多种环境材料配施对陇东新修梯田土壤质量的提升效应

赵建龙，汝海丽，王安民，豆巧莉
（平凉市水土保持科学研究所，甘肃 平凉 744000）

摘　要：［目的］探究多种环境材料对陇东黄土区新修梯田土壤理化性状的改良效果，筛选适用于该区域快速培肥与地力提升的优化模式，为提升梯田耕地质量和促进区域农业可持续发展提供科学依据与技术支撑。［方法］以甘肃省静宁县2021年新修梯田为研究对象，通过2022—2023年田间定位试验，设置保水剂、微生物菌剂、腐殖酸、黑矾和绿肥5类材料的单施及配施处理（共10个处理，含CK和单施化肥对照）。采用随机区组设计，测定土壤物理指标（容重、孔隙度、团聚体、持水性）和化学指标（有机质、氮磷钾养分），运用样方法测定并计算产量。［结果］添加环境材料可显著改善土壤结构，配施处理的改良效果尤为显著。ACF处理（微生物菌剂＋腐殖酸＋化肥）使土壤总孔隙度较CK提升19.89%，容重降低6.16%，团聚体稳定性显著增强。化学性状方面，所有环境材料处理均显著提高土壤养分含量，ABF处理（微生物菌剂＋保水剂＋化肥）有机质含量最高（5.72 g/kg，较CK提高64.59%），ACF处理硝态氮和有效磷含量最高（分别达26.18和14.77 mg/kg，较CK分别提高71.34%和76.25%）。BCF处理（保水剂＋腐殖酸＋化肥）增产效果最佳，甜高粱产量达11 963 kg/hm^2，较CK提高70.53%。［结论］多种环境材料通过物理-化学-生物协同作用促进新修梯田快速熟化，其中微生物菌剂与腐殖酸配施（ACF）在改良土壤理化性状方面效果最优，保水剂与腐殖酸配施（BCF）在增产方面表现最佳。综合土壤改良与增产效果，“微生物菌剂-腐殖酸-化肥”组合（ACF）在快速、全面培肥地力方面优势显著，可作为陇东黄土区新修梯田首选的快速培肥技术模式。

关键词：环境材料；新修梯田；土壤理化性状；主成分分析；土壤改良；陇东黄土区
文献标识码：B　　**文章编号：**1000-288X（2026）03-0267-10　　**中图分类号：**S156，S157.3，S147.2

文献参数：赵建龙，汝海丽，王安民，等.多种环境材料配施对陇东新修梯田土壤质量的提升效应[J].水土保持通报，2026，46（3）：267-276. Zhao Jianlong，Ru Haili，Wang Anmin，et al. Effects of combined application of multiple environmental materials on soil quality in newly built terraces in Longdong loess region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation，2026，46（3）：267-276.

DOI：10.13961/j.cnki.stbctb.2026.03.002　　**CSTR：32312.14.stbctb.2026.03.002**

Effects of combined application of multiple environmental materials on soil quality in newly built terraces in Longdong loess region

Zhao Jianlong，Ru Haili，Wang Anmin，Dou Qiaoli
（*Pingliang Institute of Soil and Water Conservation*，*Pingliang*，*Gansu* 744000，*China*）

Abstract：［Objective］The improvement effects of multiple environmental materials on soil physicochemical properties of newly built terraces in Longdong Loess region were investigated in order to select optimal models suitable for rapid soil fertilization and fertility enhancement in this region，and to provide a scientific basis and technical support for improving the quality of terraced farmland and promoting sustainable regional agricultural development.［Methods］A field positioning experiment was conducted from 2022 to 2023 on newly built terraces（established in 2021）in Jingning County，Gansu Province. Individual and combined applications of five environmental materials，including water-retaining agent，microbial inoculant，humic acid，iron sulfate，and green

收稿日期：2025-09-24　　**修回日期：**2025-11-28　　**采用日期：**2025-11-28
资助项目：甘肃省科技厅技术创新引导计划：农业类〔科技特派员（团）专项〕“陇东地区巨菌草质效提升栽培技术研究及规模化示范推广”（26CXNL009）；甘肃省委组织部省级人才发展专项（青年团队项目）（2026QNTD057）；平凉市科技重点研发计划项目（PL-STK-2023A-028）
第一作者：赵建龙（1990—），男（汉族），甘肃省平凉市人，大学，工程师，主要从事水土保持科研工作。Email：493058170@qq.com。
通信作者：汝海丽（1988—），女（汉族），甘肃省平凉市人，硕士研究生，高级工程师，主要从事水土保持与水土保持优质林草新品种引进示范推广工作。Email：1175332809@qq.com。

manure, were set, with a total of ten treatments including a control (CK) and a chemical fertilizer-only treatment. A randomized block design was adopted. Soil physical properties (bulk density, porosity, aggregates, water-holding capacity) and chemical properties (organic matter, nitrogen, phosphorus, and potassium nutrients) were measured, and crop yield was calculated using the quadrat method. [Results] The addition of environmental materials significantly improved soil structure, and the effects of combined application treatments were particularly outstanding. The ACF treatment (microbial inoculant + humic acid + chemical fertilizer) increased total soil porosity by 19.89%, reduced bulk density by 6.16% compared with CK, and significantly enhanced aggregate stability. Regarding chemical properties, all environmental material treatments significantly increased soil nutrient contents. The ABF treatment (microbial inoculant + water-retaining agent + chemical fertilizer) resulted in the highest organic matter content (5.72 g/kg), which was 64.59% higher than that of CK. The ACF treatment resulted in the highest nitrate nitrogen (26.18 mg/kg) and available phosphorus (14.77 mg/kg) contents, which were increased by 71.34% and 76.25% compared with CK, respectively. The BCF treatment (water-retaining agent + humic acid + chemical fertilizer) showed the best yield-increasing effect, and the yield of sweet sorghum reached 11 963 kg/hm^2, which was 70.53% higher than that of CK. [Conclusion] Multiple environmental materials promote the rapid maturation of newly built terraces through synergistic physical-chemical-biological interactions. Among them, the combined application of microbial inoculants and humic acid (ACF) shows the best performance in improving soil physicochemical properties, whereas the combined application of water-retaining agents and humic acid (BCF) shows the best performance in yield increase. Considering both soil improvement and yield enhancement, the combination of microbial inoculant-humic acid-chemical fertilizer (ACF) shows significant advantages in rapid and comprehensive soil fertility enhancement, and can be used as the preferred rapid fertilization technology model for newly built terraces in the Longdong loess region.

Keywords: environmental materials; newly built terraces; soil physicochemical properties; principal component analysis; soil improvement; Longdong loess region

黄土高原是中国乃至世界上水土流失最严重、生态环境最脆弱的地区之一[1]。长期以来,严重的水土流失导致该地区地形破碎,土壤贫瘠,农业生产条件恶劣,制约着区域经济社会可持续发展与生态安全[2]。梯田作为黄土高原水土保持和农田基本建设的主要形式,在控制坡耕地水土流失、改善农业生产条件、保障区域粮食安全方面发挥着不可替代的作用[3]。据统计,截至2020年,黄土高原地区梯田面积已超过6.00×10^6 hm^2,成为该地区重要的基本农田和粮食生产基地[4]。然而,大规模的梯田工程建设在带来显著生态效益的同时,也产生了新的科学问题。由于机械施工过程中的强烈扰动,新修梯田普遍存在熟土层被破坏,生土层裸露,土壤结构劣化,有机质含量急剧下降,微生物群落紊乱等问题[3]。研究表明,新修梯田土壤有机质含量通常低于1.0%,远低于当地耕作多年的老梯田(通常>1.2%),导致其保水保肥能力差,作物出苗困难,生长发育受阻,产量低而不稳,干旱年份甚至绝收[5-6]。传统的自然培肥方式需要3~5 a甚至更长时间才能使土壤肥力恢复到可耕作水平,这严重限制了土地资源的及时高效利用,影响了农民增收和梯田建设的可持续性[7]。因此,如何快速改良新修梯田土壤结构、提升土壤肥力、缩短生土熟化周期,已成为当前黄土高原地区耕地质量提升和农业绿色发展面临的关键技术难题。

针对新修梯田的快速培肥,已有研究[4,7]探讨了传统有机肥、绿肥、秸秆还田等措施的应用效果。这些措施虽有一定效果,但也存在培肥周期较长、所需物料量大或成本较高等瓶颈。近年来,随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入实践和国家对黄河流域生态保护和高质量发展战略的深入推进,发展环境友好型农业投入品已成为农业绿色发展的重点方向[8]。多种环境材料(或土壤改良剂),如保水剂、微生物菌剂、腐殖酸、矿物质调理剂等,因其具有生物降解性、环境友好性和功能多样性等特点,在土壤改良领域展现出广阔的应用前景[9]。保水剂能够显著提高土壤持水能力,缓解季节性干旱胁迫[6];微生物菌剂通过活化土壤养分,促进团粒结构形成,抑制土传病害等多途径改善土壤健康状况[10];腐殖酸类物质能够改善土壤理化性质,增强土壤缓冲性能,促进养分吸收利用[11];而黑矾(硫酸亚铁)等矿物质材料在调节土壤pH值,改善土壤结构方面具有独特效果[12];绿肥则通过生物固氮和提供新鲜有机质提升地力[13]。国内外研究[10,14-15]表明,这些环境材料的合理应用对改善土壤结构,提高养分利用率,促进作物

生长具有显著效果。然而,现有研究多集中于单一材料在特定土壤类型或作物上的应用效果,针对陇东黄土高原丘陵沟壑区新修梯田土壤特性,系统研究多种环境材料配施对土壤理化性状的协同改良效应尚缺乏深入探讨。为此,本研究以陇东黄土区新修梯田为对象,通过2 a田间定位试验,探究保水剂、微生物菌剂、腐殖酸、黑矾和绿肥等5种环境材料单施及配施对土壤物理、化学性状及作物产量的影响,旨在明确其改良效果与协同机制,筛选出适用于该区域新修梯田快速熟化的优化材料组合模式,以期为提升梯田耕地质量和促进区域农业可持续发展提供科学依据与技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

试验位于甘肃省静宁县细巷镇刘堡村王家埂,属黄土高原丘陵沟壑区第Ⅲ副区,暖温带半湿润半干旱气候,年均气温7.1 ℃,年均降水量490 mm,降水主要集中在7—9月。土壤类型为黄绵土,质地疏松,抗蚀性差,保水保肥能力弱。试验地为2021年秋季通过机械碾压修建的新修梯田。

1.2　试验材料

①供试作物。供试作物为饲用甜高粱(*Sorghum bicolor*),品种为"绿巨人"。②供试环境材料。微生物菌剂(A):有效活菌数≥500×10^8/g,主要菌种为枯草芽孢杆菌(*Bacillus subtilis*)和解淀粉芽孢杆菌(*Bacillus amyloliquefaciens*),产自郑州中科化工产品有限公司。③保水剂(B)。农用长效性,褐色不规则的细小颗粒,pH值6.0~8.0呈中性,无毒无害,不溶于水,产自甘肃海瑞达生态环境科技有限公司。④腐殖酸(C)。由风化煤提取,腐殖酸含量≥60%(以干基计),产自郑州中科化工产品有限公司。⑤黑矾(D)。主要成分为七水合硫酸亚铁($FeSO_4·7H_2O$),含量≥90%,购自市售农用级产品。⑥绿肥(E)。箭筈豌豆(*Vicia sativa*),于盛花期翻压还田。⑦化肥。尿素(N≥46%)、过磷酸钙(P_2O_5≥16%)、氯化钾(K_2O≥60%)。

1.3　试验设计

试验共设10个处理(表1),包括不施肥(CK)、单施化肥(F),以及化肥配施5种环境材料(微生物菌剂-A、保水剂-B、腐殖酸-C、黑矾-D、绿肥-E)的连续两年单施、双施和三施组合。每处理3次重复,采用随机区组排列,小区面积40 m^2(5 m×8 m)。所有环境材料及基肥均于每年4月播种前作为基肥一次性施入0—20 cm耕层,作物于每年10月底收获。绿肥处理(EF)于每年7月中下旬至8月播种箭筈豌豆,10月中旬翻压还田。环境材料施用量参考前人相关研究[6,10,12]及厂家推荐用量确定。所有处理化肥用量一致。

表1　试验处理设计

Table 1　Experimental treatment design

处理编号	处 理	环境材料及其施用量
CK	不施肥	
F	单施化肥	
AF	微生物菌剂+化肥	微生物菌剂,30 kg/hm^2
BF	保水剂+化肥	保水剂,60 kg/hm^2
CF	腐殖酸+化肥	腐殖酸,30 kg/hm^2
DF	黑矾+化肥	黑矾,750 kg/hm^2
EF	绿肥+化肥	箭筈豌豆(翻压还田),300 kg/hm^2
ABF	微生物菌剂+保水剂+化肥	微生物菌剂,30;保水剂,60 kg/hm^2
ACF	微生物菌剂+腐殖酸+化肥	微生物菌剂,30;腐殖酸,30 kg/hm^2
BCF	保水剂+腐殖酸+化肥	保水剂,60;腐殖酸,30 kg/hm^2

注:本研究所有处理化肥用量一致,皆为尿素300 kg/hm^2,过磷酸钙750 kg/hm^2,氯化钾150 kg/hm^2。

1.4　测定指标与方法

采样与数据重复:每个处理设3次重复(即3个小区)。于每年作物收获后,每个小区采用梅花形五点取样法按土层深度(0—20 cm,20—40 cm,40—60 cm)采集土壤样品。因此,每个处理每个测定指标共计3个重复样品(即n=3)。本研究所有土壤理化性质数据均表示为平均值±标准差,该平均值即为每个处理3个重复样品测定值的算术平均值。

(1)土壤物理性状。容重、孔隙度采用环刀法测定[16]。

(2)持水特性。测定最大持水量、毛管持水量、田间持水量[16]。

(3)团聚体组成与稳定性。采用干筛法测定土壤机械稳定性团聚体组成[16]。平均重量直径(MWD)计算公式:

$$MWD=\sum(x_i w_i) \quad (1)$$

式中:i为各级团聚体平均直径;w_i为该级团聚体重量百分比[17]。

(4)土壤化学性状。有机质含量:采用重铬酸钾外加热氧化法测定[16]。土壤硝态氮(NO_3-N):采用酚二磺酸比色法测定[16]。土壤铵态氮(NH_4-N):采用KCl浸提-靛酚蓝比色法测定[16]。有效磷(AP):采用碳酸氢钠浸提-钼锑抗显色法测定[16]。速效钾(AK):采用乙酸铵浸提-火焰光度计法测定[16]。

(5)产量测定。于每年作物收获时,取掉边行,每小区随机选取1 m^2的样方3个,测定植株鲜重并折算单位面积产量。

1.5 数据处理与分析

采用Microsoft Excel 2020进行数据整理与初步计算，使用IBM SPSS Statistics 20对数据进行单因素方差分析，并采用Duncan's新复极差法进行多重比较（$p<0.05$）。采用Pearson相关性分析方法分析土壤理化性质与作物产量各指标间的关系。所有图形通过Origin 2021软件绘制。

2 结果与分析

2.1 对土壤物理性状的影响

2.1.1 土壤容重

添加环境材料显著降低了土壤容重（表2）。总体上看，土壤容重随土层深度的增加而加大。整体上2023年土壤容重低于2022年。2022年，各处理0—20 cm土层土壤容重均比CK和F处理显著下降，其中以两种物料配施处理土壤容重较小。0—20 cm土层，ABF，ACF处理土壤容重显著低于CK和F处理；20—40 cm土层，以DF处理土壤容重最低；40—60 cm土层，以BCF处理土壤容重最小，这可能与作物根系生长及土壤动物活动将改良效应向下传递有关。至2023年，ABF和ACF处理与CK差异显著，土壤容重分别比CK下降0.11，0.12 g/cm^3。结果表明，环境材料，特别是配施处理，可有效地改善土壤紧实度。

表2 静宁县新修梯田土壤容重

Table 2 Soil bulk density of newly built terraces in Jingning County 单位：g/cm^3

处理编号	2022年土壤容重			2023年土壤容重		
	0—20 cm土层	20—40 cm土层	40—60 cm土层	0—20 cm土层	20—40 cm土层	40—60 cm土层
CK	1.50±0.01^{a}	1.51±0.01^{a}	1.55±0.01^{a}	1.42±0.02^{a}	1.48±0.03^{a}	1.49±0.04^{a}
F	1.45±0.03^{a}	1.49±0.02^{ab}	1.54±0.00^{a}	1.37±0.02^{ab}	1.44±0.02^{a}	1.48±0.01^{a}
AF	1.31±0.01^{bc}	1.35±0.01^{cd}	1.59±0.02^{a}	1.34±0.02^{b}	1.30±0.05^{b}	1.46±0.06^{a}
BF	1.32±0.02^{b}	1.42±0.04^{bc}	1.57±0.01^{a}	1.38±0.01^{ab}	1.34±0.02^{b}	1.46±0.05^{a}
CF	1.33±0.00^{b}	1.37±0.04^{cd}	1.56±0.02^{a}	1.38±0.02^{ab}	1.32±0.04^{b}	1.47±0.04^{a}
DF	1.31±0.01^{bc}	1.30±0.00^{d}	1.57±0.01^{a}	1.34±0.02^{b}	1.29±0.04^{b}	1.46±0.06^{a}
EF	1.27±0.02^{bc}	1.36±0.02^{cd}	1.52±0.01^{a}	1.36±0.01^{b}	1.33±0.02^{b}	1.49±0.04^{a}
ABF	1.25±0.03^{c}	1.34±0.03^{d}	1.56±0.08^{a}	1.33±0.02^{b}	1.30±0.01^{b}	1.41±0.01^{a}
ACF	1.28±0.01^{bc}	1.31±0.01^{d}	1.53±0.05^{a}	1.34±0.02^{b}	1.31±0.03^{b}	1.38±0.04^{a}
BCF	1.26±0.02^{c}	1.35±0.02c^{d}	1.51±0.06^{a}	1.33±0.01^{b}	1.30±0.02^{b}	1.38±0.02^{a}

注：①处理编号含义见表1；②数据为平均值±标准误；③同列不同小写字母表示处理间在$p<0.05$水平差异显著。下同。

2.1.2 土壤持水特性

添加环境材料可显著提高土壤的持水能力（表3）。添加多种环境材料后，静宁县新修梯田各土层最大持水量、毛管持水量和田间持水量在年际间均呈现增加趋势。2022年，各处理土壤最大持水量均显著高于CK处理，DF，EF，ABF，ACF和BCF处理最大持水量显著高于F处理。毛管持水量也呈现类似规律，AF，DF，ABF，ACF和BCF处理显著高于CK和F处理。田间持水量在不同土层深度下存在明显差异，ABF，ACF和BCF处理与CK差异显著。至2023年，ACF处理的最大持水量、毛管持水量和田间持水量平均值均最高，分别为403.35，350.58和281.35 g/kg，显著高于CK处理。这表明腐殖酸与微生物菌剂配施（ACF）在改善土壤水分状况方面效果最佳，且具有持续效应。

2.1.3 土壤孔隙度

添加环境材料显著优化了土壤孔隙状况（表4）。多种环境材料添加后，两个年度的毛管孔隙度和总孔隙度在总体上呈增加趋势，而非毛管孔隙度在年度内各处理与CK有显著性差异，但在两个年度间变化幅度较小。2022年，两种物料配施的3个处理（ABF，ACF，BCF）与CK处理差异显著，ABF处理总孔隙度最大为41.48%，比CK处理显著高6.68%。ACF处理毛管孔隙度最大，为37.22%。2023年，土壤孔隙度变化同2022年基本一致，ABF和ACF处理的总孔隙度最高，分别达到43.08%和42.93%，显著高于CK（37.09%）。配施处理（如ACF，BCF）的毛管孔隙度和非毛管孔隙度也得到显著改善。对比两个年度，2023年总孔隙度略高于2022年，表明多种材料的添加有利于持续改善土壤通气性。

2.1.4 土壤团聚体稳定性

添加环境材料显著促进了土壤大粒径团聚体的形成（表5）。在0—20 cm土层（2023年数据），所有配施处理（AF，BF，CF，ABF，ACF，BCF）的≥0.25 mm机械稳定性团聚体含量均显著高于CK（72.56%）和F（77.31%）处理，其中ABF处理最高，达84.78%。

表 3　静宁县新修梯田土壤持水特性

Table 3　Soil water-holding characteristics of newly built terraces in Jingning County　　单位:g/kg

处理	2022年土壤持水特性			2023年土壤持水特性		
	最大持水量（平均值）	毛管持水量（平均值）	田间持水量（平均值）	最大持水量（平均值）	毛管持水量（平均值）	田间持水量（平均值）
CK	351.75±184^{c}	309.85±3.24 ^{e}	239.99±4.04^{c}	366.36±6.01^{c}	319.26±3.51^{d}	250.16±8.27^{b}
F	357.57±4.17^{bc}	311.59±4.27^{de}	244.73±6.88^{bc}	359.16±3.24^{c}	326.01±2.90^{cd}	257.18±8.36^{ab}
AF	370.49±3.59^{ab}	328.97±2.98a^{bc}	257.28±7.17^{abc}	377.90±8.84^{abc}	333.64±2.35^{bc}	270.24±8.73^{ab}
BF	370.21±4.48^{ab}	327.71±5.25^{bcd}	249.65±6.96^{abc}	382.30±7.41^{abc}	341.38±2.97^{ab}	272.77±8.65^{ab}
CF	369.79±4.19^{ab}	320.03±2.73^{cde}	255.38±2.64^{abc}	370.69±9.25^{bc}	327.85±4.00^{bcd}	274.08±6.51^{ab}
DF	380.61±2.30^{a}	329.68±2.23^{abc}	257.60±4.97^{abc}	385.04±8.71^{abc}	334.36±7.27^{bc}	274.03±3.87^{ab}
EF	373.06±2.00^{a}	319.85±3.02^{cde}	259.61±6.33^{abc}	386.39±8.37^{abc}	333.70±5.46^{bc}	262.51±9.53^{ab}
ABF	381.52±5.75^{a}	335.33±4.02^{a}	262.92±7.49^{ab}	398.13±10.96^{ab}	337.45±2.52^{abc}	268.06±7.72^{ab}
ACF	380.83±7.98^{a}	333.08±5.38^{ab}	270.27±7.60^{a}	403.35±11.87^{a}	350.58±5.78^{a}	281.35±5.05^{a}
BCF	375.78±4.21^{a}	330.94±2.52^{abc}	266.24±8.38^{a}	386.82±7.45^{abc}	340.65±4.50^{ab}	277.21±6.07^{a}

表 4　静宁县新修梯田土壤孔隙度

Table 4　Soil porosity of newly built terraces in Jingning County　　单位:%

处理	2022年土壤孔隙度			2023年土壤孔隙度		
	总孔隙度（平均值）	毛管孔隙度（平均值）	非毛管孔隙度（平均值）	总孔隙度（平均值）	毛管孔隙度（平均值）	非毛管孔隙度（平均值）
CK	34.80±0.91^{e}	31.30±0.86^{d}	3.50±0.12^{e}	37.09±0.80^{cd}	33.09±0.74^{cd}	4.00±0.09^{c}
F	35.83±0.92^{de}	32.22±0.83^{cd}	3.61±0.12^{de}	36.05±0.84^{d}	32.29±0.72^{d}	3.76±0.15^{bc}
AF	38.79±1.23^{abcd}	34.47±1.13^{abc}	4.32±0.14^{b}	41.12±0.86^{ab}	36.25±0.85^{ab}	4.87±0.14^{a}
BF	39.1±1.13^{abcd}	34.94±1.15^{abc}	4.22±0.09^{b}	41.49±0.69^{ab}	36.77±0.59^{ab}	4.72±0.18^{a}
CF	37.83±0.97^{abcd}	34.59±0.84^{abc}	4.14±0.27^{bc}	41.83±1.23^{ab}	37.35±1.03^{ab}	4.48±0.29^{ab}
DF	38.19±0.58^{bcd}	34.14±0.58^{abcd}	4.05±0.17^{bcd}	39.81±0.73^{bc}	35.13±0.61^{bc}	4.69±0.24^{a}
EF	37.86±0.81^{cde}	33.97±0.77^{bcd}	3.71±0.08^{cde}	40.49±1.40^{ab}	36.07±1.26^{ab}	4.42±0.16^{ab}
ABF	41.48±0.94^{ab}	37.00±0.81^{ab}	4.48±0.21^{b}	43.08±1.20^{a}	38.16±1.07^{a}	4.92±0.23^{a}
ACF	41.42±1.02^{a}	37.22±0.89^{a}	4.49±0.18^{b}	42.93±0.82^{ab}	37.99±0.70^{a}	4.94±0.15^{a}
BCF	40.14±1.64^{abc}	35.12±1.60^{abc}	5.02±0.12^{a}	42.57±1.13^{ab}	37.63±1.00^{ab}	4.93±0.16^{a}

表 5　0—20 cm 土层土壤机械稳定性团聚体组成（2023年）

Table 5　Composition of mechanically stable aggregates in 0—20 cm soil layer（2023）　　单位:%

处理	不同粒径团聚体含量						
	＞5 mm	2～5 mm	1～2 mm	0.5～1 mm	0.25～0.5 mm	＜0.25 mm	≥0.25 mm
CK	6.69±0.23^{g}	18.48±1.99^{b}	20.43±0.42^{b}	15.41±0.42^{bc}	11.56±0.77^{b}	27.44±0.63^{a}	72.56±0.63^{e}
F	7.40±0.11^{g}	22.14±0.46^{a}	23.77±0.32^{a}	14.36±0.26^{cd}	9.63±0.15^{bcd}	22.69±1.04^{b}	77.31±1.04^{d}
AF	18.21±0.57^{c}	22.83±0.99^{a}	19.93±0.68^{bc}	13.04±0.80^{de}	8.64±0.54^{bcd}	17.35±1.24^{cde}	82.65±1.24^{abc}
BF	16.54±0.80^{de}	20.06±1.84^{ab}	19.78±0.42^{bc}	14.27±0.80c^{d}	9.82±0.47^{bc}	19.52±0.34^{bcd}	80.48±0.34^{bcd}
CF	17.50±0.44^{cd}	20.15±0.17^{ab}	18.76±0.63^{c}	11.80±0.60^{e}	14.76±0.59^{a}	17.02±0.96^{cde}	82.98±0.96^{abc}
DF	18.55±0.60^{c}	22.00±0.28^{a}	12.54±0.31^{d}	16.64±1.06^{b}	9.98±0.61^{b}	20.30±1.31^{bc}	79.07±1.31^{cd}
EF	20.27±0.26^{b}	17.89±1.46^{b}	19.66±0.28^{bc}	14.43±0.39^{cd}	6.71±1.08^{d}	21.05±1.40^{b}	78.95±1.40^{d}
ABF	15.88±0.14^{ef}	20.42±0.29^{ab}	24.41±0.29^{a}	14.64±0.28^{cd}	9.43±1.13^{bcd}	15.22±1.01^{e}	84.78±1.01^{a}
ACF	15.02±0.04^{f}	22.31±0.38^{a}	23.24±0.29^{a}	15.98±0.25^{bc}	6.90±0.84^{cd}	16.56±1.35^{de}	83.44±1.35^{ab}
BCF	22.88±0.43^{a}	17.40±0.22^{b}	11.52±0.35^{d}	22.27±0.35^{a}	9.84±1.77^{bc}	16.08±0.88^{de}	83.92±0.88^{ab}

2.1.5　土壤团聚体平均重量直径

添加环境材料显著提高了土壤团聚体平均重量直径（表 6）。在 0—20 cm 土层（2023年数据），所有配施处理（AF，BF，CF，DF，EF，ABF，ACF，

BCF)的土壤团聚体平均重量直径均显著高于CK(1.51 mm)和F(1.70 mm)处理,其中BCF为最高,表明团聚体稳定性增强。

表6 静宁县新修梯田不同土层土壤机械稳定性团聚体平均重量直径(2023年)

Table 6 Mean weight diameter of mechanically stable aggregates in different soil layers of newly built terraces in Jingning County (2023) 单位:mm

处理	不同土层深度团聚体平均重量直径		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	1.51±0.06^{e}	1.42±0.02^{h}	1.36±0.03^{d}
F	1.70±0.02^{d}	1.50±0.02^{g}	1.35±0.02^{d}
AF	2.08±0.04^{a}	1.74±0.02^{f}	1.52±0.01^{c}
BF	2.02±0.02^{c}	1.94±0.00^{cd}	1.52±0.02^{c}
CF	2.05±0.01^{c}	1.92±0.02^{de}	1.54±0.01^{c}
DF	2.10±0.03^{abc}	1.86±0.02^{e}	1.71±0.02^{b}
EF	2.12±0.06^{abc}	2.01±0.02^{b}	1.69±0.01^{b}
ABF	2.06±0.01^{c}	2.22±0.02^{a}	1.70±0.02^{b}
ACF	2.07±0.02^{bc}	1.98±0.03^{bc}	1.72±0.01^{b}
BCF	2.17±0.02^{ab}	2.17±0.02^{a}	1.79±0.01^{a}

2.2 对土壤化学性状的影响

2.2.1 土壤有机质

添加环境材料极显著提高了土壤有机质含量(表7)。由表7可知,2022和2023年,各处理土壤有机质含量均随土层加深而降低,且在0—20 cm土层,所有环境材料处理(AF至BCF)的有机质含量均显著高于单施化肥(F)处理和对照(CK)处理。多种环境材料配施处理(ABF, ACF, BCF)的有机质含量显著高于单施处理。ABF处理在0—20 cm土层的有机质含量最高,2022和2023年分别达5.72和6.24 g/kg。2023年各土层有机质含量均高于2022年,显示出培肥效果的累积趋势。

2.2.2 土壤氮、磷、钾养分

添加环境材料显著提升了土壤养分含量(表8—11)。在0—20 cm土层,所有环境材料处理(AF至BCF)的各类养分含量均显著高于单施化肥(F)和对照(CK)处理,其中配施处理(ABF, ACF, BCF)的效果尤为突出。2022年,ABF处理有机质含量最高,EF处理铵态氮含量最高,ACF处理硝态氮和有效磷含量最高,BCF处理速效钾含量最高。至2023年,各养分指标进一步提升,ABF处理有机质含量较2022年提高9.21%,ACF处理有效磷含量提高43.99%,BCF处理速效钾含量提高9.42%,表明配施处理具有持续的改良效果。两种或3种物料配施的处理(ABF, ACF, BCF)在提升养分有效性方面普遍优于单施处理,显示配施的协同优势和持续效应。

表7 不同处理对土壤有机质含量的影响

Table 7 Effects of different treatments on soil organic matter content 单位:g/kg

处理	2022年土壤有机质含量			2023年土壤有机质含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	3.47±0.18^{c}	2.98±0.11^{d}	2.08±0.18^{e}	3.61±0.03^{d}	3.05±0.05^{c}	2.31±0.11^{c}
F	3.95±0.04^{c}	3.45±0.08^{cd}	2.78±0.08^{d}	4.05±0.06^{cd}	3.42±0.08^{c}	2.69±0.08^{c}
AF	4.73±0.10^{b}	3.91±0.08^{c}	3.54±0.21^{bc}	5.60±0.19^{b}	4.52±0.05^{b}	4.26±0.42^{b}
BF	4.08±0.28^{c}	3.76±0.09^{c}	3.35±0.16b^{c}	4.38±0.21^{c}	4.25±0.03^{b}	4.10±0.11^{b}
CF	3.98±0.20^{c}	3.92±0.28^{c}	3.54±0.01^{bc}	5.11±0.27^{b}	4.44±0.19^{b}	4.22±0.05^{b}
DF	4.08±0.16^{c}	3.83±0.36^{c}	3.18±0.14^{cd}	5.16±0.28^{b}	4.27±0.19^{b}	3.79±0.29^{b}
EF	4.84±0.32^{b}	4.22±0.19^{bc}	3.73±0.22^{b}	5.11±0.13^{b}	4.71±0.12^{b}	4.34±0.19^{b}
ABF	5.72±0.28^{a}	5.01±0.31^{a}	4.57±0.21^{a}	6.24±0.05^{a}	5.88±0.11^{a}	5.31±0.03^{a}
ACF	5.46±0.12^{a}	4.97±0.42^{a}	4.72±0.11^{a}	6.22±0.15^{a}	5.82±0.24^{a}	5.35±0.14^{a}
BCF	5.70±0.10^{a}	4.74±0.17^{ab}	4.53±0.19^{a}	6.24±0.15^{a}	5.82±0.19^{a}	5.45±0.15^{a}

2.3 对作物产量的影响

由表12可以看出,添加环境材料显著提高了甜高粱产量,且配施处理的效果普遍优于单施处理。2022年所有处理甜高粱产量均显著高于CK处理($p<0.05$),其中以两种物料配施处理产量最高。BCF, ABF和ACF处理产量分别达到8 784,8 695和8 668 kg/hm^2,较CK处理提升28.20%,26.90%和26.50%,较单施化肥(F)处理提升14.78%,13.62%和13.26%。3种配施处理间产量差异不显著($p>0.05$),但均显著高于单施环境材料处理。2023年各处理甜高粱产量继续保持增长趋势,且增幅较2022年进一步扩大。

BCF处理产量最高,达到11 963 kg/hm^2,较CK和F处理分别显著提高70.53%和52.36%。两种物

料配施处理产量表现为:BCF>ACF>ABF,产量分别比CK提升70.53%,45.15%和37.39%。单施处理间产量的差异不显著,以BF处理的产量最低(8 263 kg/hm²),但仍显著高于CK处理。

表8　不同处理对土壤铵态氮含量的影响

Table 8　Effects of different treatments on soil ammonium nitrogen content　　单位:mg/kg

处理	2022年土壤铵态氮含量			2023年土壤铵态氮含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	14.12±0.27^{f}	13.84±0.09^{e}	12.26±0.40^{f}	18.12±0.63^{f}	16.17±0.17^{e}	14.22±0.85^{f}
F	20.85±0.96^{e}	19.45±0.76^{d}	17.82±0.76^{e}	31.44±0.22^{e}	25.10±0.21^{d}	19.01±0.16^{e}
AF	28.66±0.21^{d}	22.66±0.35^{c}	20.82±0.34^{d}	39.34±0.69^{bc}	30.22±0.47^{c}	21.44±0.64^{de}
BF	28.82±1.17^{d}	25.29±0.72^{b}	21.12±0.33^{d}	35.49±0.52^{d}	29.41±0.96^{c}	22.96±0.87^{cd}
CF	32.55±0.35^{bc}	25.61±0.11^{b}	23.25±0.94^{bc}	39.65±0.92^{bc}	31.20±1.01^{c}	25.21±0.81^{bc}
DF	31.11±0.62^{cd}	24.26±1.50^{bc}	21.02±0.54^{d}	38.31±1.60^{c}	31.20±1.01^{c}	25.21±0.81^{bc}
EF	36.47±0.50^{a}	29.86±0.37^{a}	20.17±0.16^{d}	40.87±0.60^{abc}	36.16±0.34^{a}	23.51±0.46^{cd}
ABF	35.23±1.76^{ab}	31.44±0.77^{a}	22.04±0.86^{cd}	42.68±0.08^{a}	36.44±0.18^{a}	27.63±1.77^{ab}
ACF	35.65±1.60^{a}	26.62±1.11^{b}	24.14±0.42^{b}	41.54±0.58^{ab}	35.00±0.54^{ab}	27.43±0.28^{ab}
BCF	35.87±0.58^{a}	31.44±0.76^{a}	26.06±0.97^{a}	41.26±1.23^{ab}	34.23±0.28^{b}	29.57±0.48^{a}

表9　不同处理对土壤硝态氮含量的影响

Table 9　Effects of different treatments on soil nitrate nitrogen content　　单位:mg/kg

处理	2022年土壤硝态氮含量			2023年土壤硝态氮含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	15.28±0.78^{b}	14.21±0.57^{c}	12.37±1.15^{ab}	16.49±0.75^{d}	14.90±1.64^{c}	12.50±0.60^{e}
F	20.83±0.85^{ab}	19.14±1.37^{b}	17.32±1.62^{b}	20.42±0.79^{c}	19.68±0.92^{b}	15.21±0.80^{d}
AF	21.33±0.20^{ab}	19.95±0.75^{b}	17.47±1.34^{ab}	25.00±0.88^{b}	23.46±0.78^{a}	21.95±0.50^{abc}
BF	20.58±1.00^{ab}	19.42±1.46^{b}	18.22±0.66^{ab}	26.60±1.03^{b}	25.08±1.48^{a}	21.97±0.33^{abc}
CF	22.12±3.68^{a}	19.55±1.15^{b}	19.02±1.84^{ab}	25.92±1.28^{b}	23.39±1.57^{a}	22.62±1.62^{ab}
DF	21.27±2.77^{ab}	18.96±0.87^{b}	19.21±0.57^{ab}	24.89±1.42^{b}	23.65±0.66^{a}	19.89±0.97^{c}
EF	24.29±2.13^{a}	22.14±0.56^{ab}	20.02±0.94^{ab}	27.11±1.66^{b}	25.66±1.44^{a}	24.11±0.14^{a}
ABF	24.57±0.66^{a}	20.72±1.97^{b}	19.58±0.72^{ab}	33.10±1.39^{a}	25.97±1.03^{a}	20.06±0.82^{bc}
ACF	26.18±2.33^{a}	25.19±2.71^{a}	21.01±0.34^{a}	34.58±1.42^{a}	26.09±0.89^{a}	22.16±0.73^{abc}
BCF	26.14±0.79^{a}	20.83±0.85^{c}	19.92±0.45^{ab}	33.66±1.57^{a}	23.68±0.04^{a}	23.87±0.28^{a}

表10　不同处理对土壤有效磷含量的影响

Table 10　Effects of different treatments on soil available phosphorus content　　单位:mg/kg

处理	2022年土壤有效磷含量			2023年土壤有效磷含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	8.38±0.99^{d}	8.13±0.73^{c}	6.41±0.57^{d}	8.77±0.63^{e}	8.65±0.19^{f}	7.96±0.29^{e}
F	10.31±0.13^{cd}	10.43±0.02^{b}	8.00±0.29^{c}	12.03±0.36^{d}	11.57±0.14^{e}	10.62±0.20^{d}
AF	12.10±1.15^{bc}	11.94±0.73^{ab}	9.21±0.56^{bc}	16.28±0.75^{bc}	14.04±0.48^{cd}	12.31±0.42^{c}
BF	11.98±1.31^{bc}	10.61±0.04^{b}	9.21±0.55^{bc}	16.00±0.37^{c}	13.10±0.50^{d}	12.47±0.38^{c}
CF	12.53±0.76^{abc}	10.40±0.53^{b}	10.25±0.26^{ab}	15.39±0.46^{c}	13.67±0.52^{d}	12.88±0.62^{c}
DF	10.73±0.12^{cd}	10.23±0.42^{b}	9.51±0.35^{ab}	15.53±0.69^{c}	12.86±0.77^{de}	12.92±0.50^{c}
EF	10.60±0.15^{cd}	10.27±0.34^{b}	8.98±0.53^{bc}	15.31±0.78^{c}	15.23±0.77^{bc}	12.88±0.19^{c}
ABF	12.87±0.24^{abc}	11.00±0.26^{ab}	9.76±0.16^{ab}	18.54±1.20^{ab}	16.37±0.38^{ab}	14.43±0.43^{b}
ACF	14.77±0.88^{a}	12.40±0.40^{a}	10.33±0.30^{ab}	18.48±0.87^{ab}	17.67±0.47^{a}	15.56±0.66^{ab}
BCF	14.46±0.76^{ab}	12.39±0.87^{a}	10.71±0.21^{a}	18.68±0.83^{a}	17.39±0.25^{a}	15.91±0.29^{a}

表11 不同处理对土壤速效钾含量的影响

Table 11 Effects of different treatments on soil available potassium content 单位:mg/kg

处理	2022年土壤速效钾含量			2023年土壤速效钾含量		
	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm	0—20 cm	20—40 cm	40—60 cm
CK	107.22±1.88^{e}	102.60±1.07^{e}	93.67±2.45^{f}	110.05±2.51^{f}	103.61±1.81^{f}	94.58±1.78^{f}
F	118.55±1.41^{d}	106.19±2.92^{de}	102.15±1.72^{e}	124.37±2.56^{e}	110.42±2.16^{e}	103.54±2.48^{e}
AF	127.74±1.78^{b}	120.50±2.54^{b}	116.17±1.51^{c}	143.62±1.66^{c}	134.78±1.57^{bc}	121.95±2.57^{bc}
BF	116.80±1.69^{d}	107.11±1.47^{de}	103.78±2.31^{de}	134.93±1.83^{d}	131.88±3.02^{c}	112.97±1.14^{d}
CF	126.25±1.30^{bc}	114.63±2.52^{c}	117.46±1.83^{c}	149.39±1.10^{c}	139.70±2.47^{ab}	125.97±2.69^{ab}
DF	121.54±0.84^{cd}	111.81±1.31^{cd}	106.76±1.81^{de}	133.11±2.98^{d}	130.21±1.10^{cd}	117.60±2.79^{cd}
EF	116.63±1.24^{d}	109.86±1.81^{cd}	108.57±0.39^{d}	132.48±0.66^{d}	124.22±2.70^{d}	114.18±2.45^{d}
ABF	152.35±1.36^{a}	135.39±1.21^{a}	127.19±1.33^{b}	167.61±2.91^{a}	143.34±2.18^{a}	127.38±1.94^{ab}
ACF	151.82±2.62^{a}	135.15±1.57^{a}	134.54±2.29^{a}	157.73±0.28^{b}	144.50±1.57^{a}	130.89±1.95^{a}
BCF	154.40±2.70^{a}	133.30±1.34^{a}	127.54±2.45^{b}	168.95±1.80^{a}	141.09±1.39^{ab}	124.18±2.08^{abc}

表12 不同处理甜高粱产量及其与对照的比较

Table 12 Sweet sorghum (*Sorghum bicolor*) yield under different treatments and comparison with control

处理	2022年			2023年		
	产量/(kg·hm^{-2})	较CK增加/%	较单施化肥增加/%	产量/(kg·hm^{-2})	较CK增加/%	较单施化肥增加/%
CK	6 852±215^{d}			7 015±185^{e}		
F	7 653±192^{c}	11.68		7 852±163^{d}	11.94	
AF	8 126±178^{bc}	18.59	6.18	8 745±152^{c}	24.67	11.37
BF	7 968±165^{bc}	16.29	4.12	8 263±174^{cd}	17.80	5.24
CF	8 345±154^{b}	21.79	9.04	9 216±168^{bc}	31.38	17.37
DF	8 057±172^{bc}	17.59	5.28	8 967±157^{c}	27.82	14.20
EF	8 243±161^{b}	20.30	7.71	9 354±162^{bc}	33.34	19.13
ABF	8 695±148^{a}	26.90	13.62	9 638±145^{b}	37.36	22.75
ACF	8 668±152^{a}	26.53	13.26	10 182±138^{a}	45.12	29.67
BCF	8 784±142^{a}	28.17	14.78	11 963±125^{a}	70.53	52.36

3 讨 论

本研究通过2 a田间试验,系统阐明了多种环境材料对陇东黄土区新修梯田土壤理化性状及作物产量的改良效应。研究发现,环境材料添加通过“物理-化学-生物”三重协同机制,显著改善了新修梯田的不良土壤特性。环境材料对土壤物理结构的改良呈现出明显的协同效应。保水剂作为高分子聚合物,其分子链上的酰胺基、羧基等官能团通过氢键和离子交换作用与土壤颗粒结合,有效促进了团聚体的形成[6]。本研究结果表明,配施处理使≥0.25 mm团聚体含量提高了5.34%~7.47%,与黄占斌等[6]的研究结果一致。腐殖酸作为天然有机胶结剂,其酚羟基和醌基等活性基团既能与黏粒矿物形成有机-无机复合体,又能与多价阳离子络合,促进微团聚体向大团聚体发育[11]。黑矾则通过化学反应产生的$Fe(OH)_3$胶体和CO_2气体,使土壤变得疏松多孔[12]。最重要的是,微生物菌剂产生的胞外多糖和脂肽等物质,增强了腐殖酸与矿质土粒间的胶结作用[18],而保水剂为微生物活动创造了适宜的水分环境[6],这种多重协同机制突破了单一材料改良的局限性。环境材料通过“活化-固持”平衡机制显著提高了土壤养分有效性。微生物菌剂中的功能菌株通过分泌有机酸和磷酸酶等物质,有效活化土壤中固定的磷钾矿物,并将有机氮转化为无机氮[19]。本研究证实,接种解磷菌等功能微生物使土壤有效磷含量显著提高,与强茹茹等[20]的研究结果一致。与此同时,腐殖酸和保水剂通过吸附和络合作用,减少了铵态氮和钾离子的淋溶损失,起到“养分库”的作用[11,21]。值得注意的是,绿肥翻压处理通过生物固氮和新鲜有机质输入,显著提高了土壤有机质和铵态氮含量[13,22]。这种“微生物活化-有机质固持-化肥补充”的多位一体养分管理模式,确保了养分在土壤-植物系统中的高效循环。环境材料配施显著提高了作物产量,且随着

改良时间的延长,效果愈加明显。BCF 处理(保水剂+腐殖酸+化肥)在两年试验中均表现出最佳的增产效果,2023年产量达到11 963 kg/hm^2,较对照增产70.53%。这种增产效应与BCF处理在改善土壤物理结构和提高养分有效性方面的优异表现高度一致。保水剂通过提高土壤持水能力,有效缓解了黄土高原春季干旱对作物生长的胁迫[23];腐殖酸则通过改善土壤结构和延长肥效,促进了养分吸收利用[11];二者的协同作用为作物生长创造了良好的土壤环境。这一结果与田露等[24]和赵维彬等[10]的研究发现相互印证,进一步证实了多种环境材料配施在黄土高原新修梯田增产中的协同效应和应用潜力。

本研究与前人研究的不同之处和创新点在于,系统比较了5种常见环境材料在黄土区新修梯田这一特定场景下的单施与配施效果,并揭示了不同组合的作用侧重。具体表现为,配施处理在改善土壤容重、孔隙度、团聚体稳定性和提升有机质及速效养分方面的效果普遍优于单施处理。值得注意的是,ACF处理(微生物菌剂+腐殖酸+化肥)在改善土壤综合理化性状(如有机质、孔隙度、团聚体)上效果最优,其土壤总孔隙度(2023年达42.93%)、≥0.25 mm团聚体含量(83.44%)和有机质含量(6.22 g/kg)均处于领先水平;而BCF处理(保水剂+腐殖酸+化肥)则在增产方面表现最佳,显著高于其他处理。这种效果的不一致性可能与不同组合的作用机理有关:ACF组合通过“生物与有机”协同,更全面地优化了土壤微生态系统和养分循环,侧重于土壤健康的长期培育;而BCF组合通过“物理(保水)与有机”协同,在试验年份的降水条件下,更直接地缓解了水分胁迫,从而在当季产量上表现更为突出。这为不同目标导向(长期培肥-短期增产)的田间管理提供了精准的选择依据。

本研究筛选出ACF和BCF两种优化配施模式。从作用机理看,这些组合实现了材料功能的优势互补:微生物菌剂提供“生物动力”[10,18],腐殖酸提供“结构框架”和“养分缓冲”[11,21],保水剂提供“水分环境”[6,23],化肥提供“营养基础”[4]。从区域适应性看,ACF组合有效解决了黄土高原土壤生物活性低和结构差的核心问题,而保水剂的加入则针对性缓解了该地区的水分限制因子[23]。从技术经济角度,ACF组合兼顾了改良效果、成本效益和操作便利性,与柳燕兰等[4]提出的“生物-有机-无机协同”改良理念高度吻合。建议在实际应用中基于土壤检测结果,采用“因地制宜、按需配比”的原则进行个性化配方设计,以最大限度发挥环境材料的改良效果。

4　结　论

(1) 多种环境材料配施能有效改善新修梯田土壤物理结构,显著降低土壤容重,提高孔隙度和团聚体稳定性,其中微生物菌剂与腐殖酸配施(ACF)效果尤为突出。

(2) 环境材料添加极显著提高了土壤有机质及氮、磷、钾等速效养分含量,配施处理的提升效果普遍优于单施,ACF处理在提升氮、磷有效性方面优势明显,BCF处理对速效钾的提升效果最佳。

(3) 环境材料配施能显著提高甜高粱产量,BCF处理增产效果最为显著,两年平均增产率达49.35%。

(4) 综合土壤理化性状改良与作物增产效应,微生物菌剂与腐殖酸配施(ACF)在快速、全面培肥新修梯田地力方面综合表现最优,可作为陇东黄土区新修梯田快速培肥的首选技术模式进行推广应用。

参考文献(References)

[1] 李宗善,杨磊,王国梁,等.黄土高原水土流失治理现状、问题及对策[J].生态学报,2019,39(20):7398-7409.
Li Zongshan, Yang Lei, Wang Guoliang, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20):7398-7409.

[2] 张慧.甘肃黄土高原区梯田建设成效及存在问题分析[J].甘肃科技,2015,31(4):7-9.
Zhang Hui. Analysis on the effect and existing problems of terrace construction in Loess Plateau of Gansu Province [J]. Gansu Science and Technology, 2015,31(4):7-9.

[3] 靳雪琴,豆巧莉,汝海丽,等.陇东黄土区新修梯田土壤肥力限制因子分析[J].农业与技术,2025,45(12):105-111.
Jin Xueqin, Dou Qiaoli, Ru Haili, et al. Analysis on limiting factors of soil fertility of newly built terraced fields in loess region of Longdong [J]. Agriculture and Technology, 2025,45(12):105-111.

[4] 柳燕兰,马明生,张绪成,等.施肥对旱作区新修梯田土壤理化性质及马铃薯产量的影响[J].寒旱农业科学,2022,1(11):115-118.
Liu Yanlan, Ma Mingsheng, Zhang Xucheng, et al. Effects of fertilization on soil physical and chemical properties and potato yield of new terraced farmland in rainfed region [J]. Journal of Cold-Arid Agricultural Sciences, 2022,1(11):115-118.

[5] 史晓鹏.施肥对旱地新修梯田土壤肥力和作物产量的影响[D].甘肃 兰州:兰州大学,2023.
Shi Xiaopeng. The effects of fertilization on soil fertility

and crop yields in newly built dryland terrace [D]. Lanzhou, Gansu: Lanzhou University, 2023.

[6] 黄占斌,张国桢,李秧秧,等.保水剂特性测定及其在农业中的应用[J].农业工程学报,2002,18(1):22-26,12-13.
Huang Zhanbin, Zhang Guozhen, Li Yangyang, et al. Characteristics of aquasorb and its application in crop production [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2002,18(1):22-26,12-13.

[7] 袁可能.植物营养元素的土壤化学[M].北京:科学出版社,1983.
Yuan Keneng. Soil chemistry of Plant Nutrients [M]. Beijing: Science Press, 1983.

[8] 中共中央办公厅,国务院办公厅.关于创新体制机制推进农业绿色发展的意见[EB/OL].(2017-09-30). http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dsq/201801/t20180131_6136151.htm.
General Office of the Communist Party of China Central Committee, General Office of the State Council of the People's Republic of China. Opinions on Innovative Institutional Mechanisms for Promoting Agricultural Green Development [EB/OL]. (2017-09-30). http://www.moa.gov.cn/nybgb/2017/dsq/201801/t20180131_6136151.htm.

[9] 黄占斌,孙在金.环境材料在农业生产及其环境治理中的应用[J].中国生态农业学报,2013,21(1):88-95.
Huang Zhanbin, Sun Zaijin. Application of environmental materials in agricultural production and environmental treatment [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2013,21(1):88-95.

[10] 赵维彬.生物炭与腐殖酸对弗吉尼亚栎在盐碱地生长的影响效果研究[D].湖南 长沙:中南林业科技大学,2023.
Zhao Weibin. Effects of biochar and humic acid on the growth of *Quercus virginiana* Mill in saline-alkaline land [D]. Changsha, Hunan: Central South University of Forestry and Technology, 2023.

[11] 应永庆,傅庆林,郭彬,等.腐殖酸对滨海盐土土壤性质及水稻产量的影响[J].安徽农学通报,2021,27(22):121-123.
Ying Yongqing, Fu Qinglin, Guo Bin, et al. Effects of humic acid on soil properties and rice yield in coastal saline soil [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2021,27(22):121-123.

[12] 宗娥,武汉军.定西市安定区新修梯田生地熟化培肥试验[J].农业科技通讯,2021(3):176-179.
Zong E, Wu Hanjun. Experiment on curing and fertility improvement of newly built terraces in Anding District, Dingxi City [J]. Bulletin of Agricultural Science and Technology, 2021(3):176-179.

[13] 曹卫东,黄鸿翔.关于我国恢复和发展绿肥若干问题的思考[J].中国土壤与肥料,2009(4):1-3.
Cao Weidong, Huang Hongxiang. Ideas on restoration and development of green manures in China [J]. Soil and Fertilizer Sciences in China, 2009(4):1-3.

[14] 王连祥,杨涌,马全喜,等.复合微生物菌剂对设施土壤改良及黄瓜产量的影响[J].肥料与健康,2022,49(6):34-37.
Wang Lianxiang, Yang Yong, Ma Quanxi, et al. Effect of compound microbial agents on improvement of greenhouse soil and yield of cucumber [J]. Fertilizer & Health, 2022,49(6):34-37.

[15] 丁龙平,杨倩.不同浓度微生物菌剂对黄瓜土壤理化性质的影响[J].安徽农学通报,2022,28(2):111-113.
Ding Longping, Yang Qian. Effects of different concentrations of microbial inoculants on the physical and chemical properties of cucumber soil [J]. Anhui Agricultural Science Bulletin, 2022,28(2):111-113.

[16] 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 Rukun. Methods of Soil Agrochemical Analysis [M]. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2000.

[17] 李映强.华南赤红壤物理性状的研究[J].华南农业大学学报,1997,18(3):53-56.
Li Yingqiang. Study on the physical properties of lateritic red earth in south China [J]. Journal of South China Agricultural University, 1997,18(3):53-56.

[18] 王芬.农业微生物对增强土壤肥力的作用研究[J].粮油与饲料科技,2025(7):97-99.
Wang Fen. Study on the role of agricultural microorganisms in enhancing soil fertility [J]. Grain Oil and Feed Technology, 2025(7):97-99.

[19] 王景超,于晓菲,商姗姗.我国微生物肥料研究现状及其在作物上的应用进展[J].农业与技术,2022,42(1):34-37.
Wang Jingchao, Yu Xiaofei, Shang Shanshan. Research status of microbial fertilizer in China and its application progress in crops [J]. Agriculture and Technology, 2022,42(1):34-37.

[20] 强茹茹,曾捷,达布希拉图.添加解磷菌剂的生物炭对冬马铃薯磷吸收和土壤细菌群落组成的影响[J].云南农业大学学报(自然科学版),2021,36(4):717-726.
Qiang Ruru, Zeng Jie, Dabu Xilatu. Effect of phosphate liberation bacteria added in biochar on the phosphorus absorption and soil bacterial community composition in winter potatoes [J]. Journal of Yunnan Agricultural University(Natural Science), 2021,36(4):717-726.

(下转第289页)