基于空间地理加权回归模型的陕西省居民生活饮用水水碘影响因素分析*

陕西省疾病预防控制中心(710003) 栗珊珊 年云鹏 段 刚 牛 刚 郭大伟 黄烈庆 高雪娟△

【提 要】 **目的** 分析陕西省居民生活饮用水碘含量的影响因素,为制定区域差异化碘缺乏病防控策略提供科学依据。**方法** 基于2022年陕西省水碘普查数据采用全局空间自相关分析和热点分析揭示水碘空间分布特征;运用多元线性回归和地理加权回归模型,分析GDP、地形(海拔、坡度)、气候(气温、降水、日照)和植被指数(normalized difference vegetation index,NDVI)等因素对水碘含量的影响。**结果** 全局空间自相关分析显示水碘分布存在显著的空间正相关性(Moran's $I = 0.735$, $Z = 43.829$, $P < 0.001$)。多元线性回归显示GDP、海拔和坡度是主要影响因素($R^2_{adj} = 0.491$, $P < 0.001$)。地理加权回归模型拟合更优($R^2_{adj} = 0.795$, AICc = 740.988),各自变量回归系数的估计值存在较大的空间变异。影响程度大小排序为:NDVI、年平均气温、平均坡度、平均海拔、GDP、年降雨量和年日照时长。**结论** 陕西省水碘含量具有明显的空间集聚性,地理加权回归模型对具有空间自相关性的数据获得更优的拟合。自然因子(NDVI、地形、气候)的空间分异是主导驱动,社会经济因素(GDP)影响有限且局部化。

【关键词】 水碘 地理加权回归 影响因素
【中图分类号】 R591.1 【文献标志码】 A **DOI** 10.11783/j.issn.1002-3674.2026.05.010

Analysis of Influencing Factors of Iodine Content in Drinking Water of Residents in Shaanxi Province based on a Geographically Weighted Regression Model

Li Shanshan, Nian Yunpeng, Duan Gang, et al (*Shaanxi Provincial Centre for Disease Control and Prevention, Xi'an* 710003)

【**Abstract**】 **Objective** To analyze the influencing factors of iodine content in drinking water among residents of Shaanxi Province and provide a scientific basis for formulating regionally differentiated prevention and control strategies for iodine deficiency disorders. **Methods** Based on the 2022 provincial water iodine survey data, global spatial autocorrelation and hotspot analysis were used to reveal the spatial distribution characteristics of water iodine. Ordinary Least Squares (OLS) and geographically weighted regression (GWR) models were employed to analyze the effects of GDP, topography (elevation, slope), climate (temperature, precipitation, sunshine), and vegetation index (normalized difference vegetation indesx, NDVI) on water iodine content. **Results** Global spatial autocorrelation analysis showed that there was a significant spatial positive correlation in the distribution of water iodine (Moran's $I = 0.735$, $Z = 43.829$, $P < 0.001$). Multiple linear regression showed that GDP, elevation, and slope were the main influencing factors ($R^2_{adj} = 0.491$, $P < 0.001$). The GWR model provided a better fit ($R^2_{adj} = 0.795$, $AICc = 740.988$). There was a large spatial variation in the estimates of the regression coefficients of the respective variables. The magnitude of impact was ranked as follows: NDVI, annual average temperature, average slope, average elevation, GDP, annual rainfall and annual sunshine duration. **Conclusion** The iodine content in Shaanxi's drinking water shows significant spatial clustering. The GWR model can obtain a better fit for the data with spatial autocorrelation. The spatial differentiation of natural factors (NDVI, topography, and climate) was the dominant driving force, while the influence of socioeconomic factors (GDP) was limited and localized.

【**Key words**】 Iodine in water; Geographically weighted regression; Influencing factors

水碘是人体碘的重要来源之一,其分布及含量与当地人群碘营养密切相关。研究发现水碘含量存在明显的空间异质性,不同地区的水碘含量分布不一[1]。陕西省作为气候地理环境复杂的内陆省份,各地经济发展等社会环境以及海拔、降雨等自然环境差异都非常明显[2]。本研究采用一般线性回归模型(ordinary linear regression,OLR)和地理加权回归(geographically weighted regression,GWR)的方法,对可能影响水碘分布的相关因素进行探索分析,旨在为阐明水碘分布的影响因素提供线索,为碘缺乏病的科学防控提供依据。

资料与方法

1. 资料来源

陕西省112个县(市、区)的水碘含量数据来源于陕西省疾病预防控制中心2022年水碘普查资料。共收集53990份水碘含量数据[2]。水样采集由各县(市、区)疾病预防控制中心负责。水碘检测均由省级及各地市级疾病预防控制中心实验室完成。水碘检测采用国家碘缺乏病参照实验室推荐的适合缺碘及高碘地区水碘检测方法中的砷铈催化分光光度法检测水

* 基金项目:陕西省重点研发计划一般项目(2022SF-157);陕西省自然科学基础研究计划青年项目(2024JC-YBQN-0951)
△通信作者:高雪娟,E-mail:798277378@qq.com

碘含量[3]。

2. 相关影响因素

根据相关研究假设，本研究纳入各区县GDP（亿元）、平均海拔（m）、坡度（°），年平均气温（℃），年降雨量（mm），年日照时长（h）、归一化植被指数（normalized difference vegetation index，NDVI）为影响因素进行分析，各区县GDP数据来自陕西省统计年鉴，年平均气温和降雨量等气象数据来源于国家气象科学数据共享服务平台（http://data. cma. cn/）、基础地理信息数据来自国家基础信息中心，以及经SRTM 90 m DEM数据和数字高程模型提取得到的各区（县）地形海拔因子，包括平均海拔、坡度。NDVI数据来自国家青藏高原科学数据中心平台。

3. 统计分析方法

（1）空间自相关

全局空间自相关分析采用全局Moran's *I* 指数反映居民生活饮用水碘分布的空间自相关性。Moran's *I* 指数取值范围为−1 ~ 1，其中Moran's *I*>0表示呈空间正相关，Moran's *I*<0表示呈空间负相关，Moran's *I* =0表示随机分布，通过计算*Z*值和*P*值，本研究判断陕西省县级水平水碘含量分布是否存在聚集性。

（2）热点分析

利用Getis−Ord *Gi* 指数进行空间热点分析，*Gi* 是相对测量，需要通过统计检验*Z*值进行说明。如果单位区域的*Gi* 高且*Z*≥1. 96，则表示有一个高值（热点）的空间聚类；如果*Gi* 低并为负数，且*Z*<−1. 96，则表示有一个低值（冷点）的空间聚类；如果*Gi* 接近于0，则表示不存在明显的空间聚类。*Z*值越大表示相关程度越高。

（3）OLR模型

OLR模型是传统线性回归模型的扩展，其从变量类型要求方面扩大了分析范围，即拓展了传统线性回归模型对于自变量的适用范围，不仅适用于定量资料，也适用于分类资料。模型参数估计采用普通最小二乘法（ordinary least squares，OLS）进行估计，基本准则是通过最小化估计值和观测值之间的残差平方和（residual sum of squares，RSS）来找到最佳参数。

（4）GWR模型

GWR模型由英国地理学家提出，是一种空间局域回归分析方法。其目的是在考虑变量空间自相关性的前提下，分析自变量与因变量间空间依赖性的空间变化关系，展示自变量与因变量之间的空间依赖性在空间范围内的变化趋势及其分布模式。GWR模型允许在不同的地理区域有不同的空间关系存在，可以在空间上对每个参数进行估计，其结果是局部性的并非全局性的参数估计，从而能够探测到空间数据的空间非平稳性，揭示影响因素对水碘含量贡献大小的空间变化[4]。

5. 统计学分析

采用excel 2021软件录入数据并进行整理，采用R 4. 0. 4软件进行空间自相关分析、热点分析、OLR和GWR分析，检验水准α=0. 05。

结　果

1. 生活饮用水水碘空间自相关分析和热点分析

全省共采集样本53990份，水碘中位数为6. 66 μg/L，水碘范围0. 10~779. 40 μg/L。全局空间自相关分析显示，陕西省居民生活饮用水水碘含量分布呈现明显的空间正相关性，Moran's *I*=0. 735，（*Z*=43. 829，*P*<0. 001）。热点分析结果显示，关中地区存在显著的水碘含量空间聚集特征。显著的热点区域（*Z*>2. 58，*P*<0. 01）集中分布于关中地区的4个市共11个县，包括西安市的阎良区、高陵区，咸阳市的秦都区、泾阳县、三原县，渭南市的临渭区、富平县、大荔县、蒲城县、澄城县、合阳县，这些区域的水碘含量呈现高度空间聚集状态，表明该地区水碘含量显著高于周边区域。显著的冷点区域（*Z* <−1. 96，*P* <0. 05）主要分布于陕南地区的安康市宁陕县和安康市汉滨区。

2. OLR模型分析

以各县水碘含量为因变量，以各县GDP、平均海拔、平均坡度、年平均气温、年降雨量、年日照时长、NDVI为自变量，采用OLR模型进行分析，结果显示，构建的回归模型具有统计学意义（*F*=15. 585，*P*<0. 001），按照检验水准α=0. 05，GDP、平均海拔和平均坡度被纳入回归模型，R^2=0. 524，R^2_{adj}=0. 491，提示这3个变量可以解释水碘总变异的49. 1%，详见表1。

表1　OLR模型分析结果

变量	回归系数	标准误	*t*	*P*
GDP	−0. 011	0. 003	−4. 236	<0. 001
平均海拔	−0. 028	0. 010	−2. 798	0. 006
平均坡度	−0. 483	0. 185	−2. 609	0. 010
年平均气温	−3. 090	1. 708	−1. 809	0. 073
年降雨量	−0. 004	0. 007	−0. 497	0. 621
年日照时长	0. 002	0. 003	0. 576	0. 566
NDVI	3. 571	10. 409	0. 343	0. 732
常量	82. 576	30. 420	2. 715	0. 008

3. GWR模型分析

以陕西省各县水碘水平作为因变量，将各县GDP、平均海拔、平均坡度、年平均气温、年降雨量、年日照时长、NDVI作为自变量，构建GWR模型进行分析，结果见表2。由GWR分析回归系数估计值的分布情况可知，居民饮用水水碘的GWR模型各自变量回归系数的估计值皆存在较大的空间变异性。GWR分析得，R^2 = 0. 808，R^2_{adj} = 0. 795，*AICc* =740. 988，R^2及

R^2_{adj}相比于OLS模型明显增大，表明GWR模型在捕捉变量间的空间异质性方面明显优于传统OLS回归。从回归系数中位数绝对值反映的影响程度大小依次为：NDVI、年平均气温、平均坡度、平均海拔、GDP、年降雨量和年日照时长。

表2 GWR模型回归系数统计描述

变量	*min*	*max*	*M*	P_{25}	P_{75}	*S*
GDP	−0.018	0.003	−0.005	−0.007	−0.004	0.004
平均海拔	−0.073	0.022	−0.025	−0.057	−0.006	0.028
平均坡度	−2.043	1.92	−0.642	−0.905	−0.424	0.650
年平均气温	−8.419	14.277	−2.874	−6.907	−0.47	4.701
年降雨量	−0.221	0.009	−0.001	−0.006	0.004	0.033
年日照时数	−0.024	0.012	0	−0.002	0.001	0.005
NDVI	−71.577	90.571	37.078	10.888	57.926	35.591
R^2			0.808			
Adjusted R^2			0.795			
AICc			740.988			

为了分析各影响因素对水碘含量的空间异质性，绘制GWR模型的拟合系数空间分布图，图形结果显示：GDP的回归系数普遍为负（−0.018~0.003），全省98.1%的县区表现为负相关，但地区间差异较小，表明其对水碘含量的影响相对有限。平均海拔的回归系数在−0.073~0.022，84.11%的县区为负相关，空间上中部的负效应最强，向北和东南逐渐减弱。平均坡度的回归系数范围为−2.043~1.920，全省88.79%的县区为负相关，仅榆林等少数地区呈正相关。其影响表现出从东南向西北递增的梯度特征。年平均气温的回归系数介于−8.419~14.277，其中80.37%的县区为负值。空间上呈现北正南负的格局，关中地区以负相关为主，而陕北与陕南则多为正相关。年降雨量的回归系数介于−0.221~0.009，约57.94%的县区为负相关，其余为正相关，显示出较强的空间异质性。年日照时长的回归系数范围较小（−0.024~0.012），均值接近零，54.21%的县区为正相关，说明其整体对水碘含量的解释力较弱，但仍存在一定的区域差异。NDVI的回归系数范围最大（−71.577~90.571），表现出明显的东西梯度分布特征，陕西东南地区（如商洛、渭南）呈较强的正相关，而陕北地区（如榆林定边、延安吴起）则呈明显负相关。

讨 论

陕西省居民生活饮用水水碘含量普遍较低，全省水碘中位数为6.66μg/L。全局空间自相关分析显示，陕西省水碘分布呈现明显空间正相关性，且存在显著热点与冷点区域，热点区域集中于关中部分地区，冷点主要在陕南特定县区。这一结果与山东[5]、温州[6]等地的研究结论一致，均验证了水碘分布受地理环境影响的普遍规律。

OLS和GWR对陕西省居民饮用水水碘含量的影响因素进行了系统性分析。结果显示，GWR模型的拟合优度（R^2_{adj} =0.795）显著优于OLS模型（R^2_{adj} = 0.491），且*AICc*值（740.988）也进一步验证了GWR在捕捉空间非平稳性方面的优势。这一发现与山东省[7]类似研究的结论一致，表明地理加权回归方法在揭示水碘空间异质性影响因素中具有普适性，GWR模型通过局部参数估计，更精准地刻画了各影响因素的空间分异性特征[8]。

从自然地理因子看，地形与气候的协同效应主导了水碘的空间分异格局。平均坡度与海拔的回归系数呈现东西梯度分异，陕北黄土高原区坡度系数负相关与关中盆地海拔系数负效应的耦合，反映了陡峭地形加速碘淋溶与低洼地形延长地下水滞留时间的双重机制[9]。气候因子的南北对立特征尤为显著：陕北气温正相关（局部系数高达14.277）源于干旱区蒸发浓缩作用，而陕南降雨负相关（57.94%县区系数为负）可能与秦巴山区充沛降水导致的碘淋溶迁移相关[10]，气温系数的变异幅度（标准差4.701）远超降雨量（标准差0.033），表明蒸发效应对水碘浓度的提升作用强于湿润区的稀释效应。社会经济与生态因子的交互作用进一步强化了空间异质性。GDP在98.1%的县区呈负相关。关中平原作为全省经济核心区，工业化进程可能加速地下水开采，导致深层低碘水的上升补给，进而稀释浅层富碘含水层[11]。此外，陕北榆林等地作为能源开发区，近年来经济发展迅速，已经成为陕西省重要的经济增长极，但是经济的发展也可能伴随工业污染或地下水开采，这都有可能间接影响水碘分布[12]。但GDP回归系数绝对值中位数仅为0.005，说明其对水碘作用有限，影响强度远低于生态因子。NDVI的空间极化效应（系数范围−71.577~90.571，标准差35.591）揭示了生态调节的核心地位：陕南高植被区（商洛、渭南）的正相关源于根系分泌物促进土壤碘活化，而陕北荒漠草原区（榆林定边）的负相关则与植被稀疏导致的表土流失及深层低碘基岩水补给相关[13]，其影响强度（中位数绝对值37.078）居所有变量之首。陕西省水碘热点区域集中分布于关中盆地东部（如临渭区、富平县等），其成因需结合地质历史与人类活动综合解析。渭河冲积平原第四纪富碘沉积层提供物源基础，与山东黄泛平原成碘模式相似[14]；而GDP负效应在此区域最强（局部系数−0.018）与城市扩张加速深层低碘水混合有关，叠加NDVI正系数反映的农田植被固碘作用，形成“地质−生态−经济”三元协同机制。

本研究为陕西省碘缺乏病及高碘甲状腺疾病的精准防控提供了科学依据。首先，针对关中盆地热点

（下转第707页）

ing[J]. Psychology International, 2025, 7(4): 84.
[13] Bagozzi RP, Yi Y. On the evaluation of structural equation models [J]. JAMS, 1988, 16(1): 74-94.
[14] Scott JE. The measurement of information systems effectiveness[J]. ACM SIGMIS Database, 1995, 26(1): 43-61.
[15] Hair JF Jr, Babin BJ, Krey N. Covariance-based structural equation modeling in the Journal of Advertising: Review and recommendations[J]. J Advert, 2017, 46(1): 163-177.
[16] Zhu R, Hou W, Wang L,et al. Willingness to purchase institutionalised elderly services and influencing factors among Chinese older adults: A nationwide cross-sectional study[J]. BMJ Open, 2024,14 (3):e082548.
[17] Liu X, Yu HJ, Zhang MZ, et al. The transition of eldercare responsibility and traditional filial piety concepts and its urban-rural differences in China: An age-period-cohort analysis from 2006 to 2017 [J]. BMC Public Health, 2024, 24:1669.
[18] Sadarangani T, Fernandez Cajavilca M, Qi X, et al. Adult day services: A potential antidote to social isolation and loneliness in marginalized older adults[J]. Front Public Health, 2024,12:1427425.
[19] Cai S, Pei Q, Wang X, et al. Inequity in the utilization of the home and community integrated healthcare and daily care services in older adults with limited mobility in China[J]. BMC Geriatr, 2024, 24: 744.
[20] Wang J, Wang Z, Niu B. Empirical analysis of preferences of older adults for care facilities in Japan: Focusing on household structure and economic status[J]. Healthcare, 2023, 11(13): 1843.
[21] Lou S, Liu H. Awareness, use, and need of smart care for older adults: A comparative study based on a survey in Macao, China[J]. Front Public Health, 2023, 11:1135164.
[22] Ko AJ, Xu H, Lee H, et al. Association between the utilization of senior centers and health and social outcomes among older adults: A cross-sectional study[J]. Sci Rep, 2024, 14:11518.
[23] Rodríguez-Martínez A, De-la-Fuente-Robles YM, Martín-Cano MdC, et al. Quality of life and well-being of older adults in nursing homes: Systematic review[J]. Soc Sci, 2023,12(7):418.
[24] Ma W, Shen Z. Impact of community care services on the health of older adults: Evidence from China[J]. Front Public Health,2023,11: 1160151.
[25] Barrio-Cortes J, Castaño-Reguillo A, Beca-Martínez MT, et al. Chronic diseases in the geriatric population: morbidity and use of primary care services according to risk level[J]. BMC Geriatr, 2021, 21(1):278.
[26] 冯美菱,吴绍峰,李静,等. 我国患慢性病老年人社区养老服务需求研究[J]. 攀枝花学院学报,2024,41(1):29-37.
[27] 司明舒,邵梅英,吴胤歆,等. 基于Andersen行为模型的机构内老年人医养结合模式选择及其影响因素研究[J]. 中国卫生统计,2021, 38(1):33-38.
[28] Xu X, Li P, Ampon-Wireko S. The willingness and influencing factors to choose institutional elder care among rural elderly: An empirical analysis based on the survey data of Shandong Province [J]. BMC Geriatr,2024,24:17.
[29] Xie F, Deng A, Chen J, et al. Factors associated with willingness to receive a novel community care service for older people in Foshan, China: A cross-sectional study[J]. BMC Health Serv Res, 2022, 22: 575.

（责任编辑：张　悦）

（上接第701页）

区域需加强地下水碘含量的动态监测，协调工业用水与居民饮水安全；其次，水碘热点区域在开展地质勘探时，应进一步明确富碘含水层空间范围，确保加碘盐政策的科学性[15]。陕南冷点区则需关注植被恢复与水土保持工程，优化碘元素的地表-地下水循环路径，建议建立基于GWR模型的水碘风险分级地图，实现干预措施的空间靶向化。本研究存在以下局限之处：一是横断面数据难以揭示影响因素与水碘的因果时序关系，未来需结合长期监测构建时空耦合模型；二是未纳入地下水开采强度等关键中介变量，后续可补充企业点位等大数据完善指标体系进一步探索分析。

参 考 文 献

[1] 吴赵明, 张向东, 郭百锁, 等. 2020年山西省水源性高碘地区监测结果分析[J]. 中华地方病学杂志, 2023,42(12):947-950.
[2] 栗珊珊, 年云鹏, 高雪娟, 等. 2022年陕西省居民生活饮用水碘含量空间分布情况分析[J]. 中华地方病学杂志, 2025, 44(11): 890-894.
[3] 肖文静, 丁玉松, 徐上知, 等. 2020年湖北省重点人群碘营养水平及空间分布状况[J]. 中华地方病学杂志, 2023,42(2):139-143.
[4] Yang R, Shen T, Yin W, et al. Geographically weighted regression: a scoping review of methods, development, and applications[J]. Land, 2026, 15(6): 915.
[5] 高杰, 张志杰, 王增亮, 等. 2008-2010年山东省居民饮用水碘空间分布特征分析[J]. 中华预防医学杂志, 2013,1(47):18-22.
[6] 高四海, 张鹤美, 林丹, 等. 温州市居民生活饮用水碘空间分布特征[J]. 预防医学, 2019,31(6):564-567.
[7] 高红旭, 张本政, 尹玉岩, 等. 基于空间地理加权回归分析的山东省居民饮用水水碘的影响因素分析[J]. 中华地方病学杂志, 2018, 37(12):948-953.
[8] 刘茂, 叶云杰, 尚莉, 等. 2020年江苏省部分地区饮用水碘含量调查结果分析[J]. 中华地方病学杂志, 2023,42(6):473-476.
[9] 马成. 黄河流域陕西段脆弱生态区坡面侵蚀特征与有效植被盖度研究[D]. 西安: 长安大学, 2024.
[10] 徐盼盼,申艳军,钱会,等. 秦岭北麓生态协调控制带西安段地下水质量评价及其生态环境效应[J/OL]. 地质通报,1-15[2025-08-29]. https://link. cnki. net/urlid/11. 4648. P. 20250320. 1641. 028.
[11] 刘博文, 张立平, 王江伟, 等. 渭河流域近30年气象水文要素的特征分析[J]. 广东气象, 2025,47(1):30-34.
[12] 王乐力, 丁叶, 王贵, 等. 鄂尔多斯盆地北部某砂岩型铀矿地下水水位异常成因分析[J]. 铀矿冶, 2022,41(3):248-255.
[13] 庞绪贵, 陈建, 王红晋, 等. 山东省黄河下游流域高碘地甲病分布与地球化学环境相关性[J]. 山东国土资源, 2011,27(2):20-24.
[14] 高杰, 高红旭, 云中杰, 等. 基于地理信息系统的山东省居民饮用水水氟空间分布特征分析[J]. 中华地方病学杂志, 2018,37(4): 283-286.
[15] 梁娜, 张磊, 孟祥勇, 等. 山东省沿黄河流域水源性高碘地区儿童碘营养状况分析[J]. 中华地方病学杂志, 2024,43(4):318-322.

（责任编辑：林美艺）