

引用格式: 谭力, 王占岐, 薛志斌, 等. 南水北调中线核心水源区土壤氟空间变异特征与污染风险评价[J]. 资源科学, 2021, 43(2): 368-379. [Tan L, Wang Z Q, Xue Z B, et al. Spatial variability and pollution risk assessment of soil fluorine in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project[J]. Resources Science, 2021, 43(2): 368-379.] DOI: 10.18402/resci.2021.02.14

# 南水北调中线核心水源区土壤氟空间变异特征与污染风险评价

谭力, 王占岐, 薛志斌, 杨斌

(中国地质大学(武汉)公共管理学院, 武汉 430074)

**摘要:** 本文以生态环境脆弱的南水北调中线核心水源区为研究对象, 运用GIS与地统计学相结合的方法以及污染风险评估模型, 定量揭示了研究区土壤氟元素含量的空间变异特征、分布格局和污染风险等级。结果表明: ①研究区土壤氟元素含量整体偏高, 具有较明显的空间自相关性, 表层土壤氟密度呈现从西向东、从南向中北部逐渐增加的趋势, 并在中东部的南阳市淅川县仓房镇和丹江口市石鼓镇出现明显的单核聚集, 与该区域地层岩性及成土母质特征对应; 而土壤氟净增量状况则表明大部分地区氟含量都与后期人类活动有关; ②氟环境污染程度具有较明显的区域分异性, 根据地累计指数特性, 表明除丹江口市习家店镇和嵩坪镇受成土母质等结构性因素制约外, 其余地区多为人类活动造成的环境污染所致; ③潜在生态风险程度表现为低风险区主要分布在研究区的西部和南部, 中等风险区主要集中在中东部和北部。少量分布的高等风险区应引起重视, 如淅川县盛湾镇东部、仓房镇西部以及丹江口市嵩坪镇和石鼓镇。研究结果旨在为土壤氟环境改善、库区饮用水安全保障等提供数据和技术支撑, 同时也给当地土壤修复治理、确保优质清水北调提供决策依据。

**关键词:** 核心水源区; 土壤; 氟; 空间变异特征; 环境污染状况; 生态风险评价; 南水北调中线

DOI: 10.18402/resci.2021.02.14

## 1 引言

中国土壤氟污染问题日益严峻, 是目前重点关注的环境问题之一。氟具有双阈值性, 饮用水和食物中的氟缺乏或过量都会对人体健康造成危害, 同时也给当地土壤环境安全造成严重威胁, 对生态系统的结构与功能带来负效<sup>[1]</sup>。2018年8月1日起, 施行《土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(试行)》《土壤环境质量建设用地土壤污染风险管控标准(试行)》方案, 表明土壤污染管控已成为影响生态环境建设的重点问题, 也是社会各界关注与研究的热点<sup>[2]</sup>。2020年6月, 经中央全面深化改革委员会第十三次会议审议通过, 国家发展改革委、自然资源部印发了《全国重要生态系统保护和修复

重大工程总体规划(2021—2035年)》, 进一步明确要全面加强国家重点生态功能区、生态保护红线、国家级自然保护区等区域的生态保护和修复, 其中, 注重土地生态文明建设、促进土地资源质量保护成为可持续发展的核心需求。

目前, 土壤氟的相关研究多集中于土壤氟的形态分布、地球化学特征及其对生态环境的影响等<sup>[3-5]</sup>。在地统计学中, 与土壤相关的空间变异特征研究主要侧重于土壤养分、土壤厚度和土壤容重等<sup>[6-9]</sup>, 尚缺乏氟元素空间变异特性研究。在定量评估污染对生态环境的影响方面, 土壤环境质量和生态风险评估模型多应用于重金属元素研究<sup>[10-12]</sup>。少数学者开展了对氟污染评价的单一研究, 例如, 叶群峰等<sup>[13]</sup>

收稿日期: 2020-06-18 修订日期: 2020-09-19

基金项目: 中国地质调查局武汉地质调查中心项目(DD20160256)。

作者简介: 谭力, 男, 湖北武汉人, 博士研究生, 主要研究方向为土地评价与土壤生态。E-mail: 280368711@qq.com

通讯作者: 王占岐, 男, 陕西岐山人, 教授, 博士生导师, 主要研究方向为土地评价、土地生态、土地利用与规划。E-mail: zhqwang@cug.edu.cn

南水北调中线工程是缓解中国北方水资源严重短缺局面的战略性跨流域调水工程<sup>[17]</sup>,该工程自2014年12月12日正式通水以来,截至2020年5月,已向北京、天津、河北和河南4省市累计供水超过290亿m<sup>3</sup>,成为沿线24座大中城市供水的生命线。对于南水北调中线核心水源区的界定没有确切定义,但参考国家发展改革委、南水北调办印发的《丹江口库区及上游地区对口协作工作方案》的通知,核心水源区指距离丹江口水库水面较近、城市及工业污染对水库水质直接影响的共9个县(市、区)地区<sup>[18]</sup>。该地区承担着南水北调中线工程供水的艰巨任务,同时,当地部分区域是氟病高发地区,土壤氟含量超标直接或间接地影响库区及受水地区饮用水质量,其沿线地区生态环境状况与自身水资源高质量发展关乎华北地区几千万人的用水安全问题,对受水地区经济社会稳定及确保一库清水北调具有十分重要的意义<sup>[19]</sup>。目前,对于南水北调中线工程核心水源区这一生态环境脆弱区的氟污染鲜有研究涉及,本文以南水北调中线工程核心水源区为研究区,借助GIS与地统计学相结合的方法,并采用污染风险评估模型,结合研究区区域特征,定量分析土壤氟元素含量的空间变异特征,探究氟环境污染状况、潜在生态风险等级及其空间分布规律,有效揭示氟污染严重和生态风险较高的地区,并结合氟含量净增量分布、地累计指数模型特征以及土壤类型分布情况等,判断人为影响和自然因素影响的

南水北调中线工程核心水源区包括河南省南阳市淅川县、西峡县、邓州市、内乡县,湖北省十堰市张湾区、茅箭区、丹江口市(含武当山特区)、郧阳区(原郧县)、郧西县共9个县(市、区)<sup>[18]</sup>,研究区主要涉及核心水源区湖北省十堰市的全部5个县(市、区)以及河南省南阳市淅川县和西峡县辖区内的38个乡、镇及街道,总面积为6022.59 km<sup>2</sup>,包含汇入丹江口水库的汉江、丹江两大流域,水域面积达到930.49 km<sup>2</sup>,占丹江口水库面积的80%以上,是丹江口水库的核心沿线地带,地理位置处于东经110°30′—111°45′,北纬32°30′—33°20′,区位示意图如图1所示。气候属季风性气候区,年平均气温为15~16℃,年均降水量为800~1000 mm。地质地层复杂,主要为元古界与中生界,少量古生界和新生界,含多种岩石,以变质岩浆岩和碳酸盐岩为主;东部河南省南阳市地处秦岭支脉伏牛山南麓山区,总体地势由西北向东南倾斜,地貌类型主要为侵蚀剥蚀



<http://www.resci.cn>

低山区、侵蚀剥蚀丘陵区 and 堆积平原区三大类,西部湖北省十堰市受秦巴山脉的影响,地势总体呈现西北高、东南低的特点,地貌以丘陵、低山和中山为主;土壤类型主要有黄棕壤、粗骨土和黄褐土,土壤pH以弱酸性为主;土地利用类型主要有林地、耕地、水域及水利设施用地、园地和住宅用地,土地利用类型面积占比如表1所示。

2.2 样品采集及检测

样品采集和检测工作严格按照《多目标区域地球化学调查规范(1:250000)》要求<sup>[20]</sup>,表层土壤以

表1 南水北调中线核心水源区土地利用类型统计

Table 1 Statistics of land use types in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

地类名称	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
耕地	1176.81	19.54
园地	410.74	6.82
林地	2915.54	48.41
草地	103.59	1.72
商服用地	52.41	0.87
工矿仓储用地	128.28	2.13
住宅用地	171.04	2.84
公共管理与公共服务用地	40.95	0.68
特殊用地	16.86	0.28
交通运输用地	37.34	0.62
水域及水利设施用地	930.49	15.45
其他土地	38.54	0.64
合计	6022.59	100.00

1 km<sup>2</sup>为单位网格,按照6件/km<sup>2</sup>、采集深度为0~20 cm进行网格化采样,采集样品质量大于1 kg;垂向剖面土壤以1件/16 km<sup>2</sup>的采集密度,按照土壤垂向分层明显的剖面采集母质层、淀积层、淋溶层、腐殖层(根系土)样品各1个,土壤垂向分层不明显的剖面,采集0~50 cm、50~100 cm、100~150 cm、150~200 cm等层垂向土壤剖面样品各一个(自下往上采集),每个样品原始重量大于1 kg,每个垂向剖面采集4个样品。采样时避开人为污染和后期堆积,确保采样厚度达标,保证样品的均匀性和代表性,共采集表层土壤样品7735件,垂向剖面土壤样品88组共352件,采样时间为2017年8—10月和2018年8—10月。

样品经自然风干后,用木槌轻轻敲打,过10目标准筛,收集400 g装入样品袋,及时送回检测单位进行测试分析,分析项目包括氟含量、pH、土壤养分(全氮、总磷)和重金属含量(铬、镍、铜、锌、砷、镉、铅、硒、汞)在内的共13个指标,检测方法如表2所示。样品的保存及分析测试均按国家有关标准方法及国家环保局颁布的《环境检测质量管理规定》(2006)和《土壤环境检测技术规范》(HJ-T 166-2004),分析质量控制采用外部质量控制和内部质量控制相结合的办法,通过分析国家一级标准物质(GBW)进行检验,并执行三级审核制度,检出限及合格率完全满足要求。

表2 样品检测方法统计

Table 2 Sample testing methods

检测项目	检测方法	主要仪器设备	检出限
pH	NY/T 1377-2007	多参数水质分析仪 HQ30D	—
全氮	凯氏法 HJ 717-2014	容量瓶	48.00 mg/kg
总磷	碱熔-钼锑抗分光光度法 HJ 632-2011	可见分光光度计 722	10.00 mg/kg
全氟	选择性离子电极法(ISE)GB/T 22104-2008	氟离子选择电极	25.00 mg/kg
铬	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	1.00 mg/kg
镍	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	1.90 mg/kg
铜	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	1.20 mg/kg
锌	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	3.20 mg/kg
砷	微波消解/原子荧光法 HJ 680-2013	原子荧光光度计 AFS-8510	0.50 mg/kg
镉	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	0.60 mg/kg
铅	电感耦合等离子体质谱法 HJ 766-2015	电感耦合等离子体发射质谱仪 NexION 350D	2.10 mg/kg
硒	微波消解/原子荧光法 HJ 680-2013	原子荧光光度计 AFS-8510	0.60 mg/kg
汞	微波消解/原子荧光法 HJ 680-2013	原子荧光光度计 AFS-8510	0.002 mg/kg



2021年2月

### 2.3 数据处理及空间变异特性分析方法

将 7735 个表层土壤和 88 个底层土壤氟元素含量采用域法识别特异值,即单一样品含量与均值进行比较,差值大于 3 倍标准方差为特异值,在后续空间分析中用正常最大值替代特异值,共处理 137 个表层土壤和 2 个底层土壤特异值,用正常最大值表层(1260.00 mg/kg)和底层(983.50 mg/kg)替代,表层土壤特异值主要分布在丹江口市石鼓镇和南阳市淅川县仓房镇,两个底层土壤特异值均分布在丹江口市石鼓镇。剔除特异值后,土壤氟元素含量的正态分布检验结果基本呈正态分布。为避免原始数据规律性增强,仅做剔除特异值处理<sup>[21]</sup>。采用空间自相关性分析和半方差函数在软件 GS+9.0 中计算土壤氟空间变异特性,并对理论模型进行了拟合。氟密度空间分布图、土壤氟净增量空间分布图、表层土壤氟污染状况和风险评价等相关分布图等利用普通 Kriging 以及 IDW 插值法在 ArcGIS 10.2 中分别绘制;土壤氟含量描述性统计、正态分布检验等均在 SPSS 19.0 中完成。

#### 2.3.1 空间自相关分析

全局 Moran's  $I$  系数作为地统计差值的基础,可以定量判断研究变量是否存在空间聚集区和空间隔离区。Moran's  $I$  系数的取值范围在 -1~1 之间,  $I > 0$  表示变量在空间上呈正相关,越接近 1 表明在空间上关系越密切,性质越相似(存在高值聚集或低值聚集);  $I < 0$  表示变量在空间上呈负相关,越接近 -1 表明在空间上差异越大或分布越不集中;  $I = 0$  则代表不存在相关性<sup>[22]</sup>。

#### 2.3.2 半方差函数分析

通过 GS+9.0 进行半方差函数分析,得到高斯模型拟合效果最优,以块金值  $C_0$ 、基台值  $C+C_0$  及变程  $A$  等参数表征表层土壤氟的空间变异性。从结构因素来看,当块金效应  $\leq 25\%$  时,体系具有较强的空间相关性;当块金效应为 (25%, 75%) 时,表明该体系

具有中等的空间相关性;当块金效应  $\geq 75\%$  时,系统的空间相关性很弱<sup>[23]</sup>。

#### 2.3.3 土壤氟净增量分析

深层土壤代表土壤原始沉积环境中的元素含量,表层土壤与深层土壤元素含量的差值为净增量,在一定程度上反映了后期人类活动引起的表层土壤中元素含量的叠加程度<sup>[24,25]</sup>。用单位表层土壤氟元素含量减去相应底层土壤氟元素含量得出研究区土壤氟净增量。

### 2.4 土壤氟污染及风险评价方法

#### 2.4.1 单因子指数法

单因子指数法适用于评价单一污染元素的污染程度,也是分析某一区域环境质量状况的基础。研究区土壤整体偏弱酸性,加之湖北省十堰市和河南省南阳市为酸雨地区,根据李静等<sup>[26]</sup>学者的研究,酸性土壤以全氟指数法对土壤环境质量进行评价。

#### 2.4.2 地累计指数法

地累计指数法 (Geoaccumulation Index) 通常称为 Muller 指数,由德国学者 Muller 于 1969 年提出<sup>[27]</sup>,该方法广泛应用于重金属污染方面的研究,目前也有学者应用于部分非金属污染的研究<sup>[13,28,29]</sup>,取得了较好成果,它不仅考虑了自然地质过程对背景值的影响,而且充分注意到了人类活动的影响<sup>[29]</sup>,是区分人类活动影响和自然变化特征的重要参数。计算公式如下:

$$I_{\text{geo}} = \log_2 [C_n / (k \times B)] \quad (1)$$

式中:  $I_{\text{geo}}$  为地累计指数;  $C_n$  为土壤中第  $n$  个样点氟含量的实测值 (mg/kg);  $B$  为氟元素的背景值 (mg/kg), 分别选取湖北省与河南省的两种表层土壤背景值作为各区域对应样点的参比值<sup>[30]</sup>;  $k$  为考虑沉积特征、岩石地质及其他影响的变异系数<sup>[29]</sup>, 本文取值为 1.5。地累计指数分级标准如表 3 所示。

#### 2.4.3 潜在生态风险指数法

潜在生态风险指数 (The Potential Ecological

表 3 地累计指数分级标准

Table 3 Distribution of topsoil sampling sites in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

地累计指数 $I_{\text{geo}}$	$I_{\text{geo}} \leq 0$	$0 < I_{\text{geo}} \leq 1$	$1 < I_{\text{geo}} \leq 2$	$2 < I_{\text{geo}} \leq 3$	$3 < I_{\text{geo}} \leq 4$	$4 < I_{\text{geo}} \leq 5$	$I_{\text{geo}} > 5$
级别	0	1	2	3	4	5	6
污染程度	无污染	无-中度污染	中度污染	中度-重度污染	重度污染	重度-严重污染	严重污染



Risk Index, RI)由瑞典学者 Hakanson 提出,是一种利用沉积学原理评估水体沉积物的方法<sup>[31]</sup>,许多学者利用潜在生态风险指数法进行土壤重金属污染评估,定量划定潜在风险程度<sup>[12,32,33]</sup>。在土壤-植物系统中,氟存在与河流沉积物-水体系统中类似的行为,因此,该方法也适用于土壤氟生态风险评估<sup>[14]</sup>,其单一污染元素计算公式:

$$E_i = T \times P_i = T \times (C_i/S) \tag{2}$$

式中: $E_i$ 是土壤中第*i*个样点氟的潜在生态风险指数; $T$ 为氟元素的毒性响应系数,本文把氟作为单独元素,以氟丰度值为校正丰度数值,得到其毒性响应因子  $T$  为 1<sup>[14]</sup>;  $P_i$  为第*i*个样点氟元素的单项污染指数;  $C_i$  为土壤中第*i*个样点氟含量的实测值 (mg/kg);  $S$  为土壤中氟的评价标准 (mg/kg)。依照薛栗尹等<sup>[14]</sup>对 Hakanson 潜在生态风险评估指标与分级关系做了修正,结果如表 4 所示。

3 结果与分析

3.1 土壤氟含量统计特征分析

南水北调中线核心水源区 7735 个表层土壤和 88 个底层土壤中氟元素含量统计结果见表 5。全区土壤氟含量整体偏高,表层土壤氟含量平均值为 586.83 mg/kg,底层土壤为 571.32 mg/kg,均大于河南省土壤表层氟背景值 406.00 mg/kg 和底层氟背景值 416.00 mg/kg<sup>[30]</sup>。表层土壤变异系数为 31.05%,底层土壤为 28.91%,根据变异系数的等级划分,表层土壤和底层土壤氟含量均为中等变异性,说明空间分布不均匀,可能存在局部氟污染区域。

土壤氟含量随深度变化特征如图 2 所示,可见,土壤氟含量随着采样深度的增加而呈现 Z 型波动,变化幅度较小,在 100~150 cm 处有明显增加,可能受成土过程中的外部影响。土壤垂向剖面样点以及土壤类型空间分布如图 3 所示,垂向剖面样点广泛分布于各区域,土壤类型主要有黄棕壤、粗骨土以及黄褐土,其中以黄棕壤为主,占比达到 35.66%,主要分布在研究区十堰市范围内的西部和南部;粗骨土和黄褐土主要分布在南阳市淅川县各区域,占比分别为 15.16%和 14.55%,如表 6 所示。

已有研究表明,土壤剖面中氟含量主要受黏粒含量和 pH 值的影响,其分布特征虽无明显的规律变化,但一致认为,在酸性淋溶土壤中,土壤剖面由上至下黏土矿物逐渐增多,土壤氟含量随黏土成分的增加而升高,故随土壤深度的增加而增加<sup>[34]</sup>。研究区土壤以酸性为主,且为酸雨地区,并根据土壤类型特征可知,黄棕壤的剖面中含有粘粒量较多的粘化层,质地粘重(粘壤土至粘土),土层紧实,尤以心底土中的粘粒聚积明显,并有铁锰胶膜和结核淀积,粗骨土以及黄褐土的质地砾质性均较强,表土层以下即为风化或半风化的母质层,夹有大量岩屑体。但本文土壤氟含量整体呈现出随深度增加而略微减少的趋势,说明研究区氟含量总体具有表面富集现象,受人为干扰较为明显。

3.2 表层土壤氟空间变异特征分析

3.2.1 空间自相关系数

由图 4 可知,本文研究区表层土壤氟含量的

表 4 土壤氟潜在生态风险评估指标与分级标准

Table 4 Evaluation index and grading standard of potential ecological risk of soil fluorine

潜在生态风险指数 $E_i$	$E_i < 1$	$1 \leq E_i < 2$	$2 \leq E_i < 4$	$4 \leq E_i < 8$	$E_i \geq 8$
风险程度	A(低)	B(中等)	C(高)	D(很高)	E(极高)

表 5 南水北调中线核心水源区土壤氟含量描述性统计

Table 5 Descriptive statistics of soil fluorine content in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

项目	样品数	氟含量/(mg/kg)						变异系数/%	偏度	峰度
		最大值	最小值	中值	平均值	标准差				
原数据	表层	7735	4760.80	133.00	565.80	593.72	222.66	37.50	3.978	37.920
	底层	88	1166.00	200.30	570.10	574.79	175.16	30.47	0.917	1.505
处理后	表层	7735	1260.00	133.00	565.80	586.83	182.20	31.05	1.325	2.994
	底层	88	983.50	200.30	570.10	571.32	165.19	28.91	0.593	0.413

2021年2月

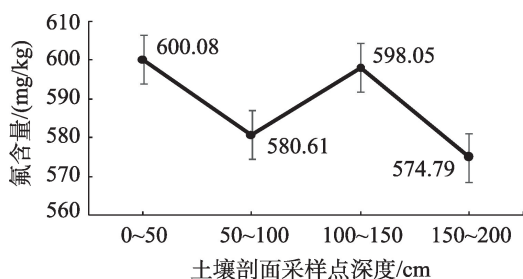


图2 土壤垂向剖面氟含量

Figure 2 Fluorine content in vertical profile of soil

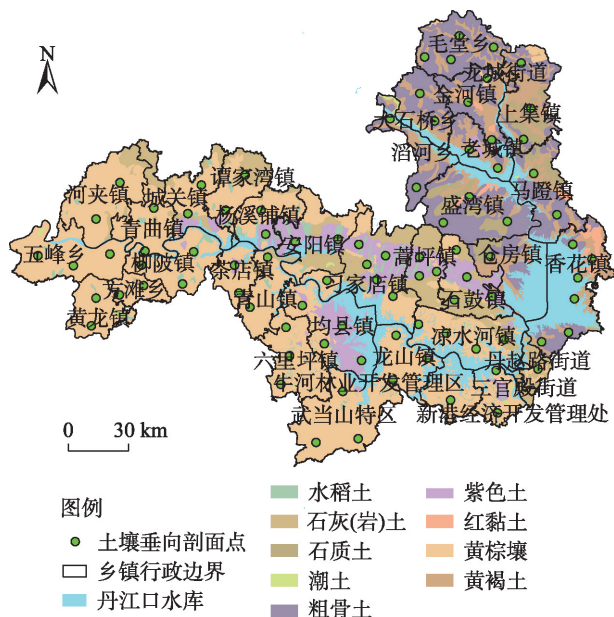


图3 研究区土壤垂向剖面样点及土壤类型分布

Figure 3 Distribution of vertical profiles of soil and soil types in the study area

表6 南水北调中线核心水源区土壤类型统计

Table 6 Statistics of soil types in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

土壤类型	面积/km <sup>2</sup>	占比/%
潮土	12.01	0.20
粗骨土	913.09	15.16
红黏土	44.88	0.75
黄褐土	876.16	14.55
黄棕壤	2147.80	35.66
石质土	237.71	3.95
石灰(岩)土	421.08	6.99
水稻土	112.81	1.87
紫色土	326.56	5.42

Moran's  $I$  系数在 0~19326.62 m 内为正值,呈较强的正相关,表明该区间存在明显的空间聚集性;随着距离的增加,在 19326.62~57979.86 m 范围内为负值,呈较弱的负相关关系,表明该区间存在空间隔离;整体上 Moran's  $I$  系数随着距离的增加而逐渐降低,说明距离越近关系越密切,距离越远关系越疏远,即研究区表层土壤氟含量存在空间自相关性,可进行地统计插值分析。

### 3.2.2 半方差函数分析

如表 7 所示,块金效应为 47.85%,属于中等强度的空间变异性,说明其空间变异是由磷肥和含氟农药、含氟灌溉水、工矿业生产和燃煤燃烧产生的大量含氟废物进入环境等随机性因素和成土母质、地形地貌、土壤类型、气候等结构性因素共同作用的结果,且在变程 21477.43 m 以内变量具有空间自相关性,远大于取样的最大间距,则表示采样点对该区域进行的无偏估计是可信的,能满足土壤氟元素空间变异评价需求。

### 3.2.3 表层土壤氟含量空间分布

南水北调中线核心水源区氟密度空间分布如图 5 所示,在中东部的丹江口市嵩坪镇和石鼓镇、南阳市淅川县仓房镇以及石鼓镇与仓房镇行政单元结合部出现较大的高密度聚集;在西部的十堰市郧阳区杨溪铺镇和青山镇结合部也出现较小的高密度聚集现象;南阳市淅川县的大石桥乡、金河镇、上集镇、滔河乡、盛湾镇、马蹬镇和香花镇以及丹江口市习家店镇也呈现较高密度;其余地区逐步降低,尤其是西部和南部,呈现较低的密度值。总体来

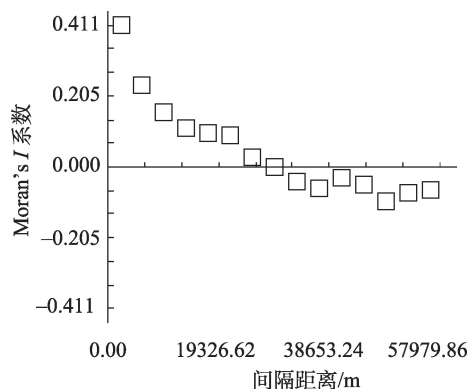


图4 表层土壤氟 Moran's  $I$  系数

Figure 4 Moran's  $I$  of topsoil fluorine

表7 土壤氟最优半方差函数模型及相关参数

Table 7 Optimal semivariogram model and related parameters of soil fluorine				
模型	块金值 $C_0$	基台值 $C+C_0$	变程 $A/m$	块金效应 $C_0/C+C_0/\%$
高斯模型	17460	36490	21477.43	47.85

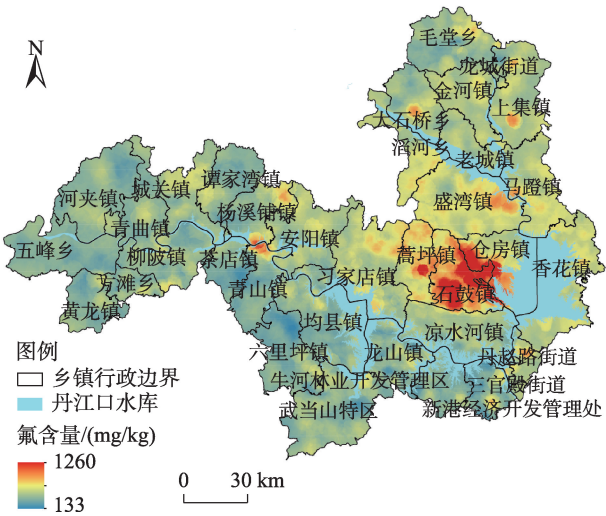


图5 南水北调中线核心水源区表层土壤氟含量密度分布  
Figure 5 Density distribution of topsoil fluorine content in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

看,氟密度空间结构上呈现从西向东、从南向中北部逐渐增加的趋势,并在中东部出现明显的单核聚集,主要集中在南阳市淅川县仓房镇和丹江口市石鼓镇。

根据《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295-2016)中氟分级划分标准<sup>[35]</sup>,上述高密度区域表现为氟过剩或高等级,面积为3284.12 km<sup>2</sup>,占研究区总面积的54.33%,其中过剩区域面积为1087.08 km<sup>2</sup>,占到18.05%。南阳市淅川县与丹江口市石鼓镇是氟病高发地区,该区域下伏地层主要包含白龙庙组、水沟口组、大仓房组、玉皇顶组和岳家坪组,该地层含多种岩石类型,如白云岩、石英砂岩、角砾岩、棕红色泥岩、灰白色泥灰岩等,但主要以白云岩为主,徐荣立等<sup>[36]</sup>在大巴山的研究表明,厚层硅质白云岩氟平均含量为880 mg/kg,故该地区土壤氟含量普遍超标很可能是由区域复杂的地质构造及其地层岩性引起。

3.2.4 土壤氟净增量空间分布特征

如图6所示,十堰市郧阳区城关镇、南阳市淅川

县毛堂乡、丹江口市蒿坪镇、丹江口市的牛河林业开发管理区和三官殿街道氟净增量密度较高,空间结构形成5个最高值中心,根据净增量反映表层土壤中氟含量的叠加程度,可剔除自然背景,说明这些地区氟含量受后期人为作用影响较大;十堰市郧阳区的五峰乡和杨溪铺镇、丹江口市武当山特区北部、丹江口市石鼓镇以及南阳市淅川县香花镇南部形成5个最低值中心,这些地区底层氟含量较高,说明可能并不是后期人类活动导致,而是与土壤形成时的原始沉积环境有关,也与前文分析结果中石鼓镇和仓房镇的氟含量较高是与该区域地层岩性有关相吻合;其余地区净增量大部分为正值,说明研究区大部分地区氟含量可能与后期人类活动有关。

3.3 表层土壤氟污染状况及风险评价

3.3.1 环境质量状况分析

利用单因子指数法对研究区土壤氟环境质量进行评价,评价结果如表8所示。可知,总体上研究区单因子污染程度以低污染和中度污染为主,样品占比分别为58.34%和41.36%,另有0.27%的强污染和0.03%的极强污染样品。从空间分布上来看(图7),有较为明显的区域差异性,污染区域主要集中在东部和北部,污染程度主要为中度污染,西部和南部污染程度较低;地域性表现为越靠近河南省南阳市污染越严重,越靠近湖北省十堰市污染程度越

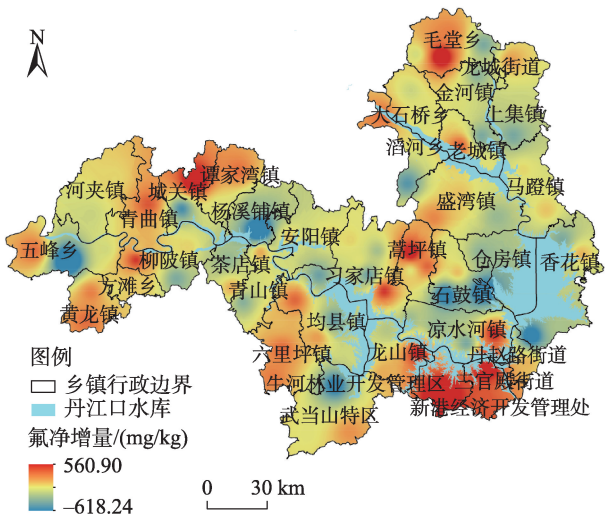


图6 南水北调中线核心水源区土壤氟净增量密度分布

Figure 6 Density distribution of net increment density of soil fluorine in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project



2021年2月

表8 研究区土壤氟各评价方法分级统计

Table 8 Degree of soil fluorine pollution by evaluation methods in the study area

项目	污染等级	污染样品占比/%
单因子指数 $P_i$	一级(低污染)	58.34
	二级(中度污染)	41.36
	三级(强污染)	0.27
	四级(极强污染)	0.03
地累计指数 $I_{geo}$	0(无污染)	83.36
	1(无-中度污染)	16.34
	2(中度污染)	0.28
	3(中度-重度污染)	0.02
	4(重度污染)	0.00
	5(重度-严重污染)	0.00
	6(严重污染)	0.00
潜在生态风险指数 $E_i$	A(低)	58.35
	B(中等)	38.86
	C(高)	2.68
	D(很高)	0.13
	E(极高)	0.00

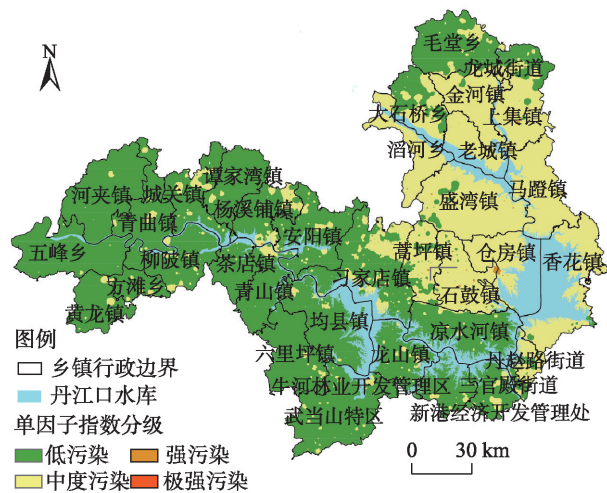


图7 以单因子指数表示的表层土壤氟污染空间分布

Figure 7 Spatial distribution of pollution degree of single factor index of topsoil fluorine

低;强污染和极强污染位于丹江口市的嵩坪镇、石鼓镇和南阳市淅川县仓房镇的部分区域。

由表8可知,研究区地累计污染程度大部分以无污染为主,样品占比达到83.36%;有16.34%的样品污染程度为无-中度污染;还有少数样品污染程度达到中度污染和中-重度污染,占比分别为0.28%、0.02%;无重度污染及以上污染现象。由图8

可知,空间分布上,污染区域主要集中在研究区的河南省南阳市淅川县以及丹江口市的石鼓镇,其余地区基本呈无污染状态;淅川县的污染程度主要以无-中度污染为主,在上集镇、盛湾镇、马蹬镇和仓房镇的部分区域存在少数中度污染和中-重度污染状况;在湖北省十堰市内,无-中度污染主要集中在丹江口市嵩坪镇和石鼓镇,中度污染和中-重度污染在郧县区杨溪铺镇、丹江口市嵩坪镇和石鼓镇的部分区域有所分布。

地累计指数可以有效降低成土母质对土壤氟元素含量的影响,突出人为污染。对比以上两种评价方法可知,丹江口市嵩坪镇和习家店镇的氟污染程度在单因子指数法中为中度污染,在地累计指数法中为无污染,说明嵩坪镇和习家店镇的氟污染多与成土母质等结构性因素有关。在前文净增量分布分析中,嵩坪镇的土壤氟净增量密度较高,表明嵩坪镇土壤氟含量表面有明显堆积;结合环境污染评价结果,嵩坪镇氟污染也与成土母质因素相关;因此,综合来看,习家店镇的氟污染多与自然因素有关,嵩坪镇的氟污染是成土母质与后期人为因素共同作用的结果,其他污染地区多为人类活动造成的环境污染所致。

### 3.3.2 潜在生态风险指数评价结果

由土壤氟元素潜在生态风险指数评价结果(表

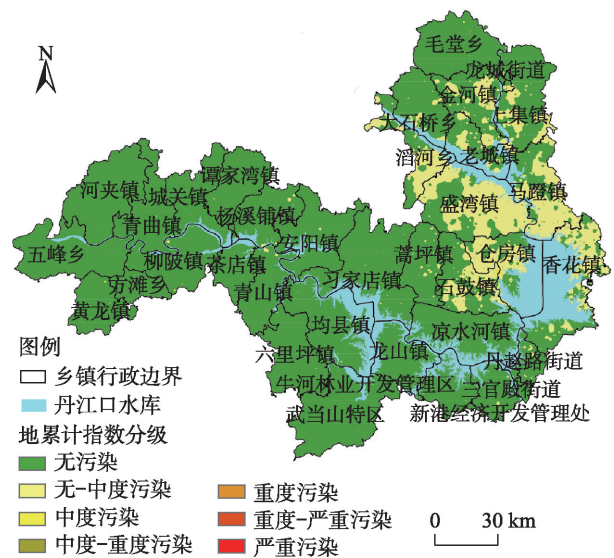


图8 以地累计指数表示的表层土壤氟污染空间分布

Figure 8 Spatial distribution of pollution degree of geoaccumulation index of topsoil fluorine

8)可知,研究区主要以低风险和中等风险为主,有58.35%的低风险区域和38.86%的中等风险区域。从空间分布上来看(图9),低风险区主要分布在研究区的西部和南部;中等风险区主要集中在研究区的中东部和北部;研究区存在2.68%的高风险区,主要分布在南阳市淅川县上集镇南部、盛湾镇东部、马蹬镇、仓房镇西部以及丹江口市嵩坪镇和石鼓镇,并在盛湾镇-马蹬镇、仓房镇-石鼓镇的行政单元结合部聚集明显;另有0.13%的很高风险区,分别在十堰市郧阳区杨溪铺镇南部、丹江口市嵩坪镇和石鼓镇、淅川县上集镇以及仓房镇与石鼓镇的行政单元结合部有所分布,相关区域应引起重视。

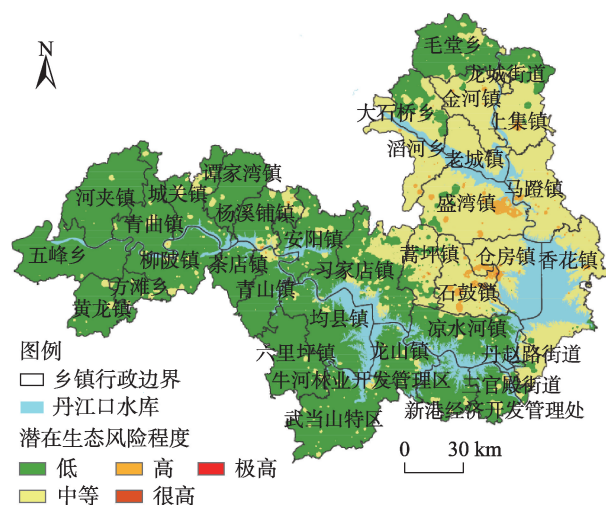


图9 表层土壤氟潜在生态风险空间分布

Figure 9 Spatial distribution of potential ecological risk of topsoil fluorine

## 4 结论

本文运用空间变异特性及污染风险评价等定量模型,探究南水北调中线核心水源区土壤氟元素含量整体状况及空间分布特征,同时揭示了区域氟环境污染状况及潜在生态风险程度,判断了人为和自然因素的影响区域。本文主要结论如下:

(1)研究区表层和深层土壤氟元素含量均高于河南省土壤氟含量背景值,变异系数表现为空间分布不均匀性;在土壤剖面中,氟含量均值深度变化没有随黏土的增加而升高,表层含量大于深层含量,说明氟含量总体具有表面富集现象。

(2)通过空间变异特性计算结果得出,表层土

壤氟含量具有明显的空间自相关性,并由块金效应发现其为中等程度变异,表明空间变异是受到自然因素和人为因素共同作用的结果。

(3)表层土壤氟含量密度总体呈现中东部和中北部高、西部和南部低的态势,并集中于中东部的南阳市淅川县仓房镇和丹江口市石鼓镇;结合研究区土壤类型分布情况,说明上述区域土壤氟含量较高与地层岩性及成土母质有很大关系;通过与土壤氟净增量空间分布对比发现,除仓房镇和石鼓镇外其余大部分区域为正值,说明研究区其余大部分区域氟含量都与后期人为堆积有关。

(4)单因子指数法和地累计指数法评价结果显示,污染分布具有明显的地域分异性,污染区域多集中于河南省南阳市,湖北省十堰市污染较低;地累计指数具有突出人为污染的特性,并对比净增量状况,说明习家店镇的氟污染多与自然因素有关,嵩坪镇是成土母质与后期人为因素共同作用的结果,其余地区的污染多为人类活动造成。

(5)就潜在生态风险而言,低风险区和中等风险区合计占比97.21%,其中,中等风险区主要集中在中东部和北部;此外,有占比2.68%的高风险区和占比0.13%的很高风险区,分布在南阳市淅川县盛湾镇东部、仓房镇西部以及丹江口市嵩坪镇和石鼓镇。

限于篇幅,未能提供相应管理对策及土壤修复建议,有待今后收集更全面的支撑数据,进一步从人为影响来源、政策调控以及生态文明建设等方面进行完善。

## 参考文献(References):

- [1] 杨金燕, 苟敏. 中国土壤氟污染研究现状[J]. 生态环境学报, 2017, 26(3): 506-513. [Yang J Y, Gou M. The research status of fluorine contamination in soils of China[J]. Ecology and Environmental Sciences, 2017, 26(3): 506-513.]
- [2] 刘需珈, 吴克宁, 罗明. 基于数据稳健性的农用地土壤重金属空间分异研究[J]. 中国土地科学, 2019, 33(5): 86-94. [Liu P J, Wu K N, Luo M. Research on spatial variation characteristics of agricultural land soil heavy metals based on data robustness[J]. China Land Science, 2019, 33(5): 86-94.]
- [3] 孟昱, 任大军, 张晓晴, 等. 林地土壤氟的形态分布特征及其影响因素[J]. 环境科学与技术, 2019, 42(9): 98-105. [Meng Y, Ren

2021年2月

- D J, Zhang X Q, et al. Speciation and distribution characteristics of fluorine and its impact factor in forest soil[J]. *Environmental Science & Technology*, 2019, 42(9): 98–105.]
- [4] 涂成龙, 何令令, 崔丽峰, 等. 氟的环境地球化学行为及其对生态环境的影响[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(1): 21–29. [Tu C L, He L L, Cui L F, et al. Environmental and geochemical behaviors of fluorine and its impacts on ecological environment[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2019, 30(1): 21–29.]
- [5] 何令令, 何守阳, 陈琢玉, 等. 环境中氟污染与人体氟效应[J]. *地球与环境*, 2020, 48(1): 87–95. [He L L, He S Y, Chen Z Y, et al. Fluorine pollution in the environment and human fluoride effect [J]. *Earth and Environment*, 2020, 48(1): 87–95.]
- [6] 杨静涵, 刘梦云, 张杰, 等. 黄土高原沟壑区小流域土壤养分空间变异特征及其影响因素[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(3): 743–754. [Yang J H, Liu M Y, Zhang J, et al. Spatial variability of soil nutrients and its affecting factors at small watershed in gully region of the Loess Plateau[J]. *Journal of Natural Resources*, 2020, 35(3): 743–754.]
- [7] 葛畅, 刘慧琳, 聂超甲, 等. 土壤肥力及其影响因素的尺度效应: 以北京市平谷区为例[J]. *资源科学*, 2019, 41(4): 753–765. [Ge C, Liu H L, Nie C J, et al. Scale effect of soil fertility spatial variability and its influencing factors[J]. *Resources Science*, 2019, 41(4): 753–765.]
- [8] 高峻, 何春霞, 张劲松, 等. 太行山干瘠山地土壤厚度空间变异及草灌群落分布特征[J]. *生态学报*, 2020, 40(6): 2080–2089. [Gao J, He C X, Zhang J S, et al. Spatial variability of soil thickness and the distribution characteristics of herb and shrub communities in the arid and barren areas of Taihang Mountains[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2020, 40(6): 2080–2089.]
- [9] 孙国军, 李卫红, 朱成刚, 等. 新疆伊犁河谷表层土壤容重的空间变异性分析[J]. *资源科学*, 2016, 38(7): 1222–1228. [Sun G J, Li W H, Zhu C G, et al. Spatial variation analysis of topsoil bulk density in the Yili Valley, Xinjiang[J]. *Resources Science*, 2016, 38(7): 1222–1228.]
- [10] 孙厚云, 吴丁丁, 毛启贵, 等. 新疆东天山某铜矿区土壤重金属污染与生态风险评价[J]. *环境化学*, 2019, 38(12): 2690–2699. [Sun H Y, Wu D D, Mao Q G, et al. Soil heavy metal pollution and ecological risk assessment in a copper mining area in East Tianshan, Xinjiang[J]. *Environmental Chemistry*, 2019, 38(12): 2690–2699.]
- [11] 姣哈尔·红卫, 李宁, 苏玉红, 等. 长期再生水灌溉对于干旱区山地土壤基本性质及重金属含量的影响[J]. *干旱区资源与环境*, 2020, 34(12): 181–186. [Hongwei J, Li N, Su Y H, et al. Effects of long-term reclaimed water irrigation on soil properties and heavy metal content in arid mountainous area[J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 2020, 34(12): 181–186.]
- [12] 刘利, 张嘉雯, 陈奋飞, 等. 衡水湖底泥重金属污染特征及生态风险评价[J]. *环境工程技术学报*, 2020, 10(2): 205–211. [Liu L, Zhang J W, Chen F F, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of heavy metals in the sediment of Hengshui Lake[J]. *Journal of Environmental Engineering Technology*, 2020, 10(2): 205–211.]
- [13] 叶群峰, 周小玲. 金华市萤石矿区土壤氟污染评价[J]. *环境科学*, 2015, 36(7): 2648–2654. [Ye Q F, Zhou X L. Assessment of soil fluorine pollution in Jinhua Fluorite Ore Areas[J]. *Environmental Science*, 2015, 36(7): 2648–2654.]
- [14] 薛粟尹, 李萍, 王胜利, 等. 干旱区绿洲土壤氟污染生态风险评估研究[J]. *环境科学*, 2014, 35(3): 1075–1080. [Xue S Y, Li P, Wang S L, et al. Study on ecological risk assessment technology of fluoride pollution from arid oasis soil[J]. *Environmental Science*, 2014, 35(3): 1075–1080.]
- [15] 包凤琴, 李佑国, 李红威, 等. 河套地区氟分布特征及物质来源研究[J]. *内蒙古师范大学学报(自然科学汉文版)*, 2016, 45(3): 344–349. [Bao F Q, Li Y G, Li H W, et al. The study on the fluorine distribution characteristic and material source in the Hetiao Area[J]. *Journal of Inner Mongolia Normal University (Natural Science Edition)*, 2016, 45(3): 344–349.]
- [16] 李朋飞, 陈富荣, 杜国强, 等. 安徽涡河沿岸土壤氟含量特征及其影响因素[J]. *物探与化探*, 2020, 44(2): 426–434. [Li P F, Chen F R, Du G Q, et al. Characteristics and influencing factors of fluorine content in soils along the Guohe River in Anhui Province [J]. *Geophysical & Geochemical Exploration*, 2020, 44(2): 426–434.]
- [17] 周晨, 丁晓辉, 李国平, 等. 南水北调中线工程水源区生态补偿标准研究: 以生态系统服务价值为视角[J]. *资源科学*, 2015, 37(4): 792–804. [Zhou C, Ding X H, Li G P, et al. Ecological compensation standards in the water source area of the Middle Route Project of the South–North Water Transfer Project[J]. *Resources Science*, 2015, 37(4): 792–804.]
- [18] 国家发展改革委, 南水北调办. 丹江口库区及上游地区对口协作工作方案[EB/OL]. (2015–7–15). [National Development and Reform Commission, South–to–North Water Transfer Project office. Work plan of counterpart cooperation in Danjiangkou Reservoir Area and upstream area[EB/OL]. (2015–7–15). [https://www.ndrc.gov.cn/fggz/dqzx/dkzyyhz/201507/1020150715\\_1083736.html](https://www.ndrc.gov.cn/fggz/dqzx/dkzyyhz/201507/1020150715_1083736.html).]
- [19] 蔡晓雨, 赵茂崧, 李卫朋, 等. “南水北调”中线水源区可利用降水量时序分析[J/OL]. *长江流域资源与环境*, (2021–01–20) [2021–01–25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20210120.1551.002.html>. [Cai X Y, Zhao M Q, Li W P, et al. Temporal variation of available precipitation in the water source area of the South–to–North Water Diversion Middle Route Project [J/OL]. *Resources and Environment in the Yangtze Basin*, (2021–01–20) [2021–01–25]. <https://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1320.X.20210120.1551.002.html>.]
- [20] 中国地质调查局. 多目标区域地球化学调查规范(1: 250000) [S]. 北京: 中国地质调查局, 2005. [China Geological Survey. Specification for Multi–purpose Regional Geochemical Survey (1: 250000)[S]. Beijing: China Geological Survey, 2005.]
- [21] White J G, Welch R M, Norvell W A. Soil Zinc map of the USA us-



- ing geostatistics and geographic information and systems[J]. Soil Science Society of America Journal, 1997, 61(1): 185-194.
- [22] 辛龙, 孙慧, 王慧, 等. 基于地理探测器的绿色经济效率时空分异及驱动力研究[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(9): 128-138. [Xin L, Sun H, Wang H, et al. Research on the spatial-temporal differentiation and driving force of green economic efficiency based on the geographic detector model[J]. China population, resources and environment, 2020, 30(9): 128-138.]
- [23] 党倩楠, 王进鑫, 姚丽霞, 等. 干旱荒漠区煤矸石山覆土区土壤水分物理性质的空间异质性[J]. 应用生态学报, 2021, 32(1): 281-288. [Dang Q N, Wang J X, Yao L X, et al. Spatial heterogeneity of soil water physical properties in coal gangue pile in arid desert area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(1): 281-288.]
- [24] 李随民, 梁文楼, 韩腾飞, 等. 冀中南平原区土壤氟元素来源分析[J]. 中国地质, 2012, 39(3): 794-803. [Li S M, Luan W L, Han T F, et al. A source analysis of soil fluorine in central and southern Hebei plain[J]. Geology in China, 2012, 39(3): 794-803.]
- [25] 张宪庞, 庞成宝, 王安婷, 等. 海南岛表层及深层土壤重金属分布特征及源解析[J]. 现代地质, 2020, 34(5): 970-978. [Zhang X Y, Pang C B, Wang A T, et al. Distribution characteristics and source identification of heavy metals in topsoils and subsoils of Hainan Island[J]. Geoscience, 2020, 34(5): 970-978.]
- [26] 李静, 谢正苗, 徐建明, 等. 我国氟的土壤健康质量指标及评价方法的初步探讨[J]. 浙江大学学报(农业与生命科学版), 2005, 31(5): 593-597. [Li J, Xie Z M, Xu J M, et al. Preliminary study on guideline on soil health quality index of fluorine and method of its evaluation in China[J]. Journal of Zhejiang University (Agriculture & Life Sciences), 2005, 31(5): 593-597.]
- [27] Muller G. Index of geoaccumulation in sediments of the Rhine River[J]. GeoJournal, 1969, 2(108): 108-118.
- [28] 张健健. 新疆奎屯地区土壤氟的迁移转化规律及钙对土壤氟污染的改良研究[D]. 石河子: 石河子大学, 2019. [Zhang J J. Study on the Law of Migration and Transformation of Soil Fluoride and the Improvement of Calcium on Soil Fluoride Pollution in Kuitun Area, Xinjiang[D]. Shihezi: Shihezi University, 2019.]
- [29] 李绍生. 地质累积指数法在义马矿区土壤重金属及氟污染评价中的应用[J]. 河南科学, 2011, 29(5): 614-618. [Li S S. Application of index of geoaccumulation for pollution of heavy metals and fluorine in Yima Mining Areas[J]. Henan Science, 2011, 29(5): 614-618.]
- [30] 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. [China Environmental Monitoring General Station. Background Values of Soil Elements in China[M]. Beijing: China Environmental Science Press, 1990.]
- [31] Hakanson L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach[J]. Water Research, 1980, 14(8): 975-1001.
- [32] 任晓辉, 高宗军, 安永会, 等. 张掖市甘州区北部土壤重金属污染特征及生态风险评价[J]. 干旱区资源与环境, 2020, 34(7): 163-169. [Ren X H, Gao Z J, An Y H, et al. Pollution characteristics and ecological risk assessment of soil heavy metals in northern Ganzhou District, Zhangye City[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2020, 34(7): 163-169.]
- [33] 伍娟丽, 王永刚, 王旭, 等. 通州区河流沉积物重金属污染评价[J]. 水生态学杂志, 2020, 41(1): 71-78. [Wu J L, Wang Y G, Wang X, et al. Assessment of heavy metal pollution in surface sediment of rivers in Tongzhou District[J]. Journal of Hydroecology, 2020, 41(1): 71-78.]
- [34] 潘自平, 刘新红, 孟伟, 等. 贵阳中心区土壤氟的地球化学特征及其环境质量评价[J]. 环境科学研究, 2018, 31(1): 87-94. [Pan Z P, Liu X H, Meng W, et al. Geochemical characteristics of fluorine in soils and its environmental quality in central district of Guiyang[J]. Research of Environmental Sciences, 2018, 31(1): 87-94.]
- [35] 中华人民共和国国土资源部. DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S]. 北京: 中华人民共和国国土资源部, 2016. [Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China. DZ/T 0295-2016, Specification of Land Quality of Geochemical Assessment[S]. Beijing: Ministry of Land and Resources of the People's Republic of China, 2016.]
- [36] 徐立荣, 雒昆利. 大巴山区地层中氟的分布规律[J]. 地理研究, 2012, 31(8): 1503-1511. [Xu L R, Luo K L. Studies on fluorine distribution in the strata of the Daba Region[J]. Geographical Research, 2012, 31(8): 1503-1511.]

# Spatial variability and pollution risk assessment of soil fluorine in the core area of the Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project

TAN Li, WANG Zhanqi, XUE Zhibin, YANG Bin

(School of Public Administration, China University of Geosciences, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** In order to provide important data and technical support for improving local soil fluorine environment and ensuring water safety in reservoir area, it also provides decision-making basis for local soil remediation and ensure high-quality water diversion to the north, this study quantitatively analyzed the spatial distribution and pollution risk of soil fluorine in the core area of the Middle Route of the South- to- North Water Transfer Project with fragile ecological environment by using the methods of GIS and geostatistics and pollution risk assessment models. The results show that: (1) The soil fluorine content was on the high side and showed clear spatial autocorrelation in the study area. The fluorine density of topsoil increased gradually from west to east and south to middle north, and obviously peaked in Cangfang Town, Xichuan County and Shigu Town, Danjiangkou City in the central eastern part, which was corresponding to the characteristics of regional stratigraphic lithology and soil parent material. Combined with information on the net increment of soil fluorine, it was concluded that the fluorine content in most areas was related to human activities. (2) The degree of fluorine pollution showed obvious regional differentiation, which was mostly resulted from environmental pollution caused by human activities according to the characteristics of geoaccumulation index, except that Xijiadian Town and Songping Town of Danjiangkou City were restricted by structural factors such as soil parent material. (3) The degree of potential ecological risk indicates that level A was mainly distributed in the west and the south of the study area, and level B was concentrated in the central, eastern, and northern parts. The areas with the highest ecological risk were the east of Shengwan Town and the west of Cangfang Town in Xichuan County, Songping Town and Shigu Town in Danjiangkou City.

**Key words:** core water source area; soil; fluorine; spatial variability; environmental pollution; ecological risk assessment; Middle Route of the South-to-North Water Transfer Project