豆科作物与有机肥对干热河谷工程渣场土壤酸化-活化耦合效应的影响

张 萌[1], 田红卫[2], 王灵芝[2]

(1.西北农林科技大学 生命科学学院, 陕西 杨凌 712100;
2.长江勘测规划设计研究有限责任公司, 湖北 武汉 430010)

摘 要: [目的]探究豆科作物与有机肥不同处理对干热河谷工程渣场土壤养分、物理结构和生物活性的改良效应,为水电工程表土保护与利用及干热河谷等生态脆弱区土壤改良提供科学依据与技术支撑。[方法]于2023年雨季初期(5月)至2024年作物秋收后(11月)在金沙江上游旭龙水电站渣场采用完全随机设计开展为期一个完整生长季(约18个月)的田间土壤熟化试验,共设置9个处理,分别为T_1(对照组,仅施基础肥料)、T_2(撒播大豆种子,10 kg/hm^2)、T_3(质地改良)、T_4(有机质处理,5 g/kg土壤)、T_5(有机质处理,10 g/kg土壤)、T_6(大豆+有机质,5 g/kg土壤)、T_7(大豆+有机质,10 g/kg土壤)、T_8(大豆+质地改良+有机质,5 g/kg土壤)、T_9(大豆+质地改良+有机质,10 g/kg土壤)。每个处理设置3个重复,合计27个试验小区。系统监测0—100 cm渣土14项土壤理化指标,运用LSD多重比较和相关性分析方法,揭示不同熟化措施的改良效应和协同机制。[结果]复合处理T_9(大豆+质地改良+10 g/kg有机质)改良效果最佳,显著高于其他处理的指标数量占比最多。有机质、全氮、有效磷含量较对照组分别提升112.2%(由15.16 g/kg增至32.17 g/kg),102.8%(由1.45 g/kg增至2.94 g/kg),128.8%(由1.49 mg/kg增至3.41 mg/kg),容重降低45.5%(由1.30 g/cm^{3}降至0.71 g/cm^3),水稳性团聚体增加66.5%(由55.56%增至92.51%);土壤理化指标间的相关性分析显示,土壤指标间69.2%呈显著相关关系($p<0.05$),有机质与主要养分指标相关系数均超过0.85,pH值与肥力指标呈现显著负相关($p<0.05$),表明存在有机质提升与养分活化、土壤酸化相伴发生的协同变化规律。[结论]"豆科固氮-有机胶结-物理结构优化"协同模式可有效破解干热河谷工程渣场土壤熟化的多重制约,加速土壤熟化进程。

关键词: 土壤熟化; 豆科间作; 有机质; 水电工程; 干热河谷

文献标识码: A **文章编号:** 1000-288X(2026)03-0021-11 **中图分类号:** S156.99

文献参数: 张萌, 田红卫, 王灵芝.豆科作物与有机肥对干热河谷工程渣场土壤酸化-活化耦合效应的影响[J].水土保持通报,2026,46(3):21-31. Zhang Meng, Tian Hongwei, Wang Lingzhi. Effects of legume crops and organic fertilizer on soil acidification-activation coupling in an engineering slag field of dry-hot valley [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation,2026,46(3):21-31.

DOI:10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.018 **CSTR:32312.14.stbctb.2026.03.018**

Effects of legume crops and organic fertilizer on soil acidification-activation coupling in an engineering slag field of dry-hot valley

Zhang Meng[1], Tian Hongwei[2], Wang Lingzhi[2]

(1.*College of Life Sciences*, *Northwest A&F University*, *Yangling*, *Shaanxi* 712100, *China*;
2.*Changjiang Survey*, *Planning*, *Design and Research Co.*, *Ltd.*, *Wuhan*, *Hubei* 430010, *China*)

Abstract: [Objective] Improvement effects of different treatments involving legume crops and organic fertilizer on soil nutrients, physical structure, and biological activity in engineering slag fields of the dry-hot valley were investigated in order to provide a scientific basis and technical support for topsoil conservation and utilization in

收稿日期:2025-09-01 **修回日期:**2025-12-01 **采用日期:**2025-12-04
资助项目:湖北省技术创新计划项目"有机固废资源转化关键技术与成套装备"(2024BCA006),"污泥基蓄水陶土生态治理系统在流域污染控制中的应用研究"(2024BCB063);武汉市科技计划项目(2024020702030129)
第一作者:张萌(2000—),女(汉族),陕西省榆林市人,硕士研究生,研究方向为土壤与植物微生物。Email:2446913693@qq.com。
通信作者:田红卫(1987—),男(汉族),陕西省汉中市人,硕士,高级工程师,主要从事水土保持规划方面的工作。Email:124531087@qq.com。

hydropower engineering, as well as for soil amelioration in ecologically fragile regions such as the dry-hot valley. [Methods] A completely randomized design experiment on soil maturation was conducted at the slag site of the Xulong Hydropower Station in the upper reaches of the Jinsha River from the early rainy season (May) in 2023 to after the autumn harvest (November) in 2024, covering one complete growing season (approximately 18 months). Using a completely randomized design, nine treatments were established, including T_1 (control, basal fertilizer only), T_2 (soybean seeding at 10 kg/hm^2), T_3 (texture improvement), T_4 (organic matter amendment at 5 g/kg soil), T_5 (organic matter amendment at 10 g/kg soil), T_6 (soybean + organic matter at 5 g/kg soil), T_7 (soybean + organic matter at 10 g/kg soil), T_8 (soybean + texture improvement + organic matter at 5 g/kg soil), and T_9 (soybean + texture improvement + organic matter at 10 g/kg soil). Each treatment was replicated three times, resulting in a total of 27 experimental plots. Fourteen soil physicochemical properties in the 0—100 cm slag soil layer were systematically monitored. Least significant difference (LSD) multiple comparison and correlation analysis were used to reveal the amelioration effects and synergistic mechanisms of different soil maturation measures. [Results] The composite treatment T_9 (soybean + texture improvement + 10 g/kg organic matter) showed the best improvement effect, with the highest proportion of indicators significantly superior to those of other treatments. Compared with the control, the contents of organic matter, total nitrogen, and available phosphorus increased by 112.2% (from 15.16 g/kg to 32.17 g/kg), 102.8% (from 1.45 g/kg to 2.94 g/kg), and 128.8% (from 1.49 mg/kg to 3.41 mg/kg), respectively, while soil bulk density decreased by 45.5% (from 1.30 g/cm^3 to 0.71 g/cm^3), and the proportion of water-stable aggregates increased by 66.5% (from 55.56% to 92.51%). Correlation analysis of soil physicochemical properties revealed that 69.2% of the indicators were significantly correlated ($p<0.05$). The correlation coefficients between organic matter and major nutrient indicators all exceeded 0.85, whereas pH value showed significant negative correlations with fertility indicators ($p<0.05$). This indicated a synergistic co-variation pattern in which the increase in organic matter was accompanied by nutrient activation and soil acidification. [Conclusion] The synergistic model of 'legume nitrogen fixation-organic cementation - physical structure optimization' can effectively overcome the multiple constraints on soil maturation in engineering slag fields in dry-hot valleys and accelerate the soil maturation process.

Keywords: soil maturation; legume intercropping; organic matter; hydropower engineering; dry-hot valley

水电站建设是全球碳中和目标下清洁能源发展的重要组成部分,然而其施工期产生的大量工程渣场所引发的生态环境问题日益凸显[1]。大规模水电工程建设导致生态系统破坏,造成表土资源损失、土壤退化和植被破坏,表土保护与利用已成为水电工程生态修复的关键技术难题[2]。金沙江干热河谷作为我国重要水电基地,生态环境脆弱,年均降水量仅300—400 mm,土壤酸性强(pH值5.0~6.0)、有机质含量低、表土层薄(平均21.3 cm),加之季节性干旱和土壤干化问题突出,使该地区水电工程生态修复面临严峻挑战[3]。因此,如何通过土壤熟化技术有效改良退化土壤、重建健康土壤生态系统,是干热河谷水电工程生态修复亟待解决的关键科学问题。

近年来,土壤熟化作为一种综合性土壤改良技术,通过有机质添加、质地调节、生物固氮等多种措施的协同作用,能够显著改善土壤理化性质和生物活性,为退化土壤的生态功能恢复提供了有效途径[4-5]。豆科作物间作系统凭借其生物固氮能力与根际效应,被证实能有效提升土壤有机质含量、改善土壤结构、增强团聚体稳定性,在多种生态系统中表现出显著改良效果[6-8]。已有研究[9]表明,该系统通过生物固氮机制可实现约125 kg/hm^{2}的氮素固定,同时改善土壤物理结构,降低容重,在全球范围内的研究表明,豆科间作可使作物产量提高30%~35%(以主作物当量产量计)。在玉米-豆科间作系统中[10],土壤全氮和矿质氮含量分别增加15.3%和13.4%,土壤和微生物C/N比分别降低11.3%和17.4%,从而缓解了微生物氮限制并加速秸秆残体分解。经过4 a处理后,矿物结合态有机碳(MAOC)含量显著增加5.6%,表明豆科间作通过"微生物碳泵"效应促进了颗粒态有机碳(POC)向MAOC的转化,增强了土壤有机碳的稳定性[11]。有机质是土壤肥力的核心指标,直接影响养分供应能力,是团聚体形成与稳定的关键驱动因子,与土壤氮磷元素呈极显著正相关($r>0.85$),通过矿化分解和物理包裹等机制调控土壤碳氮循环[12-13]。畜禽粪便类有机质富含速效氮磷钾,施

入后可在3～6个月内快速提升土壤养分供应能力,使土壤速效磷含量增加50%～80%[14];秸秆类有机质则通过腐殖化过程形成稳定碳库,能延长土壤肥力持效期,且其纤维结构可优化土壤孔隙组成,使通气孔隙度提升10%～20%[15];而生物炭类有机质兼具吸附性与稳定性,既能通过孔隙结构保蓄水分(保水能力提升25%～45%),又能通过表面官能团调节土壤pH值,在酸性退化土壤改良中表现尤为突出[16]。但当前研究多集中于单一有机质类型的应用,不同有机质与生物措施的协同效应仍需深入探索。质地改良的核心途径在于通过调节土壤颗粒组成(砂粒、粉粒、黏粒比例),直接影响土壤养分保持、水分储存与排水特性[17-18]。粉粒(0.002～0.05 mm)含量的增加可显著提升土壤保水保肥能力,这是因为随着平均粒径减小,单位重量的表面积增加,为养分吸附和水分保持提供了更多位点。研究[19]表明,适宜的砂粒、粉粒和黏粒配比对土壤功能至关重要,通过精确调控这些组分可实现土壤物理化学性质的定向改良。然而,当前土壤熟化研究多集中于温带农业生态系统,针对干热河谷等极端环境的研究相对缺乏。在水电工程建设背景下,如何构建适应干热河谷气候的土壤熟化技术体系,实现有限表土资源的高效利用与快速熟化,仍缺乏系统性研究[3]。为此,本研究以金沙江上游旭龙水电站为平台,采用完全随机设计,设置豆科作物、有机质添加、质地改良及其组合共9种处理。通过为期2 a的田间试验,系统监测14项土壤理化指标的动态变化,运用LSD多重比较、相关性分析和效应量评估等方法,深入解析不同处理对土壤养分、物理结构和生物活性的改良效应。研究成果将为水电工程表土保护与利用及干热河谷等生态脆弱区土壤改良提供科学依据与技术支撑。

1　研究方法

1.1　研究区概况

本研究于2023年雨季初期(5月)至2024年作物秋收后(11月)在金沙江上游旭龙水电站项目区右岸下游的茂顶河弃渣场范围内开展土壤熟化试验。研究区位于金沙江干热河谷上游河段,地理坐标为28°42′—28°48′N,99°06′—99°08′E,海拔2 151～2 531 m,属典型的干热河谷气候。该区域立地条件极差,年均降水量仅300—400 mm且集中于雨季(5—10月),冬季至初春土壤含水率长期低于凋萎湿度(约9%),呈现严重的季节性干旱特征[20]。研究区土壤以燥红壤和潮土为主,pH值5.0～6.0,属强酸性至酸性范围,表土层厚度10～25 cm(平均21.3 cm)[3],土壤养分普遍不足,有机质易分解,团聚体结构不稳定,颗粒组成中粉粒含量偏少而砂砾含量较高,不利于保水保肥。本研究选择弃渣场作为试验平台具有重要的工程实践意义。水电工程建设产生的弃渣场是生态修复的重点区域,其土壤来源于工程深层扰动土,具有养分贫瘠,结构破坏,有机质含量低等典型特征,代表了水电工程中最极端的立地条件。在此类极端立地条件下验证的土壤熟化技术,其改良效果对整个工程区的生态修复具有直接指导意义[21]。试验周期设定为18个月(完整生长季),具体时间为2023年5月至2024年11月,涵盖从雨季初期到作物秋收的完整物候期,能够充分评估熟化措施的季节性效应和持续性。

1.2　试验设计

试验区选择坡度0°～8°,距离河岸直线距离≥1 km的相对平缓区域,总占地面积约0.45 hm^2。采用完全随机设计(CRD),设置9种土壤熟化处理:T_1为对照组(仅施基础肥料),T_2为撒播大豆种子(10 kg/hm^2),T_3为质地改良(每1 kg原土掺入0.048 0和0.001 6 mm筛网筛选粉粒各180 g),T_4为有机质处理(5 g/kg土壤),T_5为有机质处理(10 g/kg土壤),T_6为大豆＋有机质(5 g/kg土壤),T_7为大豆＋有机质(10 g/kg土壤),T_8为大豆＋质地改良＋有机质(5 g/kg土壤),T_9为大豆＋质地改良＋有机质(10 g/kg土壤)。每种处理设置3次重复,共计27个试验单元。为保障基线一致,所有单元土壤均来源于同一弃渣场并经均质化处理,背景值测定显示主要理化指标变异系数<15%。试验单元设计为高2.5 m的土堆,底面规格为长20 m×宽6 m,两侧坡比均为1∶2.5,土堆外侧设置0.5 m高袋装土拦挡,相邻试验单元间距1 m。质地改良所用粉粒(粒径0.002～0.048 mm)通过0.048 0与0.001 6 mm标准筛筛分获得,该粒径范围符合USDA土壤质地分类标准中的粉粒界定[22],并按比例均匀掺入0—20 cm表层;有机质以纯牛粪为主(不足时以猪粪-羊粪-禽粪序补充),按设计用量与表土充分混合。所有处理均依据退化土壤养分需求研究[23],统一施用低水平基础肥料(尿素8.70 kg/hm^2,普钙16.88 kg/hm^2,硫酸钾3.75 kg/hm^2,相当于纯N 4 kg/hm^2,P_2O_5 2 kg/hm^2,K_2O 1.7 kg/hm^2,为常规量5%～10%),肥料随灌溉于土堆顶部施用,全周期共追肥8次。

1.3　样品采集与测定方法

土壤样品采集按照分层取样原则,在每个试验单元长边平行中线附近30 cm范围内选取采样点,采样深度分为0—20,20—40,40—60,60—80,80—100 cm

共5个层次。采用洛阳铲/螺旋取土钻获取土壤样品，每份样品质量为20～30 g，取样后编号并用密封袋封存，带回实验室进行理化性质测定。测定指标包括pH值、有机质、全氮、水解性氮、全磷、有效磷、全钾、速效钾、容重、总孔隙度、水稳性团聚体以及黏粒、粉粒、砂粒含量等14项土壤理化指标。pH值采用电位法测定，有机质采用重铬酸钾氧化法，水解性氮采用氢氧化钠碱解-扩散法，容重和总孔隙度采用环刀法，颗粒组成采用比重计法测定，这些方法均参考《土壤农化分析》[24]，全氮采用凯氏定氮法[25]，全磷和有效磷分别采用氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法和氟化铵浸提-钼锑抗比色法[26]，全钾和速效钾采用火焰原子吸收分光光度法[27]，水稳性团聚体采用湿筛法[28]。

1.4 数据分析方法

数据分析采用R 4.3.0软件，运用agricolae包进行LSD多重比较检验（$p<0.05$），分析各处理间的显著性差异；采用corrplot包计算Pearson相关系数矩阵，分析土壤指标间的相关关系；通过计算各处理相对于对照组的效应量，评估处理效果的相对改良幅度；进行深度分层统计分析，揭示处理效应在不同土层的分布特征和持续性。具体包括4个主要分析内容：①各处理不分土层的所有指标LSD差异显著性检验，通过对各深度层数据取平均值后进行多重比较；②各处理随深度变化的分层LSD差异显著性检验，分别对5个深度层进行独立的方差分析和多重比较；③各处理与对照组间的效应量分析，计算相对变化率并进行显著性检验；④土壤指标间的相关性分析，构建相关系数矩阵并检验显著性水平。所有图表采用ggplot2包制作，设置显著性水平为$p<0.05$。

2 结果与分析

2.1 土壤熟化处理效应的差异分化格局

土壤熟化处理在时空尺度上表现出显著的分层分化效应。9种处理在14项土壤指标间均存在显著差异（$p<0.05$），各指标显著性分组数为4～8个（图1），基于各处理在多指标LSD检验中的最优显著性组比例及效应量（图2）的综合评定，综合改良效果从优到劣依次为：T_9，T_7，T_8，T_5，T_6，T_2，T_3，T_4，T_1。复合处理T_9（大豆＋质地改良＋10 g/kg有机质）在70个深度-指标组合中，显著高于其他处理的指标数量比例最多。土壤养分指标呈现明显处理梯度：有机质含量以T_7（23.93±1.25 g/kg）与T_9（23.66±1.18 g/kg）最高，且二者间无显著差异，但均显著高于其他处理组（$p<0.05$）。全氮含量表现出相似的趋势，T_9（2.17±0.12 g/kg）和T_7（2.08±0.15 g/kg）的含量同为最高；水解性氮、全磷和有效磷亦为T_7，T_9处理显著优于其他处理的分组模式。此外，图1中可发现异常趋势，其中T_4处理（5 g/kg土壤有机质）速效钾含量为（156.82±8.45）mg/kg，T_5处理（10 g/kg土壤有机质）为（132.47±7.23）mg/kg，T_4较T_5显著提高18.4%（$p<0.05$），这与典型的随深度增加而含量降低的垂直分异规律有所不同，推测这与微生物介导的钾素转化密切相关。

效应量分析（图2）揭示各处理相对对照组的改良幅度。T_9复合处理在有机质、全氮、有效磷方面分别实现112.2%，102.8%，128.8%的显著增幅（$p<0.05$），同时容重降低45.5%，水稳性团聚体增加66.5%。质地改良处理T_3使粉粒含量显著增加46.7%，砂粒含量相应减少47.0%，各处理pH值均表现为1.8%～9.4%的显著负效应，表明土壤发生了轻度酸化。

深度分层效应（图3）表明处理差异在土壤表层至深层均显著。表层0—20 cm有机质含量T_9达32.17±7.45 g/kg，深层80—100 cm仍保持20.16±1.01 g/kg的显著优势，而T_1从表层16.44±2.74 g/kg降至深层7.24±0.60 g/kg。土壤物理性状响应更为显著，容重指标T_9在深层80—100 cm达0.88±0.12 g/cm^{3}的显著最低值，较T_1的1.85±0.11 g/cm^{3}降低52.4%，相应地总孔隙度T_9达66.90±4.48%，较T_1的30.21±4.27%提升121.4%。

2.2 土壤理化指标间的相关性分析

土壤指标间的相关性分析表明，土壤熟化过程伴随显著的理化性质协同改善特征，14个指标中69.2%的指标对呈现显著相关关系（$p<0.05$），形成复杂的相互作用网络（图4）。有机质作为土壤肥力改善的核心驱动因子，与主要养分指标表现出极显著的强正相关关系（$p<0.001$），其中与全氮（$r=0.881$）、有效磷（$r=0.879$）、水解性氮（$r=0.855$）和全磷（$r=0.855$）的相关系数均超过0.85，可能是因为有机质投入通过矿化分解过程协同提升土壤氮磷供给能力，这一生物化学转化过程可以解释复合处理在养分指标上的显著优势。pH值与土壤肥力指标间呈现显著的负相关关系，与水解性氮（$r=-0.845$，$p=2.86\times10^{-8}$）；全氮（$r=-0.822$，$p=1.41\times10^{-7}$）；有机质（$r=-0.813$，$p=2.50\times10^{-7}$）和全磷（$r=-0.793$，$p=8.04\times10^{-7}$）的负相关关系均达极显著水平，表明有机质分解产酸降低土壤pH值的同时促

进养分的活化释放,这一酸化-活化耦合过程解释 T_9 处理 pH 值降低与养分大幅提升的协同现象。土壤物理结构改善遵循明确的相关性规律,容重与总孔隙度呈完全负相关($r=-1.000$, $p=7.77\times10^{-8}$),有机质与容重呈强负相关($r=-0.849$, $p=2.22\times10^{-8}$)而与总孔隙度($r=0.849$, $p=2.23\times10^{-8}$)和水稳性团聚体($r=0.819$, $p=1.79\times10^{-7}$)呈强正相关,表明有机质通过增强土壤胶结性能和团聚体稳定性实现了结构优化,解释了复合处理在物理性状上的显著改善效应。质地组分间的完全负相关关系(粉粒与砂粒 $r=-1.000$, $p=3.21\times10^{-57}$)证实了质地改良的精确调控作用。

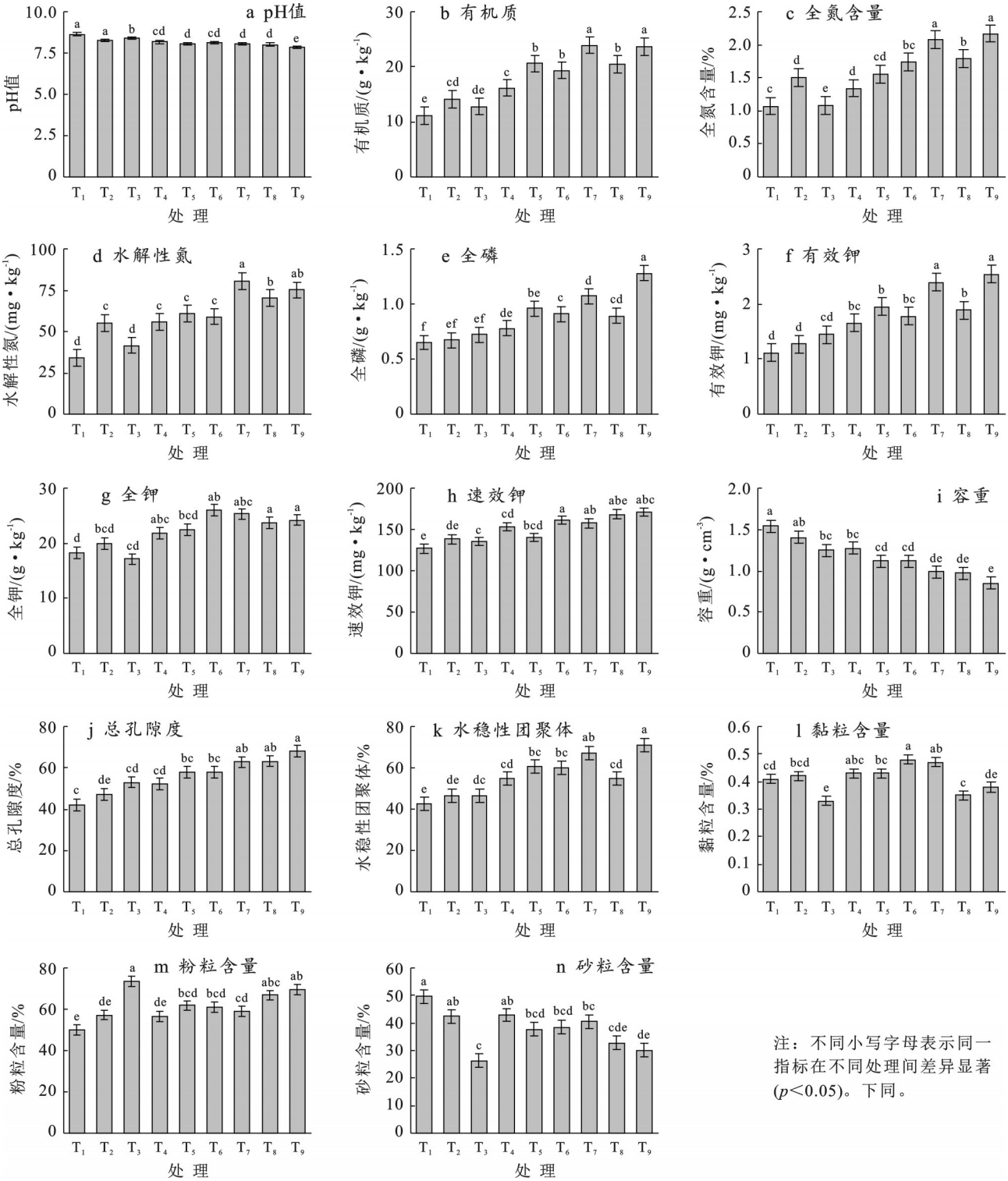


图 1　干热河谷土壤熟化试验不同处理组的多项指标对比

Fig.1　Comparing multiple indicators among different treatment groups in dry-hot valley soil maturation experiment

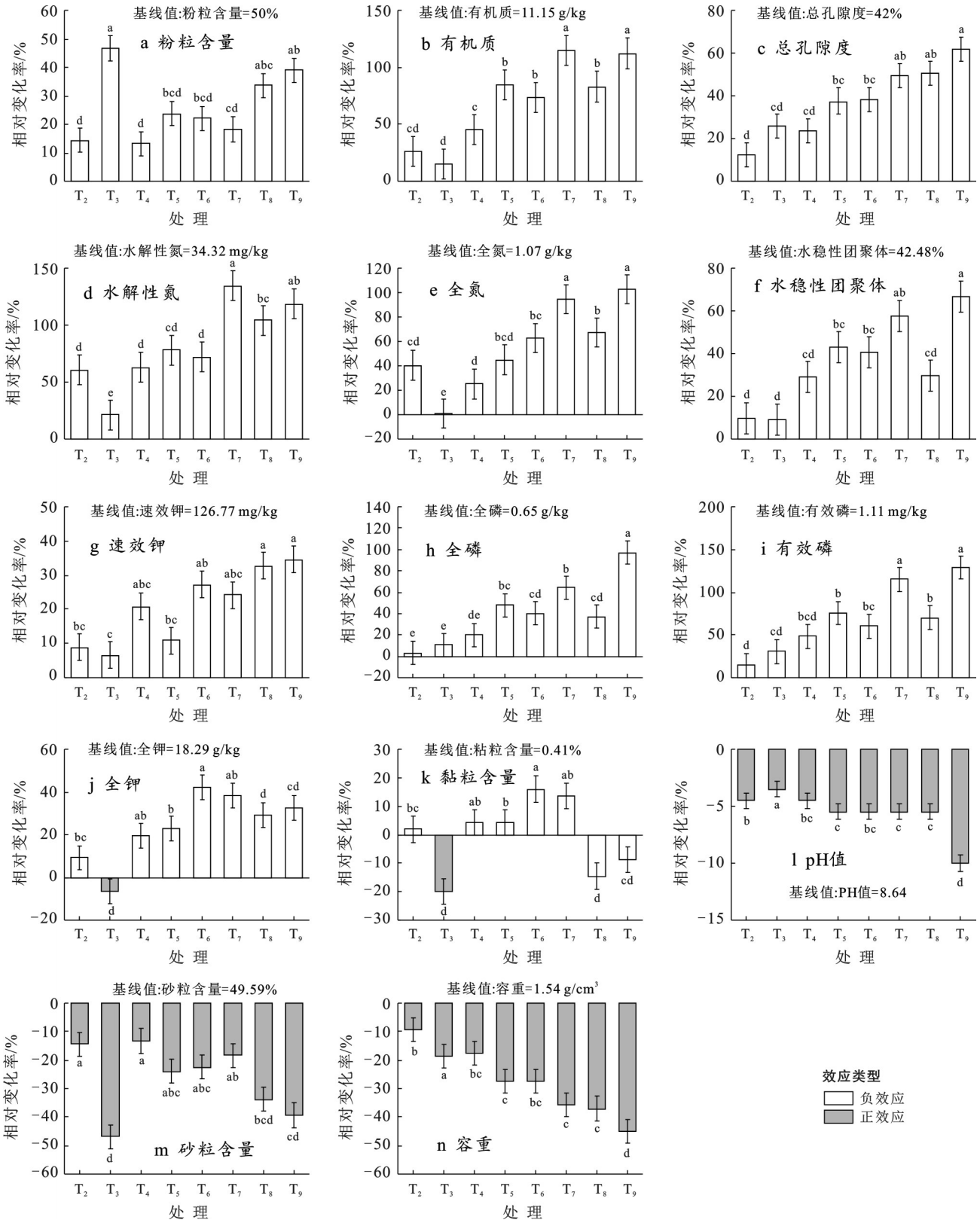


图2 土壤理化性质基线值及其对生态效应的响应方向

Fig.2 Baseline values of soil physicochemical properties and their response direction to ecological effects

2.3 土壤指标随深度变化的变异系数分析

通过对不同处理(T_1—T_9)下土壤多项指标的深度变异系数(C_v)进行分析,分析结果显示,复合处理T_9在土壤多数关键指标上的深度变异系数最低,改良效果优于其他单一或简单处理。

图5为不同处理对土壤有机质、全氮、有效磷、速

效钾、水解性氮、容重、总孔隙度、粉粒含量、黏粒含量、砂粒含量、pH值和阳离子交换量等指标的深度变异系数。由图5可以看出,复合处理的土壤熟化试验T_9在多数关键指标上深度变异系数(C_v)最低,同时通过与其他处理(T_1—T_8)的对比可进一步明确其改良优势。

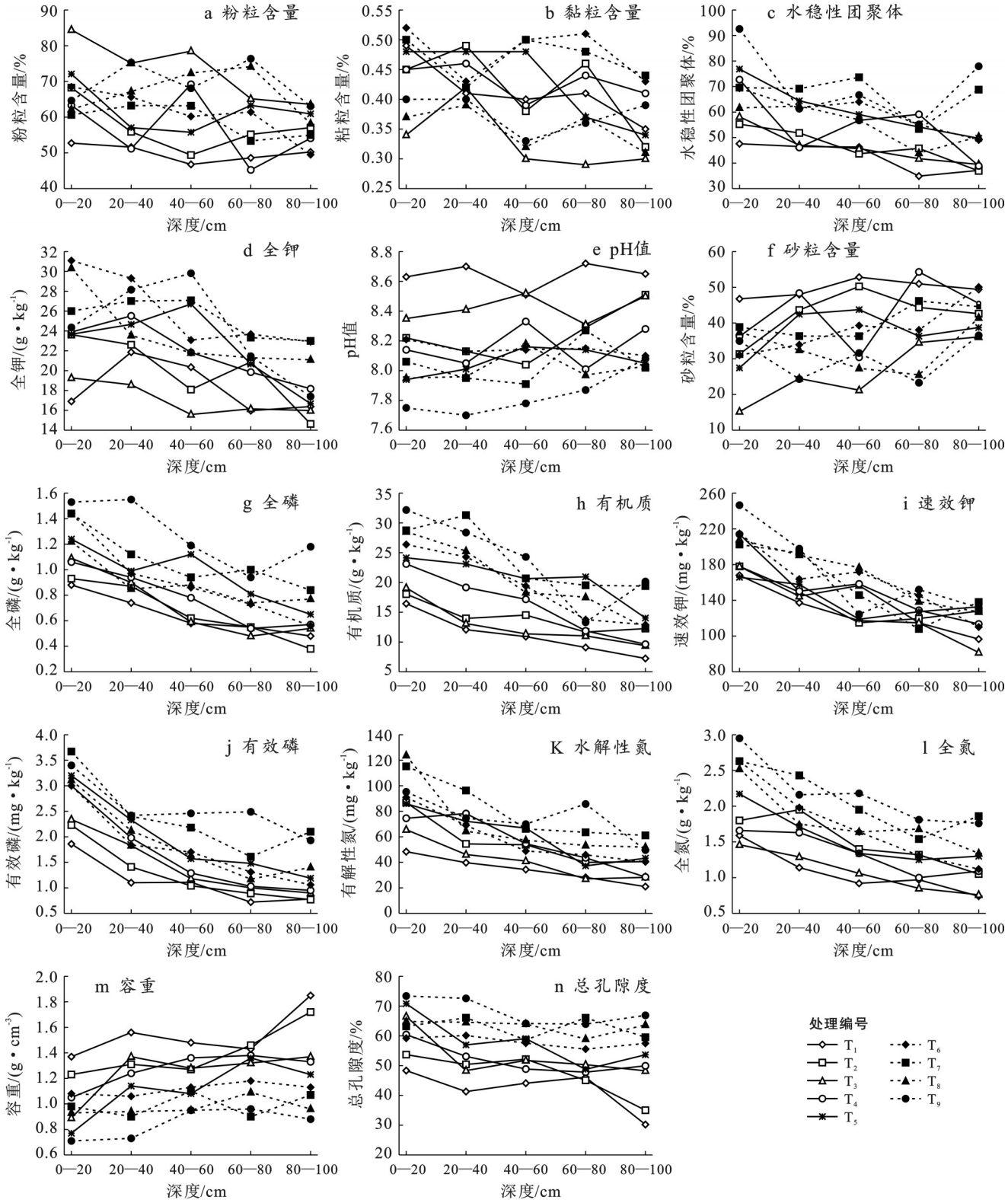
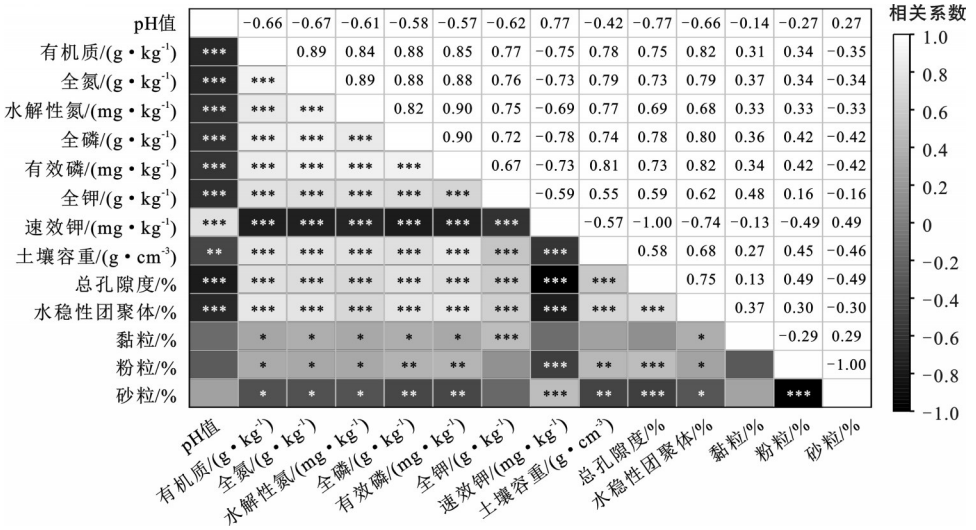


图3　干热河谷土壤熟化试验不同处理方式下土壤各层理化指标变化

Fig.3　Variation of soil physicochemical indicators at different depths under different treatments of soil maturation experiment in dry-hot valley

在有机质指标上，T_9处理0—100 cm各土层有机质含量分别为32.17 g/kg(0—20 cm)，28.38 g/kg(20—40 cm)，24.29 g/kg(40—60 cm)，13.31 g/kg(60—80 cm)，20.16 g/kg(80—100 cm)，其C_v值为各处理中最低，而T_1，T_3等单一处理的有机质C_v值显著更高(如T_1超过35.00%)，说明单一措施对有机质垂直分布均匀性的改善有限。全氮指标下，T_9处理各土层全氮含量依次为2.95 g/kg，2.16 g/kg，2.18 g/kg，1.81 g/kg，1.76 g/kg，深度变异性低，反观T_2，T_4等处理的全氮C_v值较高(如T_2超过30.00%)，表明这些处理对全氮垂直分布均匀性的提升效果弱于T_9。有效磷指标上，T_9处理0—20 cm有效磷达3.40 mg/kg，20—40 cm为2.42 mg/kg，40—60 cm为2.46 mg/kg，60—80 cm为2.49 mg/kg，80—100 cm为1.93 mg/kg，C_v值处于较低水平，而T_5，T_7等处理的有效磷C_v值超过40.00%，土层间有效磷含量波动剧烈，体现出T_9对有效磷垂直分布均一性的改良更显著。容重指标上，T_9处理0—20 cm容重仅0.71 g/cm^3，20—40 cm为0.73 g/cm^3，40—60 cm为0.95 g/cm^3，60—80 cm为0.96 g/cm^3，80—100 cm为0.88 g/cm^3，深度变异性小，总孔隙度指标下各土层分别为73.39%，72.59%，64.15%，63.95%和66.90%，深度变异性也较低。相比之下，T_1，T_6等处理的容重C_v值超过25.00%，总孔隙度C_v值超过20.00%，土壤结构的垂直异质性更突出；同时，T_9处理也降低了粉粒、砂粒等颗粒组成以及pH的变异系数，pH值0—100 cm各土层依次为7.75，7.70，7.78，7.87和8.08，变化相对平缓。而T_3，T_8等处理的pH值的C_v值超过15.00%，颗粒组成C_v值甚至超过30.00%，进一步说明T_9对土壤颗粒和酸碱度垂直均匀性的调控更优。这可能是由于T_9处理中添加的有机质和豆科植物的固氮作用，有效地提高了土壤养分的供应能力和均匀性。结合图3的分析结果进一步证实了T_9处理(大豆＋质地改良＋10 g/kg有机质)在改善土壤肥力、结构和质地方面的显著效果。表明通过综合应用豆科植物、有机质添加和质地改良等措施，可以在极端环境下实现土壤的可持续改良。



注：*表示在$p<0.05$水平显著相关，**表示在$p<0.01$水平高显著相关，***表示在$p<0.001$水平极高显著相关。

图4 土壤理化指标间Pearson相关系数矩阵

Fig.4 Pearson correlation coefficient matrix among soil physicochemical properties

3 讨 论

本研究通过田间土壤熟化试验揭示干热河谷极端环境下土壤熟化技术的分层分化效应与协同改良机制，为水电工程生态修复提供了重要的理论依据和技术支撑。

研究结果表明，复合处理T_9(大豆＋质地改良＋10 g/kg有机质)在47.1%的深度-指标组合中(70个中的约33个)显著性优于其他处理。这一结果与Franke等[29]在撒哈拉以南非洲干旱区的研究结论高度吻合，证实豆科间作复合技术在不同生态系统中具有普适性和有效性。特别值得注意的是，T_9处理在80—100 cm深层土壤维持高有机质(20.16±1.01 g/kg，较T_1提升178%)，低容重(0.88±0.12 g/cm^3，降幅52.4%)，其改良深度远超Huang等[8]报道的30 cm有效深度，表明“豆科固氮＋有机胶结＋粉粒密实”这一综合改良模式对极端环境土壤具有持久剖面改良潜力。此外，本研究观察到仅土壤用量不同的T_4(5 g/kg土壤)、T_5(10 g/kg土壤)有机质处理呈现T_4速效钾更高的反常规结果，推测与微生物介导的钾素转化相关。较高的有机质投入(T_5)为微生物提供了更充足的碳源，刺激微生物大量繁殖，其生物量钾

的固持量超过释放量,导致速效钾暂时降低。这种微生物固持效应在有机质投入初期尤为明显,随着微生物周转,固持的钾素会逐渐释放。这一结果与任凤玲等[30]的研究结果一致。这既体现土壤元素转化的复杂性,也侧面印证T_9复合处理通过“豆科-有机-质地”协同调控微生物生境与养分平衡的科学性——多因子协同规避了单一变量引发的失衡,正是其极端环境改良高效持久的关键。

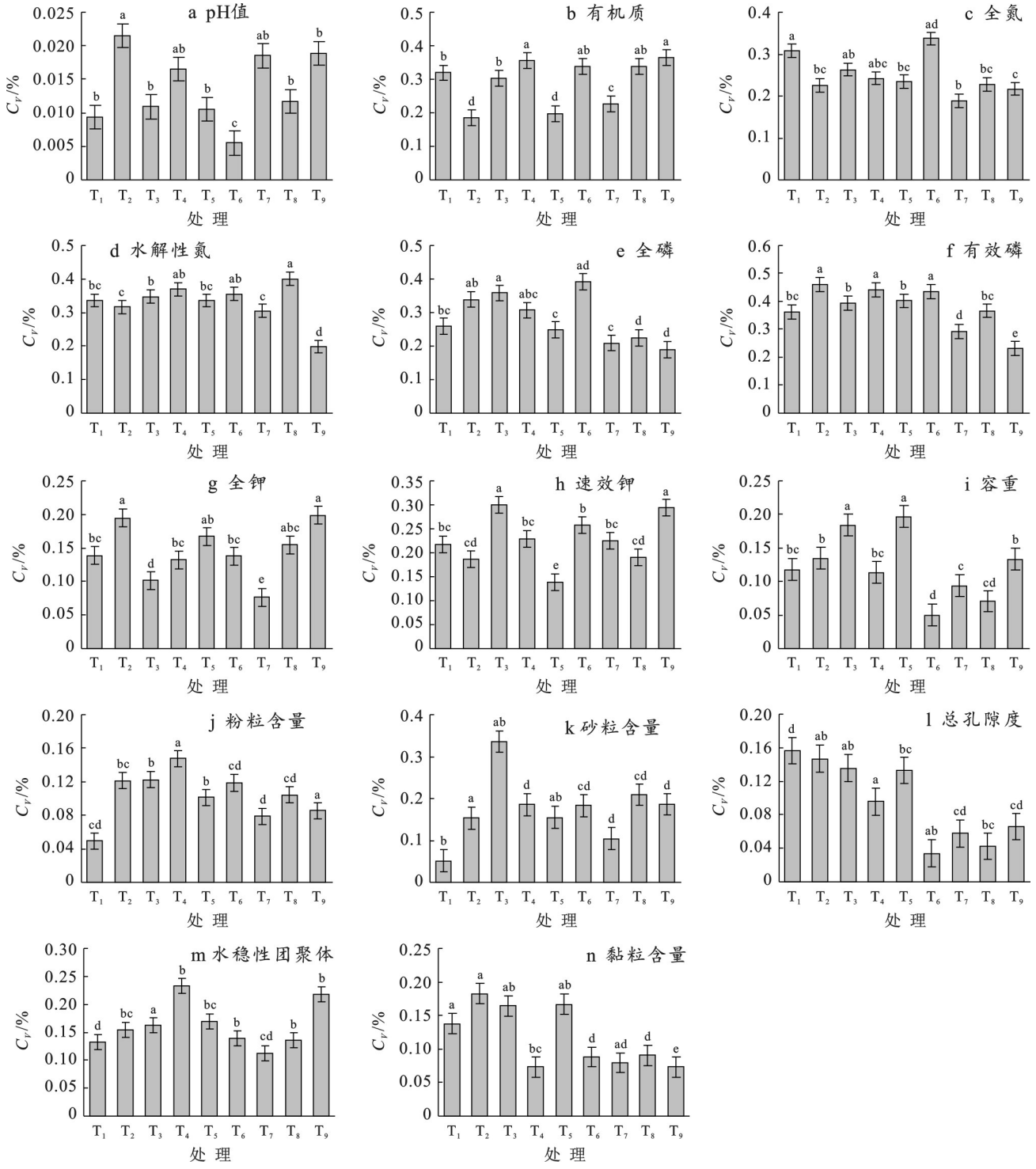


图5　不同处理土壤指标随深度变化的变异系数(C_V)

Fig.5　Coefficients of variation (C_V) for soil indicators across depths under different treatments

相关分析表明,有机质是土壤肥力与物理结构协同提升的核心驱动因子,与全氮(r=0.881)、有效磷(r=0.879)等养分指标呈极显著正相关,验证Even和Cotrufo[13]提出的“土壤聚合能力优先于聚合状态”理论。值得深入讨论的是,pH值与有机质(r=−0.813)、全氮(r=−0.822)等肥力指标呈系统性负

相关(r=－0.845～－0.793),这一酸化-活化耦合现象与Zhang等[4]在玉米-大豆间作系统中的发现一致,但其在干热河谷环境中的表现更为显著,这可能与当地强酸性土壤背景和有机质快速矿化分解的环境特点密切相关。容重与总孔隙度的完全负相关关系(r=－1.000)以及有机质与物理结构指标的强相关性,进一步印证了Zhao Zhanhui等[5]关于有机质通过增强土壤胶结性能实现结构优化的假说,同时也验证了Gecaite等[7]提出的豆科间作通过根际效应改善土壤物理性状的理论框架。

总体而言,将单一措施提升为系统性熟化技术体系能够显著提升修复效果。T_9处理使有机质、全氮、有效磷含量较对照增幅分别达112.2%,102.8%和128.8%,远超Peddle等[31]综述的传统修复技术20%～40%的改良效果。表明针对性的复合熟化技术在极端环境修复中具有突出优势。特别是质地改良使粉粒含量增加46.7%而砂粒含量减少47.0%的精确调控效果,为Sonsri和Watanabe[18]提出的土壤质地优化理论提供了实践验证。深度分层效应分析表明处理差异具有显著的剖面持续性,表层0—20 cm的改良效果能够持续至深层80—100 cm,这一发现对于理解土壤熟化的长期稳定性具有重要意义,也为刘亚龙等[32]关于有机质促进土壤团聚体形成的假说提供了实证支持。

从水电工程生态修复实践角度看,本研究成果具有重要的应用价值和推广意义。随着全球水电装机容量持续增长[1]与生态环境保护要求日益严格,如何在有限表土资源条件下实现高效土壤改良与植被恢复,已成为水电工程可持续发展的关键技术瓶颈。本研究构建的复合熟化技术体系,不仅能显著改善土壤理化性质,更重要的是通过生物固氮、有机质积累与结构优化的协同作用,构建出自维持的土壤生态系统,为植被恢复奠定坚实基础。然而,需指出本研究仅为两年期田间土壤熟化试验,熟化效果的长期稳定性及其在不同气候年型下的表现,仍需持续监测验证。鉴于干热河谷地区生态脆弱性及气候变化不确定性,未来研究应着力优化熟化技术参数,探索适应气候变化的适应性管理策略;同时,需结合遥感与数值模拟等现代技术,构建大尺度土壤熟化效果评估与预测体系,为水电工程生态修复的精准智能管理提供科技支撑。

4 结 论

(1)复合熟化措施(T_9)综合改良效果最优。复合处理T_9(大豆种植＋质地改良＋10 g/kg有机质施用)表现出最佳的土壤综合改良效果。在分析的14个土壤指标、70个深度组合中,有47.1%的指标组合归属于最优显著性组。

(2)关键土壤理化性质显著改善。与对照相比,最优处理T_9能显著提升土壤肥力并改善结构。土壤有机质、全氮、有效磷含量分别显著提高了112.2%,102.8%和128.8%;土壤容重降低了45.5%,水稳性团聚体含量增加了66.5%。

(3)揭示了“酸化-活化”协同改良机制。土壤指标间存在广泛且显著的相关性(69.2%)。有机质是驱动土壤改良的核心因子,与主要养分指标的相关系数均高于0.85;pH值与主要肥力指标呈显著负相关(r=－0.845～－0.793),印证了适度的“酸化”过程有助于激活和提升土壤养分有效性的关键协同过程。

(4)熟化效应具有显著的剖面持续性。深度分层分析表明,土壤熟化效果不仅限于表层,其改良效应能够持续影响到80—100 cm的深层土壤,为土壤的长期稳定改良奠定了坚实基础。研究成果为水电工程表土资源高效利用与生态修复提供了科学依据,所构建的复合熟化技术体系可显著缩短熟化周期,提高改良效率,对促进干热河谷等生态脆弱区土壤改良与植被恢复具有重要理论价值和实践指导意义,为水电工程与生态环境协调发展提供了技术支撑。

参考文献(References)

[1] International Hydropower Association. 2024 World hydropower out look: Opportunities to advance net zero [R/OL]. [2024-06-28]. International Hydro power Association,2024 https://www. hydropow er. org/publications/2024-world-hydropower-outlook.

[2] Fan Peilei, Cho M S, Lin Zihan, et al. Recently constructed hydropower dams were associated with reduced economic production, population, and greenness in nearby areas [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2022,119(8):e2108038119.

[3] 张建辉.金沙江干热河谷典型区土壤特性与植被恢复技术[D].四川 成都:成都理工大学,2002.
Zhang Jianhui. Soil properties and vegetative rehabilitation techniques in a typical dry-hot valleyof the Jinsha River basin [D]. Chengdu, Sichuan: Chengdu University of Technology, 2002.

[4] Zhang Wei, Lu Junsheng, Bai Ju, et al. Introduction of soybean into maize field reduces N_2O emission intensity *via* optimizing nitrogen source utilization [J]. Journal of Cleaner Production, 2024,442:141052.

[5] Zhao Zhanhui, Mao Yanli, Gao Songfeng, et al. Organic carbon accumulation and aggregate formation in soils under organic and inorganic fertilizer management prac-

tices in a rice-wheat cropping system [J]. Scientific Reports, 2023,13:3665.

[6] Benmrid B, Ghoulam C, Zeroual Y, et al. Bioinoculants as a means of increasing crop tolerance to drought and phosphorus deficiency in legume-cereal intercropping systems [J]. Communications Biology, 2023,6:1016.

[7] Gecaite V, Ceseviciene J, Arlauskiene A. Soil mineral nitrogen and mobile organic carbon as affected by winter wheat strip tillage and forage legume intercropping [J]. Agriculture, 2024,14(9):1490.

[8] Huang Zhi, Cui Chunhong, Cao Yajun, et al. Tea plant-legume intercropping simultaneously improves soil fertility and tea quality by changing *Bacillus* species composition [J]. Horticulture Research,2022,9:uhac046.

[9] 柴强,胡发龙,陈桂平.禾豆间作氮素高效利用机理及农艺调控途径研究进展[J].中国生态农业学报,2017,25(1):19-26.
Chai Qiang, Hu Falong, Chen Guiping. Research advance in the mechanism and agronomic regulation of high-efficient use of nitrogen in cereal-legume intercropping [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2017, 25(1):19-26.

[10] 杨文亭,王晓维,王建武.豆科-禾本科间作系统中作物和土壤氮素相关研究进展[J].生态学杂志,2013,32(9):2480-2484.
Yang Wenting, Wang Xiaowei, Wang Jianwu. Crop- and soil nitrogen in legume-gramineae intercropping system: Research progress [J]. Chinese Journal of Ecology, 2013,32(9):2480-2484.

[11] 李世文,卢居勐,黄耿,等.花生/玉米间作增加花生土壤微生物活性促进土壤有机碳固持[J].土壤学报,2025,62(3):801-810.
Li Shiwen, Lu Jumeng, Huang Geng, et al. Peanut/maize intercropping promotes peanut soil organic carbon sequestration by increasing soil microbial activity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2025,62(3):801-810.

[12] Even R J, Cotrufo M F. The ability of soils to aggregate, more than the state of aggregation, promotes protected soil organic matter formation [J]. Geoderma, 2024,442:116760.

[13] Wang Wei, Li Mengying, Wen Qinghui, et al. Cereal-legume intercropping stimulates straw decomposition and promotes soil organic carbon stability [J]. Science China Life Sciences, 2025,68(5):1498-1508.

[14] 宋佳明,蔡红光,张秀芝,等.施用不同种类有机肥对黑土磷素含量的影响[J].吉林农业大学学报,2019,41(6):707-712.
Song Jiaming, Cai Hongguang, Zhang Xiuzhi, et al. Effects of different organic manures application on phosphorus content in black soil [J]. Journal of Jilin Agricultural University, 2019,41(6):707-712.

[15] 温云杰,张建诚,杨娜,等.长期秸秆还田配施有机肥对土壤有机碳组分和孔隙结构的影响[J].农业工程学报,2024,40(21):74-81.
Wen Yunjie, Zhang Jiancheng, Yang Na, et al.Effects of the long-term application of organic fertilization and straw returning on the components of soil organic carbon and pores [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2024,40(21):74-81.

[16] 黄宝源,邓兰生,邓丽芳,等.生物炭调理酸化土壤的作用机制[J].土壤与作物,2024,13(1):74-84.
Huang Baoyuan, Deng Lansheng, Deng Lifang, et al. Mechanism of biochar conditioning acidified soil [J]. Soil and Crop, 2024,13(1):74-84.

[17] Kermah M, Franke A C, Adjei-Nsiah S, et al. Maize-grain legume intercropping for enhanced resource use efficiency and crop productivity in the Guinea Savanna of northern Ghana [J]. Field Crops Research, 2017, 213:38-50.

[18] Sonsri K, Watanabe A. Insights into the formation and stability of soil aggregates in relation to the structural properties of dissolved organic matter from various organic amendments [J]. Soil and Tillage Research, 2023,232:105774.

[19] 黄昌勇,徐建明.土壤学[M].3版.北京:中国农业出版社,2010.
Huang Changyong, Xu Jianming. Soil science [M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2010.

[20] 云南省气象局.云南省气候图集[M].北京:气象出版社,2017.
Yunnan Meteorological Bureau. Climatological Atlas of Yunnan Province [M]. Beijing: China Meteorological Press, 2017.

[21] 黎建强.弃渣场岩土侵蚀研究:以金安桥水电站建设项目为例[D].云南 昆明:西南林业大学,2008.
Li Jianqiang. Research on rock and soil erosion in waste disposal sites: A case study of Jin'anqiao Hydropower Station construction project [D]. Kunming, Yunnan: Southwest Forestry University, 2008.

[22] Soil Survey Staff. Soil Taxonomy: A Basic System of Soil Classification for Making and Interpreting Soil Surveys [M]. Washington, D C: Soil Conservation Service, United States Department of Agriculture, 1975.

[23] 李建明,王志刚,许文盛,等.生产建设项目弃土弃渣资源化利用及生态修复研究[J].中国水土保持,2022(2):33-38.
Li Jianming, Wang Zhigang, Xu Wensheng, et al. Resources utilization and ecological restoration of spoil in production and construction projects [J]. Soil and Water Conservation in China, 2022(2):33-38.

(下转第 72 页)