

doi: 10.19388/j.zgdzdc.2023.293

引用格式: 郅苏日嘎拉,王永亮,陈国栋,等. 低山丘陵区土壤厚度空间分布特征与驱动因子分析——以鄂伦春自治旗为例[J]. 中国地质调查,2025,12(2): 60–68. (Tai S R G L, Wang Y L, Chen G D, et al. Spatial distribution characteristics and driving factors of soil thickness in low-hilly areas: A case study of Oroqen Autonomous Banner[J]. Geological Survey of China, 2025,12(2): 60–68.)

低山丘陵区土壤厚度空间分布特征与驱动因子分析 ——以鄂伦春自治旗为例

郅苏日嘎拉^{1,2}, 王永亮^{1,2,3*}, 陈国栋^{1,2}, 李永春^{1,2}, 杜雨春子^{1,2}, 苟鹏飞^{1,2}

(1. 中国地质调查局呼和浩特自然资源综合调查中心, 内蒙古 呼和浩特 010010; 2. 黄河大黑河流域水资源开发与生态环境效应创新基地, 内蒙古 呼和浩特 010010; 3. 内蒙古师范大学, 内蒙古 呼和浩特 010022)

摘要: 土壤厚度是土壤的一个重要特性,能直接反映土壤的发育程度,与土壤肥力密切相关,是鉴别土壤肥力的重要指标。以内蒙古鄂伦春自治旗为研究区,选取与土壤厚度密切相关的10项指标,基于SPSS 22.0软件对数据进行主成分分析,利用ArcGIS10.7和地理探测器(GeoDetector),研究低山丘陵区低成本、可快速获取、高精度的土壤厚度数字制图方法,并对土壤厚度空间变异驱动因子进行分析。结果显示:鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布规律整体表现为西北薄、东南厚,混淆矩阵精度验证结果显示总精度为74.32%,卡帕系数为0.744,表明鄂伦春自治旗土壤厚度数字制图结果跟实际高度一致;单因子探测结果显示土壤类型、成土母质驱动因子对当地土壤厚度空间分布变异性有较强的解释力;交互因子探测结果显示地形湿度指数 $\cap$ 径流强度系数的 q 值(0.58)大于地形湿度指数+径流强度系数的 q 值(0.47),呈现非线性增强,其余因子间均表现出双因子增强,表明多因子交互作用对当地土壤厚度空间分布变异性的影响要大于单因子产生的影响。研究成果可为当地农业可持续发展、退耕还林、种植适宜性、国土空间规划提供科学依据。

关键词: 主成分分析; 土壤厚度; 鄂伦春自治旗; 地理探测器; 低山丘陵区

中图分类号: P98; K903

文献标志码: A

文章编号: 2095-8706(2025)02-0060-09

0 引言

土壤厚度指从土壤母质层到土壤表面的垂直深度^[1-2]。土壤厚度能直接反映土壤的发育程度,与土壤肥力密切相关,是野外鉴别土壤肥力的重要指标,它既是土壤养分的补源,又是土壤矿物质的储存^[3],除此之外土壤厚度还影响着坡面水文响应过程,是水文和生态模型的重要输入参数^[4-6],被广泛用于全球变化和陆地碳循环研究,对土壤碳密度、土壤生物量和土壤含水率进行估算^[7]。

近年来,数字土壤制图方法在全世界范围内得到了广泛的研究^[8-10],土壤厚度是一个时空连续的变体,具有高度的空间异质性,土壤厚度无论在小范围尺度还是大面积区域都存在一定的空间异质性^[11]。目前土壤厚度制图方法众多^[12],其中基于物理机制的土壤厚度研究主要从土壤风化速率和土壤侵蚀过程方面进行研究,并建立相应模型,该方法需要对研究区进行长时间定点监测^[13-14]。基于遥感研究方法,在植被覆盖和生物作用复杂地区,因技术条件限制难以实现精确预测;基于点采样插值研究方法运用也较广泛,该

收稿日期: 2023-10-23; 修订日期: 2024-11-11。

基金项目: 中国地质调查局“松嫩平原北缘鄂伦春地区黑土地表基岩调查(编号: DD20220860)”项目资助。

第一作者简介: 郅苏日嘎拉(1995—),男,工程师,主要从事自然资源调查和评价方面工作。Email: taisurgl@mail.cgs.gov.cn。

通信作者简介: 王永亮(1993—),男,工程师,主要从事自然资源调查和评价方面工作。Email: wangyongliang@mail.cgs.gov.cn。

方法需要一定数量的采样密度控制整个区域,投入成本大,对采样点代表性要求较高^[15]。目前,基于环境相关推理研究是主流研究方法,该方法是主要利用土壤与环境要素之间的相关性建立的研究方法。成土因素学说^[16]表达为土壤气候、生物、地形、成土母质、时间和其他因素之间的关系。前人利用该理论采用不同方法,选取一系列指标,建立了土壤景观模型来进行土壤数字制图研究^[17-19]。其中空间主成分分析法具有一种较大程度上保留原指标的基础上,将多个相关联评价指标通过降维处理得到几个少量的综合评价指标,能有效避免人为主观随意的影响,提高了评价指标的客观性^[20-21]。

本次研究采用主成分分析法 (principal component analysis, PCA), 选取海拔、坡度、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数、径流强度系数、成土母质、土地利用类型、土壤类型、植被覆盖度 10 项指标对鄂伦春自治旗土壤厚度数字制图进行研究,并运用地理探测器 (GeoDetector) 揭示低山丘陵区土壤厚度主要驱动因子,旨在为当地农业可持续发展、退耕还林、种植适宜性、国土空间规划科学依据。

1 研究区概况

研究区地处内蒙古自治区呼伦贝尔市东北部,大兴安岭南麓,北与黑龙江省呼玛县以伊勒呼里山为界,东与黑龙江省嫩江县隔江相望,南与莫力达瓦达斡尔族自治县、阿荣旗接壤,西与根河市、牙克石市为邻。研究区地貌类型从西北到东南分别为构造剥蚀中低山、构造剥蚀丘陵、剥蚀丘陵和侵蚀冲洪积谷地;土地利用类型主要为林地,占研究区总面积的 77.15%,耕地占 8.7%,草地占 8.07%,其他土地利用类型占 6.08%,林地分布在研究区西北地区、植被覆盖率高,耕地主要集中在东南部大杨树镇,乌鲁布铁镇东南和古里乡等地,植被覆盖率低(图 1)。鄂伦春自治旗属于寒温带半湿润大陆性季风气候,四季变化显著年均气温 $-2.7 \sim 0.8\text{ }^{\circ}\text{C}$,年降水量 $459.3 \sim 493.4\text{ mm}$ 。区内分布暗棕壤土、暗色草甸土、棕色针叶林土、沼泽土、石质土、粗骨土、黑土 7 个土类。暗棕壤土分布最广泛,占研究区总面积的 43.65%,主要分布在研究区中东部,其次为棕色针叶林土,占研究区总面积的 30.07%,石质土和粗骨土分布面积极少,分布面积分别为 1.23 km^2 和 1.27 km^2 ,故分析研究区土壤厚度时忽略石质土和粗骨土 2 种土壤类型的影响。

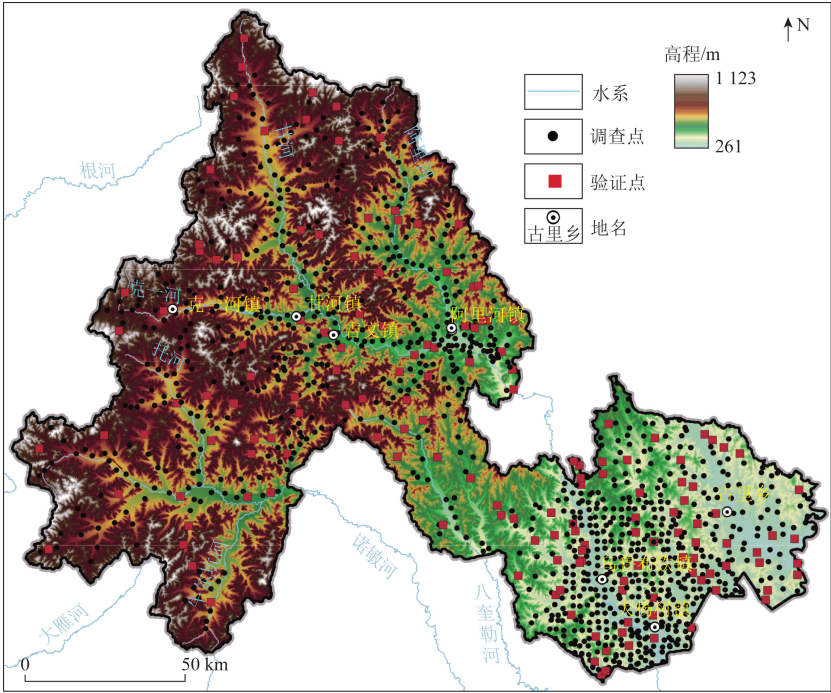


图 1 研究区及调查点和验证点位置

Fig.1 Location of the study area and the investigation points and validation points

2 研究方法

2.1 数据来源

本次研究结合当地实际情况选取 10 项指标,开展鄂伦春自治旗土壤厚度数字制图研究。在 10 项指标中 DEM 数字高程数据(分辨率 30 m)从地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)获得。海拔、坡度、平面曲率、剖面曲率、地形湿度指数和径流强度系数从 DEM 数据利用 ArcGIS10.7 软件裁剪、计算获得。各类行政界线、土地利用类型、土壤类型数据、成土母质数据从当地自然资源部门收集。植被覆盖度数据从国家青藏高原数据中心(<https://data.tpdc.ac.cn/>)获得,植被覆盖度对土壤厚度的影响是积极的,在植被覆盖度高的地区土壤侵蚀和土壤流失作用弱,有助于水土保持,为正向指标。160 个土壤厚度实测数据为在研究区内 2022—2023 年开展的野外调查获取,其中 160 件土壤厚度实测数据用于验证,具体实测数据采样点见图 1。

2.2 数据预处理

对选取的各类指标运用极差法进行标准化。

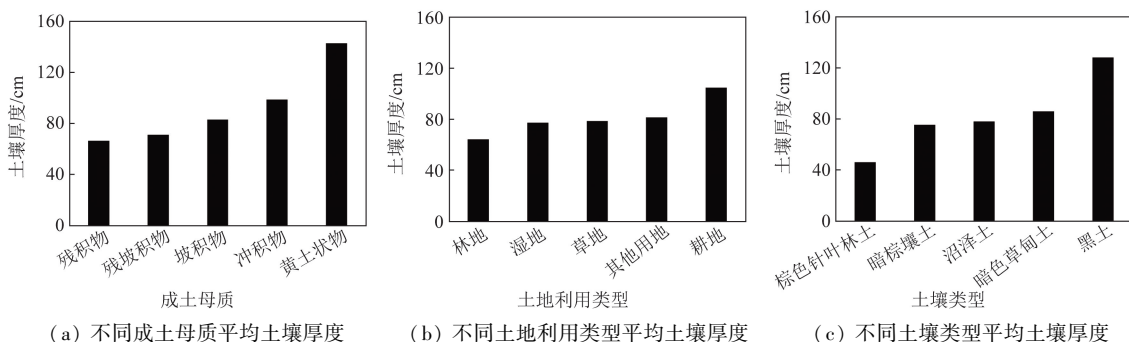


图2 研究区不同属性土壤厚度平均值

Fig.2 Average value of soil thickness with different attributes in the study area

2.3 土壤厚度数字制图方法

2.3.1 主成分分析法原理

主成分分析法是一种常用的数据降维方法,它通过线性变换将高维数据映射到低维空间中,同时保留最大的数据方差^[24-26]。本次研究利用 SPSS 22.0 进行主成分分析,求出各指标主成分的特征值,并建立相关系数矩阵和主成分模型,由于前期在数据处理过程中对各类型指标进行了标准化处理,消除了量纲不同的影响,在主成分分析过程中不需要再进行数据的标准化处理。

各类评价指标差异较大,具有不同的单位量纲且数据来源和数据均不一样,为了选取指标具有合理性和可比性,利用 ArcGIS10.7 中自然断点分级法对原始数据进行分级赋值,再利用极差法进行标准化处理。指标类型有正向和负向两种性质,其中定性指标土地利用类型、土壤类型和成土母质根据野外实测数据进行分级赋值,最后再进行指标的标准化。正负向指标采用相应公式进行标准化^[22-23]。

正向指标标准化计算公式为

$$Z_i = \frac{X_i - X_{\min}}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (1)$$

负向指标标准化计算公式为

$$Z_i = \frac{X_{\max} - X_i}{X_{\max} - X_{\min}} \quad (2)$$

式中: Z_i 为第 i 个指标标准化后的值; X_i 为第 i 个原指标值; $X_{\max}$ 为第 i 个指标最大值; $X_{\min}$ 为第 i 个指标最小值。

定性指标根据实测数据统计研究区不同类型中土壤厚度平均值(图 2),根据统计结果分级赋值,进行标准化处理。

2.3.2 主成分分析

对 1 000 个野外实测调查数据进行主成分分析。使用主成分分析的前提条件是原始数据变量之间具有较强的线性相关性^[27],检验方法有巴特莱特球形检验和 KMO 检验^[28]。数据检验结果显示,KMO 值为 0.679,大于 0.5,巴特利特球形度检验显著性小于 0.05,说明各类变量之间存在较好的线性相关性,可以进行主成分分析。在尽可能保留原有数据信息的基础上选取少数综合因子来代替原有较多变量。特征值大于 1 的成分作为主成分^[29],提取出前 3 种主成分其累计贡献率为

75.314%,主成分累计贡献率如表1所示。

表1 主成分特征值及方差贡献率

主成分	初始特征值			提取载荷平方和		
	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%	特征值	方差贡献率/%	累计贡献率/%
F1	3.341	33.411	33.411	3.341	33.411	33.411
F2	3.155	31.550	64.960	3.155	31.550	64.960
F3	1.035	10.354	75.314	1.035	10.354	75.314
F4	0.680	6.799	82.113	—	—	—
F5	0.669	6.695	88.808	—	—	—
F6	0.580	5.803	94.611	—	—	—
F7	0.381	3.815	98.426	—	—	—
F8	0.157	1.574	100.000	—	—	—

注：“—”表示无数值。

2.3.3 土壤厚度数字制图方法

根据主成分分析结果,计算出系数代入主成分权重模型

Y = \sum_{i=1}^n y_i \times E_i \quad (3)

式中:Y为土壤厚度空间分布系数;y_i为第i个主成分;E_i为第i个主成分贡献率,%。

在 ArcGIS 10.7 中利用栅格计算器得到每个像素土壤厚度分级,利用野外实测数据通过累频方法划定每个分级对应的土壤厚度区间,确定研究区对应的土壤厚度区间^[20]。

2.4 土壤厚度空间分布驱动因子分析

土壤厚度空间分布特征受多种因素影响,影响因素之间会存在相似的分布规律。为揭示其规律,利用地理探测器(GeoDetector)研究自变量对因变量的解释程度,分析自变量与因变量在空间分布上的相似性^[30]。

地理探测器(GeoDetector)是王劲峰等^[31]提出的探测空间分异性,以及揭示其背后驱动力的一组统计学方法。地理探测器(GeoDetector)包括分异及因子探测器、交互作用探测器、风险区探测器和生态探测器4种。本研究主要采用分异及因子、交互作用探测器分析鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布驱动因子,q值越大说明驱动因子影响力越大,在特定情况下,q值为1表示自变量的空间分异完全,而q值为0表示自变量的空间分布是随机的^[32-33]。

分异及因子探测是探测Y的空间分异性和探测某自变量X多大程度上解释了属性Y的空间分异,用q值度量。计算公式为

q = 1 - \frac{1}{n\sigma^2} \sum_{h=1}^L n_h \sigma_h^2 \quad (4)

式中:q表示评价指标因子对土壤厚度的解释程度,q值越大表示指标因子对土壤厚度空间分布变异性解释力越强,反之越弱;n为样本数;L为指标分类数;n_h为层样本量;σ_h²为h层的土壤厚度的方差;σ²为全区土壤厚度的方差。

交互作用探测是可用以识别不同影响因子对因变量的交互作用,即评估因子间共同作用是否会增强或减弱对因变量的解释力或两个影响因素是相互独立的^[34]。

3 结果与讨论

3.1 土壤厚度空间分布特征

利用 SPSS 22.0 对选取 10 项影响土壤厚度因子进行主成分分析,再利用 ArcGIS10.7 对鄂伦春自治旗土壤厚度进行数字化制图(图3)。鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布规律表现为从西北向东南方向逐渐变厚。(0,47]cm的区域主要分布在鄂伦春自治旗北四镇(阿里河镇、吉文镇、甘河镇、克一河镇)地区,该区域海拔高地貌起伏大,坡度陡,使得水流速度加快,水流对土壤的冲刷力增大,导致土壤的流失和剥蚀,这种强烈的水流侵蚀会导致土壤的厚度减少,不利于土壤厚度的累积。(47,85]cm的区域在研究区内交错分布,该区域海拔和地形起伏度中等,坡度较缓,成土母质主要以残坡积和坡积物为主。(85,140]cm的区域主要分布在研究区东南部(乌鲁布铁镇、大杨树镇、古里

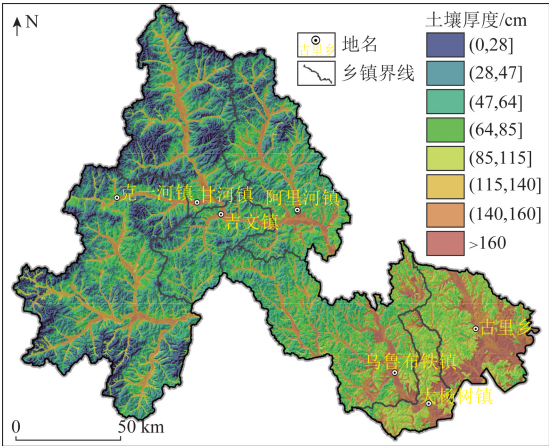


图3 鄂伦春自治旗土壤厚度分级

Fig.3 Soil thickness classification in Oroqen Autonomous Banner

乡)地区,该区地貌以低缓丘陵区为主,坡度缓,利于土壤厚度的累积。 $>140\text{ cm}$ 的区域主要分布在研究区相对平缓地区,该区域成土母质类型主要为冲积物和黄土状物,地形平摊,土壤易于汇聚,有利于土壤厚度累积,适合农耕。

研究区 7 类土壤类型黑土主要发育在研究区东南部(大杨树镇和古里乡)地势平坦地区,平均土壤厚度为 127.84 cm ,该区最适宜种植;暗色草甸土与沼泽土主要发育在研究区低洼谷地,平均土壤厚度分别为 85.83 cm 和 77.96 cm ,其中沼泽土主要分布在研究区湿地中,为生态保护区,不适合开发利用;暗棕壤土是针阔混交林下发育的地带性土壤,在丘陵区广泛分布,平均土壤厚度为 75.17 cm ,该区地势平坦区可以进行适当耕作;棕色针叶林土发育在研究区西北部山区,该区海拔高、坡度陡,平均土壤厚度为 46.05 cm ,是生态保护区,不适宜耕作。

3.2 单因子探测结果

通过地理探测器(GeoDetector)中分异及因子探测器分析鄂伦春自治旗土壤厚度驱动因子(表 2)。单因子探测结果显示,鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布受土壤类型和成土母质两个驱动因子影响较高, q 值分别为 0.72 和 0.75,表明上述两个因子对当地土壤厚度空间分布变异性的解释力强度较大。坡度、海拔和土地利用类型的 q 值分别为 0.53、0.50 和 0.44,对当地土壤厚度空间分布异质性有一定的解释力,上述结果表明地形因子和人类活动对鄂伦春自治旗土壤厚度有一定的影响。平面曲率、径流强度系数、剖面曲率、地形湿度指数、植被覆盖度 5 种驱动因子 q 值均低于 0.30,相对其他驱动因子低,其中植被覆盖度因子的 q 值为 0.16,表明植被覆盖对当地土壤厚度空间分异性的解释力强度低。

表 2 鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布因子探测器 q 值统计

Tab.2 Statistics of q value for soil thickness spatial distribution factor detectors in Oroqen Autonomous Banner										
驱动因子	平面曲率	剖面曲率	地形湿度指数	径流强度系数	土壤类型	成土母质	海拔	坡度	土地利用类型	植被覆盖度
q 值	0.29	0.26	0.20	0.27	0.75	0.72	0.50	0.53	0.44	0.16

3.3 交互因子探测结果

土壤厚度本身具有高度的空间变异性,复杂土壤景观环境条件下,影响土壤厚度分布的环境因子组合方式多样^[35]。为研究鄂伦春自治旗土壤厚度多因子影响机制,利用地理探测器(GeoDetector)中交互因子探测器识别不同因子的交互作用(表 3)。由交互探测结果可知,因子间交互作用中地形湿度指数 $\cap$ 径流强度系数的 q 值(0.58)大于地形湿度指数+径流强度系数的 q 值(0.47),呈现非线性增强,其余因子间均表现出双因子增强,不存在相互独立及减弱的情况。表明多因子交互作用对鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布的影响要大于单因子

产生的影响,在交互因子中土壤类型 $\cap$ 坡度的 q 值为 0.87,对鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布变异性解释力最强,其余成土母质 $\cap$ 海拔、成土母质 $\cap$ 坡度、土壤类型 $\cap$ 平面曲率、土壤类型 $\cap$ 海拔等交互因子的 q 值在 0.80 以上,也对当地土壤厚度空间分布变异性具有较强的解释力。所有与土壤类型或成土母质交互的因子相较于单因子解释力显著增加。单因子最弱的植被覆盖率与土壤类型和成土母质交互作用后 q 值从 0.16 增加到 0.70 以上,表明多因子交互作用能更好地反映当地土壤厚度的驱动机制,可为研究土壤厚度空间分布驱动作用、成土作用提供更为科学的依据。

表 3 交互因子对鄂伦春自治旗土壤厚度的影响

Tab.3 Influence of interaction factors on the soil thickness in Oroqen Autonomous Banner

交互因子	q	交互因子	q	交互因子	q
土地利用 $\cap$ 海拔	0.64	剖面曲率 $\cap$ 成土母质	0.77	植被覆盖度 $\cap$ 径流强度系数	0.54
土地利用 $\cap$ 径流强度系数	0.53	剖面曲率 $\cap$ 土壤类型	0.80	植被覆盖度 $\cap$ 平面曲率	0.38
土地利用 $\cap$ 平面曲率	0.54	土壤类型 $\cap$ 海拔	0.82	植被覆盖度 $\cap$ 坡度	0.40
土地利用 $\cap$ 坡度	0.66	土壤类型 $\cap$ 径流强度系数	0.80	植被覆盖度 $\cap$ 地形湿度指数	0.59
土地利用 $\cap$ 地形湿度指数	0.50	土壤类型 $\cap$ 平面曲率	0.82	地形湿度指数 $\cap$ 海拔	0.32
土地利用 $\cap$ 植被覆盖度	0.48	土壤类型 $\cap$ 坡度	0.87	地形湿度指数 $\cap$ 径流强度系数	0.58
土地利用 $\cap$ 成土母质	0.79	土壤类型 $\cap$ 地形湿度指数	0.78	地形湿度指数 $\cap$ 平面曲率	0.55
土地利用 $\cap$ 土壤类型	0.80	土壤类型 $\cap$ 植被覆盖度	0.77	地形湿度指数 $\cap$ 坡度	0.39

续表

交互因子	<i>q</i>	交互因子	<i>q</i>	交互因子	<i>q</i>
土地利用∩剖面曲率	0.53	土壤类型∩成土母质	0.81	坡度∩海拔	0.56
剖面曲率∩海拔	0.59	成土母质∩海拔	0.84	坡度∩径流强度系数	0.71
剖面曲率∩径流强度系数	0.39	成土母质∩径流强度系数	0.77	坡度∩平面曲率	0.56
剖面曲率∩平面曲率	0.48	成土母质∩平面曲率	0.79	平面曲率∩海拔	0.58
剖面曲率∩坡度	0.57	成土母质∩坡度	0.83	平面曲率∩径流强度系数	0.65
剖面曲率∩地形湿度指数	0.36	成土母质∩地形湿度指数	0.75	径流强度系数∩海拔	0.41
剖面曲率∩植被覆盖度	0.37	成土母质∩植被覆盖度	0.76	径流强度系数∩海拔	0.62

注：“∩”表示两个因子间的交互作用。

3.4 土壤厚度数字制图精度验证

为验证土壤厚度数字制图的准确性,从野外实际调查数据中随机选取 160 个土壤厚度实测点作为验证数据,对鄂伦春自治旗土壤厚度分级图进行混淆矩阵精度验证(表 4)。结果显示精度符合要求的点数为 119 个,总精度为 74.38%,卡帕系数为 0.744,表明鄂

伦春自治旗土壤厚度数字制图得到的结果跟实际情况高度一致,具有一定的科学意义和实用价值。在土壤厚度 160 cm 以上区间上预测精度为最高,在(0,28] cm 区间预测精度最低,分析其原因可能与野外实际调查过程中对山区中上坡区域的调查相较于其他区域代表性不强,研究点数量较少有关。

表 4 鄂伦春自治旗土壤厚度分级结果混淆矩阵

Tab.4 Confusion matrix of soil thickness classification results in Oroqen Autonomous Banner

混淆矩阵	土壤厚度分级/cm									精度/%
	一级 (0,28]	二级 (28,47]	三级 (47,64]	四级 (64,85]	五级 (85,115]	六级 (115,140]	七级 (140,160]	八级 (>160)	总计	
土壤厚度 实测数据 分级/cm	一级(0,28]	11	5	0	1	1	0	0	18	61.11
	二级(28,47]	0	22	4	1	1	1	0	29	75.86
	三级(47,64]	0	0	12	2	1	2	0	17	70.59
	四级(64,85]	0	0	0	19	1	2	1	24	79.17
	五级(85,115]	0	0	1	0	15	0	2	20	75.00
	六级(115,140]	0	0	0	0	1	17	5	23	73.91
	七级(140,160]	0	0	0	1	0	1	4	6	66.67
	八级(>160)	0	0	0	0	1	0	3	19	82.61
总计	11	27	17	24	21	23	15	22	160	74.38

4 结论与建议

(1)鄂伦春自治旗土壤厚度整体呈西北薄、东南厚。利用混淆矩阵对鄂伦春自治旗土壤厚度数字制图结果的精度进行了验证,结果显示总精度为 74.38%,卡帕系数为 0.744,表明鄂伦春自治旗土壤厚度数字制图得到的结果跟实际高度一致。

(2)鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布受土壤类型、成土母质驱动因子影响较大,*q* 值分别为 0.72 和 0.75,对当地土壤厚度空间分布变异性有较强的解释力。在交互因子中地形湿度指数∩径流强度系数的 *q* 值(0.58)大于地形湿度指数 + 径流强度系数的 *q* 值(0.47),呈现非线性增强,其余因子间均表现出双因子增强,不存在相互独立及减弱的情况。表明多因子交互作用对鄂伦春自治旗土壤厚度空间分布的影响要大于单因子产生的影响。

致谢:感谢在论文撰写过程中提供帮助的项目组成员,感谢中国地质调查局长沙自然资源综合调查中心戴亮亮在写作中提供的帮助,感谢鄂伦春自治旗自然资源部门提供的基础地理数据。

参考文献(References):

[1] 曾宪勤,刘宝元,刘瑛娜,等. 2008. 北方石质山区坡面土壤厚度分布特征——以北京市密云县为例[J]. 地理研究,2008, 27(6):1281-1289.

Zeng X Q, Liu B Y, Liu Y N, et al. Soil depth distribution characteristics on the lithoidal mountainous slope of northern China: A case study of Miyun County, Beijing[J]. Geographical Research, 2008, 27(6):1281-1289.

[2] 李润奎,彭明,河野泰之,等. 基于分层策略和模糊推理的北方石质山区土壤厚度制图——以滦平县虎什哈流域为例[J]. 地理研究,2013, 32(5):965-973.

Li R K, Peng M, Kono Y, et al. Soil depth mapping in lithoidal mountainous area using stratified strategy and fuzzy logic: A case

- study in Hushiha watershed, North China [J]. *Geographical Research*, 2013, 32(5): 965–973.
- [3] 刘创民, 李昌哲, 史敏华, 等. 多元统计分析在森林土壤肥力类型分辨中的应用[J]. *生态学报*, 1996, 16(4): 444–447.
Liu C M, Li C Z, Shi M H, et al. Multivariate statistical analysis techniques applicated in differentiation of soil fertility [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 1996, 16(4): 444–447.
 - [4] 李润奎, 朱阿兴, Augello P C, 等. SWAT 模型对高精度土壤信息的敏感性研究[J]. *地球信息科学*, 2007, 9(3): 72–78, 90.
Li R K, Zhu A X, Augello P C, et al. Sensitivity of SWAT model to detailed soil information [J]. *Journal of Geo-information Science*, 2007, 9(3): 72–78, 90.
 - [5] Kuriakose S L, Devkota S, Rossiter D G, et al. Prediction of soil depth using environmental variables in an anthropogenic landscape, a case study in the western Ghats of Kerala, India [J]. *CATENA*, 2009, 79(1): 27–38
 - [6] 王志强, 刘宝元, 海春兴. 土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响[J]. *水土保持学报*, 2007, 21(4): 164–167.
Wang Z Q, Liu B Y, Hai C X. Effects of soil depth on vegetation cover and above ground biomass in east part of inner Mongolia [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2007, 21(4): 164–167.
 - [7] 王绍强, 朱松丽, 周成虎. 中国土壤土层厚度的空间变异性特征[J]. *地理研究*, 2001, 20(2): 161–169.
Wang S Q, Zhu S L, Zhou C H. Characteristics of spatial variability of soil thickness in China [J]. *Geographical Research*, 2001, 20(2): 161–169.
 - [8] 王改粉, 赵玉国, 杨金玲, 等. 流域尺度土壤厚度的模糊聚类与预测制图研究[J]. *土壤*, 2011, 43(5): 835–841.
Wang G F, Zhao Y G, Yang J L, et al. Prediction and mapping of soil depth at a watershed scale with fuzzy-c-means clustering method [J]. *Soils*, 2011, 43(5): 835–841.
 - [9] 王德彩, 叶希琛, 张雅梅, 等. 利用数字土壤制图技术评价桉树林土壤肥力[J]. *土壤通报*, 2021, 52(1): 139–147.
Wang D C, Ye X C, Zhang Y M, et al. Evaluation of soil fertility under eucalyptus plantation using digital soil mapping [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(1): 139–147.
 - [10] 朱阿兴, 杨琳, 樊乃卿, 等. 数字土壤制图研究综述与展望[J]. *地理科学进展*, 2018, 37(1): 66–78.
Zhu A X, Yang L, Fan N Q, et al. The review and outlook of digital soil mapping [J]. *Progress in Geography*, 2018, 37(1): 66–78.
 - [11] 王军, 傅伯杰, 邱扬, 等. 黄土高原小流域土壤养分的空间异质性[J]. *生态学报*, 2002, 22(8): 1173–1178.
Wang J, Fu B J, Qiu Y, et al. Spatial heterogeneity of soil nutrients in a small catchment of the loess Plateau [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2002, 22(8): 1173–1178.
 - [12] 王强, 吴炳方, 朱亮. 土壤厚度研究进展[J]. *安徽农业科学*, 2012, 40(9): 5273–5277, 5287.
Wang Q, Wu B F, Zhu L. Review of soil depth [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2012, 40(9): 5273–5277, 5287.
 - [13] Dietrich W E, Reiss R, Hsu M L, et al. A process-based model for colluvial soil depth and shallow landsliding using digital elevation data [J]. *Hydrological Processes*, 1995, 9(3/4): 383–400.
 - [14] Minasny B, McBratney A B. A rudimentary mechanistic model for soil production and landscape development [J]. *Geoderma*, 1999, 90(1/2): 3–21.
 - [15] 易湘生, 李国胜, 尹衍雨, 等. 土壤厚度的空间插值方法比较——以青海三江源地区为例[J]. *地理研究*, 2012, 31(10): 1793–1805.
Yi X S, Li G S, Yin Y Y, et al. Comparison on soil depth prediction among different spatial interpolation methods: A case study in the Three-River Headwaters Region of Qinghai Province [J]. *Geographical Research*, 2012, 31(10): 1793–1805.
 - [16] Jenny H. *Factors of Soil Formation: A System of Quantitative Pedology* [M]. New York: Dover Publications, Inc., 1994.
 - [17] 张振华. 耦合植被物候与 SoLIM 的新疆绿洲土壤盐渍化数字制图[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020.
Zhang Z H. Soil Salinization Digital Mapping Coupled with Vegetation Phenology and Soil Land Inference Model in the Oasis of Xinjiang [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020.
 - [18] 杨琳, 朱阿兴, 李宝林, 等. 应用模糊 c 均值聚类获取土壤制图所需土壤-环境关系知识的方法研究[J]. *土壤学报*, 2007, 44(5): 784–791.
Yang L, Zhu A X, Li B L, et al. Extraction of Knowledge about Soil-Environment relationship for soil mapping using Fuzzy c-Means (FCM) clustering [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2007, 44(5): 784–791.
 - [19] 何婷, 赵春兰, 李屹, 等. 基于 FCM 聚类的模糊综合评价方法[J]. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 2023, 51(1): 111–119.
He T, Zhao C L, Li Y, et al. Research on fuzzy comprehensive evaluation method based on FCM clustering [J]. *Journal of Shaanxi Normal University (Natural Science Edition)*, 2023, 51(1): 111–119.
 - [20] 戴亮亮, 罗敏玄, 张涛, 等. 基于主成分分析法的低山丘陵区土壤厚度快速评定方法与实践——以河南省罗山县为例[J]. *华南地质*, 2021, 37(04): 377–386.
Dai L L, Luo M X, Zhang T, et al. Method and practice of rapid evaluation of soil thickness in low mountain and hilly area based on principal component analysis: Taking Luoshan county, Henan Province as an example [J]. *South China Geology*, 2021, 37(4): 377–386.
 - [21] 邵苏日嘎拉, 王永亮, 陈国栋, 等. 基于 SRP 模型的内蒙古鄂伦春地区生态脆弱性评价[J]. *中国地质*, 2024, 51(1): 234–247.
Tai S R G L, Wang Y L, Chen G D, et al. Ecological vulnerability assessment of Oroqen region in the Inner Mongolia based on SRP model [J]. *Geology in China*, 2024, 51(1): 234–247.
 - [22] 田丰收, 刘新平, 原伟鹏. 新疆和田地区耕地面源污染生态风险评价[J]. *干旱区地理*, 2019, 42(2): 295–304.
Tian F S, Liu X P, Yuan W P. Ecological risk assessment of farmland

- non-point source pollution in Hotan Prefecture, Xinjiang[J]. *Arid Land Geography*, 2019, 42(2): 295-304.
- [23] 马骏. 三峡库区重庆段生态脆弱性动态评价[D]. 重庆: 西南大学, 2014.
- Ma J. Dynamic Evaluation of Ecological Vulnerability in the Three Gorges Reservoir Region in Chongqing Section, China[D]. Chongqing: Southwest University, 2014.
- [24] 田福金, 马青山, 张明, 等. 基于主成分分析和熵权法的新安江流域水质评价[J]. *中国地质*, 2023, 50(2): 495-505.
- Tian F J, Ma Q S, Zhang M, et al. Evaluation of water quality in Xin'anjiang River basin based on principal component analysis and entropy weight method[J]. *Geology in China*, 2023, 50(2): 495-505.
- [25] 徐梦婷, 王强, 郝艳宾, 等. 基于主成分分析的核桃品种油性性状综合评价[J]. *食品工业科技*, 2024, 45(2): 235-242.
- Xu M T, Wang Q, Hao Y B, et al. Comprehensive evaluation of oil-use traits of walnut varieties based on principal component analysis[J]. *Science and Technology of Food Industry*, 2024, 45(5): 235-242.
- [26] 张晓磊, 杨源祯, 阎琨, 等. 广西珍珠湾红树林湿地沉积物重金属分布及评价[J]. *中国地质调查*, 2022, 9(5): 104-110.
- Zhang X L, Yang Y Z, Yan K, et al. Distribution and evaluation of heavy metals in sediments of Zhenzhu Bay mangrove wetland in Guangxi[J]. *Geological Survey of China*, 2022, 9(5): 104-110.
- [27] 刘潇, 薛莹, 纪毓鹏, 等. 基于主成分分析法的黄河口及其邻近水域水质评价[J]. *中国环境科学*, 2015, 35(10): 3187-3192.
- Liu X, Xue Y, Ji Y P, et al. An assessment of water quality in the Yellow River estuary and its adjacent waters based on principal component analysis[J]. *China Environmental Science*, 2015, 35(10): 3187-3192.
- [28] 傅德印. 主成分分析中的统计检验问题[J]. *统计教育*, 2007(9): 4-7.
- Fu D Y. Statistical testing problems in principal component analysis[J]. *Statistical Education*, 2007(9): 4-7.
- [29] 黄美菱, 黄露滴, 龙飞利. 基于主成分分析法的西安市生态环境评价[J]. *环境与发展*, 2017, 29(8): 57-59.
- Huang M L, Huang L D, Long F L. Evaluation of ecological environment in Xi'an Based on principal component analysis[J]. *Environment and Development*, 2017, 29(8): 57-59.
- [30] 王钰, 胡宝清. 西江流域生态脆弱性时空分异及其驱动机制研究[J]. *地球信息科学学报*, 2018, 20(7): 947-956.
- Wang Y, Hu B Q. Spatial and temporal differentiation of ecological vulnerability of Xijiang river in Guangxi and its driving mechanism[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2018, 20(7): 947-956.
- [31] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望[J]. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- Wang J F, Xu C D. Geodetector: Principle and prospective[J]. *Acta Geographica Sinica*, 2017, 72(1): 116-134.
- [32] 叶妍君, 齐清文, 姜莉莉, 等. 基于地理探测器的黑龙江垦区农场粮食产量影响因素分析[J]. *地理研究*, 2018, 37(1): 171-182.
- Ye Y J, Qi Q W, Jiang L L, et al. Impact factors of grain output from farms in Heilongjiang reclamation area based on geographical detector[J]. *Geographical Research*, 2018, 37(1): 171-182.
- [33] 阎琨, 杨源祯, 李伟. 广西钦州典型农业区表层土壤 Se 含量分布特征及影响因素[J]. *中国地质调查*, 2023, 10(6): 69-76.
- Yan K, Yang Y Z, Li W. Distribution characteristics and influencing factors of surface soil selenium content in typical agricultural areas of Qinzhou in Guangxi[J]. *Geological survey of China*, 2023, 10(6): 69-76.
- [34] 田智慧, 尹传鑫, 王晓蕾. 鄱阳湖流域生态环境动态评估及驱动因子分析[J]. *环境科学*, 2023, 44(2): 816-827.
- Tian Z H, Yin C X, Wang X L. Dynamic monitoring and driving factors analysis of ecological environment Quality in Poyang lake basin[J]. *Environmental Science*, 2023, 44(2): 816-827.
- [35] 芦园园, 张甘霖, 赵玉国, 等. 复杂景观环境下土壤厚度分布规则提取与制图[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(18): 132-141.
- Lu Y Y, Zhang G L, Zhao Y G, et al. Extracting and mapping of soil depth distribution rules in complex landscape environment[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(18): 132-141.

Spatial distribution characteristics and driving factors of soil thickness in low-hilly areas: A case study of Oroqen Autonomous Banner

TAI Surigala^{1,2}, WANG Yongliang^{1,2,3}, CHEN Guodong^{1,2}, LI Yongchun^{1,2}, DU Yuchunzi^{1,2}, GOU Pengfei^{1,2}

(1. Hohhot General Survey of Natural Resources Center, China Geological Survey, Hohhot Inner Mongolia 010010, China;

2. Innovation Base for Water Resource Exploration and Eco-environmental Effects in the Daheihe Basin of the Yellow River, Hohhot Inner Mongolia 010010, China; 3. Inner Mongolia Normal University, Hohhot Inner

Mongolia 010022, China;)

Abstract: Soil thickness is a fundamental soil characteristic that directly reflects soil development, and it is closely related to soil fertility. It is also an important indicator to identify soil fertility. Taking Oroqen Autonomous Ban-

ner of Inner Mongolia as the study case, the authors in this paper selected 10 indicators closely related to soil thickness. The principal component analysis of these data were conducted by SPSS 22.0 software, and soil thickness digital mapping. method with the characteristic of low cost, rapid acquirability and high precision was probed by ArcGIS 10.7 and GeoDetector. Besides, driving factors of the spatial variation of soil thickness was analyzed. The study reveals that soil thickness in Oroqen Autonomous Banner is distributed thinly in the northwest and thickly in the southeast, and the accuracy verification results of the confusion matrix indicates a total accuracy of 74.32% and the kappa coefficient of 0.744, indicating a high level of agreement with the actual situation. The single - factor detection results show that the soil type and the driving factor of soil - forming matrix significantly influence the spatial distribution variability of local soil thickness. The results of the interacting factor detection show that the q - value (0.58) of the terrain humidity index $\cap$ runoff intensity coefficient is larger than the q - value (0.47) of the terrain humidity index + runoff intensity coefficient, indicating a non - linearly enhancement. And the other factors show two - factor enhancement. This suggests that the effect of multifactor interaction on the local spatial distribution of soil thickness is greater than that of a single factor. This study could provide scientific basis for the sustainable development of local agriculture, returning ploughland to forests, planting suitability, and spatial planning of the national territory.

Keywords: principal component analysis; soil thickness; Oroqen Autonomous Banner; geodetector; low - hilly area

(责任编辑: 王晗)