

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2024.01.026

苏胜, 毛伟, 李文西, 等. 近 37 年扬州市耕地土壤有效锌含量时空变化特征. 土壤, 2024, 56(1): 214–221.

近 37 年扬州市耕地土壤有效锌含量时空变化特征^①

苏胜, 毛伟*, 李文西, 陈明, 陈欣, 刘翔麟, 王翔, 张弘毅, 杜平

(扬州市耕地质量保护站/农业农村部耕地质量监测与评价重点实验室/江苏耕地质量与测土配方施肥数据中心, 江苏扬州 225009)

摘要: 基于扬州市 1984—2020 年表层土壤数据, 运用地统计分析和相关性分析方法, 系统分析了扬州市耕地土壤有效锌含量时空变化特征及其影响因素。结果表明: 近 37 年扬州市耕地土壤有效锌平均含量上升 1.15 mg/kg, 增幅达 188.5%; 扬州市耕地土壤有效锌分布存在明显的空间异质性, 总体上呈现南高北低、西高东低的分布特征。成土母质、土壤质地及土地利用方式不同, 耕地土壤有效锌含量存在显著差异。不同成土母质中, 长江冲积物发育土壤有效锌含量较高; 不同土壤质地中, 砂壤土中有效锌含量较高; 不同土地利用方式中, 旱地土壤中有效锌含量最高。土壤 pH 及有机质含量与土壤有效锌含量存在不同程度的响应关系。

关键词: 耕地土壤; 土壤有效锌; 时空变异; 影响因素; 扬州市

中图分类号: S158 文献标志码: A

Spatio-Temporal Variations of Cropland Soil Available Zn over the Past 37 Years in Yangzhou City

SU Sheng, MAO Wei*, LI Wenxi, CHEN Ming, CHEN Xin, LIU Xianglin, WANG Xiang, ZHANG Hongyi, DU Ping

(1 Yangzhou Cultivated Land Quality Protection Station/Key Laboratory of Cultivated Land Quality Monitoring and Evaluation, Ministry of Agriculture and Rural Affairs/ Jiangsu Cultivated Land Quality and Soil Formula Fertilization Data Center, Yangzhou, Jiangsu 225009, China)

Abstract: Based on the data of topsoil available Zn contents of croplands in 1984—2020 in Yangzhou City, geostatistical analysis and correlation analysis were applied to systematically analyze spatio-temporal variation characteristics of available Zn and its influencing factors. The results showed that available Zn increased meanly by 1.15 mg/kg and by 188.5% in the past 37 years. Available Zn was spatially heterogeneous, which was high in south and west, but low in north and east. Available Zn was significantly different between different parent materials, soil textures and soil utilizations, among of which, the Yangtze River alluvial deposit had the higher available Zn than other parent materials, sandy loam soil had higher available Zn than other textures, dry field had higher available Zn than other land use types. Additionally, soil available Zn had certain relationship with soil pH and organic matter.

Key words: Cropland soil; Soil available Zn; Spatio-temporal variations; Influential factors; Yangzhou City

锌是动植物正常生长发育以及人体健康所必需的微量元素之一^[1]。例如, 锌是人体中 200 多种酶的组成成分和激活因子, 多种复杂生理和生化过程都离不开锌的参与^[2]。此外, 锌在植物生长发育过程中也积极参与酶催化或活化、光合作用、呼吸作用、花粉形成、细胞色素和核苷酸合成等^[3]。植物缺锌会导致自身发育迟缓, 蛋白质含量下降, 同时受真菌病毒感染性增加, 进一步影响作物产量和质量, 最终对人体健康产生影响^[4]。土壤是植物中锌的主要来源, 土壤

有效锌含量能够反映土壤中锌元素的供给水平, 其主要是指用四乙三胺五醋酸(DTPA 溶液)或 0.1 mol/L HCl 分别提取的石灰性土壤和酸性土壤有效锌含量^[5]。施用锌肥可用于缺锌土壤确保作物生长, 但作为一种不可再生资源, 面对日益增大的消费量, 国内锌资源已不能完全保障供应^[6], 因此有效管理土壤中有效锌含量对于保障我国锌资源可持续性至关重要。

缺锌是全世界范围内最常见的微量营养素缺乏症, 目前全球 50% 用于种植粮食作物的耕地有效锌

①基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0200300)资助。

* 通讯作者(maowei918@163.com)

作者简介: 苏胜(1995—), 男, 山西吕梁人, 硕士, 助理农艺师, 主要从事耕地质量保护工作。E-mail: 172394754@qq.com

含量偏低^[7-8]。我国作为全球主要的农业生产国，缺锌耕地已达总耕地面积的 51%^[9]，因土壤缺锌导致的作物减产量高达 40%^[10]。近年，随着信息技术的快速发展，3S 技术在土壤养分空间变异研究中的应用越来越广泛^[11]，基于地统计学和 ArcGIS 的土壤有效锌空间分布特征逐渐成为研究的热点。Ye 等^[12]应用描述性统计和地统计学方法，研究了北京市延庆区耕地土壤有效锌的空间变异性，发现成土母质、有机质含量和土壤 pH 是影响该区域土壤有效锌含量的重要因素。姜冰等^[13]针对山东省青州市土壤有效锌含量的研究发现，有效锌含量不仅与锌元素全量水平关系密切，还受土壤 pH 和有机质含量的影响。夏凡等^[14]采用地统计学与 GIS 空间分析技术相结合的方法，探讨了小尺度茶园土壤有效锌的空间异质性，发现茶园土壤有效锌含量主要受土壤有机质的影响。可见，前人研究多集中于某一年份或茶园、烟区等某一类型土壤有效锌空间分布，并不能完全反映耕地土壤有效锌含量的长期变化趋势，而长时间尺度内耕地土壤有效锌时空变异特征的研究更少。

第二次土壤普查距今已过去 40 多年，随着经济社会的迅猛发展，耕地土壤现状发生了重大变化，因此了解当前耕地土壤中微量元素的时空变化特征显得十分迫切。扬州市作为沿江流域重要的粮食生产基地之一，其土壤类型、自然条件和种植制度在该区域具有一定典型性，分析其耕地土壤有效锌的时空变化特征，可为沿江类似地区土壤合理利用提供科学依据。由此，本研究以江苏省扬州市为例，利用经典统计学和地统计学方法，对比分析 1984 年、2005 年和 2020 年耕地土壤有效锌含量，系统研究近 37 年耕地土壤有效锌含量的时空演变规律及其影响因素，以厘清该市耕地土壤有效锌状况，为沿江地区耕地土壤有效锌可持续利用提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

扬州市位于长江与京杭大运河交汇处，江苏省中部(119°01'E ~ 119°54'E、31°56'N ~ 33°25'N)，总面积约为 6 591 km²。地势整体呈西高东低，有里下河、通南高沙土、沿江圩区和丘陵 4 种地貌类型。气候类型为北亚热带湿润气候，年平均气温 16.4 °C，年均降水量为 1 337.8 mm，水资源丰富。土壤类型包括水稻土、潮土、黄棕壤、沼泽土等 4 类。作物种类以小麦、水稻、豆类和各类蔬菜作物为主。

1.2 数据来源

1984 年数据来源于第二次全国土壤普查，共收集 4 105 个土样；2005 年土壤样点源于扬州市组织的土壤普查采样，共收集 4 015 个土样；2020 年根据土壤类型、利用方式和生产力状况等土壤特点，在原有采样点基础上，突出重点，优化个数，共采集 456 个土样。采样过程中详细记录各采样点的地理位置、成土母质、土壤质地和土地利用方式等。其中，1984 年土壤采样点数据坐标通过扬州市各县(市、区)第二次土壤普查时绘制的 1 : 50 000 土壤农化剖面监测点分布图和土壤图等图件资料，结合扬州市行政区划图和各县(市、区)行政区划图、1 : 50 000 地形图等辅助资料对采样点数据进行定位及矢量化获得。其他年份采样点坐标均来自采样过程中 GPS 定位。土壤有效锌含量、pH 和有机质含量分析测定均参考《土壤农业化学分析方法》^[15]的测定标准，分别采用 DTPA 浸提法、电位法和重铬酸钾容量法。

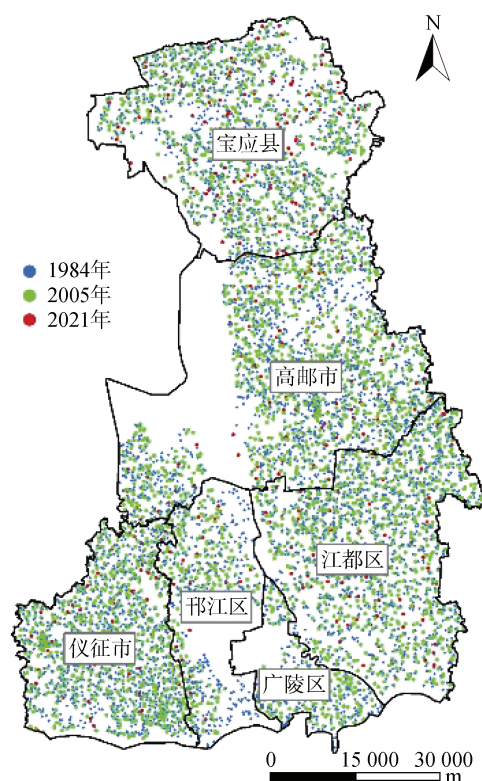


图 1 土壤采样点分布图

1.3 数据分析

采用 SPSS 21.0 进行单因素方差分析和相关性分析。运用 GS+9.0 进行半变异函数拟合，根据决定系数最大和残差值最小原则，选定最优拟合模型，并通过交叉验证法检验模型的合理性。采用 ArcGIS 10.2

进行克里格空间插值模块绘制扬州市耕地土壤有效锌空间分布图, 采用 Origin 2021 绘制柱状图。

2 结果与分析

2.1 扬州市耕地土壤有效锌含量描述性统计

扬州市耕地土壤有效锌含量描述性统计结果如表 1 所示, 1984 年、2005 年和 2020 年耕地土壤有效锌平均含量分别为 0.61、1.09 和 1.76 mg/kg, 总体呈现递增趋势。与 1984 年相比, 近 37 年扬州市耕地土壤有效锌平均含量上升 1.15 mg/kg, 增幅达 188.5%。1984—2020 年耕地土壤有效锌含量变异系数在 42.93% ~ 68.65%, 属于中等程度变异, 其中 2005 年和 2020 年变异系数均大于 65%, 说明当前扬州市耕地土壤有效锌含量普遍处于较高水平, 但仍存在局部耕地土壤有效锌缺乏的情况。不同时期耕地土壤有效锌含量分布如表 2 所示, 可见, 1984 年第二次土壤普查时期和 2005 年有 50% 以上耕地土壤有效锌含量处于 IV 级水平, 其中 1984 年有 25.69% 的耕地土壤有效锌含量处于 V 级水平。随时间推移, 扬州市耕地土壤有效锌含量处于 IV、V 级水平占比逐渐下降, I、II、III 级水平占比逐渐上升, 2005 年耕地土壤有效锌 III 级占比由 1984 年的 0.87% 增长至 40.99%。相较于 1984 年和 2005 年, 2020 年耕地土壤有效锌含量涨幅明显, 其中 I、II、III 级水平占比高达 95.60%, 大部分地区均处于中等以上水平。

2.2 扬州市耕地土壤有效锌含量时空变异特征

运用 GS+9.0 软件对不同时期扬州市耕地土壤有效锌含量进行半变异函数拟合, 选出最优模型, 结果(表 3)表明, 1984 年最优拟合模型为指数模型, 决定系数 R^2 小于 0.5, 拟合效果较差; 2005 年和 2020 年最优拟合模型均为球状模型, 其决定系数 R^2 均大于 0.5, 说明拟合效果较好。块金效应是描述土壤养分空间变异程度的重要指标。1984 年和 2020 年研究区土壤有效锌含量块金效应 <25%, 表现为强空间相关性, 说明有效锌空间变异主要受气候、地形等结构性因素的影响; 2005 年块金效应 >25%, 属于中等空间相关性, 说明有效锌含量受结构性因素和人为因素的共同作用。2020 年土壤有效锌含量变程为 34.40 km, 说明有效锌空间自相关性范围较大。

表 1 扬州市耕地有效锌含量描述性统计

年份	最大值 (mg/kg)	最小值 (mg/kg)	平均值 (mg/kg)	标准偏差 (mg/kg)	CV (%)
1984	4.55	0.10	0.61	0.26	42.93
2005	11.35	0.18	1.09	0.75	68.65
2020	11.12	0.29	1.76	1.18	67.07

表 2 不同时期扬州市耕地有效锌含量等级分布

等级	含量	描述	占比(%)		
			1984 年	2005 年	2020 年
I	>3.0 mg/kg	很高	0.00	0.14	12.19
II	2.0 ~ 3.0 mg/kg	高	0.00	4.05	20.92
III	1.0 ~ 2.0 mg/kg	中等	0.87	40.99	62.49
IV	0.5 ~ 1.0 mg/kg	低	73.44	54.28	4.40
V	≤0.5 mg/kg	很低	25.69	0.54	0.00

图 2 显示了不同时期研究区耕地土壤有效锌含量的分布差异。1984 年扬州市耕地土壤未出现有效锌含量 >3.00 mg/kg 的区域, 处于 V 级水平的区域主要集中在高邮市、江都区东部大部分地区以及宝应县北部部分区域。2005 年有效锌含量处于 IV 级水平的地区主要集中在宝应县、高邮市大部分地区以及仪征市和邗江区的部分地区, 江都区大部分耕地土壤有效锌含量处于 III 级水平。2020 年有效锌含量大幅提升, 其中江都区约有 1/3 耕地土壤有效锌含量处于 I 级水平, 有效锌含量低于 1.00 mg/kg 的地区主要分布在宝应县、高邮市和仪征市的部分地区。

对不同时期土壤有效锌含量分布图层进行差减提取得图 3, 可见, 1984—2005 年扬州市 97% 以上耕地土壤有效锌含量有所上升, 其中 14% 的区域耕地土壤有效锌含量涨幅超过 1.00 mg/kg, 19% 的区域有效锌含量涨幅在 0.50 ~ 1.00 mg/kg, 64% 的区域有效锌含量涨幅在 0.00 ~ 0.50 mg/kg。其中, 江都区土壤有效锌含量增长面积和幅度最为明显, 大部分区域有效锌含量增长幅度 >1.00 mg/kg, 其他县(市、区)有效锌含量增长幅度主要集中在 0.00 ~ 0.50 mg/kg。与 1984—2005 年相比, 2005—2020 年耕地土壤有效锌增加量明显提高, 同时区域变化也比较明显, 有效锌含量涨幅超过 1.00 mg/kg 的区域面积提高了 11%, 有效锌含量涨幅在 0.50 ~ 1.00 mg/kg 的区域面积提高了 24%, 相反, 涨幅在 0.00 ~ 0.50 mg/kg 的区域面

表 3 不同时期扬州市耕地有效锌含量半变异函数模型

年份	最优模型	块金值 C_0	基台值 Sill	块金效应 $C_0/Sill$ (%)	变程(km)	决定系数 R^2	残差 RSS
1984	指数模型	0.006 6	0.053 7	12.29	6.00	0.452	1.04×10^{-4}
2005	球状模型	0.255 0	0.605 0	42.15	13.70	0.723	0.0214
2020	球状模型	0.808 0	3.726 0	21.69	34.40	0.874	1.450

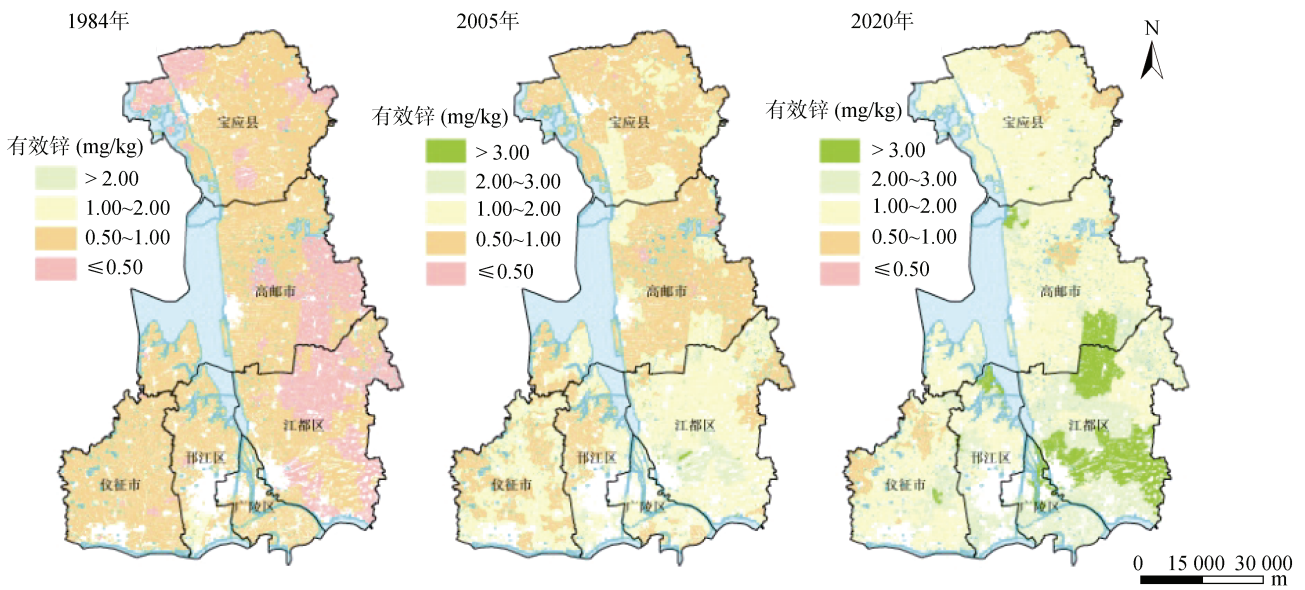


图 2 1984 年、2005 年和 2020 年扬州市耕地土壤有效锌含量分布

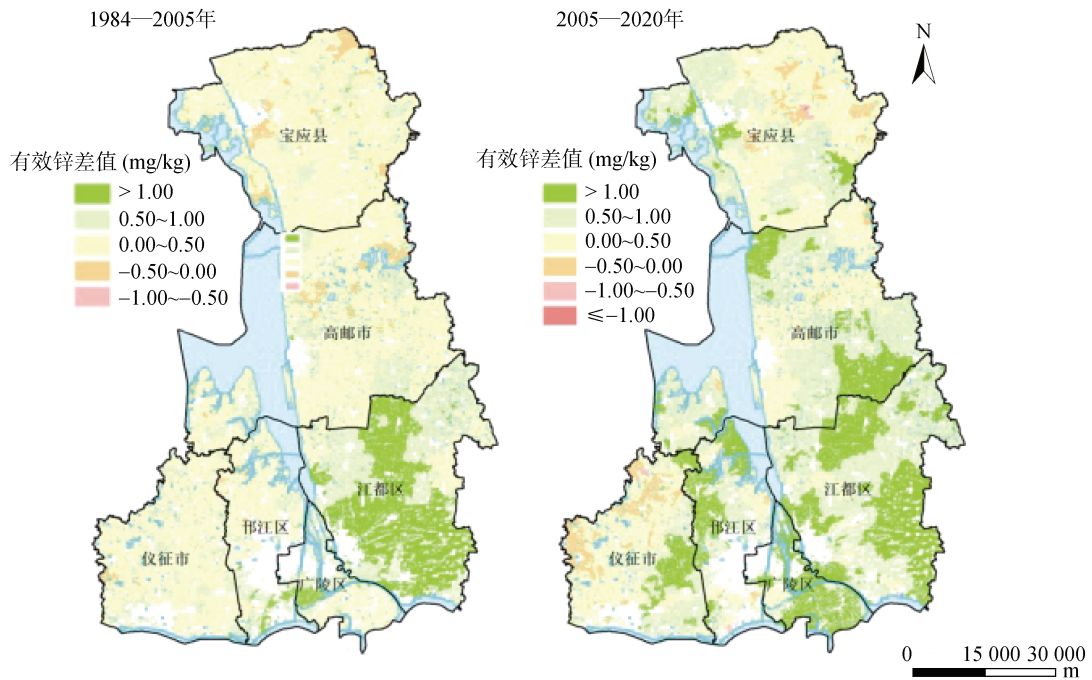


图 3 1984—2005 年和 2005—2020 年扬州市耕地土壤有效锌含量差值空间分布

积减小了 35%。其中，有效锌含量增长区域主要分布在江都区、广陵区、邗江区和高邮市，这主要与 2005 年之后国家快速发展的经济水平导致农户重视微量元素肥料的施用以及测土配方施肥、秸秆还田等农业技术的推广实施有关。

2.3 扬州市耕地土壤有效锌含量空间变异的影响因素

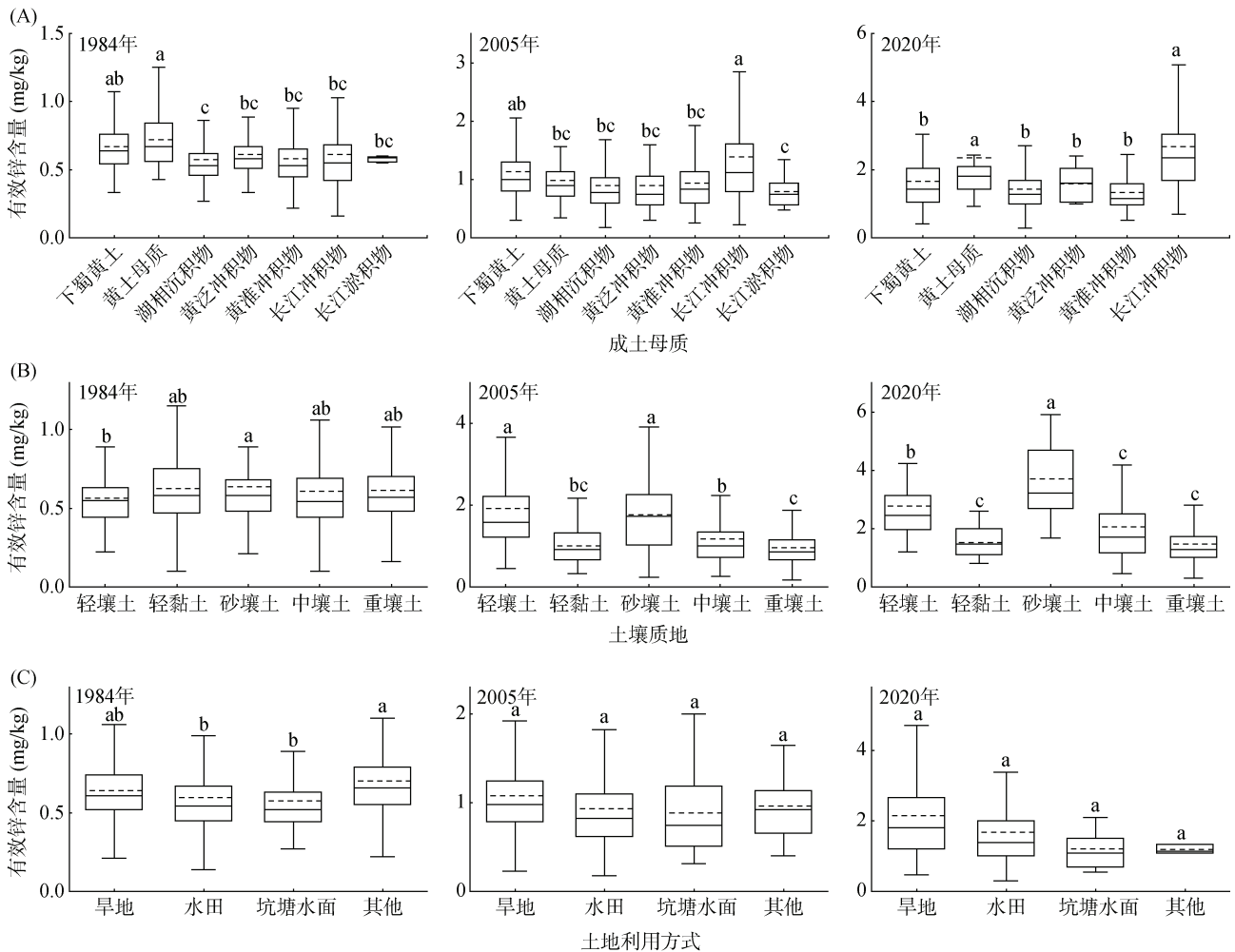
扬州市土壤成土母质种类繁多，不同成土母质发育土壤有效锌含量存在显著差异。如图 4A 所示，1984 年不同成土母质发育的土壤有效锌平均含量在 0.57 ~

0.72 mg/kg，2005 年在 0.79 ~ 1.37 mg/kg，2020 年在 1.32 ~ 2.68 mg/kg。从成土母质种类看，1984 年黄土和下蜀黄土发育土壤有效锌平均含量较高，而湖相沉积物发育土壤有效锌含量较低，与其他母质发育土壤有效锌含量有明显差异；2005 年长江冲积物和下蜀黄土发育土壤有效锌含量较高，长江淤积物发育土壤有效锌含量较低；2020 年长江冲积物和黄土母质发育土壤有效锌含量明显高于其他母质发育土壤。从时间尺度看，不同成土母质发育土壤中有效锌含量整体呈现上升趋势。其中，长江冲积物母质发育土壤有效锌含

量增幅最为显著,由 1984 年的 IV 级水平变为 2005 年的 III 级水平,到 2020 年变为 II 级水平,有效锌平均含量达到 2.68 mg/kg;其他母质发育土壤有效锌含量增长幅度各有差异,总体上表现为由 IV 级水平变为 III 级水平。

扬州市主要有轻壤土、轻黏土、砂壤土、中壤土和重壤土 5 种类型土壤质地,不同质地土壤有效锌含量差异明显(图 4B)。1984 年不同质地土壤有效锌平均含量为 0.57~0.63 mg/kg,其中轻壤土较低,其他质地土壤间无

显著差异;2005 年有效锌平均含量在 0.96~1.92 mg/kg,其中轻壤土和砂壤土有效锌含量高于其他质地土壤,重壤土含量最低;2020 年有效锌平均含量在 1.46~3.70 mg/kg,其中砂壤土有效锌含量明显高于其他质地土壤,重壤土最低。随着时间的推移,各质地土壤中有有效锌含量均有提升,其中砂壤土中有效锌平均含量增长最为显著,由 1984 年 IV 级水平到 2020 年增长至 I 级水平,其次是轻壤土,由 IV 级水平增长至 II 级水平,其余质地土壤由 IV 级水平增长至 III 级水平。



(箱式图内中间实线、虚线以及箱体的下边缘线、上边缘线、下误差线、上误差线分别表示中值、平均值、第 25、75、5、95 百分位数;不同小写字母表示不同成土母质(土壤质地、土地利用方式)间差异显著($P < 0.05$))

图 4 不同时期成土母质、土壤质地和土地利用方式影响扬州市耕地有效锌含量的箱形图

扬州市的土地利用方式主要为旱地、水田、坑塘水面以及其他利用方式。土地利用方式不同,土壤有效锌含量各有差异(图 4C)。1984 年其他土地利用方式的土壤有效锌含量较高,其次是旱地,然后是水田和坑塘水面。2005 年和 2020 年,各土地利用方式土壤有效锌含量无显著差异,除其他利用方式外,总体表现为旱地>水田>坑塘水面。与 1984 年相比,近

37 年各土地利用方式的土壤有效锌含量均有不同程度的提升。

2.4 扬州市耕地土壤有效锌含量与土壤理化指标的相关性

为进一步明确耕地土壤理化性质与土壤有效锌的相关性,选取耕地土壤 pH 和有机质含量与有效锌含量进行 Pearson 相关性分析。由表 4 可知,土壤

有效锌含量与土壤 pH 呈显著负相关($P<0.05$), 且在 1984 年和 2005 年达到极显著负相关($P<0.01$)。1984 年土壤有效锌含量与有机质含量呈极显著正相关($P<0.01$), 但在 2005 年和 2020 年呈负相关, 且在 2005 年呈极显著负相关($P<0.01$)。

表 4 土壤有效锌含量与其他理化指标的 Pearson 相关性

年份	pH	有机质
1984	-0.041**	0.375**
2005	-0.144**	-0.104**
2020	-0.084*	-0.042

注: *和**分别表示相关性达到 $P<0.05$ 和 $P<0.01$ 显著水平。

3 讨论

3.1 土壤有效锌含量的时空变异

作物吸收锌元素的途径主要源于土壤, 因此确保土壤中锌元素的充足供应是农作物持续高产的重要基础。近 37 年, 扬州市耕地土壤有效锌含量呈显著上升趋势。2020 年扬州市耕地土壤有效锌平均含量约是 1984 年全国第二次土壤普查时期的 2.9 倍, 主要是近年来我国中微量元素肥料的广泛应用、秸秆还田技术的推广以及农户科学管理等措施使土壤中有效锌含量得以提升^[16]。

从半变异函数拟合结果分析, 扬州市耕地土壤有效锌含量分布存在明显的空间异质性, 总体上呈现南高北低、西高东低的分布特征, 这与扬州市地形地貌、成土母质、土壤质地等结构性因素和土地利用方式、施肥等人为因素密切相关。扬州市不同成土母质形成土壤中有效锌含量差异显著, 其中南部地区长江冲积物发育土壤有效锌含量较高, 且随时间推移增长趋势明显, 这可能是因为长江冲积物是由风化物质经河流侵蚀、搬运和沉积等过程形成的沉积物, 黏粒含量多, 发育土壤剖面层次分明, 层内黏粒粗细均一, 有利于有效锌的积累^[17]。土壤质地是根据土壤机械组成状况进行的土壤分类^[18]。扬州市目前有轻壤土、轻黏土、砂壤土、中壤土和重壤土 5 种类型质地, 本研究结果发现, 砂壤土和轻壤土中有效锌含量较高, 而重壤土和轻黏土中有效锌含量较低, 这与周聪^[19]的研究结果一致, 这主要是因为砂壤土和轻壤土中黏粒含量少, 重壤土和轻黏土中黏粒含量多。赵爽等^[20]研究发现, 土壤中黏粒含量与有效锌含量呈负相关, 过多的黏粒会对锌产生固定作用, 降低土壤颗粒对锌元素的解吸能力, 使土壤中有效锌含量下降。扬州市不

同土地利用方式中, 有效锌平均含量总体表现为旱地>水田>坑塘水面。土地利用方式是人类活动和自然条件共同作用的综合反映, 其改变直接影响土壤中微量元素含量及其有效性的变化^[21-22]。张欣^[23]通过分析重庆市采集的 479 个耕地土壤剖面也发现, 不同厚度的土层中, 旱地土壤有效锌含量均大于水田土壤。这主要是旱地和水田的特性决定的, 一方面旱地是依靠天然降水种植的耕地, 土壤中矿物质以稳定态形式存在, 不易流失, 而水田是具有灌溉保障、种植水稻等作物的耕地, 矿物质流动性大, 易流失^[24]; 另一方面, 水田土壤的 pH 高于旱地^[25], 而本研究发现土壤 pH 与有效锌含量呈负相关, 由此也可能导致旱地有效锌含量高于水田土壤。此外, 气候^[26]、地形^[27]等其他结构性因素和施肥^[28]等人为活动也会对土壤中有效锌分布产生影响, 这些也可能是导致扬州市耕地土壤有效锌存在空间异质性的重要因素。

3.2 土壤理化指标对有效锌含量的影响

土壤 pH 是影响土壤质量的重要理化指标之一, 直接影响土壤中金属元素的迁移和转化。Singh 等^[29]研究了 pH 对新西兰坎特伯雷平原土壤有效锌吸附和解吸的影响, 发现土壤对锌的吸附量随 pH 的升高而增加, 对锌的解吸量随着 pH 的升高而降低。王子腾等^[30]研究发现农田土壤中, 土壤有效锌含量与土壤 pH 呈显著负相关。本研究中, 通过 Pearson 相关性分析发现, 1984 年、2005 年和 2020 年土壤有效锌含量与土壤 pH 相关系数小于 0, 且 1984 年和 2005 年呈极显著负相关, 2020 年呈显著负相关。这主要是因为随着 pH 的升高, 土壤中的 OH^- 增多, 形成大量吸附物质 $\text{Zn}(\text{OH})^-$ 和 $\text{Zn}(\text{OH})_2$, 从而间接导致锌的解吸量减少; 降低 pH, 伴随着 H^+ 增多, 土壤中有效锌含量增多^[29]。

土壤有机质是土壤的重要组成部分, 其含有的含氧官能团和其他官能团直接影响土壤中金属元素的迁移、转化以及生物有效性^[31]。本研究结果表明, 1984 年扬州市土壤有效锌含量与有机质含量呈显著正相关, 导致该结果的原因可能是有机质在其分解过程中会产生酸性物质, 从而降低土壤 pH, 提高有效锌含量, 此外有机质中小分子物质可与锌形成溶解度较大的络合物, 提高土壤中有效锌含量^[32-33]; 而 2005 年和 2020 年土壤有效锌含量与有机质含量呈负相关, 与王子腾等^[30]的研究结果不同, 其原因一方面是近些年随着有机肥的大量投入, 土壤肥力得以提升, 进一步促进植物生长, 导致植物对土壤中锌元素的需求量增加, 从而直接影响土壤中有效锌含量^[32];

另一方面, 崔婷婷^[34]研究发现, 在田间原位条件下 0.88% ~ 5.28% 的秸秆添加量处理下表层土壤有效锌含量下降, 最高下降 33.72%, 可能是因为大量的秸秆进入土壤, 仅能改变土壤中各个形态锌之间的转化, 不能提高土壤中 DTPA-Zn 含量^[35]。据统计, 从 20 世纪 90 年代开始, 扬州市秸秆还田数量显著增加, 2005 年达到 100 万 t, 2014 年达到 197 万 t^[36], 因此可能会出现土壤有机质含量增加而有效锌含量不变甚至减少的现象。

4 结论

1) 1984 年、2005 年和 2020 年扬州市耕地土壤有效锌平均含量分别为 0.61、1.09 和 1.76 mg/kg, 近 37 年来有效锌含量整体呈现上升趋势。1984—2020 年, 扬州市耕地土壤有效锌分布存在明显的空间异质性, 总体上呈现南高北低、西高东低的分布特征。

2) 不同成土母质、土壤质地以及土地利用方式等对耕地土壤有效锌含量产生影响。长江冲积物母质发育土壤有效锌含量增幅显著高于其他母质; 砂壤土有效锌含量高于其他质地土壤; 旱地土壤有效锌含量高于水田和坑塘水面有效锌含量。

3) 耕地土壤有效锌含量受土壤 pH 和有机质等多种土壤理化指标的影响。降低土壤 pH 有利于提高土壤有效锌含量, 土壤有效锌含量与土壤有机质含量相关性随时间变化由正相关转变为负相关。

参考文献:

- [1] 刘彦伶, 李渝, 蒋太明, 等. 长期施用磷肥和有机肥对黄壤稻田锌形态转化的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(1): 258–268.
- [2] 王艳梅. 微量元素锌与人类疾病[J]. 延安大学学报(自然科学版), 2001, 20(2): 75–77.
- [3] Alloway B J. Soil factors associated with zinc deficiency in crops and humans[J]. Environmental Geochemistry and Health, 2009, 31(5): 537–548.
- [4] Cakmak I. Tansley Review No. 111: Possible roles of zinc in protecting plant cells from damage by reactive oxygen species[J]. The New Phytologist, 2000, 146(2): 185–205.
- [5] 刘铮. 我国土壤中锌含量的分布规律[J]. 中国农业科学, 1994, 27(1): 30–37.
- [6] 田尤, 刘廷, 曾祥婷, 等. 我国锌资源产业形势及对策建议[J]. 现代矿业, 2015, 31(4): 5–9.
- [7] Cakmak I. Plant nutrition research: Priorities to meet human needs for food in sustainable ways[M]//Progress in Plant Nutrition: Plenary Lectures of the XIV International Plant Nutrition Colloquium. Dordrecht: Springer Netherlands, 2002: 3–24.
- [8] 王子腾, 耿元波. 国内外主要粮食作物对施用锌肥响应的研究进展[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 805–816.
- [9] Alloway B J. Micronutrient Deficiencies in Global Crop Production[M]. Dordrecht: Springer Netherlands, 2008.
- [10] Noulas C, Tziouvalakas M, Karyotis T. Zinc in soils, water and food crops[J]. Journal of Trace Elements in Medicine and Biology, 2018, 49: 252–260.
- [11] 麻万诸, 吕晓男, 陈晓佳. “3S”技术在土壤养分空间变异研究中的应用[J]. 农业网络信息, 2009(7): 13–16.
- [12] Ye H C, Shen C Y, Huang Y F, et al. Spatial variability of available soil microelements in an ecological functional zone of Beijing[J]. Environmental Monitoring and Assessment, 2015, 187(2): 13.
- [13] 姜冰, 王松涛, 孙增兵, 等. 山东省青州市土壤养分元素有效量及其影响因素[J]. 土壤, 2021, 53(6): 1221–1227.
- [14] 夏凡, 王永东, 郑子成, 等. 小尺度下茶园土壤有效态微量元素空间变异特征及其影响因素分析[J]. 植物营养与肥料学报, 2022, 28(6): 1047–1054.
- [15] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [16] 朱盼盼, 周忠雄, 杨国富, 等. 我国中微量元素肥料产品登记及产业发展现状[J]. 磷肥与复肥, 2022, 37(12): 31–34.
- [17] 姚敏. 长江三角洲地区主要类型土壤对锌的吸附—解吸特性研究[D]. 南京: 南京工业大学, 2005.
- [18] 王圣, 陈科希, 袁源远, 等. 江西省旱地土壤质地与土壤化学性状的相关性研究[J]. 中国土壤与肥料, 2021(6): 65–71.
- [19] 周聪. 秦皇岛市耕作土壤微量元素含量特征分析[J]. 南方农业, 2020, 14(32): 227–229, 234.
- [20] 赵爽, 许自成, 解燕, 等. 曲靖市植烟土壤有效锌含量状况及与土壤因素的关系分析[J]. 中国烟草学报, 2013, 19(1): 26–31.
- [21] 王兴灵, 张怡颖, 谷丰, 等. 华北土石山区土地利用类型对土壤有效态微量元素的影响[J]. 草业科学, 2020, 37(7): 1272–1280.
- [22] 李秀芝, 胡聪月, 杨帆, 等. 土地利用方式改变对紫色水稻土不同形态钾演变特征的影响[J]. 土壤学报, 2023, 60(3): 685–693.
- [23] 张欣. 山地丘陵区环境因子对耕地土壤剖面微量元素含量的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2021.
- [24] 杨刚, 沈飞, 钟贵江, 等. 西南山地铅锌矿区耕地土壤和谷类产品重金属含量及健康风险评估[J]. 环境科学学报, 2011, 31(9): 2014–2021.
- [25] 赵凯丽, 徐明岗, 周晓阳, 等. 南方典型红壤区旱地与水田土壤酸度的剖面差异性[J]. 土壤, 2022, 54(5): 1010–1015.
- [26] 赵苗苗, 郑粉莉, 王婧, 等. 土壤微量元素对 CO₂ 摩尔分数和温度升高响应的模拟试验[J]. 中国水土保持科学(中英文), 2022, 20(3): 53–61.

- [27] 魏孝荣, 邵明安. 黄土沟壑区小流域不同地形下土壤微量元素分布特征[J]. 环境科学, 2009, 30(9): 2741–2746.
- [28] 任顺荣, 邵玉翠, 高宝岩, 等. 长期定位施肥对土壤微量元素含量的影响[J]. 生态环境, 2005, 14(6): 921–924.
- [29] Singh D, McLaren R G, Cameron K C. Effect of pH on zinc sorption–desorption by soils[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2008, 39(19/20): 2971–2984.
- [30] 王子腾, 耿元波, 梁涛. 中国农田土壤的有效锌含量及影响因素分析[J]. 中国土壤与肥料, 2019(6): 55–63.
- [31] 陈子扬, 孙孝龙. 土壤中有机质与重金属关系的研究进展[J]. 环境与发展, 2017, 29(8): 141–142.
- [32] 杜彩艳, 祖艳群, 李元. pH 和有机质对土壤中镉和锌生物有效性影响研究[J]. 云南农业大学学报, 2005, 20(4): 539–543.
- [33] 蒋廷惠, 胡霁堂, 秦怀英. 土壤中锌的形态分布及其影响因素[J]. 土壤学报, 1993, 30(3): 260–266.
- [34] 崔婷婷. 秸秆还田对土壤有机质特征的影响[D]. 长春: 吉林农业大学, 2017.
- [35] 丁婷婷. 土壤各形态锌对 DTPA-Zn 的贡献量及土壤供锌能力的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [36] 毛伟, 李文西, 陈明, 等. 扬州市耕地土壤有机质含量 30 年演变及其驱动因子[J]. 扬州大学学报(农业与生命科学版), 2019, 40(4): 25–31.