料显示,很多地区中人群摄入氟化物的剂量相同,氟中毒程度却存在显著差异<sup>[5]</sup>。部分学者认为该现象主要是由于不同地区间人群的营养、饮用水化学性质等条件的差异所致<sup>[6]</sup>。既往研究大多关注病情严重程度及现象的改善状况,较少从医学地理学角度对其相关影响因素等方面进行分析。空间流行病学是一门分析疾病空间分布特点和变化规律、探索特定区域人群疾病影响因素并为防治疾病提供策略和措施的科学<sup>[7]</sup>。地理信息系统作为一种分析空间数据和绘制可视化空间地图的工具,广泛应用于疾病预防控制与公共卫生领域<sup>[8]</sup>。空间分析能独立分析与疾病相关变量的空间聚集情况,更直观地分析聚集区在整体中的位置和与周边地区的关联,有助于了解地表饮用水源中化学元素与氟斑牙流行程度的空间分布特征。

贵州省金沙县位于中国燃煤污染型氟中毒地区的中心地带,其水文地质条件复杂,典型喀斯特

地貌广泛分布并有着独特的岩溶地质特点,该地区分布着大量的碳酸盐岩,且发育程度、构造、地貌部位的不同及岩溶水补给、径流等条件的差异,导致水资源的空间分布极不均匀。即使同一含水岩组在不同的构造、地貌条件下,其富水性及水源理化性质也具有很大的差别<sup>[9]</sup>。近年来,该地区疾病防控得到国家的大力支持并采取了相应的控氟措施,氟中毒现象得到了有效遏制,但对于氟中毒的机制仍不清楚,且在一些偏远地区仍有病例发生<sup>[10-11]</sup>。据监测结果显示,地氟病与地质环境密切相关。特殊的地质条件使地下水中的化学成分与地方病存在密切关系<sup>[4]</sup>。岩溶地下水是该地区居民重要的生活、生产和农业水源,长期的岩溶作用影响着各区域水源的化学性质<sup>[12-13]</sup>。饮用水中的化学元素可通过食物被身体吸收,与人类健康相关的必需元素和其他化学物质的过量或不足都可能会引起不良的健康反应,且元素的异常分布可能会严重影响氟斑牙的流行程度<sup>[14]</sup>。因此,本研究探讨该地区地表饮用水源中化学元素与氟斑牙流行程度的相关关系。

## 资料与方法

1. 资料来源:根据贵州省 CDC 地氟病的调查资料<sup>[15]</sup>,收集并分析贵州省燃煤污染型氟中毒病区

(县)8~12 岁学生氟斑牙患病情况的数据,选择儿童氟斑牙患病率较高但氟斑牙指数分布不均的金沙县作为现场调查地点。研究对象均签署知情同意书。

2. 样品采集:2022 年在金沙县 25 个乡镇中,采取整群随机抽样方法进行现场调查采集 274 个原始水源点位,采样过程使用全球定位系统工具箱进行卫星定位标注,同时按照《生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存》(GB/T 5750.2—2006)对典型病区及相邻部分非病区生活水源(原始水井、水库、蓄水池及自引山泉水)使用一次性聚乙烯瓶(10% 硝酸浸泡 24 h 后去离子水清洗-烘干使用)进行标准采集及预处理,每个水源点采集 2 份 100 ml 饮用水<sup>[16]</sup>。

3. 测定方法:按照《生活饮用水标准检验方法 金属指标》(GB/T 5750.6—2006)<sup>[17]</sup>、《水质 氯化物的测定 离子选择电极法》(GB/T 5750.5—2006)<sup>[18]</sup>、《生活饮用水标准检验方法 水质分析质量控制》(GB/T 5750.3—2006)<sup>[19]</sup>,氟元素含量使用氟离子电极(PXSJ-226,中国上海仪电科学仪器股份有限公司)进行测定,钙、镁元素含量采用原子吸收光谱仪(德国耶拿分析仪器股份公司,ContrAA 700)火焰法进行测定,其他元素铝、钛、锰、铜、锌、镍、砷、钼、镉、钡、铅、铬、铁、硒使用电感耦合等离子体质谱仪(中国上海珀金埃尔默仪器有限公司,NexION 2000)进行测定。质量控制采用平行双样法,每批测定的水样随机抽取 10% 左右的样品进行平行双样测定<sup>[20]</sup>。

4. 统计学分析:利用 Excel 2019 软件录入数据并建立数据库、Origin 2021 软件制图、SPSS 25.0 软件进行数据统计与分析。以反映氟斑牙流行程度的氟斑牙指数为因变量,17 种元素作为自变量,进行相关性分析。利用 ArcGIS 10.7 软件和 GeoDa 1.20 软件将饮用水中化学元素含量和氟斑牙流行程度资源数据与地图数据的行政区划进行匹配,建立相应的属性数据库和空间数据库分析制图。双侧检验,检验水准  $\alpha=0.05$ 。地图数据来自于地理空间数据云(<https://www.gscloud.cn/>),空间分辨率为 90 m。

(1)全局空间自相关分析:全局空间自相关 Moran's  $I$  指数是用来检验整体空间相关性的常用工具。公式:

$$I = n \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} (x_i - \bar{x})(x_j - \bar{x}) / \left( \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n \omega_{ij} \right) \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2$$

Moran's  $I$  指数取值范围为  $[-1, 1]$ ; 取值为正,

表示存在空间正相关;取值为负,表示存在空间负相关;等于 0 则表示研究区内的各空间对象单元彼此之间相互独立。

(2)Getis-Ord  $G_i^*$  热点分析:是一种探索局部空间聚类分布特征的有效手段。与 Moran's  $I$  指数不同,Getis-Ord  $G_i^*$  可以很好地反映变量在局部空间区域上的热点分布。公式:

$$G_i^* = \sum_{j=1}^n w_{ij} (d) x_j / \sum_{j=1}^n x_j$$

(3)Spearman 相关分析:根据原始数据的排序位置进行求解。公式:

$$r_s = 1 - \frac{6 \sum_{i=1}^n d_i^2}{n(n^2 - 1)}$$

(4)局部空间自相关分析:在实际的空间数据分布中,当数据量过大时往往会出现局部区域的变量数据由于数据的随机性导致局部不稳定现象的出现,进而需要引入局部空间自相关指数来实现局部区域的自相关评估,揭示数据的空间异质性。公式:

$$I_i = \frac{(x_i - \bar{x})}{S^2} \sum_{j=1}^n w_{ij} (x_j - \bar{x})$$

## 结 果

1. 氟斑牙流行程度空间分布:研究涉及 25 个乡镇(镇),242 个村(社区),地处黔北高原,区内海拔西高东低(图 1A)。氟斑牙指数一级、二级主要分布在东南部(高坪乡、长坝乡)、西北部(马路苗族彝族乡、清池镇)、中部以北(岩孔街道、五龙街道)以及西南部(大田苗族布依族乡)地区,氟斑牙指数三级、四级主要分布在东部(木孔镇、源村镇、沙土镇、后山乡)以及中部(西洛街道、鼓场街道、安底镇)地区(图 1B)。氟斑牙患病率重、中度主要分布在东南部、中部以北及西南部地区,轻度、极轻和可疑在东部、中部地区分布较显著。氟斑牙指数与患病率分级图均说明海拔较低的东部和中部以东地区氟斑牙病情相对较轻,而海拔较高的西南部和中部以西地区病情相对严重(图 1C)。

2. 全局自相关和 Getis-Ord  $G_i^*$  热点分析:对金沙县 274 个原始水源点的饮用水化学元素分布情况进行全局空间自相关检验,结果表明该区域饮用水中除铝、铬、锰、镍、铜、锌、砷、镉元素  $P>0.05$  外,其他元素氟、钙、镁、钛、铁、硒、钼、钡、铅差异均有

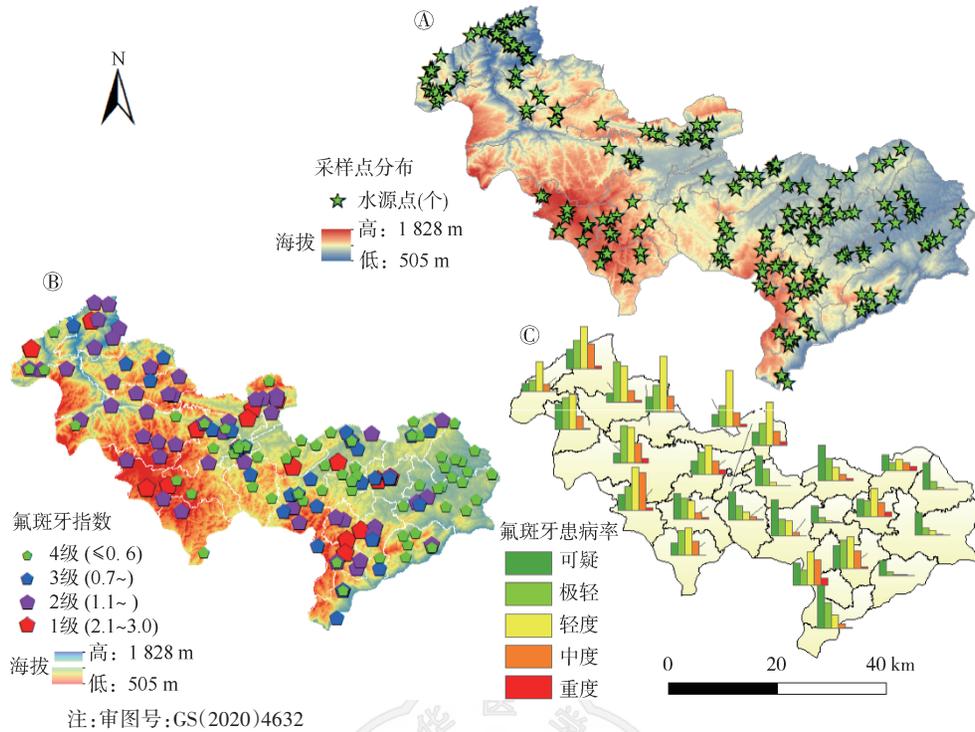


图1 贵州省金沙县饮用水采样点和氟斑牙流行程度分布

统计学意义 ( $P < 0.05$ )。此外,除铜、锌、镉元素 Moran's  $I$  指数为负值,其他 14 种元素 Moran's  $I$  指数均为正值,且锌元素最低 (-0.004);钙元素最高 (0.616)。说明该区域饮用水中化学元素氟、钙、镁、钛、铁、硒、钼、钡、铅含量不是随机分布的,而是存在显著的空间聚集。见表 1。在 Getis-Ord  $G_i^*$  热点分析结果显示,饮用水中化学元素分布规律存在显著的地域差异性。氟元素主要分布在中部、东部和东南部地区,钙、钛、砷、镉、锰、铜元素在东部和东北地区,镁、钡、铅、铬、锰、铁元素在中部地区,铝、钼元素在东南地区,锌元素在西北地区表现为高值聚集性,即“热点区”;氟、钙、铅元素集中在西部地区邻接乡镇,钼元素连通南、北部地区邻接乡镇集中表现为低值聚集性分布,即“冷点区”,其他元素的低值呈分散分布;个别地区差异无统计学意义 ( $P > 0.05$ )。见图 2。

3. Spearman 相关和局部空间自相关分析: Spearman 相关分析结果显示,除钙、铬、锰、铁、镍、铜元素外,氟斑牙指数与其他元素均显著相关 ( $P < 0.05$ ),并且与锌、硒元素呈正相关,与氟、镁、铝、钛、砷、钼、镉、钡、铅元素呈负相关。见表 2。局部空间自相关分析显示,铬、锌元素无显著聚集性,铜、镍、铅元素与疾病无高-高聚集的热点关系,这可能与其在全局自相关分析中为随机分布有关。氟、钙、铝、钛、砷、钼元素在东部地区以及锰、铁、钡

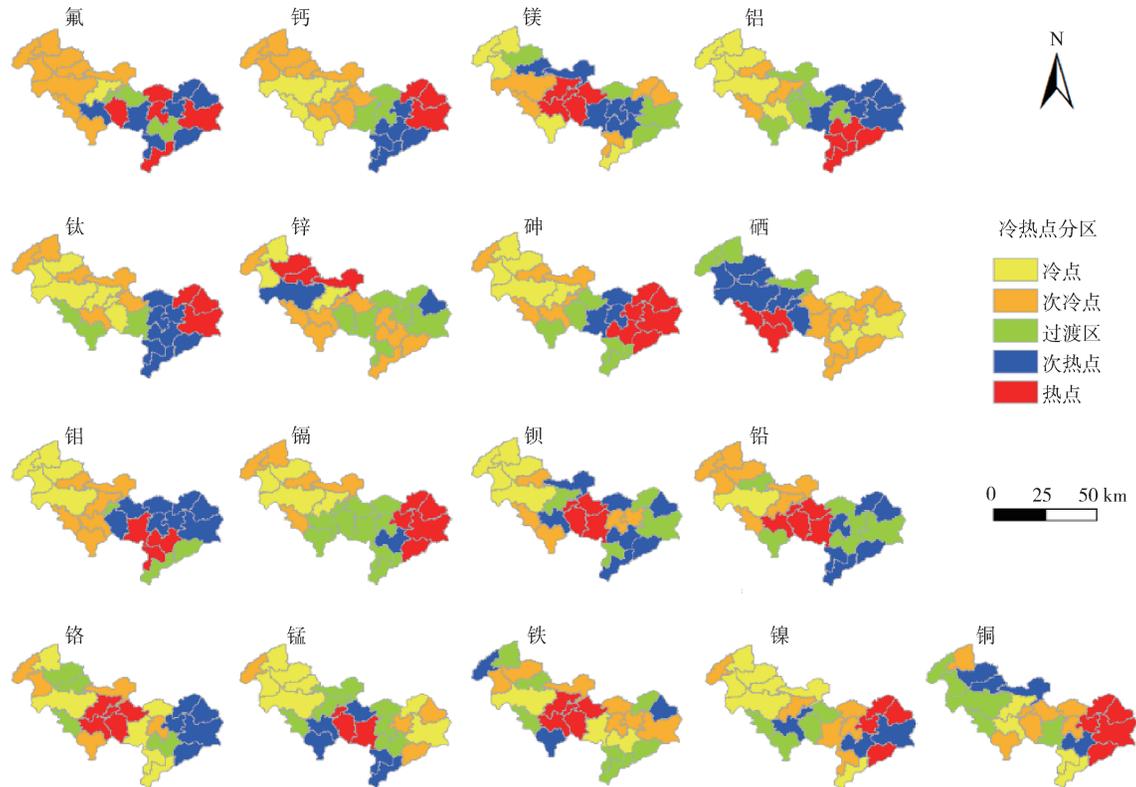
表1 贵州省金沙县饮用水化学元素全局空间自相关分析

元素	Moran' $I$ 值	$s_x$	Z得分	P值	聚集
氟	0.601	0.004	9.591	<0.001	是
钙	0.616	0.004	9.815	<0.001	是
镁	0.339	0.004	5.677	<0.001	是
铝	0.058	0.003	1.101	0.271	否
钛	0.395	0.004	6.252	<0.001	是
铬	0.026	0.000	1.414	0.157	否
锰	0.085	0.003	1.582	0.114	否
铁	0.489	0.004	7.768	<0.001	是
镍	0.017	0.000	0.957	0.338	否
铜	-0.003	0.000	0.048	0.962	否
锌	-0.004	0.003	-0.011	0.991	否
砷	0.009	0.000	0.633	0.527	否
硒	0.079	0.002	1.683	0.032	是
钼	0.236	0.004	3.889	<0.001	是
镉	-0.002	0.000	0.355	0.723	否
钡	0.263	0.004	4.171	<0.001	是
铅	0.037	0.000	2.148	0.032	是

元素在中部地区高-高聚集,呈现高发病率聚集的特点,是疾病高发的热点区;而氟、铝、锰、钼、镉、铜元素主要在西部地区低-低聚集,说明该地区为发病率较低的区域;低-高、高-低聚集说明该区域与周围的区域发病率差异性大,是氟中毒发病率由高到低的过渡区。见图 3。

## 讨 论

地氟病多与人体摄入所需元素含量的不足和



注:审图号:GS(2020)4632

图2 贵州省金沙县饮用水化学元素 Getis-Ord  $G_i^*$  热点分析

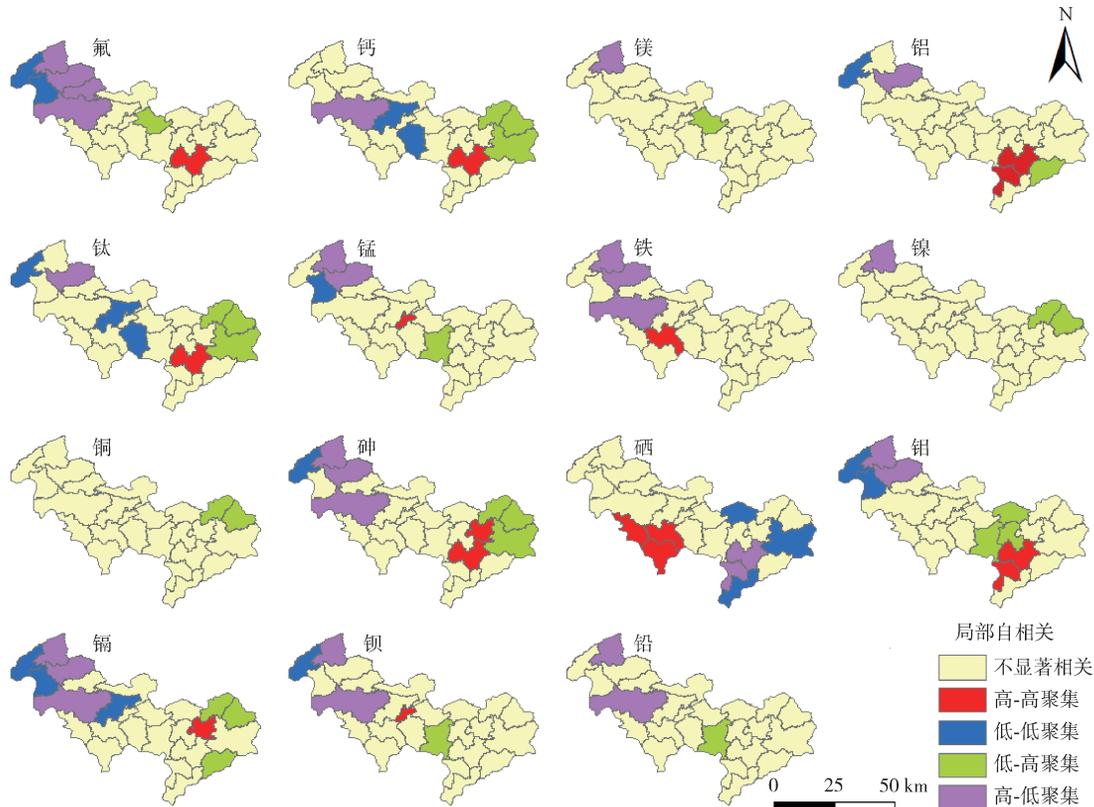
表2 贵州省金沙县饮用水化学元素描述性统计及其与氟斑牙指数的相关性

元素	$M(Q_1, Q_3)$ (mg/L)	$s_x$	相关系数	P值
氟	0.147(0.085, 0.287)	0.249	-0.304	<0.001
钙	185.333(115.123, 291.496)	159.893	-0.062	0.308
镁	10.572(4.088, 22.267)	14.336	-0.182	<0.003
铝	0.077(0.035, 0.181)	0.539	-0.252	<0.001
钛	1.280(0.789, 1.886)	0.901	-0.134	<0.027
铬	0.006(0.003, 0.010)	0.020	0.071	0.242
锰	0.010(0.004, 0.034)	0.304	-0.108	0.074
铁	0.006(0.004, 0.008)	0.004	-0.039	0.520
镍	0.014(0.004, 0.029)	0.143	0.069	0.254
铜	0.002(0.001, 0.006)	0.143	0.095	0.117
锌	0.064(0.044, 0.130)	0.903	0.159	<0.008
砷	0.006(0.004, 0.008)	0.033	-0.325	<0.001
硒	0.000(0.000, 0.000)	0.021	0.316	<0.001
钼	0.003(0.003, 0.005)	0.005	-0.274	<0.001
镉	0.000(0.000, 0.000)	0.014	-0.183	<0.002
钡	0.179(0.095, 0.293)	0.124	-0.223	<0.001
铅	0.003(0.002, 0.005)	0.017	-0.196	<0.001

过量有关。同时与地质地貌、环境水文地质密切相关,因此其发病流行程度分布不均,呈现空间聚集性,并在地下水化学条件作用下促成了拮抗和协同的综合作用,与先前研究结果一致<sup>[2,21]</sup>。研究饮用

水与氟中毒的关系时,需结合该水文地球化学场中各元素的含量进行系统全面地综合研究和评价<sup>[22]</sup>。通过分析发现,该病区除铝、铬、锰、镍、铜、锌、砷、镉元素是随机分布,其他元素氟、钙、镁、钛、铁、硒、钼、钡、铅均存在显著的空间相关性;热点分析说明病区饮用水化学元素存在显著的空间聚集性。另外,本研究通过局部双变量空间自相关分析发现,该病区东南部、中部、西南部地区是该元素影响氟中毒高发的热点区,与全局自相关结果基本一致。西部地区是氟、铝、锰、钼、镉、钡元素影响氟中毒发病率较低的冷点区,与基本相关分析结果基本一致。可能与水源矿物质时空分布不均有关,水源化学性质在参与地氟病发病过程中发挥一定作用,因此与氟斑牙流行程度可能存在相应的因果关系。

本研究进一步佐证了饮用水中相关化学元素与氟斑牙流行程度可能存在一定程度协同或拮抗的密切关系<sup>[23]</sup>。既往研究发现在该病区内饮用水源中氟元素含量普遍低于 1 mg/L,显著低于全国限值标准,与多数研究相同<sup>[1]</sup>。表明燃煤型氟中毒区域人群饮用水源中氟暴露风险非常低,不是人群氟中毒的主要途径。既往对氟元素与氟中毒关系的评价,只局限于氟元素,导致一些不够科学的结论



注:审图号:GS(2020)4632

图3 贵州省金沙县饮用水化学元素与氟斑牙流行程度局部空间自相关分析

出现。如在任何水文地球化学条件下氟元素均与氟中毒呈正相关关系。实际上,氟元素不是完全可以被人体吸收和利用的。氟离子的生物有效性也将受到诸如  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{Cl}^-$ 、 $\text{HCO}_3^-$ 、 $\text{SO}_4^{2-}$ 、铁、铝元素等成分的影响<sup>[22]</sup>。

本研究中硒元素与氟斑牙患病率呈正相关关系,可能与研究病区硒元素浓度普遍较低有关。有研究认为,高浓度的硒元素可能会拮抗氟中毒,缺硒元素的外环境下氟中毒的现象较为明显<sup>[24]</sup>。另有研究通过实验发现适量硒浓度对氟斑牙的发生有一定拮抗作用<sup>[25]</sup>。在饮水型氟中毒病区,硒元素浓度也存在偏低的现象,说明硒元素缺乏可能会加重氟中毒的发生<sup>[26]</sup>。陈培忠等<sup>[27]</sup>认为镁元素含量可能影响氟中毒患病程度,体内高氟状态下对镁元素起干扰作用,结果表明镁元素对氟元素的负相关作用成立。因此,可通过食物中摄入充足的镁元素来提高病区人群对氟暴露的耐受,从而缓解氟中毒产生的危害。有研究发现铝、氟元素在吸收、代谢、蓄积等方面都发生相互作用,它们对机体的作用表现为相互拮抗或协同增效;表明铝元素可以拮抗氟元素的同时,氟元素也可以促进铝元素的蓄积,二者之间的关系既可表现为协同作用又可表现为单

独作用<sup>[28]</sup>。因此,一定浓度的铝元素可能会拮抗氟元素的毒性,超过浓度范围则可形成氟、铝络合物引起氟、铝元素的联合中毒。本研究证实铝元素含量高的地区,氟斑牙流行程度显著降低,与多数拮抗的研究结果相符<sup>[29]</sup>。有研究发现砷元素可减少氟元素在体内的吸收,但拮抗作用较弱<sup>[30]</sup>。曾奇兵等<sup>[31]</sup>指出氟、砷元素交互作用极为复杂,不是简单地协同或拮抗,也与机体对氟、砷元素的暴露水平密切相关。研究结果的不同可能是由于动物实验种属、暴露时间、剂量不一致等复杂因素。通常,氟、砷元素之间的交互作用主要为拮抗作用。本研究中铅元素含量较低,对氟斑牙流行程度也呈现较低的负相关趋势,可以推论该地区铅元素对病情影响较小。钡元素是碱土金属中活泼的元素,钛元素在较高的温度下,可与许多元素和化合物发生反应。说明在氟斑牙流行病区,钛、钡元素含量可能在一定程度上对氟暴露产生一定的拮抗作用。钼与氟元素在生物学上的作用起初是从抗龋齿的角度提出,在实验设计剂量下,钼元素可能有减轻氟元素的毒性作用<sup>[26]</sup>。

综上所述,燃煤污染型氟中毒病区氟斑牙流行程度以及饮用水源中化学元素分布存在显著的空

间聚集效应,可能对氟斑牙的发生与流行程度起到协同或拮抗效应。饮用水中化学元素对氟斑牙流行程度的拮抗或协同关系可能会受到水文地球化学条件的控制。地氟病病因多样,发病机制复杂,在今后的局部地区还有新发的可能。本研究仅从医学地理学的角度对地方性氟斑牙流行程度相关影响因素等方面进行空间分析,须进一步扩大病因查找范围,结合动物实验和流行病学调查等方法进行全面分析,加强对氟斑牙流行程度相关影响因素的综合性探究,为进一步有效防控地氟病的发生及其机制研究提供思路和方向。

**利益冲突** 所有作者声明无利益冲突

**作者贡献声明** 王建莹:资料整理、样本采集、数据分析、论文撰写;程建中、杨娜:论文修改;张江慧:参与实验;涂成龙:课题设计、论文指导与修改

### 参 考 文 献

- [1] 官志忠. 燃煤污染型地方性氟中毒[M]. 北京:人民卫生出版社, 2015.  
Guan ZZ. Coal-burning type endemic fluorosis[M]. Beijing: People's Medical Publishing House, 2015.
- [2] 张福存, 文冬光, 郭建强, 等. 中国主要地方病区地质环境研究进展与展望[J]. 中国地质, 2010, 37(3):551-562. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2010.03.002.  
Zhang FC, Wen DG, Guo JQ, et al. Research progress and prospect of geological environment in main endemic disease area[J]. Geol China, 2010, 37(3): 551-562. DOI: 10.3969/j.issn.1000-3657.2010.03.002.
- [3] 赵艳. 我国饮水型氟中毒预防措施效果评价[J]. 中国地方病学杂志, 2006, 25(2): 222-224. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1000-4955.2006.02.046.  
Zhao Y. Evaluation of the effectiveness of preventive measures against drinking water fluorosis in China[J]. Chin J Endemiol, 2006, 25(2):222-224. DOI:10.3760/cma.j.issn.1000-4955.2006.02.046.
- [4] Arif M, Husain I, Hussain J, et al. Assessment of fluoride level in groundwater and prevalence of dental fluorosis in Didwana block of Nagaur district, Central Rajasthan, India [J]. Int J Occup Environ Med, 2013, 4(4):178-184.
- [5] 徐淑芹, 戴国钧, 翟城, 等. 地方性氟中毒病区粮菜和饮水中微量元素分布规律的研究[J]. 中国地方病防治杂志, 1996, 11(6):334-336. DOI:CNKI:SUN:DYBF.0.1996-06-007.  
Xu SQ, Dai GJ, Zhai C, et al. A study on the distribution pattern of trace elements in grain, vegetables and drinking water in endemic fluorosis disease areas[J]. Chin J Endemiol, 1996, 11(6): 334-336. DOI: CNKI: SUN: DYBF.0.1996-06-007.
- [6] Karthikeyan K, Nanthakumar K, Velmurugan P, et al. Prevalence of certain inorganic constituents in groundwater samples of Erode district, Tamilnadu, India, with special emphasis on fluoride, fluorosis and its remedial measures[J]. Environ Monit Assess, 2010, 160(1/4):141-155. DOI:10.1007/s10661-008-0664-0.
- [7] 马凯芳, 张晓婷, 李东民. 空间流行病学应用于艾滋病预防控制的研究进展[J]. 中华流行病学杂志, 2022, 43(1): 128-133. DOI:10.3760/cma.j.cn112338-20210816-00645.  
Ma KF, Zhang XT, Li DM. Progress on application of spatial epidemiology in HIV/AIDS control and prevention[J]. Chin J Epidemiol, 2022, 43(1):128-133. DOI:10.3760/cma.j.cn112338-20210816-00645.
- [8] 张永强, 刘泽军. 地理信息系统(GIS)在公共卫生中的应用[J]. 中国公共卫生, 2005, 21(5):632-633. DOI:10.11847/zgggws2005-21-05-88.  
Zhang YQ, Liu ZJ. Application of geographic information systems (GIS) in public health[J]. Chin J Public Health, 2005, 21(5): 632-633. DOI: 10.11847/zgggws2005-21-05-88.
- [9] 刘珂林. 贵州喀斯特小流域水资源评价——以开磷集团 40 万吨/年合成氨工程供水项目为例[D]. 贵阳:贵州大学, 2007.
- [10] 高彦辉. 大力推进地方性氟中毒的精准防控工作[J]. 中华地方病学杂志, 2017, 36(2): 87-89. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4255.2017.02.003.  
Gao YH. Making energetic efforts for progress in targeted prevention and control of endemic fluorosis[J]. Chin J Endemiol, 2017, 36(2): 87-89. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4255.2017.02.003.
- [11] 叶红兵, 安冬, 姚丹成, 等. 贵州省 14 个燃煤污染型地方性氟中毒病区县考核结果分析[J]. 中国地方病防治杂志, 2019, 34(2): 194-197. DOI: CNKI: SUN: DYBF. 0.2019-02-028.  
Ye HB, An D, Yao DC, et al. Analysis of assessment results for coal-burning endemic fluorosis area in 14 counties of Guizhou Province [J]. Chin J Endemiol, 2019, 34(2): 194-197. DOI:CNKI:SUN:DYBF.0.2019-02-028.
- [12] 袁道先. 我国西南岩溶石山的环境地质问题[J]. 世界科技研究与发展, 1997, 19(5): 41-43. DOI: 10.16507/j.issn.1006-6055.1997.05.010.  
Yuan DX. On the environmental and geologic problems of karst mountains and rocks in the South-West China[J]. World Sci-Tech R&D, 1997, 19(5):41-43. DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.1997.05.010.
- [13] 顾尚义, 鄢贵权. 贵州岩溶地下水库的研究现状与展望[J]. 贵州科学, 2006(1): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6563.2006.01.006.  
Gu SY, Yan GQ. Research status and prospects of karst underground reservoirs in Guizhou [J]. Guizhou Science, 2006(1): 28-31. DOI: 10.3969/j.issn.1003-6563.2006.01.006.
- [14] Wang H, Mu LH, Jiang M, et al. The relationship between chemical elements in soil and whole blood, and fluorosis induced by coal-fired pollution[J]. Environ Monit Assess, 2014, 186(4): 2081-2088. DOI: 10.1007/s10661-013-3519-2.
- [15] 孙殿军, 安冬. 中国燃煤污染型地方性氟中毒防治与实践[M]. 北京:人民卫生出版社, 2017.  
Sun DJ, An D. Coal-burning type of endemic fluorosis control and practice in China[M]. Beijing: People's Health Publishing House, 2017.
- [16] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5750.2-2006 生活饮用水标准检验方法 水样的采集与保存[S]. 北京:中国标准出版社, 2007.  
Ministry of Health of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 5750.2-2006 Standard examination methods for

- drinking water-Collection and preservation of water samples[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [17] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5750.6-2006 生活饮用水标准检验方法 金属指标[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
Ministry of Health of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 5750.6-2006 Standard examination methods for drinking water-Metal parameters[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [18] 国家环境保护总局. GB/T 5750.5-2006 水质 氟化物的测定 离子选择电极法[S]. 北京: 中国标准出版社, 2006.  
State Environmental Protection Administration. GB/T 5750.5-2006 Water quality; Determination of fluoride; Ion selective electrode method[S]. Beijing: Standards Press of China, 2006.
- [19] 中华人民共和国卫生部, 中国国家标准化管理委员会. GB/T 5750.3-2006 生活饮用水标准检验方法 水质分析质量控制[S]. 北京: 中国标准出版社, 2007.  
Ministry of Health of the People's Republic of China, China National Standardization Administration. GB/T 5750.3-2006 Standard examination methods for drinking water-Water analysis quality control[S]. Beijing: Standards Press of China, 2007.
- [20] 张利明, 张付刚, 李建. 平行双样测量值相对偏差计算方法[J]. 化学分析计量, 2022, 31(9): 71-74. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6145.2022.09.015.  
Zhang LM, Zhang FG, Li J. Calculation method of parallel sample measurements relative deviation[J]. Chem Anal Meter, 2022, 31(9): 71-74. DOI: 10.3969/j.issn.1008-6145.2022.09.015.
- [21] Sun YH, Sun SH, Lu LJ, et al. A study on the relationship between the abnormal chemical components of underground water and endemic fluorosis in Shuangliao Area, Jilin province, China[J]. Adv Mater Res, 2012, 581-582: 1133-1136. DOI: 10.4028/www.scientific.net/AMR.581-582.1133.
- [22] 孙述海. 吉林西部氟中毒区地氟病与水文地球化学关系的研究[D]. 长春: 吉林大学, 2012. DOI: CNKI:CDMD:1.1012.355042.  
Sun SH. Study on relationship between fluorosis and hydro-geochemical of endemic fluorosis area in west of Jilin province[D]. Changchun: Jilin University, 2012. DOI: CNKI:CDMD:1.1012.355042.
- [23] 崔国权, 朱振岗, 富咸忠. 饮水中 20 种元素与地方性氟中毒关系的研究[J]. 中国地方病学杂志, 1992, 11(3): 137-141.  
Cui GQ, Zhu ZG, Fu XZ. A study on the relationship between 20 elements in drinking water and endemic fluorosis[J]. Chin J Endemiol, 1992, 11(3): 137-141.
- [24] 边建朝, 王海明. 硒及有关抗氧化物质抗氟研究现状及进展[J]. 中国地方病学杂志, 2003, 22 Suppl 1: 36-40. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1000-4955.2003.z1.013.  
Bian JC, Wang HM. Current status and progress of anti-fluorine research on selenium and related antioxidant substances[J]. Chin J Endemiol, 2003, 22 Suppl 1: 36-40. DOI: 10.3760/cma.j.issn.1000-4955.2003.z1.013.
- [25] 陈荣梅, 蒋伟东, 蒋备战. 硒对氟斑牙发生的拮抗作用及其对 Beclin1 表达的影响[J]. 同济大学学报: 医学版, 2020, 41(4): 426-430. DOI: 10.16118/j.1008-0392.2020.04.004.  
Chen RM, Jiang WD, Jiang BZ. The antagonistic effect of selenium on dental fluorosis and the expression of beclin1 in mice[J]. J Tongji Univ: Med Sci, 2020, 41(4): 426-430. DOI: 10.16118/j.1008-0392.2020.04.004.
- [26] 汤晔, 陈晋容, 邓建红. 硒、铜、硼对氟中毒大鼠氟斑牙发生的影响[J]. 贵州医药, 2011, 35(1): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-744X.2011.01.008.  
Tang Y, Chen JR, Deng JH. Effect of selenium, molybdenum, and boron on occurrence of dental fluorosis in rats with chronic fluorosis[J]. Guizhou Med J, 2011, 35(1): 21-23. DOI: 10.3969/j.issn.1000-744X.2011.01.008.
- [27] 陈培忠, 云中杰, 李涛, 等. 地方性氟中毒与病区内外环境中化学元素关系分析[J]. 中国公共卫生, 2002, 18(4): 433-434. DOI: 10.11847/zgggws2002-18-04-33.  
Chen PZ, Yun ZJ, Li T, et al. Relations between endemic fluorosis and chemical elements in environment[J]. Chin J Public Health, 2002, 18(4): 433-434. DOI: 10.11847/zgggws2002-18-04-33.
- [28] 戴国友, 周琳业, 魏黄道, 等. 氟铝联合作用实验研究[J]. 贵阳医学院学报, 1990, 15(2): 81-88. DOI: 10.19367/j.cnki.1000-2707.1990.02.001.  
Dai GY, Zhou LY, Wei HD, et al. Experimental study of combined effect with fluoride and aluminum[J]. Guiyang Med College, 1990, 15(2): 81-88. DOI: 10.19367/j.cnki.1000-2707.1990.02.001.
- [29] 王卫, 李伟伟, 熊传龙. 饮水型氟中毒影响因素的研究进展[J]. 中华地方病学杂志, 2014, 33(2): 226-228. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4255.2014.02.031.  
Wang W, Li WW, Xiong CL. Research progress on the factors influencing drinking water fluorosis[J]. Chin J Endemiol, 2014, 33(2): 226-228. DOI: 10.3760/cma.j.issn.2095-4255.2014.02.031.
- [30] 李达圣, 黎平, 王述全, 等. 砷对氟中毒影响的流行病学研究[J]. 中国地方病防治杂志, 2000, 15(2): 73-74. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1889.2000.02.004.  
Li DS, Li P, Wang SQ, et al. Epidemiological study of influence of arsenic on endemic fluorosis[J]. Chin J Control Endem Dis, 2000, 15(2): 73-74. DOI: 10.3969/j.issn.1001-1889.2000.02.004.
- [31] 曾奇兵, 喻仙, 杨黎, 等. 氟砷污染对暴露人群骨代谢交互作用[J]. 中国公共卫生, 2012, 28(11): 1480-1482. DOI: 10.11847/zgggws2012-28-11-30.  
Zeng QB, Yu X, Yang Y, et al. Interactive effect of fluoride and arsenic pollution on bone metabolism in exposed population[J]. Chin J Public Health, 2012, 28(11): 1480-1482. DOI: 10.11847/zgggws2012-28-11-30.