

doi: 10.12097/gbc.2023.05.026

黄顺生, 周强, 张平, 崔晓丹, 蔡露明, 李文博, 徐宏婷. 2025. 淮安农用地土壤硫分布特征、影响因素及生态环境效应研究[J]. 地质通报, 44(6): 1062-1075.

Huang Shunsheng, Zhou Qiang, Zhang Ping, Cui Xiaodan, Cai Luming, Li Wenbo, Xu Hongting. 2025. Distribution characteristics, influencing factors, and ecological and environmental effects of soil sulfur in Huai'an agricultural land[J]. Geological Bulletin of China, 44(6): 1062-1075(in Chinese with English abstract).

淮安农用地土壤硫分布特征、影响因素及生态环境效应研究

黄顺生^{1,2}, 周强^{1,2}, 张平^{1,2}, 崔晓丹^{1,2}, 蔡露明^{1,2}, 李文博^{1,2}, 徐宏婷^{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:【研究目的】淮安地区处于苏北平原腹地,地质背景较复杂,在地质与人为双重影响下,土壤硫元素空间变异性大,影响土壤硫元素空间分布的因素及其对周围生态环境的效应尚不清楚。【研究方法】对比不同深度、土壤类型、地貌、土地利用方式的土壤S含量和开展硫元素平衡状况评估,揭示硫元素分布特征及影响因素,进一步开展生态环境效应初步研究。【研究结果】研究区表层土壤全硫的平均值为 388×10^{-6} ,远高于江苏省土壤平均值。空间分布上总体表现为南部高于北部,层次土壤分布自上而下逐渐降低。全S含量在不同土壤类型中表现为沼泽土最高、水稻土次之、潮土最低;在不同地貌类型间,扇缘湖沼平原区最高,冲海积砂坝高地最低;在不同土地利用方式下则表现为水浇地最高、林地最低。土壤全S含量与有机质含量呈显著正相关性($P < 0.01$)。农用地土壤硫元素平衡状况评估结果表明,年净增量为 58.21 kg/hm^2 ,与2004年多目标数据相比,研究区农用地土壤全S含量近15年来出现一定程度的累积。【结论】土壤硫元素分布特征与土壤深度、土壤类型、土地利用方式及有机质密切相关,土壤硫元素显著累积区对应设施农用大棚(种植红椒等)分布范围,成因上与硫酸钾复合肥、有机肥等大量施用密切相关。这些区域土壤已出现酸化趋势,对周围水体产生一定硫元素负荷,建议开展生态风险监测。

关键词: 农用地土壤;硫;分布特征;影响因素;变化趋势;淮安;生态环境;农业地质调查工程

创新点: 系统揭示土壤硫元素分布主要受控于地貌、土壤类型、土地利用类型、有机质等因素,人为活动(种植红椒等)显著增加了土壤硫元素含量。硫元素异常区附近土壤已出现了酸化趋势,对周围水体产生一定硫元素负荷。

中图分类号: P595; S158; S181 文献标志码: A 文章编号: 1671-2552(2025)06-1062-14

Distribution characteristics, influencing factors, and ecological and environmental effects of soil sulfur in Huai'an agricultural land

HUANG Shunsheng^{1,2}, ZHOU Qiang^{1,2}, ZHANG Ping^{1,2}, CUI Xiaodan^{1,2}, CAI Luming^{1,2},
LI Wenbo^{1,2}, XU Hongting^{1,2}

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

Abstract: 【Objective】 The study area is located in the core area of the Northern Jiangsu Plain, characterized by complex geological

收稿日期: 2023-05-26; 修订日期: 2023-10-26

资助项目: 江苏省自然资源厅地质调查项目《淮安城市地质调查》(编号: 苏财建[2018]96号)

作者简介: 黄顺生(1975-),男,硕士,正高级工程师,矿物学、岩石学、矿床学专业,从事土地质量地球化学调查与评价工作。E-mail: geohuangss@163.com

settings. Under the combined influences of geological processes and anthropogenic activities, the spatial variability of soil sulfur exhibits significant heterogeneity. However, the key factors influencing its spatial distribution and its corresponding ecological environmental effects remain poorly understood. **[Methods]** The paper compares soil sulfur content under varying depths, soil types, landforms, and land uses, evaluates sulfur balance, identifies distribution patterns and driving factors, and preliminarily explores ecological environmental effects. **[Results]** The mean concentration of sulfur in topsoil is 388×10^{-6} and distinctly elevated compared with the mean background level of soil in Jiangsu province. The overall spatial distribution suggests that the southern part is higher than the northern one, and the vertical distribution gradually decreases with depth. The concentration of sulfur in different soil types is the highest in marsh soil, the second in paddy soil, and the lowest in fluvoaquic soil. Among different types of landforms, the fan edge lake marsh plain area is the highest, and the alluvial sand dam highland is the lowest. Based on the comparison of land use patterns, the concentration of soil sulfur is the highest in irrigated land and lowest in woodland. The concentrations of soil sulfur exhibit a significant positive relationship with the contents of organic matter ($P < 0.01$). The evaluation results of soil sulfur balance in agricultural soil show that the net increase will be 58.21 kg/hm^2 annually. Compared with the multi-target data in 2004, the content of sulfur in agricultural soil in the study area has been accumulated to some extent in the last 15 years. **[Conclusions]** The distribution characteristics of soil sulfur are closely related to soil depth, soil type, land use patterns, and organic matter content. Hotspots of sulfur accumulation correspond to areas with greenhouse agriculture (e.g., red pepper cultivation), primarily due to the extensive application of sulfur-containing fertilizers such as potassium sulfate compound fertilizers and organic fertilizers. These regions have shown a trend of soil acidification, contributing to sulfur loading in surrounding water bodies. Therefore, ecological risk monitoring is recommended.

Key words: agricultural soil; sulfur; distribution characteristics; influencing factors; variation trend; Huai'an; ecological environment; agricultural geological survey engineering

Highlights: The study systematically reveals that the distribution of soil sulfur is primarily governed by factors such as landform, soil type, land use patterns, and organic matter. Human activities (e.g., red pepper cultivation) have significantly increased soil sulfur content. Notably, soils in sulfur anomaly zones have exhibited an acidification trend, exerting a certain sulfur load on surrounding water bodies.

About the first author: HUANG Shunsheng, male, born in 1975, master, professor-level senior engineer, mainly engaged in geochemical investigation and evaluation of land quality; E-mail: geohuangss@163.com

Fund support: Supported by Geological Survey Project of Jiangsu Provincial Department of Natural Resources "Huai'an Urban Geological Survey" (No. Sucaijian [2018] No. 96)

硫是植物生长必需的营养元素(杨宗飞, 2009; 安永龙等, 2023), 它是氨基酸、蛋白质、酶、维生素及次级代谢产物、硫基黄酮类等生物代谢合成所必需的重要物质, 在植物的生长发育及代谢过程中发挥重要的生理功能(Koprivova and Kopriva, 2016; 崔帅等, 2022)。当作物缺硫时, 植株的幼芽或幼嫩叶片首先褪绿和变黄, 心叶失绿黄化, 开花时间延长, 果实量减少。水稻缺硫时植株矮小、返青慢、根系生长不良, 容易出现“发僵”现象(李录久等, 2003)。在土壤—植物系统中, 有近 98% 的硫贮存于土壤系统中, 植物体需要的硫主要来自根系对土壤中无机硫($\text{SO}_4^{2-}\text{-S}$)的吸收(刘潇潇等, 2016)。影响土壤 S 含量及分布的因素较多, 主要有自然因素(成土母质、理化性状、土壤类型、地形地貌等)和人为因素(如土地利用方式、施肥状况等)(刘念龙等, 2000; 李新华等, 2006; 迟清华和鄢明才, 2007)。

淮安地处苏北平原腹地, 是江苏省重要的农业生产大市, 近年来已形成粮油、畜禽、水产、蔬菜四大类优势主导产业。据 2022 年淮安统计年鉴(淮安市统计局, 2022), 全市蔬菜瓜类种植面积达 $1.09 \times 10^4 \text{ hm}^2$ 。淮安黄瓜在丁集镇形成约 70000 hm^2 的种植规模, 淮安红椒主要分布于黄码镇、武墩镇、和平镇, 自 20 世纪 80 年代以来种植面积达 $2.7 \times 10^4 \text{ hm}^2$, 它们以设施大棚种植为主。为提高大棚红椒产量, 种植户通常会施加硫酸钾复合肥, 施肥量可达 1650 kg/hm^2 (王立华, 2011); 同时还有大量有机肥的投入, 高强度施肥活动会加大外源性硫的输入(牟文燕等, 2022), 未被植物吸收的剩余硫会残留在土壤中而产生积累, 甚至可能对周围生态系统产生负面作用。此外土壤还继承了成土母质的硫元素(王凡等, 2007), 使土壤硫分布状况较复杂, 因此客观评价人为活动、自然因素对农用地土壤硫元素分布的影响非常重要。

目前,国内外有关硫在农用地土壤中的分布特征及影响因素研究偏少,主要集中于有机质(孙奥等, 2022)、pH(毛立等, 2023)、植被(张志霞等, 2014)、土地利用方式(李新华等, 2006)、人为活动(Chen and Sun, 2020)对土壤硫分布的影响。为了便于对比,研究者往往选取单一的环境因素作为研究对象,而对多种环境因素共存条件下的研究较少。对于淮安地区区域成土母质的多样性及高强度农业活动对土壤硫元素的累积及影响研究鲜有报道,土壤硫异常区对周围生态环境影响探索尚属空白。本次研究利用2019年淮安规划区1:50 000土地质量地球化学调查数据,对研究区农用地土壤全硫状况进行全面准确地评估,探讨不同土壤类型、地貌、土地利用方式等因素对土壤S含量分布的影响,初步评估农

用地土壤硫元素的平衡状况;与2004年多目标地球化学调查数据进行对比,掌握了近15 a来研究区土壤硫元素的变化趋势,厘定自然因素、人为因素对农田土壤硫元素累积的影响,以期为淮安市农用地土壤硫元素的系统研究提供基础资料,可有效地提高农业施肥的科学性及作物品质改善的精准性,为淮安区域生态风险防控提供依据。

1 研究区概况

研究区位于江苏省中北部,江淮平原东部,介于北纬 $33^{\circ}17' \sim 33^{\circ}55'$ 、东经 $118^{\circ}44' \sim 119^{\circ}37'$ 之间。行政区辖淮安区、淮阴区、清江浦区、经济开发区、涟水县,土地总面积约 3326 km^2 (图1-a)。区内水网密布,水系格局自南向北依次为淮河水系、废黄河水

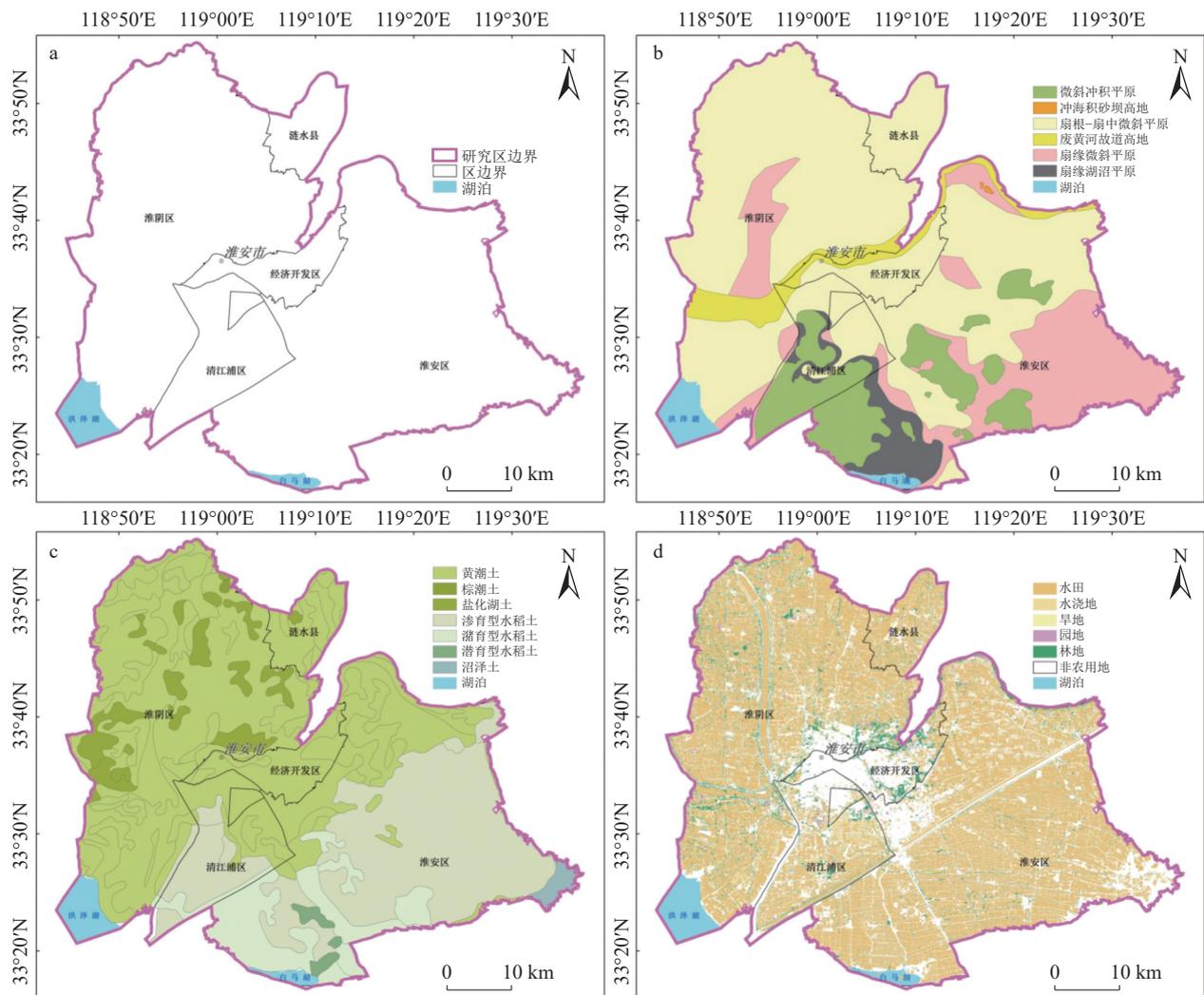


图1 研究区行政区划图(a)、地貌分区图(b)、土壤类型图(c)和土地利用类型图(d)

Fig. 1 Distribution of administrative division (a), landforms (b), soil types (c) and land use patterns (d) in the study area

系、沂沭泗水系。区内地形地貌为江淮冲积-冲海积平原,受到晚期黄河泛滥冲积物堆积的影响,依据机械沉积分异原理,结合槽型钻岩性资料等综合分析,江淮冲积-冲海积平原进一步分为微斜冲积平原区、冲海积砂坝高地;黄淮决口扇冲积平原可细分为废黄河故道高地、扇根-扇中微斜砂质平原、扇缘微斜泥质平原和扇缘低洼湖沼泥质区(图 1-b)。区内土壤主要为水稻土、潮土及沼泽土类,水稻土主要分布于苏北灌溉总渠以南,分为渗育型、潜育型、潜育型 3 个亚类;潮土分布于苏北灌溉总渠以北地区,分为棕潮土、黄潮土、盐化潮土 3 个亚类,沼泽土仅分布于研究区东侧地势低洼处(图 1-c)。

研究区以平原水网为主,区内农用地面积 248071.38 hm²,占研究区总面积的 75.98%,土地利用类型以耕地为主,其次为园地、林地,耕地以水田为主(图 1-d);区内未利用地占比近 6%,包括河流水面、湖泊水面及内陆滩涂。研究区地处北亚热带和暖温带的过渡地带,光照充足,雨水充沛,年降水量在 910~1000 mm 之间,依托优质的自然资源禀赋,成为江苏省重要的商品粮、蔬菜、瓜果等生产基地,区内作物种类丰富多样,如淮安稻米、红椒、黄瓜、蒲菜都享誉盛名。

2 材料和方法

2.1 样品采集

土壤样品集中采集于 2019 年 2—5 月,采用公里网格+图斑布点方法在农用地内布设样点,采集周围 20~30 m 范围表层土壤(0~20 cm)5 点组合样品,重量在 1 kg 以上,共采集样品 2806 件,样点平均密度为 1 个/km²(图 2)。为了对比不同深度层次土壤 S 含量,研究区布设了 20 个分层样点,分别采集表层(0~20 cm)、中层(20~40 cm)及下层(40~60 cm)土壤,共采集样品 60 件。采样过程中注重样品的代表性、均匀性、控制性,避开人为污染源、近期堆积土和施肥土。为了对比不同土地利用方式影响下土壤硫元素累积特征,在黄码镇相邻的水田、设施大棚各取 1 个土壤剖面,深度 200 cm,按 5~20 cm 间隔连续取样,共采集样品 21 件。大气降尘采集 26 件样品,采样点布设于农村民房二楼,接尘缸放置在距离地面 8 m 左右的相对平坦处,周围相对较宽阔,避开人为活动干扰明显的地方,如公路边或工厂附近等。大气干湿沉降样品的收集方法及处理过程参照已有

研究(黄顺生等,2008)。土壤样品自然风干,用木槌敲碎,除去土壤颗粒中的杂物,研磨过 10 目尼龙筛,混匀,采用四分法称取 200 g 装牛皮纸袋送往实验室分析。

灌溉水样品采集工作于 2019 年 7 月完成,采样点主要布设于湖泊、河流、沟渠、坑塘等地区,避开可能污染的断面。取样前用待取水洗涤聚乙烯塑料壶及塞子 3~5 次,然后将取样瓶沉入水中 30 cm 处,尽量轻轻扰动水体,严防杂物混入,水样不超过容器容量的 90%。样品采集后立即置于铺有冰袋的恒温箱中低温保存,当天送至实验室。

2.2 样品测试

样品分析方法参照《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)(DD2005-03)》(中国地质调查局,2005)、《多目标区域地球化学调查规范(1:250 000)(DZ/T 0258-2014)》(中国地质调查局,2014)、《耕地质量等级(GB/T 33469-2016)》(中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会,2016)。样品测试工作由自然资源部南京矿产资源检测中心完成。土壤(及大气干沉降)S、Al、Fe、P 分析采用 X 射线荧光光谱法(Axios MAX/HX103),其检出限分别为 25 mg/kg、0.03%、0.05%、8 mg/kg;N 分析采用容量法,检出限为 15 mg/kg;有机碳分析采用非分散红外法,检出限为 0.01%;CEC 测定采用蒸馏容量法,检出限为 1.0 mmol/kg;pH 测定采用离子电极法(PHS-3C/HX014),检出限为 0.01;硫酸根采用硫酸钡比浊法,检出限为 1 mg/L。灌溉水及大气湿沉降中的硫酸根测定采用电感耦合等离子光谱法(iCAP6300 MFC/HX015),检出限为 1 mg/L。样品测试过程中采取严格的外部部和内部质量监控,利用国家土壤一级标准物质(GSS-1、GSS-5)准确度和精密度进行监控,指标合格率 100%。实验室异常点抽取和内部检查的合格率为 91.3%~100%,密码样抽查检查合格率为 95.2%~100%。

2.3 数据处理

采用 SPSS19.0 统计软件对数据进行统计性描述,采用单变量方差分析(One-Way ANOVA)研究不同因素对土壤全 S 含量的影响。S 含量空间分布图及变化图采用 ArcGIS 10.2 编制,土壤元素垂向分布图及对比图则采用 Graph4 编制,相关图件在 CoreDrawX5 中进行处理。

3 结果与讨论

3.1 农用地土壤 S 含量特征

研究区 2086 件土壤样品 S 含量的偏度-峰度检验结果及描述性统计特征见表 1。由表 1 可见,土壤 S 含量为 $92.6 \times 10^{-6} \sim 4004 \times 10^{-6}$, 平均含量是江苏省背景值(111×10^{-6})的 3.5 倍(廖启林等, 2011); 其极大值是江苏省背景值的 36 倍, 表明局部地区土壤受到了剧烈的人为扰动。S 含量中值也超过了背景值, 表明研究区土壤存在硫富集现象, 且出现正偏现象, 反映其受到人为干扰偏离了原有的正态分布。统计数据的波动性强度通常采用变异系数进行表征, 根据前人(赵科理等, 2016)对变异程度的分类, 变异系数 ≤ 0.1 表示弱变异, 变异系数在 0.1~0.9 之间表示中等变异, 变异系数 > 0.9 表示强变异。本次获得硫的变异系数为 0.61, 已达到中等变异状态, 反映 S 含量分布在外活动下处于一定波动状态, 这也与较大峰度值的特征分析一致。由此可以看出, 研究区土壤硫受到了明显的外源性输入。

从淮安市不同区县土壤硫平均值对比看, 平均值由高至低依次为清江浦区、淮阴区、淮安区、经济开发区、涟水县。相比而言, 淮阴区、清江浦区土壤 S 含量变化幅度、变异系数、峰度、偏度等参数均较大, 与这些地区大量的蔬菜大棚用地、园地分布有关, 硫酸钾等富硫化肥施用量大(王立华, 2011), 与野外异常查证发现的硫异常点多分布于辣椒、火龙果种植地块等现象一致, 进一步反映它们受局部人为干扰更强烈, 而涟水县为典型的稻麦轮种区域, 施肥与耕作均相对均匀, 反映其空间变异较小, 区域土壤受人为活动影响不明显。

农作物吸收硫元素受诸多因素影响, 其中主要

因素是土壤的供硫状况, 在某种程度上土壤全 S 含量可以反映土壤硫的丰缺状况。前人研究表明(刘崇群等, 1993), 中国土壤全 S 含量集中于 $100 \times 10^{-6} \sim 500 \times 10^{-6}$ 之间, 若低于 150×10^{-6} , 土壤可能出现缺硫现象。本次研究结果显示, 淮安区、淮阴区、涟水县和经济开发区全 S 含量的平均值分别为 373×10^{-6} 、 383×10^{-6} 、 325×10^{-6} 和 351×10^{-6} , 说明淮安农用地土壤的全 S 含量处于中国全 S 含量的变幅范围内, 且高于土壤硫亏缺临界值。如参照《土地质量地球化学评价规范》(DZ/T 0295—2016)中养分等级划分标准(中华人民共和国国土资源部, 2016), 土壤硫处于较丰富、丰富等级的占比分别为 22.81%、51.82%。综上分析可以看出, 研究区农用地土壤硫元素充足。

3.2 农用地土壤硫元素空间分布特征

参照《地球化学普查规范(1:50000)》(DZ/T 0011-2015)《地球化学图色划分要求(中华人民共和国国土资源部, 2015)》, 本次研究将土壤全 S 含量分为 7 个等级: 强低值区($101 \times 10^{-6} \sim 156 \times 10^{-6}$)、低值区($157 \times 10^{-6} \sim 245 \times 10^{-6}$)、低背景区($246 \times 10^{-6} \sim 278 \times 10^{-6}$)、背景区($279 \times 10^{-6} \sim 465 \times 10^{-6}$)、高背景区($466 \times 10^{-6} \sim 711 \times 10^{-6}$)、高值区($712 \times 10^{-6} \sim 980 \times 10^{-6}$)和强高值区($981 \times 10^{-6} \sim 3163 \times 10^{-6}$)。利用反距离权重法插值对研究区农田土壤全 S 含量进行最优插值绘制空间分布图(图 3)。由图 3 可见, 农田土壤硫强低值区呈点状分布, 仅占全部样点的 1.43%; 硫低值区主要分布于南马厂街道、钦工镇、苏嘴镇等; 硫低背景区分布面积约占 10%, 主要分布于渔沟镇、陈师街道、钦工镇、顺河镇、苏嘴镇; 硫背景区在全区广泛分布; 土壤硫的高值区、强高值区主要分布于黄码镇、流均镇、南陈集镇等地, 其次零星分布于淮高镇、丁集镇、漕运镇、高家堰镇等局地。不难发现,

表 1 淮安农用地土壤全 S 含量描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristic of contents of sulfur in agricultural soil

10^{-6}

地区	样品数	平均值	最大值	最小值	中值	标准差	变异系数	峰度	偏度
淮安区	903	373	1414	92.6	358	130	0.35	8.8	1.8
淮阴区	861	383	4004	111	345	234	0.61	101.3	7.8
清江浦区	183	527	3328	92.9	385	485	0.92	11.3	3.0
涟水县	78	325	649	93.3	302	109	0.34	0.44	0.67
经济开发区	61	351	1534	114	253	285	0.81	8.9	3.0
研究区	2086	388	4004	92.6	352	235	0.61	68.2	6.3

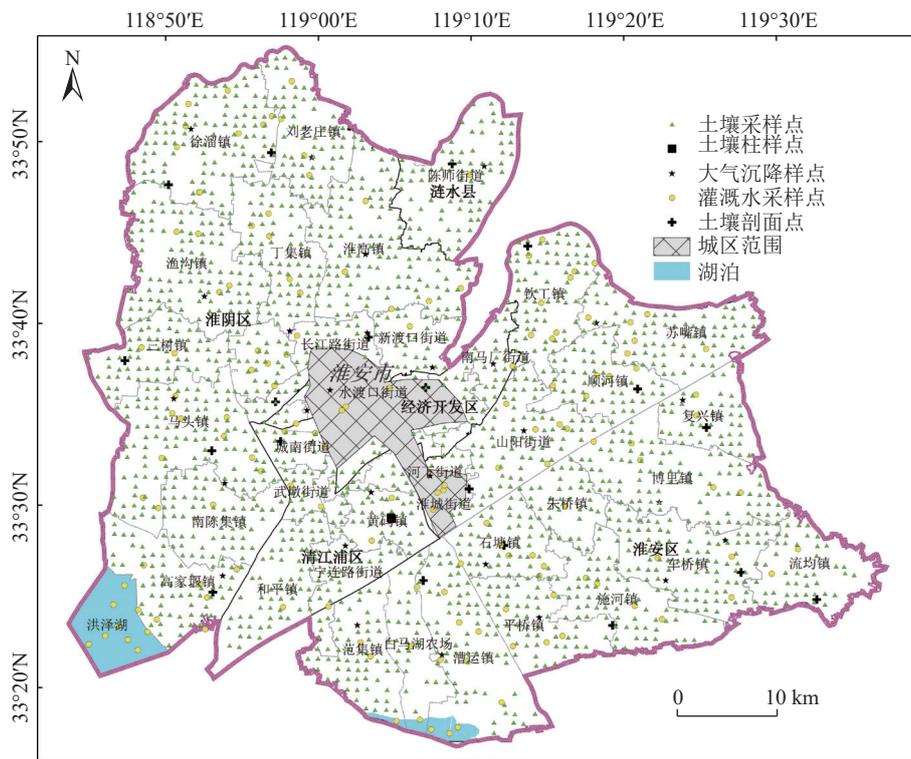


图 2 采样点分布图

Fig. 2 Sampling sites of the study area

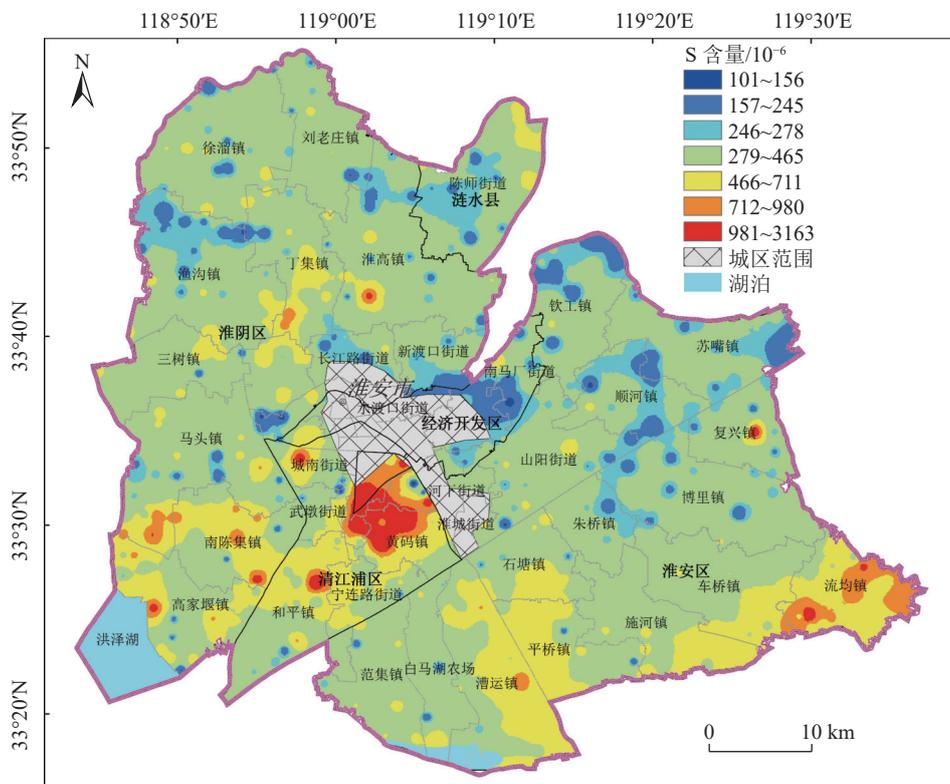


图 3 研究区农用地土壤全 S 含量分布图

Fig. 3 Spatial distribution of concentrations of sulfur in agricultural soil in the study area

研究区农田土壤全 S 含量分布总体上是南部高于北部, 主要与南北土壤质地分布格局密切相关, 北部主要受黄泛堆积物影响, 土壤质地多为砂土、砂壤等, 颗粒较大, 土壤有机质低, 保水保肥能力弱, 氮磷硫等养分贫乏, 如长江路街道、新渡口街道、南马厂街道等硫低值区位于王营口决口扇顶及其附近处, 渔沟镇硫低值区位于泗阳决口扇缘处(江苏省地质调查研究院, 2021), 其他硫低值区空间上与黄河决口扇分布有关; 南部主要受江淮冲积—冲海堆积物影响, 土壤质地以重壤、粘土为主, 富含有机质及养分元素, 在流均镇、车桥镇一带形成硫高值区。此外, 在黄码镇、和平镇形成大面积的土壤硫高值区或强高值区, 与这些乡镇大规模的红椒种植有关。因此, 研究区农用地土壤硫分布特征是区域地质背景与人为活动双重影响的结果。

3.3 农用地层次土壤硫元素分布特征

由图 4 可以看出, 研究区农用地不同层次土壤的全硫平均含量顺序为表层>中层>下层。层次土壤全硫分布特征能较好地反映人为活动的影响, 土壤全 S 含量随着深度的增加而减少, 表明外源性输入的硫逐步向深部迁移, 从而影响中、下层土壤。统计检验结果表明, 淮安地区不同农用地层次土壤之间的全 S 含量存在显著差异($P < 0.01$), 这与前人(罗曼琳等, 2019)对重庆农田土壤硫的研究结论相同。

3.4 土壤硫分布的影响因素

3.4.1 土壤理化性质对全 S 含量的影响

土壤全硫与养分元素及理化指标的相关性见表 2。结果表明, 土壤全 S 含量与有机碳含量在 $P < 0.01$ 水平上呈极显著正相关性。通常情况下, 有机碳含量高的土壤全 S 含量一般也较高(李新华等,

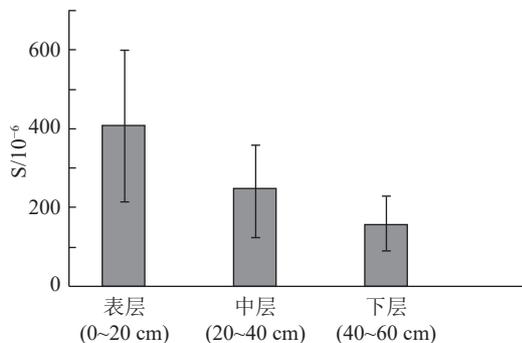


图 4 不同土壤层次硫平均含量(线段上端为均值+标准差; 下端为均值-标准差)

Fig. 4 The mean contents of sulfur at different soil layers

2006)。前人研究表明(滕险峰, 2000), 土壤全 S 含量与有机碳含量之间存在显著的正相关关系, 有机质对硫具有一定的吸附和固定作用, 此外土壤中硫还以有机硫形式存在, 因此有机质含量是影响土壤全硫的主要因素。本次研究中土壤全 S 含量与 pH 无显著相关性, 这和沙聪等(2018)获得的土壤全 S 含量与 pH 呈显著负相关性的结论不一致, 这可能与研究区土壤总体呈碱性(pH 均值为 7.95)有关, 较小的 pH 变化幅度(集中于 6.5~8.5 之间)对土壤全硫的影响非常有限。

3.4.2 土壤类型对 S 含量的影响

研究区土壤类型包括潮土、水稻土和沼泽土(表 3), 各类型土壤全 S 含量顺序为沼泽土($626 \times 10^{-6} \pm 109 \times 10^{-6}$)>水稻土($434 \times 10^{-6} \pm 364 \times 10^{-6}$)>潮土($388 \times 10^{-6} \pm 295 \times 10^{-6}$), 它们的全 S 含量在 $P < 0.01$ 水平上存在显著差异, 该差异主要由三方面因素引起, 一是潮土的成土母质为近代黄河冲积物, 土壤颗粒较粗, 土粒比表面积和电荷密度较小, 电荷性较弱, 导致其对元素的吸附能力较弱(魏孝荣等, 2008), 此外腐质化程度较低, 因此潮土 S 含量通常低于水稻土、沼泽土。二是沼泽土在形成时, 由于沼泽植物生长茂盛, 在淹水还原状态下累积了丰富的土壤有机质, 因而具有最高的 S 含量。三是水稻土长期处于缺氧还原状态, 有机质含量高; 黄河冲积物含有较多的 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Ba^{2+} , 能与土壤中 SO_4^{2-} 形成难溶性

表 2 土壤硫元素与其他元素及理化指标的相关系数

Table 2 Pearson correlation coefficients for elements and physic-chemical parameters in soils

指标	有机碳	Al	Fe	CEC	pH
S	0.501**	-0.157	-0.101	-0.173	0.115

注: **在 $P < 0.01$ 水平上显著相关

表 3 不同土壤亚类 S 含量

Table 3 Statistical characteristic of concentration of sulfur in different soil subcategories 10^{-6}

统计参数	潮土			水稻土			沼泽土
	黄潮土	棕潮土	盐化潮土	潜育型水稻土	渗育型水稻土	潜育型水稻土	腐泥土
样品数量	1151	29	125	42	531	188	20
含量平均值	393	379	388	515	377	418	626
标准差	291	166	151	186	145	125	109

硫;此外,研究区水稻质地粘重,多为重壤,含硫量较高(张艳等,2016),本次研究与贵州耕地土壤硫元素研究结果相似(肖厚军,2003)。在 $P<0.01$ 水平上,黄潮土、棕潮土、盐化潮土之间无显著性差异。不同水稻土亚类之间,土壤 S 含量存在显著性差异($P<0.01$),表现为潜育型>潴育型>渗育型,因为潜育型水稻土成土过程中封闭于静水状态,质地粘重,有机质、硫等养分含量普遍高,而渗育型水稻土多分布于地势较高区域,硫等养分元素的聚集不如潜育型水稻土。本次认识与前人对比不同类型水稻土硫肥力的研究结果一致(江苏省地质调查研究院,2007)。

3.4.3 地貌对 S 含量的影响

研究区地貌主要为冲积平原,根据相对高差、微地貌、沉积相等进一步细分为 6 类。土壤全 S 含量从高至低排列顺序:扇缘湖沼平原区>扇缘微斜平原区>扇根—扇中微斜平原区>微斜冲积平原区>废黄河故道>冲海积砂坝高地(图 5)。方差分析结果表明,不同冲积条件下土壤全 S 含量存在显著差异($P<0.01$),对于江淮冲—海积平原,微斜冲积全 S 含量显著高于冲海积砂坝高地;对于黄淮决口扇平原,扇根—扇中微斜平原、扇缘微斜平原、扇缘湖沼平原之间全 S 含量差异不显著,但它们均显著高于废黄河故道。在不同地貌中,废黄河故道与冲海积砂坝高地的全 S 含量最低,一方面是因为它们的地势相对较高,形成时间较老(如冲海积砂坝高地距今 7000 年前就形成),植被覆盖率低,长期受雨水淋溶冲刷,侵蚀程度大,水土流失严重,土壤养分流失;另一方面,这些区域土地利用方式多为旱地,有利于有机质分

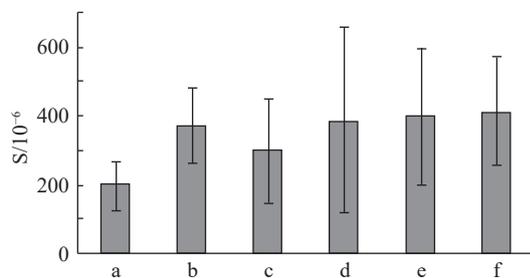


图 5 不同地貌土壤硫平均含量(线段上端为均值+标准差;下端为均值-标准差)

Fig. 5 The mean contents of sulfur in different landforms
a—冲海积砂坝高地; b—微斜冲积平原区; c—废黄河故道高地;
d—扇根-扇中微斜砂质平原; e—扇缘微斜泥质平原;
f—扇缘低洼湖沼泥质区

解;再因其种植的油菜、玉米等作物需硫较多(郑诗樟和刘志良,2015),因此其全 S 含量低于其他地貌的土壤。

3.4.4 土地利用方式对 S 含量的影响

土地利用方式是自然条件和人为活动的综合反映,是影响土壤变化最具表征的因素(吕唤春,2004)。从图 6 可以看出,研究区不同土地利用方式土壤全 S 含量差异显著,其中以水浇地土壤全 S 含量最高,平均为 $934 \times 10^{-6} \pm 724 \times 10^{-6}$;水田、园地次之,平均值分别为 $386 \times 10^{-6} \pm 136 \times 10^{-6}$ 、 $350 \times 10^{-6} \pm 278 \times 10^{-6}$;再之是旱地,平均为 $275 \times 10^{-6} \pm 107 \times 10^{-6}$;林地最低,平均为 $237 \times 10^{-6} \pm 95 \times 10^{-6}$ 。方差分析结果表明,除水田与园地之外,不同土地利用条件下土壤全 S 含量均存在显著差异($P<0.01$)。这主要是由于研究区水浇地涵盖了大量的设施大棚蔬菜地,高强度施肥等外源性输入强烈,土壤全 S 含量最高;水田淹育条件下土壤有机质分解缓慢,有利于土壤硫元素的积累;果园通常施加有机肥,有机肥为土壤硫不可忽视的外来源之一(骆珊等,2021);旱地由于耕垦效应,改变了土壤温度条件和透气状况,有机质分解速率加快,不利于土壤硫元素的累积;林地土壤具有最低的全 S 含量,可能归结于林地的成生特点,研究区林地多为疏林地、未成林地基苗圃地,缺少施肥等外源性硫输入,也没有林木凋落物产生的硫留存。从变异系数看,园地≈水浇地>林地≈旱地>水田,这可能是由于园地、水浇地施肥量大及施肥条件的随机性导致变异性较大,而旱地和水田由于管理措施及施肥水平相当,所以空间变异性较小,这与罗曼琳等(2019)的研究结果一致。

为了进一步了解人为活动对土壤硫元素的影响

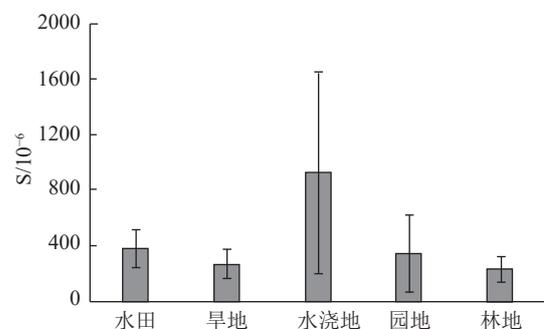


图 6 不同土地利用方式的硫平均含量(线段上端为均值+标准差,下端为均值-标准差)

Fig. 6 The mean contents of soil sulfur in different land use patterns

响,本次研究对比了大棚菜地、水田土壤全硫、硫酸根、氮、磷元素的垂向分布特征(图7)。研究表明,这些元素在水田土壤0~30 cm出现了一定程度的表生富集,这与农业活动关系密切。由于大棚菜地施肥量大,复种指数高,导致硫、氮等元素在表层土壤40 cm内也存在高度富集,大棚菜地元素的富集程度明显大于水田土壤,且富集深度更大。硫酸根与其他元素在土壤剖面累积特征不同,可能与土壤溶液中硫酸根浓度、土壤水活动状况、土壤质地等因素有关(朱博麟等,2010)。由此可以看出,受经济效益、农事活动等影响,不同土地利用方式下土壤硫元素及养分差异显著。

3.5 农用地土壤硫元素平衡状况评估

3.5.1 农用地土壤硫的输入

土壤中硫除继承成土母质来源外,还有外源性输入的硫,外源性输入方式有施肥(含硫化肥、有机肥)、降水、灌溉等(Chen and Sun, 2020)。

(1) 含硫化肥的硫输入

近年,石膏、硫磺、硫酸铵等高硫化肥使用量逐渐减少,但如过磷酸钙等含硫化肥在研究区使用较广泛,走访当地多处农资经营部获知,当地施用磷肥主要为普通过磷酸钙。根据前人对淮南市农田肥料投入情况研究(马玉军等,2014),2012年以后磷肥投入趋于稳定,且水稻、小麦投入的折纯 P_2O_5 分别为 77.25 kg/hm^2 、 76.65 kg/hm^2 。普通过磷酸钙中硫、 P_2O_5 含量分别约占12%、15%(黄玉安,2004),假如

研究区农田施用的 P_2O_5 均来自于普通过磷酸钙,即估算出稻麦轮种的农田含硫化肥的硫年输入为 36.20 kg/hm^2 。由于有机肥一般多施用于设施大棚用地,很少施用于大面积水田,不但施用数量难以统计,而且S含量变化较大,因而本次研究中硫投入计算并未包括有机肥中的硫。

(2) 大气中的硫沉降

大气沉降是农田生态系统获取硫元素的重要途径之一,包括大气湿沉降和干沉降。本次26个收集点数据分析结果表明,大气干沉降中硫的输入量为 0.702 kg/hm^2 ,与前人报道的宁夏石嘴山大气沉降硫输入通量相近(杨建锋等,2022)。研究区降水中的硫输入量为 9.826 kg/hm^2 ,若以地面径流占降雨量的1/2计算(刘崇群等,2000),每年进入土壤的湿沉降硫为 4.913 kg/hm^2 ,可以估算每年大气输入硫元素为 5.62 kg/hm^2 。

(3) 灌溉水的硫输入

灌溉水也是农田土壤硫的重要来源。根据研究区沟渠、河流、湖泊、坑塘采集的153件水样品分析结果,灌溉水硫平均含量为 6.02 mg/L 。由于研究区为稻麦轮种,一季一公顷水稻灌水 7500 m^3 (李娟等,2008),则每年每公顷水田输入硫元素约为 45.15 kg 。

3.5.2 农用地土壤硫的淋失

随农作物收获带走硫元素是土壤硫输出的主要形式。淋失是土壤硫元素输出的另一主要方式,当降雨量超过土壤水分蒸腾蒸发量、植物吸收及饱和

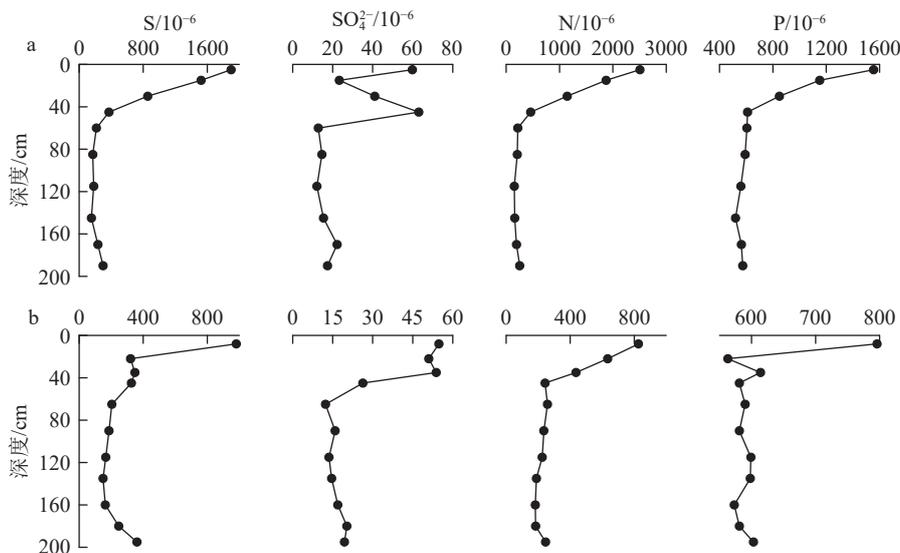


图7 大棚菜地(a)和水田(b)土壤元素垂向分布图

Fig. 7 Vertical distribution of soil elements in greenhouse lands (a) and paddy fields (b)

土壤剖面所需要水分的总和时,就会产生硫元素的淋失现象。

(1) 作物吸收的硫输出

随作物收获种类不同,带走的硫数量也有较大的差异。根据前人的研究成果(吴娜娜等, 2019; 牟文燕等, 2022),小麦、水稻籽实中 S 含量分别估算为 1.53 kg/t、0.98 kg/t,若按小麦亩产 600 kg,稻谷亩产 700 kg 估算,每年稻麦轮种以作物产出带走的硫元素为 24.06 kg/hm²。淮安市早在 2014 年就采取秸秆机械化还田措施,因此作物植株不会造成土壤硫输出损失。

(2) 淋溶和径流的硫输出

淋溶和径流也是土壤硫元素输出的主要方式(李娟等, 2008)。刘崇群等(1993)对中国南方土壤硫现状进行研究时发现,受地形地貌、降水量、土壤颗粒组成及土壤 S 含量等因素的综合影响,中国南方省份土壤硫由渗漏水淋失的量平均为 4.7 kg/hm²。根据上述农田土壤硫元素输入、损失数量,评估研究土壤硫元素平衡状况(输入量减去损失量)为 58.21 kg/hm²。由于土地利用类型不同,人类干扰程度不

同,土壤硫元素输入、输出的途径及数量等均存在差异,因此该值不能准确刻画土壤硫元素的净增量,但总体上可反映研究区土壤硫元素增加的现象。

3.6 近 15 a 来土壤硫元素演变趋势

与 2004 年多目标地球化学调查数据相比,近 15 a 来研究区农田土壤全 S 含量的变化状况如图 8 所示。土壤全硫显著下降区($\Delta S=-1353\times 10^{-6}\sim-400\times 10^{-6}$)主要分布于流均镇,这些区域地势低洼,湿地分布较广,近些年来一些湿地改造为农田,因此土壤全 S 含量下降与湿地开垦导致土壤有机质含量降低密切相关(李新华等, 2006)。土壤全硫下降区($\Delta S=-399\times 10^{-6}\sim-101\times 10^{-6}$)除分布于流均镇外,还分布于淮安城区周围。土壤全硫基本持平区($\Delta S=-100\times 10^{-6}\sim 100\times 10^{-6}$)广泛分布于研究区。土壤全硫增加区域主要分布于研究区西部及南部,其中土壤全硫显著增加区($\Delta S=681\times 10^{-6}\sim 860\times 10^{-6}$)与极显著增加区($\Delta S=861\times 10^{-6}\sim 2556\times 10^{-6}$)集中分布于黄码镇、和平镇,空间上与这些区域的设施大棚(淮安红椒种植)分布非常吻合,这与施用硫酸钾复合肥、有机肥等有关,其次还零星分布于南陈集镇、高家堰

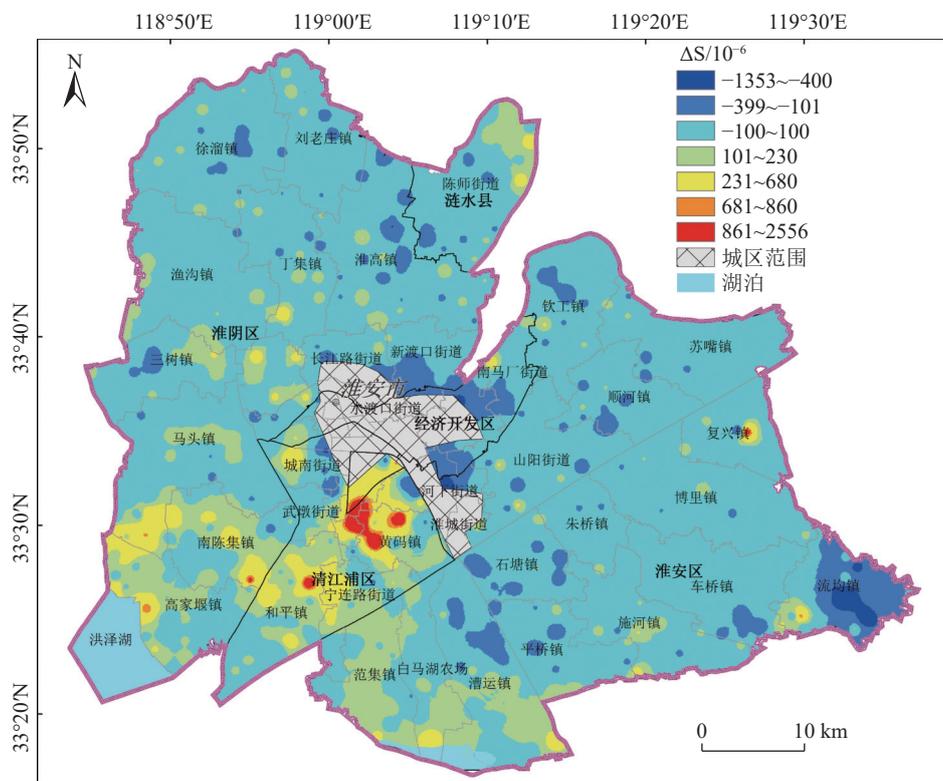


图 8 研究区农用地土壤近 15 a 硫元素变化趋势图

Fig. 8 Variation trend of sulfur in agricultural soil in the study area in the last 15 years

镇、复兴镇等地,经野外现场核实,均与设施大棚种植有关。由此可以看出,农业施肥、土地利用方式改变等因素均可以改变土壤S含量,但总体上看,近15a来研究区农用地土壤硫元素出现一定程度的增加,这与本次农用地土壤硫元素平衡状况评估结果一致。

3.7 土壤硫元素生态环境效应浅析

3.7.1 对土壤酸化的影响

土壤硫在生态系统中参与多种作用,如硫是植物必需的营养元素之一,参与蛋白质合成和酶促反应,所以可能影响植物生产和农作物产量(赵辰等,2023)。硫的不同形态对土壤的理化性质有不同影响,如pH值、氧化还原状态,进而影响微生物活动。但是硫过量可能带来环境问题,如土壤硫过量累积导致土壤酸化,会影响生态安全。为了客观反映土壤硫元素对土壤pH值的影响,本次研究筛选全区设施大棚用地土壤120件,其S含量为 $275\times 10^{-6}\sim 3328\times 10^{-6}$,平均值为 834×10^{-6} ,远高于区域土壤平均值 388×10^{-6} ,反映人为活动导致土壤硫的高度富集。相关分析结果显示,土壤S含量与pH值在 $P<0.001$ 水平上呈现极显著负相关($r=-0.627, n=120$),也佐证了土壤硫元素的增加会导致土壤pH值的降低。研究区地处湿润区,降雨充沛,土壤富集硫酸根离子会促进盐基离子淋失(雷万彬等,2024),可能会加速区域土壤酸化风险。前人研究也证实土壤硫富集区土壤出现了明显的酸化(最低pH值为4.66),成因上与设施大棚大量施用硫酸钾等肥料密切相关(李文婷等,2025)。

3.7.2 对水环境的影响

农业活动会使土壤中大量的氮磷硫等营养元素进入周围水环境,导致水体富营养化,严重时会导致鱼类和水生生物死亡,破坏水生生态环境。区域地表水S含量为1.98~158 mg/L,平均含量18.74 mg/L,明显高于地表水S含量11 mg/L(刘英俊等,1984)。从区域地表水S含量分布图(图9)不难看出,总体上市地表水S含量较低(小于20 mg/L),局地出现了硫异常高值区,尤其是黄码镇、和平镇等地,其空间分布与土壤硫异常分布范围非常吻合。表明在降雨或灌溉时,土壤中可溶性硫酸盐随地表径流进入河流,显著增加了水环境硫负荷。硫酸盐还原菌在厌氧环境中将 SO_4^{2-} 还原为 S^{2-} ,同时消耗有机物并释放磷酸盐,促进藻类爆发。此外这些土壤硫异常分布区多

为砂质土壤,土壤硫在垂直下渗过程中可能进入地下水系统。土壤硫元素对生态环境效应是一个长期、隐性作用过程,建议土壤硫富集区周围应开展水-土-生物的动态监测工作,服务于区域生态风险防控。

4 结论

(1)淮安市农用地土壤S含量为 $92.6\times 10^{-6}\sim 4004\times 10^{-6}$,平均值是全省背景值的3.5倍,变异系数达到中等变异程度,空间分布上表现为南部土壤硫高于北部,且在层次土壤上含量特征表现出表层>中层>下层,反映土壤硫受到了明显的外源性输入影响。

(2)土壤有机质含量与全S含量呈显著正相关,反映有机质是土壤全S含量的主要影响因素,而pH、CEC、粘粒含量、Fe含量等因素的影响较小。不同土壤类型全S含量顺序为沼泽土>水稻土>潮土;不同地形地貌条件下,全S含量呈现扇缘湖沼平原区>扇缘微斜平原区>扇根一扇中微斜平原区>微斜冲积平原区>废黄河故道>冲海积砂坝高地;在不同土地利用方式下,土壤全S含量顺序为水浇地>水田>园地>旱地>林地。

(3)通过估算研究区农用地土壤硫的输入量(含硫化肥施用、大气中的硫沉降、灌溉水的硫输入)和损失量(作物吸收的硫输出、淋溶和径流的硫输入),评估农用地土壤硫元素净增量为 45.43 kg/hm^2 。由于土地利用类型不同,人类干扰程度不同,土壤硫元素的输入、输出的途径及数量等均存在差异,但总体上反映了研究区土壤硫元素增加的事实。

(4)与2004年多目标地球化学调查数据相比,研究区农用地土壤全硫近15a来出现一定程度的累积,其中显著增加区域主要分布于黄码镇、和平镇等地设施大棚,与种植户大量施加硫酸钾复合肥及有机肥密切相关。

(5)土壤硫富集区已出现土壤酸化的趋势,周围水体中硫元素负荷显著增加,建议开展水-土-生物的动态监测工作,服务于区域生态风险防控。

致谢:感谢淮安市自然资源和规划局、江苏省水文地质海洋地质勘查院、山东省物化探勘查院及自然资源部南京矿产资源检测中心对本研究野外调查采样和测试工作的鼎力支持;感谢审稿专家提出宝贵的修改意见。

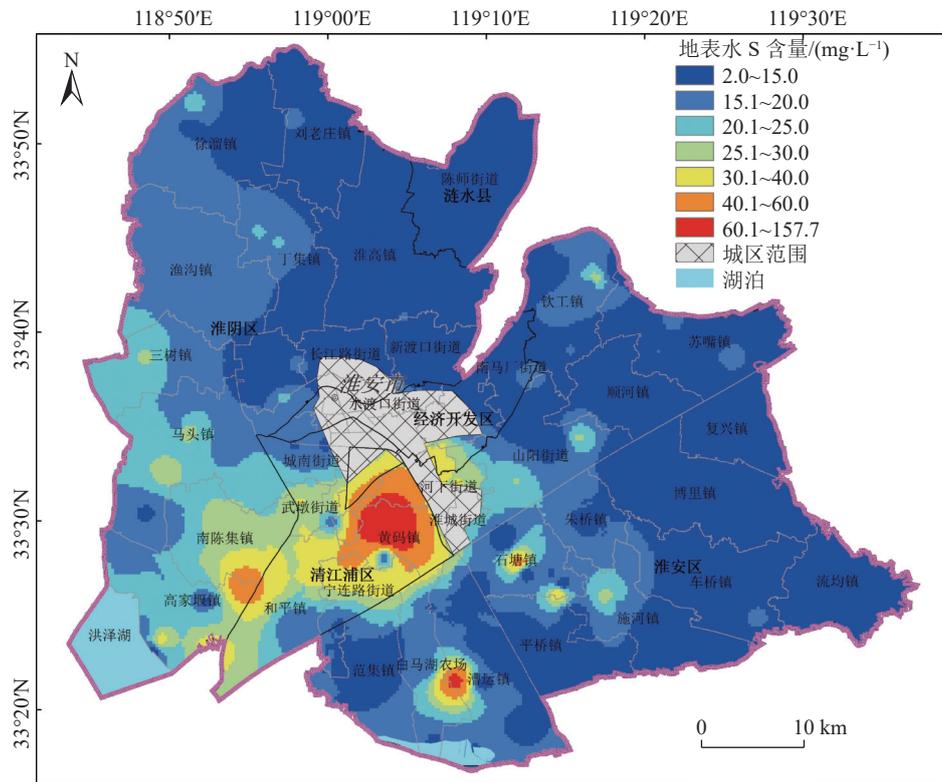


图 9 研究区地表水 S 含量分布图

Fig. 9 Distribution of sulfur content in surface water in the study area

References

- An Y L, Yin X L, Jin A F, et al. 2023. Ecological stoichiometry and spatial variation characteristics of soil nutrients in a cultivation area of Zhangjiakou city, Hebei Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(2/3): 443–459 (in Chinese with English abstract).
- Chen B B, Sun Z G. 2020. Effects of nitrogen enrichment on variations of sulfur in plant–soil system of *Suaeda salsa* in coastal marsh of the Yellow River Estuary, China[J]. *Ecological Indicators*, 109: 541–551.
- Chi Q H, Yan M C. 2007. Handbook of elemental abundance for applied geochemistry[M]. Beijing: Geological Publishing House: 92–93(in Chinese).
- Cui S, Liu S R, Wang Y, et al. 2022. Soil available sulfur content in Jilin Province and its correlation with soil organic matter and soil total nitrogen[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 55(12): 2372–2383(in Chinese with English abstract).
- Huai'an Municipal Bureau of Statistics. 2022. Huai'an municipal statistical yearbook[M]. Beijing: China Statistics Press: 56–57(in Chinese).
- Huang S S, Hua M, Jin Y, et al. 2008. Concentrations and sources of heavy metal in atmospheric dustfall in the Nanjing city, East China[J]. *Earth Science Frontiers*, 15(5): 161–166(in Chinese with English abstract).
- Huang Y A. 2004. Rapid determination of available P_2O_5 in SSP by one-step EDTA extraction[J]. *Phosphate & Compound Fertilizer*, 19(1): 70–71(in Chinese with English abstract).
- Koprivova A, Kopriva S. 2016. Sulfur metabolism and its manipulation in crops[J]. *Journal of Genetics and Genomics*, 43(11): 623–629.
- Lei W B, Lin X, Duan X X, et al. 2024. Source and migration of selenium in the soil[J]. *Journal of Jilin University(Earth Science Editon)*, 54(1): 264–278(in Chinese with English abstract).
- Li J, Lin Q, Chen Z C, et al. 2008. Sulfur balance and plentiful–lack of soil available sulfur in southeast of Fujian Province[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Sinica*, 23(supplement): 178–181(in Chinese with English abstract).
- Li L J, Qi S S, Sun L S, et al. 2003. Research progress on soil sulfur fertility and crop sulfur nutrition[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 31(2): 188–190(in Chinese with English abstract).
- Li W T, Huang S S, Xu W W, et al. 2025. Spatiotemporal variation characteristics and influencing factors of soil pH in Huai'an City[J]. *Soil and Fertilizer Sciences in China*, 1: 1–14(in Chinese with English abstract).
- Li X H, Liu J S, Sun Z G, et al. 2006. Change in soil sulfur under different land use in Sanjiang Plain[J]. *Journal of Ecology and Rural Environment*, 22(4): 80–82(in Chinese with English abstract).
- Liao Q L, Liu C, Xu Y, et al. 2011. Geochemical baseline values of elements in soil of Jiangsu Province[J]. *Geology in China*, 38(5): 1363–1378(in Chinese with English abstract).
- Liu C Q, Cao S Q, Wu X J, et al. 1993. The status of soil sulfur and demand for sulfur in China[C]//Proceedings of the international symposium on the effects of sulfur, magnesium, and trace elements on crop balance. Chengdu: Chengdu University of Science and

- Technology Press: 10–18.
- Liu C Q, Xu J X, Cao S Q, et al. 2000. Sulfur contents in rainfall and irrigation water and their effect on soil s status in Anhui, Guangdong, Jiangxi, and Sichuan Provinces[J]. *Journal of Anhui Agricultural University*, 27(supplement): 114–118(in Chinese with English abstract).
- Liu N L, Ming C Z, Ma X H, et al. 2000. Soil sulfur status and sulfur fertilizer efficiency in Hunan Province[J]. *Hunan Agricultural Sciences*, 3: 22–23,25(in Chinese with English abstract).
- Liu X X, Wan J, Ceng H. 2016. Spatial variation in surface soil sulfur in the temperate grasslands of China and environmental constraints[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 36(24): 7919–7928(in Chinese with English abstract).
- Liu Y J, Cao L M, Li Z L, et al. 1984. *Element geochemistry*[M]. Beijing: Science Press: 457(in Chinese).
- Luo M L, Dou T Y, Xiang Q J, et al. 2019. Distribution characteristics and influencing factors of soil sulphur in Chongqing farmlands[J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 36(3): 287–297(in Chinese with English abstract).
- Luo S, Zhang D M, Lu D B, et al. 2021. Evaluation of trace elements abundance and deficiency in cultivated soil and its influencing factors in Bijie City of Wumeng Mountain[J]. *Geological Bulletin of China*, 40(9): 1570–1583(in Chinese with English abstract).
- Lv H C, Xue S G, Fang Z W, et al. 2004. Influence of different land use patterns upon nitrogen and phosphorus loss in the Qiandaohu drainage area[J]. *Geology in China*, 31(supplement): 112–117(in Chinese with English abstract).
- Ma Y J, Ni Y C, Yang Y Z, et al. 2014. Analysis on fertilizer input and nutrient balance of farmland in Huai'an City[J]. *Modern Agricultural Sciences and Technology*, 1: 229–236(in Chinese).
- Mao L, Sun Z G, Li Y Q, et al. 2023. Spatial distribution of inorganic sulfur and its key influencing factors in wetland sediments in Fuzhou reach of the Min River[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 43(4): 467–477(in Chinese with English abstract).
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2016. *Specification of land quality geochemical assessment(DZ/T 0295–2016)*[S]. Beijing: Geological Publishing House: 43(in Chinese).
- Ministry of Natural Resources of the People's Republic of China. 2015. *Specification of geochemical reconnaissance survey(1 : 50000): DZ/T 0011—2015*[S]. Beijing: Geological Publishing House: 14–16(in Chinese).
- Mu W Y, Chu H X, Huang N, et al. 2022. Relationship between grain yield and sulfur requirement characteristics of wheat cultivars (lines) in main wheat production regions of China[J]. *Acta Agronomica Sinica*, 48(12): 3192–3202(in Chinese with English abstract).
- Sha C, Wang M L, Jiang Y L, et al. 2018. Interactions between pH and other physicochemical properties of mangrove sediments: A review[J]. *China Sciental Bulletin*, 63(26): 2745–2756(in Chinese with English abstract).
- Sun A, Duan B H, Wang F, et al. 2022. Geochemical distributions and influencing factors of soil elements in Xianfeng county, Western Hubei Province, China[J]. *Soils*, 54(3): 637–645(in Chinese with English abstract).
- Teng X F. 2000. Composition of soil sulfur and its availability to plants[D]. Master Thesis of Northeast Agricultural University: 26–33(in Chinese with English abstract).
- Wang F, Zhu Y J, Lu L. 2007. Sulfur in soil and its transformation[J]. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 23(5): 249–253(in Chinese with English abstract).
- Wang L H. 2011. Effect of potassium sulfate compound fertilizer on plastic house hot pepper in Huai'an[J]. *Journal of Changjiang Vegetables*, 12: 49–50(in Chinese with English abstract).
- Wei X R, Shao M A, Gao J L, et al. 2008. Relationships between soil organic carbon and environmental factors in gully watershed of the loess plateau[J]. *Environmental Science*, 29(10): 2879–2884(in Chinese with English abstract).
- Wu N N, Ma Z Q, Tan B, et al. 2019. Research progress of nutrient content, flour properties, cooking and sensory quality of rice with different milling degree[J]. *Science and Technology of Cereals, Oils and Foods*, 27(6): 40–45(in Chinese with English abstract).
- Xiao H J. 2003. Study on soil sulfur status and crop response to sulfur fertilization in Guizhou[D]. Master Thesis of Southwest Agricultural University: 15–21(in Chinese with English abstract).
- Yang J F, Wei L X, Shi T C, et al. 2022. Geochemical characteristics and source analysis of soil sulfur in Shizuishan area[J]. *Journal of Ningxia University(Natural Science Edition)*, 3(1): 85–89(in Chinese with English abstract).
- Yang Z F. 2009. Research on the Current Status of Sulfur Content in Agricultural Soil in Mile, Southeast Yunnan[J]. *Tillage and Cultivation*, 5: 35–36(in Chinese).
- Zhang Y, Xie W X, Dun Y H, et al. 2016. Rearch advances in distribution characteristics and influence mechanism of the wetland soil surflur[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 47(3): 763–767(in Chinese with English abstract).
- Zhang Z X, Xu M X, Shi C D, et al. 2014. Scaling effect on spatial variability of soil organic carbon in different geomorphic units on the loess hilly region[J]. *Journal of Natural Resources*, 29(7): 1173–1182(in Chinese with English abstract).
- Zhao C, Sun B B, Zhou G H, et al. 2023. Investigation on the characteristics nutrient content and prediction of available nutrients content in soil of Longhai, Fujian Province[J]. *Geological Bulletin of China*, 42(10): 1784–1791(in Chinese with English abstract).
- Zhao K L, Fu W J, Ye Z Q, et al. 2016. Spatial variation of soil heavy metals in an E-waste dismantling area and their distribution characteristics[J]. *Environmental Science*, 37(8): 3151–3159(in Chinese with English abstract).
- Zheng S Z, Liu Z L. 2015. Advances on the availability of sulfur fertilizers for soil quality and biology[J]. *Journal of Shangdong Agricultural University (Natural Science Edition)*, 46(5): 688–693(in Chinese with English abstract).
- Zhu B L, Li X Q, Liu N, et al. 2010. Migration behavior of sulfate irons in aquitard[J]. *Global Geology*, 29(4): 658–662(in Chinese with English abstract).

附中文参考文献

安永龙, 殷秀兰, 金爱芳, 等. 2023. 河北张家口市某种植区土壤营养元

- 素生态化学计量与空间分异特征[J]. *地质通报*, 42(2/3): 443-459.
- 迟清华, 鄢明才. 2007. 应用地球化学元素丰度数据手册[M]. 北京: 地质出版社: 92-93.
- 崔帅, 刘烁然, 王寅, 等. 2022. 吉林省旱地土壤有效硫含量及其与土壤有机质和全氮的关系[J]. *中国农业科学*, 55(12): 2372-2383.
- 淮安市统计局. 2022. 淮安统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社: 56-57.
- 黄顺生, 华明, 金洋, 等. 2008. 南京市大气降尘重金属含量特征及来源研究[J]. *地学前缘*, 15(5): 161-166.
- 黄玉安. 2004. EDTA 一步提取法快速测定过磷酸钙中有效五氧化二磷含量[J]. *磷肥与复肥*, 19(1): 70-71.
- 江苏省地质调查研究院. 2007. 江苏省 1 : 250 000 多目标区域地球化学调查报告[R].
- 江苏省地质调查研究院. 2021. 淮安城市地质调查报告[R].
- 雷万彬, 林鑫, 段星星, 等. 2024. 土壤中硒元素来源和迁移作用研究现状[J]. *吉林大学学报(地球科学版)*, 54(1): 264-278.
- 李娟, 林琼, 陈子聪, 等. 2008. 闽东南耕地土壤硫素平衡及有效硫丰缺状况研究[J]. *华北农学报*, 23(增刊): 178-181.
- 李录久, 戚士胜, 孙礼胜, 等. 2003. 土壤硫肥力与作物硫营养研究进展[J]. *安徽农业科学*, 31(2): 188-190.
- 李文婷, 黄顺生, 许伟伟, 等. 2025. 淮安市土壤 pH 时空变化特征及影响因素[J]. *中国土壤与肥料*, 1: 1-14.
- 李新华, 刘景双, 孙志高, 等. 2006. 三江平原不同土地利用方式下土壤硫含量变化特征[J]. *生态与农村环境学报*, 22(4): 80-82.
- 廖启林, 刘聪, 许艳, 等. 2011. 江苏省土壤元素地球化学基准值[J]. *中国地质*, 38(5): 1363-1378.
- 刘崇群, 曹淑卿, 吴锡军, 等. 1993. 中国土壤硫素状况和对硫的需求[C]//硫、镁和微量元素在作物影响平衡中的作用国际学术研讨会论文集. 成都: 成都科技大学出版社: 10-18.
- 刘崇群, 徐俊祥, 曹淑卿, 等. 2000. 南方某些省份降水和灌溉水的含硫量及其对土壤供硫的影响[J]. *安徽农业大学学报*, 27(增刊): 114-118.
- 刘念龙, 明承州, 马晓华, 等. 2000. 湖南省土壤硫素状况及硫肥肥效[J]. *湖南农业科学*, 3: 22-23, 25.
- 刘潇潇, 王钧, 曾辉. 2016. 中国温带草地土壤硫的分布特征及其与环境因子的关系[J]. *生态学报*, 36(24): 7919-7928.
- 刘英俊, 曹励明, 李兆麟, 等. 1984. 元素地球化学[M]. 北京: 科学出版社: 457.
- 罗曼琳, 窦添元, 向秋洁, 等. 2019. 重庆农田土壤硫分布特征及其影响因素[J]. *农业资源与环境学报*, 36(3): 287-297.
- 骆珊, 张德明, 卢定彪, 等. 2021. 乌蒙山毕节市耕地土壤微量元素丰缺评价及其影响因素[J]. *地质通报*, 40(9): 1570-1583.
- 吕唤春, 薛生国, 方志文, 等. 2004. 千岛湖流域不同土地利用方式对氮和磷流失的影响[J]. *中国地质*, 31(增刊): 112-117.
- 马玉军, 倪言成, 杨用钊, 等. 2014. 淮安市农田肥料投入与养分平衡分析[J]. *现代农业科技*, 1: 229-236.
- 毛立, 孙志高, 李亚勤, 等. 2023. 闽江福州段湿地沉积物无机硫沿程分布特征及其影响因素[J]. *环境科学学报*, 43(4): 467-477.
- 牟文燕, 褚宏欣, 黄宁, 等. 2022. 中国主要麦区小麦品种(系)产量与需硫特征关系分析[J]. *作物学报*, 48(12): 3192-3202.
- 沙聪, 王木兰, 姜玥璐, 等. 2018. 红树林土壤 pH 和其他土壤理化性质之间的相互作用[J]. *科学通报*, 63(26): 2745-2756.
- 孙奥, 段碧辉, 王芳, 等. 2022. 鄂西咸丰地区土壤元素地球化学分布及其影响因素[J]. *土壤*, 54(3): 637-645.
- 滕险峰. 2000. 土壤中硫的组成及其对植物的有效性研究[D]. 东北农业大学硕士学位论文: 26-33.
- 王凡, 朱云集, 路玲. 2007. 土壤中的硫素及其转化研究综述[J]. *中国农学通报*, 23(5): 249-253.
- 王立华. 2011. 硫酸钾复合肥对淮安大棚辣椒产量的影响[J]. *长江蔬菜*, 12: 49-50.
- 魏孝荣, 邵明安, 高建伦, 等. 2008. 黄土高原沟壑区小流域土壤有机碳与环境因素的关系[J]. *环境科学*, 29(10): 2879-2884.
- 吴娜娜, 马占倩, 谭斌, 等. 2019. 不同加工精度稻米的营养物质含量、米粉特性及米饭品质研究进展[J]. *粮油食品科技*, 27(6): 40-45.
- 肖厚军. 2003. 贵州主要耕地土壤硫素状况及硫肥效应研究[D]. 西南农业大学硕士学位论文: 15-21.
- 杨建锋, 魏丽馨, 石天池, 等. 2022. 宁夏石嘴山地区土壤中硫的地球化学特征及其来源分析[J]. *宁夏大学学报(自然科学版)*, 3(1): 85-89.
- 杨宗飞. 2009. 滇东南弥勒农业土壤 S 含量现状研究[J]. *耕作与栽培*, 5: 35-36.
- 张艳, 谢文霞, 杜云鸿, 等. 2016. 湿地土壤硫分布及其影响机制研究进展[J]. *土壤通报*, 47(3): 763-767.
- 张志霞, 许明祥, 师晨迪, 等. 2014. 黄土丘陵区不同地貌单元土壤有机碳空间变异的尺度效应[J]. *自然资源学报*, 29(7): 1173-1182.
- 赵辰, 孙彬彬, 周国华, 等. 2023. 福建龙海市土壤营养元素全量特征及有效量预测[J]. *地质通报*, 42(10): 1784-1791.
- 赵科理, 傅伟军, 叶正钱, 等. 2016. 电子垃圾拆解区土壤重金属空间异质性及分布特征[J]. *环境科学*, 37(8): 3151-3159.
- 郑诗樟, 刘志良. 2015. 硫肥对土壤质量和生物有效性的研究进展[J]. *山东农业大学学报(自然科学版)*, 46(5): 688-693.
- 中国地质调查局. 2005. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)(DD2005-03)[S]. 北京: 中国标准出版社: 5-30.
- 中国地质调查局. 2014. 多目标区域地球化学调查规范(1 : 250 000)(DZ/T 0258-2014)[S]. 北京: 中国标准出版社: 3-15.
- 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 2016. 耕地质量等级(GB/T 33469-2016)[S]. 北京: 中国标准出版社: 28-44.
- 中华人民共和国国土资源部. 2015. 地球化学普查规范(1 : 50 000): DZ/T 0011-2015[S]. 北京: 中国地质出版社: 14-16.
- 中华人民共和国国土资源部. 2016. 土地质量地球化学评价规范(DZ/T 0295-2016)[S]. 北京: 地质出版社: 43.
- 朱博麟, 李绪谦, 刘娜, 等. 2010. 硫酸根离子在弱透水层中的迁移行为[J]. *世界地质*, 29(4): 658-662.