

# 西藏一江两河区坡耕地整理初期土壤质量变化研究

谢骁健<sup>1,2</sup>, 苏正安<sup>1</sup>, 张建辉<sup>1</sup>, 次珠巴丹<sup>3</sup>,  
达娃桑布<sup>4</sup>, 周涛<sup>1,2</sup>, 周铃<sup>1,2</sup>, 吴清华<sup>1,2</sup>, 易聪<sup>1,2</sup>

(1. 中国科学院水利部成都山地灾害与环境研究所

山地表生过程与生态调控重点实验室, 成都 610041; 2. 中国科学院大学, 北京 100049;

3. 曲水县农业农村和水利局, 拉萨 850600; 4. 桑珠孜区农牧综合服务中心, 西藏 日喀则 857400)

**摘要:** [目的] 探明西藏一江两河区坡耕地整理后土壤质量变化特征, 为高原农业土地整理与土壤地力提升工作提供科学依据。[方法] 以拉萨市曲水县广泛实施的常规整理(ST)和客土整理(GT)坡耕地为研究对象。测定 12 项土壤物理、化学和生物学指标, 构建最小数据集, 并利用土壤质量指数法分析了不同坡位土壤质量特征。[结果] 坡耕地整理后, 坡下部形成细颗粒物( $<0.02\text{ mm}$ )富集区, 粉粒含量增幅达 41.95%~67.71%, 而坡上部土壤呈砂质化, 客土改良措施则能显著缓解耕层砂化趋势。土地整理显著增加耕层及亚耕层土壤容重, 土壤容重显著增加 12.20%~28.98%; 坡下部土壤阳离子交换量、有机质、全氮等养分含量接近或超过阶地高产田水平, 而坡上部呈养分流失与碱化趋势; 整理扰动显著抑制微生物生物量碳、氮、磷恢复, 但 GT 处理较 ST 表现出显著恢复潜力。坡下部微生物生物量较坡上部提高 1.25~1.56 倍, 但仍不及未整理坡耕地水平; 坡耕地整理 5 a 后, 不同坡位土壤质量指数呈显著空间分异性, 坡下部土壤质量指数较未整理坡耕地显著改善 50.00%, 坡中部下降 17.86%, 坡上部显著退化 57.14%。客土改良对改善耕层土壤质量具有积极作用。[结论] 西藏一江两河区坡耕地整理后短期内(5 a), 土壤质量整体呈下降趋势, 亟需优先在坡上部实施精准培肥改良措施, 以促进土壤质量快速恢复与地力提升。

**关键词:** 土壤质量指数; 最小数据集; 坡耕地; 高标准农田; 西藏

中图分类号: S157.3

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)02-0232-12

## Study on soil quality changes at initial stage of sloping farmland consolidation in region of Brahmaputra River and its two tributaries in Xizang

Xie Xiaojian<sup>1,2</sup>, Su Zheng'an<sup>1</sup>, Zhang Jianhui<sup>1</sup>, Cizhu Badan<sup>3</sup>, Dawa Sangbu<sup>4</sup>,  
Zhou Tao<sup>1,2</sup>, Zhou Ling<sup>1,2</sup>, Wu Qinghua<sup>1,2</sup>, Yi Cong<sup>1,2</sup>

(1. Key Laboratory of Mountain Surface Processes and Ecological Regulation, Institute of Mountain

Hazards and Environment, CAS, Chengdu 610041, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences,

Beijing 100049, China; 3. Agriculture, Rural and Water Resources Bureau of Qushui County, Lhasa 850600, China;

4. Integrated Service Center for Agriculture and Animal Husbandry of Sangzhu District, Xigaze, Xizang 857400, China)

**Abstract:** [Objective] To investigate the characteristics of soil quality changes after sloping farmland consolidation in the region of the Brahmaputra River and its two tributaries in Xizang, providing a scientific basis for agricultural land consolidation and soil fertility enhancement on the plateau. [Methods] The standard land consolidation (ST) and guest soil consolidation (GT) practices widely implemented in sloping farmland in Qushui County, Lhasa City, were selected as the research objects. Twelve soil physical, chemical, and biological indicators were measured, a minimum data set was constructed, and the soil quality index method was used to

收稿日期: 2025-04-23

修回日期: 2025-06-01

接受日期: 2025-06-04

资助项目: 国家自然科学基金(42277338); 国家重点研发计划项目(2023YFD1901203); 曲水县第三次土壤普查项目(SCJXCGZB-20221207)

第一作者: 谢骁健(2000—), 男(土家族), 湖北恩施人, 硕士研究生, 研究方向为土壤侵蚀和生态修复。E-mail: xiexiaojian@imde.ac.cn

通信作者: 苏正安(1980—), 男, 四川江油人, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀和生态修复研究。E-mail: suzhengan@imde.ac.cn

<https://stbj.publish.founderss.cn>

investigate the soil quality characteristics of different slope positions. [Results] After sloping farmland consolidation, fine particles ( $<0.02$  mm) accumulated in the lower slope positions, with an increase in silt content of 41.95%~67.71%, while the soil in the upper slope positions became sandy. Guest soil consolidation significantly alleviated the sandification trend of the cultivated layer. The soil bulk density of the cultivated layer and sub-cultivated layer increased significantly after land consolidation, with increases of 12.20% to 28.98%. The cation exchange capacity, organic matter, total nitrogen, and other nutrient contents of the soil in the lower slope positions were close to or higher than those of high-yield terraced fields. In contrast, the upper slope positions showed a tendency toward nutrient loss and alkalization. The recovery of microbial biomass carbon, nitrogen, and phosphorus was significantly inhibited due to soil disturbance from land consolidation. However, GT treatment showed significant recovery potential compared with ST treatment. Moreover, microbial biomass in lower slope positions increased by 1.25 to 1.56 times compared to upper slope positions but remained lower than the level of non-consolidated sloping farmland. After five years of sloping farmland consolidation, the soil quality index showed significant spatial differentiation in different slope positions. The soil quality index in lower slope positions improved significantly by 50.00% compared with non-consolidated sloping farmland, while those in middle slope positions decreased by 17.86%, and those in upper slope positions deteriorated significantly by 57.14%. Guest soil consolidation had a positive effect on improving the soil quality of the plough layer. [Conclusions] After a short-term period (five years) following sloping farmland consolidation in the region of the Brahmaputra River and its two tributaries in Xizang, a declining trend in the soil quality is observed. Therefore, it is necessary to prioritize the implementation of precision fertilization and improvement measures at upper slope positions to promote the rapid recovery of soil quality and enhance the fertility of sloping farmland.

**Keywords:** soil quality index; minimum data set; sloping farmland; high-standard farmland; Xizang

西藏高原耕地是当地群众赖以生存的基本资源,高标准农田建设是该区稳定作物产出并逐步提升耕地产能的重要方式<sup>[1]</sup>。西藏高原海拔高,气候、植被、土壤垂直地带性明显,其耕地多分布在河流阶地和较平缓的山谷坡地上。该区耕地面积较小且分布破碎化,同时道路通达性差,灌溉保证程度低,显著制约了农业生产管理效率,还对区域生态环境构成持续压力<sup>[2]</sup>。高标准农田建设通过综合性的土地整理和农业基础设施建设,形成田块平整集中、设施完善配套、土壤生态友好、宜于机械化作业的高产稳产耕地<sup>[3]</sup>。截至2023年8月,西藏已累计建成 $2.73 \times 10^5$  hm<sup>2</sup> 高标准农田,占全自治区耕地面积的61.83%<sup>[4]</sup>。早期土地整理工程主要集中于河谷阶地等耕地集中连片区域,已取得显著生态经济效益<sup>[1]</sup>。坡耕地作为西藏中低产田主要类型,因其显著的土壤侵蚀与养分流失问题<sup>[5]</sup>,近年来已成为西藏高标准农田建设重点实施区域。

相较于河谷阶地相对平缓的地形条件,坡耕地整治需实施大规模土地平整工程。高标准农田建设的土地平整工程按土方量最小原则,做到就近挖填平衡、运距最短、工效最高,并同步开展耕作层土壤剥离与回填作业。然而,在实际施工过程中,受机械施工限制(大型设备作业面要求)、地形特征(坡耕地

田块零散且石砾含量高)及挖填平衡(清除大粒径石块后回填量大)等多重因素影响,在坡地整理区域不可避免出现土层扰乱<sup>[6]</sup>,具体表现为心土层上移和部分表层土壤沿坡向下迁移等异位沉积特征,最终导致土壤质量及生产力波动。

土壤作为陆地生态系统物质循环与能量转化的重要载体,是农业生产不可或缺的物质基础<sup>[7]</sup>。土地整理作为高标准农田建设的核心环节,主要包括田面平整、田块归并等关键措施。土地整理重构了原有生态环境系统,而土壤作为主要的实施载体,其性质特征将发生显著变化<sup>[8]</sup>。土壤质量作为表征区域生态环境状况的关键要素,其不仅直接影响土地整理工程综合效益,更关系着农业生产的可持续发展,对于耕地地力维持和农业产能提升具有决定性作用<sup>[9]</sup>。近年来,土地整理工程引发的生态负效应引发学术界广泛关注。现有研究多聚焦黄土高原及西南丘陵山区等典型坡耕地区域<sup>[10-12]</sup>,相关结果表明机械扰动当年显著降低土壤养分供给能力,破坏微生物多样性,并导致不同坡位土壤质量呈现显著空间分异<sup>[11]</sup>,但工程竣工3~5 a后土壤质量恢复并提高<sup>[13]</sup>。然而,西藏高原因其特殊的生态脆弱性,其耕地土壤对外部扰动更为敏感。目前针对西藏一江两河区坡耕地整理工程的相关研究鲜有报道,尤其是不同坡

位的土壤质量的空间分异特征亟待探明。

为探明西藏一江两河区坡耕地整理后土壤质量变化及其坡位空间分异规律,本研究以常规坡地整理和客土坡地整理耕地为研究对象,以未整理坡耕地作为空白对照,阶地高产田为有效对照。通过室内测试化验,从土壤物理、化学和生物学性质入手,结合土壤质量指数法,构建最小数据集,查明坡耕地整理土壤性质及其坡位空间分异特征,揭示坡耕地整理对土壤质量的影响,为高原耕地可持续发展提供科学依据。

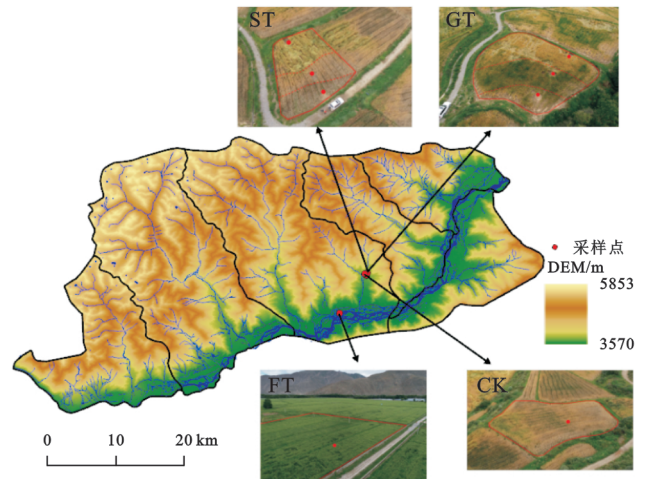
## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于西藏自治区拉萨市曲水县(29°14′—29°36′N, 90°21′—90°04′E),总面积为 1 627 km<sup>2</sup>(图 1)。该区地处雅鲁藏布江中游河谷地带,中部河谷区地势较为平坦,山沟发育呈现自高位狭窄段向低位宽阔段过渡的特征,形成大小不一的冲积扇,海拔 3 501~5 891 m。气候属高原温带半干旱季风类型,年均降水量 444.8 mm(95%集中于 5—9月),极端日降水量达 41.6 mm,年均蒸发量 2 205.6 mm,约为降水量的 5 倍<sup>[14]</sup>。年均气温 7.5℃,年均日照时数 3 007.7 h,具有太阳辐射强,日照长,昼夜温差显著的特点。坡耕地土壤以坡积、洪积母质发育的冷棕钙土为主,河谷阶地主要是冲积母质形成的潮土。主要农作物包括青稞(*Hordeum vulgare* var. *coeleste* L.)、小麦(*Triticum aestivum* L.)和玉米(*Zea mays* L.)。

研究区河谷阶地地势平缓且地形起伏较小(相对高差≤1.0 m),发育成熟的潮土广泛分布。独特的

地貌特征使耕地呈现集中连片分布格局,形成高产稳产农田的核心区。该区土地整理以田埂破除、田块规整及沟渠系统归并等工程措施为主,施工期间同步清除地表大粒径砾石。而沟谷坡耕地分布区坡度相对较大,耕地呈细碎化分布特征。在土地整理过程中,重点开展土地平整、田块归并和宜机化改造等核心工程。常规坡地整理模式首先剥离坡地表层土壤(20 cm)并就近堆置,随后将上部坡体土壤向下转移,再合并零散田块形成规模化梯田,最后回填原表土至整理后的田面,施工期间同步清除地表大粒径砾石;客土坡地整理模式在常规坡地整理的基础上,从邻近坡麓地带区取用表层冷棕钙土,经与原表土混合后均匀覆盖于改造地表,形成厚度为 20 cm 的客土层。客土土源主要物理、化学性质见表 1。



注:基于标准地图服务系统下载的审图号 GS(2019)1822 号的标准地图制作,底图未做修改,下图同。

图 1 研究区地理位置与采样点

Fig. 1 Geographical location of study area and sampling sites

表 1 客土土源主要物理、化学性质

Table 1 Main physical and chemical properties of guest soil

黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	pH 值	阳离子交换量/ (cmol·kg <sup>-1</sup> )	有机质/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全氮/ (g·kg <sup>-1</sup> )	全磷/ (g·kg <sup>-1</sup> )
8.46	14.19	77.35	7.5	7.7	17.29	0.97	0.86

### 1.2 土壤样品采集及测试

2024年8月,在曲水县开展实地踏勘,基于典型性和代表性原则,选取 4 种典型处理样地开展对比研究,具体包括:常规坡地整理(Standard Land Consolidation, ST)、客土坡地整理(Guest Soil Consolidation, GT)、阶地高产田(Farmland Terrace, FT)以及未整理坡耕地(Control, CK),各设置 1 个样地。土地整理工程于 2019 年竣工,至 2024 年稳定投入使用 5 a,配套建设田间道路系统及灌溉排水设施。两处坡耕地整理样地在施工前均呈阶梯式坡地地貌特征,由上下两级坡面构成。通过土地平整和田块归并工程,对

耕层(20 cm)保护性剥离,将上级坡面土体定向转移至下级坡面,最后表土回填,整合形成水平梯田,示意图见图 2。在邻近区域选取未经土地整理的坡耕地样地,其地势相对平缓且面积较大,连续耕作超过 10 a。所有样地均于当年 3 月统一施用商品有机肥,实物用量为 1 500 kg/hm<sup>2</sup>,有机质含量达 40%。

在避开施肥时段及施肥区域的前提下开展样地布设。针对 CK 和 FT 样地,分别设置 1 个典型剖面(长 1.5 m×宽 2 m×深 0.8 m),而针对具有地形梯度特征的 ST 和 GT 样地,分别在上、中、下坡位设置 1 个典型剖面,共设置 8 个剖面(图 3)。地形改造后,坡耕

地整理样地各坡位空间对应关系为坡上部对应原始上级坡面,坡中部对应原阶梯交界过渡带,坡下部则对应原下级坡面。坡耕地整理样地编码基于坡位标识,ST 样地标记为 ST-u(坡上部)、ST-m(坡中部)、ST-l(坡下部),GT 则依次对应为 GT-u,GT-m,GT-l。

典型样地剖面点基本信息见表 2。由于坡地整理过程强烈扰动了原始土层,导致其与传统的土壤发生层结构不一致。为此,每个剖面按照经验深度划分为 3 层,分别为耕层(0—20 cm)、亚耕层(20—40 cm)、深层(40—80 cm)。在 8 个剖面样点位置,采样前清除地表植被覆盖层及碎石,按自下而上的顺序分层采样:每层随机选取 5~8 个采样点,混合均匀后构成 1 个混合样本,每个层次设置 3 个重复。每个理化分析样本经 5 mm 筛分取 1.5 kg,微生物检测鲜样经 2 mm 筛分取 0.5 kg。原状土采集使用经清洁干燥处理的 10 cm 内径环刀及铝盒,按自下而上的顺序在每个土层采集 6 个环刀样本,采样后立即密封环刀两端以防止水分蒸发,现场使用电子天平(精度 0.01 g)进行称量记录。所有样本经人工剔除根系、石砾、动

植物残体等杂质后,所有样本依据检测指标需求进行分装处理。其中,理化分析样本常温避光存放,经自然风干后和磨碎过 0.25 mm 和 2 mm 尼龙筛;微生物样本于 4 °C 冰箱冷藏保存。



图 2 坡耕地整理工程土地平整示意图  
Fig. 2 Schematic diagram of land leveling in sloping farmland consolidation

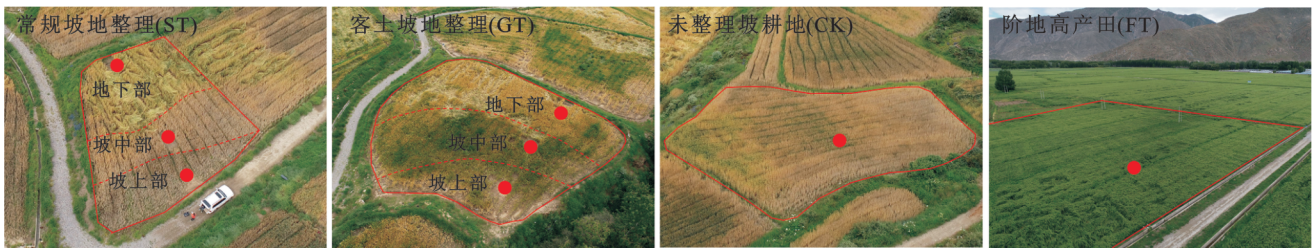


图 3 典型样地采样点  
Fig. 3 Sampling points in representative plots

表 2 典型样地剖面点基本信息

Table 2 Basic information of profile points in representative plots

编码	坡位	经度 E/(°)	纬度 N/(°)	海拔/m	坡度/(°)	土壤类型
ST-u	上					
ST-m	中	90.8280	29.4217	3758	4.2	冷棕钙土
ST-l	下					
GT-u	上					
GT-m	中	90.8287	29.4243	3784	3.1	冷棕钙土
GT-l	下					
CK		90.8253	29.4237	3780	6.5	冷棕钙土
FT		90.7921	29.3715	3589	1.3	潮土

土壤样品共测定 12 项土壤指标。土壤物理和化学性质按照《土壤农业化学分析方法》进行测定<sup>[15]</sup>,土壤生物学性质则按照《土壤微生物生物量测定方法及其应用》进行测定<sup>[16]</sup>。容重(Bulk Density, BD)采用环刀法;土壤机械组的测定采用马尔文 MasterSizer 2000 型激光粒度仪完成;pH 值采用电位法,水土比为 2.5:1;阳离子交换量(Cation Exchange Capacity, CEC)采用 NH<sub>4</sub>Cl-NH<sub>4</sub>Ac 交换法;有机质

(Soil Organic Matter, SOM)采用浓 H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>-K<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub>外加热法;全氮(Total Nitrogen, TN)采用半微量开氏蒸馏法;全磷(Total Phosphorus, TP)采用 HClO<sub>4</sub>-H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 氧化钼锑抗比色法;土壤微生物生物量碳氮(Microbial Biomass Carbon, MBC, Microbial Biomass Nitrogen, MBN)采用氯仿熏蒸法,熏蒸后 K<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> 浸提,使用 TOC 检测;土壤微生物生物量磷(Microbial Biomass Phosphorus, MBP)采用氯仿熏蒸法,熏蒸后 NaHCO<sub>3</sub>

浸提,使用ICP检测。土壤颗粒的分级采用国际土壤颗粒分类制:黏粒(Clay, <0.002 mm)、粉粒(Silt, 0.002~0.02 mm)、砂粒(Sand, 0.02~2 mm)。

### 1.3 土壤质量评价方法

土壤质量评价包括物理、化学和生物学性质3个方面,这些性质综合表征共同决定着土壤的农业生产水平。基于12项土壤指标构建土壤总数据集(Total Data Set, TDS),并从中筛选出关键指标组成土壤最小数据集(Minimum Data Set, MDS),采用土壤质量指数法评价土壤质量。

**1.3.1 最小数据集建立** 采用主成分分析法(Principal Component Analysis, PCA)筛选最小数据集,结合最大方差旋转法优化因子载荷矩阵,从而通过各主成分综合反映总数据集的核心信息。选取特征值 $\geq 1$ 的主成分,将因子载荷绝对值 $\geq 0.5$ 的指标归入同1组,对于在多个主成分上因子载荷绝对值均 $\geq 0.5$ 的指标,依据最大载荷原则将其分配至载荷值最高的组<sup>[17]</sup>。载荷向量范数值(Norm值)表示因子的信息解释力,其中Norm值越高表明该指标对主成分的信息贡献度越高。在各分组内,保留Norm值处于最大值90%以上区间的指标作为候选指标,若分组内同时存在多个候选指标时,如果指标间相关系数 $< 0.5$ ,则全部保留,反之,选择Norm值高的指标纳入最小数据集<sup>[18]</sup>。

$$N_{ik} = \sqrt{\sum_{i=1}^k (u_{ik}^2 \lambda_k)} \quad (1)$$

式中: $N_{ik}$ 为在第 $k$ 个主成分上 $i$ 指标的Norm值; $k$ 为特征值 $\geq 1$ 的主成分个数; $u_{ik}$ 为第 $k$ 个主成分上第 $i$ 项指标的荷载; $\lambda_k$ 为第 $k$ 个主成分的特征值。

**1.3.2 指标隶属度** 采用标准评分隶属函数对土壤指标进行标准化。根据每个指标对土壤质量的不同影响,应用正S型(适用于正向增益指标)和抛物线型(适用于区间最优指标)评分函数对指标进行评分(0~1)<sup>[19]</sup>。具体而言,土壤容重、黏粒含量、粉粒含量、砂粒含量及pH值适用于抛物线型函数,其余指标则采用正S型函数进行评分。参考西藏耕地质量监测指标分级标准及相关研究<sup>[20-21]</sup>,确定各指标在不同隶属度函数曲线上的拐点值(表3)。

$$\text{SSF}_1: f(x) = \begin{cases} 1.0 & l \leq x \leq u \\ 0.9 \frac{u_1 - x}{u_1 - u} + 0.1 & u < x < u_1 \\ 0.9 \frac{x - l_1}{l - l_1} + 0.1 & l_1 < x < l \\ 0.1 & x \leq l_1 \text{ 或 } x \geq u_1 \end{cases} \quad (2)$$

$$\text{SSF}_2: f(x) = \begin{cases} 1.0 & x \geq u \\ 0.9 \frac{x - l}{u - l} + 0.1 & l < x < u \\ 0.1 & x \leq l \end{cases} \quad (3)$$

式中: $f(x)$ 为指标评分; $x$ 为指标值; $l$ 和 $u$ 分别为下限和上限阈值。

表3 隶属度曲线转折点取值  
Table 3 Turning point values for membership function curves

指标	$l_1$	$l$	$u$	$u_1$
BD/(g·cm <sup>-3</sup> )	1	1.1	1.25	1.55
Clay/%	0	15	25	45
Silt/%	0	30	45	75
Sand/%	0	30	55	85
pH	5.5	6.5	7.5	9
CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )		5	20	
SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )		10	40	
TN/(g·kg <sup>-1</sup> )		0.5	3	
TP/(g·kg <sup>-1</sup> )		0.4	1	
MBC/(mg·kg <sup>-1</sup> )		100	400	
MBN/(mg·kg <sup>-1</sup> )		10	55	
MBP/(mg·kg <sup>-1</sup> )		5	20	

**1.3.3 土壤质量指数计算** 通过主成分分析法提取土壤质量评价指标的公因子方差,并以各指标的公因子方差在总公因子方差中的占比作为其权重。

$$W_i = \frac{F_i}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (4)$$

式中: $W_i$ 为第 $i$ 个土壤质量评价指标的权重; $F_i$ 为第 $i$ 个土壤质量评价指标的公因子方差; $n$ 为土壤质量指标的总数。

土壤质量指数的计算基于加权求和法,其数值由各评价指标得分值与其对应权重之积累加而成。

$$\text{SQI} = \sum_{i=1}^n W_i \times S_i \quad (5)$$

式中:SQI为土壤质量指数; $S_i$ 为第 $i$ 个土壤质量指标的得分值; $W_i$ 为第 $i$ 个土壤质量评价指标的权重; $n$ 为参评土壤质量指标的个数。

## 1.4 数据处理

研究区地理位置及采样点图使用ArcGIS 10.8软件绘制;数据统计分析使用Excel 2021软件、R语言(4.41)处理;土壤性质及土壤质量图使用Origin 2021软件、R语言(4.41)绘制。

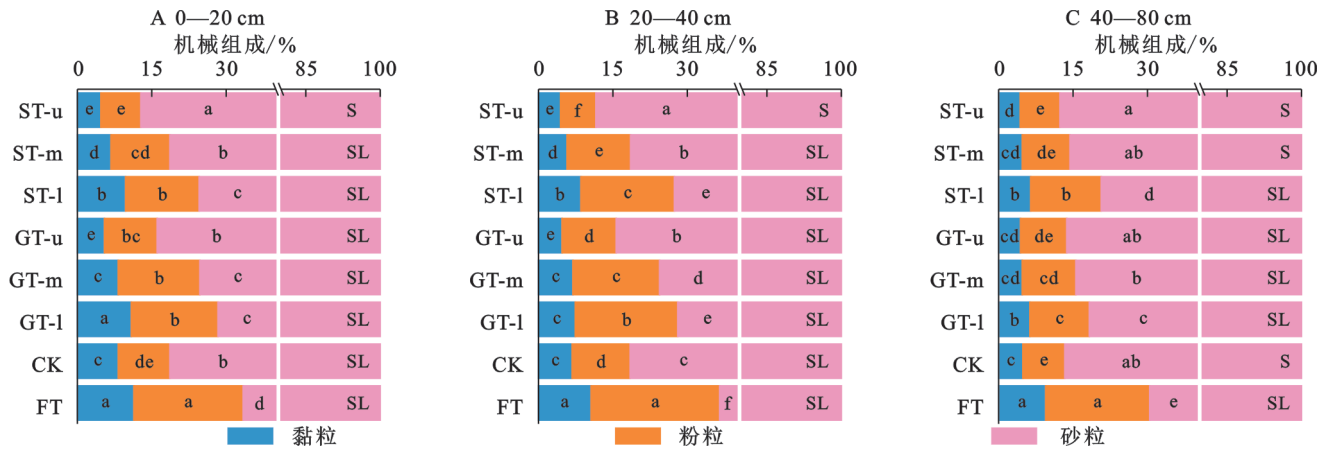
## 2 结果与分析

### 2.1 坡耕地整理对土壤物理性质的影响

坡耕地整理后,不同坡位的土壤机械组成具有显著

空间分异性(图 4)。自坡上至坡下部,各土层黏粒(4.69%增至 8.22%)和粉粒含量(9.11%增至 16.61%)呈显著递增趋势( $p < 0.05$ ),而砂粒含量(86.31%降至 75.41%)呈显著递减趋势( $p < 0.05$ )。在坡上部,ST-u 各土层黏粒含量较 CK 显著减少,降幅 11.05%~42.52%,同时耕层和亚耕层砂粒含量占比显著增加 7.22%~8.49%,剖面土壤质地为砂土及壤质砂土,呈砂质化趋势。值得注意的是,客土措施通过外源细颗粒

物质( $< 0.02 \text{ mm}$ )的输入,补偿坡上部(GT-u)耕层因机械扰动作用引发的细颗粒物质流失问题。GT-u 处理耕层粉粒含量(10.63%)显著高于 ST-u 处理(8.05%)( $p < 0.05$ )。坡下部处理组(ST-l, GT-l)则形成细颗粒物质富集区,ST-l 和 GT-l 处理各土层粉粒含量显著高于 CK,增幅 41.95%~67.71%。阶地高产田(FT)的黏粒和粉粒含量显著高于其他处理组,分别达到最大值[( $10.49 \pm 0.90$ )%和( $22.97 \pm 2.76$ )%]。



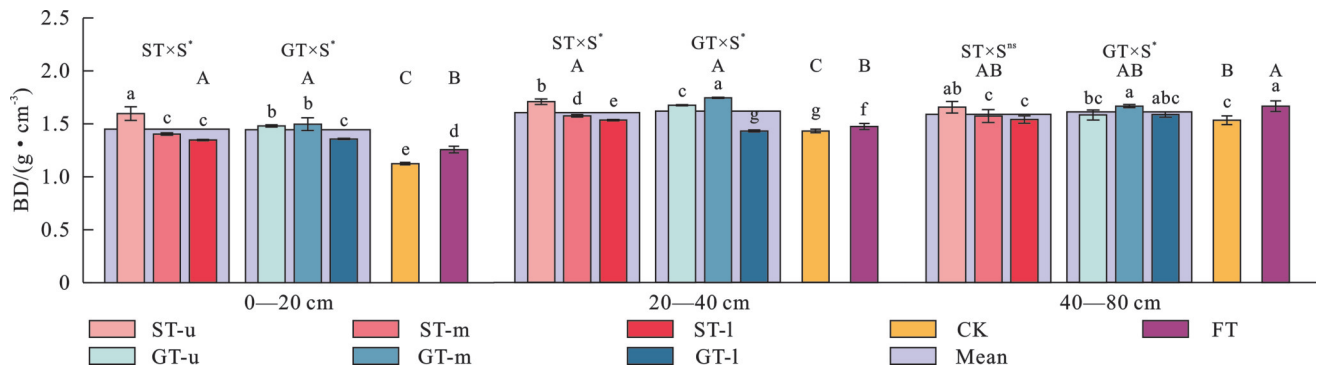
注:S为砂土及壤质砂土;SL为砂质壤土;不同小写字母表示各处理间指标在同一土层差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图 4 土壤机械组成及其坡位空间分异特征

Fig. 4 Soil mechanical composition and spatial differentiation characteristics across slope positions

由图 5 可知,土地整理显著增加耕层及亚耕层容重,导致土壤压实效应加剧。这可能源于土地整理工程的宜机化改造以及后续长期机械化耕作活动等影响。与 CK 相比,常规坡地整理(ST)和客土坡地整理(GT)处理的耕层和亚耕层容重显著增加 12.20%~28.98% ( $p < 0.05$ )。FT 耕层和亚耕层容重较 CK 显著增加 3.03%~11.87% ( $p < 0.05$ ),但显著低于 ST 和 GT ( $p < 0.05$ )。

坡耕地整理后,不同坡位的容重呈现显著的空间分异性。自坡上至坡下部,ST 处理各土层容重呈显著递减趋势,GT 处理则表现为先微幅上升后显著下降,整体仍呈减少趋势。坡下部处理组(ST-l, GT-l)耕层和亚耕层容重与坡上部处理组(ST-u, GT-u)和坡中部处理组(ST-m, GT-m)差异显著,容重显著降低 0.05~0.28  $\text{g}/\text{cm}^3$ ,但较 CK 土壤仍表现出显著压实效应。



注:Mean 表示常规坡地整理(ST)与客土坡地整理(GT)中各坡位的均值;\*表示显著相关( $p < 0.05$ );ns 表示不显著( $p > 0.05$ );S 表示坡位;不同大写字母表示各样地间指标在同一土层差异显著( $p < 0.05$ ),下同。

图 5 土壤容重及其坡位空间分异特征

Fig. 5 Soil bulk density and spatial differentiation characteristics across slope positions

## 2.2 坡耕地整理对土壤化学性质的影响

坡耕地整理(ST, GT)处理显著改善各土层的土壤 pH 值(图 6)。与 CK 相比,ST 和 GT 处理各土层 pH 值显著降低 0.75~0.93 个单位( $p < 0.05$ )。两种坡

耕地整理处理间 pH 值在耕层具有显著差异( $p < 0.05$ ),其中 GT 处理(7.39)显著低于 ST 处理(7.56),这表明客土坡地整理处理能更有效改善耕层土壤酸

碱环境。坡耕地整理后,不同坡位的pH值呈现显著的空间分异性。自坡上至坡下部,各土层pH值(8.12减至6.97)呈显著递减趋势( $p < 0.05$ )。结果表明,坡

耕地整理坡下部和坡中部的土壤酸碱环境得到显著改善,但坡上部耕层有进一步碱化趋势。FT各土层pH值与CK无显著差异( $p > 0.05$ )。

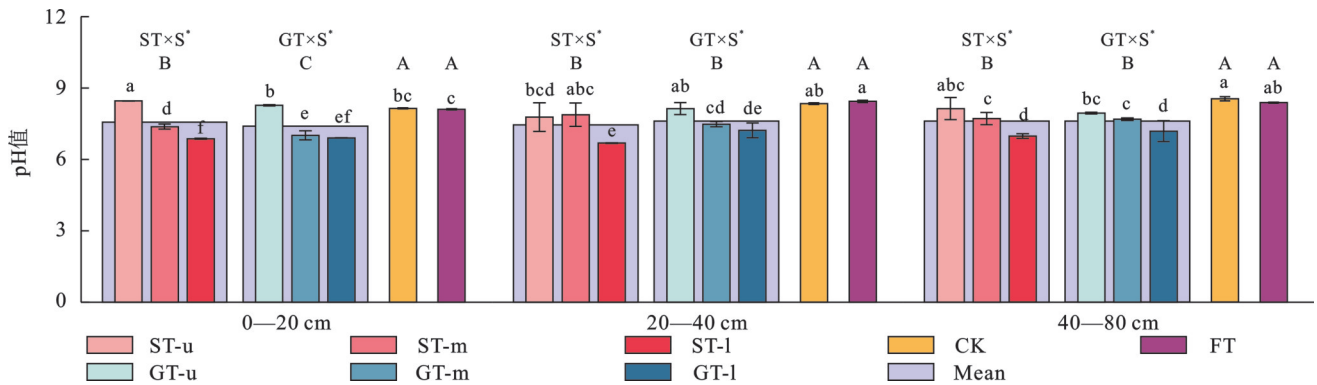


图6 土壤pH值及其坡位空间分异特征

Fig. 6 Soil pH value and spatial differentiation characteristics across slope positions

坡耕地整理主要改善亚耕层和深层的土壤阳离子交换量及全量养分水平,而对耕层有显著负向影响(图7)。与CK相比,ST和GT处理的耕层阳离子交换量、有机质、全氮、全磷含量显著降低20.69%~36.89%( $p < 0.05$ );亚耕层整体与CK无显著差异( $p > 0.05$ );而在深层显著提升12.72%~45.96%。值得注意的是,GT处理耕层全磷含量较ST处理显著提升9.64%,阳离子交换量显著提升14.74%( $p < 0.05$ ),这表明客土措施能更有效改善耕层土壤阳离子交换量和全磷水平。FT各土层的阳离子交换量、有机质、全氮、全磷含量显著高于坡地系统各处理(CK,ST,GT)( $p < 0.05$ )。坡耕地整理后,不同坡位土壤化学性质呈显著坡位空间分异性( $p < 0.05$ )。自坡上至坡下部,阳离子交换量(3.92 cmol/kg增至11.81 cmol/kg)、有机质(3.89 g/kg增至15.33 g/kg)、全氮(0.24 g/kg增至0.94 g/kg)、全磷(0.67 g/kg增至0.94 g/kg)含量呈显著增加趋势( $p < 0.05$ )。坡下部处理组(ST-l,GT-l)亚耕层和深层土壤阳离子交换量及养分水平均较CK显著提升,其中阳离子交换量显著高于FT( $p < 0.05$ )。而坡上部处理组(ST-u,GT-u)均处于最低水平,较CK显著降低( $p < 0.05$ )。这表明坡耕地整理坡下部阳离子交换量、有机质、全氮、全磷得到显著改善,且坡下部亚耕层和深层已接近甚至超过阶地高产田水平,而坡上部表现出显著退化特征。

### 2.3 坡耕地整理对土壤微生物生物量的影响

坡耕地整理对各土层微生物生物量碳、氮、磷均有显著负向影响(图8)。与CK相比,ST和GT处理的耕层微生物生物量碳、氮、磷均显著降低15.45%~66.09%。这主要源于土地整理过程对土体结构的高强度扰动,导致土壤微生物系统尚未恢复至原始状

态。值得注意的是,GT处理耕层微生物生物量碳、氮、磷分别较ST处理显著提升66.42%,33.33%,74.72%( $p < 0.05$ ),这表明客土措施能更有效改善耕层微生物生物量水平。坡耕地整理后,耕层和亚耕层土壤微生物生物量碳、氮、磷整体呈显著坡位空间分异性。自坡上至坡下部,耕层和亚耕层微生物生物量碳(90.33 mg/kg增至229.10 mg/kg)、微生物生物量氮(14.35 mg/kg增至36.77 mg/kg)、微生物生物量磷(6.25 mg/kg增至14.04 mg/kg)含量呈显著增加趋势( $p < 0.05$ )。这表明微地形重塑显著改变微生物群落的分布格局。FT的微生物生物量整体处于最高水平。

### 2.4 坡耕地整理对土壤质量的影响

2.4.1 构建最小数据集 经KMO和Bartlett球形检验,KMO值为0.83( $> 0.70$ ),Bartlett球形检验结果呈极显著( $p < 0.001$ ),表明总数据集土壤指标适合进行主成分分析(PCA)。PCA分析结果表明(表4),根据特征值 $\geq 1$ 的提取原则,共得到前3个主成分(PC<sub>1</sub>, PC<sub>2</sub>, PC<sub>3</sub>),其贡献率分别为37.43%,36.26%,16.16%,累计贡献率为89.85%,说明可以解释土壤指标的绝大部分信息。

根据最小数据集的构建原则,对各主成分中荷载绝对值高于0.5的指标进行分组,并计算得到各指标的Norm值。按照每组中Norm值在最高值10%范围内的选取原则,并结合相关性( $\geq 0.5$ )(图9)进行指标选取,最终确定Sand,CEC,MBC构成最小数据集,权重分别为0.353,0.314,0.333。

2.4.2 基于最小数据的土壤质量评价 坡耕地整理初期(第5年),各土层土壤质量呈现差异化恢复特征(图10)。耕层土壤质量指数仍显著低于整理前水平,而亚耕层已恢复至原始水平,深层则显著提升( $p <$

0.05)。与CK相比,GT处理耕层土壤质量指数显著降低0.09,ST处理则降幅更大,降低0.24( $p < 0.05$ ),表明客土措施对改善坡地整理造成的耕层土壤退化具有积极作用。坡地整理后,不同坡位土壤质量指数呈显著空间分异性。自坡上至坡下部,土壤质量指数由0.08递增至0.42,呈显著增加趋势( $p < 0.05$ )。值得注意的是,坡下部表现出显著改善趋势,土壤质

量指数较CK提升50.00%,坡中部则表现为轻度退化,土壤质量指数降低17.86%,坡上部的土壤质量呈显著退化趋势,下降57.14%。以整体剖面(0—80 cm)角度,土壤质量指数由大到小依次为FT(0.58) > GT-1(0.44) > ST-1(0.39) > GT-m(0.30) > CK(0.28) > ST-m(0.19) > GT-u(0.14) > ST-u(0.10),整体处于中等偏低的水平(0~0.60)。

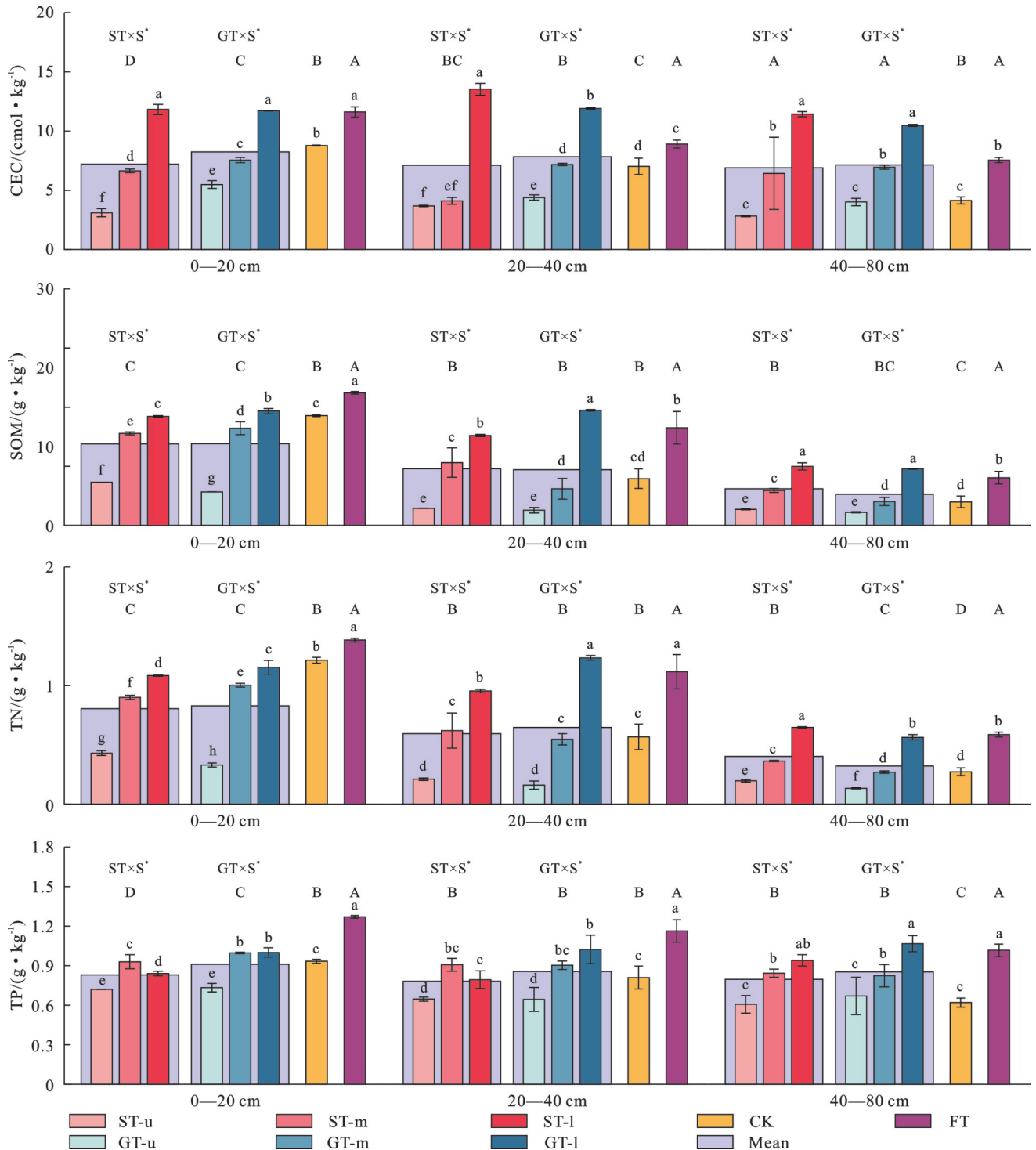


图 7 土壤阳离子交换量和全量养分及其坡位空间分异特征

Fig. 7 Soil cation exchange capacity, total nutrient content, and spatial differentiation characteristics across slope positions

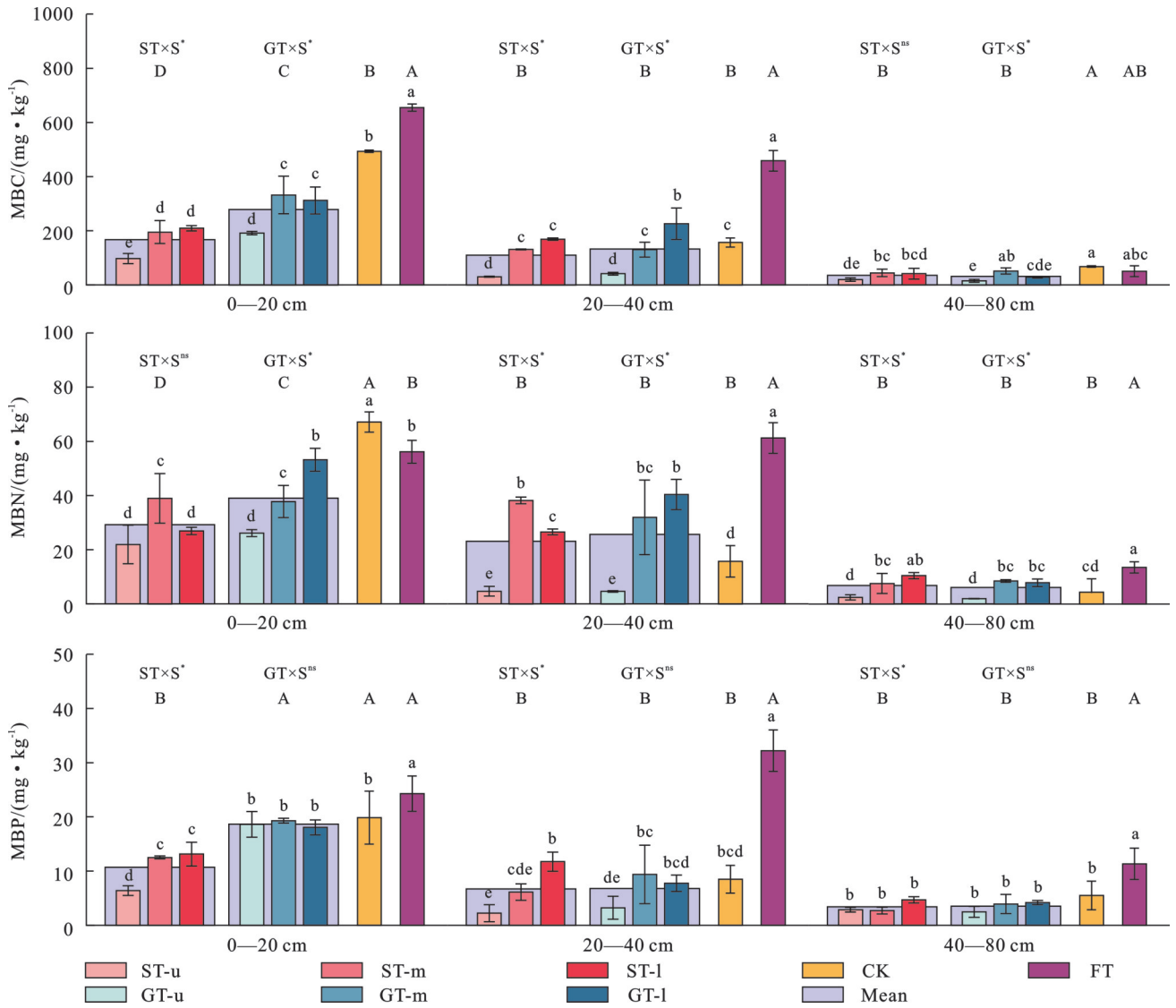


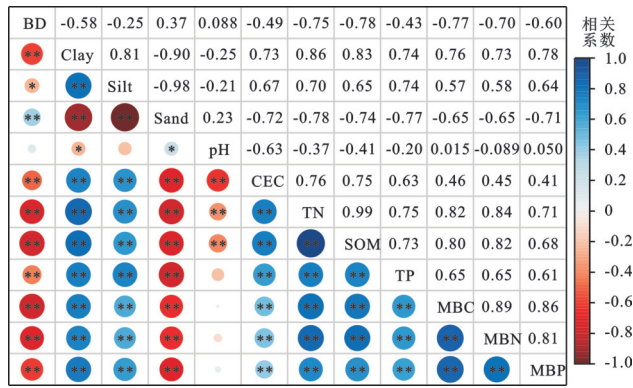
图 8 土壤微生物生物量及其坡位空间分异特征

Fig. 8 Soil microbial biomass and spatial differentiation characteristics across slope positions

表 4 主成分分析结果及土壤指标权重

Table 4 Principal component analysis results and weights of soil indicators

指标	分组	PC <sub>1</sub>	PC <sub>2</sub>	PC <sub>3</sub>	公因子方差	Norm 值	权重-TDS	权重-MDS
BD	1	-0.932	-0.036	-0.179	0.901	1.991	0.084	
Clay	2	0.534	0.742	0.228	0.889	1.945	0.082	
Silt	2	0.181	0.946	0.162	0.955	2.024	0.089	
Sand	2	-0.302	-0.923	-0.190	0.979	2.046	0.091	0.353
pH	3	0.022	-0.071	-0.944	0.897	1.324	0.083	
CEC	3	0.314	0.532	0.705	0.878	1.623	0.081	0.314
SOM	1	0.747	0.462	0.429	0.956	1.947	0.089	
TN	1	0.730	0.523	0.390	0.959	1.970	0.089	
TP	2	0.400	0.731	0.190	0.731	1.765	0.068	
MBC	2	0.853	0.447	-0.061	0.931	2.035	0.086	0.333
MBN	1	0.815	0.445	0.019	0.862	1.960	0.080	
MBP	1	0.689	0.587	-0.163	0.845	1.919	0.078	
特征值		4.490	4.350	1.940				
方差贡献率/%		37.430	36.260	16.160				
累计贡献率/%		37.430	73.690	89.850				



注: \*表示显著相关( $p < 0.05$ ); \*\*表示极显著相关( $p < 0.01$ )。

图 9 土壤质量评价指标相关关系  
Fig. 9 Correlation between soil quality evaluation indicators

### 3 讨论

#### 3.1 土壤质量指数法能够较好地表征该区土壤质量

土壤质量是指土壤在特定生态系统中,通过其物理、化学和生物学特性,实现维持植物与动物的持续生产力、调节水循环与大气环境、保障生态系统健康

运行的能力<sup>[22]</sup>。土壤质量指数法通过统计分析实现对全数据集降维处理,提取关键指标构建最小数据集,该方法因科学性与易用性已被广泛运用。本研究基于主成分分析法,并结合载荷向量范数值(Norm值)构建最小数据集,综合评估指标在各主成分轴上的载荷向量特征,有效克服了传统方法因仅依据单一主成分筛选指标所引发的信息缺失问题<sup>[17]</sup>。Ma等<sup>[18]</sup>在评估黄土高原复垦农田土壤质量的研究中,系统对比了基于主成分分析的多种最小数据集构建方法,研究表明引入Norm值得到的土壤质量指数与玉米产量的相关性最高( $R^2=0.707$ ),该方法在保留关键土壤属性信息的同时降低数据冗余,能更准确反映土壤质量对作物生产的潜在影响。阳离子交换量、有机碳、全氮、pH值、含水量及机械组成等指标可以反映土壤养分状况和结构水平,因而常被作为核心指标应用于土壤质量评价<sup>[23]</sup>。除此之外,本研究将微生物生物量碳入选最小数据集,说明该研究区土地整理耕地土壤质量的主要影响因素除了砂粒、阳离子交换量以外,微生物生物量对土壤质量的影响作用也较为显著。

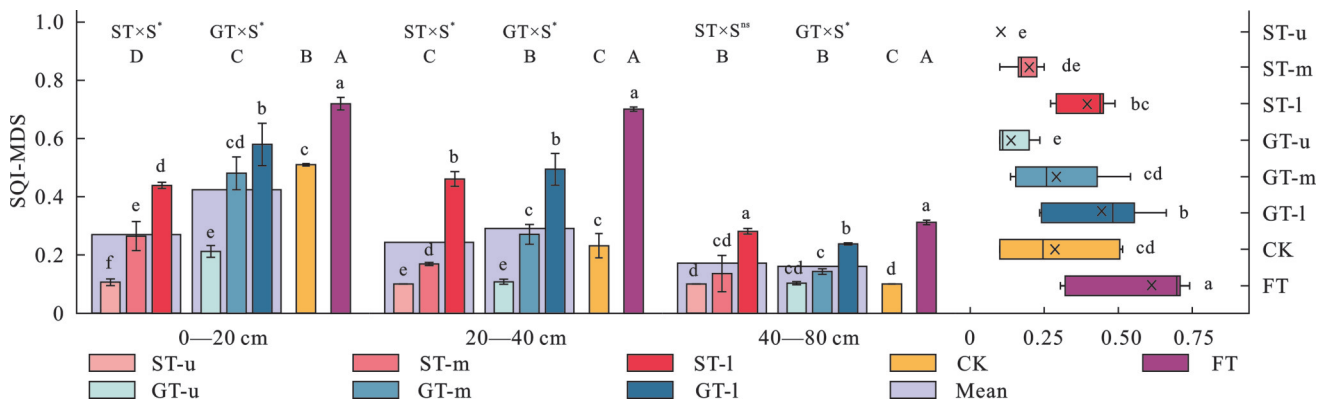


图 10 土壤质量及其坡位空间分异特征  
Fig. 10 Soil quality and spatial differentiation characteristics across slope positions

#### 3.2 坡耕地整理初期土壤质量出现下降趋势

本研究结果表明,西藏坡耕地在实施土地整理工程后,其耕层土壤质量恢复周期不同于常规农业区。土地整理工程通过深挖、土方搬运、回填及土地平整等系统性措施,对土壤剖面结构、理化性质、微生物生物量及土壤质量产生显著影响<sup>[13]</sup>。现有研究表明,土地整理工程实施当年的机械扰动会导致显著土壤退化现象,具体表现为土壤压实加剧、有机质含量减少、微生物活性与生物量骤降等负面效应,整体呈现土壤肥力水平低、质地差的特征<sup>[24]</sup>。薛蕙等<sup>[10]</sup>在黄土丘陵区的研究表明,坡改梯工程当年表层土壤物理结构、化学性质和生物学特性均呈现系统性退化特征。在重庆丘陵区等地研究发现,工程实施 3~5 a 后,阳离子交换量显著提高,土壤有机质等养分增加<sup>[13]</sup>,整体土壤质量恢复并提升,这与本研

究坡耕地整理竣工 5 a 后亚耕层和深层土壤质量已恢复至自然坡耕地水平的结果一致。然而,本研究坡耕地整理耕层物理、化学、生物学性质仍较未整理坡耕地显著降低,其中微生物生物量差异最为突出。这主要归因于西藏高原特殊的环境,低温环境促使微生物优先将代谢能量用于维持基础代谢而非生物量积累,有限的热量条件不仅直接抑制微生物增殖,还通过延长有机质分解周期间接影响养分循环<sup>[25]</sup>。同时,该区年均蒸发量(2 205.6 mm)为降水量(444.8 mm)的 5 倍,坡耕地的水分亏缺则进一步削弱微生物活性与有机质转化效率<sup>[26]</sup>。

#### 3.3 坡耕地整理初期不同坡位土壤质量出现空间分异性

整地活动导致大量土壤在短时期内发生剧烈的顺坡迁移,不同坡位土壤质量也发生显著变化。前

人研究发现,在长期耕作作用下,表层土壤沿坡面向下位移,最终造成上坡段土壤持续流失与下坡段物质堆积<sup>[27]</sup>。值得注意的是,尽管坡耕地整理工程旨在提升农业生产效率,但在坡改梯等施工过程中,大规模地形改造导致土壤沿坡面发生定向迁移,其迁移方向与传统耕作导致的土壤迁移趋势一致。坡耕地整理导致耕层熟化土壤向坡下部迁移,可能原因是工程前期表土剥离不彻底,同时坡下部回填量需求大,坡下部的耕层及亚耕层土壤均来源于表土回填,而坡上部的贫瘠底土暴露于表层。土壤细颗粒物及养分等在坡上部流失,在坡下部富集,最终引发不同坡位土壤质量产生显著的空间分异特征。王国刚<sup>[11]</sup>针对新修梯田研究表明,梯田外侧土壤有机质、全氮、全磷等显著高于内侧土壤,该研究结论与本研究结果一致。从景观生态学视角分析,坡耕地整理和耕作侵蚀同属人类活动引发的景观扰动类型,两者通过改变地表形态与土壤结构,对坡地农田的景观异质性、能量流动与物质迁移产生显著影响,均为坡地景观局部尺度上土壤再分配的扰动过程<sup>[28]</sup>。不过,耕作侵蚀对坡耕地地形演变的影响是一个渐进且累积的过程,通过长期、反复的耕作活动,土壤在空间上的持续重新分配导致微地形发生渐进式改变<sup>[29]</sup>。相较之下,坡耕地整理工程通过机械化施工直接实现地形重塑,其单次作业产生的土壤迁移量相当于耕作侵蚀数十年的累积效应。因此,坡耕地整理改造本质上可视为高强度的单次耕作侵蚀过程,其土壤迁移机制与耕作侵蚀具有显著同源性。土壤在顺坡搬运的再分配过程会显著影响其理化及生物活性等特征,进而导致坡耕地土壤养分等性质的空间分异规律<sup>[30]</sup>。

在开展坡耕地整理时,应积极采取耕层剥离回填,并结合客土置换、测土配方施肥等土壤改良措施。同时,通过增施有机肥料、实施绿肥轮作与秸秆还田等养分管理手段,重点降低土地整理活动可能引发的土壤结构破坏和生物活性下降等生态风险。值得注意的是,不同坡位应采取差异化培肥策略,其中坡上部区域应作为土壤改良培肥的重点区域。

## 4 结论

(1) 坡耕地整理导致不同坡位土壤机械组成呈现显著空间分异性。机械扰动导致坡下部形成细颗粒富集区,坡上部土壤砂化,客土改良措施可有效缓解耕层砂化。同时,土地整理显著加剧耕层及亚耕层土壤压实程度。

(2) 养分迁移与再分配导致不同坡位土壤化学

性质空间分异性。坡耕地整理坡下部处理组亚耕层和深层阳离子交换量及全量养分水平较CK提升12.72%~45.96%,且接近或超过阶地高产田水平,而坡上部整体呈现养分流失与碱化趋势。

(3) 坡耕地整理显著降低土壤微生物生物量碳、氮、磷,耕层降幅达15.45%~66.09%,但客土改良措施呈现显著恢复潜力。不同坡位微生物生物量呈显著空间分异性。坡下部因细粒物质和养分富集,其微生物生物量较坡上部提升124.64%~153.62%,但仍未恢复未整理坡耕地水平。

(4) 坡耕地整理初期(5 a),不同坡位土壤质量呈显著空间分异性,坡下部表现出显著改善趋势,土壤质量较CK提升50.00%,坡中部则表现为轻度退化,土壤质量降低17.86%,坡上部的土壤质量呈显著退化趋势,下降57.14%。坡耕地在土地整理工程实施后5 a,土壤质量整体仍未恢复整理前水平,需对坡耕地实施快速培肥措施,重点针对坡上部进行土壤生态修复。

### 参考文献(References):

- [1] 薛会英,罗红英,阿琼. 简析西藏耕地质量与高标准基本农田建设[J]. 高原农业, 2023, 7(2): 109-112.  
Xue H Y, Luo H Y, A Q. The quality of cultivated land and the construction of high standard basic farmland in Tibet Autonomous Region[J]. Journal of Plateau Agriculture, 2023, 7(2): 109-112.
- [2] 何万华,周文佐,田罗,等. 西藏“一江两河”流域土地利用时空分布与地形因子关系研究[J]. 西南大学学报:自然科学版, 2018, 40(9): 113-123.  
He W H, Zhou W Z, Tian L, et al. Relationship between spatio-temporal distribution of land use and topographic factors in the valleys of the Yarlung Zangbo River and its two tributaries: the Nyangqu River and the Lhasa River in Tibet [J]. Journal of Southwest University: Natural Science Edition, 2018, 40(9): 113-123.
- [3] 陈正,刘瀛弢,贺德俊,等. 中国高标准农田建设现状与发展趋势[J]. 农业工程学报, 2023, 39(18): 234-241.  
Chen Z, Liu Y T, He D J, et al. Current situation and development trend of well-facilitated farmland construction in China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2023, 39(18): 234-241.
- [4] 岳现录,尹国伟,巴桑次旦,等. 西藏自治区第三次全国土壤普查成果转化应用的区域实施路径研究[J]. 中国农业综合开发, 2024(3): 4-9.  
Yue X L, Yin G W, Basang C D, et al. Study on the regional implementation path for the transformation and application of the results of the third national soil census in Xizang Autonomous Region[J]. Agricultural Comprehensive Development in China, 2024(3): 4-9.
- [5] Su Z A, Wang L J, Liu Y H, et al. <sup>137</sup>Cs tracing of the

- spatial patterns in soil redistribution, organic carbon and total nitrogen in the southeastern Tibetan Plateau [J]. *International Soil and Water Conservation Research*, 2023, 11(1):86-96.
- [6] 许安定,周鑫斌,苏婷婷,等.土地整理对烟田土壤理化及生物学性状的影响[J].*西南大学学报:自然科学版*, 2016, 38(3):156-164.
- Xu A D, Zhou X B, Su T T, et al. Effects of land consolidation on soil physical, chemical and biological properties on hilly land [J]. *Journal of Southwest University: Natural Science Edition*, 2016, 38(3):156-164.
- [7] Quinton J N, Govers G, Van Oost K, et al. The impact of agricultural soil erosion on biogeochemical cycling [J]. *Nature Geoscience*, 2010, 3(5):311-314.
- [8] Wu C F, Huang J Y, Zhu H, et al. Spatial changes in soil chemical properties in an agricultural zone in south-eastern China due to land consolidation [J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 187:152-160.
- [9] Yang E J, Zhao X L, Qin W, et al. Temporal impacts of dryland-to-paddy conversion on soil quality in the typical black soil region of China: establishing the minimum data set [J]. *Catena*, 2023, 231:107303.
- [10] 薛蕙,刘国彬,张超,等.黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应[J].*农业工程学报*, 2011, 27(4):310-316.
- Xue S, Liu G B, Zhang C, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in hilly region of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4):310-316.
- [11] 王国刚.宁南山区新修梯田土壤生产力限制因素研究 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2024.
- Wang G G. Study on the limiting factors of soil productivity of newly repaired terraced fields in mountainous areas of southern Ningxia [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2024.
- [12] Tang J H, Han Z, Zhong S Q, et al. Changes in the profile characteristics of cultivated soils obtained from reconstructed farming plots undergoing agricultural intensification in a hilly mountainous region in southwest China with regard to anthropogenic pedogenesis [J]. *Catena*, 2019, 180:132-145.
- [13] 刘涓.重庆丘陵山地耕作田块修筑的土壤工程效应研究 [D].重庆:西南大学, 2015.
- Liu J. Soil engineering effects of farming plots reconstruction in hilly-mountainous region of Chongqing [D]. Chongqing: Southwest University, 2015.
- [14] 孙宝祥.曲水县志 [M].北京:方志出版社, 2016.
- Sun B X. Qushui county annals [M]. Beijing: Local Chronicles Publishing House, 2016.
- [15] 鲁如坤.土壤农业化学分析方法 [M].北京:中国农业科学技术出版社, 2000.
- Lu R K. Methods of Soil agrochemical analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.
- [16] 吴金水,林启美,黄巧云,等.土壤微生物生物量测定方法及其应用 [M].北京:气象出版社, 2006.
- Wu J S, Lin Q M, Huang Q Y, et al. Determination method of soil microbial biomass and its application [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2006.
- [17] Teng L D, Jiang G H, Ding Z L, et al. Evaluation of tobacco-planting soil quality using multiple distinct scoring methods and soil quality indices [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2024, 441:140883.
- [18] Ma J F, Chen Y P, Zhou J, et al. Soil quality should be accurate evaluated at the beginning of lifecycle after land consolidation for eco-sustainable development on the Loess Plateau [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 267:122244.
- [19] 包耀贤.黄土高原坝地和梯田土壤质量特征及评价 [D].陕西杨凌:西北农林科技大学, 2008.
- Bao Y X. The characteristics and assessment on soil quality of dam land and terrace in Loess Plateau [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2008.
- [20] 张俊华,黄华雨,丁启东,等.河套平原盐碱化耕地土壤质量评价与障碍因素诊断 [J].*环境科学*, 2025, 46(4): 2325-2336.
- Zhang J H, Huang H Y, Ding Q D, et al. Soil quality evaluation and obstacle diagnosis of saline-alkali cultivated land in Hetao Plain [J]. *Environmental Science*, 2025, 46(4):2325-2336.
- [21] Wang D W, Bai J H, Wang W, et al. Comprehensive assessment of soil quality for different wetlands in a Chinese delta [J]. *Land Degradation & Development*, 2018, 29(10):3783-3794.
- [22] 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 X, Zhang W J, Wu L, et al. Advance in indicator screening and methodologies of soil quality evaluation [J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2021, 54(14):3043-3056.
- [23] 刘占锋,傅伯杰,刘国华,等.土壤质量与土壤质量指标及其评价 [J].*生态学报*, 2006, 26(3):901-913.
- Liu Z F, Fu B J, Liu G H, et al. Soil quality: concept, indicators and its assessment [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(3):901-913.
- [24] Chartin C, Evrard O, Salvador-Blanes S, et al. Quantifying and modelling the impact of land consolidation and field borders on soil redistribution in agricultural landscapes (1954—2009) [J]. *Catena*, 2013, 110:184-195.
- [25] Wang H Y, Xu Y X, Chai B B. Effect of temperature on microorganisms and nitrogen removal in a multi-stage surface flow constructed wetland [J]. *Water*, 2023, 15(7):1256.