

doi: 10.12097/gbc.2023.10.011

江苏海安里下河地区富硒土壤分布特征及成因

杨晋炜^{1,2}, 刘强^{1,2,3*}, 任衍斌^{1,2,3}, 丁小琴^{2,4}, 杨贵芳^{1,2,3}, 张松伟^{1,2,3},
胡利^{1,2,3}, 张颀^{1,2,3}

YANG Jinwei^{1,2}, LIU Qiang^{1,2,3*}, REN Yanbin^{1,2,3}, DING Xiaoqin^{2,4}, YANG Guifang^{1,2,3},
ZHANG Songwei^{1,2,3}, HU Li^{1,2,3}, ZHANG Di^{1,2,3}

1. 江苏省海洋地质调查院, 江苏南京 210007;

2. 自然资源部滨海盐碱地生态改良与可持续利用工程技术创新中心, 江苏南京 210007;

3. 江苏华东地质环境工程有限公司, 江苏南京 210007;

4. 海安市自然资源和规划局, 江苏南通 226600

1. Marine Geological Survey of Jiangsu Province, ECE, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

2. Coastal Caline-alkali Land Ecological Rehabilitation and Sustainable Utilizationment Technology Innovation Center, MNR, Nanjing 210007, Jiangsu, China;

3. Jiangsu East China Geological Environmental Engineering Co., Ltd., Nanjing 210007, Jiangsu, China;

4. Hai'an Natural Resources and Planning Bureau, Nantong 226600, Jiangsu, China

摘要:【研究目的】近年来,天然富硒土地资源的开发利用越来越受到关注,但对于远离母岩的平原区富硒土壤成因尚不明确。以海安里下河地区为例,探讨平原区富硒土壤分布特征及其成因,进而指导富硒土地资源的开发利用。【研究方法】系统梳理了研究区 1800 组表层土壤样品和 1000 组土壤剖面样品地球化学数据,并结合以往研究资料,对数据开展了综合分析研究,采用沉积物的粒度特征反演了母质沉积环境。【研究结果】研究区农用地表层土壤中 Se 含量最高达 0.63 mg/kg,富集区 (≥ 0.3 mg/kg) 面积达 66 km²。土壤垂向剖面上,耕作层 (0~20 cm)、犁底层 (20~40 cm)、心土层 (50~80 cm)、底土层 (80~100 cm) 和深土层 (150~180 cm) Se 平均含量分别为 0.23 mg/kg、0.18 mg/kg、0.13 mg/kg、0.12 mg/kg、0.11 mg/kg,表聚性十分明显;表层土壤 Se 含量与母质层呈高度正相关,其相关系数在 0.6~0.8 ($p < 0.01$) 之间。地表高程与土壤 Se 含量出现极显著负相关,相关系数达 -0.6 ($p < 0.01$),地势越高,土壤 Se 含量越低;土壤有机质与 Se 呈显著的正相关,成壤过程对硒具有重要的吸附和固定作用。【结论】研究区母质层主要受古潟湖-砂坝沉积体系的控制,富硒土壤主要为发育于古潟湖相的母质经表生富集作用形成,潟湖相沉积环境控制了土壤硒富集边界。基于多元线性回归分析技术揭示了土壤硒富集控制因素,其中土壤有机质对于研究区 Se 的富集起到了决定性作用,对土壤硒富集的贡献率达 70%。

关键词: 富硒土壤; 土壤有机质; 潟湖; 里下河; 成因; 江苏海安

创新点: 里下河古潟湖边缘与苏北平原相比土壤硒含量更富集,成壤过程中有机质对硒具有重要的吸附和固定作用,有机质是平原区富硒土地评价的重要指标,有助于评价土壤硒是否有稳定来源。

中图分类号: P595; X825; S15 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-2552(2025)01-0173-12

Yang J W, Liu Q, Ren Y B, Ding X Q, Yang G F, Zhang S W, Hu L, Zhang D. Distribution and causes of selenium-rich soil in Lixiahe area of Hai'an, Jiangsu Province. *Geological Bulletin of China*, 2025, 44(1): 173-184

Abstract: [Objective] Recently, the development and utilization of natural selenium-rich land resources have attracted increasing attention. However, the genesis of selenium-rich soil in plain areas far from parent rocks is still unclear. This paper aims to take the

收稿日期: 2023-10-11; 修订日期: 2023-12-05

资助项目: 江苏省 2021 年度省级地质勘查资金项目《海安市富硒土地资源调查与开发利用示范》(编号: 苏财资环 [2021]46 号)

作者简介: 杨晋炜(1984-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事水工环地质、盐碱地改良工作。E-mail: 85189249@qq.com

* 通信作者: 刘强(1985-), 男, 硕士, 正高级工程师, 从事生态地质、环境地质、土壤调查及修复工作。E-mail: lauqung@qq.com

Lixiahe area in Hai'an as an example to explore the distribution characteristics and genesis of selenium-rich soil in plain areas, thereby guiding the development and utilization of selenium-rich land resources. **[Methods]** The paper systematically collated geochemical data from 1800 groups of surface soil samples and 1000 groups of soil profile samples in the study area, and combined with previous research data, conducted a comprehensive analysis and study of the data. The grain size characteristics of sediments were used to infer the depositional environment of the parent material. **[Results]** The selenium (Se) content in the surface soil of agricultural land in the study area reaches up to 0.63 mg/kg, and the area of the enrichment zone (≥ 0.3 mg/kg) is 66 km². In the vertical soil profile, the average Se content in plough layer (0~20 cm), plough pan (20~40 cm), subsoil (50~80 cm), subsoil (80~100 cm) and deep soil (150~180 cm) were 0.23 mg/kg, 0.18 mg/kg, 0.13 mg/kg, 0.12 mg/kg, and 0.11 mg/kg, respectively, showing a very obvious surface accumulation; the selenium content in surface soil was highly positively correlated with the parent material layer, with a correlation coefficient between 0.6 and 0.8 ($P < 0.01$). There was a highly significant negative correlation between ground elevation and soil Se content, with a correlation coefficient of -0.6 ($P < 0.01$), indicating that the higher the terrain, the lower the soil Se content; soil organic matter (SOM) was significantly positively correlated with Se, playing an important role in the adsorption and fixation of selenium during soil formation. **[Conclusions]** The parent material layer was mainly controlled by the ancient lagoon-sand dam sedimentary system. The selenium-rich soil in the area was mainly formed by the supergene enrichment of the parent material developed in the ancient lagoon facies. The lagoon facies sedimentary environment controls the selenium enrichment boundary of the soil. Based on multiple linear regression analysis, the controlling factors of soil selenium enrichment were revealed. Among them, SOM played a decisive role in the enrichment of Se in this area, and the contribution rate to soil Se enrichment was 70%.

Key words: selenium-rich soil; soil organic matter (SOM); lagoon; Lixia river; genesis; Hai'an, Jiangsu Province

Highlights: Compared with the soil selenium content in the North Jiangsu area Plain, the soil selenium content at the edge of the ancient lagoon in Lixiahe is more enriched. Organic matter plays an important role in the adsorption and fixation of selenium during the soil formation process. Organic matter is an important indicator for evaluating selenium-rich land in plain areas, which helps to evaluate whether the soil selenium has a stable source.

硒(Se)是人体必需的微量元素(Daniel, 2008),被誉为“抗癌之王”(毛香菊等, 2021; 周墨等, 2021)。人体补充 Se 元素最安全最有效的途径是通过天然富硒农产品等膳食摄入(Banuelos et al., 2015; 杨奎等, 2018; 徐雪生等, 2022),而富硒土壤是生产天然富硒产品的先决条件,富硒土地资源的开发利用也越来越受到关注(廖启林等, 2020),已成为当前农业地质研究的一大热点(刘健等, 2022)。江苏的富硒土壤资源稀缺,土壤 Se 分布极不均匀,含量最高值与最低值相差数百倍,全省表层土壤的 Se 含量均值为 0.18 mg/kg,约 1/2 的市县存在不同程度的缺硒现象,成片富硒区主要分布于苏南宜溧低山一丘陵区,多出露煤系地层或产有煤矿,苏北大部分平原区基本未发现大面积富硒土地(廖启林等, 2020)。廖启林等(2020)认为,江苏全省富硒来源主要可分为 2 类,一是与富硒岩石有关的“先天”来源,二是人类活动引起的“后天”来源。对于远离母岩的平原区富硒土壤的成因,大多研究表明(杨泽等, 2021; 柴冠群等, 2022; 王仁琪等, 2022)与 Se 元素在地表的迁移密切相关,影响土壤硒富集的因素主要有地形、气候、成土母质、土壤质地、有机质、人为因素等(Umesh et al., 2010; Supriatin et al., 2015; Jones et al.,

2017)。前人研究结果对于富硒土壤成因研究具有重要的意义,但对于成陆时间短,成陆期表生环境对于现今地表土壤硒富集的影响鲜见报道。

研究区位于江苏省里下河平原的边缘部位,现为江苏省粮食主产区,被称为江苏省的“粮仓”。江苏省 1:25 万多目标区域地球化学调查结果揭示(廖启林等, 2007),在里下河边缘潟湖相沉积区土壤 Se 含量多介于 0.3~0.5 mg/kg 之间,相比于周围地区,呈明显的相对富集特点,具有发展富硒特色农业的潜力。因此,在该区域寻找和挖掘更多的富硒土壤资源用于富硒农产品的开发具有重要的现实意义。该区第四系覆盖数百米厚,成土母质主要为河流冲积物和海相沉积物,这些物质远离母岩,在长期的风化搬运过程中,理化性质与母岩有很大差异。近期在里下河地区发现了约 60 km² 的硒富集区,本文在 1:5 万土地质量调查的基础上,开展了平原区富硒土壤成因及控制因素研究,为类似地区富硒土壤的寻找和开发提供参考。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于江苏省南通市西北部(图 1),北纬

32°27'~32°44'、东经 120°11'~120°31' 之间, 总面积约 500 km²(其中农用地面积约 430 km²)。研究区属北亚热带季风气候, 四季分明, 年平均气温 14.5℃, 年平均降水量 1025 mm, 年平均相对湿度为 60%~80%。区内大体属淮河水系, 正常河网水位 1.2 m; 南部(通扬运河以南)属长江水系, 正常河网水位 2.5 m; 主要河流有新通扬运河(东西向)、串场河、通榆河(均南北向)。地貌上, 主体为里下河浅洼圩田平原, 南部和东部跨少量高沙平原和滨海平原, 其中里下河浅洼区为古潟湖相沉积和黄泛冲积平原区, 沉积物主要为粉砂质粘土, 多夹泥炭或淤泥质亚粘土; 高沙平原为海积冲积相沙嘴沙洲堆积平原, 河口相沉积的扬泰古沙嘴东缘由长江冲积而成; 东部滨海平原为海积相滨海堆积平原。土壤类型主要为水稻土、滨海盐土、高沙土, 其中里下河浅洼区主要土壤类型为水稻土, 以渗育型、潴育型、脱潜型为主; 南部为高沙土分布区, 主要土壤类型有泡沙土、板而沙、夹沙土等; 东部滨海平原为潮盐土地区, 主要土壤类型为夹沙土、板而沙、粘土等。研究区第四系沉积物覆盖厚度在 300 m 左右, 全新世以来, 研究区经历了从海湾到三角洲, 又从三角洲到陆地, 以及几千年的沉积和地壳升降运动的过程(姜鹏等, 2006)。境内成陆最早的是扬泰古沙嘴(扬泰岗地), 在南莫镇青墩村、海安镇隆政村吉家墩、曲塘镇刘圩村等多处发现新石器时代遗址和哺乳动物化石, 据同位素测定

约为 6000 a。

1.2 样品采集与测试

根据土地利用方式, 结合遥感影像资料, 在研究区农用地中采集了 1800 个表层土壤样品(0~20 cm), 平均点密度约 4 个/km²; 深层土壤柱(0~180 cm)样品 200 个, 平均点密度约 1 个/2 km², 每柱分 5 层采样: 表层(0~20 cm)、犁底层(20~40 cm)、心土层(50~80 cm)、底土层(80~100 cm)和深层土(150~180 cm)。土壤样品采集时间为 2022 年 1—2 月。野外样品采集方法参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)(中华人民共和国国土资源部, 2016)。表层土壤样以 2021 年遥感影像上确定的地块图斑中心位置为主样点, 同时向四周辐射 20~30 m, 确定 4 个子样点(子样点均位于同一土地利用类型范围), 混合均匀为 1 个样品; 土壤柱采用深层取土器分土层采集样品。按照采样点位 3% 的比例采集重复样, 由检查人员根据采样航点航迹在原点位处进行采集。样品加工: 首先在制样室风干样品, 然后用木锤碾压进行粗磨, 过孔径 10 目尼龙筛, 过筛后的样品一部分用于测试土壤 pH 值和粒度, 另一部分继续进行细磨(过 60 目尼龙筛), 用于测试有机质和 Se 含量。样品测试方法见表 1。实验室内部质控为每隔 12 个样品插入 1 个国家一级标准物质, 每 10 个样品做 1 个平行双样分析, 标准物质测试相对偏差(RE)及平行双样相对偏差(RD)均在规范允许

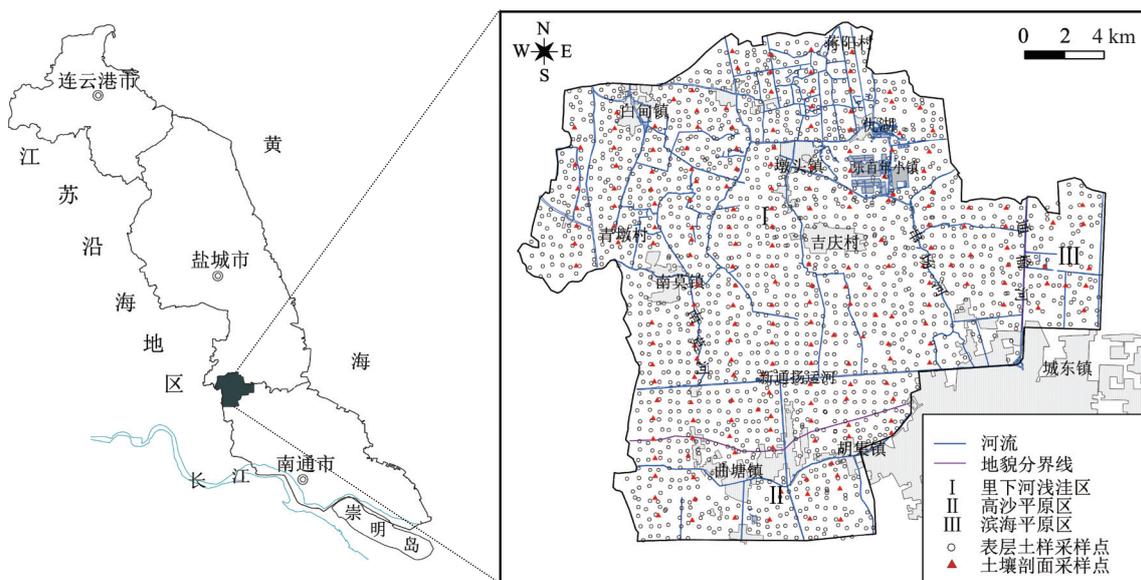


图 1 研究区位置及采样点位图

Fig. 1 Location of study area and sampling points

范围内,合格率均为100%。

1.3 数据分析方法

本文数据分析方法如下所述:①采用 Excel 进行一般数据统计分析,采用 SPSS 17 软件进行相关性分析。地球化学分布图采用 Surfer 11 软件绘制,插值方法选用克里金插值法。②粒径公式: $\Phi = -\log_2 D$, D 为颗粒直径 (μm), Φ 值越大,表明粒径越细,反之亦然。③母质层沉积相划分方法:以深层土壤 (150~180 cm) 段平均粒径划分成陆期母质沉积相,其中平均粒径 $\leq 5 \Phi$ (粘粒含量低于 5%) 划为砂坝, $5\sim 7 \Phi$ (粘粒含量 5%~20%) 为潟湖—砂坝过渡相, $> 7 \Phi$ (粘粒含量高于 20%) 为潟湖相。④土壤质地类型划分方法:参照国际制土壤质地分类标准(农业大词典编辑委员会, 1998; 吴克宁等, 2019) 进行土壤质地类型分类。⑤多元线性回归分析方法:采用 SPSS 17 软件回归分析完成,根据土壤 Se 与其影响因子相关性结果,以土壤 Se 为因变量,选择与其出现极显著相关的影响因子为自变量,为消除不同因子之间数值的差异,对因变量和自变量进行对数转换;然后通过 SPSS 17 软件线性回归功能,按照相关系数大小依次引入自变量构建回归方程,检验方法选用德宾-沃森。

2 结果与讨论

2.1 土壤硒地球化学分布特征

研究区土壤 Se 及主要理化指标统计结果如表 2 所示。土壤硒、有机质(SOM)含量由深层至表层逐渐增加,表生富集效应较明显。pH 值由深层至表层逐渐减小,至犁底层中值约为 7.89,总体上呈碱性,至耕作层 pH 值下降,总体略呈中性。平均粒径 Φ 值由深层至表层逐渐减小,总体为上部略粗下部较细。

参照《天然富硒土地划定与标识(试行)》(DZ/T0380—2021)(中华人民共和国自然资源部, 2021),对于碱性土壤 Se 含量高于 0.3 mg/kg,即达到了富硒土地 Se 含量阈值,结合江苏全省和南通市表层土壤 Se 平均含量分别为 0.18 mg/kg 和 0.16 mg/kg,在《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T0295—2016)基础上,对土壤 Se 元素富集等级进行了一定的微调,分级标准如表 3 所示。参照表 3,研究区各层位土壤 Se 分级如图 2 所示。

主要特征如下所述:①从深层土—底土层—心土层—犁底层—表层自下而上土壤 Se 逐渐出现富

表 1 土壤样品测试方法

Table 1 Test method of soil sample

测试指标	样品粒度	测试方法	检出限	RE	RD	参照标准
pH	$\leq 2 \text{ mm}$	ISE	0.1	0.7~7.9%	1.6~15.8%	《土壤中pH的测定》(NY/T 1377—2007)
粒度分析	$\leq 2 \text{ mm}$	激光衍射法	0.01%	0.6~15%	2.1~19.5%	《粒度分布 激光衍射法》(GB/T 19077—2016)
有机质(SOM)	$\leq 0.149 \text{ mm}$	重铬酸钾法	0.20‰	0~4.1%	0.1~10%	《土壤检测 第6部分:土壤有机质的测定》(NY/T 1121.6—2006)
全Se	$\leq 0.149 \text{ mm}$	原子荧光光谱法	0.01 mg/kg	0.2~4.8%	3.0~12.8%	《土壤中全硒的测定》(NY/T1104—2006)

表 2 土壤 Se 及主要理化指标特征统计结果

Table 2 Characteristics of soil selenium and its main physicochemical indicators

土壤层位	耕作层(0~20 cm)	犁底层(20~40 cm)	心土层(50~80 cm)	底土层(80~100 cm)	深土层(150~180 cm)	
样本数	$n=1800$	$n=200$	$n=200$	$n=200$	$n=200$	
Se/(mg·kg ⁻¹)	范围	0.07~0.63	0.05~0.37	0.04~0.32	0.04~0.28	0.05~0.23
	均值	0.23	0.18	0.13	0.12	0.11
SOM/‰	范围	6.2~64.5	3.6~28.4	3.2~23.1	1.3~25.2	0.3~25.4
	均值	26.9	13.2	8.7	6.7	6.5
pH	范围	4.90~8.48	6.80~8.50	6.89~8.74	7.19~9.07	7.11~9.25
	中值	7.24	7.89	8.01	8.23	8.41
平均粒径/ Φ	范围	4.97~8.04	5.00~8.71	4.67~8.72	4.91~9.05	4.49~9.23
	均值	5.91	6.18	6.27	6.43	6.47

表 3 土壤 Se 分级标准

Table 3 Soil selenium classification standard

指标	缺乏	边缘	足硒	富集区	过剩
Se/(mg·kg ⁻¹)	≤0.125	0.125~0.175	0.175~0.3	0.3~3	>3

集,足硒和硒富集区逐渐扩大,尤其是表层和犁底层,足硒级以上区域已占主导地位。②深层土壤中约 90% 的区域处于边缘—缺硒级,仅在乐百年小镇(海安里下河湿地公园)周边约 20 km² 处于足硒级;底土层足硒区范围逐渐扩大,至心土层已在墩头—仇湖—吉庆一带形成连片区。③犁底层硒富集区扩大至 40 km²(约占全区 10%),足硒区约 200 km²(约占全区 50%),缺硒地区大幅收缩。表层土壤 Se 富集区(≥0.3 mg/kg)面积约 66.25 km²,主要分布于北部里下河地区。足硒区域约占全区 70%,边缘—缺硒地区主要分布于南部高沙平原、东部滨海平原及北部蒋阳村西南部。④从各层位土壤硒等级分区图看(图 2),研究区土壤硒出现强烈的富集效应,尤其是在犁底层—表层土表聚性十分明显。从平面上看,研究区自深层土—表土层,各层位土壤 Se 含量均表现出不均匀性,总体为北部相对富集,南部和东部较贫化。

2.2 成土母质沉积环境

粒度特征是沉积物物源、地形地貌、水动力条件、搬运距离等综合作用的结果(Mclaren et al., 1985; Gao et al., 2019; 梅西等, 2020),可反映沉积介质的流体力学性质和能量(Liu, et al., 2006),平均粒径(M_z)指示了沉积物粒径频率分布的中心趋向,大小反映了沉积物的平均动能,故通过沉积物粒度特征可以反演母质层的沉积环境。

2.2.1 母质层粒度特征

据粒度分析结果,研究区深土层和底土层粒度特征如图 3 所示,主要特征如下。①研究区位于里下河古潟湖的边缘,在成壤前存在明显的沉积环境分异,沉积物粒度特征总体表现为古潟湖—砂坝沉积体系,二者粒度特征存在显著差异。母质层粒度特征均揭示,里下河区存有沉积物较细的潟湖相沉积物,中间为较粗的砂坝分割,其中东侧潟湖发育较完整,西侧则有较粗物质淤塞的趋势。②在潟湖区粒度明显细于砂坝区域(表 4),平均粒径 6.88~9.23 Φ ,均值为 8.14 Φ ,其中在乐百年小镇一带出现 8 Φ (约合 3.906 μm)以上的细粒物质连片区。粘粒(粒

径 < 2 μm , $\Phi \geq 9$)含量一般在 20% 以上,平均为 34.5%;粉粒(2~20 μm , 粒径 5.75~9 Φ)含量 30%~51.29%,平均为 44%;砂粒(20~2000 μm , 粒径 1~5.75 Φ)含量 9.28%~39.13%,平均为 21.5%。该区域 SOM 含量相对较高,一般在 10% 以上,局部区域达到 20%。Se 含量为 0.06~0.23 mg/kg,平均为 0.14 mg/kg,为区域内含量最高的沉积单元。③潟湖之间为砂坝所分割,该砂坝平均粒径为 4.56~7.36 Φ ,粘粒含量平均约为 2.1%,Se 含量平均为 0.1 mg/kg。在南部和东部均有较粗的砂坝分隔高沙平原和滨海平原,高沙平原区和滨海平原区平均粒径为 5~6 Φ ,粘粒含量均低于 2%,砂粒含量一般大于 50%,该区域 SOM 含量低,一般在 3% 左右,Se 平均含量在 0.06 mg/kg 左右。④对照深土层和底土层粒度特征,东侧潟湖仍较稳定,但沉积物粒度略变粗,平均粒径 8 Φ 以上较细物质分布区逐渐减小;西侧逐渐分割成大小湖荡,其中西北部的白甸—青墩一带已被较粗物质覆盖,今南莫河一带已与北部彻底被较粗物质分割。上述特征总体上表明,随着海平面下降,海岸线东移,区内受到长江、江淮等河流冲积物的影响,逐渐被较粗物质覆盖。

2.2.2 母质层沉积环境分区

参照国际制土壤分类标准(农业大词典编辑委员会, 1998; 吴克宁等, 2019),研究区深层土土壤类型如图 4 所示,共识别出 4 种土壤类型:粘土、粘壤土、粉砂质壤土和砂质壤土,其中粘壤土的分布范围极小,仅零星分布于粘土覆盖区。粘土主要分布于里下河潟湖沉积区,粉砂质壤土全区均有分布,砂质壤土主要分布于南部高沙平原和东部的滨海平原。参照研究区地表高程、成陆历史及地质背景,深土层土壤大体为区内成陆期的地表层位。研究区沉积分区如图 5 所示,共分布有 3 种沉积相:潟湖相、砂坝—潟湖过渡相和砂坝相。

表层土壤 Se 富集区(≥0.3 mg/kg)主要分布于潟湖相及少量潟湖—砂坝过渡相沉积物上,无论是南部里下河地区还是东部滨海平原区的砂坝表层土壤均未形成土壤 Se 的富集,同时里下河地区南片区表层土壤也未形成 Se 的富集。因此,表层土壤 Se 的富集与潟湖相沉积母质密切相关,古潟湖的沉积环境是区内土壤 Se 富集的基础,一定程度上控制了 Se 的富集范围。在潟湖分布区的南、北部并未出现土壤 Se 的富集,表明土壤 Se 的富集还受其他因素

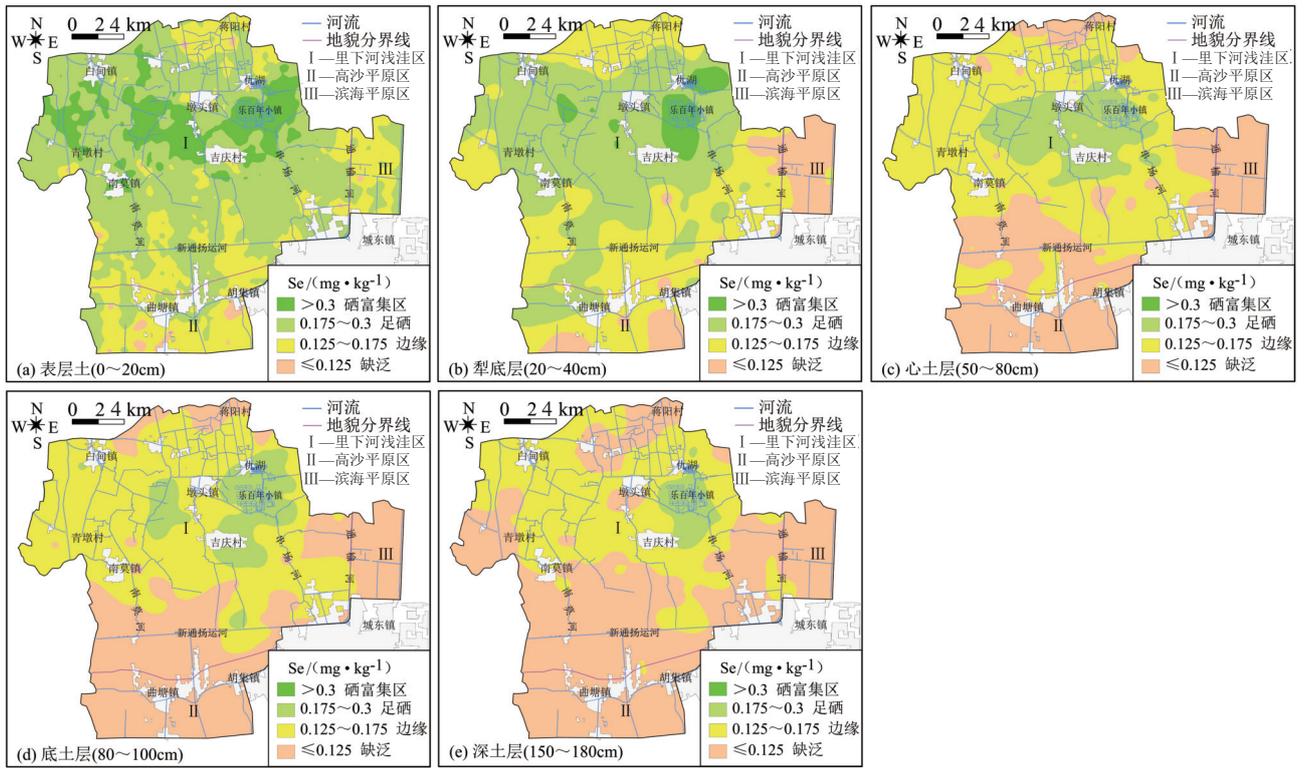


图 2 土壤 Se 含量地球化学分级图

Fig. 2 Geochemical distribution maps of soil selenium

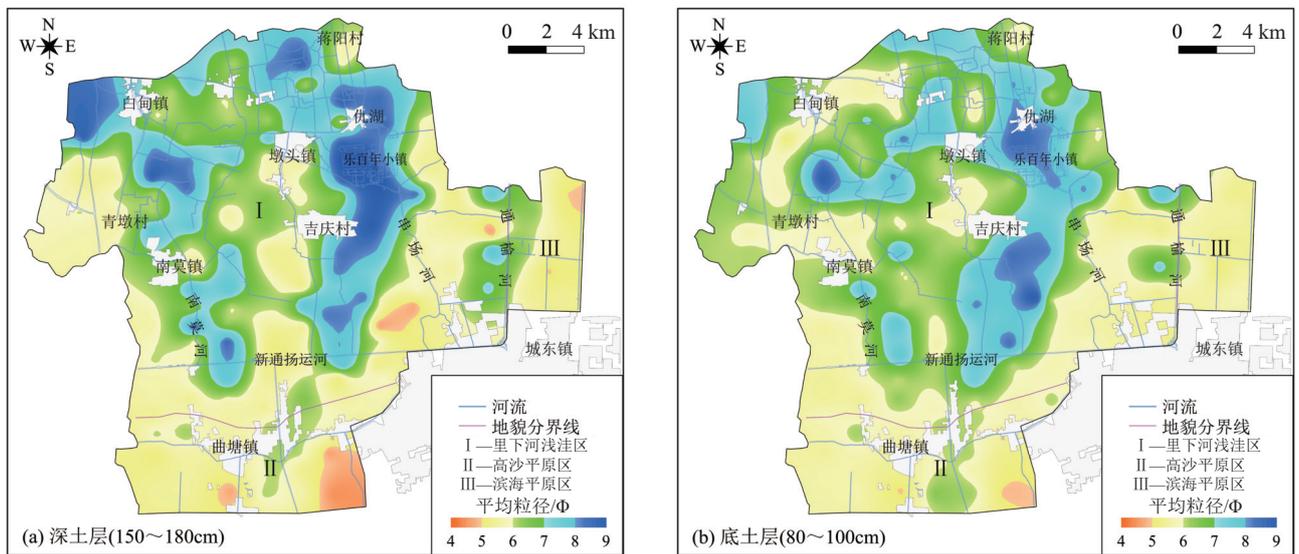


图 3 深土层和底土层平均粒径 (Mz) 平面分布图

Fig. 3 Mz distribution map of deep soil layer and subsoil layer

的影响。

2.3 土壤 Se 富集成因分析

2.3.1 成土母质

土壤 Se 的含量虽然受多种因素的影响,但在很大程度上取决于成土母质的组成和性质(王莹,

2008; 杨泽等, 2021)。在地表元素迁移的作用下,地球化学元素在局部区域会出现相对富集。有研究认为,成土母质与土壤硒有较大的相关性(章海波, 2005; 周殷竹等, 2020),因此本文分析了表层土 Se 含量与下部各土层 Se 含量的相关性(表 5)。结

表 4 研究区各沉积单元粒度参数特征

Table 4 Characteristics of particle size parameters of each sedimentary unit in the study area

地貌分区	沉积单元	参数	平均粒径/ Φ	粘粒/%	粉粒/%	砂粒/%	SOM/‰	Se/(mg·kg ⁻¹)
里下河 浅洼区	潟湖	范围	6.88~9.23	20~51.5	30~51.29	9.28~39.13	1.26~25.36	0.06~0.23
		平均值	8.14	34.5	44.04	21.45	10.08	0.14
高沙平原	砂坝	范围	4.56~7.36	0.34~4.22	17.5~79.05	18.29~82.17	1.2~16.76	0.05~0.16
		平均值	5.84	2.14	50.89	46.94	5.79	0.1
滨海平原	砂坝	范围	4.49~6.53	0.42~3.48	15.87~71.55	24.97~83.71	1.26~10.36	0.04~0.11
		平均值	5.61	1.83	45.66	52.48	3.11	0.06
滨海平原	砂坝	范围	4.93~6.32	0.6~3.16	28.44~64.57	32.27~70.96	1.2~7.26	0.04~0.11
		平均值	5.48	1.34	41.59	57.07	3.07	0.06

果表明, 表层土壤 Se 含量与下部各土层均呈现出极显著的正相关性, 相关系数分别为 0.79、0.71、0.65 和 0.6 ($p < 0.01$), 相关程度为强相关, 与表层土壤 Se 含量的相关性总体表现为犁底层 > 心土层 > 底土层 > 深土层, 随着土层深度的增加相关系数略有下降, 这也反映表层土壤 Se 含量与母质层有极密切的关系, 在母质层富集的区域表层土壤出现富集。因此, 母质层的沉积环境对于表层土壤 Se 的富集有一定的控制作用。

2.3.2 地形条件

地形条件是地表元素迁移重要的影响因素。依据本次 200 个点土壤剖面获得的地表高程(基准面为 1985 国家高程基准)数据, 编制了研究区地形图(图 6)。从图 6 可以看出, 表层土富集区与地表低洼地带高度相关, 即表土硒的富集范围为地势低的区域。地表高程与潜水位埋深呈显著正相关(图 7), 相关系数为 0.56 ($p < 0.01, n=200$), 表明地势越高潜水位埋深越深。表 6 为地表高程与各层位 Se、SOM、粘粒、 Mz 相关系数, 结果表明: ①地表高程与各土层 Se 含量均出现极显著负相关, 相关系数均在 -0.6 ($p < 0.01, n=200$) 左右, 地势越高土壤 Se 含量越低, 反之亦然, 表明地形条件对 Se 的富集有重要影响。②地表高程与各土层 SOM 含量也出现极显著的负相关性, 相关系数在 -0.5 ($p < 0.01, n=200$) 左右, 地势越高土壤 SOM 含量越低, 表明地形条件对 SOM 也有显著影响。③地表高程与各土层粘粒、 Mz 的关系较复杂, 在 80 cm 的上部土壤, 呈微弱的负相关, 在 80 cm 以下土层, 相关系数为 $-0.3 \sim -0.4$ ($p < 0.01, n=200$), 表明地形条件对粘粒物质产生了一定的影响, 总体趋势为地势越低的区域, 粘粒含量越高。

综上所述, 地形条件对研究区 Se 的富集也有较明显的影响, 同时影响 SOM 及粘粒物质的含量。

2.3.3 土壤理化指标

土壤理化指标是硒富集重要的影响因素(戴慧敏等, 2015; 陈锦平等, 2018; 柴龙飞等, 2019), 研究区土壤 Se 含量与主要理化指标土壤有机质(SOM)、pH 值、粘粒(Clay)、粉粒(Silt)、砂粒(Sand)及平均粒径(Mz)的相关系数如表 7 所示。

分析结果表明: ①研究区土壤全硒含量均与有机质(SOM)呈极显著正相关, 表土层、犁底层、心土层、底土层、深土层及全土层(0~180 cm)相关系数分别为 0.46、0.82、0.83、0.86、0.87、0.86 ($p < 0.01$)。总体表现为在犁底层以下的土层, 全硒含量均与 SOM 呈极显著正相关, 说明在成壤过程中有机质对硒具有一定的吸附和固定作用(吴俊, 2018; 柴冠群等, 2022), 硒能够以腐殖质缔合的形态存在并在土壤中固定下来, SOM 对于土壤 Se 的富集起决定性的作用。也有研究发现, 土壤全硒含量与土壤有机质无明显的相关性(陈俊坚等, 2012; 周越等, 2014)。王松山等(2011)研究认为, 在相同母质下, 有机质含量越高, Se 含量越高。②各土层中, 除表土层土壤 Se 全量与 pH 值未出现显著相关性外, 其他土层均出现显著负相关, 犁底-心土层、心土层、底土层、深土层及全土层相关系数分别为 -0.64 、 -0.55 、 -0.65 、 -0.64 、 -0.70 ($p < 0.01$)。有研究表明, 土壤 pH 值对硒的影响主要是影响其形态及生物有效性, 与其全量相关性不大(周越等, 2014)。但也有研究认为, pH 值与 Se 全量有一定的负相关性, pH 可以通过影响土壤中硒的形态和价态, 改变土壤硒的迁移转化能力, 进而影响土壤 Se 含量(黄春雷等, 2013; 刘永贤等, 2018)。本文相关性揭示出的下层土壤与

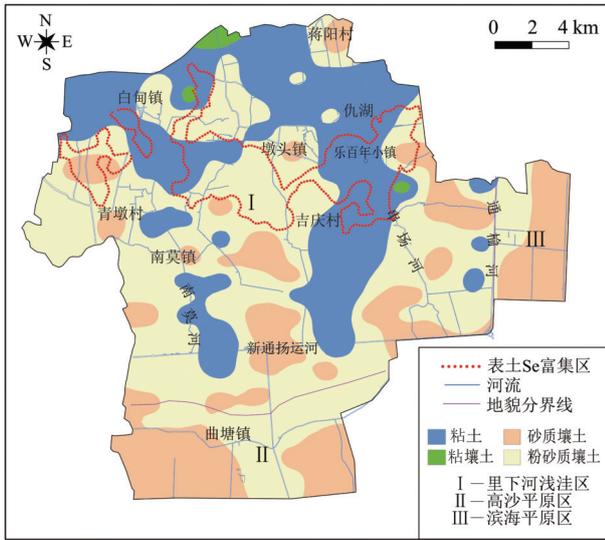


图 4 深土层土壤类型

Fig. 4 Deep soil type in the study area

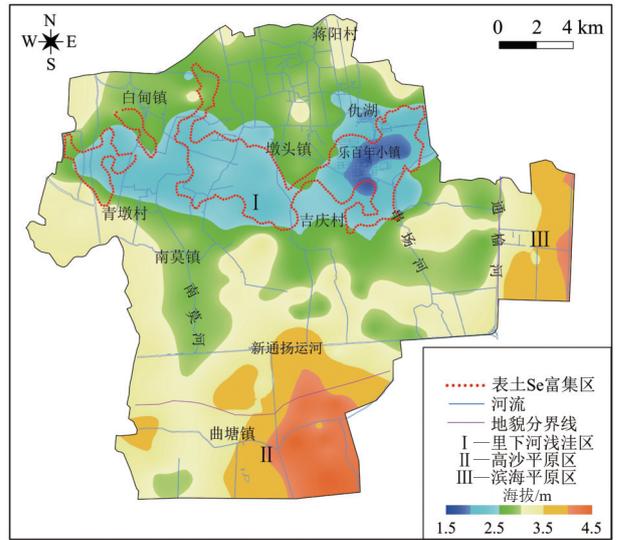


图 6 研究区地表高程图

Fig. 6 Surface elevation map (NHD-85) of the research area

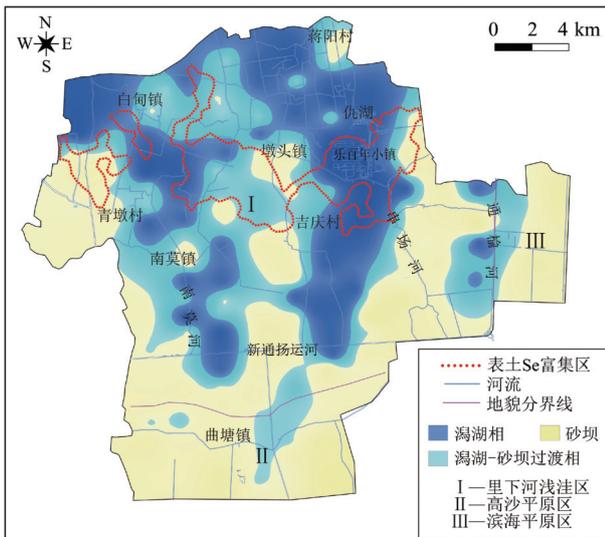


图 5 母质沉积环境分区

Fig. 5 Sedimentary environment zoning of parent material

表 5 表层土壤 Se 含量与下部各土壤 Se 含量相关系数 (n=200)

Table 5 Relationship between Se content in surface soil and Se content in lower soil

土层/cm	犁底层 (20~40)	心土层 (50~80)	底土层 (80~100)	深土层 (150~180)
表层 (0~20)	0.79**	0.71**	0.65**	0.60**

注:**表示在0.01水平(双侧)上显著相关

pH 有一定的负相关, 而表层几乎没有关系, 中下层土壤环境较稳定, 一般不易流失。研究区母质环境

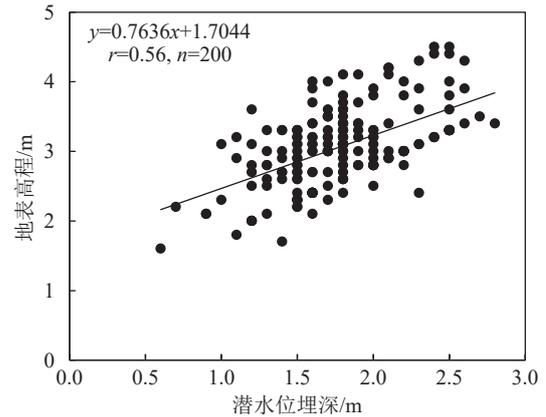


图 7 地表高程-潜水位埋深相关关系

Fig. 7 Correlation between surface elevation and groundwater depth

为碱性—强碱性土壤环境, SOM 与 pH 有较显著的负相关, 而 SOM 与 Se 全量有一定的正相关性, 中下层土壤出现 Se 全量与 pH 值的负相关, 很可能是在 SOM 高含量区, 即 Se 全量高值区, 其土壤受 SOM 的影响 pH 值相对较低, 因此在相关性分析过程中出现了一定的负相关。③土壤全 Se 与土壤质地出现显著相关性, 与粘粒 (Clay) 的关系在底土层 (80~100 cm) 和深土层 (150~180 cm) 出现中等强度正相关, 相关系数分别为 0.47 和 0.55 ($p < 0.01$), 其他层位均为弱相关; 与粉粒均为中等强度正相关; 与砂粒均为负相关, 在心土层 (50~80 cm)、底土层 (80~100 cm)、深土层 (150~180 cm) 3 个层位出现中等—强相关; 与平

表 6 地表高程与各层位 Se、SOM、粘粒、Mz 相关系数 (n=200)

Table 6 Correlation coefficient between surface elevation and Se, SOM, Clay, Mz of each layer

项目	土层/cm				
	0~20	20~40	50~80	80~100	150~180
地表高程-Se	-0.600**	-0.646**	-0.590**	-0.621**	-0.577**
地表高程-SOM	-0.401**	-0.519**	-0.488**	-0.492**	-0.539**
地表高程-Clay	-0.116	-0.101	-0.247**	-0.246**	-0.318**
地表高程-Mz	-0.178*	-0.164*	-0.296**	-0.281**	-0.405**

注: **表示在 0.01 水平(双侧)上显著相关; *表示在 0.05 水平(双侧)上显著相关(下同)

表 7 各土层 Se 全量与土壤主要理化性质的相关系数

Table 7 Correlation coefficient between total soil Se content and main physicochemical properties

土层/cm	有机质	pH	粘粒	粉粒	砂粒	平均粒径
0~20	0.46**	-0.04	0.20**	0.23**	-0.23**	0.15*
20~40	0.82**	-0.64**	0.16*	0.31**	-0.39**	0.28**
50~80	0.83**	-0.55**	0.26**	0.34**	-0.52**	0.39**
80~100	0.86**	-0.65**	0.47**	0.15*	-0.62**	0.54**
150~180	0.87**	-0.64**	0.55**	0.27**	-0.67**	0.65**
0~180	0.86**	-0.70**	0.36**	0.30**	-0.29**	0.11*

均粒径均为正相关, 其中在底土层(80~100 cm)和深土层(150~180 cm)为强相关, 其他层位为弱相关。总体而言, 在深层土壤, 土壤全硒与质地有较好的相关性, 总体表现为细粒物质 Se 全量高。而在表层土

壤, 受农业生产及高沙土治理等影响, 表层土壤质地已与深层出现明显变化, 土壤质地不是影响 Se 含量的单一因素。

2.3.4 土壤硒富集主要控制因素

研究区潟湖-砂坝沉积体系控制了土壤硒的初始富集范围, 地形条件和有机质对硒的富集起决定性作用。研究区地处古潟湖边缘水陆交接处, 地势低洼处沉积物粒度较细, 有机质含量较高, 细粒物质中粘土矿物含量高, 有机质和粘土矿物均对土壤硒有一定的固定和富集作用。平面上, 在地表元素迁移作用下, 砂性土壤 Se 易流失, Se 元素往地势低的区域迁移, 而地势低的区域是 SOM 含量高的地区, SOM 对 Se 有较好的吸附作用和固定作用, 硒能够以腐殖质缔合的形态存在并在土壤中固定下来。垂向上由于上部土壤 SOM 含量总体高于下部, 在 SOM 的吸附作用下, Se 元素向表层不断聚集迁移。

为揭示研究区 SOM 对土壤 Se 富集的控制程度, 本次利用多元线性回归技术分析了 SOM 对 Se 富集的控制作用。前文分析表明, 研究区与土壤 Se 富集相关的关键土壤理化因子包括 SOM、pH、质地等。土壤质地包括粘粒(Clay)、粉粒(Silt)、砂粒(Sand)及平均粒径(Mz), 由于具有一定的同质性, 本次选择 Mz 代表质地指标。以获得的土壤柱 5 个土层 1000 个样本数据为基础, 通过对数转换, 然后以土壤 Se 为因变量, 以 SOM、pH、Mz 为自变量, 应用多元回归分析技术, 构建土壤 Se 与其影响因子的线性模型(表 8)。

表 8 全土层 (0~180 cm) Se 含量多元回归线性模型

Table 8 Multiple regression linear model for Se content in the entire soil layer (0~180 cm)

因子	预测方程 (n=1000)	R ²	p	德宾-沃森值	F	
单因子	SOM	$\lg Se_{soil} = 0.480 \lg SOM - 1.298$	0.747	<0.01	1.225	322.52
	pH	$\lg Se_{soil} = -3.96 \lg pH + 2.703$	0.456	<0.01	1.075	84.22
	Mz	$\lg Se_{soil} = 0.682 \lg Mz - 1.391$	0.046	<0.01	0.477	17.53
双因子	SOM+pH	$\lg Se_{soil} = 0.449 \lg SOM - 0.443 \lg pH - 0.873$	0.764	<0.01	1.203	163.50
	SOM+Mz	$\lg Se_{soil} = 0.476 \lg SOM + 0.157 \lg Mz - 1.419$	0.765	<0.01	1.238	162.79
三因子	SOM+Mz+pH	$\lg Se_{soil} = 0.436 \lg SOM + 0.213 \lg Mz - 0.561 \lg pH - 0.922$	0.779	<0.01	1.220	110.87

注: 式中, Se_{soil} 为土壤 Se 含量(单位为 mg/kg); SOM 为土壤有机质含量(单位: %); Mz 为平均粒径(单位: Φ)。R² 为回归分析中自变量变异对因变量的解释度, 即相对控制程度, 范围为 0~1; p 为显著性水平, p < 0.05 为有显著性, p < 0.01 为极显著性, p > 0.05 为没有显著性; 德宾-沃森值为检验变量自相关性的指标, 若在 0~4 之间, 符合数据独立性; F 值为组间和组内的离差平方和与自由度的比值, 在 p < 0.01 下其值越大表明模型越具统计学意义

(1)分别引入单因子 SOM、pH、 Mz 构建模型, R^2 分别为 0.747、0.456 和 0.046($p < 0.01$), 表明 SOM、pH、 Mz 单因子对土壤 Se 的控制精度分别为 74.7%、45.6% 和 4.6%。

(2)由于研究区土壤剖面 pH 与 SOM 呈极显著负相关, 且研究区成土第一环境以碱性—强碱性土为主体, pH 下降有很大一部分因素是受 SOM 升高造成的, 因此, 虽然 pH 单因子对土壤 Se 的控制程度为 45.6%, 但并不代表完全因酸碱度的影响造成 Se 的富集。为此分别引入 SOM + pH、SOM + Mz 进入模型, 2 组模型 R^2 分别为 0.764 和 0.765($p < 0.01$), 表明双因子下对土壤 Se 的控制程度分别为 76.4% 和 76.5%, 扣除 SOM 单因子的控制精度, pH 和 Mz 对 Se 的贡献度分别为 1.5% 和 1.8%。

(3)当同时引入 SOM + pH + Mz 三因子时, 模型 R^2 为 0.779($p < 0.01$), 说明上述 3 个指标对土壤 Se 的控制程度为 77.9%。对于土壤 Se 的控制, 主体是受 SOM 的影响, SOM 对土壤 Se 的控制程度为 74.7%。

(4)上述模型德宾-沃森值均在 0~4 之间, 表明自变量之间符合独立性, F 值均大于 10 且很小的 p 值意味着至少有一个自变量对应因变量是显著的。

(5)为验证该模型准确度, 本文从 1800 个表层土壤样品中选取了 100 个点位实测数据对三因子 $\lg Se_{soil} = 0.436 \lg SOM + 0.213 \lg Mz - 0.561 \lg pH - 0.922$ 方程进行验证, 即以实测的 SOM、 Mz 、pH 值经对数转换后代入上述方程, 得出该点位土壤 Se 含量预测值, 与实测值进行对比, 统计结果如表 9 所示, 模型含量最大偏差为 0.13 mg/kg, 最大相对偏差约为 30%, 相对偏差绝对值平均约为 17.2%, 总体上

该模型精度较可靠。

3 结论

(1)江苏海安里下河地区土壤硒出现了强烈的表生富集效应, 富集区主要分布于潟湖相沉积低洼区的表层土壤, 富集面积达 66 km², Se 最高含量达 0.63 mg/kg。

(2)研究区成陆期母质沉积环境主要受潟湖-砂坝体系控制, 据粒度特征可分为潟湖相、潟湖-砂坝过渡相、砂坝相, 其中潟湖相低洼区出现硒的相对富集, 该区域有机质含量高, 土壤质地较细, 在此基础上发育的土壤进一步富集硒, 至表层已达富硒土地标准。

(3)土壤硒与深土母质、有机质、地形条件、土壤质地等均出现极显著的相关性, 总体表现为母质 Se 和有机质含量越高、地势越低、土壤质地越细, 土壤中 Se 含量越高, 母质沉积环境和地形控制了土壤硒富集边界, 有机质对硒具有重要的吸附作用和固定作用。

(4)研究区富硒土壤是发育于古潟湖相的母质经表生富集作用形成的, 成因类型为沉积型(古潟湖相), 有机质对于研究区 Se 的富集起到了决定性作用, 对土壤硒的贡献率达 70%。区内有机质丰富, 土壤硒有稳定的来源, 具有发展富硒产业的资源基础。

致谢: 工作中得到江苏省地质局海洋院“海安富硒土壤调查项目部”野外一线人员的大力支持和审稿专家的悉心指导, 在此一并表示衷心感谢。

References

- Banuelos G S, Arroyo I, Pickering I J, et al. 2015. Selenium biofortification of broccoli and carrots grown in soil amended with Se-enriched hyperaccumulator *Stanleya pinnata*[J]. Food Chemistry, 166(1): 603–608.
- Chai G Q, Wang G K, Wang L, et al. 2022. Distribution of soil Se content and its influencing factors in Qingzhen City, Guizhou Province[J]. Soils, 54(6): 1108–1116(in Chinese with English abstract).
- Chai L F, Li J, Zhong X Y, et al. 2019. Selenium contents and their relationship with main soil properties in farmland soils of southern Guizhong, Guangxi[J]. Chinese Journal of Soil Science, 50(4): 899–903(in Chinese with English abstract).
- Chen J P, Liu Y X, Pan L P, et al. 2018. Selenium accumulation characteristics and influential factors of different crops in Xunyu Plain[J]. Soils, 50(6): 1155–1159(in Chinese with English abstract).

表 9 土壤 Se 实测值与模型预测值偏差统计

Table 9 Deviation between measured soil Se values and model predictions

项目	含量偏差/ (mg·kg ⁻¹)	实测值/ (mg·kg ⁻¹)	预测值/ (mg·kg ⁻¹)	相对偏差/%
最大正偏差	0.07	0.22	0.29	31.8
最大负偏差	-0.13	0.44	0.31	-29.5
均值	-0.001	0.24	0.23	-1.1
绝对值均值	0.035	0.24	0.23	17.2

注: 含量偏差=预测值-实测值; 相对偏差=含量偏差/实测值

- Chen J J, Zhang H H, Yu W M, et al. 2012. Spatial variation and environmental indications of soil selenium in Guangdong province[J]. *Ecology and Environment*, 21(6): 1115–1120(in Chinese with English abstract).
- Dai H M, Gong C D, Dong B, et al. 2015. Distribution of soil selenium in the Northeast China Plain and its influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 52(6): 1356–1364(in Chinese with English abstract).
- Daniel L M. 2008. Distribution, mineralogy and geochemistry of selenium in felsic volcanic-hosted massive sulfide deposits of the Finlays on Lake District, Yukon Territory, Canada[J]. *Society of Economic Geologists, Inc.*, 103: 61–68.
- Gao M S, Guo F, Huang X Y, et al. 2019. Sediment distribution and provenance since Late Pleistocene in Laizhou Bay, Bohai Sea, China[J]. *China Geology*, 2: 16–25.
- Huang C L, Song M Y, Wei Y C, et al. 2013. Study on selenium contents of typical selenium-rich soil in the middle area of Zhejiang and its influencing factors[J]. *Environmental Science*, 34(11): 4405–4410(in Chinese with English abstract).
- Jiang P, He F Q, Fang L, et al. 2006. The relationship between the engineering properties and development mechanism of the ancient lagoon facies soft soil at Lixiahe[J]. *Journal of Engineering Geology*, 14(6): 769–775(in Chinese with English abstract).
- Jones G D, Droz B, Greve P, et al. 2017. Selenium deficiency risk predicted to increase under future climate change[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(11): 2848–2853.
- Liao Q L, Cui X D, Huang S S, et al. 2020. Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 47(6): 1813–1825(in Chinese with English abstract).
- Liao Q L, Wu X M, Zhang D M, et al. 2007. A geochemical survey report on the target area of 1 : 250 000 in Jiangsu Province[R]. Nanjing: Geological Survey of Jiangsu Province(in Chinese).
- Liu J, Wang Y F, Lin Z Y, et al. 2022. Distribution, sources and ecological effects of selenium in topsoil of cultivated land in Jiande City, Zhejiang Province[J]. *Geoscience*, 36(3): 953–962(in Chinese with English abstract).
- Liu J P, Li A C, Xu K H, et al. 2006. Sedimentary features of the Yangtze River-derived along-shelf clinoform deposit in the East China Sea[J]. *Continental Shelf Research*, 26: 2141–2156.
- Liu Y X, Chen J P, Pan L P, et al. 2018. Studies on causes and influential factors of selenium-rich soil in Xunyu Plain[J]. *Soils*, 50(6): 1139–1144 (in Chinese with English abstract).
- Mao X J, Liu L, Cheng X T, et al. 2021. Geochemistry and spatial distribution of Se element in soils of typical Se-rich area in Xinmi, Henan Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1664–1670(in Chinese with English abstract).
- Mclaren P, Bowles D. 1985. The effects of sediment transport on grain-size distributions[J]. *Journal of Sedimentary Research*, 55: 457–470.
- Mei X, Li X J, Mi B B, et al. 2020. Distribution regularity and sedimentary differentiation patterns of China seas surface sediments[J]. *Geology in China*, 47(5): 1447–1462(in Chinese with English abstract).
- Supriatin S, Weng L, Comans R. 2015. Selenium speciation and extractability in Dutch agricultural soils[J]. *Science of the Total Environment*, 532(1): 368–382.
- The Editorial Committee of the Agricultural Dictionary. 1998. *Agricultural Dictionary*[M]. Beijing: China Agricultural Press: 1–577(in Chinese).
- Umesh C G, Subhas C G. 2010. Selenium deficiency in soils and crops and its impact on animal and human health[J]. *Current Nutrition & Food Science*, 6(4): 268–280.
- Wang R Q, Zhang Z M, Xu C, et al. 2022. A study of the Selenium speciation in paddy soil and status of selenium-enriched rice in western part of Ankang City, Shaanxi Province[J]. *Geology in China*, 49(2): 398–408(in Chinese with English abstract).
- Wang S S, Liang D L, Wei W, et al. 2011. Relationship between soil physico-chemical properties and selenium species based on path analysis[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 48(4): 823–830(in Chinese with English abstract).
- Wang Y. 2008. Soil geochemical characteristics of selenium[J]. *Xiandai Nongye Keji*, (17): 233–236(in Chinese with English abstract).
- Wu J. 2018. The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing factors[J]. *Geology in China*, 45(6): 1167–1176(in Chinese with English abstract).
- Wu K N, Zhao R. 2019. Soil Texture classification and its application in China[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 56(1): 227–241(in Chinese with English abstract).
- Xu X S, Luo J L, Huang F Q, et al. 2022. Construction of the evaluation system for Se-rich arable land and its application in Xinxu Town, Xintian County, Hunan Province[J]. *Geology in China*, 49(3): 789–801(in Chinese with English abstract).
- Yang K, Li X L, Zhang J Y, et al. 2018. Selenium Bioavailability and the Influential Factors in Potentially Selenium Enriched Soils in Lujiang County, Anhui Province[J]. *Research of Environmental Sciences*, 31(4): 715–724(in Chinese with English abstract).
- Yang Z, Liu G D, Dai H M, et al. 2021. Selenium geochemistry of soil and development potential of Se-rich soil in Xingkai Lake Plain[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(10): 1773–1782 (in Chinese with English abstract).
- Zhang H B, Luo Y M, Wu L H, et al. 2005. Hong Kong soil researches II: Distribution and content of selenium in soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 42(3): 404–410(in Chinese with English abstract).
- Zhou M, Tang Z M, Zhang M, et al. 2021. Selenium contents of rice and rhizosphere soil and threshold value of selenium-rich soil in Ganzhou of Jiangxi Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(4): 604–609 (in Chinese with English abstract).
- Zhou Y Z, Liu Y, Wang B, et al. 2020. Influence factors of soil selenium in cultivated area of Nangqian County, Qinghai Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 39(12): 1952–1959(in Chinese with English abstract).

Zhou Y, Wu W L, Meng F Q, et al. 2014. Review on the content, specification of selenium and its availability in soils[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 31(6): 527-532(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

- 柴冠群, 王国坤, 王丽, 等. 2022. 贵州省清镇市土壤硒含量的分布及其影响因素[J]. 土壤, 54(6): 1108-1116.
- 柴龙飞, 李杰, 钟晓宇, 等. 2019. 广西桂中南部地区富硒土壤硒含量及其与土壤理化性状的关系[J]. 土壤通报, 50(4): 899-903.
- 陈锦平, 刘永贤, 潘丽萍, 等. 2018. 浔郁平原不同作物的硒富集特征及其影响因素[J]. 土壤, 50(6): 1155-1159.
- 陈俊坚, 张会化, 余炜敏, 等. 2012. 广东省土壤硒空间分布及潜在环境风险分析[J]. 生态环境学报, 21(6): 1115-1120.
- 戴慧敏, 官传东, 董北, 等. 2015. 东北平原土壤硒分布特征及影响因素[J]. 土壤学报, 52(6): 1356-1364.
- 黄春雷, 宋明义, 魏迎春. 2013. 浙中典型富硒土壤区土壤硒含量的影响因素探讨[J]. 环境科学, 34(11): 4405-4410.
- 姜鹏, 贺富强, 方磊, 等. 2006. 里下河古潟湖相软土基本工程特性与形成机理的关系[J]. 工程地质学报, 14(6): 769-775.
- 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 2020. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源[J]. 中国地质, 47(6): 1813-1825.
- 廖启林, 吴新民, 张登明, 等. 2007. 江苏省1:25万多目标区域地球化学调查报告[R]. 南京: 江苏省地质调查研究院.
- 刘健, 汪一凡, 林钟扬, 等. 2022. 浙江建德市耕地表层土壤硒分布、来源及生态效应[J]. 现代地质, 36(3): 953-962.
- 刘永贤, 陈锦平, 潘丽萍, 等. 2018. 浔郁平原富硒土壤成因及其影响因素研究[J]. 土壤, 50(6): 1139-1144.
- 毛香菊, 刘璐, 程新涛, 等. 2021. 河南新密典型富硒区土壤Se元素地球化学特征及空间分布规律[J]. 地质通报, 40(10): 1664-1670.
- 梅西, 李学杰, 密蓓蓓, 等. 2020. 中国海域表层沉积物分布规律及沉积分异模式[J]. 中国地质, 47(5): 1447-1462.
- 农业大词典编辑委员会. 1998. 农业大词典[M]. 北京: 中国农业出版社: 1-577.
- 王仁琪, 张志敏, 晁旭, 等. 2022. 陕西省安康市西部稻田土壤硒形态特征与水稻富硒状况研究[J]. 中国地质, 49(2): 398-408.
- 王松山, 梁东丽, 魏威, 等. 2011. 基于路径分析的土壤性质与硒形态的关系[J]. 土壤学报, 48(4): 823-830.
- 王莹. 2008. 硒的土壤地球化学特征[J]. 现代农业科技, (17): 233-236.
- 吴俊. 2018. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素[J]. 中国地质, 45(6): 1167-1176.
- 吴克宁, 赵瑞. 2019. 土壤质地分类及其在我国应用探讨[J]. 土壤学报, 56(1): 227-241.
- 徐雪生, 骆检兰, 黄逢秋, 等. 2022. 富硒耕地质量评价体系构建及其在湖南省新田县新圩镇的应用[J]. 中国地质, 49(3): 789-801.
- 杨奎, 李湘凌, 张敬雅, 等. 2018. 安徽庐江潜在富硒土壤硒生物有效性及其影响因素[J]. 环境科学研究, 31(4): 715-724.
- 杨泽, 刘国栋, 戴慧敏, 等. 2021. 黑龙江兴凯湖平原土壤硒地球化学特征及富硒土地开发潜力[J]. 地质通报, 40(10): 1773-1782.
- 章海波, 骆永明, 吴龙华, 等. 2005. 香港土壤研究域II: 土壤硒的含量、分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 42(3): 404-410.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. DZ/T 0295—2016, 土地质量地球化学评价规范[S].北京: 地质出版社.
- 中华人民共和国自然资源部. 2021. DZ/T 0380—2016, 天然富硒土地划定与标识[S].北京: 地质出版社.
- 周墨, 唐志敏, 张明, 等. 2021. 赣州市水稻及根系土中硒的含量特征与富硒土壤界限值[J]. 地质通报, 40(4): 604-609.
- 周殷竹, 刘义, 王彪, 等. 2020. 青海省囊谦县农耕地土壤硒的富集因素[J]. 地质通报, 39(12): 1952-1959.
- 周越, 吴文良, 孟凡乔, 等. 2014. 土壤中硒含量、形态及有效性分析[J]. 农业资源与环境学报, (6): 527-532.