

方知库
Eco-Environmental
Knowledge Web

环境科学

ENVIRONMENTAL SCIENCE

ISSN 0250-3301 CODEN HCKHDV
HUANJING KEXUE

PM_{2.5}污染对我国健康负担和经济损失的影响

李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕

PM_{2.5}

• 中风

PM_{2.5}控制目标
健康经济效益

• 冠心病

• 呼吸系统疾病

■ 主办 中国科学院生态环境研究中心

■ 出版 科学出版社



2021年4月

第42卷 第4期
Vol.42 No.4

目次

京津冀及周边地区秋冬季大气污染物排放变化因素解析	唐倩, 郑博, 薛文博, 张强, 雷宇, 贺克斌 (1591)
珠江三角洲大气光化学氧化剂(O_3)与 $PM_{2.5}$ 复合超标污染特征及气象影响因素	颜丰华, 陈伟华, 常鸣, 王伟文, 刘永林, 钟部卿, 毛敬英, 杨士士, 王雪梅, 刘焯芳 (1600)
广州市臭氧污染溯源: 基于拉格朗日光化学轨迹模型的案例分析	裴成磊, 牟江山, 张英南, 申恒青, 陈玉茹, 黄杰生, 丁浩然, 李成柳 (1615)
运城秋冬季大气细粒子化学组成特征及来源解析	赵清, 李杏茹, 王国选, 张兰, 杨阳, 刘永桥, 孙宁宁, 黄禹, 雷文凯, 刘新罡 (1626)
降雪后24 h内大气中多环芳烃的变化规律	范慧泽, 祝富杰, 胡鹏持, 马万里 (1636)
道路扬尘中 $PM_{2.5}$ 粒度乘数的测定方法及特征	李冬, 陈建华, 张月帆, 高忠阳, 高健, 张凯, 竹双 (1642)
铸造行业挥发性有机物排放成分谱及影响	高爽, 李时蓓, 伯鑫, 李厚宇, 舒木水, 谈默, 屈加豹, 雷团团 (1649)
燃煤电厂和垃圾焚烧电厂燃烧产物中卤代多环芳烃的赋存特征和毒性风险	倪秀峰, 王儒威, 蔡飞旋, 蔡家伟 (1660)
兰州市春季微生物气溶胶浓度、粒径及细菌群落结构分布特性	赵炜, 李杰, 谢慧娜, 张莉红, 王亚娥 (1668)
大气污染排放格局优化方法及案例	李敏辉, 廖程浩, 常树诚, 张永波, 杨柳林, 曾武涛 (1679)
$PM_{2.5}$ 污染对我国健康负担和经济损失的影响	李勇, 廖琴, 赵秀阁, 白云, 陶燕 (1688)
基于多同位素的不同土地利用区域水体硝酸盐源解析	金赞芳, 胡晶, 吴爱静, 李光耀, 张文辽, 李非里 (1696)
新疆叶尔羌河流域地表水水化学特征及控制因素	张杰, 周金龙, 曾妍妍, 涂治, 纪媛媛, 孙英, 雷米 (1706)
漓江流域水体中重金属污染特征及健康风险评价	黄宏伟, 肖河, 王敦球, 席北斗, 孙晓杰, 李洁月, 李向奎 (1714)
近20年来鄱阳湖流域泛滥平原沉积物微量元素含量与污染变化	李括, 杨柯, 彭敏, 刘飞, 杨峥, 赵传冬, 成杭新 (1724)
汾河流域浅层地下水水化学和氢氧稳定同位素特征及其指示意义	刘鑫, 向伟, 司炳成 (1739)
会仙岩溶湿地地下水主要离子特征及成因分析	李军, 邹胜章, 赵一, 赵瑞科, 党志文, 潘民强, 朱丹尼, 周长松 (1750)
贵州威宁草海流域地下水水化学特征及无机碳通量估算	曹星星, 吴攀, 杨诗笛, 刘闪, 廖家豪 (1761)
辽宁典型海域表层海水中在用化学农药浓度水平与潜在生态风险	杜静, 胡超魁, 解怀君, 田甲申, 李爱, 谢晴, 吴金浩, 宋伦 (1772)
辽河流域土壤中微(中)塑料的丰度、特征及潜在来源	韩丽花, 徐笠, 李巧玲, 陆安祥, 殷敬伟, 田佳宇 (1781)
津冀辽地区典型湖库沉积物PAHs污染特征及来源解析	吴鹏, 鲁逸人, 李慧, 郑天娇子, 程云轩, 焦立新 (1791)
环太湖河流及湖体中有有机磷酸酯的污染特征和风险评价	张文萍, 张振飞, 郭昌胜, 吕佳佩, 邓洋慧, 张恒, 徐建 (1801)
太湖表层水体典型抗生素时空分布和生态风险评价	丁剑楠, 刘舒娇, 邹杰明, 石溪哲, 邹华, 史红星 (1811)
淮河流域南四湖可挥发性有机物污染特征及风险评价	程云轩, 高秋生, 李捷, 李慧, 吴鹏, 焦立新 (1820)
三亚河沉积物PAHs和PCBs的分布、来源及风险评价	詹咏, 韦婷婷, 叶汇彬, 董滨, 张领军, 黄远东 (1830)
三峡库区非点源污染氮磷负荷时空变化及其来源解析	李明龙, 贾梦丹, 孙天成, 褚琳, 李朝霞 (1839)
反硝化细菌、硝酸钙和锆改性沸石联用对底泥中氮磷迁移转化的影响及硝态氮释放风险评估	辛慧敏, 李建伟, 詹艳慧 (1847)
锁磷剂联合好氧反硝化菌修复富营养化水体	李炳堂, 周志勤, Ravi Naidu, 胡智泉, 郭大滨, 陈嘉鑫 (1861)
太湖蓝藻胞内有机质的微生物降解	张巧颖, 孙伟, 杜瑛珣, 巩小丽 (1870)
青藏高原拉萨河流域附石藻类群落结构特征及其驱动因子分析	魏俊伟, 李鸿然, 汪兴中, 齐文华, 汪洋, 赵彬洁, 谭香, 张全发 (1879)
基于EEMs与UV-vis分析苏州汛期景观河道中DOM光谱特性与来源	何杰, 朱学惠, 魏彬, 李学艳, 汤如涛, 林欣, 周飞, 司壮壮 (1889)
老化前后轮胎磨损微粒与聚氯乙烯微粒对抗生素的吸附-解吸行为	范秀磊, 邹峰峰, 刘加强, 李莹, 刘强, 侯俊 (1901)
磁性铁基改性生物炭去除水中氨氮	王芳君, 桑倩倩, 邓颖, 赵元添, 杨娅, 陈永志, 马娟 (1913)
城市污水处理厂进水氨氧化菌对活性污泥系统的季节性影响	于莉芳, 汪宇, 滑思思, 李韧, 张兴秀, 惠晓飞 (1923)
基于粒径分化的厌氧氨氧化污泥性能与微生物多样性分析	王晓瞳, 杨宏 (1930)
ClO_2 消毒工艺对污水处理厂出水超级耐药基因的影响	程春燕, 李海北, 梁永兵, 师丹阳, 陈郑珊, 杨栋, 焦巧瑞, 邵一帆, 李君文, 金敏 (1939)
微塑料PES与2,4-DCP复合污染对厌氧污泥胞外聚合物与微生物群落的影响	林旭萌, 宿程远, 吴淑敏, 黄嫒, 邓雪, 林香凤, 黄尊, 魏佳林 (1946)
城镇污水处理厂污泥泥质监测及资源化风险评价	李娟, 李金香, 杨妍妍 (1956)
气候变暖对冻结期黑土碳氮循环关键过程及指标的影响	王子龙, 刘传兴, 姜秋香, 李世强, 柴迅 (1967)
沼液秸秆联用对滨海围垦田土壤重金属迁移及形态变化的影响	王伟, 周珺楠, 汤逸帆, 申建华, 韩建刚 (1979)
地块尺度城市土地质量地球化学调查方法: 以雄安新区起步区为例	周亚龙, 郭志娟, 刘飞, 韩伟, 孔牧, 赵传冬, 刘爱涛, 彭敏, 王乔林, 王成文 (1989)
雄安新区农田土壤-农作物系统重金属潜在生态风险评估及其源解析	周亚龙, 杨志斌, 王乔林, 王成文, 刘飞, 宋云涛, 郭志娟 (2003)
地质背景农田土壤下不同水稻品种对Cd的累积特征及影响因素	代子雯, 方成, 孙斌, 魏志敏, 胡锋, 李辉信, 徐莉 (2016)
不同外源硒对镉污染土壤中小白菜生长及镉吸收的影响	刘杨, 齐明星, 王敏, 刘娜娜, Pornpimol Kleawsampanjai, 周菲, 翟辉, 王梦柯, 任蕊, 梁东丽 (2024)
影响不同农作物镉富集系数的土壤因素	陈洁, 王娟, 王怡雯, 姚启星, 苏德纯 (2031)
Cd胁迫下不同外源植物激素对水稻幼苗抗氧化系统及Cd吸收积累的影响	张盛楠, 黄益宗, 李颜, 保琼莉, 黄永春 (2040)
不同有机物料对水稻根表铁膜及砷镉吸收转运的影响	李开叶, 赵婷婷, 陈佳, 赵秀兰 (2047)
铜尾矿坝及其周边土壤真菌群落结构与功能多样性	陈建文, 张红, 李君剑, 刘勇 (2056)
微生物群落驱动AM真菌、生物炭及联合改良沙化土壤作用潜力	张哲超, 杨久扬, 郝百惠, 郝利君, 罗俊清, 李雪, 刁风伟, 张璟霞, 郭伟 (2066)
动物粪便施肥措施促进耐药基因在粪便-土壤-蔬菜之间的散播	张红娜, 董梦洁, 周玉法, 孙佳欣, 常美洁, 翟真真 (2080)
区域水生态文明建设绩效评价及障碍诊断模型的建立与应用	万炳彤, 鲍学英, 赵建昌, 李爱春 (2089)
《环境科学》征订启事(1738) 《环境科学》征稿简则(1790) 信息(1860, 1878, 1900)	

地块尺度城市土地质量地球化学调查方法:以雄安新区起步区为例

周亚龙^{1,2,3}, 郭志娟^{1,2,3*}, 刘飞^{1,2,3}, 韩伟^{1,2,3}, 孔牧^{1,2,3}, 赵传冬^{1,2,3}, 刘爱涛⁴, 彭敏^{1,2,3*}, 王乔林^{1,2,3}, 王成文^{1,2,3}

(1. 中国地质科学院地球物理地球化学勘查研究所, 廊坊 065000; 2. 中国地质调查局土地质量地球化学调查评价研究中心, 廊坊 065000; 3. 中国地质科学院地球表层碳-汞地球化学循环重点实验室, 廊坊 065000; 4. 河北省地质调查院, 石家庄 050081)

摘要: 以土地质量地球化学调查评价成果服务于城市土地资源精准管护为目标, 选择中国城镇化探路者的雄安新区起步区为研究对象, 采用差异化分类布设样点, 开展不同采样密度条件下地块尺度土壤元素空间插值精度、地块(图斑)插值精度和地球化学预测评价等级准确度的定量评估研究。结果表明: ①采用差异化分类布设样点方法使平面上随机分布的区域地球化学量变值在每一个地块(图斑)都有明确的量值反映, 能满足城市土地资源精准管护对单一地块(图斑)具有质量属性的基本需求; ②研究区土壤元素指标空间变异性以轻中度为主; 其中 Hg、Pb、Cd、Cu、Zn、N、P 和 Se 受人类生产活动影响, 具有较高的空间变异性; ③相同采样密度条件下, 元素含量空间变异性越大, 其空间插值精度和图斑插值精度越低; 同一种元素插值精度受采样密度的影响, 但采样密度的增大并不一定能够识别土壤元素含量的结构性连续组分; 区内土壤环境本底清洁, 重金属含量低于 GB15618-2018 标准, 其插值评价等级和实测评价等级结果基本一致; 养分指标 N、P 和 K 含量区间变化大, 受人为扰动和空间变异性等因素影响, 其预测等级和实测等级差异较大; ④采用 16 点·km⁻² 的采样密度开展地块尺度城市土地质量地球化学调查评价可以满足研究区及类似地区城市土地资源精准管控的需求。

关键词: 土地质量; 地球化学调查; 地块尺度; 空间变异性; 采样密度; 雄安新区

中图分类号: X53 文献标识码: A 文章编号: 0250-3301(2021)04-1989-14 DOI: 10.13227/j.hjxx.202008133

Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District

ZHOU Ya-long^{1,2,3}, GUO Zhi-juan^{1,2,3*}, LIU Fei^{1,2,3}, HANG Wei^{1,2,3}, KONG Mu^{1,2,3}, ZHAO Chuan-dong^{1,2,3}, LIU Ai-tao⁴, PENG Min^{1,2,3*}, WANG Qiao-lin^{1,2,3}, WANG Cheng-wen^{1,2,3}

(1. Institute of Geophysical & Geochemical Exploration, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 2. Research Center of Geochemical Survey and Assessment on Land Quality, China Geological Survey, Langfang 065000, China; 3. Key Laboratory of Geochemical Cycling of Carbon and Mercury in the Earth's Critical Zone, Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 065000, China; 4. Geological Survey Institution of Hebei Province, Shijiazhuang 050081, China)

Abstract: In order to evaluate the land quality geochemical survey achievement in the service of the accurate management of urban land resources, the initial area of the Xiong'an New District as urbanization pathfinder in China is chosen as the research subject. The sample points were set by differential classification, and the spatial interpolation accuracy of the soil elements at a plot scale and a quantitative assessment of the consistency of the land plot (pattern spot) prediction evaluation were studied under the conditions of different sampling densities. The regional geochemical variation values randomly distributed on the plane can be reflected quantitatively by differential classification sampling, which can meet the basic demand of the quality attribute of a single plot (map spot) by the accurate management of urban land resources. The spatial variability of soil elements is mostly middle to moderate, and Cd, Cu, Pb, Hg, Se, N, P, and other elements of high spatial variability are affected by human industrial and agricultural production activities. Under the same sampling density, the larger the element variation coefficient, the worse the spatial interpolation accuracy. Although the interpolation accuracy of the same element index is affected by the sampling density, the increase in the sampling density could not identify the continuous component on the structure of the soil element content. The soil environment is clean, and the heavy metal content is lower than the GB15618-2018 standard. The interpolation results are basically consistent with the grading results of the measured values, while the contents of N, P, and K of the nutrient indices vary greatly, and the predicted and measured geochemical grades of the plots (map spot) differ substantially under the influence of factors such as human disturbance and spatial variability. The quantitative evaluation of the six different sampling densities indicates that the 16 points·km⁻² sampling density adopted in the geochemical survey and evaluation of urban land quality can satisfy the needs of an accurate control of urban land resources in the study

收稿日期: 2020-08-13; 修订日期: 2020-09-15

基金项目: 中国地质调查局地调项目(DD20189123, DD20190527)

作者简介: 周亚龙(1984~), 男, 硕士, 高级工程师, 主要研究方向为地球化学勘查, E-mail: zyalong@mail.cgs.gov.cn

* 通信作者, E-mail: gzhjuan@mail.cgs.gov.cn; pmin@mail.cgs.gov.cn

area and similar areas. The research can provide key technologies to support and serve the accurate management of urban land resources for geochemical surveys and the evaluation of land quality in land parcel scale cities.

Key words: land quality; geochemical survey; land parcel scale; spatial variability; sampling density; Xiong'an New District

土壤是人类赖以生存和文明建设的重要自然资源,是人类生存栖息之地^[1~3].随着新型城镇化和生态文明建设的推进,在城市规划、建设和运行管理时,土壤质量现状越来越受到关注.近20年来,土地质量地球化学调查评价在服务土地资源管理^[4~7]和土壤污染防治^[8~10]等方面发挥了巨大作用.然而,目前已开展的土地质量地球化学调查评价工作精度(以1:25万和1:5万比例尺为主)难以满足城市地块尺度土地资源精细化管理的需求^[11~13].因此,实施地块(图斑)尺度城市土地质量地球化学调查,构建地块(图斑)精度的土地质量数据库,是促使城市土地质量地球化学调查评价成果应用直接与城市规划、建设和运行管理工作对接,实现土地资源科学、高效和精细管护的必然要求.

客观上地球化学调查采样点数受条件限制,采集的土壤样品在区域上呈现不均匀分布,地块(图斑)内的采样点数与评价地块(图斑)数不相等,通常采样点数少于评价地块(图斑)数(局部亦有一个地块(图斑)有数个采样点对应的情况),总会留下一些空白地块(图斑).因此,在调查成本受限,如何确定科学合理的地球化学调查精度,构建地块(图斑)精度的土地质量数据库满足城市土地资源精细化管理需求,以及在确保调查精度的前提下,地块(图斑)精准赋值成为研究的关键问题^[14].

本文选择作为中国城镇化探路者的雄安新区起步区为研究对象,基于研究区土地质量地球化学调查元素指标含量的空间变异性,定量评估不同调查精度数据条件下地块(图斑)的空间插值精确度以及地块(图斑)地球化学评价等级的准确度,探讨满足研究区土地资源精细化管理需求的地块尺度城市土地质量地球化学调查所需的科学合理的采样密度,以期类似城市土地质量地球化学调查提供技术支持.

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于华北平原的河北省雄安新区起步区(图1),地处北京、天津和保定腹地,地理坐标北纬38°41'~39°10',东经115°37'~116°19'之间.雄安新区属暖温带大陆性半湿润季风型气候^[15],区内以农田生态系统为主,地势相对平坦.以低海拔平原和洼地地貌为主,容城-雄县北侧为近代河流冲积(洪积)层或扇前洼地堆积物形成的冲(湖)积微倾斜平原;南侧为由近代河流冲积(湖沼沉积)形成冲(湖)积低平原^[16].研究区以冲洪积、冲湖积和冲积为主的第四系地层覆盖,主要由砂、黏土和砾石组成,厚348~437 m^[17].区内土壤类型相对单一,主要为潮土.研究区存在大量的废旧有色金属回收、电解、线缆加工和精密

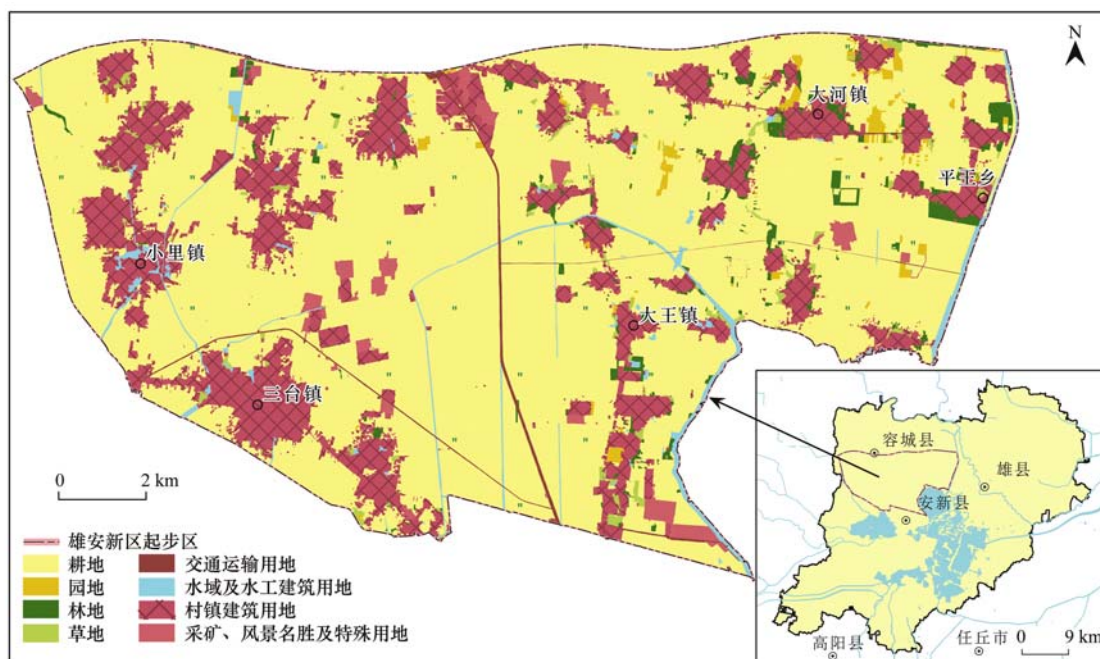


图1 雄安新区起步区地理位置及其土地利用类型

Fig. 1 Geographical location map of the initial area of the Xiong'an New District

仪器制造等中小企业,其人类生产活动可能对区内土壤环境存在一定的影响。

雄安新区起步区调查面积 192 km²,耕地面积占调查区面积比例 69.92%,耕地图斑数1 951个,每 4 km² 面积内的平均图斑数为 58 个;对单个图斑而言,最大图斑面积 5.45 E - 1 km²,最小图斑面积 1.31E - 5 km²,图斑中位数面积 4.46E - 2 km²,图斑平均面积 6.88E - 2 km². 研究区建设用地面积 37.45 km²,占比 19.51%,图斑数1 508个,每 4 km² 面积内的平均图斑数 161 个;最大图斑面积 1.21 km²,最小图斑面积 1.00E - 5 km²,图斑中位数面积 1.69E - 3 km²,图斑平均面积 2.48E - 2 km². 由此不难看出,目前已有的 1:25 万和 1:5 万调查精度均不能保证不同用地类型单一地块(图斑)具有质量属性,无法满足雄安新区土地资源精细化管理的需求。

1.2 调查方法

与以往以等密度采样为基础,按比例尺进行的地球化学调查不同,雄安新区起步区土地质量地球化学调查以城市土地利用规划编制对地块(图斑)附有地球化学质量属性的需求为目标,基于起步区地块(图斑)的统计分析数据,针对起步区不同土地利用类型,采用差异化方式,分类布设样点^[4]. 在综合考虑新区城市土地利用规划编制需求、样品代表性和调查成本的基础上,因调查区各类土地利用类型地块图斑面积中位数为 1.69E - 3 km²,本调查采样点布设时,对各类土地利用类型图斑面积小于 2.00E - 3 km² 的地块,均不布设样点. 耕地图斑个数中位数面积为 4.46E - 2 km²,因此耕地区采样点布设时,当 2.00E - 3 km² ≤ 耕地图斑面积 < 3.33E

- 2 km² 时,只布设一个样点,当耕地图斑面积 ≥ 3.33E - 2 km² 时,布设样点密度为图斑面积/3.33E - 2 km². 园地、草地和建设用地三者的图斑个数中位数面积介于 7.81E - 3 ~ 8.93E - 3 km² 之间,当 2.00E - 3 km² ≤ 图斑面积 < 6.67E - 3 km² 时,也只布设一个样点,当图斑面积 ≥ 6.67E - 3 km² 时,布设样点密度为图斑面积/6.67E - 3 km²,但单一地块(图斑)布设最大样点数为 10 个;对林地和草地而言,当 2.00E - 3 km² ≤ 图斑面积 < 6.67E - 3 km² 时,布设一个样点,当图斑面积 ≥ 6.67E - 3 km² 时,布设样点密度为图斑面积/6.67E - 3 km²,但单一地块布设最大样点数为 5 个。

差异化布设样点使平面上随机分布的区域地球化学量变值在每一个面积大于 2.00E - 3 km² 的图斑都有明确的量值反映,满足了土地利用规划编制对单一地块图斑附有质量属性的需求。

1.3 样品采集及测试

调查区面积 192 km²,总共采集表层土壤样品 7 278件. 样品采集深度 0 ~ 20 cm,采集样品质量大于 1 kg. 样品在自然条件下风干后,样品采集和初加工严格按照文献[18]的相关要求进行. 分析测试时参照文献[19,20]要求根据不同分析指标过不同粒级样筛. 测试指标:砷(As)、镉(Cd)、铬(Cr)、铜(Cu)、汞(Hg)、铅(Pb)、锌(Zn)、氮(N)、磷(P)、钾(K)、有机质(SOM)、硒(Se)、锆(Ge)、氟(F)、碘(I)和酸碱度(pH)等. 样品分析测试工作由具有国家级资质认证和多目标地球化学样品测试分析资质的河南省岩石矿物测试中心按照文献[19,20]完成. 各指标分析测试配套方法和检出限见表1,对样

表 1 土壤样品地球化学指标配套分析方法和检出限及合格率¹⁾
Table 1 Instrumental methods and detection limit for soil samples

序号	元素	配套分析方法	检出限	报出率/%	一级标准物质合格率/%	重复性检验合格率/%	突变点抽查样品数/个	突变点重复性检验合格数/个	突变点的重复性检验合格率/%
1	As	氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)	1	99.96	100.00	96.52	476	444	93.28
2	Cd	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	0.03	99.99	100.00	96.30	1 083	1 018	94.00
3	Cr	X-射线荧光光谱法(XRF)	2	100.00	100.00	97.61	982	941	95.82
4	Cu	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	1	100.00	100.00	97.61	1 085	1 047	96.50
5	Hg	氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)	0.0005	100.00	100.00	96.09	612	558	91.18
6	Ni	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	1	100.00	100.00	97.39	1 086	1 038	95.58
7	Pb	电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)	1	100.00	100.00	97.39	1 083	990	91.41
8	Zn	等离子体质谱法(ICP-MS)	2	100.00	100.00	97.39	1 062	1 014	95.48
9	N	容量法(VOL)	0.020	100.00	100.00	98.48	315	304	96.51
10	P	X-射线荧光光谱法(XRF)	0.01	100.00	100.00	100.00	63	62	98.41
11	K ₂ O	电感耦合等离子体发射光谱法(ICP-OES)	0.5	100.00	100.00	100.00	129	124	96.12
12	F	离子选择性电极(ISE)	50	100.00	100.00	98.26	158	145	91.77
13	I	催化分光光度法(COL)	0.5	99.69	100.00	97.83	148	143	96.62
14	Se	氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)	0.01	100.00	100.00	99.57	89	86	96.63
15	Ge	氢化物-原子荧光光谱法(HG-AFS)	0.1	100.00	100.00	99.57	108	100	92.59
16	SOM	容量法(VOL)	0.01	99.77	100.00	97.83	124	114	91.94
17	pH	离子选择性电极法(ISE)	0.10	100.00	100.00	97.17	399	381	95.49

1) pH 检出限无量纲, N、P、K 和 SOM 检出限单位为 g·kg⁻¹, 其他元素含量检出限单位均为 mg·kg⁻¹

品采用国家一级标准物质和重复性检验等方法进行分析测试的准确度和精密度监控. 插入国家一级标准物质样品 914 件, 所有分析测试元素一级标准物质合格率为 100%, 随机抽取 460 件样品编成密码样进行重复性检验, 各指标重复性检验合格率均大于 96.3%; 异常点检查合格率均大于 90.7% 以上, 样品各项分析测试数据质量和各指标检出限均满足文献[19,20]的要求.

1.4 数据处理

以雄安新区起步区土地质量地球化学调查采集的 7278 件样品 ($38 \text{ 点} \cdot \text{km}^{-2}$) 数据为原始数据, 利用 ArcGIS 10.2 地统计分析模块中的子集要素 (Subset Feature) 工具将原始数据随机抽稀成 6 128、3 064、1 532、766、384 和 192 点 6 种不同采样密度 (32 、 16 、 8 、 4 、 2 和 $1 \text{ 点} \cdot \text{km}^{-2}$) 的数据, 利用上述随机抽稀数据定量评估不同采样密度条件下土壤地球化学调查指标空间插值的精准度. 采用 Excel 2010 和 SPSS 20 等软件进行数据统计分析, 采用 ArcGIS 10.2 地统计分析和空间分析模块开展地球化学数据空间插值工作.

2 结果与分析

2.1 土壤元素含量统计特征分析

研究区位于华北平原区, 成土母质主要为第四系冲积物, 土壤类型为潮土, 元素含量受成土母质和人类生产活动的共同影响, 不同元素其含量空间变异性差异较大 (表 2). 不同重金属元素含量与河北省土壤背景值^[21]相比差异较大, 如 As、Cd、Cu、Pb

和 Hg 含量均值分别是河北省土壤背景值的 0.66、1.80、1.06、1.13 和 1.19 倍. 研究区土壤重金属元素含量的非均一性, 可能是在成土母质的地质背景上叠加了研究区废旧有色金属的回收、电解和机械制造等人类生产活动的影响. 经典统计学中, 采用变异系数 (CV) 定量评价土壤元素的空间变异性. 变异系数介于 0%~15% 为轻度变异, 15%~35% 为中度变异, 大于 35% 为高度变异^[22~24]. 调查区土壤元素含量统计分析显示, 总体上土壤元素空间变异性以轻中度为主, 其中 pH、K 和 Ge 变异系数 $CV \leq 15\%$, 属于轻度变异; As、Ni、Cr、F 和 I 含量变异系数为 15%~35%, 属于中度变异; N、Se、P、SOM、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 变异系数 $CV > 35\%$, 属于高度变异 (图 2). 区内 Cd、Cu、Pb 和 Hg 等重金属的高变异性可能与其元素活动性较强, 易受人类生产活动影响有关; 土壤养分指标 N、P 和 SOM 的高变异性则可能受区内农业生产种植活动和沉积环境的影响.

2.2 不同采样密度下元素含量差异

统计了随机抽稀的 6 种采样密度 (32 、 16 、 8 、 4 、 2 和 $1 \text{ 点} \cdot \text{km}^{-2}$) 各项指标的平均值、中位数和变异系数等特征参数 (表 3). 总体而言, 抽稀后的 6 种采样密度下各元素的平均值和中位数无明显大幅波动, 总体较为接近. 轻度变异指标 pH、K 和 Ge 以及中度变异指标 As、Ni、Cr 和 F, 抽稀后的 6 种采样密度下各元素变异系数变化不大, 仍然为轻度变异和高度变异; 高度变异指标 N、Se、P、SOM、Cu、Zn、Cd、Pb 和 Hg 中抽稀后的 6 种采样密度下各元

表 2 研究区土壤地球化学指标含量统计参数¹⁾ (样本数 $N=7\ 278$)

Table 2 Statistical parameters of soil geochemical index content in the study area (sample number $N=7\ 278$)

指标	最小值	最大值	不同百分位数的含量			标准差	变异系数 /%	偏度	峰度	全国土壤 背景值 ^[21]	河北省土壤 背景值 ^[21]
			25%	50%	75%						
As	0.23	26.63	7.36	8.95	10.18	2.16	24.50	0.29	2.86	11.20	13.60
Cd	0.038	6.837	0.142	0.175	0.206	0.13	70.71	30.53	1368.56	0.097	0.094
Cr	18.65	341.40	55.13	62.27	71.49	14.92	23.29	4.11	53.90	61.00	68.30
Cu	2.97	305.90	19.51	23.03	26.97	11.07	45.50	11.84	233.76	22.60	21.80
Hg	0.001	5.677	0.031	0.043	0.055	0.11	205.62	29.37	1 244.02	0.065	0.036
Ni	3.84	103.30	23.83	27.05	30.40	5.36	19.56	1.29	10.62	26.90	30.80
Pb	7.09	1 329.00	21.26	24.30	27.51	22.15	86.56	41.13	2 102.01	26.00	21.50
Zn	24.88	2 160.00	63.44	71.96	82.36	43.97	57.39	28.94	1 216.42	74.20	78.40
Se	0.02	1.56	0.15	0.20	0.25	0.09	43.26	2.10	13.37	0.29	—
Ge	0.55	5.65	1.23	1.30	1.36	0.12	9.03	6.96	266.42	1.70	1.60
F	182	3 643	533	583	642	104.43	17.56	5.93	141.33	478	462
I	0.05	14.95	1.50	1.89	2.28	0.68	35.07	2.64	38.19	3.76	1.55
N	0.07	12.33	0.74	1.04	1.26	0.43	43.12	3.48	72.95	—	—
P	0.29	22.62	0.84	1.10	1.33	0.50	44.96	15.07	543.14	—	—
K	1.24	35.10	17.18	17.76	18.42	1.29	7.22	0.57	29.27	—	—
SOM	0.08	243.60	7.30	9.90	11.80	5.63	57.72	13.83	474.93	—	—
pH	5.93	9.99	7.92	8.10	8.30	0.29	3.56	0.34	1.31	6.70	7.90

1) pH 无量纲, N、P、K 和 SOM 含量单位为 $\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$, 其他元素含量单位均为 $\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$

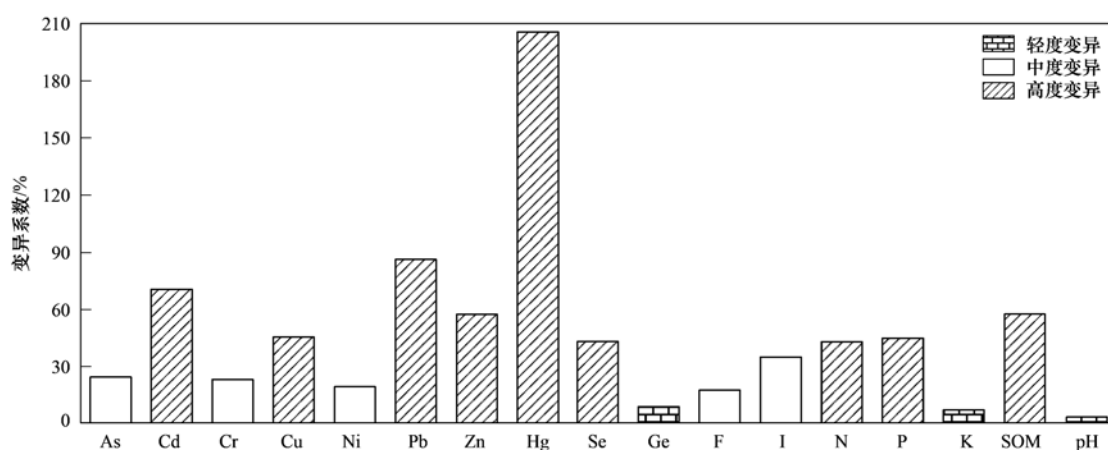


图2 研究区土壤地球化学指标含量变异系数

Fig. 2 Variation coefficients of soil geochemical index content in the study area

素变异系数则出现了一定的差异,其中 N、Se 和 SOM 等指标仍然为高度变异,Cd 则随着采样密度的降低,其变异系数变大,Pb 和 Zn 随着采样密度的降低,其变异系数则变小。抽稀后的 6 种采样密度下各高度变异元素变异系数差异变化,间接反映了其元素空间分布的差异性,原始采样密度条件下 Pb 和 Zn 的高度变异可能是研究区存在 Pb 和 Zn 点源污染。

为探讨抽稀后 6 种采样密度下各指标含量的相差程度,计算了 6 种采样密度下各指标均值的相对双差。采样密度 32 点·km⁻²和 16 点·km⁻²条件下各指标均值的相对双差最大仅 1% 左右;采样密度 8 点·km⁻²和 4 点·km⁻²条件下各指标均值的相对双差最大仅 2.5% 左右;采样密度 2 点·km⁻²条件下仅 Hg 均值的相对双差大于 10%,其余指标均小于 10%;采样密度 1 点·km⁻²条件下 Hg 和 Cd 均值的相对双差大于 10%,其余指标均小于 10%。参照文献[19]重复样两次采样分析结果相对双差 RD ≤ 30% 为合格的要求,抽稀后 6 种采样密度下各指标均值的相对双差均满足 RD ≤ 30% 的要求。总体上,6 种采样密度均可以相对客观地反映研究区土壤元素地球化学含量的总体特征。

3 讨论

土壤中元素含量在空间上并不是独立的,不属于纯随机变量,而是受土壤形成过程的连续性和气候带的渐变性等因素作用,在一定区域内存在空间自相关性^[24~27]。利用地统计空间插值法定量评估元素的空间变异特征的理论基础是土壤元素含量空间上自相关性^[28~30]。通常地球化学调查的采样密度影响其空间插值的精度^[31]。为探讨地块尺度城市土地质量地球化学调查科学合理的采样密度,以新区起步区 7278 点位实测值作为原始数据集,其评估结果

为实测值。利用 ArcGIS 10.2 地统计分析工具,将原始数据集随机均匀抽稀成 6 种不同采样密度的数据,通过地统计空间插值获得的 6 种采样密度数据的评价结果作为预测值。通过对比分析 6 种不同采样密度预测值与实测值之间的相对误差来探讨适合研究区的科学合理采样密度。

研究区土壤元素含量数据经 Kolmogorov-Smirnov 法正态分布检验,绝大部分不符合正态分布,不满足普通克里格法(ordinary Kriging)的假设前提^[31]。本次空间插值分析采用反距离权重法(inverse distance weighted)。二者的估值公式类似,不同之处在于权重系数的确定方法。实际应用中二者整体预测精度差异不明显,有学者研究表明反距离权重法在进行重金属污染识别时略有优势^[32]。研究区采用差异化分类布设采集的样点,在空间上呈非均匀分布,因此空间插值采用可变搜索半径,按照参与计算的临近点数为 15 个设定,确保插值过程中参与计算的临近点数量一致,插值搜索方向 360°,幂参数为 2。

3.1 空间插值精度分析

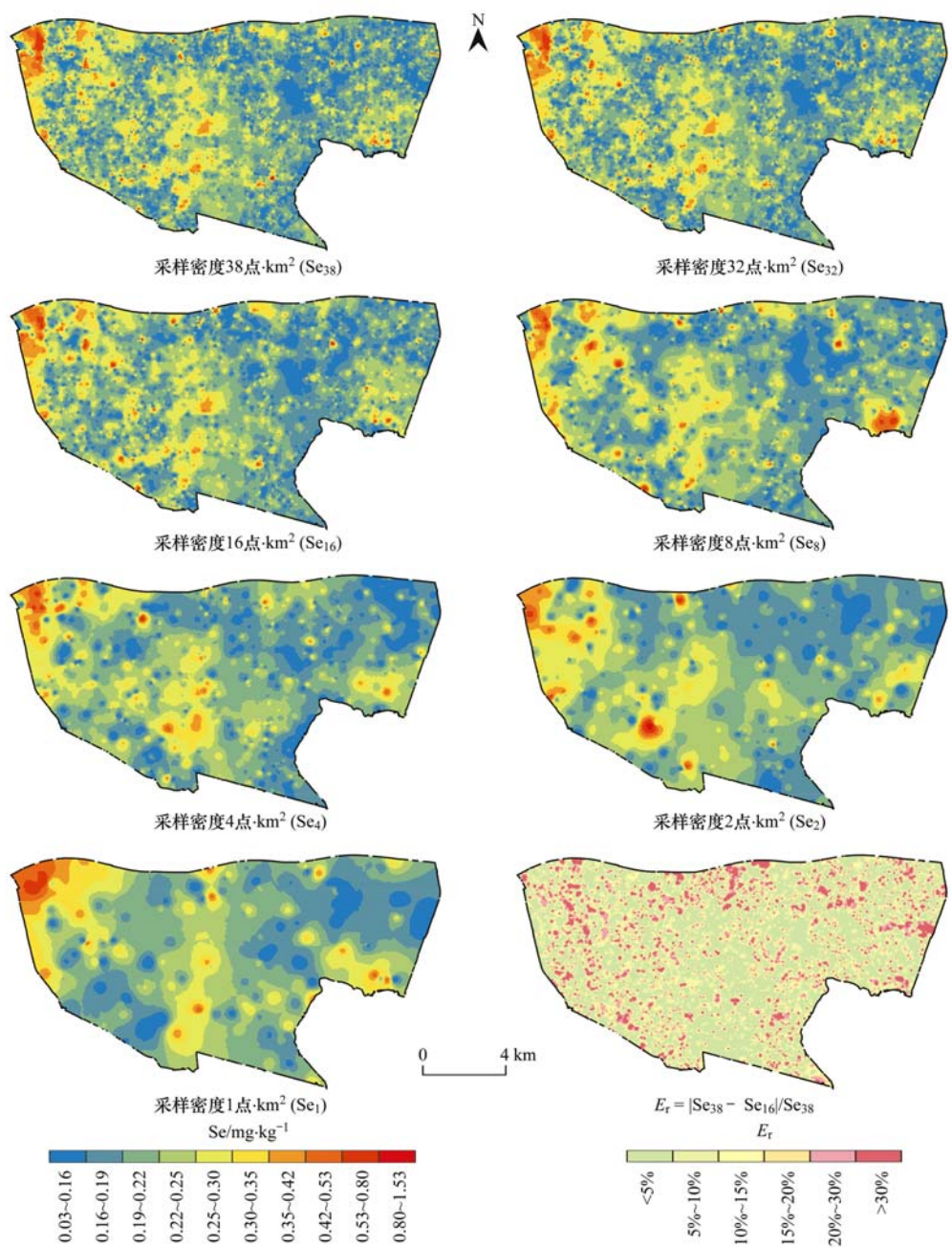
为定量评估抽稀后 6 种不同采样密度土地质量地球化学调查数据的空间插值精度,以原始数据(7 278 点)生成的地球化学图各栅格单元值作为实测值,均匀随机抽稀后的 6 种不同采样密度调查数据生成的地球化学图各栅格单元值作为预测值。如图 3 所示,不同采样密度条件下同一种元素指标土地质量地球化学调查数据空间插值生成的地球化学预测图存在一定差异,采样密度越大,空间插值生成的地球化学预测图对元素空间分布特征刻画程度越精细。

利用 ArcGIS 栅格分析工具计算 6 种不同采样密度条件下各栅格单元预测值与实测值的相对误差

表 3 研究区不同采样密度条件下土壤地球化学指标含量特征值

采样密度 /点·km ⁻²	元素	As	Cd	Cr	Cu	Ni	Pb	Zn	Hg	Se	Ge	F	I	N	P	K	SOM	pH
32 (N=6 128)	平均值	8.84	0.18	64.00	24.34	27.41	25.35	76.42	0.052	0.21	1.29	594.60	1.93	1.01	1.12	17.85	9.75	8.12
	中位数	8.97	0.18	62.23	23.02	27.06	24.28	71.90	0.043	0.21	1.30	582.00	1.89	1.04	1.11	17.76	9.90	8.09
	变异系数	0.24	0.58	0.23	0.47	0.19	0.65	0.51	1.71	0.43	0.09	0.18	0.35	0.43	0.43	0.07	0.59	0.04
	均值相对双差/%	0.17	0.53	0.08	0.05	0.03	0.95	0.25	0.50	0.12	0.05	0.01	0.09	0.05	0.16	0.03	0.02	0.02
16 (N=3 064)	平均值	8.84	0.18	64.10	24.42	27.44	25.43	77.12	0.053	0.21	1.29	593.89	1.91	1.01	1.13	17.85	9.85	8.12
	中位数	8.98	0.18	62.34	23.00	27.07	24.27	71.90	0.043	0.21	1.30	581.00	1.88	1.04	1.11	17.76	10.00	8.09
	变异系数	0.24	0.48	0.23	0.51	0.19	0.80	0.62	1.88	0.43	0.08	0.18	0.33	0.45	0.51	0.07	0.70	0.04
	均值相对双差/%	0.19	0.88	0.07	0.36	0.09	0.64	0.65	0.46	0.25	0.03	0.13	0.75	0.49	0.69	0.04	1.01	0.01
8 (N=1 532)	平均值	8.75	0.18	63.44	24.39	27.20	25.58	75.77	0.052	0.21	1.29	590.56	1.93	1.02	1.15	17.85	9.79	8.11
	中位数	8.86	0.17	62.00	22.94	26.87	24.20	71.69	0.043	0.20	1.29	580.00	1.89	1.04	1.13	17.76	9.95	8.08
	变异系数	0.25	0.43	0.24	0.54	0.19	0.72	0.33	1.26	0.45	0.08	0.18	0.34	0.50	0.61	0.07	0.59	0.04
	均值相对双差/%	0.82	0.75	0.96	0.25	0.79	0.04	1.12	2.00	0.71	0.48	0.69	0.08	1.12	2.36	0.07	0.35	0.13
4 (N=766)	平均值	8.93	0.18	63.52	24.05	27.45	25.98	74.75	0.053	0.21	1.29	592.37	1.95	1.01	1.12	17.84	9.90	8.11
	中位数	9.00	0.18	62.12	23.29	27.28	24.60	71.54	0.044	0.20	1.29	585.00	1.91	1.05	1.09	17.76	10.00	8.08
	变异系数	0.23	0.56	0.19	0.29	0.18	0.69	0.28	1.41	0.42	0.08	0.15	0.34	0.40	0.34	0.06	0.95	0.03
	均值相对双差/%	1.21	0.36	0.84	1.17	0.13	1.50	2.46	1.34	0.24	0.25	0.38	1.33	0.09	0.00	0.01	1.46	0.12
2 (N=382)	平均值	8.97	0.19	65.15	25.74	28.01	25.29	77.77	0.060	0.22	1.30	604.01	1.92	1.01	1.08	17.93	9.95	8.13
	中位数	9.13	0.18	62.67	23.47	27.39	24.53	72.94	0.044	0.21	1.31	584.50	1.88	1.05	1.09	17.84	10.35	8.10
	变异系数	0.23	1.41	0.29	0.78	0.23	0.25	0.38	2.27	0.45	0.08	0.30	0.33	0.40	0.31	0.09	0.45	0.04
	均值相对双差/%	1.68	4.91	1.70	5.65	2.13	1.16	1.49	12.36	2.44	0.30	1.56	0.40	0.86	3.30	0.50	1.96	0.13
1 (N=192)	平均值	8.97	0.21	64.25	25.60	28.12	25.08	75.43	0.067	0.22	1.30	607.91	1.99	1.05	1.13	17.73	9.96	8.11
	中位数	9.05	0.18	61.89	23.46	26.91	24.48	72.47	0.045	0.21	1.31	581.50	1.94	1.09	1.12	17.76	10.20	8.07
	变异系数	0.22	1.79	0.19	0.69	0.27	0.19	0.27	2.60	0.44	0.09	0.39	0.33	0.43	0.33	0.06	0.45	0.04
	均值相对双差/%	1.72	13.78	0.31	5.07	2.52	2.02	1.56	23.69	5.26	0.21	2.21	3.09	3.93	0.54	0.63	2.06	0.08

1) N、P、K 和 SOM 含量单位为 g·kg⁻¹, pH 无量纲, 其他元素含量单位均为 mg·kg⁻¹; 均值相对双差 = $2 \left| \frac{X_a - X_b}{X_a + X_b} \right| \times 100\%$, 式中 X_a 为原始采样密度下某指标含量的均值, X_b 为随机抽样采样密度下该指标含量的均值



Se₃₈、Se₃₂、Se₁₆、Se₈、Se₄、Se₂ 和 Se₁ 分别对应 38、32、16、8、4、2 和 1 点·km⁻² 采样密度下土壤 Se 含量,下同

图3 研究区不同采样密度土壤 Se 元素空间插值地球化学特征及空间插值相对误差 (E_r)

Fig. 3 Geochemical characteristics and relative error (E_r) of spatial interpolation of element Se under different sampling densities

($E_r = | \text{预测值} - \text{实测值} | / \text{实测值}$),按照相对误差 E_r 的大小分成 6 类 (<5%、5%~10%、10%~15%、15%~20%、20%~30% 和 >30%) 对数据空间插值精度进行统计(图 4)。

图 4 为抽稀后 6 种不同采样密度条件下土地质量地球化学调查指标数据空间插值生成的地球化学图各栅格单元预测值与原始实测数据生成的地球化学图各栅格单元实测值的相对误差 E_r 的统计结果。在相同采样密度下,指标空间插值预测值与实测值的相对误差 E_r 随指标空间变异系数增大而增大。轻度变异元素 K 的 6 种采样密度条件下空间插值预

测值与实测值的相对误差 E_r 相对较低,预测值与实测值相对误差 $E_r \geq 30\%$ 的面积占比均低于 0.14%,相对误差 $E_r < 10\%$ 的面积占比均大于 97.61%。中度变异元素 F 的 6 种采样密度条件下预测值与实测值相对误差 $E_r < 10\%$ 的面积占比介于 63.48%~98.51%之间,相对误差 $E_r > 30\%$ 的面积占比介于 0.05%~3.98%之间。同等采样密度条件下,轻度变异元素 K 的空间插值精度明显高于中度变异元素 F 的空间插值精度。高度变异元素 Hg 变异系数高达 205.62%,其预测值与实测值相对误差 $E_r < 10\%$ 的面积占比介于 20.50%~84.85%之间,相对误差 E_r

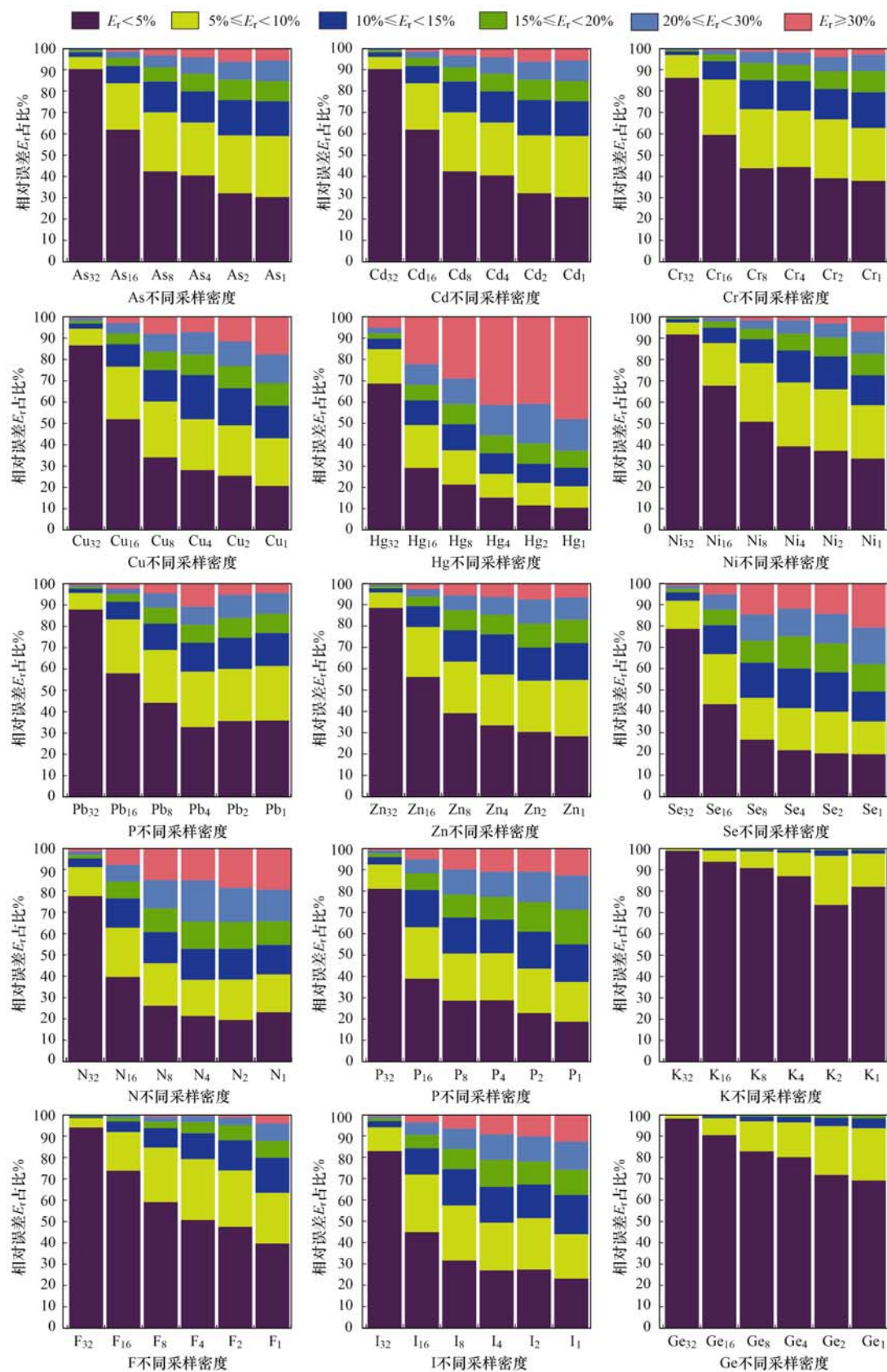


图4 研究区不同采样密度土壤地球化学指标空间插值的预测值与实测值相对误差 (E_r)

Fig. 4 Relative error of spatial interpolation (E_r) and measured values of soil geochemical index under different sampling densities

>30% 的面积占比则介于 5.09%~47.94% 之间,与同等采样密度条件下其他轻度变异元素或中度变异元素相比,其空间插值精度相对最差。

大部分元素指标空间插值预测值与实测值的总体相对误差 E_r 均值随采样密度增大而降低(图 5)。如 Hg 元素抽稀后的 32、16、8、4、2 和 1 点· km^{-2}

采样密度数据空间插值预测值与实测值相对误差 E_r 均值分别为 7.28%、19.53%、22.74%、27.19%、37.69% 和 52.32%。但是部分元素指标空间插值预测值与实测值的相对误差 E_r 未随着采样密度增大而降低, 如 Pb 元素抽稀后 32、16、8、4、2 和 1 点·km⁻² 采样密度数据空间插值的相对误差均值分别为 4.21%、6.62%、9.16%、14.04%、9.20% 和 8.60%, 其空间插值的相对误差 $E_r > 30\%$ 的面积比例分别为 0.78%、2.14%、4.51%、10.76%、5.15% 和 4.32%, 其采样密度 4 点·km⁻² 的空间插值的相对误差均值高于 2 点·km⁻² 和 1 点·km⁻² 的空间插值。这表明土壤采样密度的增大并不能总是提高空间插值精度, 采样密度从 8 点·km⁻² 增加至 32

点·km⁻² 时, 研究区 16 种元素指标空间插值精度是随着采样密度的增加而增高, 但是当达到一定采样密度之后, 采样密度从 1 点·km⁻² 增加至 4 点·km⁻² 时, 元素指标空间插值精度未随着采样密度的增加而增高, 说明样点数量的增加不一定利于识别土壤元素含量变异中的结构性连续组分。

研究区土壤元素空间插值分析结果显示, 采样密度和元素空间变异性均影响其空间插值精度, 同等采样密度条件下, 元素空间变异性越大, 其插值精度越低; 同种元素的空间插值和地块(图斑)插值精度受到地球化学调查采样密度的影响, 但采样密度的增加并不一定能够识别土壤元素含量的结构性连续组分。

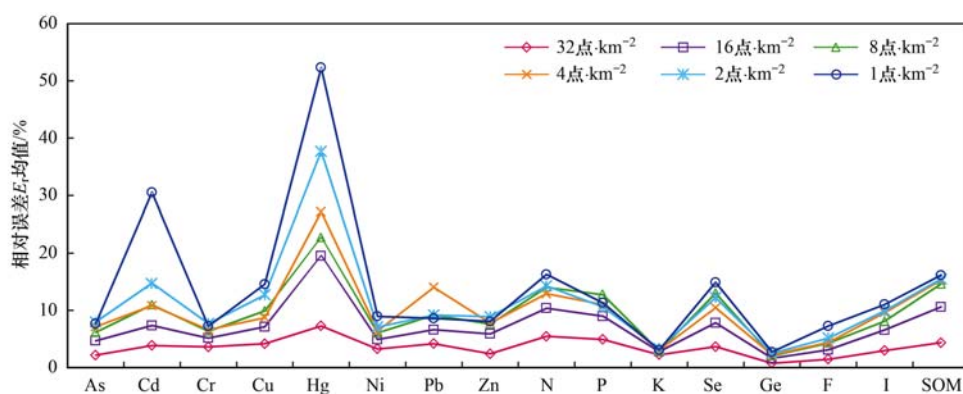


图5 研究区不同采样密度土壤地球化学指标空间插值相对误差 (E_r) 均值

Fig. 5 Mean value of spatial interpolation relative error (E_r) of soil geochemical index under different sampling densities

3.2 地块图斑插值与实测值相对误差分析

以地块(图斑)为统计单元, 计算各地块的预测值与实测值的相对误差 (E_r) 来定量评估地块插值的精确度。不同采样密度地块(图斑)插值与实测值相对误差 (E_r) 分析结果显示(图6), 地块插值精度与空间插值精度类似, 均受采样密度和元素空间变异度的影响, 相同采样密度条件下, 随着元素变异系数增加, 地块插值精度相应降低。如高度变异元素 Hg 抽稀后的 32、16、8、4、2 和 1 点·km⁻² 采样密度图斑插值与实测值相对误差 $E_r < 5\%$ 的地块图斑所占比例分别为 75.28%、33.35%、20.82%、16.36%、12.93% 和 12.02%, 相对误差 $E_r \geq 30\%$ 的地块图斑所占比例分别为 4.43%、18.89%、30.33%、34.39%、39.08% 和 43.14%; 轻度变异元素 K 地块图斑插值的 $E_r < 5\%$ 的地块图斑所占比例分别为 97.77%、91.34%、87.58%、85.70%、82.48% 和 84.27%, 相对误差 $E_r \geq 30\%$ 的地块图斑所占比例均小于 0.28%, 说明随着元素变异系数增加, 地块(图斑)插值精度相应降低。

3.3 地球化学预测等级与实测等级误差分析

利用抽稀后的 6 种不同采样密度数据和原始实测数据, 分别进行地块尺度单指标土壤环境地球化学等级、土壤环境地球化学综合等级、单指标土壤养分地球化学等级、土壤养分地球化学综合等级和土壤质量地球化学综合等级的划分, 对不同采样密度条件下地块尺度土地质量地球化学预测等级与实测等级一致性进行评估(表4)。

土壤环境 As、Cd、Cr、Cu、Hg、Ni、Pb 和 Zn 单指标地球化学预测等级和土壤环境地球化学综合预测等级的合格率均在 98.5% 以上, 6 种采样密度下土壤环境地球化学等级插值预测结果和实测等级评价结果差异较小, 部分指标评价等级结果几乎一致。插值评价等级结果未受采样密度和元素含量空间变异性的明显影响, 其原因与研究区土壤环境本底清洁, 土壤中 8 种重金属环境指标整体含量较低, 其含量均低于土壤环境质量农用地土壤污染风险管控标准(GB 15618-2018)中的筛选值和管制值, 土壤环境地球化学等级主要为清洁无污染等级, 因此插值与实测值对图斑地球化学等级评价不会有明显

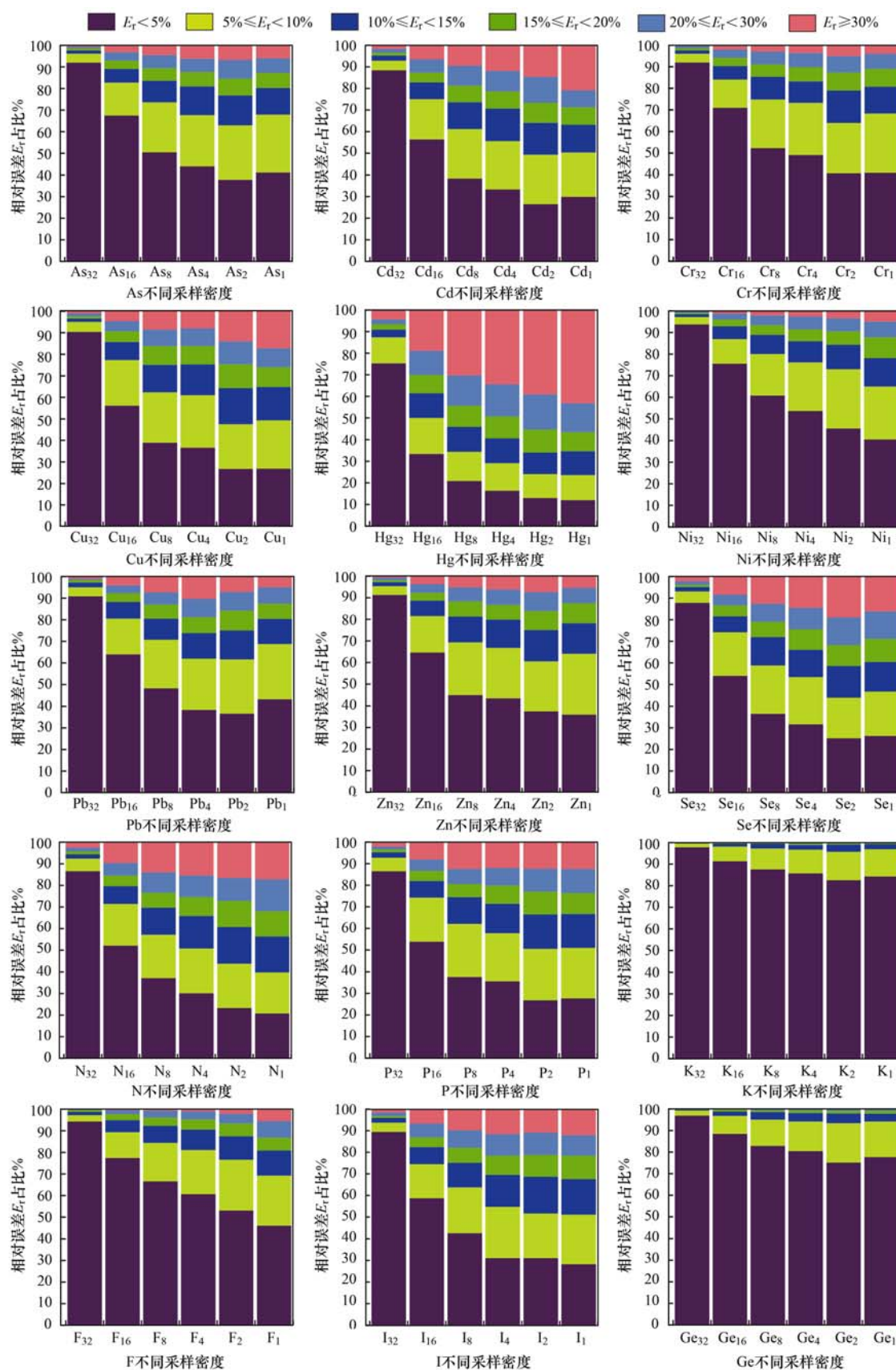


图6 研究区不同采样密度土壤地球化学指标地块图斑插值与实测值相对误差(E_r)

Fig. 6 Relative error of spatial interpolation(E_r) and measured values of soil geochemical index under different sampling densities

的差异.

土壤养分元素(N、P和K)和健康元素(Se、Ge、

F和I)地球化学预测等级的合格率总体上随着采样密度的增加而增加,但是在一定的采样密度范围内,

土壤采样密度的增大并不一定提高地球化学预测等级的合格率. 如 P 单指标 1 点·km⁻² 采样密度的预测等级合格率高于 2 点·km⁻² 采样密度的预测等级合格率; I 单指标 1 点·km⁻² 采样密度的预测等级合格率高于 8 点·km⁻² 采样密度的预测等级合格率. 大量养分元素 N、P 和 K 地球化学等级预测值和实测值差异较大, 可能是受到元素含量区间变化大、空间变异性强和农业生产等强烈人为扰动等因素的影响.

表 4 研究区不同采样密度土壤地球化学指标预测等级合格率统计
Table 4 Statistics of qualified rates of soil geochemical index predictions under different sampling densities

评价指标	预测等级合格率/%					
	32 点·km ⁻²	16 点·km ⁻²	8 点·km ⁻²	4 点·km ⁻²	2 点·km ⁻²	1 点·km ⁻²
N 元素单指标	91.44	74.73	66.79	62.13	56.93	54.12
P 元素单指标	94.13	84.13	78.32	75.33	67.14	73.38
K 元素单指标	99.63	98.72	98.51	98.00	97.84	98.45
Se 元素单指标	95.06	85.31	81.81	78.72	76.56	80.27
Ge 元素单指标	91.85	73.10	64.89	57.39	50.31	56.95
F 元素单指标	95.03	83.36	77.44	77.51	72.50	68.30
I 元素单指标	97.84	92.99	90.11	90.55	89.49	91.02
SOM 单指标	94.92	84.45	77.51	76.56	74.40	77.81
As 元素单指标	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Cd 元素单指标	99.95	99.84	99.79	99.84	99.47	98.70
Cr 元素单指标	100.00	100.00	99.98	99.98	99.95	99.98
Cu 元素单指标	99.95	99.93	99.88	99.91	99.95	99.93
Hg 元素单指标	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Ni 元素单指标	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Pb 元素单指标	99.98	99.98	99.93	99.88	99.93	99.93
Zn 元素单指标	100.00	99.95	99.91	99.91	99.91	99.91
土壤养分综合	92.43	78.51	69.97	65.77	59.83	56.83
土壤环境综合	99.91	99.86	99.56	99.61	99.28	98.51
土壤质量综合	92.53	78.56	69.90	65.77	59.57	56.09

此外,部分元素地球化学预测等级的合格率与其元素含量变异性无必然的正相关关系,如轻度变异元素 Ge,相同采样密度条件下其地球化学预测等级的合格率明显低于中度变异元素 F、I 和高度变异元素 P、Se 等指标的合格率. 预测等级除受元素空间变异性和地块(图斑)插值精度等因素影响外,还与元素含量高低和地球化学分级标准的相对位置有关. Ge 地球化学 5 级分级临界值分别为 > 1.5、1.4 ~ 1.5、1.3 ~ 1.4、1.2 ~ 1.3 和 < 1.2 mg·kg⁻¹,其分级临界值区间相对较小是导致其插值地球化学等级预测合理率变化较大的主要因素.

土壤质量地球化学综合等级是在土壤环境质量综合等级和土壤养分质量综合等级的基础上叠加而来,研究区 6 种不同采样密度条件下土壤质量地球化学预测等级合格率统计结果显示,土壤质量地球化学预测等级合格率数随着采样密度的增加而增高,对比各地块图斑土壤质量地球化学预测等级空间分布特征(图 7),采样密度越高其土壤质量地球化学预测等级图与实测等级图空间分布特征的相似性越高.

3.4 合理采样数分析

上述研究表明,合理采样数和元素含量空间变

异性等因素对其空间插值具有一定的影响,样品数多并不一定能够识别土壤元素含量的结构性连续组分,其合理采样数需要结合土地质量地球化学调查工作精度要求和调查目标具体分析.

依据文献[18]中图斑插值相对误差的要求(图斑内各元素的相对误差 $E_r \leq 30\%$ 的样本数占总样本数的比例 $\geq 85\%$; 受人为因素影响较大的 N、Hg 和 Cd 图斑插值的相对误差 $E_r \leq 30\%$ 的样本数占总样本数的比例 $\geq 70\%$)对地块图斑插值精度进行了分析,研究区土壤中 As、Cr、Ni、Pb、Zn、P、K、F、I 和 Ge 元素,其采样密度仅需 1 点·km⁻²时,其图斑插值相对误差 $E_r \leq 30\%$ 的样本数占总样本数的比例 $\geq 85\%$,地块插值精度满足规范要求;当 Cu 采样密度为 2 点·km⁻²,Se 采样密度为 4 点·km⁻²,SOM 采样密度为 8 点·km⁻²时,其图斑插值相对误差 $E_r \leq 30\%$ 的样本数占总样本数的比例 $\geq 85\%$,地块插值精度满足规范要求. 受人为因素影响较大的 N、Cd 和 Hg 元素,其采样密度分别为 1、1 和 16 点·km⁻²时,其地块图斑插值相对误差 $E_r \leq 30\%$ 的样本数占总样本数的比例 $\geq 70\%$,地块插值精度均满足规范要求.

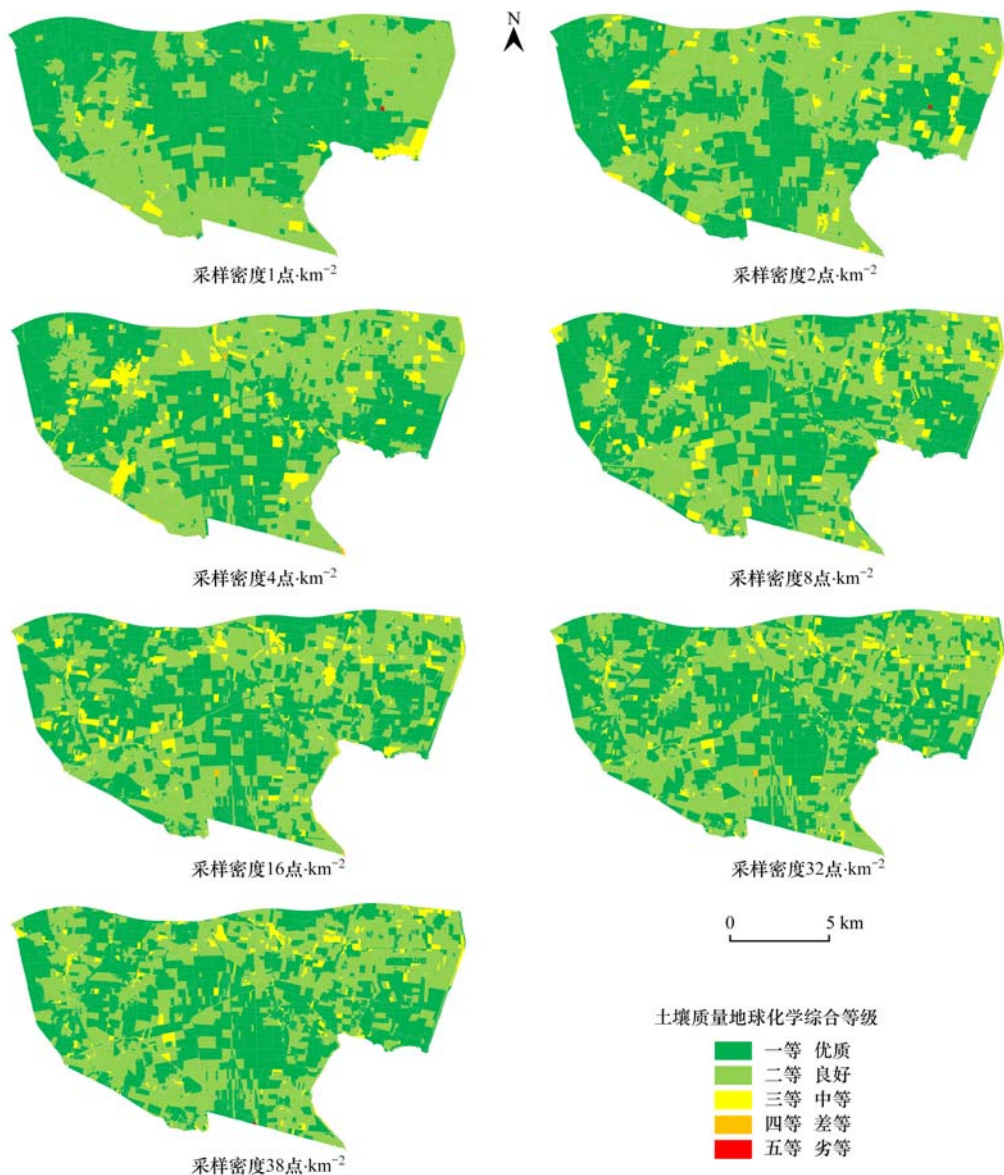


图 7 研究区地块(图斑)不同采样密度土壤地球化学综合等级评价

Fig. 7 Comparison of comprehensive grade evaluations of soil geochemistry of land plots under different sampling densities

4 结论

(1)雄安新区起步区土地质量地球化学调查采用差异化分类布设样点方法使平面上随机分布的区域地球化学量变值在每一个地块(图斑)都有明确的量值反映,满足了土地利用规划编制对单一地块(图斑)具有质量属性的基本需求.

(2)研究区土壤元素空间变异性主要以轻中度变异为主;其中 Hg、Pb、Cd、Cu、Zn 和 Se 受区内有色金属回收、电解和冶炼等人类工农业生产活动影响,具有较高的空间变异性,N、P 和 SOM 的高变异性则可能受农业生产种植活动的影响.

(3)土壤地球化学调查采样密度和元素含量空间变异性对其空间插值和地块(图斑)插值精度有显著影响,同等地球化学调查采样密度条件下,元素

含量空间变异性越大,其空间插值精度和图斑插值精度越低;同种元素的空间插值和地块(图斑)插值精度受到地球化学调查采样密度的影响,但采样密度的增加并不一定能够识别土壤元素含量的结构性连续组分.

(4)基于研究区 6 种不同采样密度条件下元素数据空间插值精度、地块插值预测值与实测值相对误差及预测等级与实测等级误差的定量评估结果,结合土地质量地球化学调查评价精度要求和满足研究区土地资源精细化管理需求,对于雄安新区起步区及类似研究区,采用 16 点·km⁻²的采样密度开展地块尺度城市土地质量地球化学评价工作时,调查评价成果可以满足城市土地资源精准管理的需要.

参考文献:

[1] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human

- security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, **348**(6235), doi: 10.1126/science.1261071.
- [2] Koch A, McBratney A, Adams M, *et al.* Soil security: solving the global soil crisis[J]. *Global Policy*, 2013, **4**(4): 434-441.
- [3] 朱永官, 李刚, 张甘霖, 等. 土壤安全: 从地球关键带到生态系统服务[J]. *地理学报*, 2015, **70**(12): 1859-1869.
Zhu Y G, Li G, Zhang G L, *et al.* Soil security: from earth's critical zone to ecosystem services[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2015, **70**(12): 1859-1869.
- [4] 李括, 彭敏, 赵传冬, 等. 全国土地质量地球化学调查二十年[J]. *地学前缘*, 2019, **26**(6): 128-158.
Li K, Peng M, Zhao C D, *et al.* Vicennial implementation of geochemical survey of land quality in China[J]. *Earth Science Frontiers*, 2019, **26**(6): 128-158.
- [5] 刘希瑶. 土地质量地球化学评估在土地规划和管理中的作用[J]. *地质与资源*, 2012, **21**(6): 557-562.
Liu X Y. Geochemical assessment for land quality: function in land planning and management[J]. *Geology and Resources*, 2012, **21**(6): 557-562.
- [6] 陈国光, 周国华, 梁晓红, 等. 土地质量地球化学调查成果应用于永久基本农田划分方法技术[J]. *地质通报*, 2019, **38**(2-3): 437-442.
Chen G G, Zhou G H, Liang X H, *et al.* The application of land quality geochemical survey results to permanent basic farmland classification technology[J]. *Geological Bulletin of China*, 2019, **38**(2-3): 437-442.
- [7] 韩慧杰, 夏学齐, 吴海东, 等. 基于 GIS 和土地质量地球化学数据的水稻种植适宜性评价——以安徽省青阳县为例[J]. *中国生态农业学报*, 2019, **27**(4): 591-600.
Han H J, Xia X Q, Wu H D, *et al.* Evaluation of rice planting suitability using GIS and geochemical land quality data——A case study of Qingyang County, Anhui Province[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2019, **27**(4): 591-600.
- [8] Cheng H X, Li M, Zhao C D, *et al.* Concentrations of toxic metals and ecological risk assessment for sediments of major freshwater lakes in China[J]. *Journal of Geochemical Exploration*, 2015, **157**: 15-26.
- [9] 成杭新, 庄广民, 赵传冬, 等. 北京市土壤 Hg 污染的区域生态地球化学评价[J]. *地学前缘*, 2008, **15**(5): 126-145.
Cheng H X, Zhuang G M, Zhao C D, *et al.* Regional eco-geochemical assessment of mercury in soils in Beijing[J]. *Earth Science Frontiers*, 2008, **15**(5): 126-145.
- [10] Xia X Q, Ji J F, Yang Z F, *et al.* Cadmium risk in the soil-plant system caused by weathering of carbonate bedrock[J]. *Chemosphere*, 2020, **254**, doi: 10.1016/j.chemosphere.2020.126799.
- [11] 彭敏, 李括, 刘飞, 等. 东北平原区地块尺度土地质量地球化学评价合理采样密度研究[J]. *物探与化探*, 2019, **43**(2): 338-350.
Peng M, Li K, Liu F, *et al.* Reasonable sampling density for land parcel scale geochemical assessment on land quality in Northeast China Plain[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2019, **43**(2): 338-350.
- [12] 何中发, 占光辉, 王瑶. 不同层级城市规划土地质量地球化学调查评价方法研究[J]. *资源环境与工程*, 2018, **32**(2): 296-301.
He Z F, Zhan G H, Wang Y. Study on land quality geochemical survey and evaluation method for urban planning at different levels[J]. *Resources Environment & Engineering*, 2018, **32**(2): 296-301.
- [13] 贺灵, 孙彬彬, 周国华, 等. 浙中丘陵盆地地区 1: 5 万土地质量地球化学调查方法研究[J]. *现代地质*, 2016, **30**(6): 1285-1293.
He L, Sun B B, Zhou G H, *et al.* Research of 1: 50, 000 land quality geochemical survey technique at a hilly-basin area in Zhejiang province[J]. *Geoscience*, 2016, **30**(6): 1285-1293.
- [14] 陈国光, 梁晓红, 张洁, 等. 丘陵区土地质量地球化学调查方法技术——以服务赣州六县精准脱贫土地质量地球化学调查为例[J]. *物探与化探*, 2020, **44**(3): 463-469.
Chen G G, Liang X H, Zhang J, *et al.* Geochemical survey method of land quality in hilly areas: a case study of the geochemical survey of land quality in Ganzhou[J]. *Geophysical and Geochemical Exploration*, 2020, **44**(3): 463-469.
- [15] 朱江, 马柱国, 严中伟, 等. 气候变化背景下雄安新区发展中面临的问题[J]. *中国科学院院刊*, 2017, **32**(11): 1231-1236.
Zhu J, Ma Z G, Yan Z W, *et al.* Problems faced by construction of Xiongan New Area under climate change[J]. *Bulletin of the Chinese Academy of Sciences*, 2017, **32**(11): 1231-1236.
- [16] 刘芳圆, 崔俊辉, 陈立江, 等. 华北平原地貌区划新见[J]. *地理与地理信息科学*, 2009, **25**(4): 100-103.
Liu F Y, Cui J H, Chen L J, *et al.* A view on geomorphologic zonalization of North China plain[J]. *Geography and Geo-Information Science*, 2009, **25**(4): 100-103.
- [17] 何登发, 单帅强, 张煜颖, 等. 雄安新区的三维地质结构: 来自反射地震资料的约束[J]. *中国科学: 地球科学*, 2018, **48**(9): 1207-1222.
He D F, Shan S Q, Zhang Y Y, *et al.* 3-D geologic architecture of Xiongan New Area: constraints from seismic reflection data[J]. *Science China Earth Sciences*, 2018, **61**(8): 1007-1022.
- [18] DZ/T 0295-2016, 土地质量地球化学评价规范[S].
- [19] DZ/T 0258-2014, 多目标区域地球化学调查规范(1:250000)[S].
- [20] DD2005-03, 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)[S].
- [21] 国家环境保护局, 中国环境监测总站. 中国土壤元素背景值[M]. 北京: 中国环境科学出版社, 1990. 326-359.
- [22] Wilding L P. Spatial variability: its documentation, accommodation and implication to soil surveys[A]. In: Nielsen D R, Bouma J (Eds.). *Soil Spatial Variability* [M]. Wageningen: Pudoc, 1985. 166-193.
- [23] Wollenhaupt N C, Mulla D J, Gotway Crawford C A. Soil sampling and interpolation techniques for mapping spatial variability of soil properties[A]. In: Pierce F J, Sadler E J (Eds.). *The State of Site Specific Management for Agriculture* [M]. Madison: ASA, CSSA, SSSA, 1997. 19-57.
- [24] 张仁铎. 空间变异理论及应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005. 23-39.
- [25] 薛正平, 杨星卫, 段项锁, 等. 土壤养分空间变异及合理取样数研究[J]. *农业工程学报*, 2002, **18**(4): 6-9.
Xue Z P, Yang X W, Duan X S, *et al.* Spatial variability of soil nutrient and reasonable sampling number[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2002, **18**(4): 6-9.
- [26] 张淑娟, 何勇, 方慧. 基于 GPS 和 GIS 的田间土壤特性空间变异性的研究[J]. *农业工程学报*, 2003, **19**(2): 39-44.
Zhang S J, He Y, Fang H. Spatial variability of soil properties in the field based on GPS and GIS[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2003, **19**(2): 39-44.
- [27] 姜秋香, 付强, 王子龙. 空间变异理论在土壤特性分析中的应用研究进展[J]. *水土保持研究*, 2008, **15**(1): 250-253.
Jiang Q X, Fu Q, Wang Z L. Research progress of the spatial

- variability theory in application to soil characteristic analysis[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, **15**(1): 250-253.
- [28] 李凯, 赵华甫, 吴克宁, 等. 土壤重金属 Cd 污染指数的适宜插值方法和合理采样数量研究[J]. 土壤通报, 2016, **47**(5): 1056-1064.
- Li K, Zhao H F, Wu K N, *et al.* Suitable interpolation method and reasonable sampling quantity of Cd pollution index in soil [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2016, **47**(5): 1056-1064.
- [29] 袁峰, 白晓宇, 周涛发, 等. 元素空间分布插值方法的对比研究: 以铜陵地区土壤中的重金属元素为例[J]. 地学前缘, 2008, **15**(5): 103-109.
- Yuan F, Bai X Y, Zhou T F, *et al.* Comparison between methods for interpolation of studying spatial distribution of elements: a case study of soil heavy metals in Tongling area, south China[J]. Earth Science Frontiers, 2008, **15**(5): 103-109.
- [30] 马宏宏, 余涛, 杨忠芳, 等. 典型区土壤重金属空间插值方法与污染评价[J]. 环境科学, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- Ma H H, Yu T, Yang Z F, *et al.* Spatial interpolation methods and pollution assessment of heavy metals of soil in typical areas [J]. Environmental Science, 2018, **39**(10): 4684-4693.
- [31] Nielsen D R, Tillotson P M, Vieira S R. Analyzing field-measured soil-water properties [J]. Agricultural Water Management, 1983, **6**(2-3): 93-109.
- [32] Long J, Liu Y L, Xing S H, *et al.* Effects of sampling density on interpolation accuracy for farmland soil organic matter concentration in a large region of complex topography [J]. Ecological Indicators, 2018, **93**: 562-571.

环 境 科 学

CONTENTS

Contributors to Air Pollutant Emission Changes in Autumn and Winter in Beijing-Tianjin-Hebei and Surrounding Areas	TANG Qian, ZHENG Bo, XUE Wen-bo, <i>et al.</i> (1591)
Characteristics and Meteorological Factors of Complex Nonattainment Pollution of Atmospheric Photochemical Oxidant (O_x) and $PM_{2.5}$ in the Pearl River Delta Region, China	YAN Feng-hua, CHEN Wei-hua, CHANG Ming, <i>et al.</i> (1600)
Source Apportionment of Ozone Pollution in Guangzhou; Case Study with the Application of Lagrangian Photochemical Trajectory Model	PEI Cheng-lei, MU Jiang-shan, ZHANG Ying-nan, <i>et al.</i> (1615)
Chemical Composition and Source Analysis of $PM_{2.5}$ in Yuncheng, Shanxi Province in Autumn and Winter	ZHAO Qing, LI Xing-ru, WANG Guo-xuan, <i>et al.</i> (1626)
Temporal Trend of Polycyclic Aromatic Hydrocarbons in Atmosphere Within 24 Hours After Snowfall	FAN Hui-ze, ZHU Fu-jie, HU Peng-tuan, <i>et al.</i> (1636)
Determination Method and Characteristics of Particle Size Multiplier of $PM_{2.5}$ in Road Dust	LI Dong, CHEN Jian-hua, ZHANG Yue-fan, <i>et al.</i> (1642)
Source Profiles and Impact of VOCs Based on Production Processes in Foundry Industries	GAO Shuang, LI Shi-bei, BO Xin, <i>et al.</i> (1649)
Emission Characteristics and Toxicity Effects of Halogenated Polycyclic Aromatic Hydrocarbons from Coal-Fired and Waste Incineration Power Plants	NI Xiu-feng, WANG Ru-wei, CAI Fei-xuan, <i>et al.</i> (1660)
Concentration and Particle Size Distribution Characteristics of Microbial Aerosol and Bacterial Community Structure During Spring in Lanzhou City, China	ZHAO Wei, LI Jie, XIE Hui-na, <i>et al.</i> (1668)
Optimization Method and Case Study of Air Pollution Emission Spatial Pattern	LI Min-hui, LIAO Cheng-hao, CHANG Shu-cheng, <i>et al.</i> (1679)
Influence of $PM_{2.5}$ Pollution on Health Burden and Economic Loss in China	LI Yong, LIAO Qin, ZHAO Xiu-ge, <i>et al.</i> (1688)
Identify the Nitrate Sources in Different Land Use Areas Based on Multiple Isotopes	JIN Zan-fang, HU Jing, WU Ai-jing, <i>et al.</i> (1696)
Hydrochemical Characteristic and Their Controlling Factors in the Yarkant River Basin of Xinjiang	ZHANG Jie, ZHOU Jin-long, ZENG Yan-yan, <i>et al.</i> (1706)
Pollution Characteristics and Health Risk Assessment of Heavy Metals in the Water of Lijiang River Basin	HUANG Hong-wei, XIAO He, WANG Dun-qiu, <i>et al.</i> (1714)
Changes in Concentrations and Pollution Levels of Trace Elements of Floodplain Sediments of Poyang Lake Basin in Recent Twenty Years	LI Kuo, YANG Ke, PENG Min, <i>et al.</i> (1724)
Hydrochemical and Isotopic Characteristics in the Shallow Groundwater of the Fenhe River Basin and Indicative Significance	LIU Xin, XIANG Wei, SI Bing-cheng (1739)
Major Ionic Characteristics and Factors of Karst Groundwater at Huixian Karst Wetland, China	LI Jun, ZOU Sheng-zhang, ZHAO Yi, <i>et al.</i> (1750)
Hydrochemistry Characteristics and Estimation of the Dissolved Inorganic Carbon Flux in the Caohai Lake Wetland Catchment of Guizhou Province	CAO Xing-xing, WU Pan, YANG Shi-di, <i>et al.</i> (1761)
Concentration Levels and Potential Ecological Risks of Current Use Pesticides in the Surface Seawater of Typical Liaoning Sea Areas	DU Jing, HU Chao-kui, XIE Hua-jun, <i>et al.</i> (1772)
Levels, Characteristics, and Potential Source of Micro(meso)plastic Pollution of Soil in Liaohe River Basin	HAN Li-hua, XU Li, LI Qiao-ling, <i>et al.</i> (1781)
PAHs Pollution Characteristics and Source Analysis of Typical Lake and Reservoir Sediments in Jin-Ji-Liao Area	WU Peng, LU Yi-ren, LI Hui, <i>et al.</i> (1791)
Pollution Characteristics and Risk Assessment of Organophosphate Esters in Rivers and Water Body Around Taihu Lake	ZHANG Wen-ping, ZHANG Zhen-fei, GUO Chang-sheng, <i>et al.</i> (1801)
Spatiotemporal Distributions and Ecological Risk Assessments of Typical Antibiotics in Surface Water of Taihu Lake	DING Jian-nan, LIU Shu-jiao, ZOU Jie-ming, <i>et al.</i> (1811)
Characteristics of Volatile Organic Compounds Pollution and Risk Assessment of Nansi Lake in Huaihe River Basin	CHENG Yun-xuan, GAO Qiu-sheng, LI Jie, <i>et al.</i> (1820)
Distribution, Source, and Ecological Risk Evaluation of the PAHs and PCBs in the Sediments from Sanya River	ZHAN Yong, WEI Ting-ting, YE Hui-bin, <i>et al.</i> (1830)
Spatiotemporal Change and Source Apportionment of Non-point Source Nitrogen and Phosphorus Pollution Loads in the Three Gorges Reservoir Area	LI Ming-long, JIA Meng-dan, SUN Tian-cheng, <i>et al.</i> (1839)
Effect of the Combined Use of Denitrifying Bacteria, Calcium Nitrate, and Zirconium-Modified Zeolite on the Mobilization of Nitrogen and Phosphorus in Sediments and Evaluation of Its Nitrate-Nitrogen Releasing Risk	XIN Hui-min, LIN Jian-wei, ZHAN Yan-hui (1847)
Combined Remediation of Eutrophic Water by Phoslock® and Aerobic Denitrifying Bacteria	LI Bing-tang, ZHOU Zhi-qin, Ravi Naidu, <i>et al.</i> (1861)
Biodegradation of Algae-derived Organic Matter (I-DOM) from Lake Taihu	ZHANG Qiao-ying, SUN Wei, DU Ying-xun, <i>et al.</i> (1870)
Structure Characteristics and Driving Variables of Epilithic Algae Community in Lhasa River Basin of Qinghai-Tibet Plateau	WEI Jun-wei, LI Hong-ran, WANG Xing-zhong, <i>et al.</i> (1879)
Spectral Characteristics and Sources of Dissolved Organic Matter from Landscape River During Flood Season in Suzhou Based on EEMs and UV-vis	HE Jie, ZHU Xue-hui, WEI Bin, <i>et al.</i> (1889)
Adsorption and Desorption Behaviors of Antibiotics on TWP and PVC Particles Before and After Aging	FAN Xiu-lei, ZOU Ye-feng, LIU Jia-qiang, <i>et al.</i> (1901)
Synthesis of Magnetic Iron Modifying Biochar for Ammonia Nitrogen Removal from Water	WANG Fang-jun, SANG Qian-qian, DENG Ying, <i>et al.</i> (1913)
Seasonal Effects of Influent Ammonia Oxidizing Bacteria of Municipal Wastewater Treatment Plants on Activated Sludge System	YU Li-fang, WANG Yu, HUA Si-si, <i>et al.</i> (1923)
Analysis of Performance and Microbial Diversity of ANAMMOX Sludge Based on Particle Size Differentiation	WANG Xiao-tong, YANG Hong (1930)
Effects of Chlorine Dioxide Disinfection on the Profile of the Super Antibiotic Resistance Genes in a Wastewater Treatment Plant	CHENG Chun-yan, LI Hai-bei, LIANG Yong-bing, <i>et al.</i> (1939)
Effects of PES and 2,4-DCP on the Extracellular Polymeric Substances and Microbial Community of Anaerobic Granular Sludge	LIN Xu-meng, SU Cheng-yuan, WU Shu-min, <i>et al.</i> (1946)
Characteristics of Sludge and Associated Risk Assessment of Urban Sewage Treatment Plants	LI Juan, LI Jin-xiang, YANG Yan-yan (1956)
Effects of Climate Warming on the Key Process and Index of Black Soil Carbon and Nitrogen Cycle During Freezing Period	WANG Zi-long, LIU Chuan-xing, JIANG Qiu-xiang, <i>et al.</i> (1967)
Effects of Combined Application of Biogas Slurry and Straw on the Migration and Fractions of Soil Heavy Metals in Rice-wheat Rotation System in Coastal Reclamation Areas	WANG Wei, ZHOU Jun-nan, TANG Yi-fan, <i>et al.</i> (1979)
Geochemical Survey Method of Land Quality in Land Parcel Scale City: A Case Study of the Initial Area of the Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, GUO Zhi-juan, LIU Fei, <i>et al.</i> (1989)
Potential Ecological Risk Assessment and Source Analysis of Heavy Metals in Soil-crop System in Xiong'an New District	ZHOU Ya-long, YANG Zhi-bin, WANG Qiao-lin, <i>et al.</i> (2003)
Cadmium Accumulation Characteristics and Impacting Factors of Different Rice Varieties Under Paddy Soils with High Geological Backgrounds	DAI Zi-wen, FANG Cheng, SUN Bin, <i>et al.</i> (2016)
Effects of Different Exogenous Selenium Species Application on Growth and Cadmium Uptake of Pak Choi in Cadmium Contaminated Soil	LIU Yang, QI Ming-xing, WANG Min, <i>et al.</i> (2024)
Influencing Factors of Cadmium Bioaccumulation Factor in Crops	CHEN Jie, WANG Juan, WANG Yi-wen, <i>et al.</i> (2031)
Effects of Different Exogenous Plant Hormones on the Antioxidant System and Cd Absorption and Accumulation of Rice Seedlings Under Cd Stress	ZHANG Sheng-nan, HUANG Yi-zong, LI Yan, <i>et al.</i> (2040)
Effects of Different Organic Materials on Absorption and Translocation of Arsenic and Cadmium in Rice	LI Kai-ye, ZHAO Ting-ting, CHEN Jia, <i>et al.</i> (2047)
Soil Fungal Community Structure and Functional Diversity in a Copper Tailing Dam and Its Surrounding Areas	CHEN Jian-wen, ZHANG Hong, LI Jun-jian, <i>et al.</i> (2056)
Potential of Arbuscular Mycorrhizal Fungi, Biochar, and Combined Amendment on Sandy Soil Improvement Driven by Microbial Community	ZHANG Zhe-chao, YANG Jiu-yang, HAO Bai-hui, <i>et al.</i> (2066)
Animal Manure Fertilization Promotes Antibiotic Resistance Gene Dissemination Among Manure, Soil, and Vegetables	ZHANG Hong-na, DONG Meng-jie, ZHOU Yu-fa, <i>et al.</i> (2080)
Establishment and Application of Performance Evaluation and Obstacle Diagnosis Model for Regional Water Ecological Civilization Construction	WAN Bing-tong, BAO Xue-ying, ZHAO Jian-chang, <i>et al.</i> (2089)