

# 西藏“一江两河”流域城市土壤质量遥感反演及地质驱动因子分析

洛桑旺堆 丹增贡培 尼玛次仁 索朗次仁

西藏地热地质大队地矿有限公司

DOI:10.32629/gmsm.v9i2.2429

**[摘要]** 青藏高原是我国重要生态安全屏障，“一江两河”流域为西藏核心区域，城市土壤质量关乎人居环境与生态稳定。本研究以拉萨、日喀则、山南建成区为对象，基于186组表层土壤数据与Sentinel-2影像，构建土壤质量综合指数(SQI)，对比PLSR与RF反演精度，并利用地理探测器解析地质驱动机制。结果显示：研究区土壤SQI均值0.526，整体中等，空间呈河谷冲洪积区、绿地与农用地较高，山地残坡积区、工业区与交通干线周边较低的格局；RF模型精度更优，验证集 $R^2$ 达0.824，适合高原大范围反演；成土母质、岩性类型为核心地质驱动因子，因子间以协同增强为主，成土母质与坡度交互解释力最高( $q=0.783$ )。研究可为高原城市土壤管理、国土空间规划与生态修复提供支撑。

**[关键词]** 一江两河流域；城市土壤质量；遥感反演

**中图分类号：**P343.1 **文献标识码：**A

## Xizang "One River and Two Rivers" Basin Urban Soil Quality Remote Sensing Inversion and Geological Driving Factor Analysis

Lausanne Wangdui Tenzin Gonpo Nyima Tsering Solang Tsering

Xizang Geothermal Geological Team Geology and Mining Co., Ltd.

**[Abstract]** The Qinghai-Tibet Plateau serves as a crucial ecological security barrier for China, with the "One River and Two Rivers" basin constituting the core area of Xizang. Urban soil quality is vital for human settlements and ecological stability. This study focuses on the built-up areas of Lhasa, Shigatse, and Shannan, constructing a Soil Quality Index (SQI) based on 186 surface soil datasets and Sentinel2 imagery. It compares the inversion accuracy of PLSR and RF methods and employs geodetectors to analyze geological driving mechanisms. Results show that the mean SQI in the study area is 0.526, indicating moderate overall performance. Spatial distribution reveals higher values in river valley alluvial areas, green spaces, and agricultural lands, while lower values are observed in residual slope accumulation zones of mountains, industrial areas, and peripheries of transportation corridors. The RF model demonstrates superior accuracy, achieving a validation set  $R^2$  of 0.824, making it suitable for large-scale plateau inversion. Parent material and lithological types emerge as core geological driving factors, with synergistic enhancement among factors. The interaction between parent material and slope gradient exhibits the highest explanatory power ( $q=0.783$ ). This study provides support for soil management, territorial spatial planning, and ecological restoration in plateau cities.

**[Key words]** One River Two Basins; Urban soil quality; Remote sensing inversion

### 引言

青藏高原被誉为“亚洲水塔”，是我国乃至全球气候变化的敏感区与生态脆弱带，其生态系统稳定性直接关系到区域乃至全国的生态安全。西藏“一江两河”流域位于青藏高原中南部，集中了西藏自治区70%以上的人口与80%以上的经济总量，是

西藏城市化发展的核心区域。城市土壤作为城市生态系统的重要组成部分，不仅承担着涵养水源、维持生物多样性等生态功能，还直接影响城市人居环境质量与食品安全。近年来，随着流域内城市化进程加快，建设用地扩张、人为扰动加剧，城市土壤压实、养分流失、重金属累积等问题日益凸显，而高原地区成土过程缓

慢、土壤抗干扰能力弱,土壤质量退化后极难恢复。传统土壤质量调查依赖野外采样与实验室分析,存在耗时费力、成本高、难以实现大范围动态监测的局限,无法满足高原城市土壤资源全域管控的需求。遥感技术凭借其大范围、高时效、非接触的优势,已成为土壤属性监测与质量反演的核心技术手段,其中机器学习模型能有效拟合土壤属性与光谱特征间的非线性关系,在青藏高原土壤参数反演中展现出优异的性能。

## 1 数据与研究方法

### 1.1 数据来源与预处理

#### 1.1.1 土壤实测数据

本研究于2024年7-8月开展系统土壤采样,按照城市功能区(居住区、商业区、工业区、城市绿地、城郊农用地)采用网格布点法布设采样点,共采集0~20cm表层土壤样品186个。采样过程中采用GPS精准记录样点经纬度坐标,每个样点设置3个重复样,混合后装入无菌自封袋低温保存带回实验室。

实验室分析指标涵盖土壤养分、理化性质与环境风险3大类,包括土壤有机质(SOM)、全氮(TN)、全磷(TP)、全钾(TK)、pH值、容重(BD),以及Cr、Cd、Pb、As、Hg5种重金属含量。所有指标分析均严格按照《土壤环境分析技术规范》执行,其中SOM采用重铬酸钾容量法,TN采用凯氏定氮法,重金属含量采用电感耦合等离子体质谱法(ICP-MS)测定。测试过程设置10%的平行样,相对误差控制在5%以内,确保数据可靠性。

#### 1.1.2 遥感与辅助数据

遥感数据采用欧空局Sentinel-2B多光谱影像,选取与采样同期、云量低于5%的影像4景,空间分辨率10m,数据来源于ESASentinel科学数据中心。影像预处理在ENVI5.6软件中完成,包括辐射定标、FLAASH大气校正、几何校正(RMSE<0.5个像元)与研究区裁剪,提取可见光、近红外、短波红外共10个波段的反射率数据,并计算22个与土壤属性密切相关的光谱指数,作为反演模型的输入特征。

地质与地形数据来源于1:25万西藏自治区地质图与SRTM 30 m 分辨率DEM数据,提取成土母质、岩性类型、海拔、坡度、坡向、地形起伏度、距断裂带距离7项地质驱动因子;土地利用数据来源于GlobeLand302020年30m分辨率产品,用于提取城市建成区边界。所有空间数据均统一投影为WGS84\_UTM\_45N坐标系,分辨率统一为10m。

### 1.2 研究方法

#### 1.2.1 土壤质量综合指数构建

采用最小数据集(MDS)法筛选评价指标,最终选取SOM、TN、TP、TK、pH、BD、重金属内梅罗综合污染指数(PN)7项指标,构建适配高原城市特征的土壤质量评价体系。采用极差标准化法对指标进行正向/负向标准化处理,其中SOM、TN、TP、TK为正向指标,pH、BD、PN为负向指标。

采用层次分析法(AHP)结合熵权法确定指标组合权重,通过加权求和法计算土壤质量综合指数(SQI),计算公式为:  $SQI = \sum_{i=1}^n (W_i \times N_i)$  式中,  $W_i$  为第  $i$  项指标的权重,  $N_i$  为第  $i$  项指标

的标准化值,  $n$  为指标个数。SQI取值范围为0~1,值越大表示土壤质量越好。

#### 1.2.2 遥感反演模型构建

将186个采样点按7:3的比例随机划分为训练集(130个)与验证集(56个),以训练集样本的SQI为因变量,筛选后的光谱指数为自变量,分别构建偏最小二乘回归(PLSR)与随机森林(RF)反演模型。采用验证集决定系数( $R^2$ )、均方根误差(RMSE)、平均绝对误差(MAE)评价模型精度,选取精度最优的模型进行研究区全域土壤质量反演<sup>[1]</sup>。

#### 1.2.3 地质驱动因子分析

采用地理探测器模型解析地质因子对土壤质量空间分异的解释力,以及因子间的交互作用。模型核心 $q$ 统计量用于度量自变量对因变量空间分异的解释程度,取值范围为0~1,值越大表示因子对土壤质量分异的解释力越强,计算公式为:  $q = 1 - \frac{N\sigma^2}{N\sigma^2 + L\sigma_h^2}$  式中,  $N$  为研究区总样本量,  $\sigma^2$  为全区SQI的方差,  $L$  为因子的分层数,  $N_h$  为层  $h$  的样本量,  $\sigma_h^2$  为层  $h$  的SQI方差。同时通过交互探测,识别两因子交互后对土壤质量的解释力变化,判断交互作用类型(非线性增强、双因子增强、相互独立、非线性减弱)。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤质量遥感反演模型精度验证

两种反演模型的精度验证结果如表1所示,随机森林(RF)模型的反演精度显著优于偏最小二乘回归(PLSR)模型。RF模型验证集 $R^2$ 达0.824, RMSE为0.076, MAE为0.058,远高于PLSR模型的精度水平,表明RF模型能有效拟合光谱指数与土壤质量间的非线性关系,可很好地捕捉高原城市土壤质量的光谱特征,适用于研究区土壤质量的全域遥感反演。

表1 两种反演模型精度对比

模型类型	训练集 $R^2$	验证集 $R^2$
PLSR	0.682	0.617
RF	0.913	0.824

### 2.2 城市土壤质量空间分异特征

基于最优RF模型的全域反演结果显示,研究区城市土壤SQI值介于0.217~0.832之间,平均值为0.526,整体处于中等水平,空间分异特征极为显著。

从空间分布格局来看,土壤质量高值区(SQI>0.7)主要分布于拉萨河、年楚河沿岸的冲洪积平原区、城市公园绿地与城郊农用地,该区域成土母质为河流冲洪积物,土壤质地细腻,有机质与养分含量高,加之城市绿地人工管护措施完善,土壤质量状况良好。土壤质量中等区(0.4≤SQI≤0.7)占研究区总面积的62.3%,主要分布于城市居住区与商业区,土壤受人为扰动程度中等,养分含量处于中等水平,无显著重金属污染,土壤质量整体稳定。土壤质量低值区(SQI<0.4)主要集中于城市工业区、交通干线两侧、建成区边缘裸地与山地残坡积区,该区域土壤受工业生产、交通碾压等人为扰动强烈,土壤压实严重、容重大,

养分流失显著, 部分区域存在重金属累积风险; 同时山地残坡积区成土母质风化程度低, 土层浅薄, 土壤发育差, 本底质量较差<sup>[2]</sup>。

从城市间差异来看, 拉萨市建成区土壤SQI平均值为0.542, 山南市为0.517, 日喀则市为0.508, 拉萨市城市土壤整体质量优于另外两个城市, 与拉萨市城市绿地覆盖率更高、生态管护体系更完善密切相关。

## 2.3 土壤质量地质驱动因子分析

### 2.3.1 单因子驱动效应

地理探测器单因子探测结果(表2)显示, 7项地质因子对研究区土壤质量空间分异的解释力存在显著差异。其中, 成土母质的解释力最高( $q=0.472, P<0.01$ ), 岩性类型次之( $q=0.418, P<0.01$ ), 二者是影响研究区土壤质量空间分异的核心地质驱动因子, 表明成土母质作为土壤形成的物质基础, 直接决定了土壤的初始养分含量、质地与理化性质, 而岩性的差异则控制了风化物的矿物组成与养分释放能力, 是高原城市土壤质量分异的根本地质因素。

坡度( $q=0.325, P<0.01$ )、海拔( $q=0.286, P<0.01$ )、地形起伏度( $q=0.213, P<0.01$ )的解释力次之, 这类地形因子主要通过影响区域水热条件再分配、土壤侵蚀强度与物质迁移过程, 进而调控土壤发育进程与质量演化。距断裂带距离的解释力较弱( $q=0.124, P<0.05$ ), 坡向的解释力最低( $q=0.068, P>0.05$ ), 未通过显著性检验, 对研究区土壤质量空间分异的影响不显著。

表2 地质因子单因子探测结果

驱动因子	q 值	P 值	显著性
成土母质	0.472	<0.01	极显著
坡度	0.325	<0.01	极显著
海拔	0.286	<0.01	极显著
地形起伏度	0.213	<0.01	极显著
距断裂带距离	0.124	<0.05	显著
坡向	0.068	>0.05	不显著

### 2.3.2 因子交互驱动效应

交互探测结果显示, 所有地质因子间的交互作用均表现为双因子增强或非线性增强, 无独立或减弱型交互作用, 表明研究区土壤质量的空间分异是多个地质因子协同作用的结果, 而非单一因子独立影响。

其中, 成土母质与坡度的交互作用解释力最高,  $q$ 值达到0.783, 远高于两个单因子的 $q$ 值, 表现为强烈的非线性增强; 其次为岩性类型与海拔的交互,  $q$ 值为0.726, 成土母质与距断裂带距离的交互 $q$ 值为0.691。结果表明, 成土母质与地形因子的耦合作用, 是决定高原城市土壤质量空间格局的核心地质机制——成土母质决定了土壤的物质基础与本底质量, 而地形条件则调

控了土壤的侵蚀、堆积与发育过程, 二者共同作用, 叠加人类活动的扰动, 最终形成了研究区土壤质量的空间分异格局<sup>[3]</sup>。

## 3 讨论

本研究基于Sentinel-2多光谱影像构建的随机森林模型, 实现了西藏“一江两河”流域城市土壤质量的高精度遥感反演, 模型验证集 $R^2$ 达0.824, 与青藏高原土壤属性遥感反演的相关研究结果精度一致, 证明了多光谱遥感结合机器学习模型在高原城市土壤质量大范围快速监测中的适用性与可靠性。与传统野外调查方法相比, 该方法大幅降低了高原地区土壤调查的难度与成本, 可实现城市土壤质量的空间可视化与动态监测, 为高原城市土壤资源精细化管控提供了高效的技术手段。

本研究发现, 成土母质与岩性类型是影响“一江两河”流域城市土壤质量空间分异的核心地质驱动因子, 这与高原地区成土过程缓慢、土壤发育程度低的区域特征高度契合。与我国东部平原地区城市土壤相比, 青藏高原城市土壤受人为扰动的历史较短, 土壤理化性质仍在很大程度上继承了成土母质的天然特征, 岩性风化物的矿物组成与养分含量直接决定了土壤的基础质量。同时, 坡度、海拔等地形因子通过影响土壤侵蚀过程, 进一步加剧了土壤质量的空间分异——坡度较大的山地边缘区域, 水力与冻融侵蚀强烈, 土层浅薄, 养分流失严重, 土壤质量显著低于河谷冲积平原区, 这与前人针对青藏高原土壤侵蚀的研究结论一致。

交互探测结果表明, 地质因子间的耦合作用对土壤质量的影响远大于单一因子, 这揭示了高原城市土壤质量演化的深层地质机制。在实际的城市土壤保护与生态修复工作中, 不能仅考虑单一因子的影响, 而应充分考虑地质背景的空间异质性, 针对不同成土母质、地形条件的区域, 制定差异化的管护与修复措施。同时本研究也发现, 工业区、交通干线等人为扰动强烈的区域, 土壤质量显著偏低, 表明在地质背景的基础上, 人类活动进一步加剧了高原城市土壤质量的退化, 未来研究需进一步量化地质因子与人类活动因子的耦合作用, 厘清自然与人为因素对高原城市土壤质量的相对贡献。

## [参考文献]

- [1]张甘霖, 龚子同. 城市土壤环境问题及其研究进展[J]. 土壤学报, 2000, 37(3): 419-427.
- [2]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.
- [3]刘伟, 程根伟. 西藏“一江两河”地区生态环境状况与可持续发展对策[J]. 长江流域资源与环境, 2003, 12(2): 131-135.

## 作者简介:

洛桑旺堆(1986—), 男, 藏族, 拉萨人, 大学本科, 研究方向: 化探、土壤方面工作。