

引用格式: 刘长媛, 韩文昊, 田永任, 王泽民, 王延平. 鲁中南低山丘陵区土壤理化性质的空间分异及其遥感评估[J]. 山地学报, 2024, 42(4): 442-455.

LIU Changyuan, HAN Wenhao, TIAN Yongren, WANG Zemin, WANG Yanping. Spatial heterogeneity of soil properties by remote sensing assessment in the mid-southern hilly regions of Shandong province, China [J]. Mountain Research, 2024, 42(4): 442-455.

鲁中南低山丘陵区土壤理化性质的空间分异及其遥感评估

刘长媛¹, 韩文昊¹, 田永任¹, 王泽民², 王延平^{1*}

(1. 山东农业大学 林学院, 山东 泰安 270018; 2. 蒙阴县国有林场总场, 山东 临沂 276200)

摘要: 鲁中南低山丘陵区生态系统脆弱, 水土流失严重。作为生物生存的基石, 区域土壤理化性质存在空间变异性, 深入剖析其分布特征对于生态修复与保护具有生物学价值。地面调查等常规调查方法存在耗时费力、对遥感影像及实验数据要求较高、评估周期较长等局限性。本文选择鲁中南低山丘陵山地建立典型样地, 采用地统计学方法揭示土壤理化性质空间异质性规律, 并结合无人机影像判读建立空间解译数据与地面调查数据的相关性。结果表明: (1) 在鲁中南低山丘陵区, 土壤厚度、砾石比、岩石裸露比三项指标呈现较高的空间变异, 变异系数分别为 54.16%、72.28%、61.11%, 土壤 pH 值和容重变异幅度较小。(2) 土壤有机质、全氮和全磷的空间变异性较低, 变异系数为 22%~28%; 速效养分中铵态氮含量变异幅度达 89%, 其次为速效磷 50%; 土壤综合养分指数呈现较强的空间变异。(3) 海拔、坡度、坡向对土壤理化性质的解释度依次为 10.4%、4.3% 和 2.7%, 均达到显著水平, 是影响土壤理化性质空间异质性最主要的三个地形因子。研究表明, 空间解译数据反演方法可以快速、准确地厘清土壤理化性质的空间变化规律与主控因素, 可为开展鲁中南低山丘陵区大尺度立地条件评估提供依据。

关键词: 土壤理化性质; 地形植被因子; 空间变异; 遥感评估; 鲁中南山地

中图分类号: S158

文献标志码: A

鲁中南山地丘陵, 作为山东省“两屏三带”生态安全战略格局的核心组成, 是重要的水土保持与水源涵养生态修复区。然而, 该区域生态系统脆弱, 省内 70% 水土流失面积来自于该区域^[1]。准确评估土壤理化性质是区域造林树种选择和植被修复等生态修复工作的前提^[2]。探究土壤理化性质的空间变异与环境因子的反演机制, 对促进鲁中南山地丘陵土壤的可持续利用具有重要意义。

针对鲁中南山地丘陵的土壤调查, 前期方法

多基于不同立地条件划分下的常规地面调查, 侧重于分析不同林分下的土壤质量, 但植被类型划分相对单一, 未能充分展现不同林分下的土壤性质差异。研究已明确指出^[3-5], 鲁中南山地丘陵区的林分密度、林龄等可影响土壤质量, 土壤碳氮含量与有机碳含量的稳定性具有内在联系, 与时空变化密切相关。

面对常规地面调查方法耗时耗力、评估周期冗长的挑战, 对地数字近景测量技术已经开始应用于

收稿日期 (Received date): 2022-10-17; 改回日期 (Accepted date): 2024-08-29

基金项目 (Foundation item): 山东省重点研发计划科技专项 (2021SFGC020503); 山东省农业科技资金 (林业科技创新) 项目 (2019LY005)。

[Shandong Province Key R&D Program Science and Technology Special Project (2021SFGC020503); Shandong Province Agricultural Science and Technology Fund (Forestry Science and Technology Innovation) Project (2019LY005)]

作者简介 (Biography): 刘长媛 (1999-), 女, 山东临沂人, 硕士, 主要研究方向: 困难立地植被修复与遥感应用。[LIU Changyuan (1999-), female, born in Linyi, Shandong province, M. Sc., research on difficult site vegetation restoration and remote sensing application] E-mail: 2021120301@sda.u.edu.cn

* 通讯作者 (Corresponding author): 王延平 (1978-), 男, 博士, 教授, 主要研究方向: 人工林培育和困难立地植被重建。[WANG Yanping (1978-), male, Ph. D., professor, research on plantations cultivation and difficult site vegetation reconstruction] E-mail: wangyp@sda.u.edu.cn

区域土地资源调查。其中,遥感(Remote sensing, RS)技术已成为研究土壤养分空间变异、高效解析土壤-植被相互作用关系的关键工具^[6-8]。尽管高光谱遥感数据在土壤养分反演方面展现出巨大潜力,但囿于影像质量的高要求及模型构建对裸土期数据的依赖,限制了其在林地土壤养分预测中的广泛应用;基于植被指数法的经验统计模型,在干旱贫瘠、植被覆盖稀疏的鲁中南低山丘陵区,其预测精度与稳定性亦难以保证^[9-10]。

无人机航测技术相对于遥感等传统航空摄影具有成本低廉、操作控制简便、时效和空间分辨率高等优势,能够在一定程度上弥补卫星遥感技术在空间分辨率和时间分辨率上的不足,对于开展区域尺度立地条件评估具有重要作用^[11]。采用GIS(Geographic Information System)等技术手段获取空间数据并进一步反演土壤质量变化已成为开展区域尺度立地条件评估的新趋势^[12]。

研究表明^[13-15],土壤全氮(Total nitrogen content, TN)和有机质(Organic matter content, OM)含量与地形因子之间呈现较强的空间相关性^[16],且土壤养分空间异质性受地上植被生长情况与海拔(Elevation, ELE)的影响显著^[17-18],植被覆盖度(Fractional vegetation cover, FVC)也与土壤全碳(Total carbon content, TC)、全氮含量等养分指标呈显著正相关关系。然而,针对鲁中南山地丘陵的立

地评价,尚未建立起地形因子-植被状况-土壤养分三者之间的系统关联,不利于区域内土壤理化性质的准确评估和植被重建。

本研究选取鲁中南低山丘陵区典型样地,利用无人机采集地面植被和地形数据,同时开展样地土壤理化性质测定分析,分析地形因子-植被状况-土壤质量的空间分异性及其相关性,旨在为高效开展区域尺度立地条件评估和植被修复工作提供科学支撑。

1 研究区概况

选择典型鲁中南低山丘陵区并建立150 hm²样地,地理位置为117°46'E、35°45'N,海拔273~410 m,属于温带季风气候。土壤以棕壤为主,母岩是以片麻岩为主的酸性岩类且风化较为严重,基岩裸露面积较大。由于长期垦殖作业,区域内原始植被残留较少,主要为侧柏(*Platycladus orientalis*)、黄连木(*Pistacia chinensis*)、麻栎(*Quercus acutissima*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)和核桃(*Juglans regia*)等树种的人工林。区域内界面性气候导致年均温和降水量随海拔高度变化明显,特别是夏季降雨多以暴雨的形式出现,在雨水冲刷的作用下,水土流失情况较为严重。研究区样地植被基本情况如表1所示。

表1 样地植被基本情况表

Tab. 1 Basic information of the sample plot vegetation

| 种名 | 拉丁学名 | 树高/m | 胸径/cm | 冠幅/m |
|-------|-------------------------------|-------------|--------------|-------------|
| 侧柏 | <i>Platycladus orientalis</i> | 2.50 ± 1.03 | 3.00 ± 0.15 | 0.45 ± 0.02 |
| 麻栎 | <i>Quercus acutissima</i> | 3.00 ± 0.41 | 3.50 ± 0.03 | 1.25 ± 0.23 |
| 刺槐 | <i>Robinia pseudoacacia</i> | 5.00 ± 0.20 | 4.50 ± 1.11 | 1.35 ± 0.34 |
| 核桃 | <i>Juglans regia</i> | 4.50 ± 1.12 | 3.50 ± 0.39 | 2.25 ± 0.59 |
| 苦楝 | <i>Melia azedarace</i> | 3.80 ± 0.19 | 3.00 ± 1.01 | 1.50 ± 0.83 |
| 柿树 | <i>Diospyros kaki</i> | 5.50 ± 1.45 | 4.00 ± 1.93 | 2.30 ± 1.42 |
| 臭椿 | <i>Ailanthus altissima</i> | 6.70 ± 1.39 | 11.20 ± 0.69 | 4.85 ± 1.23 |
| 君迁子 | <i>Diospyros lotus</i> | 3.50 ± 0.64 | 7.50 ± 1.52 | 3.75 ± 0.23 |
| 连翘 | <i>Forsythia suspensa</i> | 3.00 ± 1.53 | 2.50 ± 0.62 | 1.70 ± 0.35 |
| 金钟花 | <i>Forsythia viridissima</i> | 1.20 ± 0.93 | 1.50 ± 0.13 | 1.25 ± 0.34 |
| 黄栌 | <i>Cotinus coggygria</i> | 5.50 ± 0.41 | 7.50 ± 1.63 | 5.25 ± 1.22 |
| 白蜡 | <i>Fraxinus chinensis</i> | 2.50 ± 1.13 | 2.00 ± 0.38 | 1.25 ± 0.17 |
| 皂荚 | <i>Gleditsia sinensis</i> | 4.00 ± 0.67 | 2.50 ± 1.98 | 2.75 ± 1.13 |
| 华北五角枫 | <i>Acer truncatum</i> | 2.00 ± 0.19 | 1.50 ± 0.52 | 2.25 ± 0.49 |
| 花椒 | <i>Zanthoxylum bungeanum</i> | 3.30 ± 0.66 | 2.50 ± 1.31 | 2.75 ± 1.23 |

2 研究方法

2.1 无人机航测与空间数据解译

于 2019 年 10 月 31 日通过大疆无人机 Phantom 4 Pro V2.0 在研究区共获取航摄影像 213 张,飞行高度为 274 m,航线速度为 1.8 m/s,地面分辨率为 6.8 cm/pix,测区范围约 1.45 km²。飞行当日气温 9 ℃~22 ℃,南风 1 级,相对湿度 72%,紫外线强,影像质量较高。

参照研究^[18-19],同时结合研究区地形和植被特点,选取海拔、坡度(Slope, SLO)、坡向(Aspect, ASP)、坡位(Slope position, SP)4 个地形因子,以及一个植被因子——植被覆盖度。研究区数字高程模型(Digital elevation model, DEM)通过 Agisoft photoscan 软件进行预处理。其中,海拔、坡度、坡向、坡位指标在 Arc GIS 中利用空间分析工具中的相关工具对应生成并提取至采样点;植被覆盖度则通过 ENVI5.3 软件构建可见光植被指数(Visible-band difference vegetation index, VDVI)像元二分模型进行估算^[20-26]。

2.2 土壤样本采集

依照《耕地地力调查与质量评价技术规程》^[27](NY/T1634-2008),共布设 68 处样地 214 个采样点,通过 Arc GIS 软件将采样点坐标数据转换为具有空间坐标系的图层生成样方位置图(图 1)。由于样地土层较薄,不宜采用分层取样的方式,因此在各

取样点移除土壤表面碎石与枯落物后,挖取土壤剖面至母质层岩石,每一个取样点各取 3 次重复,同时将样本利用重复四分法筛选出一个样本,用封口袋收集各样点土壤约 500 g 并充分混合均匀,用环刀法获取原状土测定土壤容重。

2.3 土壤理化性质测定

根据样地内的地形地貌、地表覆被等因素进行实地勘察与取样,记录岩石裸露比(Bare rock ratio, BRR)信息,实地测量样地内的土壤厚度(Soil thickness, ST),采用环刀取样测定砾石比(Gravel ratio, GR)和土壤容重(ρ_b),采用电位法测定土壤 pH 值。所采集土壤样品经自然风干后测定有机质、全氮、全磷(Total phosphorus content, TP)、速效磷(Olsen-P, OP)、铵态氮($\text{NH}_4^+ - \text{N}$)和硝态氮($\text{NO}_3^- - \text{N}$)的含量,测定方法参照参考文献。

2.4 数据处理

采用 SPSS 24.0 软件对数据进行统计分析。使用 GS+9.0 地统计分析软件中提供的半方差函数拟合变量空间结构,基于块金值与基台值的比值大小(块金系数)衡量变量的空间自相关程度,并依据 R^2 最大、RSS(Residual sum of squares)最小的原则选择最优模型。根据 GS+9.0 里生成的最优模型结果,利用 Arc GIS 进行 Kriging 插值。插值过程通过自然间断分级法将土壤理化特征分为 7 个等级,直观呈现各指标的空间分布差异与规律。通过 Canoco 5.0 软件进行土壤理化性质与地形因子关系的去趋势对应分析(Detrended correspondence analysis, DCA)和冗余分析(Redundancy analysis, RDA)。

3 结果分析

3.1 土壤理化性质的空间变异性及其相关性

3.1.1 土壤物理和酸性特征

样地土壤厚度、砾石比、岩石裸露比三项指标变异程度略高,达到 54.16%、72.28%、61.11%(表 2);土壤容重和 pH 值两项指标变异系数相对较小,分别为 14.30%、2.00%;土壤容重为变幅 0.83~1.6 g/cm³,pH 均值为 7.68;砾石比与岩石裸露比两指标变幅较大。经单样本 K-S 检验,砾石比、土壤容重、pH 服从正态分布($P > 0.05$)。土层厚度、岩石裸露比未能通过检验,将数据进行取对数转

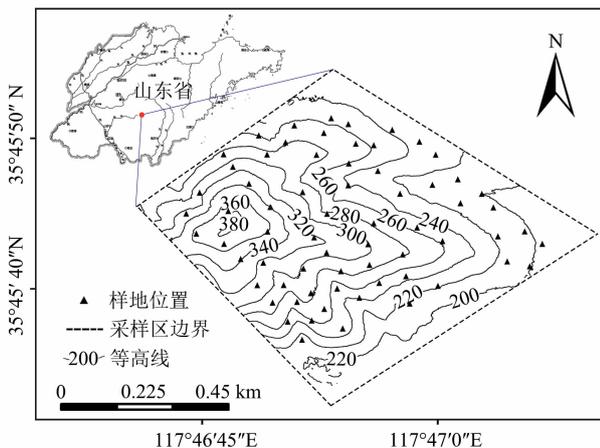


图 1 研究区样地位置分布图

Fig. 1 Location of the study plots, China

(审图号:GS(2019)3333 号)

表 2 土壤物理因子一般性指标
Tab. 2 General indicators of the soil physical factors

| 土壤物理因子 | 变幅 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/% | 峰度 | 偏度 | P | 数据转换 |
|--------|-----------|------|------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 土壤厚度 | 5~30 | 7.99 | 4.32 | 54.16 | 10.04 | 2.61 | <0.05 | 对数 log |
| 砾石比 | 0~80 | 0.29 | 0.21 | 72.28 | -0.35 | 0.72 | 0.20 | - |
| 岩石裸露 | 5~90 | 0.35 | 0.21 | 61.11 | -0.03 | 0.90 | <0.05 | 对数 log |
| 土壤容重 | 0.83~1.60 | 1.16 | 0.17 | 14.30 | -0.04 | 0.23 | 0.20 | - |
| pH 值 | 7.27~7.95 | 7.68 | 0.15 | 2.00 | -0.36 | -0.21 | 0.20 | - |

换处理,结果服从正态分布,符合进行空间插值计算要求。

3.1.2 土壤物理性质和酸碱性的空间变异性

经半变异函数拟合后(图 2),除砾石比外,各指标半方差模型拟合系数为 0.632~0.996(表 3),其中土壤厚度、砾石比、土壤容重和 pH 值呈现显著空间相关(块金系数 <25%),表明其分布主要由结构性因素引起,空间破碎化程度高。岩石裸露比的块金系数为 49.91%,变程大于 500 m,说明该变量空间连续性较好,主要受随机和结构性因素影响较大。砾石比和土壤容重变程小于 100 m,

说明这两项指标的空间连续性最差,破碎化程度最高。

数据空间插值结果显示(图 3),研究区整体土壤物理因子呈带状与片状分布,局部地区呈现空间异质性。土层厚度和岩石裸露比连续性较好,砾石比与土壤容重多在海拔较低区域呈现增大趋势,且存在破碎化分布,此结果与前述半方差分析结果一致。

3.1.3 土壤养分特征

表 4 显示土壤养分基本特征在样地内呈现显著空间变异性。其中,有机质、全氮、全磷、硝态氮 4 项土壤养分指标变异系数小于 25%,属于中等变异;

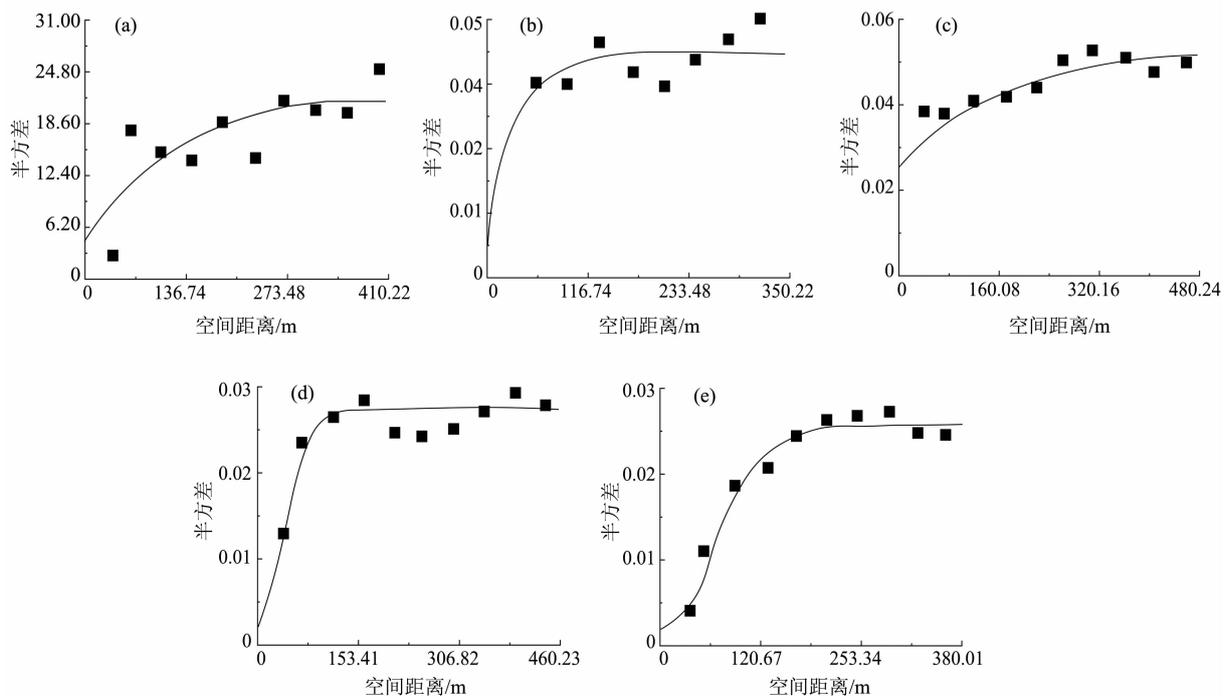


图 2 土壤物理和 pH 值的最优半方差函数图:

(a) 土壤厚度; (b) 砾石比; (c) 岩石裸露比; (d) 土壤容重; (e) pH 值

Fig. 2 Optimal semi-variance function of soil physical and pH values:

(a) soil thickness; (b) gravel ratio; (c) bare rock ratio; (d) soil bulk density; (e) pH value

表 3 土壤物理性质和 pH 值的半方差模型及参数

Tab. 3 Semi-variance models and parameters of the soil physical properties and pH values

| 土壤物理性质 | 理论模型 | 块金值 | 基台值 | 块金系数/% | 决定系数 | 残差 | 变程/m |
|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|------|
| 土壤厚度 | 指数模型 | 0.004 | 0.023 | 15.720 | 0.632 | 0.102 | 250 |
| 砾石比 | 线性模型 | 0.001 | 0.042 | 3.300 | 0.217 | 0.001 | 96 |
| 岩石裸露比 | 指数模型 | 0.029 | 0.058 | 49.910 | 0.846 | 0.001 | 731 |
| 土壤容重 | 高斯模型 | 0.002 | 0.027 | 6.190 | 0.865 | 0.000 | 89 |
| pH 值 | 高斯模型 | 0.002 | 0.026 | 6.800 | 0.996 | 0.000 | 159 |

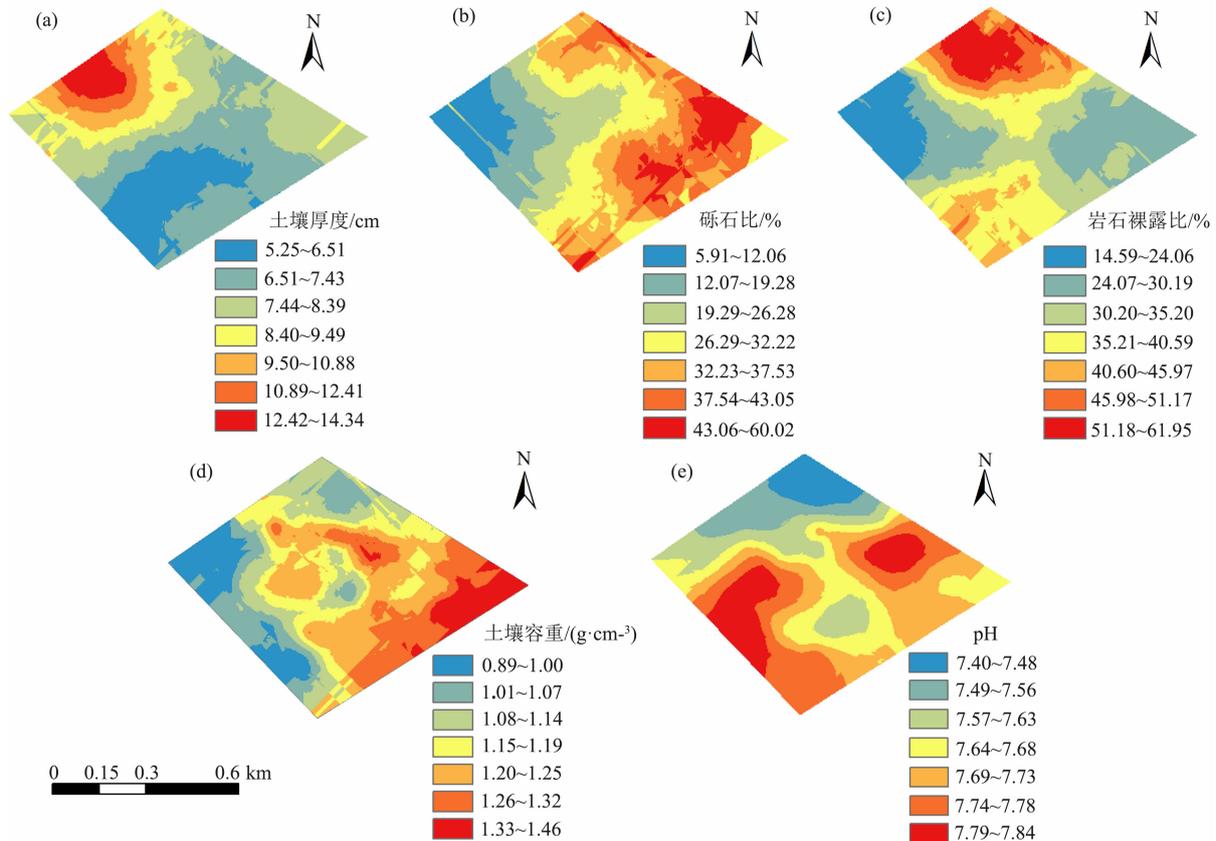


图 3 土壤物理和 pH 值的空间变异性:

(a) 土壤厚度; (b) 砾石比; (c) 岩石裸露比; (d) 土壤容重; (e) pH 值

Fig. 3 Spatial variability of the soil physical and pH values;

(a) soil thickness; (b) gravel ratio; (c) bare rock ratio; (d) soil bulk density; (e) pH value

速效磷、铵态氮的变异程度略高, 达 50.23% 和 88.89%, 属于高度变异。土壤硝态氮平均含量 26.41 mg/kg, 约为铵态氮的平均含量 6.77 mg/kg 的 4 倍, 这可能与两种氮素形态自身理化性质及微地形特征有关。K-S 检验结果显示, 有机质、全氮、全磷、硝态氮四项养分指标服从正态分布 ($P > 0.05$); 铵态氮、速效磷经取对数与开平方根转换处理后, 结果服从正态分布。因此, 土壤养分数据符合进行空间插值的计算要求。

3.1.4 土壤养分因子空间变异性

高斯模型是土壤有机质、铵态氮、速效磷的最佳拟合模型, 土壤全氮、全磷、硝态氮与球状模型可以很好拟合(表 5), 各半方差模型决定系数均大于 0.7, 说明研究变量与模型之间的拟合度较高, 能够充分反映 6 种养分在研究区域尺度下的自相关规律特征。其中有机质、硝态氮块金系数为 20% ~ 50%, 具有中等空间自相关性, 表明有机质和硝态氮的大小受到一定的随机因素控制。其他养分指

标块金系数均 < 20% , 具有较强的空间自相关, 说明其分布主要受自然因素影响, 受随机因素的影响较小。变程结果显示, 各养分自相关距离变幅较大, 其中有机质、全氮、全磷、铵态氮变程较小,

均小于 200 m, 说明其在采样区斑块连续性较差, 破碎化程度高; 而硝态氮、速效磷的变程为 500 ~ 1000 m, 表明其在相近采样点上差异性较小, 连续性、相似性较好(图 4)。

表 4 土壤养分含量一般性指标
Tab. 4 General indicators of the soil nutrient content

| 土壤养分因子 | 变幅 | 平均值 | 标准差 | 变异系数/% | 峰度 | 偏度 | P | 数据转换 |
|--------|---------------|-------|-------|--------|-------|-------|-------|--------|
| 有机质 | 28.56 ~ 80.61 | 57.13 | 13.03 | 22.80 | -0.74 | -0.25 | 0.200 | - |
| 全氮 | 0.82 ~ 3.53 | 2.24 | 0.61 | 27.44 | -0.45 | -0.03 | 0.200 | - |
| 全磷 | 0.19 ~ 0.96 | 0.59 | 0.13 | 22.46 | 0.93 | 0.06 | 0.200 | - |
| 硝态氮 | 13.73 ~ 49.65 | 26.41 | 6.33 | 23.98 | 1.58 | 0.66 | 0.200 | - |
| 铵态氮 | 0.27 ~ 33.90 | 6.77 | 6.01 | 88.86 | 5.06 | 1.69 | 0.006 | 对数 log |
| 速效磷 | 4.32 ~ 36.56 | 10.89 | 5.47 | 50.23 | 7.44 | 2.22 | 0.002 | 平方根 |

表 5 土壤养分因子半方差模型及参数
Tab. 5 Semi-variance model and parameters of the soil nutrient factors

| 土壤养分因子 | 理论模型 | 块金值 | 基台值 | 块金系数/% | 决定系数 | 残差 | 变程/m |
|--------|------|-------|-------|--------|-------|-------|------|
| 有机质 | 高斯模型 | 0.120 | 0.320 | 37.500 | 0.738 | 0.087 | 96 |
| 全氮 | 球状模型 | 0.007 | 0.036 | 19.440 | 0.777 | 0.010 | 156 |
| 全磷 | 球状模型 | 0.000 | 0.016 | 0.620 | 0.754 | 0.002 | 94 |
| 硝态氮 | 球状模型 | 0.006 | 0.021 | 28.570 | 0.904 | 0.036 | 526 |
| 铵态氮 | 高斯模型 | 0.001 | 1.574 | 0.060 | 0.906 | 0.139 | 119 |
| 速效磷 | 高斯模型 | 0.017 | 0.343 | 4.960 | 0.725 | 0.830 | 830 |

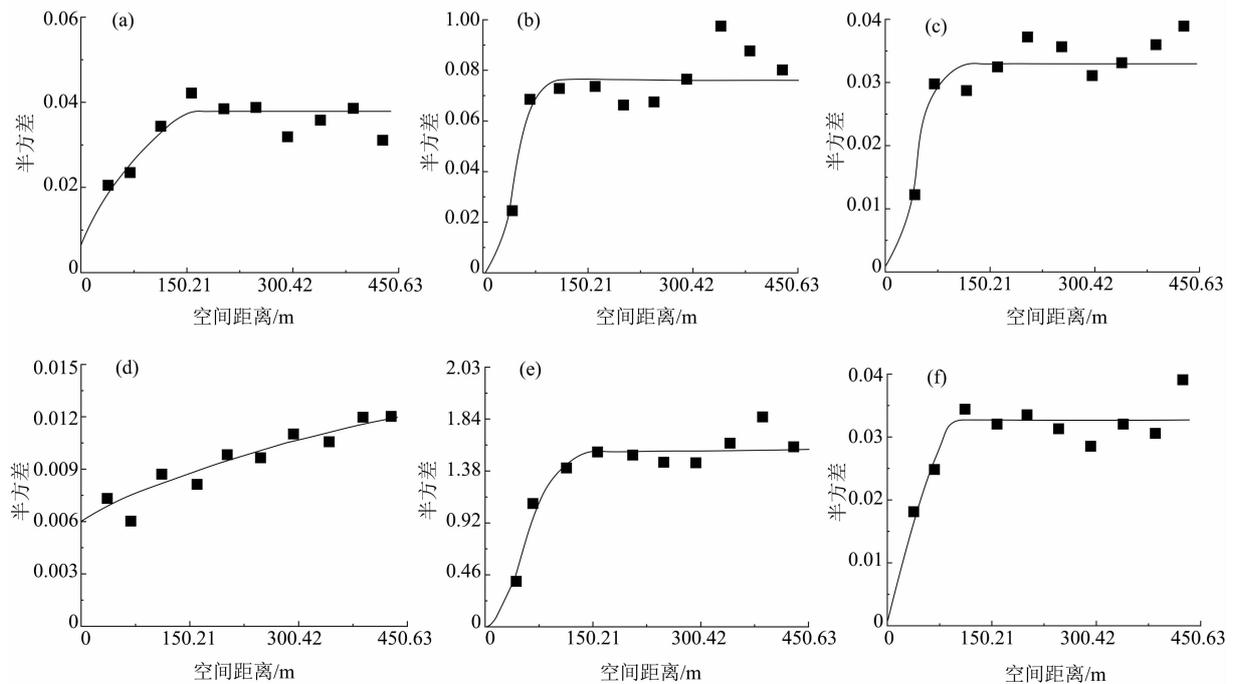


图 4 土壤养分最优半方差函数图:

(a) 全氮; (b) 有机质; (c) 全磷; (d) 硝态氮; (e) 铵态氮; (f) 速效磷

Fig. 4 Optimal semi-variance function of the soil nutrients:

(a) total nitrogen; (b) organic matter; (c) total phosphorus; (d) nitrate nitrogen; (e) ammonium nitrogen; (f) olsen-P

基于土壤养分特征的插值计算获得土壤养分含量的空间变异性,如图 5 所示。可以看出,硝态氮、全氮、有机质分布规律较为相似,均在样地西北、西南大部分,东北小部分含量丰富,这与该样地内坡向、海拔等地形因素相关。全磷和铵态氮在样地内中部和西北部呈小面积富集,速效磷含量在样地内

整较低,且分布不均,呈块状分布。

为弱化各养分变量间自相关所形成的误差,提取数据主要特征分量,分析养分整体的空间分布特征,对各养分进行主成分分析(Principal component analysis, PCA)并计算得到综合评价得分(表 6)。结果显示,研究样地土壤养分含量整体分布呈现自

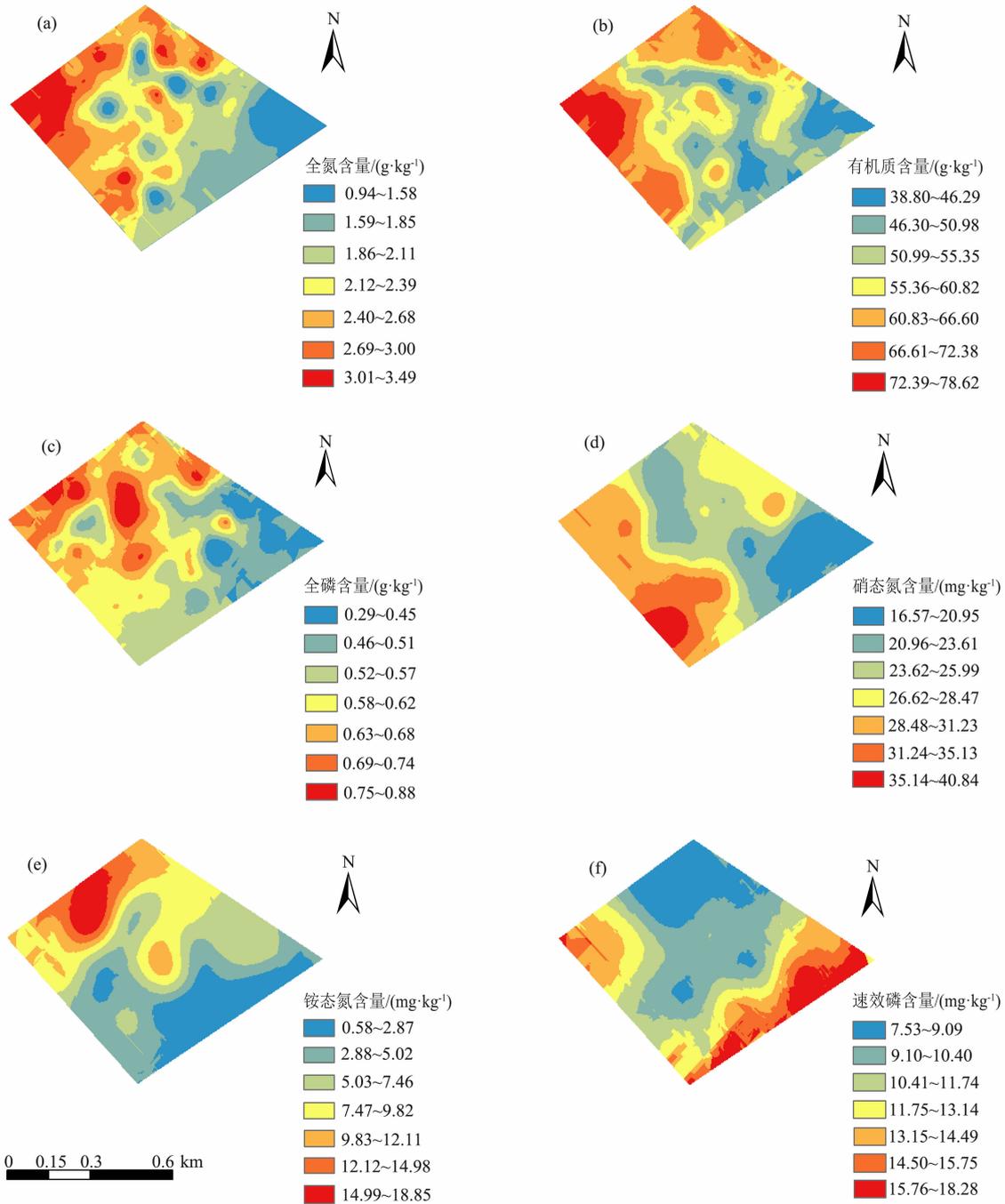


图 5 土壤养分含量的空间变异性:

(a) 全氮; (b) 有机质; (c) 全磷; (d) 硝态氮; (e) 铵态氮; (f) 速效磷

Fig. 5 Spatial variability of the soil nutrient content;

(a) total nitrogen; (b) organic matter; (c) total phosphorus; (d) nitrate nitrogen; (e) ammonium nitrogen; (f) olsen-P

西向东逐渐降低的趋势(图 6),中部有两处高养分含量区域分布在山脊线两侧。采样区 89.36% 是中等偏下的等级,较高养分含量的土壤面积比例仅为 10.64%,说明研究区土壤养分整体较为贫瘠且连续性较好。

表 6 土壤养分含量综合得分 (IFI) 分级
Tab. 6 Classification of the soil nutrient content comprehensive scale (IFI)

| 养分含量等级 | IFI 分级区间 | 面积占比% | 累计面积比/% |
|--------|---------------|-------|---------|
| 较高 | 41.18 ~ 46.83 | 10.64 | 10.64 |
| 中等 | 37.72 ~ 41.17 | 17.08 | 27.72 |
| 较低 | 34.41 ~ 37.71 | 25.91 | 53.63 |
| 低 | 31.19 ~ 34.40 | 29.63 | 83.26 |
| 极低 | 26.78 ~ 31.18 | 16.74 | 100.00 |

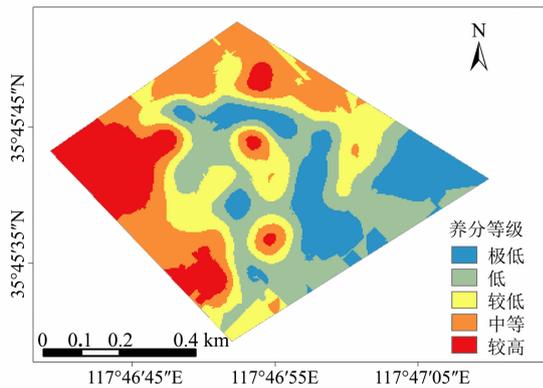


图 6 土壤养分含量等级的空间分布

Fig. 6 Spatial distribution of the soil nutrient content grades

3.2 土壤理化性质与空间数据的相关性

对样地内土壤理化性质与空间解译数据的相关性分析表明,海拔与土壤理化性质相关性密切,土壤养分特征与海拔有显著的正相关关系,而土壤物理

特征与海拔呈现负向相关关系(表 7)。此外,坡度、坡向、坡位等与土壤理化性质之间也存在一定程度相关,但植被覆盖度对研究区土壤养分含量影响并不显著。

为定量解释不同地形植被因子与土壤理化性质之间的联系,采用 DCA 和 RDA 方法分析土壤理化性质、酸碱性与地形植被因子的相关关系。DCA 分析表明,前四轴的梯度长度分别是 0.69、0.44、0.21 和 0.40,依据第一排序轴的长度为 0.69 < 3.0,选择 RDA 分析效果最佳。进一步的 RDA 分析表明(图 7),前两轴分别解释了 10.93% 和 6.53% 的土壤理化性质总方差,说明地形和植被因子可以解释 17.46% 的土壤养分变化。土壤理化性质与地形植被因子之间的相关系数为 0.39 ~ 0.65,累计解释拟

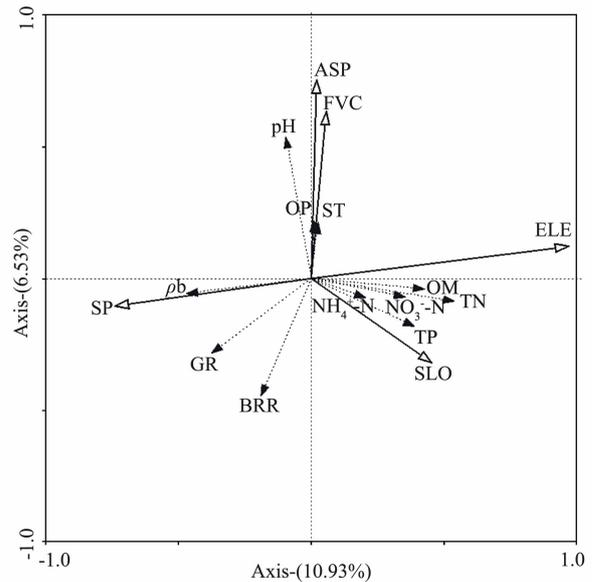


图 7 土壤理化性质与地形植被因子的 RDA 排序图

Fig. 7 RDA ranking diagram of the soil physicochemical properties and topographic vegetation factors

表 7 土壤养分和环境因子相关性

Tab. 7 Correlations of the soil nutrient and environmental factor

| 指标 | ST | GR | BRR | ρb | pH | OP | TP | $\text{NO}_3^- - \text{N}$ | $\text{NH}_4^+ - \text{N}$ | TN | OM |
|-----|---------|-----------|----------|-----------|----------|--------|----------|----------------------------|----------------------------|-----------|----------|
| ELE | 0.045 | -0.404 ** | -0.243 * | -0.424 ** | -0.049 | 0.003 | 0.360 ** | 0.276 * | 0.251 * | 0.536 ** | 0.407 ** |
| SLO | 0.040 | -0.040 | 0.162 | -0.307 * | -0.141 | -0.116 | 0.186 | 0.305 * | 0.037 | 0.210 | 0.218 |
| ASP | -0.011 | -0.136 | -0.249 * | -0.159 | 0.515 ** | 0.089 | -0.162 | -0.013 | 0.017 | -0.123 | 0.062 |
| SP | 0.082 | 0.345 ** | 0.144 | 0.316 ** | -0.045 | 0.082 | -0.201 | -0.216 | -0.336 ** | -0.390 ** | -0.302 * |
| FVC | 0.253 * | -0.230 | -0.297 * | -0.040 | 0.302 * | 0.030 | -0.098 | 0.135 | -0.086 | -0.028 | -0.063 |

注: * 表示 $P < 0.05$, ** 表示 $P < 0.01$ 。

合变异达 97.63%，表明前 4 轴的排序结果能够在一定程度上反映土壤理化性质与环境因子的关系。其中，海拔、坡度、坡向解释度依次为 10.4%、4.3%、2.7%（表 8），是显著影响土壤理化性质空间分异性的环境因子（ $P < 0.05$ ）。综合来看，海拔、坡度、坡向对土壤理化性质解释能力较强，共解释了 19.6% 的变异信息，而其他地形因子对研究区的土壤理化性质空间分异性的解释能力较差，仅为 1.1%。

表 8 环境因子解释率排序

Tab. 8 Order of environmental factor interpretation rates

| 地形因子 | 解释率/% | 贡献率/% | <i>F</i> | <i>P</i> |
|-------|--------|--------|----------|----------|
| 海拔 | 10.400 | 50.400 | 7.700 | 0.002 * |
| 坡度 | 4.300 | 20.700 | 3.300 | 0.008 * |
| 坡向 | 2.700 | 13.200 | 2.100 | 0.042 * |
| 植被覆盖度 | 2.200 | 10.600 | 1.700 | 0.088 |
| 坡位 | 1.100 | 5.200 | 0.800 | 0.568 |

4 讨论

高程、坡向、坡位是影响丘陵区土壤养分空间变异的主要地形因子，地形对土壤理化性质影响显著，土壤养分对地形因子具有较高依赖性^[31-32]。本研究结果表明，土壤有机质、全氮和硝态氮的含量在样地内呈现随地形的明显波动，而且地形因子中海拔、坡度、坡向对土壤理化性质解释度较高。有机质、全氮、全磷、硝态氮、铵态氮呈现出在高海拔处含量高于低海拔处的分布特征。此外，土壤中的有机质含量与容重呈现显著的负相关关系^[33-34]。海拔较低且地形平坦的区域，土壤养分充足，更有利于农业生产；高海拔、地形起伏较大的区域土壤养分含量则较低^[35]，这可能与研究样地岩性有关。母质在土壤形成过程中发挥重要物质基础作用^[36]，研究样地内高海拔处岩性组成主要以石灰岩为主，少数区域存在风化程度较高的酸性片麻岩，土质疏松，石灰岩土壤中无机胶体和交换性钙含量丰富，有利于土壤中有有机质的积累，一定程度上有利于植物残体矿化和土壤养分的积累。同时，酸性片麻岩会影响土壤 pH 值，对土壤水稳定性团聚体的稳定性产生削弱作用，进而影响土壤水分固存与养分积累^[37-38]。

土壤养分既受成土母岩的影响也与植被和土地利用方式有关，林木可以改善土壤肥力与理化性质，地表径流和凋落物的积累，也会影响土壤化学性质^[39]。同时，生长季阶段影响土壤养分特征，不同植被类型林下土壤养分含量在生长季旺期阶段大于生长季初期与末期^[40]。本研究结果表明，研究区植被覆盖度与土壤各养分之间相关性并不显著，原因可能有两方面：一是获取遥感影像为秋季，研究区除侧柏外，大多数植被处于生长季末期，受时间与季节条件限制影响了区域植被覆盖度的计算精度；二是本研究区域丘陵海拔高度最高为 410 m，海拔差不足 200 m，植被分布稀疏且随地形变化不明显，这主要受人工林生长分布格局及管理措施在各方向上的异质性影响，以及与山区放牧等人为干扰有关。因此，未来加强样本的连续监测和数据采集对探究土壤理化性质与地形因子之间的联系非常必要。

构建土壤养分反演模型可以较好地揭示连续空间上的土壤养分变异情况，以往研究主要涉及多元线性回归、逐步多元回归分析、人工神经网络、主成分分析和支持向量机等技术方法^[41-44]。目前，遥感技术已经广泛应用于精准农业^[45]，地统计方法因为充分考虑土壤养分的自相关性且精度较高，在土壤制图中应用最为广泛。在森林土壤养分监测方面，针对小范围样地中单因素的研究较多，大尺度空间范围内森林土壤遥感监测研究则较少^[46]。前人研究认为，地形因子能较好地预估土壤理化性质空间连续性分布情况，加强对影响土壤养分空间异质性的主要因子的监测研究十分必要^[47-48]，这也与本研究的目標结果相一致。合理配置造林树种，同时加强对人为放牧的管控，利用梯田整地等山地保水保土措施加强土壤保护^[49-50]。充分了解土壤立地条件和养分分布特征，可以对今后指导土壤贫瘠立地的人工林修复提供参考。当前，地形因子对土壤质量的总体解释度偏低，进一步挖掘影响森林土壤养分的空间因子，建立更高精度且适合当下立地条件的反演模型仍是未来急需开展的工作。

5 结论

鲁中南低山丘陵区土壤理化性质的空间变异性极为明显。海拔、坡度、坡向对土壤理化性质的影响

显著,是驱动研究区域土壤养分空间变异的主要因子,植被覆盖度与土壤养分特征的相关性不显著,在应用遥感解译数据预测土壤理化性质过程中,海拔、坡度和坡向是应该重点考虑的空间因子,同时在今后的研究中需要考虑更多的环境因素。研究结果可为今后开展低山丘陵区立地条件遥感评估提供参考依据。

参考文献 (References)

- [1] 赵全科. 鲁中南山地生态脆弱区生态农业建设——以沂蒙山区为例[J]. 山地学报, 2000, **18**(3): 253–257. [ZHAO Quanke. Ecological agriculture of weak ecological areas in mountain area of central south of Shandong Province: A case study in Yi Meng mountain area [J]. Mountain Research, 2000, **18**(3): 253–257] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.2000.03.012
- [2] 欧芷阳, 申文辉, 庞世龙, 等. 平果喀斯特山地不同植物群落的土壤质量评价[J]. 生态学杂志, 2015, **34**(10): 2771–2777. [OU Zhiyang, SHEN Wenhui, PANG Shilong, et al. Assessment of soil quality of different plant communities in the karst mountains of Pingguo County, Guangxi [J]. Chinese Journal of Ecology, 2015, **34**(10): 2771–2777] DOI: 10.13292/j.1000–4890.2015.0258
- [3] 杜振宇, 梁燕, 葛忠强, 等. 鲁中山地不同密度侧柏人工林土壤质量特性[J]. 中南林业科技大学学报, 2020, **40**(9): 104–112+123. [DU Zhenyu, LIANG Yan, GE Zhongqiang, et al. Soil quality characteristics of Platycladus orientalis plantations with different densities in central mountainous area of Shandong Province [J]. Journal of Central South University of Forestry & Technology, 2020, **40**(9): 104–112+123] DOI: 10.14067/j.cnki.1673–923x.2020.09.012
- [4] 李小倩, 杨吉华, 魏晓明. 鲁中南石灰岩山地针阔混交林土壤理化性状及水文效应[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(1): 208–211+230. [LI Xiaoqian, YANG Jihua, WEI Xiaoming. Soil physical and chemical properties and hydrological effects of coniferous and broadleaved mixed forest in limestone mountains [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(1): 208–211+230] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2016.01.038
- [5] 郭建曜, 王录, 杨静, 等. 鲁中南山地黑松人工林土壤和林下植被的动态格局[J]. 浙江农林大学学报, 2018, **35**(2): 209–218. [GUO Jianyao, WANG Lu, YANG Jing, et al. Understory vegetation patterns and soil characteristics of a Pinus thunbergii plantation in mountainous land of Shandong Province [J]. Journal of Zhejiang A&F University, 2018, **35**(2): 209–218] DOI: 10.11833/j.issn.2095–0756.2018.02.003
- [6] 方慧婷, 蒙继华, 程志强. 基于遥感与作物模型的土壤速效养分时空变异分析[J]. 中国农业科学, 2019, **52**(3): 478–490. [FANG Huiting, MENG Jihua, CHENG Zhiqiang. Spatio-temporal variability of soil available nutrients based on remote sensing and crop model [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2019, **52**(3): 478–490] DOI: 10.3864/j.issn.0578–1752.2019.03.008
- [7] 黄安, 杨联安, 杜挺, 等. 基于主成分分析的土壤养分综合评价[J]. 干旱区研究, 2014, **31**(5): 819–825. [HUANG An, YANG Lian'an, DU Ting, et al. Comprehensive assessment of soil nutrients based on PCA [J]. Arid Zone Research, 2014, **31**(5): 819–825] DOI: 10.13866/j.azr.2014.05.06
- [8] QIU Weiwen, CURTIN D, JOHNSTONE P, et al. Small-scale spatial variability of plant nutrients and soil organic matter: An arable cropping case study [J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2016, **47**(19): 2189–2199. DOI: 10.1080/00103624.2016.1228945
- [9] HBIRKOU C, PATZOLD S, MAHLEIN A K, et al. Airborne hyperspectral imaging of spatial soil organic carbon heterogeneity at the field-scale [J]. Geoderma, 2012, **175–176**: 21–28. DOI: 10.1016/j.geoderma.2012.01.017
- [10] 付萧, 鲁恒, 朱庆, 等. 利用无人机影像进行山区土地利用信息动态监测[J]. 山地学报, 2016, **34**(1): 121–126. [FU Xiao, LU Heng, ZHU Qing, et al. Landuse information of mountain areas dynamic monitoring based on UAV images [J]. Mountain Research, 2016, **34**(1): 121–126] DOI: 10.16089/j.cnki.1008–2786.000108
- [11] 汪沛, 罗锡文, 周志艳, 等. 基于微小型无人机的遥感信息获取关键技术综述[J]. 农业工程学报, 2014, **30**(18): 1–12. [WANG Pei, LUO Xiwen, ZHOU Zhiyan, et al. Key technology for remote sensing information acquisition based on micro UAV [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2014, **30**(18): 1–12] DOI: 10.3969/j.issn.1002–6819.2014.18.001
- [12] 李鑫, 张文菊, 邹磊, 等. 土壤质量评价指标体系的构建及评价方法[J]. 中国农业科学, 2021, **54**(14): 3043–3056. [LI Xin, ZHANG Wenju, WU Lei, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2021, **54**(14): 3043–3056] DOI: 10.3864/j.issn.0578–1752.2021.14.010
- [13] 李胜平, 王克林. 桂西北喀斯特山地草地土壤养分季节变化规律及其对植被多样性的响应[J]. 水土保持学报, 2016, **30**(4): 199–205. [LI Shengping, WANG Kelin. Seasonal distribution of soil nutrients and their response to the plant diversity of karst mountain grassland [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, **30**(4): 199–205] DOI: 10.13870/j.cnki.stbcb.2016.04.034
- [14] 张志华, 张锦豪, 桑玉强, 等. 太行山南麓坡面土壤碳氮空间变异性及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2021, **32**(8): 2829–2838. [ZHANG Zhihua, ZHANG Jinhao, SANG Yuqiang, et al. Spatial variations and its influencing factors of soil carbon and nitrogen on the southern foot of Taihang Mountains, China

- [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, **32**(8): 2829 – 2838] DOI: 10.13287/j.1001-9332.202108.029
- [15] NUMATA I, SOARES J V, ROBERTS D A, et al. Relationships among soil fertility dynamics and remotely sensed measures across pasture chronosequences in Rondonia, Brazil [J]. Remote Sensing of Environment, 2003, **87**(4): 446 – 455. DOI: 10.1016/j.rse.2002.07.001
- [16] 高浩然, 周勇, 刘甲康, 等. 基于信息熵的耕地土壤养分与环境影响因子空间相关性研究[J]. 水土保持通报, 2021, **41**(6): 226 – 236. [GAO Haoran, ZHOU Yong, LIU Jiakang, et al. Spatial correlation between soil nutrients and environmental factors in cultivated land based on information entropy [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, **41**(6): 226 – 236] DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2021.06.030
- [17] 杜可, 王乐, 张淑香, 等. 黑土区县域土壤养分空间分布特征及其影响因子[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, **24**(6): 1465 – 1474. [DU Ke, WANG Le, ZHANG Shuxiang, et al. Spatial distribution characteristics and influence factors of soil nutrients in black soil region counties [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2018, **24**(6): 1465 – 1474] DOI: 10.11674/zwyf.18336
- [18] 王云强, 张兴昌, 李顺姬, 等. 小流域土壤矿质氮与地形因子的关系及其空间变异性研究[J]. 环境科学, 2007, **28**(7): 1567 – 1572. [WANG Yunqiang, ZHANG Xingchang, LI Shunji, et al. Spatial variability and the relationships of soil mineral N and topographic factors in a small watershed [J]. Environmental Science, 2007, **28**(7): 1567 – 1572] DOI: 10.13227/j.hjcx.2007.07.028
- [19] 杨存建, 李何超, 许光洪, 等. 基于大疆无人机遥感的农村居民点建筑密度与容积率测算[J]. 山地学报, 2019, **37**(1): 144 – 150. [YANG Cunjian, LI Hechao, XU Guanghong, et al. A measure to the building density and floor area ratio of rural settlements based on Da Jiang unmanned aerial vehicle remote sensing [J]. Mountain Research, 2019, **37**(1): 144 – 150] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000408
- [20] 高永刚, 林悦欢, 温小乐, 等. 基于无人机影像的可见光波段植被信息识别[J]. 农业工程学报, 2020, **36**(3): 178 – 189. [GAO Yonggang, LIN Yuehuan, WEN Xiaole, et al. Vegetation information recognition in visible band based on UAV images [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2020, **36**(3): 178 – 189] DOI: 10.11975/j.issn.1002-6819.2020.03.022
- [21] 崔万新, 李锦荣, 司前程, 等. 基于无人机可见光数据荒漠灌木覆盖度提取方法研究[J]. 水土保持研究, 2021, **28**(6): 175 – 182 + 189. [CUI Wanxin, LI Jinrong, SI Qiancheng, et al. Research on extraction method of desert shrub coverage based on UAV visible light data [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, **28**(6): 175 – 182 + 189] DOI: 10.13869/j.cnki.rswc.2021.06.014
- [22] 张小宏, 赵生良, 陈丰田. Agisoft photoscan 在无人机航空摄影影像数据处理中的应用[J]. 价值工程, 2013, **32**(20): 230 – 231. [ZHANG Xiaohong, ZHAO Shengliang, CHEN Fengtian. The application of agisoft photoscan in UAV aerial photographic image data processing [J]. Value Engineering, 2013, **32**(20): 230 – 231] DOI: 10.14018/j.cnki.cn13-1085/n.2013.20.136
- [23] 凌成星, 刘华, 纪平, 等. 基于无人机影像 VDVI 指数的植被覆盖度估算——以陕西神木防护林工程研究区为例[J]. 森林工程, 2021, **37**(2): 57 – 66. [LING Chengxing, LIU Hua, JI Ping, et al. Estimation of vegetation coverage based on VDVI index of UAV visible image: Using the shelterbelt research area as an example [J]. Forest Engineering, 2021, **37**(2): 57 – 66] DOI: 10.16270/j.cnki.slgc.2021.02.009
- [24] 王猛, 隋学艳, 梁守真, 等. 利用无人机遥感技术提取农作物植被覆盖度方法研究[J]. 作物杂志, 2020(3): 177 – 183. [WANG Meng, SUI Xueyan, LIANG Shouzhen, et al. Research on the method of extracting crop vegetation coverage using UAV remote sensing technology [J]. Crops, 2020(3): 177 – 183] DOI: 10.16035/j.issn.1001-7283.2020.03.027
- [25] 刘琳, 郑兴明, 姜涛, 等. 无人机遥感植被覆盖度提取方法研究综述[J]. 东北师大学报(自然科学版), 2021, **53**(4): 151 – 160. [LIU Lin, ZHENG Xingming, JIANG Tao, et al. Extraction method of fractional vegetation cover from unmanned aerial vehicle remote sensing: A review [J]. Journal of Northeast Normal University (Natural Science Edition), 2021, **53**(4): 151 – 160] DOI: 10.16163/j.cnki.22-1123/n.2021.04.023
- [26] 张智韬, 王海峰, 韩文霆, 等. 基于无人机多光谱遥感的土壤含水率反演研究[J]. 农业机械学报, 2018, **49**(2): 173 – 181. [ZHANG Zhitao, WANG Haifeng, HAN Wenting, et al. Inversion of soil moisture content based on multispectral remote sensing of UAVs [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2018, **49**(2): 173 – 181] DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.023
- [27] NY/T1634—2008. 耕地地力调查与质量评价技术规程[S]. 北京: 中国农业出版社, 2008. [NY/T1634-2008. Rules for soil quality survey and assessment [S]. Beijing: China Agricultural Press, 2008]
- [28] 王慧敏, 唐玉霞. 流动注射分析法与紫外分光光度法测定土壤硝态氮含量的比较[J]. 河北农业科学, 2016, **20**(2): 105 – 108. [WANG Huimin, TANG Yuxia. Comparison of FIA and UV methods in determining soil nitrate nitrogen [J]. Journal of Hebei Agricultural Sciences, 2016, **20**(2): 105 – 108] DOI: 10.16318/j.cnki.hbnykx.2016.02.027
- [29] 李俊洁, 陈小迪. 土壤铵态氮测定方法研究[J]. 世界有色金属, 2017(12): 211 – 212. [LI Junjie, CHEN Xiaodi. Study on determination method of soil ammonium nitrogen [J]. World Nonferrous Metals, 2017(12): 211 – 212]

- [30] 谢涛, 郭小强. 连续流动分析仪测定土壤中的氨氮[J]. 科技创新导报, 2013 (26): 109. [XIE Tao, GUO Xiaoqiang. Determine the ammonia nitrogen in the soil by a continuous flow analyzer [J]. Science and Technology Innovation Herald, 2013 (26): 109] DOI: 10.16660/j.cnki.1674-098x.2013.26.036
- [31] 宋发军. 基于 GIS 和 RDA 的丘陵区土壤养分空间变异及其与地形因子的关系[J]. 湖北农业科学, 2021, 60(17): 31-35+53. [SONG Fajun. Spatial variability and topography factors affecting soil nutrients in hilly area based on GIS and RDA [J]. Hubei Agricultural Sciences, 2021, 60(17): 31-35+53] DOI: 10.14088/j.cnki.issn0439-8114.2021.17.007
- [32] 张国平, 郭澎涛, 王正银, 等. 紫色土丘陵地区农田土壤养分空间分布预测[J]. 农业工程学报, 2013, 29(6): 113-120+294. [ZHANG Guoping, GUO Pengtao, WANG Zhengyin, et al. Prediction of spatial distribution of hilly farmland with purple soil nutrient [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2013, 29(6): 113-120+294] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2013.06.015
- [33] 李冬初, 黄晶, 马常宝, 等. 中国农耕地土壤有机质含量及其与酸碱度和容重关系[J]. 水土保持学报, 2020, 34(6): 252-258. [LI Dongchu, HUANG Jing, MA Changbao, et al. Soil organic matter content and its relationship with pH and bulk density in agricultural areas of China [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 252-258] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2020.06.03
- [34] 张梦旭, 刘蔚, 朱猛, 等. 黑河上游山地土壤容重分布特征及影响因素[J]. 山地学报, 2019, 37(2): 198-205. [ZHANG Mengxu, LIU Wei, ZHU Meng, et al. Patterns and environmental controls of soil bulk density in the mountainous regions of the upper Heihe River basin, China [J]. Mountain Research, 2019, 37(2): 198-205] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000413
- [35] 刘焕军, 邱政超, 孟令华, 等. 黑土区田块尺度遥感精准管理分区[J]. 遥感学报, 2017, 21(3): 470-478. [LIU Huanjun, QIU Zhengchao, MENG Linghua, et al. Site-specific management zone of field scale based on remote sensing image in a black soil area [J]. Journal of Remote Sensing, 2017, 21(3): 470-478] DOI: 10.11834/jrs.20176125
- [36] 李振荣, 杨新兵, 刘海军, 等. 土壤分化促成与改良研究进展综述[J]. 中国水土保持, 2009(8): 15-17. [LI Zhenrong, YANG Xinbin, LIU Haijun, et al. Summary of the research progress of soil differentiation facilitation and improvement [J]. Soil and Water Conservation in China, 2009(8): 15-17] DOI: 10.14123/j.cnki.swcc.2009.08.010
- [37] 邹奇峰, 谢国雄, 王京文, 等. 浙西 3 类石灰岩发育土壤有机碳和团聚体稳定性的研究[J]. 土壤通报, 2018, 49(3): 567-574. [WU Qifeng, XIE Guoxiong, WANG Jingwen, et al. The stability of organic carbon and aggregates of three limestone soils in the western Zhejiang [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(3): 567-574] DOI: 10.19336/j.cnki.trtb.2018.03.10
- [38] 肖时珍, 何江湖, 曾成, 等. 西南喀斯特地区石灰岩与白云岩发育土壤的养分含量[J]. 西南农业学报, 2020, 33(6): 1247-1252. [XIAO Shizhen, HE Jianghu, ZENG Cheng, et al. Nutrient content of soil developed from limestone and dolomite in karst areas of southwest China [J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences, 2020, 33(6): 1247-1252] DOI: 10.16213/j.cnki.scjas.2020.6.023
- [39] 陈爱民, 邓浩俊, 严思维, 等. 蒋家沟 5 种植被土壤分形特征与养分关系[J]. 山地学报, 2016, 34(3): 290-296. [CHEN Aimin, DENG Haojun, YAN Siwei, et al. Fractal features of soil and their relation with soil fertility under five vegetation in Jiangjiagou Gully [J]. Mountain Research, 2016, 34(3): 290-296] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.000130
- [40] 刘帅楠, 李广, 杨传杰, 等. 植被类型对黄土丘陵区土壤碳氮磷化学计量特征的季节变异[J]. 水土保持学报, 2021, 35(6): 343-349+360. [LIU Shuainan, LI Guang, YANG Chuanjie, et al. Seasonal variation of soil carbon, nitrogen and phosphorus stoichiometry under different vegetation types in loess hilly region [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(6): 343-349+360] DOI: 10.13870/j.cnki.stbxb.2021.06.046
- [41] 徐丽华, 魏朝富, 谢德体, 等. 土壤养分遥感监测研究进展[J]. 农机化研究, 2011, 33(9): 249-252. [XU Lihua, WEI Chaofu, XIE Deti, et al. Estimating soil nutrient from remotely sensed information: A review [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2011, 33(9): 249-252] DOI: 10.13427/j.cnki.njyi.2011.09.034
- [42] 陶培峰, 王建华, 李志忠, 等. 基于高光谱的土壤养分含量反演模型研究[J]. 地质与资源, 2020, 29(1): 68-75+84. [TAO Peifeng, WANG Jianhua, LI Zhizhong, et al. Research of soil nutrient content inversion model based on hyperspectral data [J]. Geology and Resources, 2020, 29(1): 68-75+84] DOI: 10.13686/j.cnki.dzyzy.2020.01.006
- [43] GONZÁLEZ-GÓMEZ L, INTRIGLIOLO D S, RUBIO-ASENSIO J S, et al. Assessing almond response to irrigation and soil management practices using vegetation indexes time-series and plant water status measurements [J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2022, 339: 108124. DOI: 10.1016/J.AGEE.2022.108124
- [44] 王祥峰, 蒙继华. 土壤养分遥感监测研究现状及展望[J]. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 1033-1041. [WANG Xiangfeng, MENG Jihua. Research progress and prospect on soil nutrients monitoring with remote sensing [J]. Remote Sensing Technology and Application, 2015, 30(6): 1033-1041] DOI: 10.11873/j.issn.1004-0323.2015.6.1033
- [45] 罗丹, 毛忠安, 张庭瑜, 等. 延河流域耕层土壤养分空间变异及与地形因子的相关性研究[J]. 中国农学通报, 2022, 38

- (12): 79 – 87. [LUO Dan, MAO Zhong'an, ZHANG Tingyu, et al. Spatial variation of topsoil nutrients and its correlation with topographic factors in Yanhe River basin [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2022, **38**(12): 79 – 87]
- [46] 张素梅, 王宗明, 张柏, 等. 利用地形和遥感数据预测土壤养分空间分布[J]. 农业工程学报, 2010, **26**(5): 188 – 194. [ZHANG Sumei, WANG Zongming, ZHANG Bai, et al. Prediction of spatial distribution of soil nutrients using terrain attributes and remote sensing data [J]. Transactions of the CSAE, 2010, **26**(5): 188 – 194] DOI: 10.3969/j.issn.1002-6819.2010.05.033
- [47] 冯德程, 刘金涛, 陈喜. 山坡土壤化学性质的空间变异影响[J]. 山地学报, 2011, **29**(4): 427 – 432. [FENG Dezeng, LIU Jintao, CHEN Xi. Spatial variation of hillslope soil chemical attributes [J]. Mountain Research, 2011, **29**(4): 427 – 432] DOI: 10.16089/j.cnki.1008-2786.2011.04.002
- [48] 郑姗姗, 吴鹏飞, 马祥庆. 森林土壤养分空间异质性研究进展[J]. 世界林业研究, 2014, **27**(4): 13 – 17. [ZHENG Shanshan, WU Pengfei, MA Xiangqing. Research progress in nutrient spatial heterogeneity in forest soil [J]. World Forestry Research, 2014, **27**(4): 13 – 17] DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2014.04.003
- [49] 刘金荣, 谢晓蓉, 金自学, 等. 河西走廊干旱荒漠区盐碱化土地修复与调控研究——以黑河灌区为例[J]. 中国地质灾害与防治学报, 2005, **16**(3): 79 – 81 + 85 – 89. [LIU Jinrong, XIE Xiaorong, JIN Zixue, et al. Study on the recovery and control of the saline-alkali lands in Hexi Corridor drought area: An example in Heihe River irrigated area [J]. The Chinese Journal of Geological Hazard and Control, 2005, **16**(3): 79 – 81 + 85 – 89] DOI: 10.16031/j.cnki.issn.1003-8035.2005.03.018
- [50] 杨承栋. 论合理保护开发利用中国森林土壤资源[J]. 世界林业研究, 2011, **24**(1): 19 – 27. [YANG Chengdong. Research on reasonable protection, exploitation and utilization of forest soil resources in China [J]. World Forestry Research, 2011, **24**(1): 19 – 27] DOI: 10.13348/j.cnki.sjlyyj.2011.01.003

Spatial Heterogeneity of Soil Properties by Remote Sensing Assessment in the Mid-Southern Hilly Regions of Shandong Province, China

LIU Changyuan¹, HAN Wenhao¹, TIAN Yongren¹, WANG Zemin², WANG Yanping^{1*}

(1. College of Forestry, Shandong Agricultural University, Tai'an 270018, Shandong, China;

2. National Forest Farm of Mengyin County, Linyi 276200, Shandong, China)

Abstract: The ecosystem in the mid-southern hilly region of Shandong province, China is fragile mountain with severe soil erosion. As the foundation for life, the spatial variability of regional soil physicochemical properties holds biological significance for ecological restoration and conservation. Traditional survey methods such as ground surveys are time-consuming, labor-intensive, require high standards of remote sensing images and experimental data, and have lengthy assessment cycles.

In this study, typical plots were established in the mid-southern hilly region of Shandong province, China to reveal the spatial heterogeneity patterns of soil physicochemical properties using geostatistical methods. This was coupled with the establishment of correlations between spatial interpretation data from drone imagery and ground survey data.

(1) In the hilly regions of mid-southern Shandong, three indicators—soil thickness, gravel ratio, and rock exposure ratio—showed high spatial variation, with coefficients of variation being 54.16%, 72.28%, and 61.11%, respectively, while pH value and bulk density showed smaller variations.

(2) Organic matter content, total nitrogen, and total phosphorus displayed lower spatial variability, with coefficients of variation ranging from 22% to 28%; among available nutrients, ammonium nitrogen content exhibited an 89% variation range, followed by available phosphorus at 50%; the comprehensive nutrient index of

the soil also revealed strong spatial differentiation.

(3) Elevation explained 10.4% , slope angle contributed 4.3% , and aspect accounted for 2.7% of the variability in soil physicochemical properties , all reaching statistically significant levels. These factors were the top three terrain elements influencing the spatial heterogeneity of soil properties.

This finding suggests that spatial interpretation data inversion techniques can rapidly and accurately elucidate the change rules and controlling factors of soil physical and chemical properties , providing a basis for large-scale site condition assessments in the low mountain and hilly area of central and southern Shandong.

Key words: soil physicochemical properties; topographic factors; spatial variation; remote sensing assessment; mid-southern hilly region of Shandong province

(责任编辑 李 嵘)