

doi: 10.11720/wtyht.2024.1369

廖启林, 黄顺生, 许伟伟, 等. 江苏省里下河地区富硒土壤元素地球化学特征及其成因机制[J]. 物探与化探, 2024, 48(4): 1114-1124. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1369>

doi: 10.11720/wtyht.2024.1369

Liao Q L, Huang S S, Xu W W, et al. Elemental geochemical characteristics and genetic mechanisms of Se-rich soils in the Lixiahe area in Jiangsu Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2024, 48(4): 1114-1124. <http://doi.org/10.11720/wtyht.2024.1369>

江苏省里下河地区富硒土壤元素 地球化学特征及其成因机制

廖启林^{1,2}, 黄顺生^{1,2}, 许伟伟^{1,2}, 崔晓丹^{1,2}, 金洋^{1,2}, 刘玲^{1,2}, 汪媛媛^{1,2}, 李文博^{1,2}, 周强^{1,2}

(1. 自然资源部国土(耕地)生态监测与修复工程技术创新中心, 江苏 南京 210018; 2. 江苏省地质调查研究院, 江苏 南京 210018)

摘要: 基于江苏省里下河平原区所积累的有关生态地球化学调查数据, 通过元素分布对比、相关分析、R 型聚类分析、主成分分析等, 系统探讨了该区富硒土壤的元素地球化学特征和成因机制, 为合理开发利用第四纪沉积类型的富硒土地资源等提供了依据或线索。研究结果显示: 里下河富硒土壤为典型的第四纪沉积成因, 富有机质、偏还原的封闭的潟湖相沉积环境是形成局地富硒土壤的基础; 富硒土壤特征元素组合为 Se-OM-N-K-Fe-Co, 主要位于地表 30 cm 以上深度, Se 含量多为 $(0.3 \sim 0.4) \times 10^{-6}$, 分布均匀; 土壤中大多数元素之间有显著正相关性, Se-OM、Se-CEC 的相关系数 r 分别为 0.74、0.66, Se 和 pH 之间有较显著负相关性, 相关系数为 -0.35; 富硒土壤形成要经历成土母质初始富集、成土期间再富集和成土后表生富集 3 个富 Se 阶段, 以及非潟湖相沉积物(如海相沉积等)的干扰, 有机质吸附、胶体吸附和生物地球化学作用是导致土壤 Se 富集的主要原因; 富硒土壤中还伴有 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、V 等相对富集, 但相关重金属未超标。

关键词: 富硒土壤; 元素; 地球化学特征; 成因机制; 里下河地区; 江苏**中图分类号:** P632; P596**文献标识码:** A**文章编号:** 1000-8918(2024)04-1114-11

0 引言

硒(Se)在 1973 年被世界卫生组织确认为人类和动物必不可少的微量元素^[1], 具有保护心肌健康、抗氧化、防衰老、增强人体免疫力以及防癌抗癌等功用, 被比喻为“主宰生命的微量元素”。近年来围绕元素 Se 的环境地球化学调查研究^[2-6]一直处于方兴未艾之中, 富硒土壤作为生产天然富硒食品的主要物质基础, 正受到各地高度重视和绿色生态产业的普遍欢迎, 富硒土壤元素地球化学特征及其成因等已成为当前勘查地球化学及其相关学科的一大研究热点^[4-14]。自然界中的 Se 属于稀散的亲硫元素, 其局部富集离不开特定地质环境^[8, 15-17]。前人对富硒土壤元素地球化学特征的研究多偏重调查

成果的总结与报道, 而且多集中于富硒岩层为主要物质来源的富硒土壤^[9-14], 而真正涉及到第四系沉积物质来源的富硒土壤案例并不多, 见诸文献的似乎只有浙北地区^[18]。就我国相当部分耕地集中在平原区的实情而言, 开发利用好第四纪沉积形成的富硒土壤或许更有现实意义。本研究团队积江苏省土壤元素地球化学调查评价数十年之功, 初步证实江苏省里下河平原区的富硒土壤属于第四纪沉积成因, 其元素组合与土壤富硒机制同国内常见的来自于富硒岩层的富硒土壤可能有一定差异。本文以先前掌握的相关生态地球化学调查、评估等数据为基础, 拟对江苏省里下河地区的富硒土壤元素地球化学特征及其成因机制做探讨, 期望能为从事土壤元素地球化学调研及天然富硒土地资源开发利用的同行提供部分参考或新的线索。

收稿日期: 2024-08-25; **修回日期:** 2023-12-25**基金项目:** 江苏省自然资源发展专项资金(海洋科技创新)项目(JSZRHYKJ202117); 江苏省自然科学基金面上项目(BK20171496)**第一作者:** 廖启林(1964-), 男, 博士, 研究员级高级工程师, 地球化学专业。Email: 1043034588@qq.com**通讯作者:** 黄顺生(1975-), 男, 正高级工程师, 勘查地球化学与地质矿产专业。Email: 21381565@qq.com

1 研究区概况及数据来源

江苏省是我国著名的经济和农业大省,也是山地最少、平均海拔最低和唯一的通江达海省区,基岩出露区面积不到 20%,80%以上陆域为第四系所覆盖,主要包含下更新统、中更新统、上更新统和全新统等沉积地层。全省气候和农耕环境刚好处于我国南北过渡带,既有北方旱作的悠久历史,也有南方水田的独特优势,大宗农产品包括稻谷、小麦、玉米等。里下河地区(或里下河洼地)位于江苏省中部,被形象比喻为江苏省地形之“锅底”,全部为第四系所覆

盖,沉积厚度多在 200 m 以上,基岩大多被埋藏在数百米之下。第四系主要包含河流相、河湖相、河湖冲积相、湖海沉积相、湖沼相、潟湖相等,岩性主要有黏土、淤泥质黏土、亚黏土、亚砂土、砂土等。潟湖相常伴随地势低洼处分布,具有一定的随机性,通常更富有机质。里下河地区为江苏省最主要的大米产地,已建成多个国家级商品粮生产基地或绿色农业发展示范基地,当地土壤 Se 总体处于高背景偏丰富水平,局地富硒土壤多散落在淮安以南到泰州以北的广大区域(图 1),已圈定数片富硒土壤面积超过 5 万亩的农田。

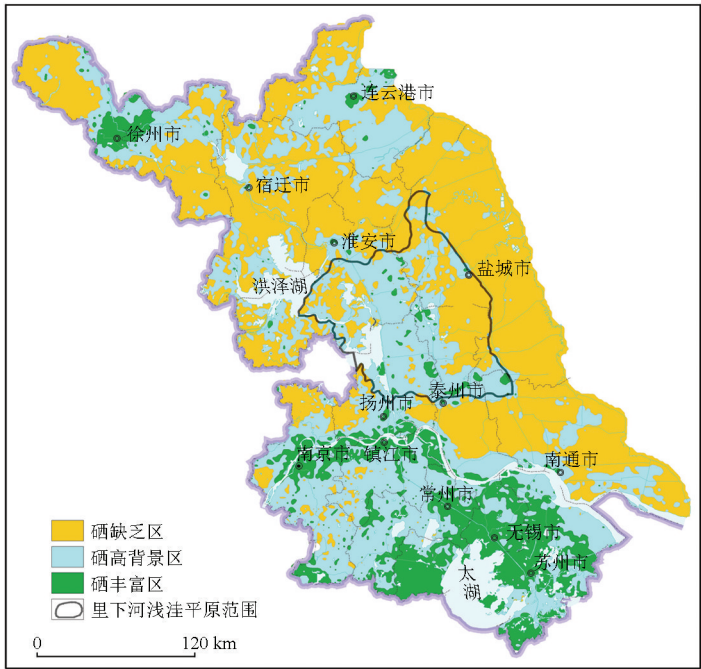


图 1 江苏省富硒土壤分布状况及研究区位置

Fig. 1 Spatial distribution of the main Se-enriched soil in Jiangsu Province and studied area location

江苏省于 2009 年率先结束其全省国土的区域生态地球化学调查(1 : 250 000),掌握了包括里下河地区在内的全省土壤 54 项指标的生态球化学调查数据,Se 作为上述 54 项指标之一,加上其特殊的生态环境效应,自然受到了更多关注。之后,又陆续开展了江苏省平原地区大部分市县的 1 : 50 000 土地质量地球化学评估(少许乡镇还完成了 1 : 10 000 高精度评价),进一步收集到里下河地区包含 Se 在内的土壤元素分布数据。截止 2022 年已经累计收集到里下河地区约 1.2 万 km² 国土上 30 000 多件土壤样品的元素地球化学调查数据,掌握了土壤样品中 Se、OM、pH、CEC、Cd 等以微量元素为主的 26 个地球化学指标的真实分布状况,为深入探讨里下

河地区富硒土壤元素地球化学特征奠定了扎实的资料基础。

江苏省发现大面积富硒土壤的历史可以追溯到 20 年以前,目前已经有 3 个地区获得中国地质学会认定的“天然富硒土地”授牌,里下河局部地区富硒土壤就是其中之一。在过去近 20 年的富硒土地开发利用实践中,本团队相关人员也先后对江苏省富硒土壤的分布规律、元素地球化学特征、成因机制及资源潜力等进行了持续探索研究^[19-22],为有效开发利用江苏省珍贵的富硒土地资源提供了依据或线索。上述探索研究涉及到部分里下河富硒土壤的信息,但未专门针对里下河地区的富硒土壤元素地球化学特征及其成因等进行研究。

2 里下河富硒土壤元素地球化学特征

2.1 元素含量分布特征

依据 1 : 50 000 土地质量地球化学评估数据,对里下河地区富硒土壤中 Se 等元素地球化学参数进行统计,结果见表 1。由该表可以看出:

1)研究区土壤 Se 含量为 $(0.26\sim0.7)\times10^{-6}$,平均值(算术均值,余同) 0.3×10^{-6} ,变异系数为 0.16。相比江苏省全省^[19]和里下河地区土壤平均值而言,里下河富硒土壤的 Se 含量要明显偏高,其土壤 Se 平均含量与我国北方平原地区的富硒土壤平均含量(如宁夏石嘴山)基本相当。

2)里下河富硒土壤的 pH 介于 4.46~8.47,均值 6.54,总体属于中性偏碱性的土壤环境;有机质含量(OM)为 1.46%~10.84%,平均含量 4.33%,其 OM 均量比江苏省土壤 OM 背景值(1.88%)高出 2 倍以上,也远远大于宁夏石嘴山富硒土壤的 OM 均量。

3)里下河富硒土壤 As、Cd、Hg、Pb、Cr 等重金属元素的最大值分别为 17.5×10^{-6} 、 0.59×10^{-6} 、 0.44×10^{-6} 、 48.2×10^{-6} 、 210×10^{-6} ,均未超过国家土壤环境质量标准限定的农用地土壤风险筛选值(GB 15618—2018),且 5 种重金属元素的平均含量更是远低于农用地土壤风险筛选值,表明当地的富硒土壤多属于绿色富硒土壤。

4)里下河富硒土壤的元素含量变异系数普遍小于 0.5,在所分析测试的 26 个指标中,仅有 Mo、Cl、Sb 3 个元素的变异系数大于 0.5。当剔除少量特异含量数据,致使元素分布满足正态分布要求时,上述 26 个元素(或指标)的变异系数全部小于 0.5,指示里下河富硒土壤元素含量分布总体较均匀,且较好地继承了原始沉积环境的属性。

图 2 展示了里下河富硒土壤区典型土壤沉积剖面(或垂向剖面,余同)Se 等元素含量变化情况,可以看出 Se 与 OM 的变化相似度极高,都大致经历 3 个阶段的相对富集,分别发生在约 140 cm、70 cm、

表 1 里下河地区富硒土壤元素地球化学参数统计(N=1313)
Table 1 Geochemical parameters of elements of selenium-enriched soil in Lixiahe area

指标	\bar{X}_{\min}	\bar{X}_{\max}	\bar{X}	C_V	\bar{X}_g	S_a	$\bar{X}_{\min a}$	$\bar{X}_{\max a}$	\bar{X}_a	C_{Va}	里下河土壤均值	江苏省土壤均值 ^[19]	石嘴山富硒土壤均值
Se	0.26	0.7	0.30	0.16	0.30	1179	0.26	0.35	0.29	0.09	0.20	0.21	0.34
OM	1.46	10.84	4.33	0.24	4.20	1268	1.95	6.54	4.25	0.22	2.28	1.88	1.89
N	404	5035	2335	0.23	2274	1275	1142	3474	2314	0.20	1431	1252	978
P	359	3688	1024	0.32	983	1219	474	1466	962	0.21	703	791	983
K	1.43	2.54	1.99	0.08	1.98	1236	1.68	2.32	2.00	0.06	1.91	1.82	1.35
Ca	0.61	3.77	0.98	0.43	0.92	1052	0.61	1.03	0.82	0.10	1.33	2.13	4.97
Mg	0.58	1.60	1.01	0.15	1.00	1160	0.78	1.18	0.98	0.08	0.97	1.01	1.53
Fe	1.93	5.47	3.48	0.14	3.44	1201	2.58	4.39	3.48	0.10	3.57	3.35	3.19
Mn	216	2944	493	0.29	478	1194	264	667	465	0.17	583	629	645
Mo	0.19	17.40	0.77	1.25	0.64	1094	0.26	0.86	0.56	0.22	0.48	0.55	60
B	26.3	145.0	57.0	0.15	56.0	1158	47.0	70.0	58.0	0.08	57	56	0.82
F	265	986	603	0.16	595	1249	403	799	599	0.14	573	546	660
Cl	37.4	1031	138	0.58	122	1180	37	227	118	0.37	100	209	—
As	3.29	17.50	7.81	0.22	7.62	1223	4.45	10.90	7.69	0.17	8.7	9.4	12.91
Cd	0.11	0.59	0.23	0.32	0.22	1173	0.12	0.30	0.21	0.18	0.133	0.151	0.21
Hg	0.037	0.440	0.095	0.39	0.089	1197	0.037	0.140	0.086	0.26	0.062	0.082	0.038
Sb	0.38	15.70	0.86	0.54	0.83	1180	0.46	1.14	0.80	0.17	0.83	0.96	—
Cu	11.3	354.0	31.0	0.38	30.0	1156	19.0	41.2	30.0	0.15	27	26	24
Pb	18.4	48.2	28.0	0.14	28.0	1233	20.0	35.6	28.0	0.11	25.9	26.8	23
Zn	55.2	368.0	97.0	0.23	95.0	1134	67.0	116.0	92.0	0.11	74	73	72
Cr	54.2	210.0	87.0	0.16	86.0	1217	66.0	106.0	86.0	0.09	81	76	66
Ni	16.5	445.0	37.0	0.39	36.0	1213	25.0	48.6	37.0	0.13	34.6	32.9	32
Co	6.21	21.20	14.00	0.15	14.00	1189	10.00	17.50	14.00	0.11	13.6	13.7	13
V	48.2	142.0	95.0	0.15	94.0	1272	62.0	128.0	95.0	0.14	92	88	—
CEC	86	333	199	0.20	195	1289	105	290	198	0.19	—	—	—
pH	4.46	8.47	6.54	0.13	6.49	1311	4.63	8.47	6.54	0.13	7.19	7.33	8.51

注: N 为样品数; OM、K、Ca、Mg、Fe 含量单位为%, CEC 含量单位为 mmol/kg, pH 无量纲; \bar{X}_{\min} 为最小值, \bar{X}_{\max} 为最大值, \bar{X} 为算术平均值, C_V 为变异系数, \bar{X}_g 为几何均值, S_a 为正态分布时参与统计样品数, $\bar{X}_{\min a}$ 、 $\bar{X}_{\max a}$ 、 \bar{X}_a 、 C_{Va} 分别为正态分布时的最小值、最大值、算术平均值、变异系数; 石嘴山富硒土壤元素均量引自《石嘴山地区富硒土地质量调查评价成果报告》; “—”为无数据。

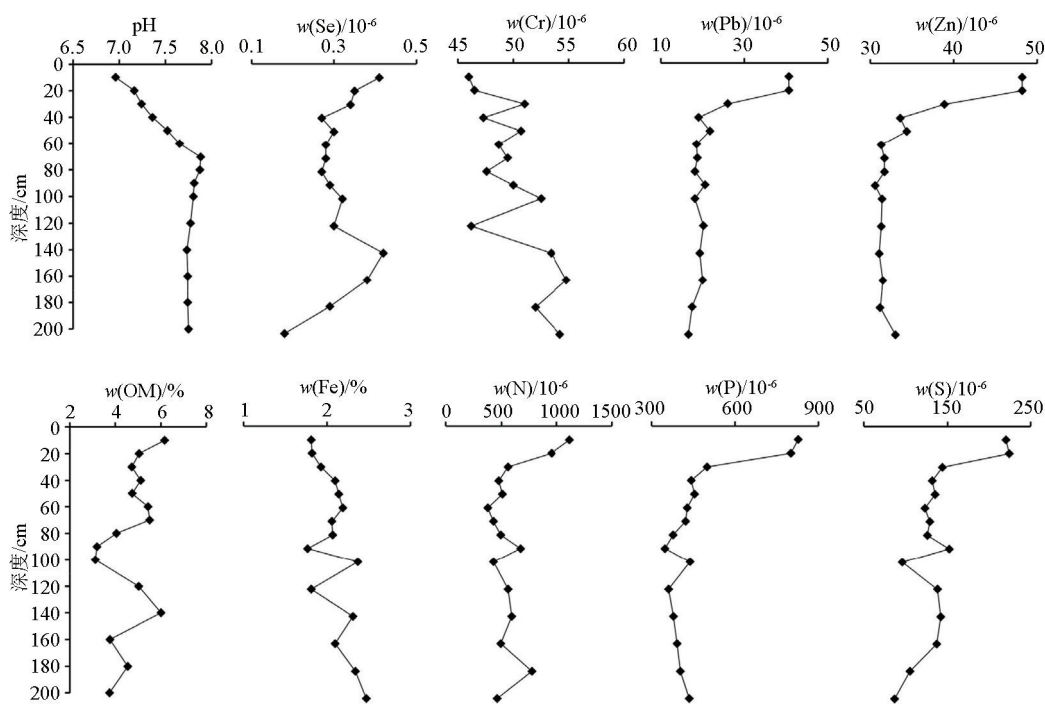


图 2 里下河富硒区典型土壤沉积剖面 Se 等元素含量变化

Fig. 2 Variation of Se and other elements in typical soil sedimentary profile in the Lixiahe Se-rich area

30 cm 深度,说明地表 30 cm 以上的富硒土壤可能是第四纪沉积成土期间经过多次 Se 富集的结果。土壤 pH 在 70 cm 以下相对稳定,70 cm 以上呈逐渐缓慢降低的趋势。土壤 N、P、S、Pb、Zn 这类与人为活动关系甚密切的元素总体呈现了显著的表层富集特征,其 30 cm 以上深度的含量显著高于 30 cm 以下深度的含量。Cr、Fe 随深度变化不甚明显,总体趋势是 30 cm 以下深度含量相对更高,且存在由深到浅含量渐次降低的趋势,这可能与 200 cm 以浅第四纪沉积成土的自然环境演化有关。本次累计在里下河地区测定了类似土壤沉积剖面 6 条,基本都证实当地土壤存在相对一致的 Se 浅表富集趋势,凡是靠近太湖相沉积部位的剖面都能发现上述 3 个阶段 Se 聚集特点。

2.2 元素相关系数统计分析

元素相关性分析是探讨富硒土壤成因的常用方法^[23-25],相关系数(r)统计对比更是揭示元素含量之间相关性密切程度的直接手段。里下河富硒土壤的元素含量相关系数统计结果如表 2 所示,对比该表数据不难发现:

1) 土壤 Se 和 OM 的相关性最好,二者之间呈显著正相关,相关系数 $r=0.74$ 。此外,Se 与 CEC、N、Fe、K、F、Cu、Pb、Zn、Ni、Co、V 等也存在显著正相关,相关系数 r 均大于 0.5;Se 与 pH 之间存在一定的负相关性,相关系数 $r=-0.35$ 。

2) 本次富硒土壤研究共测试了 26 个指标,任意两个不同指标之间的相关系数对比结果显示,以 OM-N、Fe-Co、Fe-K、K-Co 4 个元素对的正相关性相对最密切,其相关系数 r 全部大于 0.9,最高者为 Fe-Co, $r=0.97$,指示在富硒土壤形成过程中,具有相同或相似物质来源的元素对之间的正相关性更为显著。

3) 上述元素对之间,相关系数绝对值全部小于 0.5 的只有 Mo、B、P、Cl、As、Hg,这 6 个元素之间及其与其余指标之间均未呈现出显著相关性(依据以往江苏省境内土壤元素分布的海量调查数据的相关性统计经验得知,只有相关系数 r 绝对值大于 0.5 时,其变量之间的相关性显著与否检验才满足显著的基本条件),说明 Mo、B、P、Cl、As、Hg 在富硒土壤形成过程中可能扮演了特殊角色,与其余各元素的地球化学行为不尽一致。

上述富硒土壤的元素相关系数统计分析结果对比,至少可证实 3 点,其一是元素地球化学亲缘关系客观存在,如土壤 OM 和 N 之间,pH 和 Ca 之间,亲铁元素 Fe、Cu、Ni、Co、V 之间都存在普遍的正相关性(相关系数 r 普遍大于 0.5);其二是 pH 除了与 Ca 之间存在显著正相关外,与其他微量元素之间多呈显著或较显著负相关(相关系数 r 普遍小于 -0.35),这也部分解释了为何提高 pH 反而不利于土壤 Se 富集的原由;其三是里下河富硒土壤的形成

表 2 里下河地区富硒土壤元素含量相关系数统计

Table 2 Correlation coefficients of elements content in the Se-enriched soils in Lixiahe area

指标	Se	pH	CEC	OM	N	K	Ca	Mg	Fe	F	Cd	Cu	Pb	Zn	Ni	Co
Se	1.0**															
Mo	0.34**															
pH	-0.35**	1.0**														
CEC	0.66**	-0.46**	1.0**													
OM	0.74**	-0.49**	0.62**	1.0**												
N	0.73**	-0.45**	0.59**	0.94**	1.0**											
P	0.02*	0.00*	-0.31**	0.21**	0.24**											
K	0.55**	-0.17**	0.65**	0.38**	0.41**	1.0**										
Ca	-0.23**	0.68**	-0.45**	-0.36**	-0.33**	-0.02**	1.0**									
Mg	0.25**	0.37**	0.22**	0.04*	0.10**	0.71**	0.58**	1.0**								
Fe	0.58**	-0.18**	0.72**	0.40**	0.44**	0.93**	-0.00*	0.74**	1.0**							
Mn	0.08**	0.18**	0.06**	-0.08**	-0.05*	0.22**	0.26*	0.35**	0.35**							
F	0.53**	-0.23**	0.63**	0.41**	0.44**	0.79**	-0.05*	0.59**	0.84**	1.0**						
Cl	0.23**	-0.18**	0.09**	0.39**	0.40**	0.06**	-0.01*	0.02*	0.07**	0.15**						
As	0.15**	0.08**	0.12**	0.06**	0.10**	0.38**	0.05*	0.36**	0.37**	0.26**						
Cd	0.49**	0.12**	0.17**	0.39**	0.44**	0.45**	0.28*	0.55**	0.48**	0.39**	1.0**					
Hg	0.05**	-0.14**	0.01**	0.20**	0.19**	-0.15**	-0.17**	-0.18**	-0.10**	-0.07**	0.06**					
Sb	0.42**	-0.11**	0.30**	0.29**	0.30**	0.33**	-0.02*	0.28**	0.40**	0.39**	0.36**					
Cu	0.57**	-0.17**	0.60**	0.46**	0.46**	0.69**	-0.02*	0.52**	0.75**	0.65**	0.46**	1.0**				
Pb	0.57**	-0.22**	0.41**	0.53**	0.54**	0.51**	-0.05*	0.36**	0.55**	0.46**	0.55**	0.52**	1.0**			
Zn	0.55**	-0.11**	0.43**	0.45**	0.47**	0.56**	0.05*	0.49**	0.66**	0.53**	0.60**	0.59**	0.60**	1.0**		
Cr	0.16**	-0.03*	0.14**	0.08**	0.08**	0.11**	0.03*	0.11**	0.24**	0.15**	0.16**	0.19**	0.13**	0.52**		
Ni	0.54**	-0.18**	0.66**	0.41**	0.41**	0.76**	-0.05*	0.56**	0.81**	0.68**	0.37**	0.95**	0.46**	0.57**	1.0**	
Co	0.55**	-0.14**	0.69**	0.35**	0.39**	0.92**	0.01*	0.74**	0.97**	0.82**	0.46**	0.72**	0.50**	0.60**	0.79**	1.0**
V	0.52**	-0.05*	0.48**	0.36**	0.37**	0.66**	0.12*	0.64**	0.76**	0.58**	0.52**	0.59**	0.61**	0.64**	0.63**	0.72**

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。

过程应该是一个伴生有多个微量元素相对富集的过程,这其中也自然不乏 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、V 等重金属元素的相对富集,而 OM 相对富集是形成富硒土壤的至关重要的原因。

2.3 R 型聚类分析

R 型聚类分析也是解析富硒土壤成因及其物质来源的常用手段^[26]。里下河富硒土壤元素含量 R 型聚类分析结果如图 3 所示,可看出在此聚类分析结果中 Se 与 OM、N 被分在一个族群,紧邻 Se-OM-N 之后的是 K-Fe-Co-Cu-Ni-Cr 组合,再往后是 Mg-V-Pb-Cd-Zn 组合,继之是 pH-Ca-CEC-F-Mn 组合,最后是 As-Sb-Hg-P-Cl-Mo-B 组合。该聚类分析结果(元素组合和排序等)同上述元素相关系数统计分析结果十分吻合,证实当地富硒土壤中的 Se 确实与 OM 有相对最密切关系,OM 和 N 的相关系数 r 高达 0.94,所以 Se-OM-N 被聚类分析分在同一族群。同理,因为在富硒土壤中 Mo、B、P、Cl、As、Hg 等其他元素的相关性都不密切(相关系数绝对值全部小于 0.5),自然界 As、Sb、Hg 都属于低温亲硫元素,通常在内生和外生地球化学循环中大多一起行动(如同一成矿富集、一同被迁移到某个沉积环境等),所以导致 As-Sb-Hg-P-Cl-Mo-B 组合出现在距离 Se 相

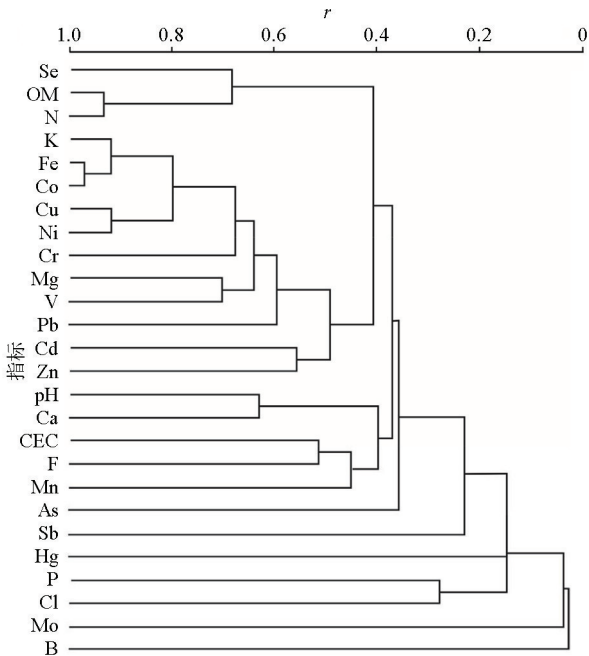


图 3 里下河地区富硒土壤元素 R 型聚类分析结果
Fig. 3 Dendrogram of Se and other elements or geochemical indicators of Se-rich soil in the Lixiahe area

对最靠后的位置,指示它们在富硒土壤形成中的确是发挥了与 OM 等不一样的作用。此外,前人的相关研究也证实聚类分析等所揭示的元素组合特征,

其本质上是富硒土壤物质来源及其成因机制的综合反映^[11-15],如 Se 和 OM、N 的紧密组合,就是第四纪沉积过程聚集 Se 的痕迹^[13],As-Sb-Hg-P-Cl 等元素组合偏离 Se 的组合,就代表在第四纪沉积演化中的各自轨迹不一样,重金属在表土富集多偏向人为或后天因素,而 Se 和 OM 的相对富集更多偏向“先天+人为”等多重因素^[11,13,18,26]。因此,富硒土壤的元素组合可以反映其成因,这点是完全无疑的。

2.4 主成分分析

元素含量主成分分析也是判别富硒土壤物质来源与成因的重要手段。利用里下河富硒土壤的元素含量分布数据,先采用 IBM SPSS Statistics 25 软件对数据进行 KMO 和 Bartlett 球形度检验。经检验,KMO 值为 0.735(>0.7),Bartlett 球形度检验显著性水平为 0.002(<0.05),证实数据适合做主成分分析。基于主成分分析,采用 Kaiser 正态化最大方差法对提取的成分矩阵进行正交旋转,结果见表 3。由表 3 可知,前 6 个主成分特征值均大于 1,累积方差贡献率为 75.560%,能基本代表原始数据所包含

的信息。

主成分 1(PC1)的方差贡献率为 34.775%,其中,K、Fe、Ni、Co、V、Mg 在 PC1 上具有较高的因子载荷,分别为 0.947、0.96、0.951、0.959、0.837、0.826,此时 Se 的因子载荷为 0.506。前人研究表明,成土母质及第四纪初始沉积环境是决定富硒土壤诞生的基本要素^[27-30],上述主成分 1 的特征正好记载了里下河富硒土壤形成的初始沉积环境信息,K、Mg 应该是偏碱性沉积环境的反映,Fe、Ni、Co、V 可能是偏还原沉积环境的反映,主成分 1 整体反映了富硒土壤形成时的偏碱性、还原的初始沉积环境,与当地富硒土壤集中分布于太湖相吻合。

主成分 2(PC2)的方差贡献率为 13.459%,其中,OM、CEC、N 在 PC2 上具有较高的因子载荷,分别为 0.871、0.758、0.874,此时 Se 的因子载荷为 0.621。PC2 也是 6 个主成分中 Se 因子载荷最高者,而且其代表性因子载荷主要是 OM、CEC 和 N,可以判断这些就是控制当地富硒土壤形成的关键因子,即 PC2 实际上代表了里下河富硒土壤形成的主

表 3 里下河地区富硒土壤元素旋转成分矩阵

Table 3 Rotated component matrix of elements distribution in Se-rich soil from the Lixiahe area

指标	PC1	PC2	PC3	PC4	PC5	PC6
Se	0.506	0.621	0.251	-0.153	-0.238	-0.126
OM	0.142	0.871	0.208	-0.249	-0.113	0.009
pH	-0.080	-0.214	-0.193	0.862	0.025	-0.002
CEC	0.414	0.758	0.149	-0.067	-0.091	-0.152
N	0.100	0.874	0.175	-0.205	-0.097	0.058
P	-0.464	0.464	0.010	0.003	0.082	0.524
K	0.947	0.027	0.019	-0.150	-0.013	-0.003
Ca	-0.355	-0.077	-0.152	0.774	-0.079	0.115
Mg	0.826	-0.061	-0.049	0.364	-0.025	0.105
Fe	0.960	0.048	0.154	-0.097	0.069	-0.025
Mn	0.389	-0.106	0.226	0.520	0.365	0.177
Mo	0.164	0.141	0.216	-0.166	0.094	0.541
B	-0.150	-0.111	0.049	0.088	0.840	-0.064
F	0.575	0.129	0.003	-0.239	0.620	0.000
Cl	-0.245	-0.136	-0.145	0.050	0.238	0.648
Cd	0.186	0.598	0.302	0.050	-0.026	0.424
As	-0.058	-0.171	0.723	-0.213	-0.018	0.248
Hg	-0.413	0.182	0.559	0.032	0.137	-0.185
Sb	0.267	0.143	0.685	-0.170	0.123	0.042
Cu	0.778	0.311	0.244	-0.071	-0.009	0.104
Pb	0.392	0.135	0.763	-0.163	-0.166	-0.049
Zn	0.354	0.298	0.380	-0.024	0.043	0.493
Cr	0.730	0.105	0.230	-0.048	0.100	-0.228
Ni	0.951	0.096	0.152	-0.096	-0.014	-0.094
Co	0.959	0.032	0.082	-0.078	0.092	-0.032
V	0.837	-0.016	0.259	-0.068	-0.157	-0.068
特征值	9.042	3.499	2.178	2.135	1.502	1.290
方差贡献率/%	34.775	13.459	8.377	8.213	5.776	4.960
累积方差贡献率/%	34.775	48.235	56.611	64.824	70.600	75.560

要贡献者或最主要的地球化学控制因素。

主成分 3(PC3) 的方差贡献率为 8.377%, 其中,Pb、As、Sb、Hg 在 PC3 上具有较高的因子载荷, 分别为 0.763、0.723、0.685、0.559, 此时 Se 的因子载荷为 0.251。依据经验不难判断,PC3 代表的是表层土壤受人为活动影响的部分信息记载, 预示里下河富硒土壤在成土之后可能存在浅表再富集, 这与里下河富硒土壤主要分布在 30 cm 以上深度是一致的。

主成分 4(PC4) 的方差贡献率为 8.213%, 其中,pH、Ca 在 PC4 上具有较高的因子载荷, 分别为 0.862、0.774, 此时 Se 的因子载荷为-0.153。从前面的土壤 Se 与 pH 呈较显著负相关、pH 与 Ca 呈显著正相关推测,PC4 应该是控制土壤 Se 富集的又一组地球化学因子, 不过是表现为与 OM、CEC 不同变化方向的影响因子, OM、CEC 表现的是正相关, 而 pH 表现的则是负相关。

主成分 5(PC5) 和主成分 6(PC6) 的方差贡献率分别为 5.776%、4.96%, 其中,B、F 在 PC5 上具有相对较高的因子载荷, Cl、Mo、P 在 PC6 上具有相对较高的因子载荷, 全部大于 0.524, 此时 Se 的因子载荷均为负值, 分别为-0.238、-0.126。结合前面的元素相关系数分析、聚类分析结果, 可以推断 PC5 和 PC6 在里下河富硒土壤形成中的贡献相同, 代表了潟湖相之外的沉积环境产物(可能是海相或海陆相混合沉积物等), 应该是形成当地富硒土壤的干扰因素, 主要发挥干扰作用。

3 里下河富硒土壤成因机制分析

富硒土壤的成因及其富硒机制直接关系到富硒土壤的质量及其利用价值或前景^[31-33], 从前人对富硒土壤的诸多成因探讨案例以及控制自然界硒富集的相关研究结果^[21,34-36]来看, 富硒物质来源和有利的第四纪沉积环境无疑是影响富硒土壤成因的关键要素, 如土壤 OM、pH、Eh、CEC、粒径、黏土矿物和 Fe-Mn 氧化物含量等都是制约 Se 迁移富集的重要地球化学因子^[35,37-42]。里下河富硒土壤属于第四纪沉积成因, 其土壤 Se 富集过程应该比缘于富硒岩石风化沉积所形成的富硒土壤要更为复杂一些, 通常要经历第四纪潟湖相沉积初始富集、沉积成土过程中的分选富集和成土后的表生富集 3 个过程或阶段, 在形成第四纪沉积型富硒土壤的过程中还会伴随有非泻湖相沉积物的干扰等, 可初步将其成因模式归纳为“三期富集+多因素控制”(如表 4 所示)。图 2 显示里下河富硒土壤在 200 cm 以上深度有 3 个相对富集层位, 且与 OM 富集部位吻合, 主成分分析显示 Se 载荷因子在 3 组主成分中为正值(其余皆为负值), 元素相关性分析显示 Se 主要同 3 类元素(分别是常量元素 K、Fe, 质地指标 OM、CEC, 微量元素 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、V) 具有显著正相关性, 就是表 4 成因模式总结的直接证据。

里下河地区及其周边都是上百米厚的第四系, 其先天富硒物质来源基本与基岩无关。作为第四纪

表 4 里下河地区富硒土壤成因模式总结
Table 4 Genetic model of Se-enriched soil in the Lixiahe area

硒富集过程	主要控制因素	地球化学证据	富硒效果及其机制	成因类型
初始富硒 (Se 首次聚集)	相对封闭的第四纪潟湖相沉积环境和碱性偏还原的富含有机质的先天含 Se 沉积物	Se 与铁族元素 (Fe、Ni、Co、V 等) 之间呈现显著正相关性, 主成分分析结果中 Se 载荷因子为正	通过有机质吸附等将第四纪沉积物携带的 Se 汇聚到潟湖相, 但未达到富硒土壤标准	
成土富硒 (Se 二次聚集)	第四纪沉积成土期间不断聚集的有机质和沉积分选作用生成的细颗粒矿物 (含胶体、黏土矿物等)	Se 与 OM、CEC 之间呈现显著正相关性, 主成分分析结果中 Se 载荷因子为正且具有最大值	通过沉积分选和胶体吸附等将 Se 进一步汇聚到黏土矿物, 部分达到富硒土壤标准	第四纪沉积成因, 与先天富硒岩层无关, 潟湖相是其最佳聚集部位, 富硒土壤主要分布在 30 cm 以上深度, Se 平均含量通常刚达标
表生富硒 (Se 三次聚集)	成土后的生物活动及表土中相对更富集的有机质和相对酸化的土壤质地或环境	Se 与 OM 呈最显著正相关性、与 pH 呈较显著负相关性, Se-OM-N 为其最具代表性元素组合, 主成分分析显示 Se 载荷因子为正	通过生物富集作用 (含 pH 降低等) 将黏土矿物中的 Se 进一步汇聚到地表, 形成富硒土壤	
伴随第四纪沉积的干扰作用	潟湖相之外的第四纪沉积物 (如海相沉积物的混入)	富硒土壤中 B、Cl、P 等与所有元素相关性均不密切, 主成分分析显示 Se 载荷因子为负	对富硒土壤生成无贡献, 只会干扰富硒土壤的形成或质量	

潟湖相沉积环境下形成的富硒土壤,其富 Se 或局部聚集 Se 的过程大致可推断如下:

1)成土母质初始富集(Se 首次聚集)。潟湖相在第四纪沉积演化中总体属于一个相对封闭、低洼的湖盆环境,偏还原且相对富有机质,有利的 pH、 E_h 环境并借助沉积物中有机质吸附或其他相关的物理、化学、生物作用,将分散(或正常分布)在第四系沉积物中的 Se 汇聚到潟湖相,形成相对富 Se 的成土母质。此时初步富硒的成土母质只是相对富 Se,并未达到富硒土壤的含量要求。

2)成土期间(沉积成土过程中)再富集(Se 二次聚集)。初步富硒的成土母质伴随第四纪演化、不断增加沉积厚度或带电荷矿物等,通过机械分选(如重力分异)、胶体吸附和生物地球化学作用等,进一步将成土母质中的 Se 富集到细颗粒沉积物或黏土矿物中,在黏土矿物或细颗粒矿物比较集中的地段可能已经生成局部富硒土壤。

3)成土后表生富集(Se 三次聚集)。潟湖相沉积物经过第四纪沉积演化,形成可被耕种的土壤后,因为生物活动(特别是微生物等)导致表土环境有机质(OM)进一步增加,土壤 pH 下降,加上耕种等导致土壤质地有所改变(黏土矿物更加聚集等),致使先前已经汇聚在潟湖相细颗粒沉积物中的 Se 继续向表层土壤转移富集,从而使得里下河第四纪沉积型富硒土壤具有显著的表聚性特征,大部分富硒土壤主要分布在地表 30 cm 以上深度。

总之,里下河富硒土壤的成因机制与物质来源等和常见的缘于富硒岩石的富硒土壤有差异,属于典型的第四纪沉积型富硒土壤。此类富硒土壤 Se 含量一般集中在 $(0.3\sim0.4)\times10^{-6}$,主要分布在 30 cm 以上深度,多受潟湖相控制,土壤 Se 与 OM 具有最显著的正相关性。因为第四纪沉积型富硒土壤主要分布在平原区,农耕条件相对更加优越,一旦形成规模化开发利用效益,其影响可能更加深远。鉴于此类富硒土壤的成因有一定特殊性,土壤 Se 含量总体上要低于山区中的岩石风化型富硒土壤等特点,结合前人开发利用富硒土壤的成功经验和相关注意事项^[31,43-47],针对里下河这类平原区第四纪沉积型富硒土壤的开发利用,今后宜加强土壤有效 Se 及其形态、富硒土壤的生态或健康效应等研究,视情况为类似的富硒土壤拟定合适的评价标准。

4 结论

1)里下河富硒土壤主要缘于潟湖相沉积作用,

属于平原区典型的第四纪沉积型富硒土壤。富硒土壤主要分布在地表 30 cm 以上深度,范围常与潟湖相高度吻合,Se 含量多为 $(0.3\sim0.4)\times10^{-6}$,Se 及其相关元素含量变异系数大多小于 0.5,其特征元素组合为 Se-OM-N-K-Fe-Co。

2)富硒土壤中 Se 与 OM 之间具有显著正相关性,相关系数 $r=0.74$ 。此外,土壤 Se 与 CEC 之间也具有显著正相关性,与 pH 之间具有较显著负相关性。富硒土壤中大多数元素之间都存在显著正相关性,以 Fe 和 Co 的正相关性最好,其相关系数 $r=0.97$ 。

3)富硒土壤的形成通常要经历 3 个富 Se 过程或阶段,分别是成土母质初始富集、成土期间再富集和成土后表生富集,主要富硒机制依次为有机质吸附、胶体吸附、随生物量剧增的综合吸附。有机质与 Se 同步富集贯穿始终,不同富硒阶段都保存了相关的元素地球化学证据。

4)第四纪潟湖相独具的相对封闭的富有机质、偏还原沉积环境,是形成里下河富硒土壤的基础。在形成局部富硒土壤的同时,还伴随有 Cu、Pb、Zn、Ni、Co、V 等重金属的相对富集和非潟湖相沉积物的干扰(如 B、Cl、P 等可能部分来源于海相沉积),但富硒土壤中相关重金属未超标。

致谢:参加该项研究的还有任静华、华明、朱伯万、贺新星、刘玮晶、徐宏婷、李文婷等同事,宁夏回族自治区地球物理地球化学调查院王志强教授提供了石嘴山地区富硒土壤的相关地球化学调查数据供本次研究对比参考,江苏省地质调查研究院有关领导和专家等对该项研究给予了大力支持与指导帮助,谨一并诚致谢忱!

参考文献 (References):

[1] Rotruck J T, Pope A L, Ganther H E, et al. Selenium: Biochemical role as a component of glutathione peroxidase[J]. Science, 1973, 179(4073): 588-590.

[2] Sun W X, Huang B, Zhao Y C, et al. Spatial variability of soil selenium as affected by geologic and pedogenic processes and its effect on ecosystem and human health[J]. Geochemical Journal, 2009, 43(4): 217-225.

[3] Dinh Q T, Cui Z W, Huang J, et al. Selenium distribution in the Chinese environment and its relationship with human health: A review[J]. Environment International, 2018, 112: 294-309.

[4] Cao Z H, Wang X C, Yao D H, et al. Selenium geochemistry of paddy soils in Yangtze River Delta[J]. Environment International, 2001, 26(5-6): 335-339.

[5] 杨忠芳,余涛,侯青叶,等.海南岛农田土壤 Se 的地球化学特征[J]. 现代地质, 2012, 26(5): 837-849.

- Yang Z F, Yu T, Hou Q Y, et al. Geochemical characteristics of soil selenium in farmland of Hainan Island [J]. *Geoscience*, 2012, 26 (5): 837-849.
- [6] 魏振山, 涂其军, 唐蜀虹, 等. 天山北坡乌鲁木齐至沙湾地区富硒土壤地球化学特征及成因探讨 [J]. *物探与化探*, 2016, 40 (5): 893-898.
- Wei Z S, Tu Q J, Tang S H, et al. A discussion on the geochemical features and origin of selenium-rich soil on the northern slope of the Tianshan Mountains from Urumqi to Shawan County [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2016, 40 (5): 893-898.
- [7] 黄子龙, 林清梅, 范汝海. 广西全州县富硒土壤地球化学特征 [J]. *物探与化探*, 2018, 42 (2): 381-385.
- Huang Z L, Lin Q M, Fan R H. Geochemical characteristics of selenium-rich soil in Quanzhou County of Guangxi [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42 (2): 381-385.
- [8] 刘才泽, 王永华, 曾琴琴, 等. 成渝典型地区土壤硒地球化学特征及其成因分析 [J]. *物探与化探*, 2018, 42 (6): 1289-1295.
- Liu C Z, Wang Y H, Zeng Q Q, et al. The distribution and source of soil selenium in typical areas of Chengdu-Chongqing region [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2018, 42 (6): 1289-1295.
- [9] 周墨, 陈国光, 张明, 等. 赣南地区土壤硒元素地球化学特征及其影响因素研究: 以青塘—梅窖地区为例 [J]. *现代地质*, 2018, 32 (6): 1292-1301.
- Zhou M, Chen G G, Zhang M, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soils of South Jiangxi Province: A typical area of Qingtang-Meijiao [J]. *Geoscience*, 2018, 32 (6): 1292-1301.
- [10] 王金达, 于君宝, 张学林. 黄土高原土壤中硒等元素的地球化学特征 [J]. *地理科学*, 2000, 20 (5): 469-473.
- Wang J D, Yu J B, Zhang X L. Geochemical features of elements of selenium in soil of Loess Plateau [J]. *Scientia Geographica Sinica*, 2000, 20 (5): 469-473.
- [11] 韩伟, 王乔林, 宋云涛, 等. 四川省沐川县北部土壤硒地球化学特征与成因探讨 [J]. *物探与化探*, 2021, 45 (1): 215-222.
- Han W, Wang Q L, Song Y T, et al. Geochemical characteristics and genesis of selenium in soil in northern Muchuan County, Sichuan Province [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45 (1): 215-222.
- [12] 王志强, 杨建锋, 魏丽馨, 等. 石嘴山地区碱性土壤硒地球化学特征及生物有效性 [J]. *物探与化探*, 2022, 46 (1): 229-237.
- Wang Z Q, Yang J F, Wei L X, et al. Geochemical characteristics and bioavailability of selenium in alkaline soil in Shizuishan Area, Ningxia [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2022, 46 (1): 229-237.
- [13] 赵辰, 孙彬彬, 贺灵, 等. 四川昭觉县中部乡镇表层土壤硒地球化学特征 [J]. *岩矿测试*, 2022, 41 (3): 412-426.
- Zhao C, Sun B B, He L, et al. Geochemical characteristics of selenium in surface soil of central townships in Zhaojue County, Sichuan Province [J]. *Rock and Mineral Analysis*, 2022, 41 (3): 412-426.
- [14] 袁宏伟, 陈江均, 郭腾达, 等. 巴彦淖尔市临河区狼山镇和新华镇一带富硒土壤地球化学特征及影响因素 [J]. *地质与勘探*, 2022, 58 (5): 1027-1041.
- Yuan H W, Chen J J, Guo T D, et al. Geochemical characteristics and influencing factors of Se-rich soils in Langshan and Xinhua towns, Linhe district, Bayannur City [J]. *Geology and Exploration*, 2022, 58 (5): 1027-1041.
- [15] 曾庆良, 余涛, 王锐. 土壤硒含量影响因素及富硒土地资源区划研究——以湖北恩施沙地为例 [J]. *现代地质*, 2018, 32 (1): 105-112.
- Zeng Q L, Yu T, Wang R. The influencing factors of selenium in soils and classifying the selenium-rich soil resources in the typical area of Enshi, Hubei [J]. *Geoscience*, 2018, 32 (1): 105-112.
- [16] 朱建明, 梁小兵, 凌宏文, 等. 环境中硒存在形式的研究现状 [J]. *矿物岩石地球化学通报*, 2003, 22 (1): 75-81.
- Zhu J M, Liang X B, Ling H W, et al. Advances in studying occurrence modes of selenium in environment [J]. *Bulletin of Mineralogy Petrology and Geochemistry*, 2003, 22 (1): 75-81.
- [17] 郑翔, 钱汉东, 吴雪枚. 湖北恩施双河硒矿床地球化学特征及成因探讨 [J]. *高校地质学报*, 2006, 12 (1): 83-92.
- Zheng X, Qian H D, Wu X M. Geochemical and genetic characteristics of selenium ore deposit in Shuanghe, Enshi, Hubei Province [J]. *Geological Journal of China Universities*, 2006, 12 (1): 83-92.
- [18] 蔡子华, 宋明义, 胡艳华, 等. 湖沼相富硒土壤的发现及其生态学意义 [J]. *物探与化探*, 2011, 35 (2): 248-253.
- Cai Z H, Song M Y, Hu Y H, et al. The discovery of lake facies selenium-rich soil and its ecological significance [J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2011, 35 (2): 248-253.
- [19] 廖启林, 华明, 冯金顺, 等. 苏南局部富硒土壤及其天然富硒茶叶初步研究 [J]. *中国地质*, 2007, 34 (2): 347-353.
- Liao Q L, Hua M, Feng J S, et al. Natural Se-rich tea in local Se-rich soils in southern Jiangsu [J]. *Geology in China*, 2007, 34 (2): 347-353.
- [20] 廖启林, 任静华, 许伟伟, 等. 江苏宜溧富硒稻米产区地质地球化学背景 [J]. *中国地质*, 2016, 43 (5): 1791-1802.
- Liao Q L, Ren J H, Xu W W, et al. Geological and geochemical background of Se-rich rice production in Yili Area, Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2016, 43 (5): 1791-1802.
- [21] 廖启林, 崔晓丹, 黄顺生, 等. 江苏富硒土壤元素地球化学特征及主要来源 [J]. *中国地质*, 2020, 47 (6): 1813-1825.
- Liao Q L, Cui X D, Huang S S, et al. Element geochemistry of selenium-enriched soil and its main sources in Jiangsu Province [J]. *Geology in China*, 2020, 47 (6): 1813-1825.
- [22] 范健, 任静华, 廖启林, 等. 苏南典型区农田土壤硒—镉拮抗作用研究 [J]. *土壤*, 2021, 53 (5): 1023-1032.
- Fan J, Ren J H, Liao Q L, et al. Antagonism between Se and Cd in typical farmland soil in southern Jiangsu Province [J]. *Soils*, 2021, 53 (5): 1023-1032.
- [23] Eiche E. Microscale distribution and elemental associations of Se in seleniferous soils in Punjab, India [J]. *Environmental Science and Pollution Research International*, 2015, 22 (7): 5425-5436.
- [24] Song T J, Cui G, Su X S, et al. The origin of soil selenium in a typical agricultural area in Hamatong River Basin, Sanjiang Plain, China [J]. *Catena*, 2020, 185: 104355.

[25] Xie T Y, Shi Z M, Gao Y W, et al. Modeling analysis of the characteristics of selenium-rich soil in heavy metal high background area and its impact on main crops[J]. *Ecological Informatics*, 2021, 66: 101420.

[26] 夏伟, 杨军, 项剑桥, 等. 江汉平原富硒土壤来源解析及其生物富集程度研究——以沙洋县东北部为例[J]. *地质学报*, 2023, 97(5): 1670–1682.

Xia W, Yang J, Xiang J Q, et al. Source analysis and bioenrichment of selenium-rich soil in the Jiangnan Plain: A case study from the northeast of Shayang County[J]. *Acta Geologica Sinica*, 2023, 97(5): 1670–1682.

[27] 杨良策, 李明龙, 杨廷安, 等. 湖北省恩施市表层土壤硒含量分布特征及其影响因素研究[J]. *资源环境与工程*, 2015, 29(6): 825–829, 848.

Yang L C, Li M L, Yang T A, et al. Study on distribution characteristics of selenium content of surface soil and its influencing factors in Enshi city, Hubei Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2015, 29(6): 825–829, 848.

[28] 谢薇, 杨耀栋, 侯佳渝, 等. 天津市蓟州区富硒土壤成因与土壤硒来源研究[J]. *物探与化探*, 2019, 43(6): 1373–1381.

Xie W, Yang Y D, Hou J Y, et al. Studies on causes and influential factors of selenium-enriched soils in Jizhou district of Tianjin[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, 43(6): 1373–1381.

[29] 梁红霞, 侯克斌, 陈富荣, 等. 安徽池州地区富硒土壤地球化学特征及成因分析[J]. *资源环境与工程*, 2022, 36(2): 154–162.

Liang H X, Hou K B, Chen F R, et al. Geochemical characteristics and genesis analysis of selenium-rich soils in Chizhou Area, Anhui Province[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2022, 36(2): 154–162.

[30] 吴俊. 福建省寿宁县土壤硒分布特征及影响因素[J]. *中国地质*, 2018, 45(6): 1167–1176.

Wu J. The distribution of soil selenium in Shouning County of Fujian Province and its influencing factors[J]. *Geology in China*, 2018, 45(6): 1167–1176.

[31] 刘道荣, 焦森. 天然富硒土壤成因分类研究及开发适宜性评价[J]. *物探与化探*, 2021, 45(5): 1157–1163.

Liu D R, Jiao S. Assessment of genetic classification and development suitability of natural selenium-rich soil[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(5): 1157–1163.

[32] 吴兴盛. 福建省武平县富硒土壤特征及成因分析[J]. *物探与化探*, 2021, 45(3): 778–784.

Wu X S. Characteristics and genesis of selenium-rich soil in Wuping Area, Fujian Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(3): 778–784.

[33] 时章亮, 金立新, 廖超, 等. 四川雷波县重点耕地地区土壤硒含量特征及其成因分析[J]. *物探与化探*, 2020, 44(5): 1253–1260.

Shi Z L, Jin L X, Liao C, et al. Content characteristics and genesis of soil selenium in important cultivated areas of Leibo County, Sichuan Province[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(5): 1253–1260.

[34] Sawyer E W. The influence of source of rock type, sorting on the geochemical weathering of clastic sediments from the Quaternary sedimentary belt, Superior Province, Canada[J]. *Chemical Geology*, 1986, (55): 932–936.

[35] Johnsson L. Selenium uptake by plants as a function of soil type, organic matter content and pH[J]. *Plant and Soil*, 1991, 133(1): 57–64.

[36] Liu Y L, Tian X L, Liu R, et al. Key driving factors of selenium-enriched soil in the low-Se geological belt: A case study in Red Beds of Sichuan Basin, China[J]. *Catena*, 2021, 196: 104926.

[37] 余飞, 张风雷, 张永文, 等. 重庆典型农业区土壤硒地球化学特征及影响因素[J]. *物探与化探*, 2020, 44(4): 830–838.

Yu F, Zhang F L, Zhang Y W, et al. Geochemical characteristics and influential factors of soil selenium in typical agricultural area, Chongqing[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, 44(4): 830–838.

[38] 牛雪, 何锦, 庞雅婕, 等. 三江平原西部土壤硒分布特征及其影响因素[J]. *物探与化探*, 2021, 45(1): 223–229.

Niu X, He J, Pang Y J, et al. Distribution feature of soil selenium in West Sanjiang Plain and its influencing factors[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2021, 45(1): 223–229.

[39] 张立, 刘国栋, 吕石佳, 等. 黑龙江省海伦市农耕地土壤硒分布特征及影响因素[J]. *现代地质*, 2019, 33(5): 1046–1054.

Zhang L, Liu G D, Lyu S J, et al. Distribution characteristics of selenium cultivated soil and its influencing factors in Hailun County of Heilongjiang Province[J]. *Geoscience*, 2019, 33(5): 1046–1054.

[40] 李玉超, 王诚煜, 于成广. 辽宁丹东地区土壤 Se 元素地球化学特征及其影响因素[J]. *吉林大学学报: 地球科学版*, 2020, 50(6): 1766–1775.

Li Y C, Wang C Y, Yu C G. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soil from Dandong Area, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2020, 50(6): 1766–1775.

[41] Li Y C, Wang C Y, Yu C G. Geochemical characteristics and influencing factors of selenium in soil from Dandong area, Liaoning Province[J]. *Journal of Jilin University: Earth Science Edition*, 2020, 50(6): 1766–1775.

[42] 史艳芙, 宗良纲, 张艳萍, 等. 茶树根际与非根际土壤硒特性及其影响因素分析[J]. *农业环境科学学报*, 2018, 37(9): 1903–1909.

Shi Y F, Zong L G, Zhang Y P, et al. Characteristic differences of selenium in the rhizospheric and non-rhizospheric soils of tea plantations, and its influencing factors[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(9): 1903–1909.

[43] 王志强, 杨建锋, 石天池. 宁夏石嘴山地区富硒土壤及其利用前景[J]. *物探与化探*, 2023, 47(1): 228–237.

Wang Z Q, Yang J F, Shi T C. A preliminary study of Se-rich soil in the Shizuishan Area, Ningxia and its potential for application[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2023, 47(1): 228–237.

[44] 张亚峰, 苗国文, 马强, 等. 青海东部碱性土壤中硒的形态特征[J]. *物探与化探*, 2019, 43(5): 1138–1144.

Zhang Y F, Miao G W, Ma Q, et al. Distribution characteristics of Se speciation of alkaline soil in eastern Qinghai[J]. *Geophysical*

and Geochemical Exploration,2019,43(5):1138-1144.

[45] 魏然,侯青叶,杨忠芳,等. 江西省鄱阳湖流域根系土硒形态分析及其迁移富集规律[J]. 物探与化探,2012,36(1):109-113.

Wei R,Hou Q Y,Yang Z F,et al. An analysis of speciation of selenium as well as its transformation and enrichment in root soil of Poyang Lake basin, Jiangxi Province [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2012,36(1):109-113.

[46] 成晓梦,马荣荣,彭敏,等. 中国大宗农作物及根系土中硒的含量特征与富硒土壤标准建议[J]. 物探与化探,2019,43(6):1367-1372.

Cheng X M,Ma R R,Peng M,et al. Characteristics of selenium in crops and roots in China and recommendations for selenium-enriched soil standards [J]. Geophysical and Geochemical Exploration,2019,43(6):1367-1372.

[47] Long Z D,Yuan L X,Hou Y Z,et al. Spatial variations in soil selenium and residential dietary selenium intake in a selenium-rich county, Shitai, Anhui, China [J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology,2018,50:111-116.

Elemental geochemical characteristics and genetic mechanisms of Se-rich soils in the Lixiahe area in Jiangsu Province

LIAO Qi-Lin^{1,2}, HUANG Shun-Sheng^{1,2}, XU Wei-Wei^{1,2}, CUI Xiao-Dan^{1,2}, JIN Yang^{1,2}, LIU Ling^{1,2}, WANG Yuan-Yuan^{1,2}, LI Wen-Bo^{1,2}, ZHOU Qiang^{1,2}

(1. Technology Innovation Center for Ecological Monitoring & Restoration Project on Land (Arable), Ministry of Natural Resources, Nanjing 210018, China; 2. Geological Survey of Jiangsu Province, Nanjing 210018, China)

Abstract: Based on relevant eco-geochemical survey data collected from the Lixiahe plain area in Jiangsu Province, this study systematically explored the geochemical characteristics of elements in Se-rich soils and the genetic mechanism through elemental distribution contrast, correlation analysis, R-type cluster analysis, and principal component analysis. This study can be referenced for the rational production and utilization of Se-rich land resources of the Quaternary sedimentary type. Key findings are as follows: (1) Se-rich soils in the Lixiahe area are typical Quaternary sediments, and the closed lagoon facies sedimentary environment characterized by rich organic matter and slightly reducing conditions plays a foundational role in the formation of local Se-rich soils; (2) Typical element association, Se-OM-N-K-Fe-Co, in Se-rich soils is primarily located within a depth of 30 cm from the surface, with Se content ranging mostly from 0.3×10^{-6} to 0.4×10^{-6} in a uniform distribution; (3) Significant positive correlations between Se and some other elements can be observed in the soils, with the correlation coefficients (r) between Se and OM, and Se and CEC being 0.74 and 0.66, respectively. In contrast, Se exhibits a significant negative correlation with pH, with a correlation coefficient of -0.35; (4) The formation of Se-rich soils might have experienced three Se enrichment stages: the initial enrichment in soil parent materials, the re-enrichment during soil formation, and the supergene enrichment after soil formation, accompanied by interference from non-lagoon facies sediments (such as marine sediments). Organic matter adsorption, colloid adsorption, and biogeochemistry constitute the main causes of Se enrichment in the soils; (5) The Se-rich soils are also relatively enriched in heavy metal elements like Cu, Pb, Zn, Ni, Co, and V, which are within the national limit standards.

Key words: Se-rich soil; element; geochemical characteristics; genetic mechanism; Lixiahe area; Jiangsu Province

(本文编辑:蒋实)