

连续 7 年施有机肥和化肥提高复垦土壤上玉米产量的驱动因子

谢钧宇, 张慧芳, 罗云琪, 孟会生, 张 杰, 洪坚平, 徐明岗^{*}

(山西农业大学资源环境学院, 太谷 030801)

摘 要: 研究长期施肥对玉米连作体系下采煤塌陷区复垦土壤肥力变化和玉米产量的影响, 明确玉米产量提高的驱动因素和最佳施肥处理, 可为该区域培肥土壤和耕地质量提升提供理论依据。该研究依托 7 a (2014—2020 年) 复垦定位肥料试验基地, 设置不施肥对照 (CK)、氮磷钾平衡施肥 (NPK)、单施有机肥 (M) 和有机肥配施无机肥 (MNPK) 4 个处理, 采集 0~20 cm 土层土壤样品, 研究不同施肥处理对作物产量、土壤化学指标 (包括有机质、全氮、有效磷、速效钾、有效铁锰铜锌含量)、土壤物理指标, 即团聚体分布比例及其碳氮含量以及土壤生物指标, 即与碳循环相关的土壤酶活性的影响。结果表明, 施化肥及有机肥较 CK 均显著提高了玉米籽粒产量, 且以 M 处理的增幅最大。M 处理显著提高了土壤有机质、全氮、速效钾及有效锰含量, 增幅分别为 21.50%、12.50%、98.37% 及 20.19%; MNPK 处理改善了土壤的基本性质, 显著提高了大粒径团聚体 (> 2 mm) 中有机碳和全氮含量, 增幅分别达 68.68% 和 471.43%, 但是显著降低了土壤有效铜和有效锌含量, 降幅分别为 16.67% 和 16.46%。而且施加有机肥后, 加速了大团聚体 (0.25~2 mm) 的破碎, 伴随着粉黏粒组分 (< 0.053 mm) 数量的增加。此外, NPK 处理显著提高了 β -葡萄糖苷酶活性, 增幅为 29.17%, 但是显著降低了脲酶活性, 降幅为 29.79%, 施有机肥 (M 和 MNPK) 显著提高了蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和碱性磷酸酶活性, 增幅分别为 45.87%~73.39%、54.98%~60.73%、43.09%~80.32% 和 51.52%~54.97%。进一步通过主成分分析以及土壤肥力综合指数评价, 表明单施有机肥是该复垦区域耕地质量提升和维持土地生产力较好的农田管理措施。结合冗余分析结果可知, β -葡萄糖苷酶是评价土壤肥力的敏感性指标, 它对玉米籽粒产量和土壤有机质含量的贡献率高达 72.40%。因此, 在现有的农田管理条件下, 单施有机肥主要通过增强 β -葡萄糖苷酶活性进而促进复垦土壤肥力的形成, 最终提高了作物产量, 是维持该复垦区作物高产稳产和培育耕地质量的有效措施。

关键词: 土壤; 有机肥; 复垦; 产量; 微量元素; β -葡萄糖苷酶

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307046

中图分类号: S157.1

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2024)-01-0150-11

谢钧宇, 张慧芳, 罗云琪, 等. 连续 7 年施有机肥和化肥提高复垦土壤上玉米产量的驱动因子[J]. 农业工程学报, 2024, 40(1): 150-160. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307046 <http://www.tcsae.org>
XIE Junyu, ZHANG Huifang, LUO Yunqi, et al. Driving factors of improving maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2024, 40(1): 150-160. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.202307046 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

煤炭作为世界三大化石能源之一, 在中国能源生产和消费中始终占据主体地位。煤炭资源开采为国民经济的发展带来了便捷服务, 但是与此同时也诱发了资源过渡开采和大面积的土地破坏^[1]。据不完全统计, 中国仍有 $66.7 \times 10^5 \text{ hm}^2$ 的土地因煤炭开采而损毁, 且尚未得到复垦, 每年仍以约 $26\ 680 \text{ hm}^2$ 的速度新增损毁, 其中一半以上的土地是耕地或其他农业用地, 加剧了煤矿区的人地矛盾, 中国的粮食生产安全和社会经济可持续发展

也受到了严重的威胁^[2]。所以, 聚焦煤矿区的复垦工作, 对于保住中国的 18 亿亩耕地红线和解决粮食安全具有重要意义。

山西省煤矿储量丰富且开采量比例为中国之最, 使得耕地、林地遭到严重破坏。开展土地复垦研究对于恢复土壤肥力、实现区域耕地质量提升和农业绿色转型发展意义非凡。施肥是培肥土壤地力和提高作物产量的有效措施。长期施肥在增加土壤养分含量^[3]、改善土壤物理结构^[4]、调节微生物种群群落^[5] 以及提高作物产量^[4,6] 等方面至关重要。研究报道, 连续 3 a 施用猪粪较不施肥显著提高了旱地红壤有机碳、全氮、有效磷和速效钾含量, 分别提高了 27.29%、33.75%、1 281.14% 和 64.02%, 而且与碳氮磷循环相关的 6 种土壤酶活性以及菠菜、玉米产量也均显著提高^[7]。邹文秀等^[8] 通过对中国东北黑土施用 13 a 有机肥试验发现, 同初始年土壤相比, 施氮磷钾化肥 (NPK) 仅对土壤有效磷含量有明显的促进作用, 而单施有机肥 (M) 对 0~40 cm 土层土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均有明显提高, 与此同时, 施肥通过增加了土壤的养分含量, 也提高了玉米产量, 且

收稿日期: 2023-07-05 修订日期: 2023-11-06

基金项目: 国家自然科学基金项目 (41807102、U1710255-3); 山西农业大学“杰青优青培育工程”项目 (2022YOPYGC05); 山西省科技创新人才团队专项 (202304051001042); 山西省重点研发计划项目 (202102140601010)

作者简介: 谢钧宇, 博士, 副教授, 研究方向为高效施肥与土壤质量提升。

Email: xjy890621@163.com

*通信作者: 徐明岗, 博士, 研究员, 中国工程院院士, 研究方向为土壤环境化学及区域治理与农业可持续发展。Email: xuminggang@sxau.edu.cn

在 0~20 cm 土层，土壤有机质对玉米产量的贡献高达 37.6%。胡诚等^[9]基于 7 a 定位试验平台，认为长期施用生物有机肥后，土壤脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶活性均有所增强，为提高土壤肥力发挥着积极的作用，进而促进了小麦产量。可见，施肥显著影响着土壤养分状况、物理结构及生物学性质，这三者又间接作用于作物产量。然而以上研究主要是针对农田土壤进行的，矿区复垦土壤多为底层土或更下层的心土，与农田土壤相比，其土壤肥力低下、有机质和氮素含量低、物理结构差、微生物活性弱。以往就长期施肥对复垦土壤肥力、物理结构、微生物学特性及玉米产量的影响已有报道^[4, 10-12]，但是驱动作物产量变化的关键土壤因素及主要措施尚不明确。

因此，本研究基于 7 a 复垦定位肥料试验，分析长期不同施肥对玉米连作体系下复垦土壤肥力变化和玉米产量的影响，探明驱动玉米产量提高的关键土壤因素，以期复垦区域土壤培肥和质量提升提供理论依据，进而保障作物稳产高产。

1 材料与方法

1.1 复垦区概况

山西省古交市屯兰矿煤矸石排放区（37°53'15"N，112°6'42"E）从 2002 年开始排矸于天然沟壑内，由于长期煤矸石堆积，该区自然植被已经破坏殆尽，仅有少量稀疏分布自然定居植物种类，矸石山周围为荒山、荒坡，废弃的农田景观。2012 年停止排矸后在排矸场附近就近取土进行了复垦。自然恢复 2 a，2014 年复垦为农田，开始布置试验，2020 年为复垦第 7 年。土壤类型为新成土，母质为黄土，耕层土壤质地为粉砂壤土（砂粒 30%，粉粒 55%，黏粒 15%），气候属北温带大陆性气候，降水集中于 7—8 月，全年日照数约 2 808 h，年均气温为 9.5℃，近 10 年平均降雨量为 460 mm，无霜期平均为 202 d，供试土壤为石灰性褐土。2014 年试验区 0~20 cm 土层土壤含有机质 7.05 g/kg，全氮 0.34 g/kg，全磷 0.28 g/kg，有效磷 3.03 mg/kg，全钾 14.42 g/kg，速效钾 102.17 mg/kg，pH 值为 8.46（水土比为 1:2.5）。

1.2 试验设计

试验设计 4 个处理：对照（不施肥，CK），氮磷钾平衡施肥（NPK），单施有机肥（M），有机肥配施无机肥（MNPK），每个处理重复 3 次，采用随机区组排列，每个小区 12.5 m²（5 m×2.5 m）。无机肥为含 N 46% 的尿素、含 P₂O₅ 12% 的过磷酸钙和含 K₂O 50% 的硫酸钾；有机肥为完全腐熟的鸡粪（养分含量见表 1）。

表 1 供试有机肥所含养分含量

Table 1 Nutrient content of tested organic fertilizers

指标 Index	值 Value
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	29.43
全氮 Total nitrogen/(g·kg ⁻¹)	0.84
P ₂ O ₅ /%	0.54
K ₂ O/%	1.56
Fe/(mg·kg ⁻¹)	2 209.47
Mn/(mg·kg ⁻¹)	99.40
Cu/(mg·kg ⁻¹)	19.52
Zn/(mg·kg ⁻¹)	96.80

NPK 处理：施肥量采用当地推荐用量^[13]，氮、磷和钾投入量分为 190 kg/hm²（以 N 计，下同）、75 kg/hm²（以 P₂O₅ 计，下同）和 100 kg/hm²（以 K₂O 计，下同）。

M 和 MNPK 处理：依据等氮量投入原则，参考 NPK 处理施氮量（190 kg/hm²），结合有机肥全氮含量（0.84 g/kg），制定 M 和 MNPK 的有机肥和化肥用量，其中 M 处理的氮、磷和钾全部由有机肥提供，有机肥用量为 22 500 kg/hm²；MNPK 处理的氮由有机肥和化肥各提供 50%，其有机肥用量为 11 250 kg/hm²，化肥氮用量为 95 kg/hm²，由化肥提供的磷和钾与 NPK 处理一致。

供试作物为春玉米（先玉 335），生育期为 150 d，种植密度为 1.44 万株/hm²，株距×行距为 40 cm×40 cm；每年 5 月初播种，10 月初收获。玉米生育期内不进行灌溉。采用旋耕机在播种前一次性将所有肥料以撒播方式施入。

1.3 样品采集与分析

为避免破坏土壤结构，本研究原状土壤样品在玉米收获前采集，时间为 2020 年 10 月 3 日，待玉米收获后，利用土钻采集混合样品，供后续分析土壤养分和酶活性使用。具体采样及土壤样品处理方法参考曹寒冰等^[4]。同时在每个小区随机采取 5 株植物样用于测定作物产量。

参考文献 [14] 的湿筛法分析水稳性团聚体和粉黏粒组分。

有机质、全氮、有效磷、速效钾和有效铁、锰、铜、锌参考《土壤农化分析》进行测定^[15]，蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶参考《土壤酶及其分析方法》进行测定^[16]。

经济效益=玉米籽粒产量收益—肥料支出，其中玉米籽粒产量收益为玉米籽粒产量（kg/hm²）与当年玉米市场价格（元/kg）的乘积，肥料支出为氮肥、磷肥、钾肥和有机肥的支出，以氮肥支出为例，氮肥支出为施氮量（kg/hm²，以 N 计）与当年氮肥市场价格（元/kg）的乘积。玉米、氮磷钾肥和有机肥的平均价格分别为 1.69、6.00、8.00、8.00 和 1.30 元/kg。

1.4 土壤肥力评价方法

运用 SPSS 26.0 软件中的因子分析法将土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、有效铁、有效锰、有效铜、有效锌、团聚体及粉黏粒组分分布比例及其碳氮含量、蔗糖酶、β-葡萄糖苷酶、脲酶、碱性磷酸酶及过氧化氢酶 25 个土壤指标进行 KMO 和 Bartlett 球形度检验，若达显著水平（P<0.05），可继续利用主成分分析法评价该复垦土壤肥力；否则，主成分分析法不适合评价该复垦土壤肥力。

主成分分析法：首先，利用 SPSS 26.0 软件中得矩阵的特征值、贡献率和累积贡献率。根据特征值≥1 的原则，提取主成分个数；然后，运用 SPSS 26.0 软件对 25 个土壤指标的原始数据进行标准化，根据主成分得分系数矩阵求得各个主成分的综合得分。第 i 个主成分的综合得分 F_i 的线性表达式为

$$F_i = \sum (a \cdot Z_b) (b = 1, \dots, 25) \quad (1)$$

式中 a 为主成分得分系数；Z_b 为标准化后的数值。

各处理下土壤肥力综合指数 I 计算式为

$$I = \lambda_1 F_1 + \lambda_2 F_2 + \cdots + \lambda_m F_m \quad (2)$$

式中 λ 为贡献率; m 为提取的主成分个数。 I 值越高表示土壤肥力越高; 反之, 则表示土壤肥力越低。

1.5 统计方法

所有数据运用 Excel 2010 进行整理, SPSS 26.0 软件进行方差分析, 通过 LSD 法进行多重比较 ($P < 0.05$), Canoco 5 进行冗余分析, Origin 2022 完成作图。

2 结果与分析

2.1 玉米籽粒产量和经济效益对施肥的响应

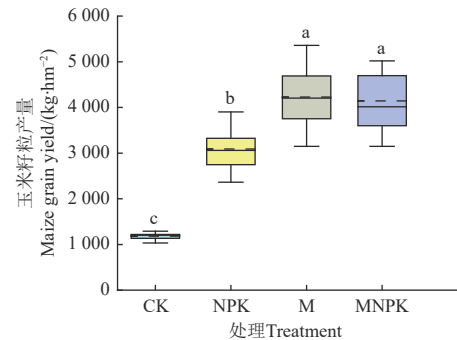
连续 7 a 不同施肥对玉米籽粒产量产生了显著的影响 (图 1), 各处理下玉米籽粒产量为 1 180.31~4 226.20 kg/hm²。NPK、M 和 MNPK 处理较 CK 处理均显著提高了玉米籽粒产量 ($P < 0.05$), 增幅分别为 161.79%、258.06% 和 250.90%, 且以 M 和 MNPK 处理的提升效果最佳。

产量收益表现为以 CK 处理最低, M 处理最高 (表 2)。同 CK 处理相比, NPK、M 和 MNPK 处理均显著提高了产量收益, 增幅分别为 161.79%、258.06% 和 250.89%。经济效益表现为以 NPK 处理最高, M 处理最低。同 CK 处理相比, NPK 处理显著提高了经济效益, 提高了 14.53%, 而 M 和 MNPK 处理均显著降低了经济效益, 降幅达 533.93%~1 208.31%。

2.2 土壤基本化学性质对施肥的响应

长期不同施肥对土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量均产生了显著的影响 (图 2)。同 CK 处理相比, 施化肥 (NPK) 对土壤基本化学性质的各指标无显著影

响, 而施有机肥 (M 和 MNPK) 均显著提高了土壤有机质、全氮、有效磷和速效钾含量 (除 M 处理下的有效磷含量外), 增幅分别为 21.50%~65.26%、12.50%~30.00%、38.81% 和 98.37%~118.55%。



注: CK 表示不施肥对照; NPK 表示氮磷钾平衡施肥; M 表示单施有机肥; MNPK 表示有机肥配施无机肥料。不同小写字母表示处理间差异达 5% 显著水平。下同。

Note: CK means control; NPK means application of nitrogen, phosphorous and potassium fertilizers; M means application of manure alone; MNPK means application of manure combined with chemical fertilizers. Different uppercase letters mean significant differences between treatments at the 5% probability level. Same as below.

图 1 2014—2020 年作物产量对各施肥处理的响应

Fig.1 Response of crop yields to various fertilizer treatments from 2014 to 2020

表 2 不同施肥处理下收获后玉米经济效益

Table 2 Economic benefits at harvest of maize under various fertilizer treatments 元·hm⁻²

处理 Treatment	产量收益 Yield benefits	肥料支出 Fertilizer spending	经济效益 Economic benefits
CK	1 994.73 d	0	1 994.73 b
NPK	5 221.91 c	2 937.27	2 284.64 a
M	7 142.27 a	29 250.00	-22 107.73 d
MNPK	6 999.39 b	15 655.18	-8 655.79 c

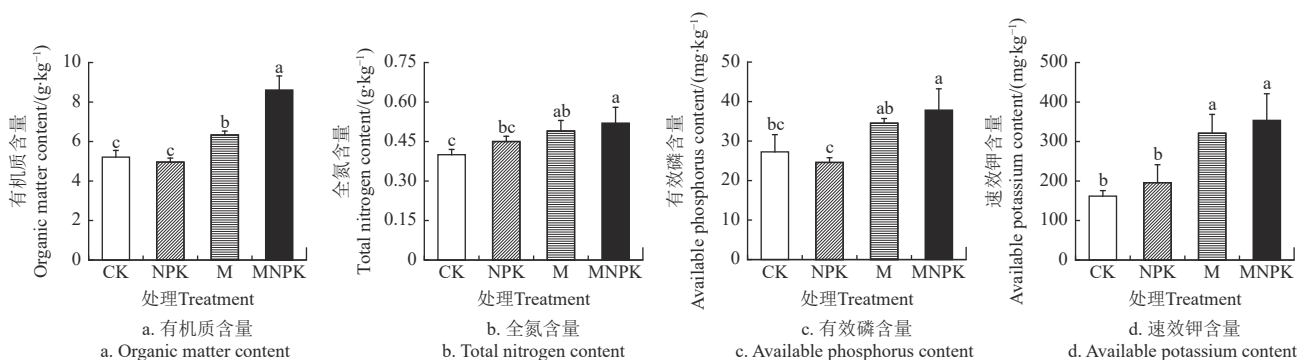


图 2 土壤基本化学性质对各施肥处理的响应

Fig.2 Response of soil basic chemical properties to various fertilizer treatments

2.3 土壤有效态微量元素对施肥的影响

各施肥处理在一定程度上影响了土壤有效锰、有效铜和有效锌含量, 但对有效铁含量无显著影响 (图 3)。同 CK 处理相比, NPK 处理对有效铁、有效锰、有效铜和有效锌含量均无显著影响 ($P > 0.05$), M 处理显著提高了有效锰含量, 增幅达 20.19%, MNPK 处理显著降低了土壤有效铜和有效锌含量, 降幅分别为 16.67% 和 16.46%。

2.4 土壤团聚体及粉黏粒组分对施肥的响应

2.4.1 土壤团聚体及粉黏粒组分分布比例

由表 3 可知, 长期不同施肥后团聚体主要分布在 > 2 mm 和 $0.25 \sim 2$ mm 粒径中, 约为微团聚体和粉黏粒组分的 2 倍。同 CK 处理相比, 施化肥 (NPK) 并没有影响各粒径分布, 但是施有机肥 (M 和 MNPK) 均显著降低了 $0.25 \sim 2$ mm 团聚体比例, 分别降低了 22.45% 和

31.26%，但是显著提高了<0.053 mm 粉黏粒组分分布比

例，增幅分别为 39.64% 和 36.68%。

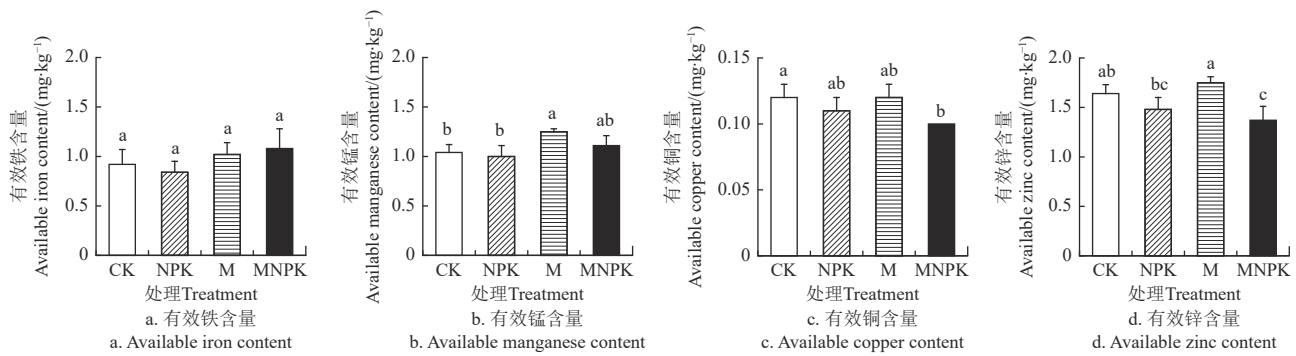


图 3 土壤有效态微量元素含量对各施肥处理的响应

Fig.3 Response of soil available trace elements contents to various fertilizer treatments

表 3 复垦土壤水稳性团聚体及粉黏粒组分分布

Table 3 Distribution of water-stable aggregates and silt clay fractions in the reclaimed soil

处理 Treatment	粒径分布 Particle size distribution/%			
	> 2 mm	0.25~2 mm	0.053~<0.25 mm	< 0.053 mm
CK	32.73±3.80 aA	37.24±1.23 aA	15.50±1.71 aB	14.53±0.88 bB
NPK	37.34±3.89 aA	33.26±1.88 abA	14.75±1.68 aB	14.65±0.39 bB
M	33.46±5.91 abA	28.88±1.75 bcAB	17.36±2.88 aC	20.29±3.54 aBC
MNPK	38.51±8.43 aA	25.60±4.74 cAB	16.02±3.18 aB	19.86±2.81 aB

注：不同大写字母表示同一处理不同粒径间差异显著 ($P < 0.05$)。
Note: Different uppercase letters mean significant differences between different aggregate size fractions in the same treatment ($P < 0.05$).

2.4.2 土壤团聚体及粉黏粒组分中有机碳和全氮含量

施有机肥明显提高了土壤团聚体及粉黏粒组分中有机碳及全氮含量，而施化肥对其中的有机碳及全氮含量无影响。所有施肥处理均较 CK 对微团聚体及粉黏粒组

分中的有机碳及全氮含量无影响（除了 MNPK 处理下<0.053 mm 组分）（图 4）。

同 CK 处理相比，NPK 及 M 处理均不影响团聚体及粉黏粒组分中有机碳含量，但 MNPK 处理显著提高了>2 mm 和 0.25~2 mm 团聚体中有机碳含量，分别提高了 68.68% 和 57.07%（图 4a）。施有机肥（M 和 MNPK）总体提高了大团聚体中全氮含量，增幅分别为 400.00%~471.43% (>2 mm) 和 145.45%~144.44% (0.25~2 mm)。

2.5 与土壤碳循环相关的酶活性对施肥的响应

长期施肥显著影响了土壤蔗糖酶活性、β-葡萄糖苷酶活性、脲酶活性和碱性磷酸酶活性，但是对过氧化氢酶活性无显著影响（图 5）。

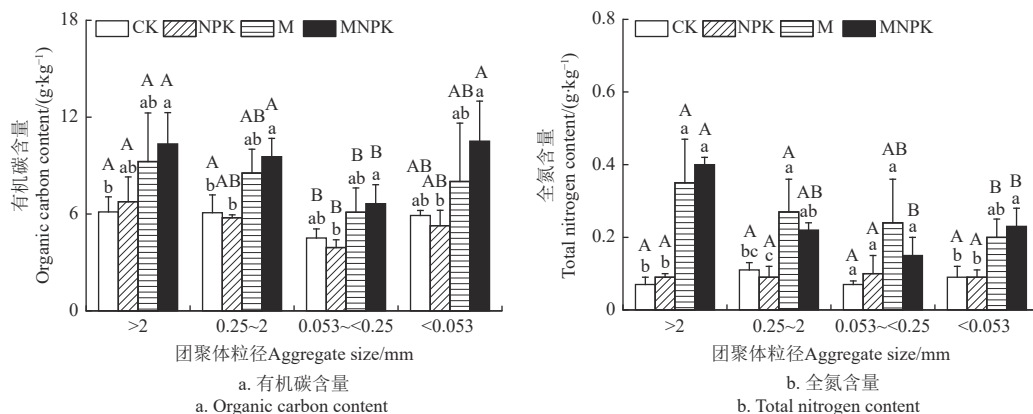


图 4 不同处理复垦土壤团聚体及粉黏粒中有机碳和全氮含量

Fig.4 Organic carbon and total nitrogen content within soil aggregates and silt and clay fractions in the reclaimed soil for different treatments

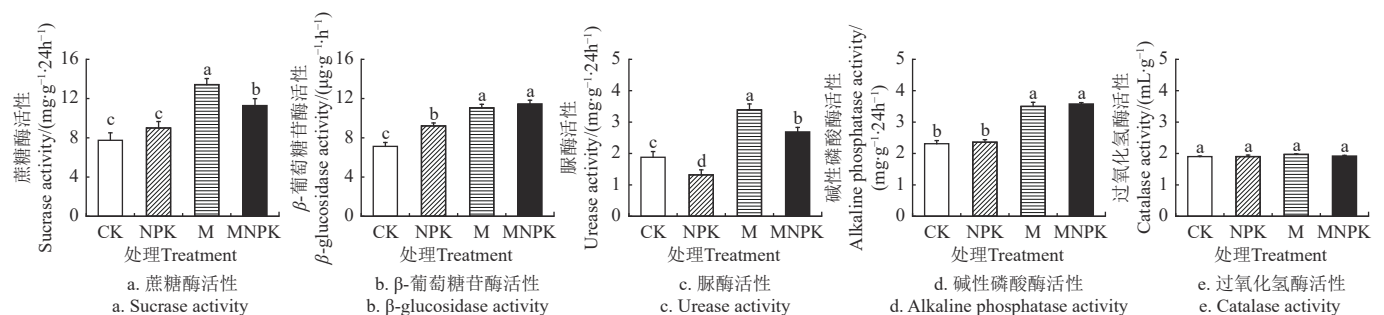


图 5 与土壤碳循环相关的酶活性对施肥的响应

Fig.5 Responses of soil enzyme activities related to C recycling to various fertilizer treatments

同 CK 处理相比，NPK 处理显著提高了 β-葡萄糖苷酶活性，增幅为 29.17%，但是显著降低了脲酶活性，降

幅为 29.79%，M 和 MNPK 处理使蔗糖酶显著提高 45.87%~73.39%，使 β -葡萄糖苷酶提高 54.98%~60.73%、使脲酶和碱性磷酸酶活性分别增加 43.09%~80.32% 和 51.52%~54.97%。

2.6 复垦土壤肥力综合评价

将土壤有机质、全氮、有效磷、速效钾、有效铁锰铜锌、团聚体及粉黏粒组分分布比例及其碳氮含量、蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、磷酸酶和过氧化氢酶这 25 各指标用 SPSS26.0 软件中的因子分析，经 KMO 和 Bartlett 球形度检验，KMO 值为 0.59，Bartlett 球形度检验的相伴概率 $P<0.01$ ，因此，采用主成分分析法对该复垦土壤肥力进行综合评价。由表 4 可知，3 个主成分的方差贡献率分别为 75.68%、19.96% 和 4.37%，累积方差贡献率达 100%。进一步评价因子载荷与得分系数的关系（表 5），发现各主成分分析中土壤肥力因子的权重有所不同；因子载荷数据表明，第一主成分，除了 $>2\text{ mm}$ 团聚体分布比例，其他指标均有较大的正值， $0.25\sim2\text{ mm}$ 团聚体分布比例有较大的负值；第二主成分，有效铜、有效锌、 $0.053\sim0.25\text{ mm}$ 团聚体分布比例和过氧化氢酶有较大的正值， $>2\text{ mm}$ 团聚体分布比例有较大的负值；第三主成分既没有较大的正值，也没有较大的负值。由表 6 可看出，M 处理下的土壤质量综合得分最高，其值为 0.83，可见，在现有的研究条件下，单施有机肥处理是该区域最佳的农田管理措施。

表 4 主成分特征向量及累积贡献率

Table 4 Principal component feature vectors and cumulative contribution rates

主成分 Component	特征值 Eigenvalue	贡献率 Contribution rate/%	累积贡献率 Cumulative rate/%
1	18.92	75.68	75.68
2	4.99	19.96	95.64
3	1.09	4.37	100

表 5 初始因子载荷与成分得分系数

Table 5 The initial factor loading and component score coefficient

指标 Index	因子载荷 Component			得分系数 Component score coefficient		
	1	2	3	1	2	3
有机质	0.85	-0.45	0.28	0.05	-0.09	0.26
全氮	0.91	-0.32	-0.26	0.05	-0.06	-0.24
有效磷	0.96	-0.09	0.26	0.05	-0.02	0.24
速效钾	0.99	-0.14	-0.07	0.05	-0.03	-0.07
有效铁	0.92	-0.05	0.38	0.05	-0.01	0.35
有效锰	0.81	0.58	-0.05	0.04	0.12	-0.05
有效铜	-0.35	0.93	0.06	-0.02	0.19	0.06
有效锌	-0.05	1.00	0.01	-0.00	0.20	0.01
团聚体 (A1)	0.25	-0.91	-0.33	0.01	-0.18	-0.30
团聚体 (A2)	-0.93	0.32	0.19	-0.05	0.06	0.17
团聚体 (A3)	0.79	0.61	0.08	0.04	0.12	0.07
团聚体 (A4)	1.00	1.00	-0.03	0.05	0.02	-0.02
有机碳 (A1)	0.98	-0.20	-0.02	0.05	-0.04	-0.02
有机碳 (A2)	0.98	-0.13	0.16	0.05	-0.03	0.15
有机碳 (A3)	0.97	-0.03	0.25	0.05	-0.01	0.23
有机碳 (A4)	0.91	-0.31	0.27	0.05	-0.06	0.25
全氮 (A1)	1.00	-0.08	0.01	0.05	-0.02	0.01
全氮 (A2)	0.95	0.31	0.01	0.05	0.06	0.01
全氮 (A3)	0.84	0.44	-0.33	0.04	0.09	-0.31
全氮 (A4)	0.99	-0.10	0.07	0.05	-0.02	0.07
蔗糖酶	0.91	0.29	-0.31	0.05	0.06	-0.29
β -葡萄糖苷酶	0.92	-0.19	-0.36	0.05	-0.04	-0.33
脲酶	0.89	0.44	0.12	0.05	0.09	0.11
碱性磷酸酶	1.00	-0.00	0.00	0.05	0.00	0.00
过氧化氢酶	0.76	0.61	-0.23	0.04	0.12	-0.21

注：A1—A4 分别表示 >2 、 $0.25\sim2\text{ mm}$ 、 $0.053\sim<0.25$ 、 $<0.053\text{ mm}$ 。

Note: A1-A4 mean >2 , $0.25\sim2$, $0.053\sim<0.25$ and $<0.053\text{ mm}$.

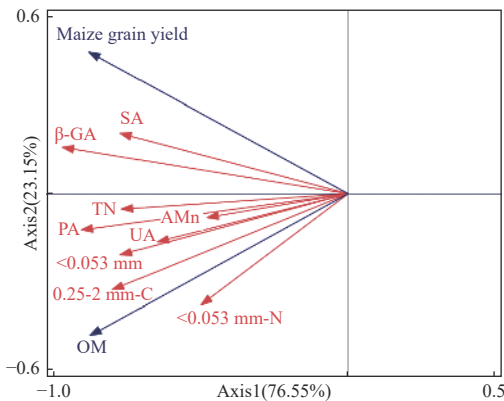
表 6 各处理对应的土壤肥力综合指数

Table 6 The integrated index of soil fertility corresponding to each treatment

处理 Treatment	主成分得分 Principal component scores			土壤肥力综合指数 Integrated fertility index (I)
	F1	F2	F3	
CK	-0.90	0.42	1.12	-0.55
NPK	-0.83	-0.51	-1.14	-0.78
M	0.81	1.18	-0.46	0.83
MNPK	0.92	-1.08	0.48	0.50

2.7 土壤性质与作物产量和土壤有机质含量的关系

将玉米籽粒产量和土壤有机质含量作为响应变量，与作为解释变量的土壤全氮（TN）、土壤有效锰、 $<0.053\text{ mm}$ 组分分布比例、 $0.25\sim2\text{ mm}$ 团聚体中有机碳含量、 $<0.053\text{ mm}$ 组分中全氮含量、 β -葡萄糖苷酶、蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶共 9 个反映土壤理化性质的指标进行了冗余分析（Redundancy Analysis, RDA）。结果表明（图 6），第一轴解释了 76.55% 的玉米籽粒产量和土壤有机质含量变化，第二轴解释了 23.15%，即前两轴累积解释率为 99.70%，说明前两轴能够较好地反映土壤理化性质与玉米籽粒产量和土壤有机质含量之间的响应关系。



注：图中只体现了部分土壤指标，其余指标由于 P 值较大而被剔除，Maize grain yield 表示玉米籽粒产量，TN 表示土壤全氮，OM 表示有机质，AMn 表示土壤有效锰， $0.25\sim2\text{ mm-C}$ 表示该团聚体中有机碳含量， $<0.053\text{ mm-N}$ 表示该组分中全氮含量，SA 表示蔗糖酶活性， β -GA 表示 β -葡萄糖苷酶活性，UA 表示脲酶活性，PA 表示碱性磷酸酶活性。下同。

Note: Only part of the soil indexes in this study are shown in the figure, and the rest indexes are removed due to their large P values. TN represents soil total nitrogen, OM represents organic matter, AMn represents soil available manganese, $0.25\sim2\text{ mm-C}$ represents organic carbon content in the aggregate, $<0.053\text{ mm-N}$ represents total nitrogen content in this fraction, SA represents sucrose activity, β -GA represents β -glucoside activity, and UA represents urease activity, PA represents alkaline phosphatase activity. Same as below.

图 6 土壤性质与作物产量和土壤有机质含量的关系

Fig.6 The relationship between soil properties and crop yield and soil organic matter content

在土壤理化性质与玉米籽粒产量和土壤有机质含量的 RDA 二维排序图中（图 6），土壤各理化性质与玉米籽粒产量和土壤有机质含量均呈正相关。

进一步分析土壤各理化性质对玉米籽粒产量和土壤有机质含量的解释率（表 7）发现， β -葡萄糖苷酶能够解释 72.20% 玉米籽粒产量和土壤有机质含量的变化，并且其单独贡献率可达 72.40%。土壤各理化性质的指标中，仅 β -葡萄糖苷酶、脲酶和土壤有效锰对玉米籽粒产量和

土壤有机质含量的解释率达到了显著水平 ($P < 0.05$)，说明 β -葡萄糖苷酶是影响该复垦区玉米籽粒产量和土壤有机质含量的主要因子。

表 7 RDA 分析中土壤指标对作物产量和土壤有机质含量的解释率和贡献率

土壤指标 Soil index	解释率 Explanatory rate/%	贡献率 Contribution rate/%	P 值 P value
β -GA	72.20	72.40	<0.01
0.25~2 mm-C	11.70	11.70	0.05
SA	4.40	4.40	0.10
UA	4.80	4.90	0.03
< 0.053 mm	1.90	1.90	0.15
AMn	3.50	3.50	0.01
TN	0.60	0.60	0.15
< 0.053 mm-N	0.60	0.60	0.06
PA	< 0.10	< 0.10	0.61

3 讨 论

3.1 长期施肥对作物产量的影响

土壤生产力的最终体现是作物产量，可以用来评价土壤肥力^[4]。本研究结果表明，连续 7 a 无论施化肥还是有机肥均较不施肥 (CK) 显著提高了复垦区玉米籽粒产量，以单施有机肥 (M) 和有机无机肥配施 (MNPK) 效果最佳 (图 1)。MUSTAFA 等^[17]也研究发现，连续 28 a 培肥土壤显著提高了玉米籽粒产量。施肥之所以提高了作物产量是因为施肥尤其是施用有机肥提高了必需营养元素的有效含量^[18-19]。另一方面，有机肥的投入可以提高土壤肥力 (图 2 和图 4)，为作物生长提供足够的养分，并且促进了作物对养分的吸收，最终提高了作物产量^[20]。

3.2 长期施肥对土壤化学性质的影响

土壤有机质是衡量土壤肥力的重要指标，在土壤结构形成、植物营养改善和土壤肥力的提升等方面至关重要^[21]。土壤氮、磷、钾养分含量作为评价土壤肥力的关键指标，其形态和有效性决定了养分能否直接被作物根系所吸收，是农业可持续发展的依据^[22]。本研究结果表明，施有机肥 (M 和 MNPK) 均较 CK 显著提高了土壤有机质 (图 2a)、全氮 (图 2b) 和速效钾 (图 2d) 含量，而且 MNPK 还显著提高了有效磷含量 (图 2c)。这与多数研究结果一致。WANG 等^[23]发现，连续 20 a 单施有机肥和有机无机肥配施后，红壤有机质含量提高了 68.25%~118.25%。LI 等^[24]和 ZHANG 等^[25]依托长期试验基地，发现施有机肥 (M 和 MNPK) 分别显著提高了和红壤和钙质灰漠土有机质、全氮和有效磷和速效钾含量。不难理解，有机肥的投入不仅直接向土壤输入了碳、氮、磷、钾元素，同时其所富含的有机物通过微生物分解作用也可间接增加其含量^[26]。另一方面，外源有机肥料的施入改善了土壤理化性状，为玉米生长提供了足够的养分，并增加了玉米根系残体的还田量^[27]，进而促进土壤养分含量的增加。

土壤有效态微量元素含量的高低直接影响作物的吸

收，常用于表征土壤微量元素有效性的高低^[28]。本研究结果表明，同 CK 处理相比，M 处理显著提高了有效锰含量 (图 3b)，MNPK 处理显著降低了有效铜 (图 3c) 和有效锌 (图 3d) 含量。这与丁少男等^[29]在黄绵土上的研究结果相似，连续 15 a 单施有机肥显著提高了土壤有效锰含量。这可能是因为有机肥施入土壤后，经过一段时间的腐解，在此过程中氧化锰被还原，进而增加土壤有效锰含量^[30]。然而，与本研究施肥对有效铜和有效锌含量的影响结果相反。李本银等^[31]认为，连续 17 a 有机无机肥配施显著提高了红壤有效铜和有效锌含量。QASWAR 等^[18]报道 34 a 有机无机肥配施显著提高了水稻土有效铜和有效锌含量。造成研究结果之间的差异可能与种植作物和供试粪肥有关，有研究报道，玉米对铜锌的富集能力高于水稻^[32]，鸡粪本身含有的铜锌含量明显少于猪粪^[33]，因此本研究有机无机肥配施显著降低了有效铜和有效锌含量。

3.3 长期施肥对土壤团聚体及粉黏粒组分分布及其碳氮含量的影响

土壤团聚体是土壤结构的重要组成部分，其粒径大小及分布比例是反映土壤结构优劣的关键指标，可表征不同管理措施下土壤质量的变化特征^[14]。本研究结果表明，施有机肥 (M 和 MNPK) 较 CK 均显著减少了大团聚体 (0.25~2 mm) 的分布比例，但是显著提高了粉黏粒组分 (< 0.053 mm) 的分布比例 (表 3)。这与冷延慧等^[34-35]的研究结果一致。有机无机肥配施显著降低了棕壤和荒漠土大团聚体 (> 2 mm) 的分布比例。然而，毛霞丽等^[36]依托 17a 长期定位试验发现，施有机肥 (M 和 MNPK) 显著提高了水稻土 > 0.25 mm 大团聚体的数量。研究结果间之所以存在差异一方面是因为复垦土壤处于初期构建阶段，结构差、肥力低，土壤中胶结物质的含量明显低于连续多年培肥的农田土壤，不利于大团聚体的形成；而且有机肥中含有大量的钾离子和钠离子等一价分散离子，不利于土壤大团聚体的形成^[34]；另一方面是因为作物种植体系不同，毛霞丽等^[36]试验所在区域的种植制度为稻麦轮作 (一年两熟制)，而本试验的种植制度为玉米连作，研究报道作物连作体系下，植物根系分泌物种类较少，土壤微生物多样性丰富度也明显少于作物轮作体系^[37]。

土壤团聚体是赋存土壤养分的重要场所，表土中近 90% 的土壤有机碳、全氮贮存于团聚体中，团聚体的团聚作用对农业生产具有现实意义^[38]。本研究结果表明，同 CK 处理相比，有机无机肥配施 (MNPK) 较 CK 显著提高了大团聚体中有机碳和全氮含量 (图 4)。这与人^[4,10-11,39]的研究结果一致，施有机肥显著提高了 > 2 mm 大团聚体中有机碳和全氮含量。此外，还有研究显示，长期单施有机肥或有机无机肥配施促进了有机碳向 > 0.25 mm 团聚体中的富集^[40]。分析其原因主要有 2 个方面，一方面是因为施加有机肥提高了土壤有机质 (图 2a) 和全氮含量 (图 2b)，有利于复垦土壤肥力形成，进而提高了玉米产量 (图 1)，促进了根际沉析^[38]；另一方

面, 外源有机肥料的投入为微生物的生存提供了充足的能源和养分, 从而提升了土壤微生物的数量和代谢活性, 本课题组前期研究结果也显示增施有机肥显著提高了复垦土壤微生物群落的丰富度和功能多样性^[12]从而增强了微生物固存土壤全氮的能力。

此外, 施肥并没有影响微团聚体和粉黏粒组分中有有机碳和全氮含量 (除 MNPK 处理下 < 0.053 mm 组分中全氮含量) (图 4), 说明这 2 个粒径的碳库最先接近或已达到饱和水平。KOOL 等^[41]也曾认为土壤各粒径团聚体中有有机碳含量并不会一直随着外源碳投入量的增加而继续增加, 较细的小粒径团聚体先于大团聚体饱和。而且本研究所区域的土壤有机碳库先于土壤氮库饱和。这可能是由于作物对氮素的吸收利用造成的^[42]。

3.4 长期施肥对与土壤碳循环相关的酶活性的影响

蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶、碱性磷酸酶和过氧化氢酶积极参与土壤碳、氮、磷养分循环, 其活性强弱是评价土壤肥力的重要指标, 对施肥的响应极为敏感^[43]。本研究中, NPK 处理仅显著提高了 β -葡萄糖苷酶活性, 而 M 和 MNPK 处理显著提高了蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶、脲酶和碱性磷酸酶活性 (图 5)。与多数研究结果一致, 谢钧宇等^[11,44]报道, 长期施有机肥 (M 和 MNPK) 分别显著提高了红壤和褐土蔗糖酶、 β -葡萄糖苷酶和脲酶活性。JIAO 等^[45]研究发现, 连续 20 a 单施有机肥和有机无机肥配施显著提高了黑土蔗糖酶、脲酶和碱性磷酸酶活性。本研究中施化肥之所以能够提高 β -葡萄糖苷酶活性可能是因为该处理中土壤氮磷钾养分均衡, 为玉米整个生育期的生长提供了足够的营养, 由此也增加了玉米根系生物量^[46]。施有机肥显著提高了土壤酶活性一方面是因为有机肥本身作为一种碳源, 为微生物提供了充足的能量物质, 保障了其生长, 而且活菌群中内源性酶含量的增加也会提高土壤酶活性^[45]; 另一方面是因为玉米根系在土壤中的残留使土壤含有更多的有机化合物, 因此提高了土壤酶活性^[47]。

此外, 土壤各性质与作物产量和土壤有机质含量的冗余分析结果表明 (表 7), β -葡萄糖苷酶对玉米籽粒产量和土壤有机质含量的贡献率最大, 其单独贡献率可达 72.40%。进一步通过分析其二维排序图 (图 6) 发现 β -葡萄糖苷酶对玉米籽粒产量的贡献率要大于对土壤有机质含量的贡献率。因此, β -葡萄糖苷酶是提高玉米籽粒产量的关键驱动因子。 β -葡萄糖苷酶的水解产物是糖类物质, 是土壤微生物生存的主要能量来源, 它的活性强弱直接影响着土壤有机碳及其复合物的分解程度^[48]。增施有机肥通过提高土壤有机质含量 (图 2), 激发 β -葡萄糖苷酶活性, 进而促进了土壤微生物和作物根系对碳氮磷的利用, 同时增加了土壤养分含量 (图 2), 最终提高了作物产量 (图 1)^[49-50]。作物产量在一定范围内能够较好地反映土壤肥力的高低, 而土壤肥力不仅是土壤质量的核心, 也是众多土壤要素综合作用的结果, 还是影响农田土壤生产力的主要因素^[51]。从 I 值的变化趋势来看 (表 6), 单施有机肥处理对应的 I 值最高

(0.83), 如果仅从土壤肥力的角度来考虑, 在当前的农业生产条件下, 单施有机肥更有利于提高复垦土壤质量。但分析各处理的经济效益发现, 该处理的经济效益是最低的 (表 2), 这意味着持续大量的有机肥投入仍不能保证产量效益与经济效益持平。说明复垦土壤养分非常贫瘠, 未来仍需持续投入肥料, 尤其是有机肥, 来恢复土壤肥力。关于本研究中复垦土壤有机碳的饱和点, 还有待于进一步的研究。综上, 单施有机肥通过恢复土壤养分含量, 增加团聚体中有有机碳及全氮含量, 增强 β -葡萄糖苷酶活性, 进而提高复垦土壤生产力和作物产量, 是该复垦区域农业生产和耕地质量提升较为合理的农田管理措施。

4 结 论

开展复垦土壤长期施有机肥和化肥提高玉米产量的驱动因子研究, 分析不同施肥处理对作物产量、土壤化学、物理和生物性质的影响, 主要结论如下:

1) 连续 7 a 单施有机肥和有机无机肥配施较不施肥显著增加了复垦土壤养分含量、团聚体中有有机碳和全氮含量及与土壤碳循环相关的酶活性, 进而提高了玉米籽粒产量。

2) 通过主成分分析以及土壤肥力综合指数评价表明, 在现有的条件下, 单施有机肥是该复垦区域耕地质量提升和维持土地生产力较好的农田管理措施。 β -葡萄糖苷酶是评价土壤肥力的关键指标, 其贡献率高达 72.40%。因此, 单施有机肥主要通过增强 β -葡萄糖苷酶活性进而促进复垦土壤肥力的形成, 最终提高了作物产量。

[参 考 文 献]

- [1] 郭斌, 白昊睿, 张波. 2022. 基于 RF 和连续小波变换的露天煤矿土壤锌含量高光谱遥感反演[J]. 农业工程学报, 2022, 38(10): 138-147
GUO Bin, BAI Haorui, ZHANG Bo, et al. Inversion of soil zinc contents using hyperspectral remote sensing based on random forest and continuous wavelet transform in an opencast coal mine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(10): 138-147. (in Chinese with English abstract)
- [2] 陈玮, 徐占军, 郭琦. 煤炭矿区耕地土壤有机质无人机高光谱遥感估测[J]. 农业工程学报, 2022, 38(8): 98-106
CHEN Wei, XU Zhanjun, GUO Qi. Estimation of soil organic matter by UAV hyperspectral remote sensing in coal mining areas[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2022, 38(8): 98-106. (in Chinese with English abstract)
- [3] 李大明, 柳开楼, 叶会财, 等. 长期不同施肥处理红壤旱地剖面养分分布差异[J]. 植物营养与肥料学报, 2018, 24(3): 633-640.
LI Daming, LIU Kailou, YE Huicai, et al. Difference of

- nutrient distribution in red soil profile under different fertilization treatments over a long period of time[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Journal*, 2018, 24(3): 633-640. (in Chinese with English abstract)
- [4] 曹寒冰, 谢钧宇, 强久次仁, 等. 施肥措施对复垦土壤团聚体碳氮含量和作物产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(18): 135-143.
- CAO Hanbing, XIE Junyu, QIANGJIU Ciren, et al. Effects of fertilization measures on soil aggregate carbon and nitrogen content and crop yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2020, 36(18): 135-143. (in Chinese with English abstract)
- [5] CHEN X L, HENRIKSEN T M, SVENSSON K, et al. Long-term effects of agricultural production systems on structure and function of the soil microbial community[J]. *Applied Soil Ecology*, 2020, 147: 103387.
- [6] HU C, XIA X G, CHEN Y F, et al. Yield, nitrogen use efficiency and balance response to thirty-five years of fertilization in paddy riceupland wheat cropping system[J]. *Plant, Soil and Environment*, 2019, 65(2): 55-62.
- [7] 杨小东, 曾希柏, 文炯, 等. 猪粪施用量对红壤旱地理化性质及酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2020, 57(3): 739-749.
- YANG Xiaodong, ZENG Xibo, WEN Jiong, et al. Effects of pig manure application on physicochemical properties and enzyme activities of red soil dryland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(3): 739-749. (in Chinese with English abstract)
- [8] 邹文秀, 邱琛, 韩晓增, 等. 长期施用有机肥对黑土土壤肥力和玉米产量的影响[J]. *土壤与作物*, 2020, 9(4): 407-418.
- ZOU Wenxiu, QIU Chen, HAN Xiaozeng, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on soil fertility and maize yield in black soil[J]. *Soil and Crop*, 2020, 9(4): 407-418. (in Chinese with English abstract)
- [9] 胡诚, 刘东海, 乔艳, 等. 施用生物有机肥对土壤酶活性及作物产量的影响[J]. *华北农学报*, 2017, 32(增刊 1): 308-312.
- HU Cheng, LIU Donghai, QIAO Yan, et al. Effects of bioorganic fertilizer application on soil enzyme activity and crop yield[J]. *Journal of North China Agronomy*, 2017, 32(Suppl1): 308-312. (in Chinese with English abstract)
- [10] 何冰, 李廷亮, 栗丽, 等. 采煤塌陷区复垦土壤团聚体碳氮分布对施肥的响应[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(4): 184-189.
- HE Bing, LI Tingliang, LI Li, et al. Response of carbon and nitrogen distribution in reclaimed soil aggregate to fertilization in coal mining subsidence area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(4): 184-189. (in Chinese with English abstract)
- [11] 谢钧宇, 张慧芳, 曹寒冰, 等. 采煤塌陷区复垦土壤有机碳固持及酶活性对长期施肥的响应[J]. *应用与环境生物学报*, 2023, 29(3): 696-703.
- XIE Junyu, ZHANG Huifang, CAO Hanbing, et al. Response of soil organic carbon sequestration and enzyme activity to long-term fertilization in coal mining subsidence area[J]. *Chinese Journal of Applied & Environmental Biology*, 2023, 29(3): 696-703. (in Chinese with English abstract)
- [12] 尚妍萌, 张杰, 孟会生, 等. 不同施肥处理下采煤矿区复垦土壤微生物功能多样性与共现性特征[J]. *生态学杂志*, 2023, 42(2): 386-394.
- SHANG Yanmeng, ZHANG Jie, MENG Huisheng, et al. Soil microbial functional diversity and co-occurrence under different fertilization treatments in a reclaimed coal mining area[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2023, 42(2): 386-394. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴良泉. 基于“大配方、小调整”的中国三大粮食作物区域配肥技术研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2014
- WU Liangquan. Fertilizer Recommendations For Three Major Cereal Crops Based On Regional Fertilizer Formula And Site Specific Adjustment in China [D]. Beijing: China Agricultural University, 2014. (in Chinese with English abstract)
- [14] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter; I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2): 681-689.
- [15] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 北京: 中国农业出版社, 2000.
- [16] 关松荫. 土壤酶及其研究法[M]. 北京: 中国农业出版社, 1986.
- [17] MUSTAFA A, XU Hu, ABRAR M M, et al. Long-term fertilization enhanced carbon mineralization and maize biomass through physical protection of organic carbon in fractions under continuous maize cropping[J]. *Applied Soil Ecology*, 2021, 165: 103971.
- [18] QASWAR M, LIU Y R, HUANG J, et al. Soil nutrients and heavy metal availability under long-term combined application of swine manure and synthetic fertilizers in acidic paddy soil[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2020, 20(4): 2093-2106.
- [19] CAI A D, XU M G, WANG B R, et al. Manure acts as a better fertilizer for increasing crop yields than synthetic fertilizer does by improving soil fertility[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 189: 168-175.
- [20] HAMER U, POTTHAST K, MAKESCHIN F. Urea fertilization affected soil organic matter dynamics and microbial community structure in pasture soils of Southern Ecuador[J]. *Applied Soil Ecology*, 2009, 43(2/3): 226-233.
- [21] DIGNAC M F, DERRIEN D, BARRE P, et al. Increasing soil carbon storage: Mechanisms, effects of agricultural practices

- and proxies. A review[J]. *Agronomy for Sustainable Development*, 2017, 37(2): 14.
- [22] 孟红旗, 郭晓明, 杨英, 等. 采煤沉陷坡面土壤氮磷钾养分有效性的空间变异性[J]. *土壤学报*, 2020, 57(4): 844-854.
- MENG Hongqi, GUO Xiaoming, YANG Ying, et al. Spatial variability of nitrogen, phosphorus and potassium nutrient availability on coal mining subsidence slope[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57(4): 844-854. (in Chinese with English abstract)
- [23] WANG H X, XU J L, LIU X J, et al. Effects of long-term application of organic fertilizer on improving organic matter content and retarding acidity in red soil from China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2019, 195: 104382.
- [24] LI W T, WU M, LIU M, et al. Responses of soil enzyme activities and microbial community composition to moisture regimes in paddy soils under long-term fertilization practices[J]. *Pedosphere*, 2018, 28(2): 323-331.
- [25] ZHANG Y, E S Z, WANG Y A, et al. Long-term manure application enhances the stability of aggregates and aggregate-associated carbon by regulating soil physicochemical characteristics[J]. *Catena*, 2021, 203(1): 105342.
- [26] SPIELES D J, MITSCH W J. Macroinvertebrate community structure in high-and low-nutrient constructed wetlands[J]. *Wetlands*, 2000, 20(4): 716-729.
- [27] 王飞, 李清华, 林诚, 等. 不同施肥模式对南方黄泥田耕层有机碳固存及生产力的影响[J]. *植物营养与肥料学报*, 2015, 21(6): 1447-1454.
- WANG Fei, LI Qinghua, LIN Cheng, et al. Effects of different fertilization modes on soil organic carbon sequestration and productivity in yellow mud fields in southern China[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Journal*, 2015, 21(6): 1447-1454. (in Chinese with English abstract)
- [28] 王擎运, 张佳宝, 赵炳梓, 等. 不同施肥方式对典型壤质潮土中微量元素积累及其有效性的影响[J]. *土壤学报*, 2012, 49(6): 1104-1113.
- WANG Qingyun, ZHANG Jiabao, ZHAO Bingzi, et al. Effects of different fertilization methods on accumulation and availability of trace elements in typical loam soil[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2012, 49(6): 1104-1113. (in Chinese with English abstract)
- [29] 丁少男, 薛蕙, 刘国彬, 等. 长期施肥对黄土丘陵区农田土壤微量元素有效含量的影响[J]. *西北农林科技大学学报 (自然科学版)*, 2017, 45(1): 124-130.
- DING Shaonan, XUE Sha, LIU Guobin, et al. Effects of long-term fertilization on effective contents of Trace elements in farmland soil in Loess hilly area[J]. *Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition)*, 2017, 45(1): 124-130. (in Chinese with English abstract)
- [30] 李志军. 长期施肥对关中壤土及作物微量元素状况的影响[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2010.
- LI Zhijun. Effects of Long-Term Fertilization On Trace Element Status Of Lou Soil And Crops in Guanzhong [D]. Yangling: Northwest A&F University, 2010. (in Chinese with English abstract)
- [31] 李本银, 汪鹏, 吴晓晨, 等. 长期肥料试验对土壤和水稻微量元素及重金属含量的影响[J]. *土壤学报*, 2009, 46(2): 281-288.
- LI Benyin, WANG Peng, WU Xiaochen, et al. Effects of long-term fertilizer experiment on the contents of trace elements and heavy metals in soil and rice[J]. *Acta Edologica Sinica*, 2009, 46(2): 281-288. (in Chinese with English abstract)
- [32] 毛岭峰, 彭培好, 陈文德. 重庆地区主要作物重金属富集特征[J]. *生态学杂志*, 2009, 28(6): 1117-1122.
- MAO Lingfeng, PENG Peihao, CHEN Wende. Heavy metal enrichment in major crops in Chongqing[J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2009, 28(6): 1117-1122. (in Chinese with English abstract)
- [33] 袁凯, 熊苏雅, 梁静, 等. 畜禽粪便中铜和锌污染现状及风险分析[J]. *农业环境科学学报*, 2020, 39(8): 1837-1842.
- YUAN Kai, XIONG Suyu, LIANG Jing, et al. Pollution status and risk analysis of copper and zinc in livestock manure[J]. *Journal of Agro-Environmental Science*, 2020, 39(8): 1837-1842. (in Chinese with English abstract)
- [34] 冷延慧. 长期施肥对棕壤、黑土团聚体组成及其稳定性的影响[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2008.
- LENG Yanhui. Effects of Long-Term Fertilization On Aggregate Composition And Stability Of Brown Soil And Black Soil [D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [35] CHAI Y J, ZENG X B, E S Z, et al. Response of soil organic carbon and its aggregate fractions to long term fertilization in irrigated desert soil of China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2014, 13(12): 2758-2767.
- [36] 毛霞丽, 陆扣萍, 何丽芝, 等. 长期施肥对浙江稻田土壤团聚体及其有机碳分布的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52(4): 828-838.
- MAO Xiali, LU Kouping, HE Lizhi, et al. Effects of long-term fertilization on soil aggregates and organic carbon distribution in paddy fields in Zhejiang Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52(4): 828-838. (in Chinese with English abstract)
- [37] 李春越, 常顺, 钟凡心, 等. 种植模式和施肥对黄土旱塬农田土壤团聚体及其碳分布的影响[J]. *应用生态学报*, 2021, 32(1): 191-200.
- LI Chunyue, CHANG Shun, ZHONG Fanxin, et al. Effects of planting pattern and fertilization on soil aggregate and carbon

- distribution in Loess upland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2021, 32(1): 191-200. (in Chinese with English abstract)
- [38] 王飞, 李清华, 何春梅, 等. 长期施肥对黄泥田土壤团聚体中氮素积累和有机氮组成的影响[J]. *中国农业科学*, 2023, 56(9): 1718-1728.
- WANG Fei, LI Qinghua, HE Chunmei, et al. Effects of long-term fertilization on nitrogen accumulation and organic nitrogen composition in soil aggregates in yellow mud field[J]. *Chinese Journal of Agricultural Sciences*, 2023, 56(9): 1718-1728. (in Chinese with English abstract)
- [39] CHEN Y, ZHANG X D, HE H B, et al. Carbon and nitrogen pools in different aggregates of a Chinese Mollisol as influenced by long-term fertilization[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1018-1026.
- [40] WANG W, CHEN W C, WANG K R, et al. Effects of long term fertilization on the distribution of carbon, nitrogen and phosphorus in water-stable aggregates in paddy soil[J]. *Agricultural Sciences in China*, 2011, 10: 1932-1940.
- [41] KOOL D M, CHUNG H, TATE K R, et al. Hierarchical saturation of soil carbon pools near a natural CO₂ spring[J]. *Global Change Biology*, 2007, 13(6): 1282-1293.
- [42] ZHANG F F, WEI Y N, BO Q F, et al. Long-term film mulching with manure amendment increases crop yield and water productivity but decreases the soil carbon and nitrogen sequestration potential in semiarid farmland[J]. *Agricultural Water Management*, 2022, 273: 107909.
- [43] XU X W, QU Q, CHEN Y H, et al. Responses of soil enzyme activity and soil organic carbon stability over time after crop land abandonment in different vegetation zones of the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2021, 196: e104812.
- [44] 柳开楼, 韩天富, 胡惠文, 等. 红壤旱地玉米开花期土壤酶活性对长期施肥的响应[J]. *植物营养与肥料学报*, 2018, 24(6): 1610-1618.
- LIU Kailou, HAN Tianfu, HU Huiwen, et al. Response of soil enzyme activity to long-term fertilization at flowering stage of maize in red soil dryland[J]. *Plant Nutrition and Fertilizer Journal*, 2018, 24(6): 1610-1618. (in Chinese with English abstract)
- abstract)
- [45] JIAO X G, GAO C S, LV G H, et al. Effect of long-term fertilization on soil enzyme activities under different hydrothermal conditions in Northeast China[J]. *Journal of Integrative Agriculture*, 2011, 10(3): 412-422.
- [46] 贺美, 王立刚, 朱平, 等. 长期定位施肥下黑土碳排放特征及其碳库组分与酶活性变化[J]. *生态学报*, 2017, 37(19): 6379-6389.
- HE Mei, WANG Ligang, ZHU Ping, et al. Carbon emission characteristics, carbon pool components and enzyme activities of black soil under long-term positioning fertilization[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2017, 37(19): 6379-6389. (in Chinese with English abstract)
- [47] SILVA-OLAYA A M, MORA-MOTTA D A, CHERUBIN M R, et al. Soil enzyme responses to land use change in the tropical rainforest of the Colombian Amazon region[J]. *Plos One*, 2021, 16(8): e0255669.
- [48] 尤彩霞, 陈清, 任华中, 等. 不同有机肥及有机无机配施对日光温室黄瓜土壤酶活性的影响[J]. *土壤学报*, 2006, 43(3): 521-523.
- YOU Caixia, CHEN Qing, REN Huazhong, et al. Effects of different organic fertilizers and combined application of organic and inorganic fertilizers on soil enzyme activity of cucumber in solar greenhouse[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2006, 43(3): 521-523. (in Chinese with English abstract)
- [49] LUO G W, LING L, VILLE-PETRI F, et al. Organic amendments increase crop yields by improving microbe-mediated soil functioning of agroecosystems: A meta-analysis[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 124: 105-115.
- [50] PENG J, HAN X R, LI N, et al. Combined application of biochar with fertilizer promotes nitrogen uptake in maize by increasing nitrogen retention in soil[J]. *Biochar*, 2021, 3(3): 13.
- [51] 包耀贤, 徐明岗, 吕粉桃, 等. 长期施肥下土壤肥力变化的评价方法[J]. *中国农业科学*, 2012, 45(20): 4197-4204.
- BAO Yaolian, XU Mingang, LYU Fentao, et al. Evaluation method of soil fertility change under long-term fertilization[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2012, 45(20): 4197-4204. (in Chinese with English abstract)

Driving factors of improving maize yields in the reclaimed soils by seven years of applied organic manure and chemical fertilizer

XIE Junyu, ZHANG Huifang, LUO Yunqi, MENG Huisheng, ZHANG Jie, HONG Jianping, XU Minggang[✉]

(College of Resources and Environment, Shanxi Agricultural University, Taigu 030801, China)

Abstract: This study aims to clarify the effects of long-term different fertilization on the soil fertility and grain yield under the continuous maize cropping system in coal mining subsidence areas. The key soil factors were determined in the fertilization treatments for the high maize yield. Four treatments were set with no fertilization (CK), nitrogen, phosphorus and potassium fertilizer (NPK), organic manure alone (M), and organic manure combined with chemical fertilizer (MNPK). Soil samples were also collected in the 0~20 cm thickness. A systematic investigation was made to explore the effects of fertilization treatments on the crop yield, contents of soil organic matter (SOM), total nitrogen (TN), available phosphorus (AP), available potassium (AK), available iron (A-Fe), available manganese (A-Mn), available copper (A-Cu), available zinc (A-Zn), the distribution of aggregates and associated carbon and nitrogen content, as well as the enzyme activities related to carbon cycle. The results showed that the NPK, M and MNPK treatments significantly increased the maize grain yield, especially for M treatment, compared with the CK treatment. M treatment significantly increased the SOM, TN, AK, and A-Mn contents, which increased by 21.50%, 12.50%, 98.37%, and 20.19%, respectively. MNPK treatment was improved the properties of the reclaimed soil. There was the significant increase in the > 2 mm aggregate associated with organic carbon and total nitrogen contents, which were 68.68% and 471.43%, respectively. But the soil A-Cu, and A-Zn contents were reduced by 16.67% and 16.46%, respectively. Moreover, the application of manure (M and MNPK) accelerated the crushing of large macroaggregate (0.25~2 mm), accompanied by the increase of the proportion of silt and clay fraction (< 0.053 mm). In addition, NPK treatment significantly increased the activity of β -glucosidase by 29.17%, but the urease activity was reduced by 29.79%. M and MNPK treatment significantly increased the activities of sucrase, β -glucosidase, urease and alkaline phosphatase, with the increases of 45.87%~73.39%, 54.98%~60.73%, 43.09%~80.32% and 51.52%~54.97%, respectively. Furthermore, the principal component analysis showed that the application of organic manure alone was the better management measure to improve the quality of cultivated land and maintain land productivity in this reclaimed area. The redundant analysis showed that β -glucosidase was a sensitivity index to evaluate the soil fertility, which was contributed 72.40% to the maize grain yield and SOM content. Therefore, the application of organic manure alone can be expected to promote the formation of soil fertility of reclamation under the existing farmland management. The activity of β -glucosidase was enhanced to ultimately improve the crop yield. The effective measure can also be used to maintain the high and stable crop yield for the cultivated land quality in this reclaimed area. The finding can provide a theoretical basis for the improvement of soil and cultivated land quality..

Keywords: soils; organic manure; reclamation; yield; micro elements; β -glucosidase