

50年耕作对新疆沙漠地区土壤质地和盐碱度的影响^①

肖颖^{1,4}, 胡瑾^{2,4}, 洪云鹏^{2,4}, 雷娇娇^{1,3}, 宋效东^{1,4*}

(1 土壤与农业可持续发展全国重点实验室(中国科学院南京土壤研究所), 南京 211135; 2 中国科学院流域地理学重点实验室(中国科学院南京地理与湖泊研究所), 南京 211135; 3 南京信息工程大学生态与应用气象学院, 南京 210044; 4 中国科学院大学, 北京 100049)

摘要: 沙漠地区土壤因其生态脆弱性和盐碱化风险成为土壤演化研究的重点。本文以新疆阿拉尔市第十二团农场为研究对象, 综合调查了 74 个耕作样点与 6 个沙漠样点(深 1 m)土壤, 系统分析了 50 年耕作对沙漠地区关键土壤属性的影响。结果表明: 长期耕作显著改善了土壤质地, 其中砂粒含量平均减少 387.2~460.6 g/kg, 而粉粒和黏粒含量分别平均增加 330.6~400.9 g/kg 和 55.7~67.1 g/kg, 土壤由砂土演变为粉质壤土。土壤盐分在剖面中显著富集, 0~20 cm 深度电导率较对照沙漠土壤提高 1 倍以上, 表现出盐分表聚现象; 碳酸钙含量显著增加, 平均增量最高达 97.1 g/kg。为了进一步量化关键土壤属性的三维空间分布特征, 采用多种深度函数模型拟合土壤属性的剖面变异规律, 其中, 二项指数函数拟合精度最优($R^2>0.85$)。在空间预测方面, 随机森林模型优于增强回归树和多元线性回归模型($R^2>0.90$)。综上, 长期耕作改善了沙漠地区土壤质地, 促进了黏粒、盐分和碳酸钙的积累, 加速了成土速率, 但同时伴随着盐碱化风险的提高。带有常数项的指数函数对沙漠地区土壤属性的深度变化模式评估最佳, 随机森林模型在空间尺度上对沙漠地区所有土壤属性的预测均展现出最优性能。

关键词: 沙漠耕作; 土壤质地; 盐碱化; 深度函数; 数字土壤制图

中图分类号: S159.9 文献标志码: A

Impacts of Fifty Years of Cultivation on Soil Texture and Salinity-Alkalinity Characteristics in the Desert Areas of Xinjiang

XIAO Ying^{1,4}, HU Jin^{2,4}, HONG Yunpeng^{2,4}, LEI Jiaojiao^{1,3}, SONG Xiaodong^{1,4*}

(1 State Key Laboratory of Soil and Sustainable Agriculture, Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 2 Key Laboratory of Watershed Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 211135, China; 3 School of Ecology and Applied Meteorology, Nanjing University of Information Science and Technology, Nanjing 210044, China; 4 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Due to the ecological fragility and high risk of salinization, desert soils have become a focal point in soil evolution studies. This study focuses on the No. 12 Regiment Farm in Aral City, Xinjiang, and systematically analyzes the impacts of fifty years of cultivation on key soil properties based on a comprehensive investigation of 74 cultivated profiles and 6 native desert profiles (1 m depth). Results showed that long-term cultivation significantly improved soil texture: sand content decreased by an average of 387.2–460.6 g/kg, while silt and clay contents increased by an average of 330.6–400.9 g/kg and 55.7–67.1 g/kg, respectively. Soil texture transformed from sandy soil to silty loam. Soil salinity was markedly enriched along the profile, with the electrical conductivity in the 0–20 cm layer more than doubling compared to the desert control, showing typical surface salt accumulation. Calcium carbonate content also increased significantly, with an average increase of up to 97.1 g/kg. To further quantify the three-dimensional spatial distribution of soil properties, several depth function models were employed to fit vertical variation patterns. The binomial exponential function yielded the highest fitting accuracy ($R^2>0.85$ for all properties). For spatial prediction, the random forest (RF) model outperformed boosted regression trees (BRT) and multiple linear regression (MLR), achieving excellent performance ($R^2>0.90$). In conclusion, long-term cultivation has improved soil texture in desert areas,

①基金项目: 中国科学院国际合作局国际伙伴计划项目(131323KYSB20210004)、国家自然科学基金项目(42322102、42271058)、第三次新疆综合科学考察项目(2023xjkk0102)和中国科学院青年创新促进会项目(2021310)资助。

* 通信作者(xdsong@issas.ac.cn)

作者简介: 肖颖(1999—), 女, 湖北武汉人, 硕士研究生, 主要从事数字土壤制图研究。E-mail: xiaoying@issas.ac.cn

promoted the accumulation of clay and silt, salts, and calcium carbonate, and accelerated pedogenic processes, while also increasing the risk of salinization. The index function with a constant term best assesses the depth variation patterns of soil properties, and the RF method shows the optimal performance in predicting all soil properties from spatial scale in the desert area.

Key words: Desert cultivation; Soil texture; Salinization; Depth function; Digital soil mapping

干旱区约占全球陆地面积的 40%，是对气候变化最敏感的区域之一^[1]。中国是受荒漠化威胁最严重的国家之一，荒漠化土地面积超过 260 万 km²，占国土总面积的 27%^[2]，主要分布在极干旱、干旱和半干旱地区，水资源匮乏，生态系统脆弱。在这一背景下，干旱区土壤质地粗、结构松散、有机质含量低、盐碱化严重，严重制约土地利用效率^[3]。科学合理地开展干旱区土地，对提升沙漠地区土壤生产力、保障粮食安全及推动区域可持续发展具有重要意义^[4]。作为荒漠化防治的重要手段，科学有序的土地开垦在我国干旱区得到了广泛推广。研究表明，适度开垦在一定时期内能显著改善沙漠地区土壤的理化性质，降低容重，优化质地，提升养分水平，从而改善农业生产条件^[5]。但上述改善多具阶段性特征。部分研究指出，沙漠地区土壤属性在开垦 6~8 年后趋于稳定，随后可能因管理不当、水资源利用效率低等导致土壤质量下降^[6]。尤其在蒸发强、降水少、灌溉频繁的区域，土壤盐分更易积累，诱发次生盐碱化，加剧退化风险^[7-8]。

目前关于沙漠地区土壤长期耕作演变的系统研究仍较匮乏，尤其对剖面尺度上质地与盐分的垂直变化关注不足。沙漠地区土壤向高产农田转变的过程可持续数十年，演变缓慢而复杂，短期观测难以揭示其全貌^[9]。因此，从剖面尺度分析长期耕作对土壤质地与盐分的影响，有助于深化对干旱区土壤演变机制的理解，支撑盐碱化防治与土地管理。

数字土壤制图(Digital soil mapping)技术的发展，为量化干旱区土壤属性三维空间变异特征提供了新契机。数字土壤制图基于土壤-景观模型范式，借助统计学、地统计学与机器学习等技术，以有限的实地采样点数据量化土壤属性与环境变量(地形、气候、遥感指数、土地利用等)间的耦合关系，可实现土壤属性的空间预测^[10]。研究表明，数字土壤制图在多种生态系统，尤其是在干旱与半干旱地区的土壤属性建模中表现出良好的预测性能^[11]。在开垦耕作背景下，沙漠地区土壤呈现显著的垂直异质性，能反映其演化过程，因此，研究其质地和盐分的剖面变化至关重要^[12]。深度函数模型是拟合土壤属性垂直变化的重要工具，其已从手绘曲线发展为多项式、幂函数、

等积样条、指数与 S 型等多种数学模型^[13-14]。近年来，其与机器学习相结合，已广泛应用于有机碳等属性的三维建模^[15]，但在土壤质地与盐分方面的应用研究仍相对不足，特别是在沙漠地区。

基于以上，本研究以新疆典型沙漠地区长期耕作土壤为研究对象，综合运用野外采样、实验室分析和数字土壤制图等手段，重点探讨了长期耕作下土壤质地和盐分在土壤剖面的演变趋势，并利用不同深度函数和机器学习模型对其三维空间分布特征进行了预测及精度评价，以揭示沙漠开垦对土壤演化的影响，为沙漠地区土壤改良与农田管理提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区为新疆维吾尔自治区阿克苏地区阿拉尔市第十二团农场，位于和田河、阿克苏河和叶尔羌河的交汇处，地理位置 81°17'E~81°22'E，40°28'N~40°31'N，北邻塔里木河，南邻塔克拉玛干沙漠(图 1)，面积 5 400 hm²。该区年日照时数高，年均日照时数为 2 303 h，气候干旱，年平均降水量低至 60 mm，年均蒸散量高达 1 800 mm。自 1953 年阿克苏地区整编建立新疆军区农业建设第一师以来，大量冰雪融水与地下水被用于沙漠开垦，建设绿洲农业。根据当地土地管理记录与农民的描述，研究区已在天然沙质土地上耕作超过 50 年，其中棉花种植面积约占 80%，红枣和果树约占 20%。

近年来，随着国家西部大开发、“丝绸之路经济带”战略及新疆农田水利工程的推进，研究区土地利用格局发生了显著变化。耕地面积扩大，林果业发展迅速，部分草地和荒漠区已被开发利用或转化为人工绿洲。但同时，过度灌溉与土地高强度利用已引发土壤盐渍化、碳储量下降等生态危机。

1.2 数据来源与处理

为调查当地农业的发展现状，按照规则网格样点布设原则，南北设置间隔 500 m，东西设置间隔 1 km，本研究于 2019 年在研究区内布设 74 个样点采集土样(TG)。每个样点打 3 个土钻，钻取 1 m 深，按照 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 采集 6 层样品。每层 3 份土样充分混合为 1 个样本，约 1 kg。

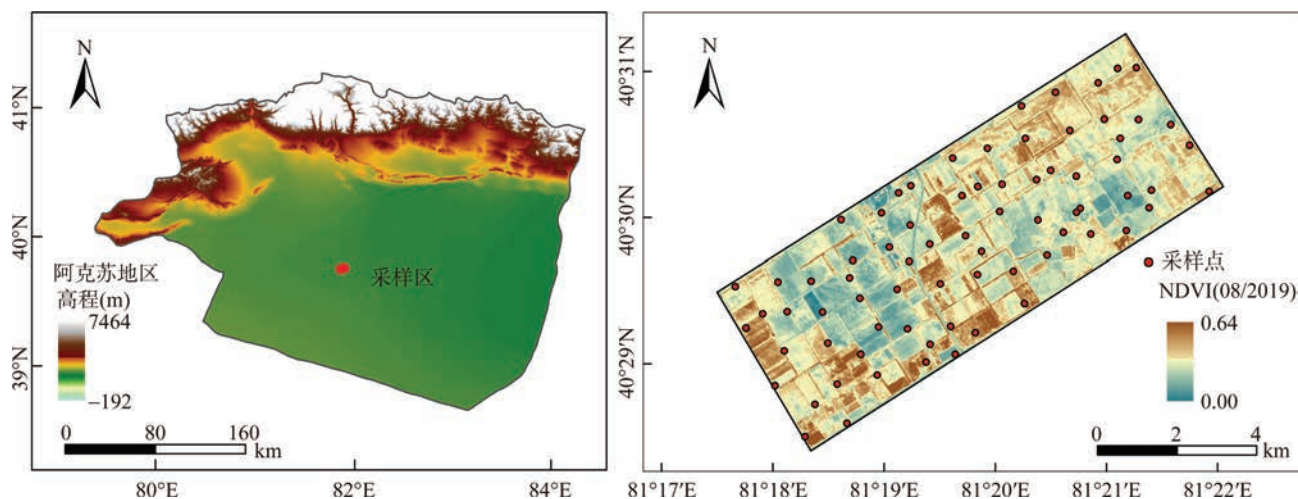


图1 研究区与采样点

Fig. 1 Study area and sampling sites

后于2024年在农场南部塔克拉玛干沙漠中以相同方式采集6个土钻样品,作为农场74个样点的对照土样(CK)。

1.2.1 土壤属性数据 将采集的土壤样品去除石砾和植物根系残茬,风干、称重、研磨、过2 mm筛后,用于土壤属性测定,包括电导率(EC)、质地(黏粒、砂粒、粉粒含量)和碳酸钙(CaCO_3)含量。其中,采用电极法测定土壤电导率,采用密度计法测定土壤质地,采用中和滴定法测定土壤 CaCO_3 含量。由于电导率与土壤盐分呈高度正相关,因此本研究将电导率作为土壤盐分含量的指标^[16]。电导率越高,土壤的盐害风险越大,可能对作物生长造成胁迫。而 CaCO_3 含量则反映了土壤中钙质物质的富集程度,是评价土壤碱化程度的重要化学指标^[17]。在干旱或半干旱环境中,土壤水分蒸发强烈,易导致 Ca^{2+} 与 HCO_3^- 反应形成碳酸钙沉淀,该过程不仅影响土壤结构,还可能引发土壤碱化。因此,本研究以电导率和碳酸钙含量作为土壤“盐”和“碱”的重要指标,用以分析50年耕作对沙漠地区土壤盐碱度的影响。

1.2.2 地形因子数据 海拔高度、坡度、坡向、平面曲率、剖面曲率、河流强度指数、地形湿度指数、距沟渠距离等地形变量基于航天飞机雷达地形测绘任务(Shuttle radar topography mission, SRTM)收集的DEM数据,在SAGA GIS中提取后导出。

1.2.3 遥感数据 收集2019年8—10月的归一化植被指数(NDVI)、盐度指数(SI)和碳酸盐指数(CAEX)=55等作为遥感变量。遥感变量均来自<https://search.asf.alaska.edu>。使用ArcGIS双线性插值算法,将所有环境变量重采样至10 m的空间分辨率。此外,

考虑到研究区规模有限,气候变化并不明显,因此,没有将气候因子作为环境变量。

NDVI、CAEX和SI是常用的遥感辅助变量,广泛用于表征植被覆盖度、地表特征识别与土壤盐渍化程度等环境因子特征。本研究为获取阿拉尔市第十二团农场的遥感辅助信息,基于Sentinel-2卫星多光谱影像数据提取上述3种指数,并结合波段特征进行计算。3个指数均通过波段比值形式构建,能有效减少大气干扰并增强地物分类精度。

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{R}) / (\text{NIR} + \text{R}) \quad (1)$$

$$\text{CAEX} = \text{G} / \text{B} \quad (2)$$

$$\text{SI} = (\text{B} - \text{R}) / (\text{B} + \text{R}) \quad (3)$$

式中:R、G、B、NIR分别代表红、绿、蓝、近红外波段的表面反射率,其值范围为0~1的浮点数值(常为量化整数除以10 000获得)。

1.3 研究方法

为量化关键土壤属性的三维空间分布特征,本研究对比分析了多元线性回归(Multiple linear regression, MLR)、提升回归树(Boosted regression tree, BRT)和随机森林(Random forests, RF)3种常用数字土壤制图模型的预测结果及其精度,并采用单项指数函数、多项指数函数和对数函数3种深度函数对土壤属性的剖面变化进行了拟合,最后选用精度最高的模型叠加生成研究区的土壤属性图。

其中,多元线性回归(MLR)是一种经典的回归分析方法,广泛应用于基于多个预测变量共同预测目标变量,同时识别变量间的交互效应,并探究各自变量对因变量的影响^[18]。该模型已广泛应用于土壤属性与多种环境变量之间的建模。提升回归树(BRT)是一种集成学习方法,区别于传统上拟合单

一简约模型的做法，其融合了回归树(Regression tree, RT)与提升(Boosting)两种算法的优势，通过逐步拟合多个简单回归树来增强预测性能^[19]。BRT本质上是一个迭代过程，其每步利用递归二值拆分对现有树中拟合欠佳的观测值进行重点建模，直至模型偏差达到最小^[20]。RF 模型是一种非线性的机器学习方法，是由 Breiman^[21]提出的一种基于分类树的集成算法。通过采用 bootstrap 重复抽样的方法有放回地抽取样本，以达到随机性的目的，同时利用这些样本建立大量决策树，构成随机森林。对于 RF 模型，取所有决策树预测结果的平均值作为最终预测结果。而在描述土壤剖面属性随深度变化的规律时，深度函数是一种常用的建模方法。该方法基于土壤属性在垂直剖面中的连续变化特性，利用数学函数对其变化趋势进行拟合和预测。通过构建函数，可实现对土壤质地特征、盐分含量等属性在不同深度上的精细模拟。

1.4 精度评价

本研究采用留一交叉验证对数字土壤制图模型进行精度评价。选用平均绝对误差(MAE)、均方根误

差(RMSE)和决定系数(R^2)作为精度评价指标。 R^2 反映了模型对数据变化的解释能力，范围 0~1，值越大表示模型拟合效果越好；MAE 表示预测值和观测值之间绝对误差的平均值，RMSE 表示预测值和观测值之间差异的平方根平均值，二者值越小，表明模型预测结果越精准。

2 结果与分析

2.1 50 年耕作对沙漠地区土壤属性的影响

2.1.1 土壤质地演变特征 由表 1 数据可知，50 年耕作管理显著改变了沙漠地区土壤的质地特征，这种变化在 0~100 cm 深度范围内均呈现显著差异。具体而言，土壤砂粒含量显著降低，平均值由 936.0 g/kg 降至 475.4~548.8 g/kg；土壤粉粒和黏粒含量则显著增加，其中粉粒含量平均值由 61.0 g/kg 提升至 391.6~461.9 g/kg，黏粒含量平均值由 3.0 g/kg 提升至 59.3~70.1 g/kg。根据国际制土壤质地分类标准，土壤质地由砂土逐渐演变为粉质壤土或壤土。未经耕作的沙漠土壤在剖面上质地均匀，而耕作 50 年后的土壤在不同深度上质地分异明显。

表 1 50 年耕作对土壤剖面黏粒、粉粒、砂粒含量的影响
Table 1 Effects of 50-year tillage on clay, silt and sand contents in the soil profile

土壤属性	深度(cm)	最大值		最小值		平均值	
		TG	CK	TG	CK	TG	CK
黏粒含量(g/kg)	0~10	242.4	3.0	9.9	3.0	59.3	3.0
	10~20	241.8	3.0	12.3	3.0	59.6	3.0
	20~40	237.2	3.0	8.2	3.0	58.7	3.0
	40~60	312.6	3.0	11.2	3.0	59.6	3.0
	60~80	327.8	3.0	9.3	3.0	70.1	3.0
	80~100	304.2	3.0	7.9	3.0	62.7	3.0
粉粒含量(g/kg)	0~10	682.8	61.0	41.5	61.0	394.1	61.0
	10~20	682.0	61.0	94.6	61.0	391.6	61.0
	20~40	694.4	61.0	81.6	61.0	397.3	61.0
	40~60	835.4	61.0	75.1	61.0	409.2	61.0
	60~80	825.3	61.0	70.8	61.0	434.6	61.0
	80~100	867.0	61.0	58.4	61.0	461.9	61.0
砂粒含量(g/kg)	0~10	948.7	936.0	143.9	936.0	546.6	936.0
	10~20	893.2	936.0	157.4	936.0	548.8	936.0
	20~40	910.2	936.0	134.8	936.0	544.0	936.0
	40~60	911.6	936.0	19.0	936.0	531.3	936.0
	60~80	905.4	936.0	20.5	936.0	495.3	936.0
	80~100	919.9	936.0	20.8	936.0	475.4	936.0

注：TG 表示耕作 50 年土壤，CK 表示对照沙漠土壤；下同。

2.1.2 土壤盐分状况和碳酸钙含量变化 经过 50 年的耕作管理，研究区沙漠土壤盐分状况和碳酸钙含

量均发生了显著变化(表 2)。其中，TG 的电导率相较 CK 呈现明显波动，在部分土层的变化率超过 100%。

从剖面上看,表层土壤(0~20 cm)的电导率显著增加,从 CK 的 0.3 mS/cm 左右上升至 TG 的 0.65~0.81 mS/cm,而亚表层土壤电导率则呈现不规则变化。同时, TG 盐分总量明显高于 CK,且表现出明显的盐分表聚现象。此外, TG 在 0~100 cm 土层的 CaCO_3 含量均高于 CK,这表明长期耕作促进了土壤中 CaCO_3 的大量积累。

2.2 土壤属性剖面分布特征模型筛选

表 3 数据表明,尽管 4 种土壤属性的深度变化模

式可能存在差异,但总体上均遵循指数关系。其中,带有常数项的指数函数(模型 2)在 3 个评估指标上均表现最佳,具有最高的 R^2 以及最低的 RMSE 和 MAE。对数函数模型(模型 3)的拟合效果较差,尤其在砂粒和粉粒含量的拟合中表现最差。使用模型 2 拟合的所有属性的 R^2 值均超过 0.85,显示出优异的拟合效果。这一结果表明,模型 2 最适合描述上述土壤属性随剖面深度的变化规律,因此,本研究后续将采用该模型进行土壤属性的三维制图。

表 2 50 年耕作对土壤剖面电导率和碳酸钙的影响
Table 2 Effects of 50-year tillage on EC and CaCO_3 contents in the soil profile

土壤属性	深度(cm)	最大值		最小值		平均值	
		TG	CK	TG	CK	TG	CK
EC(mS/cm)	0~10	3.50	0.50	0.06	0.09	0.81	0.25
	10~20	3.52	0.63	0.04	0.09	0.65	0.32
	20~40	2.69	1.75	0.05	0.10	0.52	0.66
	40~60	2.49	0.91	0.04	0.08	0.50	0.42
	60~80	3.03	2.68	0.04	0.08	0.58	0.70
	80~100	2.75	0.84	0.04	0.09	0.62	0.29
CaCO_3 含量(g/kg)	0~10	159.70	139.00	82.10	0.50	105.80	36.45
	10~20	164.50	107.00	78.10	0.50	106.50	37.73
	20~40	178.10	77.50	81.30	7.70	106.01	44.00
	40~60	197.30	110.00	79.70	0.50	109.84	64.83
	60~80	188.50	78.00	78.10	0.50	114.06	26.78

表 3 各深度函数拟合土壤属性的精度
Table 3 Accuracy of function fitting for soil properties at various depths

土壤属性	模型代码	深度函数类型	R^2	RMSE	MAE
EC(mS/cm)	模型 1	$A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.87	0.23	0.13
	模型 2	$B + A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.90	0.21	0.13
	模型 3	$A + k \cdot \ln(-\text{depth} + 1)$	0.85	0.26	0.16
CaCO_3 含量(g/kg)	模型 1	$A + k \cdot \ln(-\text{depth} + 1)$	0.85	8.93	5.49
	模型 2	$A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.87	8.85	5.23
	模型 3	$B + A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.75	9.28	5.94
砂粒含量(g/kg)	模型 1	$A + k \cdot \ln(-\text{depth} + 1)$	0.84	8.94	6.13
	模型 2	$A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.89	8.77	5.95
	模型 3	$B + A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.69	9.65	6.53
粉粒含量(g/kg)	模型 1	$A + k \cdot \ln(-\text{depth} + 1)$	0.82	7.53	5.13
	模型 2	$A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.87	7.02	5.01
	模型 3	$B + A \cdot e^{k \cdot \text{depth}}$	0.68	8.14	6.08

2.3 土壤属性三维空间预测与制图

采用 RF、BRT 和 MLR 三种方法,对 0~10 cm 土层 4 种土壤属性进行预测,结果(表 4)表明, RF 方法在所有土壤属性的预测中均展现出最优性能,所有

属性的预测 R^2 均超过 0.85; 尽管 BRT 方法也表现出相对良好的预测能力,但与 RF 模型相比仍存在一定差距; 相比之下, MLR 方法的预测效果最为逊色。因此,本研究采用 RF 方法对表层 0~10 cm 土壤属性

进行空间预测，同时结合确定的最佳深度模型(模型 2)，对研究区土壤属性进行三维空间制图。此外，使用样条函数将 4 种土壤属性插值至 0~10、10~20、20~40、40~60、60~80、80~100 cm 的中值，以展示 4 种土壤属性在剖面上的空间分布状况(图 2~图 5)。

表 4 不同模型预测土壤属性的精度
Table 4 Accuracy for different models to predict soil properties

土壤属性	模型类型	R ²	RMSE	MAE
EC (mS/cm)	RF	0.91	0.25	0.12
	BRT	0.85	0.28	0.13
	MLR	0.24	0.56	0.28
CaCO ₃ 含量 (g/kg)	RF	0.92	9.12	5.53
	BRT	0.81	9.35	5.67
	MLR	0.16	17.21	11.75
砂粒含量 (g/kg)	RF	0.93	9.38	4.28
	BRT	0.83	9.47	4.39
	MLR	0.12	18.80	8.64
粉粒含量 (g/kg)	RF	0.92	8.15	4.08
	BRT	0.80	8.54	4.39
	MLR	0.15	14.26	7.17

3 讨论

长期耕作改善了研究区沙地的土壤质量。本研究

选取土壤质地、电导率和 CaCO₃ 含量 3 种土壤属性，分析了自然因素与人为活动共同作用下的沙漠地区土壤演化特征。

土壤质地是反映土壤结构和生态功能的重要指标。本研究中，50 年耕作显著提升了沙漠地区土壤粉粒和黏粒的含量(表 1)，土壤由砂土演变为粉质壤土或壤土。这种变化既受自然风沙沉积、降尘输入等自然环境的长期影响，也与耕作制度下的频繁灌溉与有机质输入密切相关^[22]。灌溉促进了粉粒和黏粒的向下淋溶淀积，有机质和植物根系改善了土壤团粒结构，加快了土壤演化过程^[23]。表层砂粒含量高于深层土壤，反映了风力侵蚀的主导作用，而剖面内粉粒和黏粒的垂直迁移则体现了耕作对当地土壤质地空间分布的显著影响。

土壤电导率的变化揭示了耕作在提升沙漠地区土壤养分的同时，也可能带来盐碱风险。本研究中，50 年耕作显著提升了当地表层土壤盐分含量(表 2)。这一方面可能是灌溉和施肥会引入盐基离子，从而增加土壤表层的盐分；另一方面可能是干旱区域强烈的地表蒸发会导致土壤离子通过毛管水从下往上迁移，进而聚积在表层^[24]。因此，沙漠地区农田开发需要在提升土壤质量与控制盐分风险之间取得平衡，应采取合适的耕作管理措施，以减缓潜在的盐碱化趋势。

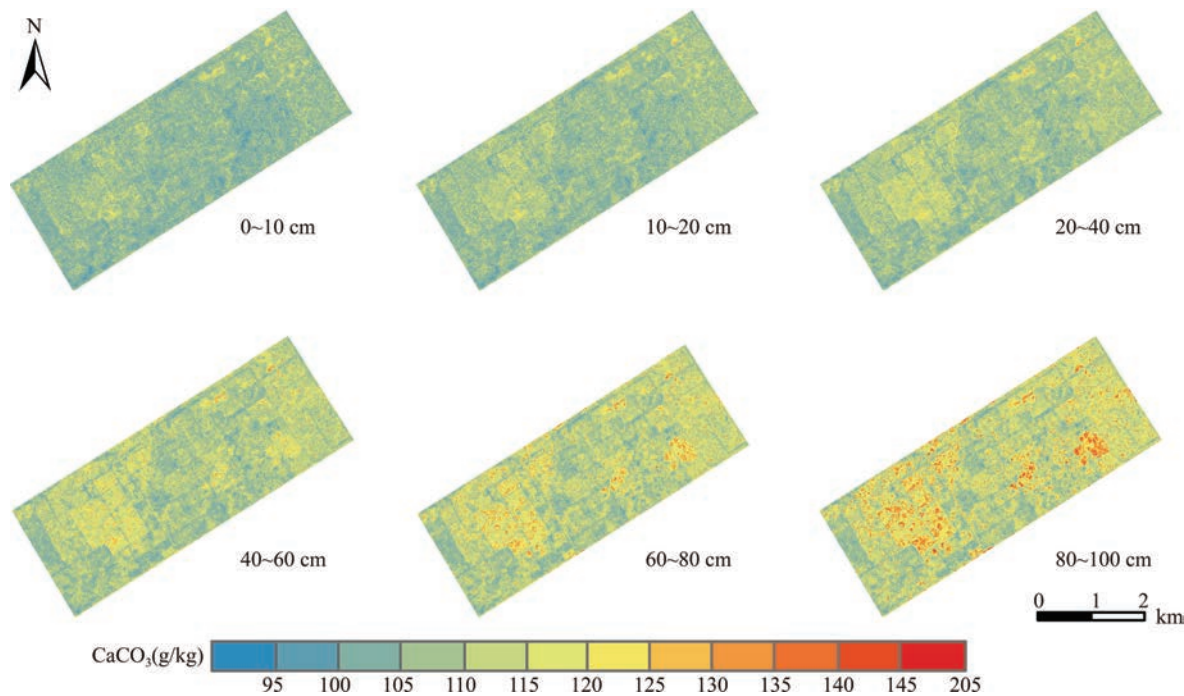


图 2 RF 模型预测 CaCO₃ 含量在不同土层深度的空间分布
Fig. 2 Spatia l distribution of CaCO₃ contents predicted by RF model at different soil depths

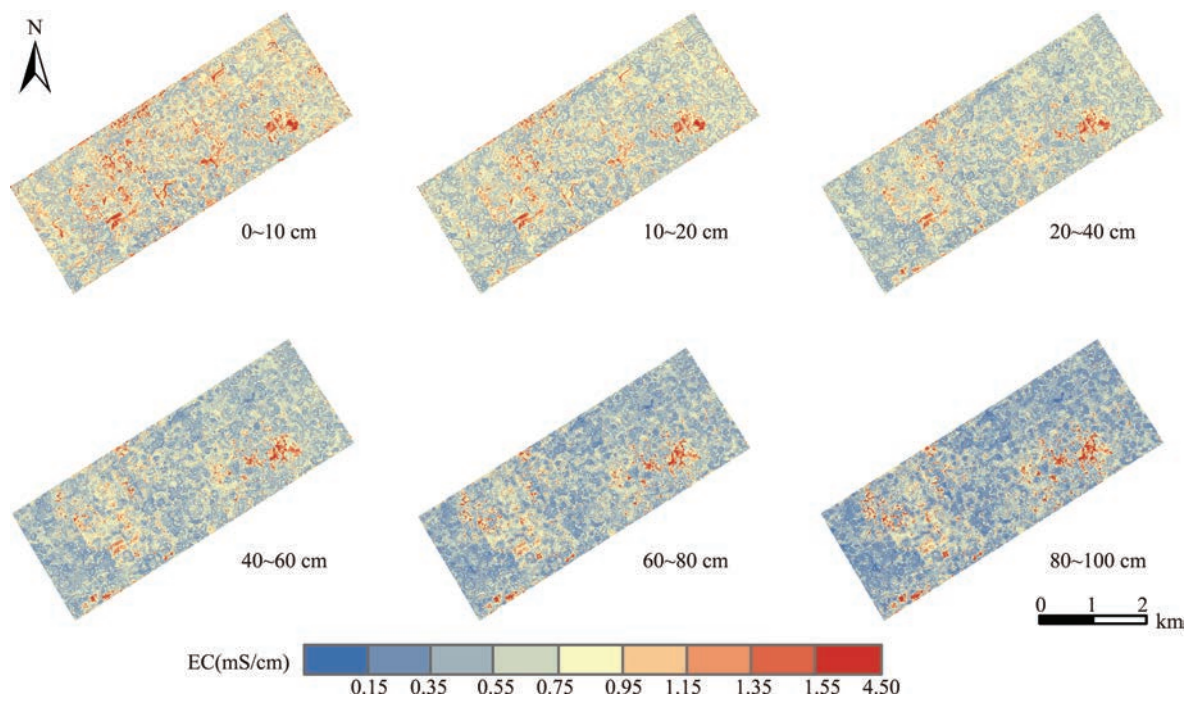


图 3 RF 模型预测电导率在不同土层深度的空间分布
Fig. 3 Spatial distribution of EC predicted by RF model at different soil depths

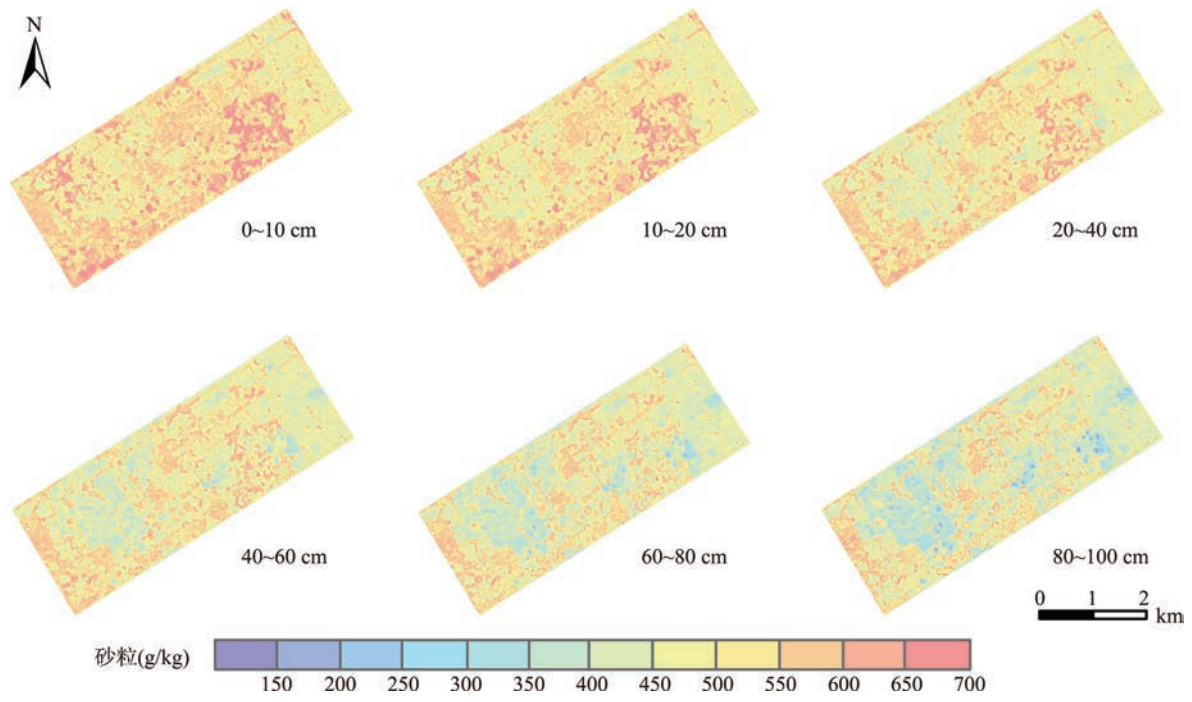


图 4 RF 模型预测砂粒在不同土层深度的空间分布
Fig. 4 Spatial distribution of sand contents predicted by RF model at different soil depths

CaCO_3 分布特征反映了成土环境和人为扰动共同影响的演化过程。本研究表明,对照沙漠土壤剖面 20~60 cm 深度是 CaCO_3 富集区,这是由于干旱气候条件下降水和蒸散发共同导致其淀积的结果;耕作 50 年后,这一分布趋势趋于均匀化,且随深度增加 CaCO_3 整体含量升高,反映出灌溉改变了水盐运移路

径,提高了土壤含水量,加快了 CaCO_3 的溶解-再淀积过程。此外,外源性碳酸盐的输入(如施肥和降尘)以及作物根系活动,也可能促进了 CaCO_3 在剖面中的积累^[25]。
研究区土壤属性剖面变化揭示了人类活动对土壤结构的影响。指数与对数深度函数,有助于量化土

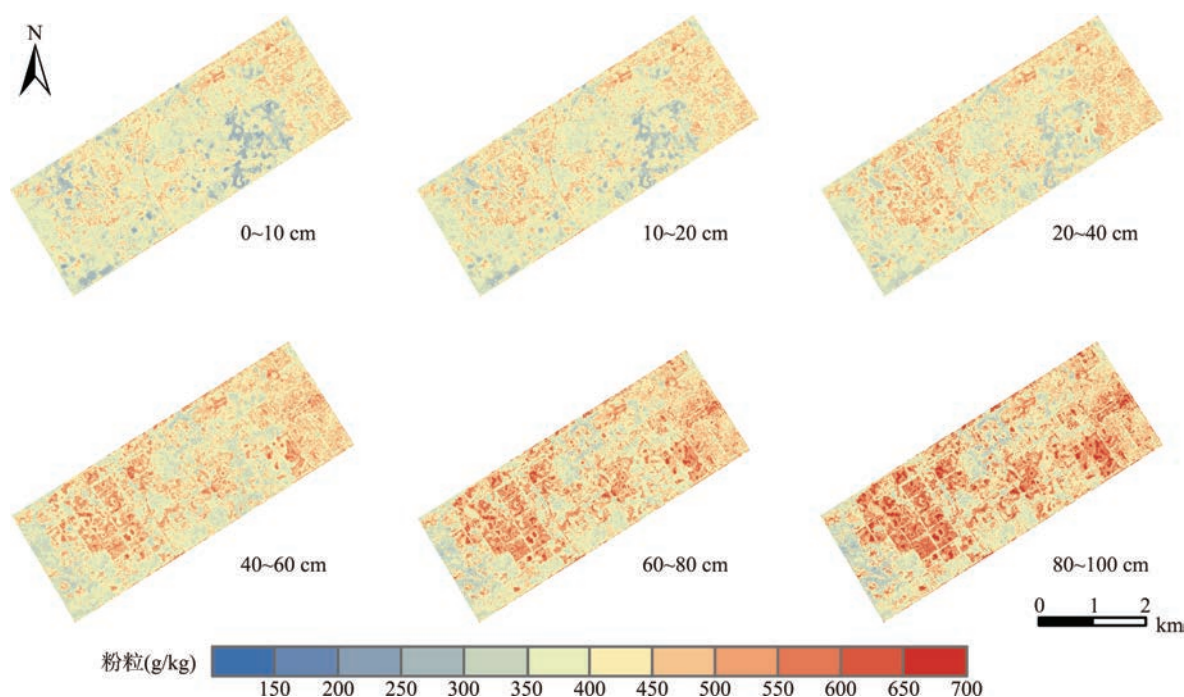


图 5 RF 模型预测粉粒在不同土层深度的空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of silt contents predicted by RF model at different soil depths

壤属性随剖面深度的变化趋势。原始沙漠土壤质地垂直分布均一,电导率与 CaCO_3 含量波动明显,整体结构单一。经过 50 年连续耕作后,土壤剖面结构发生显著改变,质地组分呈现出典型的垂向分异特征,盐分与 CaCO_3 在表层明显富集,其剖面分布规律趋近于农田土壤,与原始沙漠土壤存在明显差异,表明人类活动在较短时间尺度内已显著促进了沙漠地区土壤的成土进程。

此外,为量化研究区土壤质地与盐分的空间分布特征,本研究比较了 RF、BRT 和 MLR 三种方法的预测精度。结果表明,耕作增加了沙漠地区土壤属性的空间异质性,强化了对非线性预测模型的需求。与传统线性模型(MLR)相比,RF 模型表现出更高的预测精度,能有效刻画复杂环境因子间的交互作用^[26-27]。这进一步表明在自然-人为耦合作用主导的成土环境中,非线性建模方法具有更强的适应性与预测能力。本研究构建的三维预测模型,可为当地土壤时空演化监测提供数据支撑和技术路径。

综上所述,自然因素提供了沙漠地区土壤演化的背景,人为活动通过管理措施改变土壤水热环境和物质迁移路径,改善了研究区土壤的物理化学属性。两者共同作用,推动沙漠土壤由原始状态向农业土壤转变。本研究结果不仅加深了对沙漠地区土壤演化机制的理解,也为当地农田可持续管理提供了科学依据。

4 结论

1) 50 年耕作显著改善了研究区沙漠土壤的质地特征,砂粒含量下降,粉粒和黏粒含量增加,土壤由砂土转变为粉质壤土。

2) 耕作导致沙漠土壤盐分与 CaCO_3 积累,特别是在 0~20 cm 表层显著富集,表现出明显的盐分表聚现象,土壤盐碱化风险提升。

3) 深度函数拟合结果表明,二项指数函数拟合精度最优($R^2 > 0.85$),能有效表征沙漠地区土壤属性随剖面深度的变化趋势,反映了耕作干扰下沙漠地区土壤剖面的演化动态。

4) RF 模型在土壤属性空间预测中的表现优于 BRT 和 MLR 模型,在处理高维度、非线性及变量交互复杂的数据方面具有显著优势,适用于沙漠地区土壤属性的三维空间分布预测。

参考文献:

- [1] Lian X, Piao S L, Chen A P, et al. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world[J]. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(4): 232-250.
- [2] Ren Y, Zhang B, Chen X D, et al. Analysis of spatial-temporal patterns and driving mechanisms of land desertification in China[J]. *Science of the Total Environment*, 2024, 909: 168429.

- [3] Hachmi A, Andich K, Ezzahra El Alaoui-Faris F, et al. Amélioration de l'état de la végétation et de la fertilité des sols des parcours arides du Maroc par les techniques de restauration et de réhabilitation[J]. *Revue D'Écologie (La Terre et La Vie)*, 2018, 73(4): 401–413.
- [4] 王雨, 刘传洲, 陈金林, 等. 磷肥配施生物质改良剂对盐渍土改良与玉米增产的效应[J]. *土壤*, 2023, 55(2): 348–355.
- [5] 王冰, 张宇辰, 王昕悦, 等. 持续低量有机肥与化肥配施对绿洲农田土壤肥力和多功能性的影响[J]. *土壤学报*, 2025, 62(4): 1059–1071.
- [6] Bacq-Labreuil A, Neal A L, Crawford J, et al. Significant structural evolution of a long-term fallow soil in response to agricultural management practices requires at least 10 years after conversion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2021, 72(2): 829–841.
- [7] 张文生, 景何仿, 王维红, 等. 宁夏引黄灌区盐渍化土壤在改良剂作用下的水力特性试验[J]. *土壤*, 2024, 56(1): 193–201.
- [8] Rani J, Paul B. Challenges in arid region reclamation with special reference to Indian Thar Desert—its conservation and remediation techniques[J]. *International Journal of Environmental Science and Technology*, 2023, 20(11): 12753–12774.
- [9] Su Y Z, Yang R, Liu W J, et al. Evolution of soil structure and fertility after conversion of native sandy desert soil to irrigated cropland in arid region, China[J]. *Soil Science*, 2010, 175(5): 246–254.
- [10] 王桐, 宋洁, 王鑫, 等. 基于特征变量多重扩增与筛选的区域土壤容重随机森林预测[J]. *土壤*, 2024, 56(6): 1347–1357.
- [11] Zeraatpisheh M, Ayoubi S, Jafari A, et al. Digital mapping of soil properties using multiple machine learning in a semi-arid region, central Iran[J]. *Geoderma*, 2019, 338: 445–452.
- [12] Poggio L, Gimona A. National scale 3D modelling of soil organic carbon stocks with uncertainty propagation—An example from Scotland[J]. *Geoderma*, 2014, 232/233/234: 284–299.
- [13] Minasny B, McBratney A B, Mendonça-Santos M L, et al. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the Lower Namoi Valley[J]. *Soil Research*, 2006, 44(3): 233–244.
- [14] Zhang Y K, Biswas A, Adamchuk V I. Implementation of a sigmoid depth function to describe change of soil pH with depth[J]. *Geoderma*, 2017, 289: 1–10.
- [15] Fu P, Clanton C, Demuth K M, et al. Accurate quantification of 0–30 cm soil organic carbon in croplands over the continental United States using machine learning[J]. *Remote Sensing*, 2024, 16(12): 2217.
- [16] Muhetaer N, Nurmamet I, Abulaiti A, et al. A quantifying approach to soil salinity based on a radar feature space model using ALOS PALSAR-2 data[J]. *Remote Sensing*, 2022, 14(2): 363.
- [17] Guo A N, Ding L J, Tang Z, et al. Microbial response to CaCO_3 application in an acid soil in Southern China[J]. *Journal of Environmental Sciences*, 2019, 79: 321–329.
- [18] Zhang H, Wu P B, Yin A J, et al. Prediction of soil organic carbon in an intensively managed reclamation zone of Eastern China: A comparison of multiple linear regressions and the random forest model[J]. *Science of the Total Environment*, 2017, 592: 704–713.
- [19] Elith J, Leathwick J R, Hastie T. A working guide to boosted regression trees[J]. *Journal of Animal Ecology*, 2008, 77(4): 802–813.
- [20] Yang R M, Zhang G L, Liu F, et al. Comparison of boosted regression tree and random forest models for mapping topsoil organic carbon concentration in an alpine ecosystem[J]. *Ecological Indicators*, 2016, 60: 870–878.
- [21] Breiman L. Random forests[J]. *Machine Learning*, 2001, 45(1): 5–32.
- [22] Lal R. Soil carbon sequestration impacts on global climate change and food security[J]. *Science*, 2004, 304(5677): 1623–1627.
- [23] Cao Q Q, Li J R, Wang G, et al. On the spatial variability and influencing factors of soil organic carbon and total nitrogen stocks in a desert oasis ecotone of northwestern China[J]. *Catena*, 2021, 206: 105533.
- [24] Qadir M, Qureshi R H, Ahmad N. Amelioration of calcareous saline sodic soils through phytoremediation and chemical strategies[J]. *Soil Use and Management*, 2002, 18(4): 381–385.
- [25] Zhang Z C, Feng S C, Luo J Q, et al. Evaluation of microbial assemblages in various saline-alkaline soils driven by soluble salt ion components[J]. *Journal of Agricultural and Food Chemistry*, 2021, 69(11): 3390–3400.
- [26] Nabiollahi K, Taghizadeh-Mehrjardi R, Shahabi A, et al. Assessing agricultural salt-affected land using digital soil mapping and hybridized random forests[J]. *Geoderma*, 2021, 385: 114858.
- [27] Camera C, Zomeni Z, Noller J S, et al. A high resolution map of soil types and physical properties for Cyprus: A digital soil mapping optimization[J]. *Geoderma*, 2017, 285: 35–49.

(责任编辑: 于 飞)