

安徽省宁国市不同土地利用方式土壤质量综合评价^①

于勤勤, 刘彬, 夏飞强

(安徽省地球物理地球化学勘查技术院, 合肥 230022)

摘要: 为评价安徽省宁国市不同土地利用方式下的土壤碳固持和土壤质量, 本研究于 2016—2019 年采集了水稻种植区、山核桃种植区和茶树种植区的土壤样品, 分析了土壤 pH、有机碳、全氮、全磷、全钾及微量元素全量, 并将 SQI-面积法应用于不同土地利用类型的土壤质量综合评价。结果表明: 水稻种植区的土壤有机碳含量与山核桃种植区无差异, 而茶树种植区的土壤有机碳含量较山核桃种植区低 26%。山核桃种植区土壤养分常量元素(氮、磷、钾)和微量元素(锌、硼、铜、硒、钴、钼、镍、钒)全量相对较高, 而水稻和茶树种植区的养分含量相对较低。此外, 山核桃种植区土壤 pH 较高。最终, 综合评价结果显示, 宁国市山核桃种植区土壤质量指数最高, 水稻种植区次之, 而茶树种植区最低。

关键词: 宁国市; 土地利用方式; 土壤碳固持; 土壤质量

中图分类号: S151 文献标志码: A

Comprehensive Evaluation of Soil Quality Under Different Land Use Types in Ningguo City, Anhui Province

YU Qinqin, LIU Bin, XIA Feiqiang

(Anhui Institute of Geophysical and Geochemical Exploration Technology, Hefei 230022, China)

Abstract: To evaluate soil carbon sequestration and soil quality under different land use types in Ningguo City, Anhui Province, soil samples were systematically collected from paddy fields, *Carya cathayensis* plantations, and tea plantations during 2016—2019, soil pH, soil organic carbon (SOC), total contents of nitrogen, phosphorus, potassium and trace elements were determined, and soil quality index (SQI) were comprehensively assessed using the area-based method. Results showed no significant difference in SOC contents between paddy fields and *Carya cathayensis* plantations, whereas tea plantations exhibited 26% lower in SOC compared to *Carya cathayensis* plantations. *Carya cathayensis* plantations showed significantly higher total contents in macronutrients (N, P, and K) and micronutrients (Zn, B, Cu, Se, Co, Mo, Ni, and V), while nutrient levels in paddy fields and tea plantations remained relatively low. Additionally, soil pH was significantly higher in *Carya cathayensis* plantations. The comprehensive evaluation revealed that SQI was the highest in *Carya cathayensis* plantations, followed by paddy fields, while the lowest in tea plantations.

Key words: Ningguo City; Land use types; Soil carbon sequestration; Soil quality

土壤是陆地生态系统中最大的碳库,其碳储量约为大气碳储量的 3 倍,在维持土壤质量和缓解大气 CO₂ 浓度方面具有重要作用^[1]。预计到 2050 年,大气 CO₂ 浓度将达到 490~600 ppm,其中农田生态系统贡献了 22% 的 CO₂ 排放增量,可能对生态环境和人类健康产生潜在影响^[2]。土壤质量是生态可持续发展的基础,其演变受自然环境和人类活动的双重影响^[3]。不同土地利用方式通过改变土壤有机质积累、养分循

环、微生物活性及其他理化性质,导致土壤质量及其生态功能存在显著差异^[4-5]。近年来,随着全球气候变化和生态环境问题的加剧,深入分析不同土地利用方式下土壤质量的差异,已成为土壤学、生态学和环地球化学领域的研究热点^[6]。山地丘陵地区因地形复杂、土壤侵蚀风险较高,不同土地利用方式下土壤质量的差异尤为显著^[7]。因此,系统研究不同土地利用方式下土壤质量的变化特征,对生态环境保护及经

①基金项目: 2016 年度安徽省公益性地质工作项目(第三批)(2016-g-3-11)资助。

作者简介: 于勤勤(1982—),女,安徽六安人,硕士,高级工程师,主要从事地球化学勘查及土地质量评价工作。E-mail: 29957332@qq.com

济可持续发展具有重要的科学价值。

山核桃是我国南方丘陵地区重要的经济树种,其种植模式与水稻和茶树存在显著差异。相较于水稻田的长期水分管理和茶园的高投入利用,山核桃种植通常伴随较低强度的土壤扰动,且林地植被覆盖度较高^[8],有机质归还量大,土壤表现出较好的结构、较高的养分元素含量^[9]。然而,当前关于山核桃种植土壤质量综合分析的研究仍较为有限,尤其是在与水稻和茶树种植方式的对比研究方面,尚缺乏系统性的实证分析。此外,不同土地利用方式不仅影响土壤的基本养分供给,还可能改变微量元素的积累与迁移规律,进而影响土壤肥力及生态系统稳定性^[10]。因此,系统评价典型土地利用方式下土壤碳固持、常量和微量元素含量及土壤质量的综合状况与差异,对优化区域产业结构、提升土壤肥力及促进生态可持续发展具有重要意义。

安徽省宁国市是我国著名的山核桃主产区,山核桃种植面积达 2 万 hm^2 以上,居安徽省首位、全国第二位。然而,现有研究尚未系统揭示经济作物(如山核桃)与粮食作物(水稻)及高扰动茶园在土壤碳固持、常量与微量元素协同积累及土壤质量综合评价中的差异。因此,本研究以宁国市典型的山核桃、茶树和水稻种植区为研究对象,通过野外大范围采样与室内实验分析,结合 SQI-面积法综合评价宁国市不同土地利用模式下的土壤质量,为区域土地利用优化、土壤质量提升及生态环境可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为宁国市全域($30^{\circ}17'N \sim 30^{\circ}48'N$, $118^{\circ}36'E \sim 119^{\circ}24'E$, 天湖街道除外)。该地区为典型的北亚热带季风亚湿润气候,年平均气温 15.6°C ,年平均降水量 1 440.3 mm,年均无霜期 224 d。区内土壤类型以红壤、石灰岩土、暗黄棕壤和水稻土为主,土地利用类型主要为有林地、果园、灌木林地和水田,农作物类型以水稻、山核桃、茶树和板栗为主。

1.2 土壤样品采集

本研究于 2016 年 12 月—2019 年 12 月进行野外采样。根据研究区农作物种植特点,选择水稻、山核桃和茶树种植区的土壤作为调查对象。采用“网格+图斑”的布点方法,以 1 km^2 为采样网格,基本密度样点布设在网格内最大图斑中。优先选择连续种植超过 20 年、管理措施稳定的地块进行采样,确保土地利用历史对土壤属性的主导影响。水稻种植区、山核

桃种植区、茶树种植区采样点平均密度分别为 9.1、5.0、2.0 个/ km^2 ,全区采样点平均密度为 2.8 个/ km^2 。最终,在全市水稻种植区采集 104 件土壤样品,在山核桃主产区采集 82 件土壤样品,在“黄花云尖”和“野兰香”茶叶原产地青龙乡和方塘乡采集 30 件土壤样品。其中,水稻田土壤样品采用“样方法”采集($0.7 \text{ m} \times 0.7 \text{ m}$ 范围内土壤混合成 1 件样品),山核桃和茶树土壤样品以 $0.1 \sim 0.2 \text{ hm}^2$ 为采样单元,均匀采集 5 个土样等量混合成 1 件样品。所有样品均采自 0~20 cm 土层,因为该层是植物根系分布与养分循环的核心区域,可有效反映土地利用方式的影响。样品采集、处理和保存均严格执行 DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[11]。研究区地质分布及采样点位置见图 1。

1.3 土壤理化性质分析

土壤样品分析前,将样品进行均匀混合,并过 0.15 mm 筛。样品分析测试由安徽省地质实验研究所(国土资源部合肥矿产资源监督检查中心)完成,严格执行 DD 2005—03《生态地球化学评价样品分析技术要求(试行)》^[12]、DZ/T 0295—2016《土地质量地球化学评价规范》^[11]等标准要求。所有土壤样品分析测定土壤常量元素指标有机碳、全氮、全磷、全钾含量及土壤 pH;同时测定土壤微量元素锌、硼、铜、锰、硒、钴、钼、镍、钒的全量。

1.4 数据处理与统计分析

为了获得不同土地利用方式的土壤质量指数(SQI),采用以下公式将所有土壤性质标准化为 0~1 的无量纲分数^[4]:

$$SL_i = \frac{x_i - L_i}{H_i - L_i} \quad (1)$$

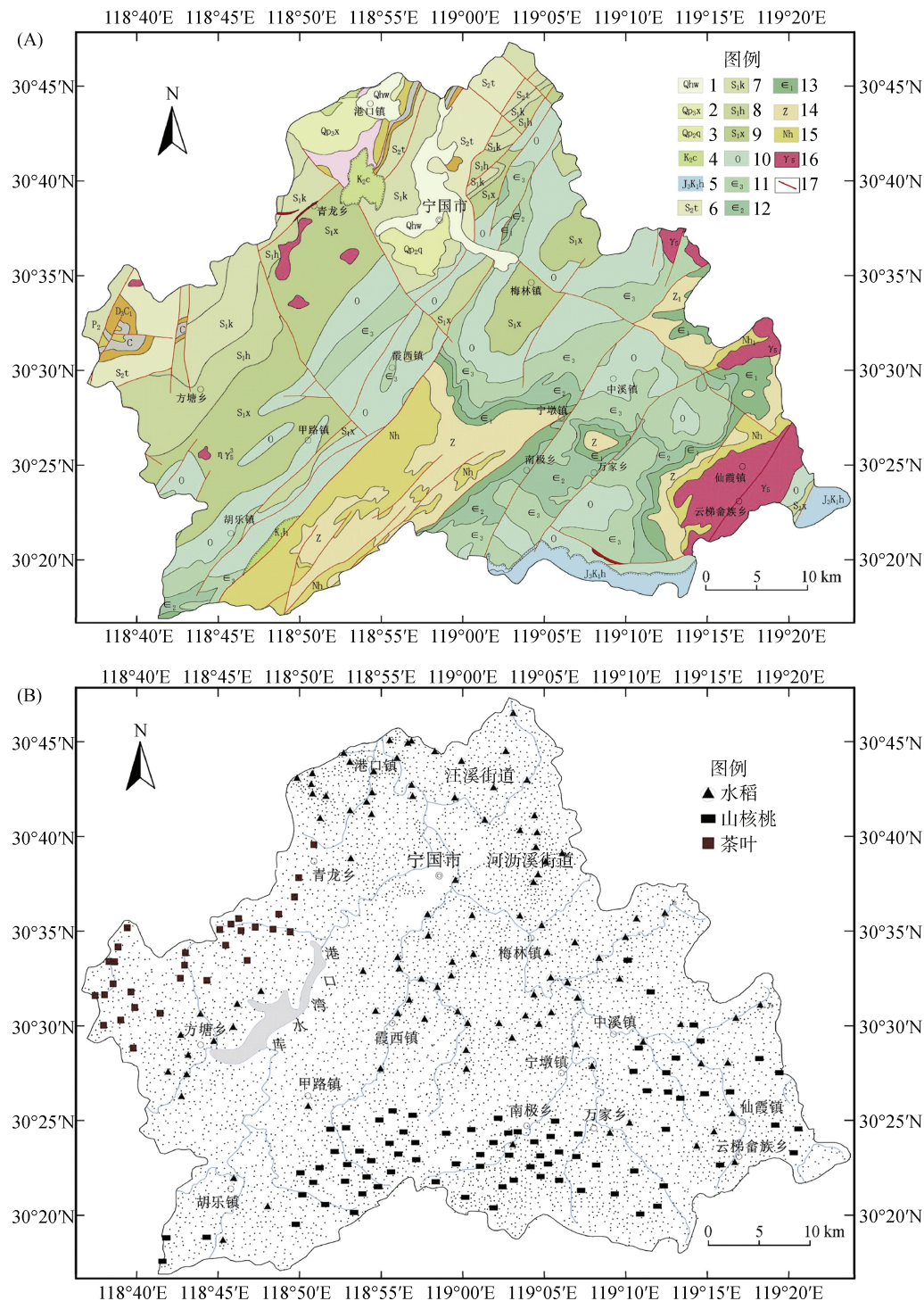
式中: SL_i 表示土壤理化性质 i 的线性转换得分; x_i 、 H_i 和 L_i 分别代表土壤理化性质 i 的实际值、最高值和最低值。本研究中,所有土壤变量均用于计算 SQI,并均被视为对土壤有益的正向指标。

SQI 通过基于雷达图中三角形面积的 SQI-面积法进行评估。该面积根据转换后的土壤理化性质计算得出:

$$SQI = 0.5 \times \sum_{i=1}^n SL_i^2 \times \sin \frac{2\pi}{n} \quad (2)$$

式中: n 表示用于计算 SQI 的土壤理化性质的数量。

本文地图编制运用中国地质调查局发展研究中心开发的“土地质量地球化学调查与评价数据管理与维护(应用)子系统”、MapGIS 6.7 和 ArcGIS 10.0 等软件完成。在进行统计分析之前,分别通过 Shapiro-Wilk



(1. 第四系芜湖组; 2. 第四系下蜀组; 3. 第四系戚家碛组; 4. 白垩系赤山组; 5. 侏罗系黄尖组; 6. 志留系唐家坞组; 7. 志留系康山组; 8. 志留系河沥溪组; 9. 志留系霞乡组; 10. 奥陶系; 11. 寒武系上统; 12. 寒武系中统; 13. 寒武系下统; 14. 震旦系 Z; 15. 南华系 Nh; 16. 燕山期侵入岩; 17. 断层)

图 1 安徽省宁国市地质图(A)与采样点位图(B)

检验和 Levene 检验评估数据的正态性和方差齐性。采用单因素方差分析(One-way ANOVA)评估不同土地利用方式下土壤理化性质和土壤质量的差异。利用 R(版本 4.3.2)对各土壤理化性质和土壤质量进行总体的相关性分析。其余图表使用 OriginPro 2024 软

件绘制。

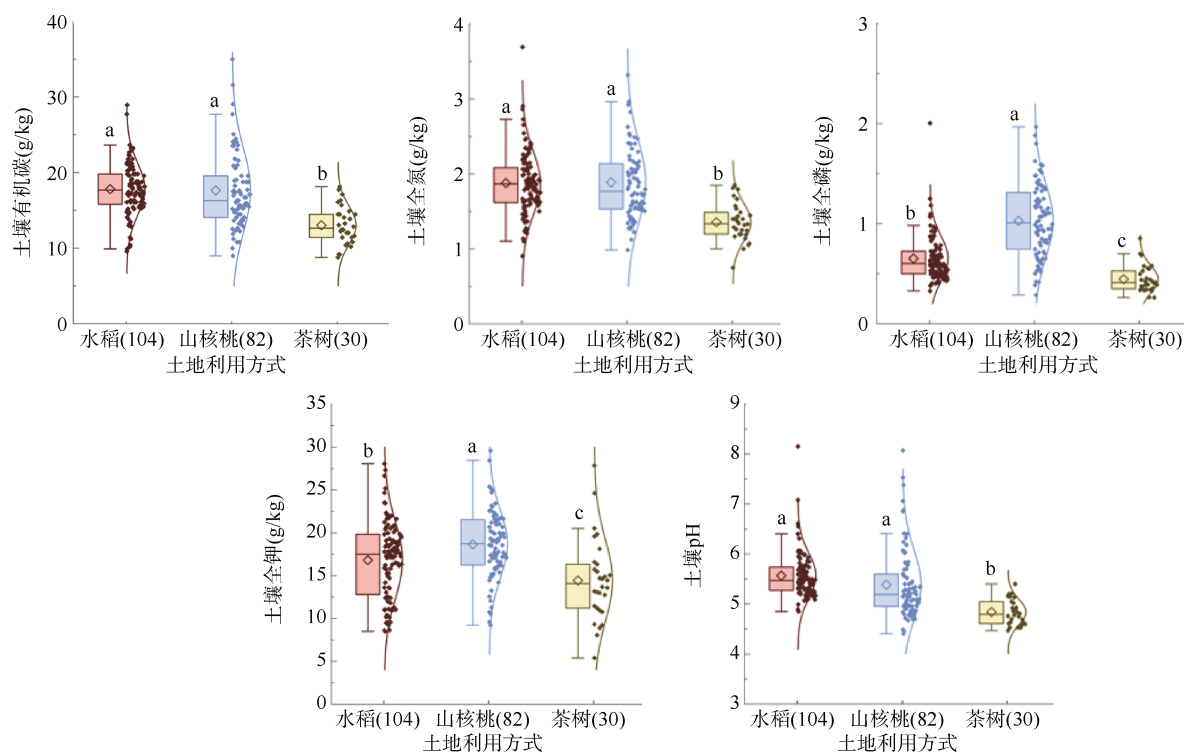
2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤常量元素的差异

由图 2 可知,水稻种植区的土壤有机碳含量与山

核桃种植区无显著差异,但茶树种植区的土壤有机碳含量较山核桃种植区显著降低了 26% ($P<0.05$)。与山核桃种植区相比,水稻种植区土壤全氮含量无显著变化,但茶树种植区全氮含量显著降低了 28%;水稻种植区和茶树种植区土壤全磷含量分别显著降低了

37% 和 57%,土壤全钾含量分别显著降低了 10% 和 23%。此外,与山核桃种植区相比,水稻种植区土壤 pH 无显著变化,但茶树种植区土壤 pH 显著降低了 10%。总之,山核桃种植区土壤有机质及其他常量元素含量相对较高。



(图中不同小写字母表示不同土地利用方式间差异显著 ($P<0.05$); 横坐标括号中的数字代表取样点数; 下同)

图 2 不同土地利用方式下土壤有机碳、全氮、全磷、全钾和 pH 的差异

2.2 不同土地利用方式下土壤微量元素的差异

不同土地利用方式下土壤微量元素含量存在显著差异 ($P<0.05$, 图 3)。相较于山核桃种植区,水稻种植区和茶树种植区土壤锌含量分别显著降低了 29% 和 47%;土壤硼含量分别显著降低了 11% 和 17%;土壤铜含量分别显著降低了 37% 和 54%;水稻种植区土壤锰含量显著降低了 71%,而茶树种植区与之无显著差异;土壤硒含量分别显著降低了 48% 和 52%;土壤钴含量分别显著降低了 38% 和 23%;土壤钼含量分别显著降低了 72% 和 62%;土壤镍含量分别显著降低了 31% 和 39%;土壤钒含量分别显著降低了 31% 和 49%。总之,山核桃种植区土壤微量元素含量相对较高。

2.3 不同土地利用方式下土壤质量的差异

不同土地利用方式下土壤质量存在显著差异 ($P<0.05$, 图 4)。相较于山核桃种植区,水稻种植区和茶树种植区土壤质量指数分别显著降低了 46% 和 67%。此外,相关分析结果表明,土壤有机碳与氮、

磷、锌、铜、硒、镍和钒元素呈显著的正相关关系,而与锰呈显著的负相关关系(图 5)。土壤质量与所测定的土壤理化性质均呈显著的正相关关系。

3 讨论

3.1 不同土地利用方式下土壤碳固持与养分特征的差异

本研究揭示了宁国市水稻、山核桃、茶树 3 种土地利用方式下土壤碳固持、养分含量及土壤质量指数 (SQI) 存在显著差异。这一结果与已有研究在经济林、农田及茶园等不同利用方式下的土壤碳固持对比研究结果相一致^[13],表明长期经济林种植对土壤有机质积累具有积极作用。山核桃作为深根性经济林树种,具有较强的枯落物返还和生物质循环能力^[14]。其深根系不仅能够吸收土壤深层的养分,还能通过根系分泌物及枯落物的降解,为土壤提供持续的有机碳输入。这一过程促进了土壤有机质的稳定,减少了有机碳的矿化损失^[15]。此外,山核桃林地的长期稳定

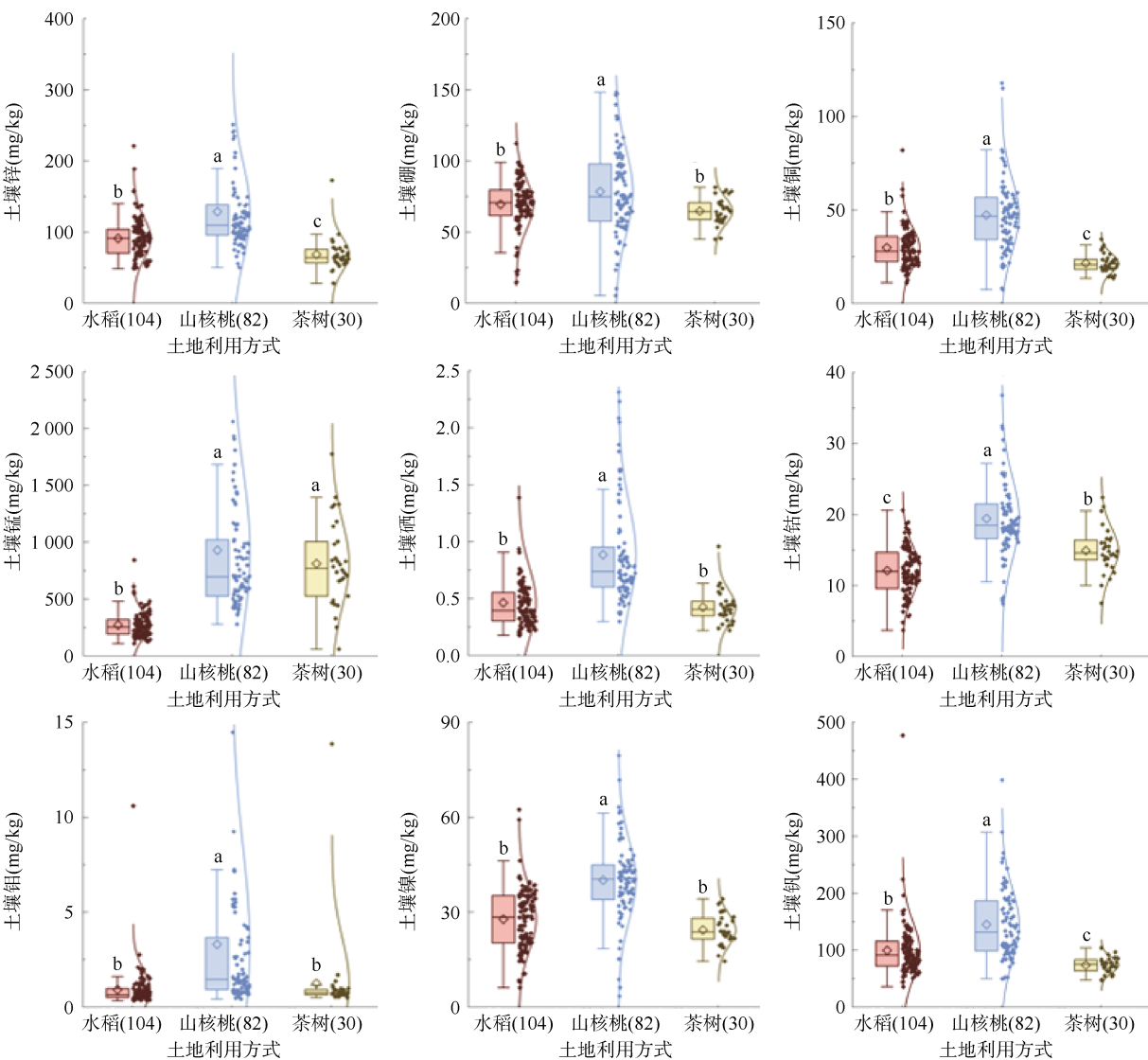


图 3 不同土地利用方式下土壤锌、硼、铜、锰、硒、钴、钼、镍和钒含量的差异

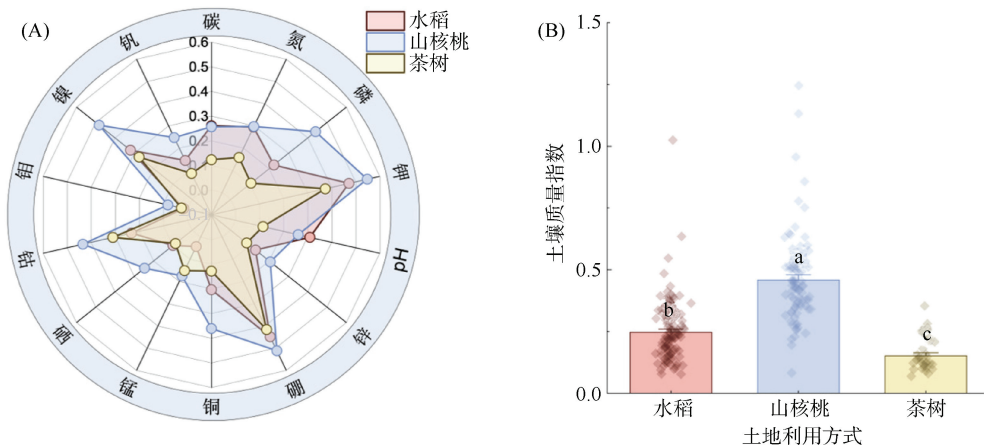


图 4 不同土地利用方式对土壤性质相对响应的雷达图(A)和不同土地利用方式的土壤质量指数(B)

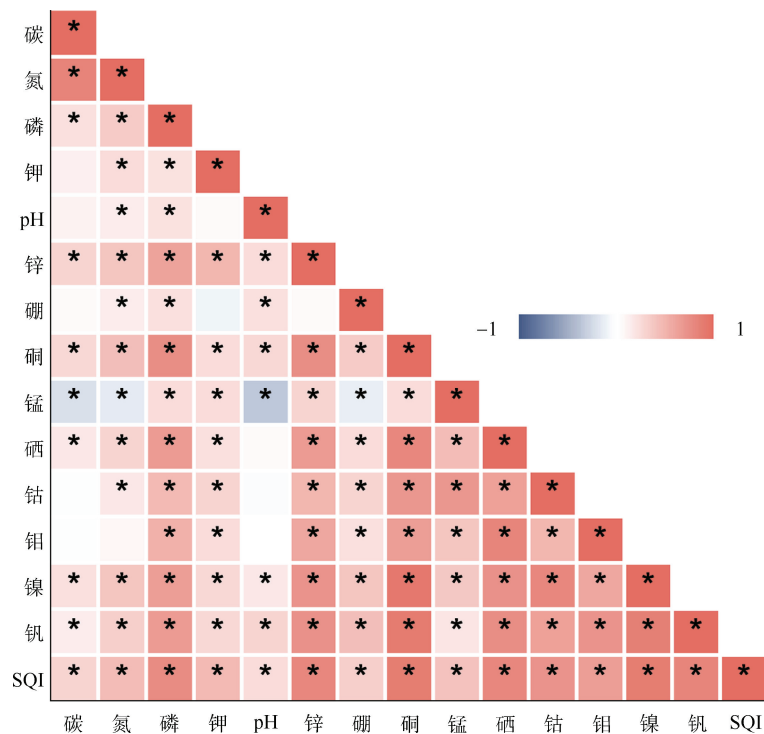


图 5 土壤常量元素、微量元素与土壤质量指数(SQI)之间的相关性

性和较低的干扰使得其土壤微生物群落的活性和结构较为均衡，从而增强了有机质的积累和转化^[16]。相较之下，茶园由于长期的土壤扰动和不均衡的施肥管理措施，导致土壤有机质积累效果较差。茶园的低有机物返还和频繁的除草、修剪等人工干预，使得土壤有机质的积累受到限制^[17]。此外，本研究发现，山核桃种植区土壤有机质水平与水稻田有机质水平没有显著差异(图 2)。水稻田长期的灌溉管理有助于稳定土壤中的水分含量，湿润的环境可以减缓有机物的分解速度，尤其是在较低的土壤温度下微生物的分解活动更会受到抑制^[18]。因此，水稻田的有机质积累并未显著低于山核桃林地。在特定的气候和管理条件下，水稻田的有机质储量可能与山核桃林地接近，尤其是在水稻田有机肥施用较为充足的情况下，土壤有机质积累能得到一定的改善^[19]。尽管山核桃种植区有较高的土壤有机质积累潜力，但在与水稻田的对比中，二者的差异并不显著，这可能表明在特定的管理条件下，水稻田通过有效的水分管理、施肥措施和秸秆还田等途径，能够在一定程度上弥补土壤有机质的流失^[20]。

3.2 不同土地利用方式下土壤质量差异的成因

本研究结果表明，山核桃种植区的土壤质量明显优于水稻和茶树种植区(图 4)。这一结果主要是由于山核桃种植区土壤中常量元素和微量元素含量较高(图 2 和图 3)。相关分析表明，常量元素和微量元素

与土壤质量指数呈正相关，进一步证明了这一结果(图 5)。山核桃种植区土壤中的微量元素(如锌、铜、镍、硼等)含量显著高于茶园和水稻田(图 3)，这些微量元素对植物生长和土壤质量具有重要影响^[21]。微量元素不仅是植物必需的养分，还在土壤微生物活性和土壤结构的稳定中起到了至关重要的作用。例如，锌和铜是植物生长所必需的微量元素，其参与植物的代谢过程，影响植物的抗病性和抗逆性^[22]。而硼元素则在促进植物根系生长和花粉管发育方面具有重要功能，进一步推动土壤生态系统的健康^[23]。山核桃属于深根性植物，其深根系不仅能够从土壤深层吸收常量元素，还能够有效地从下层土壤中吸取微量元素^[24]。山核桃的根系分泌物和枯落物能够将这些微量元素返还到土壤中，从而提升土壤中微量元素的可利用性和稳定性^[25]。相比之下，水稻田的灌溉管理虽然有助于稳定土壤水分，但由于水稻的根系浅，吸收微量元素的能力相对较弱，且水稻生长周期短，土壤中微量元素的积累效果有限^[26]。而茶园茶树虽然根系较深，但由于长期的化肥施用，导致土壤酸化，抑制了某些微量元素的有效性，尤其是锌、铜等元素的可利用性下降^[27]。另外，茶园养分管理中对化学肥料的依赖，使得土壤微量元素未能得到有效补充，导致茶园土壤中微量元素含量较低，不利于土壤质量的提高。

此外，山核桃种植区的土壤质量较高，还主要得益于山核桃林地的稳定性和较少的土壤干扰。山核桃

的深根系能够维持土壤的结构稳定性,减少土壤侵蚀和养分流失,并促进土壤中有机的稳定。这使得山核桃种植区的土壤能够保持较高的微生物活性和养分循环效率,从而维持较高的土壤质量^[28]。此外,氮、磷和钾含量是土壤养分的重要指标,直接关系到土壤的肥力和植物生长潜力。山核桃种植区土壤中的氮、磷、钾含量也相对较高,为植物提供了必需的营养来源,并且对土壤微生物的活性和多样性起到了促进作用,从而促进了植物的生长和土壤生态系统的稳定,进而有利于维持较高的土壤质量。

土壤 pH 是反映土壤酸碱度的重要指标,直接影响养分的有效性、微生物活性以及植物对养分的吸收能力^[29]。山核桃种植区的土壤 pH 呈中性,适宜大多数植物的生长。这一结果与茶园土壤的酸化形成鲜明对比。茶园由于化肥依赖性相对较高,土壤呈现较低的 pH,抑制了某些重要微量元素的有效性,导致较低的土壤质量。而水稻田由于长期水浸灌溉和肥料的施用,也可能导致土壤酸化,进而影响土壤的养分状况和微生物活性^[30]。山核桃种植区的土壤 pH 适中,既能保证微量元素和主要养分的有效性,又能够促进微生物群落的多样性和活性。这种适宜的 pH 为土壤质量的维持提供了良好的生态基础。

总体而言,土壤质量差异(山核桃种植区>水稻种植区>茶树种植区)是特定自然环境背景下,长期不同土地利用方式及其配套管理措施综合作用的结果。宁国市山核桃种植区多分布于丘陵地带,其相对稳定的森林生态系统特性(深根系、高凋落物、低扰动)与潜在的适宜母质背景相结合,共同促成了较高的土壤养分库容和土壤质量;而茶园高强度、高扰动的管理模式(频繁耕作、施肥、修剪)是导致其土壤质量相对较低的主导因素;水稻田则受益于特定的水分管理,使其有机碳得以稳定,但其常量养分和微量元素含量受耕作制度和生物量移出的制约。

4 结论

本研究对宁国市典型土地利用方式土壤质量的综合评价显示,山核桃种植区土壤质量指数(SQI)最高,水稻种植区次之,茶树种植区最低。山核桃种植区在土壤有机碳(与水稻种植区无显著差异)、常量元素(氮、磷、钾)及多种微量元素(锌、硼、铜、硒、钴、钼、镍、钒)含量上均表现出相对优势。这些差异与成土母质、地形和地球化学背景以及土地利用方式密切相关。

参考文献:

- [1] Schmidt M W I, Torn M S, Abiven S, et al. Persistence of soil organic matter as an ecosystem property[J]. *Nature*, 2011, 478: 49–56.
- [2] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304: 1623–1627.
- [3] 焦加国, 武俊喜, 李辉信, 等. 华南丘陵区村级景观下土地利用/土地覆盖对土壤质量的影响[J]. *土壤学报*, 2007, 44(2): 204–211.
- [4] Yan Z J, Zhou J, Liu C Y, et al. Legume-based crop diversification reinforces soil health and carbon storage driven by microbial biomass and aggregates[J]. *Soil and Tillage Research*, 2023, 234: 105848.
- [5] Yan Z J, Chu J C, Nie J W, et al. Legume-based crop diversification with optimal nitrogen fertilization benefits subsequent wheat yield and soil quality[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2024, 374: 109171.
- [6] 张新荣, 刘林萍, 方石, 等. 土地利用、覆被变化(LUCC)与环境变化关系研究进展[J]. *生态环境学报*, 2014, 23(12): 2013–2021.
- [7] 杜腾飞, 齐伟, 朱西存, 等. 基于生态安全格局的山地丘陵区自然资源空间精准识别与管制方法[J]. *自然资源学报*, 2020, 35(5): 1190–1200.
- [8] 张楠楠, 张万军, 曹建生, 等. 河北 38°N 生态样带土壤有机碳特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(10): 1277–1284.
- [9] 张恒, 陈锐帆, 林嘉蓓, 等. 微量元素在林木中的应用研究进展[J]. *南京林业大学学报(自然科学版)*, 2022, 46(5): 229–239.
- [10] Singh B R, Gupta S K, Azaizeh H, et al. Safety of food crops on land contaminated with trace elements[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(8): 1349–1366.
- [11] 中华人民共和国国土资源部. 土地质量地球化学评价规范: DZ/T 0295—2016[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
- [12] 中国地质调查局. 生态地球化学评价样品分析技术要求(试行): DD 2005—03 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2005.
- [13] 谢林峰, 凌晓晓, 黄圣妍, 等. 临安区山核桃林地土壤水解酶活性空间分布特征及土壤肥力评价[J]. *浙江农林大学学报*, 2022, 39(3): 625–634.
- [14] 薄慧娟, 朱嘉磊, 文春燕, 等. 栽植密度对毛白杨林地土壤垂直方向养分的影响[J]. *浙江农林大学学报*, 2020, 37(2): 266–272.
- [15] 龙吉兰, 蒋铮, 刘定琴, 等. 干旱下植物根系分泌物及其介导的根际激发效应研究进展[J]. *植物生态学报*, 2024, 48(7): 817–827.
- [16] 张红桔, 马闪闪, 赵科理, 等. 山核桃林地土壤肥力状况及其空间分布特征[J]. *浙江农林大学学报*, 2018, 35(4): 664–673.

- [17] 齐丹卉, 郭辉军, 崔景云, 等. 云南澜沧景迈古茶园生态系统植物多样性评价[J]. 生物多样性, 2005, 13(3): 221–231.
- [18] 陈晓旋, 安婉丽, 陈优阳, 等. 模拟酸雨对福州平原水稻田土壤化学结合态有机碳含量的影响[J]. 环境科学学报, 2018, 38(12): 4796–4804.
- [19] Yu Q G, Hu X, Ma J W, et al. Effects of long-term organic material applications on soil carbon and nitrogen fractions in paddy fields[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 196: 104483.
- [20] 冯晓赟, 万鹏, 李洁, 等. 秸秆还田与氮肥配施对中南地区稻田土壤固碳和温室气体排放的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2016, 33(6): 508–517.
- [21] 刘桂兰. 微量元素对植物生长发育的作用[J]. 现代农村科技, 2009(3): 55.
- [22] 薛永, 王苑嫫, 姚泉洪, 等. 植物对土壤重金属镉抗性的研究进展[J]. 生态环境学报, 2014, 23(3): 528–534.
- [23] 张恒, 陈锐帆, 林嘉蓓, 等. 微量元素在林木中的应用研究进展[J]. 南京林业大学学报(自然科学版), 2022, 46(5): 229–239.
- [24] Rivero Socorro H T. Management of vegetal covers on Pecan tree with fertilizer irrigation[J]. Scientific Research and Essays, 2013, 7(23): 1073–1081.
- [25] Rodriguez-Ramos J C, Scott N, Marty J, et al. Cover crops enhance resource availability for soil microorganisms in a pecan orchard[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2022, 337: 108049.
- [26] 周伟, 吕腾飞, 杨志平, 等. 氮肥种类及运筹技术调控土壤氮素损失的研究进展[J]. 应用生态学报, 2016, 27(9): 3051–3058.
- [27] 杨向德, 石元值, 伊晓云, 等. 茶园土壤酸化研究现状和展望[J]. 茶叶学报, 2015, 56(4): 189–197.
- [28] 胡颖槟, 金锦, 童志鹏, 等. 山核桃人工林土壤肥力研究进展[J]. 浙江农林大学学报, 2021, 38(5): 1066–1075.
- [29] Naz M, Dai Z C, Hussain S, et al. The soil pH and heavy metals revealed their impact on soil microbial community[J]. Journal of Environmental Management, 2022, 321: 115770.
- [30] 徐影, 于镇华, 李彦生, 等. 土壤酸化成因及其对农田土壤-微生物-作物系统影响的研究进展[J]. 土壤通报, 2024, 55(2): 562–572.

(责任编辑: 于 飞)