

# 土层复配方案对治沟造地新增耕地土壤肥力的影响

黄云鑫<sup>1,2</sup>, 李裕瑞<sup>1,2</sup>, 刘彦随<sup>1,2\*</sup>, 王永生<sup>1</sup>, 张轩畅<sup>1</sup>

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 新增耕地质量的提升对于延安“治沟造地”项目实施后耕地的有效利用意义重大。为探索一种快速改良“治沟造地”新增耕地质量的有效方法, 该研究在延安羊圈沟流域((109°31'~109°71'E, 36°42'~36°82'N))开展了为期 4 a 的新造耕地土层复配试验。试验基于红黏土(Red Clay, RC)和马兰黄土(Malan Loess, ML)结构上的互补性, 利用不同比例的 RC 和 ML 对新造地块 0~30 cm 的土层进行复配重构(T0, 未复配的原状土; T1, 100%的 RC; T2, 83.3%的 RC 和 16.7%的 ML; T3, 66.7%的 RC 和 33.3%的 ML; T4, 50%的 RC 和 50%的 ML; T5, 33.3%的 RC 和 66.7%的 ML; T6, 16.7%的 RC 和 83.3%的 ML; T7, 100%的 ML), 通过对土壤的理化性质和作物生长情况的分析, 结合主成分分析, 探索了不同土层复配方案对土壤肥力和作物产量的影响。结果表明: T2 和 T3 处理>0.25 mm 水稳性团聚体分别较对照组 T0 显著提高了 13.7、15.2 倍; T3 处理>0.25 mm 水稳性团聚体的几何平均直径(Geometric Mean Diameter, GMD)和平均重量直径(Mean Weight Diameter, MWD)较 T0 处理分别增大 20.9%和 29.1%, 而容重较 T0 处理减小 11.1%, 孔隙度增大 15.3%。T3 处理有机质和硝态氮含量较 T0 处理分别增加了 24.5%和 100%; T2、T3 处理有效钾较 T0 处理分别增加了 29.3%和 17.6%。主成分分析结果显示, 土体结构是土壤肥力形成的结构基础, 土壤养分是土壤肥力的重要组成部分, 二者共同决定土壤的肥力状况; 综合评价结果显示各处理土壤肥力综合得分由高到低依次为 T3、T2、T1、T5、T6、T4、T7、T0。T3 处理玉米具有最大地上生物量和千粒质量, 且玉米产量也相对较高。综合土壤肥力和玉米生长状况, 认为当 RC 为 66.7%, ML 为 33.3%时, 复配方案相对较优, 能提高土壤的肥力。试验初步表明土层复配是一种可行的快速营造高质量土壤的技术方法, 研究为提升“治沟造地”工程新增耕地质量及今后类似土地整治工程的实施提供实践参考。

**关键词:** 土壤; 肥力; 土层复配; 土体结构; 理化性质; 黄土丘陵沟壑区

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.008

中图分类号: S156.92

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2021)-12-0064-09

黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 等. 土层复配方案对治沟造地新增耕地土壤肥力的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(12): 64-72. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.008 http://www.tcsae.org

Huang Yunxin, Li Yurui, Liu Yansui, et al. Effects of soil-layer compounding schemes on the soil fertility of newly-constructed cultivated land[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2021, 37(12): 64-72. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2021.12.008 http://www.tcsae.org

## 0 引言

为缓解延安市因退耕还林(还草)等生态工程建设导致的人地矛盾问题, 2013 年启动实施了“治沟造地”国家土地整治重大工程, 对项目区的沟道进行了综合整治<sup>[1]</sup>。在项目实施过程中, 将沟道内的部分土丘或两侧的不规则坡体、危险边坡切削, 其土方用于填平沟道形成耕地<sup>[2]</sup>。黄土具有明显的分层结构, 不同土层的物理和化学性质存在差异<sup>[3]</sup>。在填沟造地时土通常包括红黏土(Red Clay, RC)和马兰黄土(Malan Loess, ML)。马兰黄土质地疏松、抗蚀性较差、保肥保水能力较弱, 而红黏土结构致密, 保水保肥性强, 但干燥时质地较硬, 不利于作物生长。在治沟造地施工过程中, 部分施工单位不注意两种土壤在填方造地时的合理搭配, 而表土剥离

回填工作可能也不到位, 从而导致了部分新造耕地质量不高, 进而影响耕地后续有效利用。促进耕地有效利用, 关键之一在于协调作物-土壤关系, 要点是耕地质量的提升<sup>[4]</sup>, 故应采取一定措施, 对部分质量欠佳的地块进行改良。

已有研究对如何改良土壤、提高土壤的肥力做了大量的探索。李品芳等<sup>[5]</sup>采用客土法对天津滨海的盐渍土进行了改良, 发现经改良后盐渍土的盐渍程度降低, 有机质含量增加。刘永兵等<sup>[6]</sup>利用河道底泥进行农田耕作层改良发现, 耕层土壤有机质含量增加了 0.95~2.18 倍, 蔬菜产量提高了 8.7%~13%。朱宝国等<sup>[7]</sup>研究表明, 心土混合秸秆、石灰和磷肥能改善白浆土的物理性状, 提高土壤养分含量。张长生等<sup>[8]</sup>研究了掺沙措施对耕层土壤结构和离子含量的影响, 结果表明掺沙有利于大粒径土壤微粒的形成, 掺沙后耕层土壤的容重明显减小。刘彦随等<sup>[4]</sup>研究表明, 利用不同质地土壤结构的互补性及其合理组配, 能达到改良土壤机械组成、减小土壤容重、增加土壤有机质含量的目的。关冰等<sup>[9]</sup>将粒径为 0~3 mm 油页岩施入沙土中, 试验发现油页岩能够改良沙土理化性质, 显著提高土壤的供肥保肥能力。此外, 还有学者发现利用砒砂岩和沙化土进行复配, 土壤中>0.25 mm 的水稳性团聚体含量有

收稿日期: 2021-01-05 修订日期: 2021-03-10

基金项目: 国家重点研发计划(2017YFC0504701); 国家自然科学基金重点项目(41931293)

作者简介: 黄云鑫, 博士生, 研究方向为农业地理和土地可持续利用。

Email: huangyx.20b@igsrr.ac.cn

\*通信作者: 刘彦随, 研究员, 博士生导师, 研究方向为农业地理学与乡村地理学、土地利用与区域可持续发展。Email: liuys@igsrr.ac.cn

所增加, 土体结构得到明显改善, 土壤的养分条件和生产力得到显著改善和提高<sup>[10-12]</sup>。现有研究表明, 通过合理的技术手段、利用适宜的物质原料, 能达到优化土体结构、改良土壤质量的目的。

在本研究区, 治沟造地中的削坡工程会产生大量的土方, 这部分土壤往往以马兰黄土和红黏土为主。如上所述, 二者是填方造地的原材料, 但若二者搭配比例不合理, 新造土地的质量难以得到保障, 尤其是红黏土若不合理处置对于新增耕地的质量具有较大负面影响。因此, 基于已有研究, 根据马兰黄土和红黏土在性质上的互补性, 及二者在区域内广泛分布的现实条件, 考虑因地制宜, 利用红黏土和马兰黄土进行复配试验。对于不同复配方案的效果, 本研究拟通过土壤的肥力和作物生长状况进行反映。对于土壤肥力的评价, 常用的有内梅罗指数法、模糊综合评价法、层次分析法、主成分分析法等。其中内梅罗指数法、模糊综合评价法、层次分析法的片面性和主观性较强<sup>[13]</sup>, 而主成分分析法充分考虑土壤的化学、物理、生物肥力, 对土壤肥力的评价较为综合客观<sup>[14-15]</sup>。因此, 采用主成分综合评价法对不同复配方案土壤的肥力进行评价, 同时借助作物的生长指标反映土壤的生产能力。研究针对“治沟造地”部分新增耕地质量不高的现实问题, 面向新增耕地后续可持续利用需求, 利用马兰黄土和红黏土进行土壤复配试验, 以期达到提高新造耕地质量的目的, 同时也为今后类似土地整治工程的实施提供技术参考。

## 1 研究区概况与方法

### 1.1 研究区概况

本研究的试验地位于延安市宝塔区羊圈沟流域的“治沟造地”项目区, 在该项目区内共计 27.84 hm<sup>2</sup> 土地得到了整治<sup>[1]</sup>。羊圈沟流域 (109°31'~109°71'E, 36°42'~36°82'N) 位于黄土高原中部, 流域面积 2.02 km<sup>2</sup>, 海拔在 1 050~1 295 m 之间, 属于典型的黄土丘陵沟壑区。该区属于半干旱性大陆季风气候, 日平均日照时数为 6.9 h, 年平均气温为 8.8 °C, 年最低平均温度为 -6.9 °C, 最高平均温度为 26 °C, 年平均降水量 535 mm, 多集中在 6—9 月 (图 1), 占全年降水量的 70% 左右, 降雨多为短时强降雨<sup>[16]</sup>。土壤类型以黄绵土为主, 土质疏松, 可耕性好, 但抗蚀性差, 加之降雨强度大, 土壤流失较严重<sup>[17]</sup>。

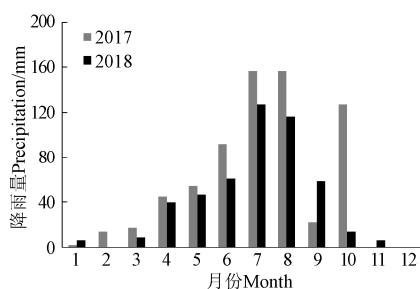


图 1 研究区 2017 年和 2018 年降雨情况

Fig.1 Precipitation in the study area in 2017 and 2018

### 1.2 试验设计

利用红黏土和马兰黄土进行土层复配试验, 探索营造优质耕地。红黏土黏性较强, 结构致密, 而马兰黄土结构疏松, 二者在结构上具有天然的互补性, 理论上利用其进行复配以改良土壤具有可行性。两类土在黄土高原地区分布广泛, 试验所用的 ML 和 RC 均来源于站点附近坡面, 易于获取。经检测, 取用的红黏土各养分含量分别为有机质 5.60 g/kg、全钾 11.53 g/kg、全氮 0.42 g/kg、全磷 0.57 g/kg、pH 值为 8.1; 而取用的马兰黄土各养分含量分别为有机质 4.51 g/kg、全钾 4.06 g/kg、全氮 0.28 g/kg、全磷 0.60 g/kg、pH 值为 8.8。修建试验小区的原地块均为“治沟造地”工程中的新造地块, 于 2014 年建造完工。试验共设计 8 种方案, 其中对照处理 T0 为原状土, 为“治沟造地”工程中的新造地 (原状土), 其是施工过程中形成的耕作层, 通常由不确定比例的马兰黄土和红黏土混合而成; 7 个试验处理 T1、T2、T3、T4、T5、T6、T7 分别为不同比例 RC 和 ML 的复配土 (表 1), 每种处理设计 3 个重复。土层复配的具体操作方式为: 先将原新增耕地的表层 30 cm 土壤进行剥离, 然后根据试验设计要求, 将不同体积比的 ML 和 RC 人工搅拌至均匀混合, 随后自然落下覆盖到剥离了表土的小区表面 (原状土不需要), 覆土厚度为 30 cm (图 2)。试验小区于 2014 年 4 月建造, 规格为 5 m×7 m, 完工后即用于耕种。小区种植当地常规作物玉米, 种植密度为 42 250 株/hm<sup>2</sup>。玉米于 2018 年 4 月 15 日播种, 同时以 390 kg/hm<sup>2</sup> 用量施用复合肥, 后在 6 月 5 日及 7 月 2 日分别以 179、143 kg/hm<sup>2</sup> 用量分 2 次追施尿素。作物播种后依靠雨水灌溉。

表 1 不同处理及其土壤机械组成

处理 Treatment	体积比 Volume ratio/%		机械组成 Mechanical composition/%		
	红黏土 Red Clay	马兰黄土 Malan Loess	黏粒 Clay	粉粒 Silt	砂粒 Sand
T0	-	-	5.0	70.8	24.2
T1	100	-	17.3	73.1	9.5
T2	83.3	16.7	7.9	73.6	18.5
T3	66.7	33.3	6.9	72.4	20.7
T4	50.0	50.0	5.4	70.3	24.3
T5	33.3	66.7	4.2	67.6	28.2
T6	16.7	83.3	4.8	70.3	24.9
T7	-	100	4.1	65.4	30.5



图 2 土层复配示意图

Fig.2 Schematic diagram of soil-layer compounding

### 1.3 样品采集和处理

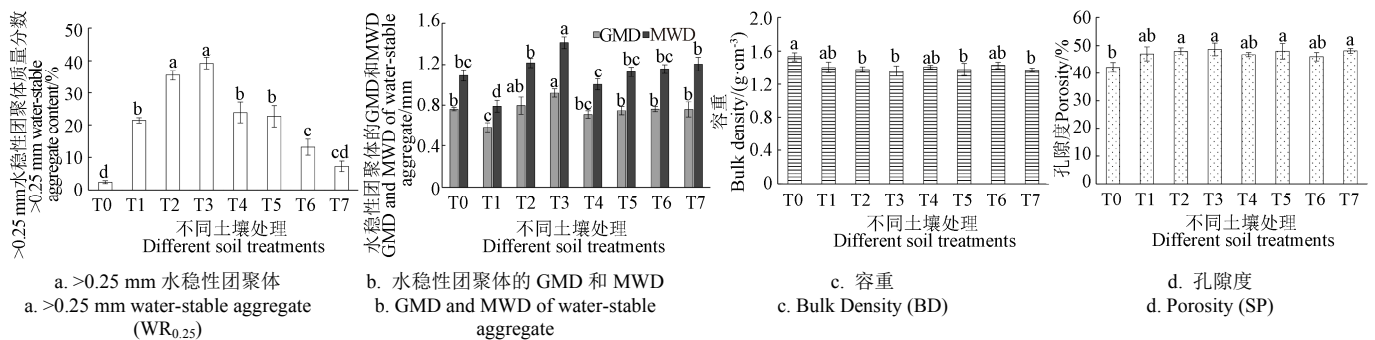
土样于 2018 年 10 月底玉米收获后采集。用于测定

化学性质和机械组成的样品采用多点混合取样法采集, 每个小区随机取 3 个样点, 每个样点按 0~10、>10~20、>20~30 cm 进行分层采样, 按层将每个小区 3 个样点的样品混合均匀, 每个小区取 3 个混合样。将样品带回实验室后去除土样中的石砾、植物残体等, 自然风干、研磨过筛后用于测试。水稳性团聚体样品的采集则是按 0~10、>10~20、>20~30 cm 分层取原状土, 然后将土块沿自然裂痕剥离成 1 cm<sup>3</sup> 左右的小块, 自然风干后用于测定土壤水稳性团聚体含量。土壤容重采用环刀法测定, 以同样的方式进行分层取样。作物地上生物量和产量于同年 10 月初测定, 采用五点采样法, 每个小区采集 5 棵植株, 为避免外界干扰, 小区边缘的两行植株不予采样。将植株置于烘箱中于 75 °C 恒温烘干至质量恒定, 然后分别称量秸秆和籽粒的质量。

#### 1.4 数据获取

土壤机械组成采用 Bettersize 2000 激光粒度分布仪进行检测, 粒径分组采用美国制标准<sup>[17]</sup>; 土粒密度由比重瓶法测定, 土壤孔隙度由相关公式计算得到<sup>[14]</sup>; 土壤水稳性团聚体通过湿筛法测定<sup>[14]</sup>; 土壤有机质、全氮、全磷、全钾分别采用重铬酸钾氧化法、凯氏法、氢氧化钠熔融-钼锑抗比色法、原子吸收分光光度法测定, 铵态氮、硝态氮、有效磷、有效钾分别采用蒸馏法、双波长比色法、碳酸氢钠提取-钼锑抗比色法、乙酸铵提取-原子吸收分光光度法测定, 阳离子交换量 (Cation Exchange Capacity, CEC) 采用醋酸铵交换-蒸馏法测定<sup>[18]</sup>。土壤团聚体的平均重量直径 (Mean Weight Diameter, MWD) 和几何平均直径 (Geometric Mean Diameter, GMD) 通过式 (1)、式 (2) 计算<sup>[19]</sup>, 土壤肥力综合评价得分由式 (3) 计算。<sup>[15]</sup>

$$MWD = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{X}_i W_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \quad (1)$$



注: 字母不同表示不同土壤处理之间差异显著 ( $P < 0.05$ ); MWD 和 GMD 分别为土壤平均重量直径和几何平均直径。

Note: Different letters indicate significant differences between different soil treatments ( $P < 0.05$ ); MWD and GMD are the soil mean weight diameter and geometric mean diameter, respectively.

图 3 不同土壤处理物理指标对比

Fig.3 Comparisons of physical indexes of soil with different treatments

#### 2.1.2 土壤化学性质

不同处理的土壤化学指标如表 2 所示。其中, T3 处理有机质含量较对照组分别增加 24.5%; 各试验组土壤铵态氮较对照组 T0 提高了 24.1%~55.3%; T3 处理土壤硝态氮较 T0 处理增加了 100%; 而土壤全氮、全钾, 除 T1 处理外, 均较 T0 有一定程度降低, 这可能与原状土经过多年施用化肥导致土壤残氮、残钾含量较高有关; 对于土壤全

$$GMD = \exp \left( \frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln \bar{X}_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right) \quad (2)$$

$$F = \sum_{j=1}^m b_j Z_j \quad (3)$$

式中  $\bar{X}_i$  为某级团聚体的平均粒径, mm;  $W_i$  为粒径为  $i$  的水稳性团体百分含量, %;  $n$  为团聚体粒级数;  $F$  为土壤肥力综合得分;  $b_j$  为第  $j$  个主成分的贡献率;  $Z_j$  为第  $j$  个主分量;  $m$  为主成分个数。

采用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理, 运用 IBM SPSS Statistics 22.0 进行单因素方差分析和主成分分析, 采用 LSD (Least Significance Difference) 多重比较法对比不同处理间的差异。利用 Microsoft Excel 2016 进行图形绘制。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同复配方案土壤理化性质

#### 2.1.1 土壤物理性质

不同土层复配方案下土壤的物理性质存在差异 (图 3)。复配土壤 >0.25 mm 水稳性团聚体含量提高明显, 其中 T2 和 T3 处理较 T0 处理分别提高了 13.7 倍和 15.2 倍, 均达到显著性水平 ( $P < 0.05$ )。不同处理 >0.25 mm 水稳性团聚体稳定指数也存在着差异, T3 处理的 MWD 显著大于其他各处理的, 比对照组的大 29.1%; 而对于 GMD, T3 处理显著大于除 T2 以外的所有处理, 较对照组 T0 提高了 20.9%。T2、T3、T5、T7 处理的土壤容重与对照组 T0 相比有一定程度的减小, 其中 T2、T5、T7 处理减小了 9.8%, T3 处理减小了 11.1%。T2、T5、T7 处理的土壤孔隙度较对照组 T0 显著提高了 13.7%, T3 处理较对照组显著提高了 15.3% ( $P < 0.05$ )。

磷, 除 T7 处理较 T0 处理提高了 22.4% 以外, 其余处理与对照组没有明显差异; 对于土壤有效钾的含量, T2、T3 处理的含量显著高于其他处理, 较对照组分别提高了 29.3% 和 17.6%, 这说明这 2 种处理更有利于有效钾素的赋存; 此外, T2、T3 处理 CEC 也显著高于其他各处理, 分别较 T0 处理高 101% 和 80.9%, 一定程度上说明这 2 种处理土壤肥力状况较好。

表 2 不同土壤处理化学指标对比  
Table 2 Comparisons of chemical indexes of soil in different soil treatments

处理 Treatments	SOM/(g·kg <sup>-1</sup> )	NH <sub>4</sub> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	NO <sub>3</sub> -N/(mg·kg <sup>-1</sup> )	TN/(g·kg <sup>-1</sup> )	TP/(g·kg <sup>-1</sup> )	TK/(g·kg <sup>-1</sup> )	CEC/(cmol·kg <sup>-1</sup> )	AP/(mg·kg <sup>-1</sup> )	AK/(mg·kg <sup>-1</sup> )
T0	5.88b	23.89d	28.51d	0.38a	0.58b	18.15a	9.82d	6.82a	95.38c
T1	5.55b	37.09a	48.98b	0.37a	0.60b	17.29a	12.17c	4.35c	94.37c
T2	7.05ab	33.28b	26.71d	0.28b	0.62b	12.53b	19.78a	3.27d	123.35a
T3	7.32a	32.19b	58.41a	0.30b	0.64ab	10.72c	17.76b	2.93d	112.07b
T4	7.03ab	29.65c	13.38e	0.30b	0.66ab	10.65c	9.41d	5.48b	74.34d
T5	5.83b	34.14b	33.77c	0.31b	0.62b	12.02bc	8.51de	2.78d	90.72c
T6	4.69b	32.36b	37.26c	0.32b	0.60b	10.40c	9.86d	2.98d	68.78d
T7	2.44c	31.34bc	13.15e	0.31b	0.71a	8.08d	7.58e	3.04d	74.79d

注：SOM：土壤有机质；NH<sub>4</sub>-N：铵态氮；NO<sub>3</sub>-N：硝态氮；TN：全氮；TP：全磷；TK：全钾；CEC：阳离子交换量；AP：有效磷；AK：有效钾。字母不同表示不同土壤处理之间差异显著（*P*<0.05）。下同。  
Note: SOM, Soil organic matter; NH<sub>4</sub>-N, Ammonium nitrogen; NO<sub>3</sub>-N, Nitrate nitrogen; TN, Total nitrogen; TP, Total phosphorus; TK, Total potassium; CEC, Cation exchange capacity; AP, Available phosphorus; AK, Available potassium. Different letters indicate significant differences between different soil treatments (*P*<0.05). Same as below.

2.2 土壤肥力综合评价

通过上述分析可以发现，仅通过部分因子来评价土壤的肥力状况，往往会得到片面的结果，无法对不同复配方案下土壤的肥力状况做出综合评价。因此本研究综合考虑了土壤的物理肥力和化学肥力，选取了相关的 12 个指标，采用主成分分析法对不同复配土壤的肥力进行评价。

2.2.1 主成分的选取

主成分分析的碎石图如图 4 所示，各主成分的特征根和方差贡献率如表 3 所示。由图可以看出前 3 个主成分的特征根均大于 1，且连线斜率均较陡。同时根据统计学原理，当各主成分的累计方差贡献率大于 85%时，就能解释系统的大部分变异信息<sup>[15]</sup>。从表 3 可以看出第 1 个主成分和第 2 个主成分的贡献率较接近，分别为 44.4% 和 31.8%，第 3 个主成分的贡献率为 11.4%，三者的累积贡献率为 87.6%，基本能够解释数据的绝大部分变异，因此选取 3 个主成分比较合理。

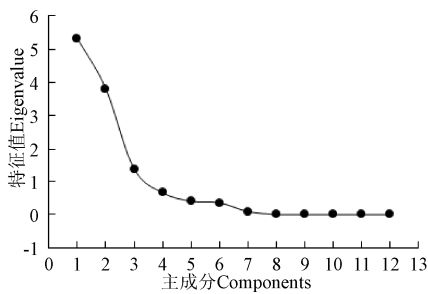


图 4 主成分分析碎石图  
Fig.4 Screen plot of principal component analysis

表 3 主成分分析的特征根和方差贡献率  
Table 3 Eigenvalues and contribution rate of variance of principal component analysis

主成分 Components	特征根 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative contribution rate/%
主成分 1 Component 1	5.452	44.4	44.4
主成分 2 Component 2	3.606	31.8	76.2
主成分 3 Component 3	1.491	11.4	87.6

2.2.2 因子载荷分析

因子在不同成分上的载荷情况可以很好地反映出各肥力因子与综合肥力的关系（表 4）。在主成分 1 上，铵态氮、阳离子交换量、孔隙度、水稳性团聚体等的载荷均超过 0.5，且都为正向，说明这些肥力因子的情况和成分 1 的得分呈正相关，而全氮、全钾、有效磷及容重与成分 1 的得分呈负相关。其中，孔隙度、容重、水稳性团聚体的载荷相对较高，因此可将主成分 1 看作表征土壤土体结构的指标。在成分 2 上，有机质、硝态氮、全钾、阳离子交换量、有效钾、水稳性团聚体的负荷均超过 0.5，且均为正向，说明这些肥力因子与成分 2 呈正相关，而全磷与成分 2 呈负相关。成分 2 上于养分的相关的指标载荷较大，可将成分 2 看作表征土壤养分的指标 1。在成分 3 上，全氮、硝态氮、铵态氮等的负荷值均大于 0.4，且为正向，说明其与成分 3 呈正相关，可将成分 3 看作表征土壤养分的指标 2。由此可见，土壤的土体结构是土壤养分的基础，二者共同决定土壤的肥力状况。

表 4 肥力因子在各主成分上的载荷  
Table 4 Loading of fertility factor on each principal component

肥力因子 Fertility factor	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3
SOM	0.196	0.785	-0.416
NH <sub>4</sub> -N	0.698	0.057	0.612
NO <sub>3</sub> -N	0.249	0.661	0.552
TN	-0.811	0.227	0.469
TP	0.447	-0.733	-0.285
TK	-0.622	0.675	0.233
CEC	0.540	0.718	-0.237
AP	-0.829	0.227	-0.350
AK	0.358	0.786	-0.207
SP	0.960	-0.188	0.112
BD	-0.964	0.151	-0.126
WR <sub>0.25</sub>	0.815	0.513	-0.182

2.2.3 不同复配方案土壤肥力评价

由基于主成分分析的肥力综合评价可见（表 5），各处理的得分由高到低为 T3、T2、T1、T5、T6、T4、T7、T0，T3 处理的综合得分较 T0 提高了 4.09，T2 处理较 T0 处理提高了 3.71。而由表 5 可以看出，T2、T3 处理在主成分 1 和主成分 2 上的得分均居于前列，说明在这 2 种复配方



案下, 土壤的结构更好, 同时土壤养分条件也更优。

表 5 不同处理主成分得分及土壤肥力综合得分

Table 5 Principal component scores and soil fertility score of different treatments

处理 Treatments	主成分 1 Component 1	主成分 2 Component 2	主成分 3 Component 3	肥力得分 Fertility score
T0	-4.99	1.28	-0.67	-2.15
T1	-0.39	1.39	2.06	0.57
T2	2.18	1.69	-1.2	1.56
T3	2.64	1.72	-0.21	1.93
T4	-0.29	-1.04	-1.68	-0.74
T5	0.91	-0.38	0.69	0.41
T6	-0.52	-0.94	0.96	-0.48
T7	0.47	-3.71	0.05	-1.10

### 2.3 不同复配方案作物生长状况比较

为反映不同复配方案地块的生产能力, 对玉米的相关性状指标进行了分析, 结果如表 6 所示。对于玉米的地上生物量而言, T3 处理的显著高于其余各处理, 为 15.85 t/hm<sup>2</sup>, 较对照组 T0 提高 23.9%。T3 处理玉米籽粒产量为 8.64 t/hm<sup>2</sup>, 和 T0、T4 处理没有显著差异, 但显著高于其余各处理的, 高出 37.4%~43.6%, 说明 T3 处理在试验处理中相对具有更高的生产能力。对比各组玉米的千粒质量, 发现 T3 处理的显著高于其余处理, 较对照组高 13.3%, 说明该处理玉米的籽粒更饱满, 品质更好 ( $P<0.05$ )。

表 6 不同土壤处理玉米生长指标对比

Table 6 Comparison of maize growth indexes under different soil treatments

处理 Treatments	玉米产量 Maize yield/(t·hm <sup>-2</sup> )	地上生物量 Above-ground biomass/(t·hm <sup>-2</sup> )	千粒质量 1 000 kernel weight/g
T0	7.42±0.65ab	12.07±0.33b	272.47±10.37bc
T1	6.28±1.05b	10.19±0.67bc	276.80±4.09b
T2	6.02±0.50b	10.36±0.80bc	245.07±6.52cd
T3	8.64±0.44a	15.85±1.11a	308.80±2.23a
T4	7.20±0.74ab	9.92±0.72bc	258.13±7.29c
T5	6.09±0.72b	11.69±0.61bc	242.93±0.70cd
T6	6.25±0.62b	9.18±1.83c	240.80±2.72cd
T7	6.27±0.64b	12.53±0.69b	228.20±4.80d

## 3 讨论

### 3.1 土层复配对土壤物理性质的影响

试验显示, 除 T7 外不同复配方案下土壤的水稳性团聚体含量较对照组显著增加 (图 3)。Edwards 等<sup>[20]</sup>认为团聚体的形成过程实质是黏粒通过多价金属阳离子连结而吸附有机分子的过程, 黏粒、阳离子、有机质等在水稳性团聚体的形成和稳定中起重要作用<sup>[21]</sup>。Tisdall 等<sup>[22]</sup>进一步指出团聚体是按粒径大小逐级形成的, 当土壤有机质含量较低时, 黏粒对团聚体的形成起主导作用<sup>[23]</sup>, 土壤中黏粒含量适度时既有充足的黏粒作为粘结剂, 又有足够的粉粒、砂粒作为团聚体形成的骨架, 能促进团聚微粒的形成; 在团聚微粒向更大粒级的团聚体转化的过程中, 金属阳离子的键桥作用起关键作用, 而过量的黏粒会减弱金属离子的键桥作用从而不利于大团聚体的形成

和稳定<sup>[17]</sup>。与对照组 T0 相比, T2、T3 处理土壤黏粒含量分别提高到 7.9%和 6.9%, 粉粒含量分别提高到 73.6%和 72.4% (表 1), 细颗粒含量的提高有助于初始阶段团聚微粒的形成, 为大团聚体的形成提供充足的原材料; 而 T1 处理因黏粒占比较高 (17.3%), 可能会减弱金属阳离子的键桥作用, 进而减弱团聚体的水稳性。但同时也注意到, T5 黏粒和粉粒的含量均较 T0 低, 但 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量却较 T0 高, 这可能与微生物的活动有关, T5 处理孔隙度较 T0 显著增大, 有助于增强微生物对团聚体的网络、连结作用, 进而增加团聚体的稳定性<sup>[24]</sup>, T2、T3 >0.25 mm 水稳性团聚体的含量较高, 同样可能得益于孔隙度的增大。Dimoyiannis 等<sup>[25]</sup>的研究表明 CEC 能增强团聚体的稳定性, 而有机质能促进小团聚体向大团聚体转化, 同时提高团聚体稳定性<sup>[7,26]</sup>。T2、T3 处理的 CEC 分别为 19.78 和 17.76 cmol/kg, 分别较对照组 (9.82 cmol/kg) 提高了 101.4%和 80.9%; 而 T3 处理的有机质含量也较 T0 有所增加, 增加了 24.5% (表 2)。适宜的机械组成, 加之孔隙度、CEC、有机质含量等指标较优, 使得 T2、T3 处理 >0.25 mm 水稳性团聚体含量相对较高, 较 T0 处理分别提高了 13.7 倍和 15.2 倍 (图 3)。

GMD 和 MWD 是衡量土体结构稳定性的重要指标, 刘威等<sup>[27]</sup>发现 GMD 和 MWD 与 >0.25 mm 大团聚体的数量显著相关, 杨如萍等<sup>[28]</sup>的研究中 MWD 的首要影响因素为水稳性大团聚体的含量, T2、T3 处理水稳性大团聚体含量较高, 其 GMD 和 MWD 也较大 (图 3), 这与已有研究相符。而土壤容重和孔隙度通常受耕作方式和土壤微观结构的影响<sup>[29]</sup>, 孙隆祥等<sup>[30]</sup>的研究表明 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体与土壤容重呈负相关, 与孔隙度呈正相关。本试验中, T2、T3、T5 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量相对较高, 其对应的容重相对较小, 而孔隙度则相对较大 (图 3), 这与已有研究的结果基本一致。土层复配通过不同土壤的混合首先改变了土壤的微观颗粒组成, 进而影响到团粒结构的形成, 最终通过团聚作用等对土壤的容重、孔隙度、团聚体稳定性等宏观物理结构特征产生影响。

### 3.2 土层复配对土壤化学性质的影响

土壤化学性质受多种因素的影响。Plante 等<sup>[31]</sup>的研究表明团聚体对有机质具有保护作用, 尤其是大团聚体对有机质的包裹作用, 能减少有机质与空气的接触, 从而减少其损失量<sup>[32]</sup>; 微生物能促进有机物的分解, 增加土壤中有有机质的来源<sup>[33]</sup>。本试验 T2、T3、T4 处理团聚体含量较高, 其有机质可能因此相对较高 (表 2)。Fateme 等<sup>[34]</sup>研究表明, 当土壤中的黏粒质量分数在 5%~10%时, 能降低有机碳的分解速度, 增加 SOM 的赋存量。T3 处理的黏粒质量分数为 6.9%, 可能也对减缓 SOM 分解有积极作用。同时, 有学者研究表明土壤有机质含量与容重呈显著正相关, 这和本试验结果不一致, 可能是由土地利用方式不同和土壤类型差异导致<sup>[35]</sup>。土壤氮、磷、钾的数量和形态受土壤质地、土壤含水率、pH 值、土壤孔隙度等多种因素的影响<sup>[36-38]</sup>。占丽平等<sup>[37]</sup>研究认为, 随着土壤黏粒含量升高, 钾素移动性降低, 土壤微生物的活化作用会增加有效养分的含量<sup>[39]</sup>。试验中, T1、T2、

T3 黏粒含量较高(表 1), 土壤对钾元素的固定作用较强, 减少了钾元素因淋溶而损失的量, 因此其有效钾和全钾含量均较高(表 2)。T2、T3 处理有效钾含量较高, 可能是其孔隙度较大, 同时有机质含量较高, 这为微生物的活动提供了良好条件, 增强了微生物的活性, 微生物的活动进一步增强了钾的有效性。杨硕等<sup>[40]</sup>发现翻耕可使土壤变得疏松, 促进硝化作用, 从而增加硝态氮的含量, 原因可能是土壤孔隙度的变化对微生物的活动产生了影响, 从而影响土壤中氮的转化。T3 处理土壤孔隙度较大, 利于好氧微生物的硝化作用, 因此可能具有较高的硝态氮含量; T2、T5、T7 处理的孔隙度虽然也较大, 但硝态氮含量并没有显著增加(图 3, 表 2), 可能与土壤质地、孔隙特征等导致的硝态氮淋溶强度不同有关<sup>[41]</sup>。此外, 有学者的研究表明土壤中氮的转化还与有机碳相关<sup>[42]</sup>, 这在本研究中未进行探讨, 可在今后的研究中进一步探索。

### 3.3 土层复配对土壤肥力的影响

土壤肥力是土壤物理、化学、生物因子的综合作用结果。Abbott 等<sup>[43]</sup>认为土壤良好的物理性状是土壤形成良好养分条件的基础, 而养分是土壤肥力的重要物质条件, 微生物则对养分转换起重要作用。本研究主成分分析的结果表明, 土壤孔隙度、容重和 $>0.25$  mm 水稳性团聚体含量在土壤肥力主成分 1 上的载荷分别为 0.960、-0.964、0.815, 载荷较高(表 4), 而主成分 2 和主成分 3 上土壤有机质、铵态氮、硝态氮、全氮有效钾等养分指标的载荷均相对较高(表 4), 说明了土体结构是土壤肥力形成的基础, 而土壤养分是土壤肥力的核心要素, 这与 Abbott 等的观点相符<sup>[43]</sup>。刘威等<sup>[27]</sup>认为 $>0.25$  mm 的团聚体是土壤中最好的结构单元, 与土壤肥力呈正相关, 本研究中各试验组除 T7 处理外,  $>0.25$  mm 的团聚体含量均高于 T0 处理的, 各试验组也相应表现出了更好的肥力。王倩等<sup>[14]</sup>的研究表明土壤的肥力不仅与有机质、全氮、全磷等养分指标相关, 土壤的力稳性和水稳性对土壤肥力也有较大贡献, T3 处理水稳性团聚体的 GMD、MWD 显著高于其他处理, 肥力也相应最高。T2、T3 处理具有较优的容重、孔隙度、团聚体等物理指标, 营造了良好的物理环境, 因此也具有更好的养分条件和综合肥力。此外, 土壤肥力还与管理措施有关<sup>[14]</sup>, 这在今后的试验中还需进一步探讨。可见, 土层复配之所以能对土壤的肥力产生影响, 主要在于其改变了土壤的物理结构, 进而对土壤的功能产生影响。作物的生长状况与肥力评价的结果不完全一致, 这可能是还有其他未讨论的因子, 如土壤水含量、土壤温度、微量元素等, 对作物的生长具有较大的影响, 后期还需完善评价指标。

## 4 结 论

1) 不同土层复配方案对土壤理化性质产生了差异化影响。除 T7 外, 各试验组 $>0.25$  mm 水稳性团聚体的含量均较对照显著增加; T3 处理 $>0.25$  mm 水稳性团聚体的 MWD 和 GMD 显著增大。T3 处理容重和孔隙度均较原状土明显改善。T3 处理有机质、有效钾和硝态氮较 T0

处理显著增加。土壤机械组成的改变是土壤结构改变的物质基础。

2) 主成分分析显示, 主成分 1 上孔隙度、水稳性团聚体等载荷较大, 可看作表征土体结构的指标; 主成分 2 上有机质、硝态氮、全钾、阳离子交换量、有效钾等载荷较大, 可看作表征土壤养分的指标 1; 主成分 3 上全氮、硝态氮、铵态氮的载荷较大, 可看作表征土壤养分的指标 2。土层复配通过优化土壤土体结构, 改善了土壤养分条件, 进而提高了土壤的肥力。

3) 综合评价结果显示, 各处理土壤肥力综合得分由大到小依次为 T3、T2、T1、T5、T6、T4、T7、T0。当红黏土和马兰黄土以体积分数 66.7%和 33.3%(T3 处理)进行复配时, 虽对产量的改善不显著, 但能显著提高作物地上生物量, 改善土壤的肥力, 因此认为该复配方案相对最优。

试验表明, 土层复配是一种可行的快速营造高质量土壤的技术方法。但因仅有一年的数据, 对复配土壤结构、功能的有效性和持续性的说服力有限, 未来仍需进行长期观测, 获取连续数据支撑相关结论。此外, 作物产量没有显著提高可能与相关微量元素有关, 后期可作进一步探索。本试验为提升“治沟造地”工程新增耕地质量提供了一种有效的技术方法, 对促进新增耕地后续有效利用具有一定实践价值, 同时也为今后类似整治工程的实施提供实践技术参考。

### [参 考 文 献]

- [1] Feng W L, Liu Y S, Chen Z F, et al. Theoretical and practical research into excavation slope protection for agricultural geographical engineering in the Loess Plateau: A case study of China's Yangjuangou catchment[J]. Journal of Rural Studies. 2019-12-12. <https://doi.org/10.1016/j.jrurstud.2019.01.020>
- [2] 刘彦随, 李裕瑞. 黄土丘陵沟壑区沟道土地整治工程原理与设计技术[J]. 农业工程学报, 2017, 33(10): 1-9.  
Liu Yansui, Li Yurui. Engineering philosophy and design scheme of gully land consolidation in Loess Plateau[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(10): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [3] 刘东生, 文启忠, 郑洪汉, 等. 黄土的物质成分和结构与水土保持的关系[J]. 水土保持通报, 1981(1): 16-19.  
Liu Dongsheng, Wen Qizhong, Zheng Honghan, et al. Relationship between material composition and structure of loess and soil and water conservation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 1981(1): 16-19. (in Chinese with English abstract)
- [4] 刘彦随, 冯巍仑, 李裕瑞. 现代农业地理工程与农业高质量发展: 以黄土丘陵沟壑区为例[J]. 地理学报, 2020, 75(10): 2029-2046.  
Liu Yansui, Feng Weilun, Li Yurui. Modern agricultural geographical engineering and agricultural high-quality development: Case study of loess hilly and gully region[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(10): 2029-2046. (in Chinese with English abstract)
- [5] 李品芳, 杨永利, 兰天, 等. 天津滨海盐渍土客土改良后的土壤理化性质与持水特性[J]. 农业工程学报, 2017,

- 33(7): 149-156.
- Li Pinfang, Yang Yongli, Lan Tian, et al. Physicochemical properties and water holding characteristics of Tianjin coastal saline soil improved by foreign soil[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(7): 149-156. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘永兵, 李翔, 刘永杰, 等. 土地整治中底泥质耕作层土壤的构建方法及应用效果[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 242-248.
- Liu Yongbing, Li Xiang, Liu Yongjie, et al. Construction method and application effect on tillage layer soil by sediment in land consolidation engineering[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 242-248. (in Chinese with English abstract)
- [7] 朱宝国, 张春峰, 贾会彬, 等. 深翻结合心土与不同改土物料混合改良白浆土的效果[J]. 农业工程学报, 2018, 34(14): 107-114.
- Zhu Baoguo, Zhang Chunfeng, Jia Huibin, et al. Improving effect of planosol by deep tillage combined with subsoil mixed with ameliorative materials[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2018, 34(14): 107-114. (in Chinese with English abstract)
- [8] 张长生, 融晓萍, 杨满红, 等. 掺沙对盐碱地耕层土壤结构和离子含量的影响[J]. 内蒙古农业科技, 2014(6): 1-4.
- Zhang Changsheng, Rong Xiaoping, Yang Manhong, et al. Influence of adding sand on soil structure and ionic contents of till layer of salinized-alkalinized soil[J]. Inner Mongolia Agricultural Science and Technology, 2014(6): 1-4. (in Chinese with English abstract)
- [9] 关冰, 周晓莹, 吕林有, 等. 风沙土添加油页岩对土壤肥力及燕麦生长的影响[J]. 辽宁农业科学, 2020(6): 36-39.
- Guan Bing, Zhou Xiaoying, Lv Linyou, et al. Effects of oil shale on soil fertility and oat growth in sandstorm soil[J]. Liaoning Agricultural Sciences, 2020(6): 36-39. (in Chinese with English abstract)
- [10] 韩霁昌, 刘彦随, 罗林涛. 毛乌素沙地砒砂岩与沙快速复配成土核心技术研究[J]. 中国土地科学, 2012, 26(8): 87-94.
- Han Jichang, Liu Yansui, Luo Lintao. Research on the core technology of remixing soil by soft rock and sand in the Maowusu Sand Land Region[J]. China Land Science, 2012, 26(8): 87-94. (in Chinese with English abstract)
- [11] Wang Y, Li Y, Li Y R. Land engineering consolidates degraded sandy land for agricultural development in the largest sandy land of China[J]. Land, 2020, 9(6): 199.
- [12] 李裕瑞, 范朋灿, 曹智, 等. 基于扫描电镜解析毛乌素沙地砒砂岩与沙复配成土的微观结构特征[J]. 应用基础与工程科学学报, 2019, 27(4): 707-719.
- Li Yurui, Fan Pengcan, Cao Zhi, et al. Analysis of micro-structure of composited soil with feldspathic sandstone and sand through the scanning electronic microscope in Mu Us Sandy Land Region[J]. Journal of Basic Science and Engineering, 2019, 27(4): 707-719. (in Chinese with English abstract)
- [13] 黄晶, 蒋先军, 曾跃辉, 等. 稻田土壤肥力评价方法及指标研究进展[J]. 中国土壤与肥料, 2017(6): 1-8.
- Huang Jing, Jiang Xianjun, Zeng Yuehui, et al. A review on the evaluation methods and indexes of soil fertility in paddy fields[J]. Soils and Fertilizers Sciences in China, 2017(6): 1-8. (in Chinese with English abstract)
- [14] 王倩, 李军, 宁芳, 等. 渭北旱作麦田长期保护性耕作肥力特征综合评价[J]. 应用生态学报, 2018, 29(9): 2925-2934.
- Wang Qian, Li Jun, Ning Fang, et al. Comprehensive assessment of soil fertility characteristics under different long-term conservation tillages of wheat field in Weibei Highland, China[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2018, 29(9): 2925-2934. (in Chinese with English abstract)
- [15] 温延臣, 李燕青, 袁亮, 等. 长期不同施肥制度土壤肥力特征综合评价方法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(7): 91-99.
- Wen Yanchen, Li Yanqing, Yuan Liang, et al. Comprehensive assessment methodology of characteristics of soil fertility under different fertilization regimes in North China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(7): 91-99. (in Chinese with English abstract)
- [16] Wang L, Ma B, Wu F. Effects of wheat stubble on runoff, infiltration, and erosion of farmland on the Loess Plateau, China, subjected to simulated rainfall[J]. Solid Earth, 2017, 8(2): 1-28.
- [17] 黄云鑫, 李裕瑞, 刘彦随, 等. 不同土层复配方案对土壤水稳性团聚体及有机质的影响[J]. 农业资源与环境学报, 2020, 37(6): 894-903.
- Huang Yunxin, Li Yurui, Liu Yansui, et al. Effects of different soil-layer compounding schemes on soil water-stable aggregates and organic matter[J]. Journal of Agricultural Resources and Environment, 2020, 37(6): 894-903. (in Chinese with English abstract)
- [18] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 2000.
- [19] 周虎, 吕贻忠, 杨志臣, 等. 保护性耕作对华北平原土壤团聚体特征的影响[J]. 中国农业科学, 2007(9): 1973-1979.
- Zhou Hu, Lv Yizhong, Yang Zhichen, et al. Effects of conservation tillage on soil aggregates in Huabei Plain, China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2007(9): 1973-1979. (in Chinese with English abstract)
- [20] Edwards A P, Bremner J M. Dispersion of soil particles by sonic Vibration[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 18(1): 47-63.
- [21] Bronick C J, Lal R. Soil structure and management: A review[J]. Geoderma, 2005, 124(1): 3-22.
- [22] Tisdall J M, Oades J M. Organic matter and water-stable aggregates in soils[J]. European Journal of Soil Science, 2010, 33(2): 141-163.
- [23] 章明奎, 何振立. 成土母质对土壤团聚体形成的影响[J]. 热带亚热带土壤科学, 1997(3): 198-202.
- Zhang Mingkui, He Zhenli. Effect of parent materials on formation of soil aggregate[J]. Tropical and Subtropical Soil Science, 1997(3): 198-202. (in Chinese with English abstract)
- [24] 王清奎, 汪思龙. 土壤团聚体形成与稳定机制及影响因素[J]. 土壤通报, 2005, 36(3): 415-421.

- Wang Qingkui, Wang Silong. Forming and stable mechanism of soil aggregate and influencing factors[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2005, 36(3): 415-421. (in Chinese with English abstract)
- [25] Dimoyiannis D G, Tsadilas C D, Valmis S. Factors affecting aggregate instability of Greek agricultural soils[J]. Communications in Soil Science & Plant Analysis, 1998, 29(9/10): 1239-1251.
- [26] Wilson G W T, Rice C W, Rillig M C, et al. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: Results from long-term field experiments[J]. Ecology Letters, 2010, 12(5): 452-461.
- [27] 刘威, 张国英, 张静, 等. 2 种保护性耕作措施对农田土壤团聚体稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(3): 117-122.
- Liu Wei, Zhang Guoying, Zhang Jing, et al. Effect of two conservation tillage measures on soil aggregate stability[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(3): 117-122. (in Chinese with English abstract)
- [28] 杨如萍, 郭贤仕, 吕军峰, 等. 不同耕作和种植模式对土壤团聚体分布及稳定性的影响[J]. 水土保持学报, 2010, 24(1): 252-256.
- Yang Ruping, Guo Xianshi, Lv Junfeng, et al. Affects of distribution and stability on soil aggregate in different patterns of tillage and cropping[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2010, 24(1): 252-256. (in Chinese with English abstract)
- [29] 关劼兮, 陈素英, 邵立威, 等. 华北典型区域土壤耕作方式对土壤特性和作物产量的影响[J]. 中国生态农业学报(中英文), 2019, 27(11): 1663-1672.
- Guan Jiexi, Chen Suying, Shao Liwei, et al. Soil tillage practices affecting the soil characteristics and yield of winter wheat and summer maize in North China[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(11): 1663-1672. (in Chinese with English abstract)
- [30] 孙隆祥, 陈梦妮, 薛建福, 等. 秸秆还田对麦梁两熟农田土壤团聚体特征的短期效应[J]. 水土保持研究, 2018, 25(6): 36-44.
- Sun Longxiang, Chen Mengni, Xue Jianfu, et al. Short-term response of soil aggregate characteristics to different annual straw incorporation rates in winter wheat-summer sorghum cropping system[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2018, 25(6): 36-44. (in Chinese with English abstract)
- [31] Plante A F, McGill W B. Stabilization of aggregates by the microbial biomass as affected by soil texture and type[J]. Soil & Tillage Research, 2002, 66(1): 79-92.
- [32] Chevallier T, Blanchart E, Albrecht A, et al. The physical protection of soil organic carbon in aggregates: a mechanism of carbon storage in a Vertisol under pasture and market gardening (Martinique, West Indies)[J]. Agriculture Ecosystems & Environment, 2004, 103(2): 375-387.
- [33] Rakhsh F, Golchin A, Agha A B A, et al. Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon[J]. Geoderma, 2017, 307: 150-158.
- [34] Fetemeh R, Ahmad G, Ali B A A, et al. Effects of exchangeable cations, mineralogy and clay content on the mineralization of plant residue carbon[J]. Geoderma, 2017, 307: 150-158.
- [35] 张岩松, 雷泽勇, 于东伟, 等. 沙质草地营造樟子松林后土壤容重的变化及其影响因子[J]. 生态学报, 2019, 39(19): 1-9.
- Zhang Yansong, Lei Zeyong, Yu Dongwei, et al. Changes in soil bulk density and its influencing factors after sandy grassland afforestation with *Pinus sylvestris* var. *mongolica*[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(19): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [36] 范晓晖, 朱兆良. 旱地土壤中的硝化-反硝化作用[J]. 土壤通报, 2002(5): 385-391.
- Fan Xiaohui, Zhu Zhaoliang. Nitrification and Denitrification in upland soils[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2002(5): 385-391. (in Chinese with English abstract)
- [37] 占丽平, 李小坤, 鲁剑巍, 等. 土壤钾素运移的影响因素研究进展[J]. 土壤, 2012, 44(4): 548-553.
- Zhan Liping, Li Xiaokun, Lu Jianwei, et al. Research advances on influence factors of soil potassium movement[J]. Soils, 2012, 44(4): 548-553. (in Chinese with English abstract)
- [38] 赵琼, 曾德慧. 陆地生态系统磷素循环及其影响因素[J]. 植物生态学报, 2005, 29(1): 153-163.
- Zhao Qiong, Zeng Dehui. Phosphorus cycling in terrestrial ecosystems and its controlling factors[J]. Chinese Journal of Plant Ecology, 2005, 29(1): 153-163. (in Chinese with English abstract)
- [39] 刘旭军, 程小琴, 田慧霞, 等. 间伐和凋落物处理对华北落叶松人工林土壤磷形态的影响[J]. 生态学报, 2019, 39(20): 1-11.
- Liu Xujun, Cheng Xiaoqin, Tian Huixia, et al. Effects of thinning and litter manipulation on soil phosphorus dynamics in a *Larix principis-rupprechtii* plantation[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(20): 1-11. (in Chinese with English abstract)
- [40] 杨硕, 金文俊, 黄海蒙, 等. 耕层土层交换对土壤氮素关键转化过程和玉米氮素利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2019, 27(10): 1515-1527.
- Yang Shuo, Jin Wenjun, Huang Haimeng, et al. Effects of soil layers exchange on key nitrogen transformation processes in soil and nitrogen utilization by maize[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2019, 27(10): 1515-1527. (in Chinese with English abstract)
- [41] 曾辉, 温娜, 张建丰, 等. 华北平原大孔隙优先流对农田氮素淋溶的影响[J]. 中国生态农业学报, 2021, 29(1): 66-75.
- Zeng Hui, Wen Na, Zhang Jianfeng, et al. Effect of macropore preferential flow on nitrogen leaching in a North China Plain farmland[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2021, 29(1): 66-75.
- [42] O'Sullivan C A, Wakelin S A, Fillery I R P, et al. Factors affecting ammonia-oxidising microorganisms and potential nitrification rates in southern Australian agricultural soils[J]. Soil Research, 2013, 51(3): 240-252.
- [43] Abbott L K, Murphy D V. Soil Biological Fertility[M]. Netherlands: Kluwer Academia Publishers, 2003.



## Effects of soil-layer compounding schemes on the soil fertility of newly-constructed cultivated land

Huang Yunxin<sup>1,2</sup>, Li Yurui<sup>1,2</sup>, Liu Yansui<sup>1,2\*</sup>, Wang Yongsheng<sup>1</sup>, Zhang Xuanchang<sup>1</sup>

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China.)

**Abstract:** The improvement of the quality of the newly-constructed cultivated land is of great significance to the effective utilization of the newly-constructed cultivated land after the implementation of the “Gully Land Consolidation Project” (GLCP) in Yan’ an. To explore an effective method that can be used to quickly improve the newly-constructed cultivated land with poor quality of GLCP, a 4-year soil-layer compounding experiment was carried out in Yangjuangou watershed (109°31'-109°71' E, 36°42'- 36°82' N). Based on the complementary structure of the Red Clay (RC) and Malan Loess (ML), the different ratios of RC and ML were used for reconstruction of the 0-30 cm soil layer of the newly-constructed cultivated land (T0, undisturbed soil; T1, 100% RC; T2, 83.3% RC and 16.7% ML; T3, 66.7% RC and 33.3% ML; T4, 50% RC and 50% ML; T5, 33.3% RC and 66.7% ML; T6, 16.7% RC and 83.3% ML; T7, 100% ML). The chemical and physical properties of the soil and the condition of crop were measured, and the soil fertility of each scheme was comprehensively evaluated by principal component analysis. The results of experiment showed: The >0.25 mm water-stable aggregates in T2 and T3 increased by 13.7 and 15.2 times, respectively, compared with T0. Compared with T0 treatment, the geometric mean diameter (GMD) and mean weight diameter (MWD) of water-stable aggregates >0.25 mm in T3 treatment were 20.9% and 29.1% higher while bulk density decreased by 11.1% and porosity increased by 15.3%. The contents of organic matter and nitrate nitrogen in T3 increased by 24.5% and 100%, respectively, compared with the control group. Compared with T0 treatment, the available potassium values in T2 and T3 treatment were increased by 29.3% and 17.6%, respectively. The results of principal component analysis showed that soil structure was the structural basis of soil fertility, and soil nutrient was an important part of soil fertility, which jointly determined soil fertility. And the order of the comprehensive fertility score from high to low was T3, T2, T1, T5, T6, T4, T7, T0. The maize in T3 treatment had the maximum aboveground biomass and 1000-grain weight, and the maize yield was also relatively high. It could be concluded that the scheme was the optimal one when the volume ratio of RC and ML was 66.7% and 33.3%, respectively for the soil having the highest comprehensive fertility and the crops growing relatively well. In conclusion, the experimental results show that soil-layer compounding is a feasible method to construct soil with high quality quickly, and the study provides practical reference for the improvement of the quality of newly-constructed land in the GLCP and the implementation of similar projects in the future.

**Keywords:** soils; fertility; soil-layer compounding; soil structure; physical and chemical properties; Loess Hilly-Gully Area