

黑土低山丘陵区水平梯田地力提升措施对土壤质量和玉米产量的影响

张瑜¹, 徐子祺¹, 徐长林², 于艳秋³, 芦贵君¹, 李红蕊¹, 李昊伦¹

(1.吉林省水土保持科学研究院, 吉林 长春 130033;

2.敦化市水土保持工作站, 吉林 敦化 133700; 3.东丰县水土保持技术服务中心, 吉林 东辽 136300)

摘要: [目的] 定量评估黑土低山丘陵区不同地力提升措施对坡改梯区域土壤质量和玉米产量的影响, 为该区耕地地力提升和黑土地保护提供理论支持。[方法] 采用野外监测与多元数理统计方法, 识别化肥、有机肥和秸秆不同组合混施对土壤养分含量、物理性状、玉米生长及产量等的影响。[结果] ①秸秆配施有机肥措施不仅对耕层肥力起到了非常显著的改良作用, 同时明显改善了土壤物理性状, 且化肥、有机肥和秸秆混施处理效果最好; ②添加秸秆与有机肥措施显著降低了 C : N, 提高了 N : P 和 C : P 值, 为土壤微生物群落生长、发育提供了更为理想的环境; ③土壤持水能力和有机 C 含量是黑土低山丘陵区梯田作物产量影响最大的因素, 未来应持续开展秸秆与有机肥混施措施; ④化肥混有机肥 3.75 t/hm² 或秸秆 3.00 t/hm² 是提高黑土丘陵区梯田产量的最佳施用量。[结论] 黑土低山丘陵区不同地力提升措施对坡改梯区域土壤质量和玉米产量的影响有显著差异, 该区域适宜用化肥混有机肥、秸秆来改善土壤质量和玉米产量状况。

关键词: 黑土; 低山丘陵区; 土壤质量; 玉米产量; 水平梯田

文献标识码: B

文章编号: 1000-288X(2022)06-0190-07

中图分类号: S154.4

文献参数: 张瑜, 徐子祺, 徐长林, 等. 黑土低山丘陵区水平梯田地力提升措施对土壤质量和玉米产量的影响[J]. 水土保持通报, 2022, 42(6): 190-196. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.06.024; Zhang Yu, Xu Ziqi, Xu Changlin, et al. Effects of fertility improvement measures on soil quality and maize yield in horizontal terraced fields of black soil hilly region [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(6): 190-196.

Effects of Fertility Improvement Measures on Soil Quality and Maize Yield in Horizontal Terraced Fields of Black Soil Hilly Region

Zhang Yu¹, Xu Ziqi¹, Xu Changlin², Yu Yanqiu³, Lu Guijun¹, Li Hongrui¹, Li Haolun¹

(1. Institute of Soil and Water Conservation of Jilin Province, Changchun, Jilin 130033,

China; 2. Soil and Water Conservation Workstation of Dunhua City, Dunhua, Jilin 133700, China;

3. Soil and Water Conservation Technical Service Center of Dongfeng County, Dongliao, Jilin 136300, China)

Abstract: [Objective] The influence of different soil fertility improvement measures on soil quality and maize yield in horizontal terraced fields was quantitatively evaluated in order to provide a theoretical support for the improvement of cultivated land fertility and the protection of black soil area. [Methods] Field monitoring and multivariate mathematical statistics were used to identify the effects of different combinations of chemical fertilizers, organic fertilizers, and straw on soil nutrient content, physical properties, maize growth, and yield. [Results] ① The combined application of organic fertilizer with straw not only played a very significant role in improving the fertility of the plow layer, but also significantly improved the physical properties of the soil. The combined application of chemical fertilizer, organic fertilizer, and straw had the best effect; ② Adding straw and organic fertilizer significantly reduced C : N ratio, and increased N : P and C : P ratios,

收稿日期: 2022-04-08

修回日期: 2022-05-19

资助项目: 吉林省科技厅项目“黑土区扩张型侵蚀沟生态控蚀技术研发与应用”(20210202025NC); 吉林省财政厅项目“低山丘陵区坡改梯耕地质量监测与提升技术研究”

第一作者: 张瑜(1980—), 女(汉族), 山东省烟台市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事黑土区水土保持方面的研究。Email: 124058200@qq.com。

通讯作者: 徐子祺(1990—), 女(汉族), 吉林省省长白县人, 硕士, 工程师, 主要从事水土保持生态修复方面的研究。Email: 235175758@qq.com。

and provided a more ideal environment for the growth and development of soil microbial communities; ③ Soil water-holding capacity and organic carbon content were the most influential factors affecting crop yield in terraced fields in the black soil hilly areas. Mixed applications of straw and organic fertilizer should be carried out continuously in the future; ④ 3.75 t/hm² of chemical fertilizers mixed with organic fertilizer or 3.00 t/hm² of straw was the best way to increase the yield of terraced fields in the black soil hilly region. [Conclusion] Different fertility improvement measures had significantly different effects on soil quality and on maize yield in horizontal terraced fields of the black soil hilly region. A suitable production practice is to use chemical fertilizer mixed with organic fertilizer and straw to improve soil quality and maize yield in this area.

Keywords: black soil; hilly region; soil quality; maize yield; horizontal terraced field

吉林省黑土区耕地面积约 4.60×10⁶ hm²,对粮食产量贡献率超过 80%。由于利用管理模式不合理,加之水土流失严重,该地区黑土层不断变薄,肥力不断降低^[1]。因此,如何提高黑土区地力成为当前的研究热点之一。化肥虽然能提高地力,但由于使用量过多,造成的土壤板结与酸化已成为黑土质量恶化重要因素^[2]。

很多研究^[2-3]表明施用适量的秸秆和有机肥是既经济又环保的黑土区的改土、增产措施。如有研究发现秸秆中富含营养元素,其与 N 肥配施后,能够增加土壤有机 C 含量,促进大团聚体形成,从而改善土壤通透性。此外,秸秆不仅可腐化、作为营养的补充源,而且可提高土壤营养物质对植物的可吸收性^[2,4]。秸秆还田能够促进玉米地上、地下部分生长,改善光合作用状况,且混拌还田方式优于覆盖还田^[5]。有机肥不仅显著提升土壤中有机 C、N、P、K 含量^[6],还能够提高土壤蔗糖酶、脲酶、过氧化氢酶、碱性 P 酸酶活性,增加土壤有益细菌丰富度,使土壤系统向稳定、健康的方向发展^[7]。与单施用化肥相比,混施有机肥、化肥一方面可切实提高土壤肥力^[8],提高土壤阳离子交换量、田间持水量、总孔隙度,且猪粪肥的效果优于鸡粪肥^[9]。长期使用有机肥配合化肥能够使玉米高产、稳产^[10]。另一方面还可以改善土壤机械结构,促使更多大粒径团聚体形成、增加团聚体水稳性。

此外,秸秆和有机肥配施也具有较好的效果。秸秆和有机肥交替施用能够降低土壤容重、紧实度,提高土壤有机 C 和水稳性团聚体含量,同时削减土壤中对植物有害的真菌数量^[11-12]。在秸秆还田的基础上,进一步增施有机肥不仅对土壤自身理化性状的改良具有重要作用,同时还能促进玉米根系生长,且二者的相互作用实现正向促进目标^[3]。在坡改梯的过程中很容易造成底土上翻,造成耕层土壤肥力下降,进而影响作物产量,亟需开展地力培肥工作,然而,有关黑土区坡改梯地力提升措施高效配置的文献却鲜有报道。

为此,本研究选择吉林省黑土区典型坡改梯措施点,施用有机肥、无机肥、秸秆不同组合处理,研究不同地力提升措施对土壤养分含量、化学计量和玉米生长、产量的影响,以及其间的相互作用机理,旨在为黑土区耕地地力提升和黑土地保护提供理论支持。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于吉林省东辽县安石镇杏木小流域(125°22′40″—125°26′10″E, 42°58′05″—43°01′40″N),属低山丘陵暗棕壤区。区域为温带大陆性气候特征,四季分明、光热水充足,无霜期年平均 135 d。年平均日照时数 2 504.20 h,年平均降水量 658.10 mm,年平均降水日数为 120 d。降雨集中在每年 5—9 月,7 月最多。研究区主要树种有落叶松、樟子松、红松、云杉,还有部分柞树桦树、五角枫等。当地传统种植作物为玉米,种植方式为坡面横垄。主要土类有暗棕壤、棕壤、白浆土、冲积土、水稻土、草甸土、沼泽土、泥炭土等。

1.2 措施布设

试验田为水平梯田,位于阳坡,坡度为 8°的直线型坡,坡长 228 m,同坡位 0—20 cm 混合样土壤理化性质详见表 1。梯田 2018 年建成,埂坎长度 20 m,类型分别为土坎梯田、生态膜带梯田、石坎梯田和组装薄壁梯田。每个田坎分 7 个处理(表 2),每个处理 3 个重复,编号为 2—8 措施处理,1 号空白对照(CK)。措施实施时间为 2021 年。玉米种植株距为 30 cm,行距为 65 cm。试验区无人为灌溉,来水方式为天然降水。

化肥为复合肥(总养分≥45%,配比为 24% N, 10% P₂O₅, 11% K₂O),有机肥来源为牛粪,含 N 量为 1.33%,秸秆为来自当地农户玉米秸秆粉碎。玉米种子为吉东 54 号(吉林省辽源市农科院监制),2021 年 5 月初播种。化肥与有机肥在播种前一次性施入。

表 1 研究坡面土壤物理性质本底值

土壤类型	容重/(g·cm ⁻³)	总孔隙度/%	全 N/(g·kg ⁻¹)	全 P/(g·kg ⁻¹)	全 K/(g·kg ⁻¹)
暗棕壤	1.36	40.90	0.46	0.59	13.40

表 2 研究区水平梯田不同地力提升处理组

处理编号	措施组合
1	空白对照
2	化肥 0.75 t/hm ²
3	化肥 0.75 t/hm ² +有机肥 7.50 t/hm ²
4	化肥 0.75 t/hm ² +有机肥 3.75 t/hm ²
5	化肥 0.75 t/hm ² +秸秆还田 3.00 t/hm ²
6	化肥 0.75 t/hm ² +秸秆还田 1.50 t/hm ²
7	化肥 0.75 t/hm ² +有机肥 7.50 t/hm ² +秸秆还田 6.00 t/hm ²
8	化肥 0.75 t/hm ² +有机肥 3.75 t/hm ² +秸秆还田 3.00 t/hm ²

1.3 指标测定

1.3.1 土壤理化指标 在每个处理的 3 个重复小区采用 S 形取样方法进行采样,取 3 个重复平均值,作为各处理代表值。在对照处理各坡位的 3 个样点取土,取平均值。作物生长季土壤水分测定时间为 2021 年 6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月 1 日,测定深度为 0—20 cm,方法为烘干称重法。在 2021 年 11 月初采集 0—20 cm 耕层土壤分析全 N、全 P、全 K、碱解 N、速效 P、速效 K、有机质、容重、含水率和总孔隙度。采集 20—40 cm(亚耕层)土壤分析全 N、全 P、全 K。全 N 采用半微量开氏法;全 P 采用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法;全 K 采用火焰光度法;有机 C 采用重铬酸 K 法—外加热法测定;化学计量为全量比值;碱解 N 采用扩散吸收法;速效 P 采用化学浸提法;速效 K 采用火焰光度计法测定。容重、含水率和总孔隙度采用为烘干称重法计算。

1.3.2 作物指标 作物株高测定于 2021 年 6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月 1 日,每个处理选 10 株测定,结果取 3 个重复平均值。作物农艺性状和产量指标测定时间为 10 月中旬。从各处理随机抽取 15 穗玉米,进行玉米考种。测玉米的穗长、穗行数、行粒数、穗粗、穗重、穗粒重、出籽率、千粒重,取 3 个重复平均。

1.4 数据处理及分析

利用 Excel 进行数据整理和图形绘制。利用 SPSS 19.0 进行方差分析(ANONA 单因素方差分析 Duncan 法)和主成分分析。利用 Canoco 4.5 进行典范对应分析(CCA)。

2 结果与分析

2.1 地力提升措施对梯田土壤养分影响

由表 3 可知,研究区土壤对照组和地力改良处

理组的耕层全量 N、P、K 的含量都大于亚耕层。其中,耕层全 N、全 P 和全 K 含量范围分别为 0.50~0.82 g/kg,0.68~0.7 g/kg,16.39~17.46 g/kg,亚耕层全 N、全 P 和全 K 含量范围分别为 0.22~0.35 g/kg,0.40~0.45 g/kg,11.53~15.23 g/kg。各地力改良处理对耕层全 N、全 P 和全 K 含量提高比例为4.00%~64.00%,0.00%~2.90%,3.20%~5.40%,对亚耕层全 N、全 P 和全 K 含量提高比例为 36.30%~50.00%,2.50%~12.50%,3.40%~29.40%。其中,耕层和亚耕层的全 P 改良效果不显著,其他效果均显著($p<0.05$)。各处理耕层全 N 改良效果的排序为:处理 4>处理 7>处理 5>处理 6>处理 8>处理 3>处理 2;耕层全 K 改良效果的排序为:处理 6>处理 7>处理 2>处理 8>处理 5>处理 3>处理 4;亚耕层全 N 改良效果的排序为:处理 4>处理 3=处理 8>处理 5 处理>6>处理 7>处理 2;亚耕层全 P 改良效果的排序为:处理 2>处理 3=处理 5>处理 6>处理 7>处理 8=处理 4;亚耕层全 K 改良效果的排序为:处理5>处理 7>处理 6>处理 8>处理 2>处理 3>处理 4。

由表 4 可知,各处理可显著提高土壤碱解 N、速效 P、有机 C 的含量($p<0.05$),但对速效 K 没有显著的改善作用。其中,各处理提高土壤碱解 N、速效 P、速效 K、有机 C 的比例范围分别为:3.50%~4.80%,1.10%~15.90%,0.10%~0.60%,1.20%~11.20%。各处理提高土壤碱解 N 幅度排序为:处理 4>处理 5>处理 3>处理 6>处理 8>处理 7>处理 2;提高土壤速效 P 幅度排序为:处理 4>处理 5>处理 6>处理 3>处理 8>处理 7>处理 2;提高土壤有机 C 幅度排序为:处理 8>处理 7>处理 6>处理 4=处理 5>处理 3>处理 2。此外,结合表 1 和表 3 可知,单施化肥

改善全 N、碱解 N、速效 P 和有机 C 的效果远不如搭配有机肥或秸秆的处理。

表 3 收获季不同处理水平梯田土壤
不同深度全 N、全 P、全 K 含量

处理 编号	土壤 层次	全 N/ (g · kg ⁻¹)	全 P/ (g · kg ⁻¹)	全 K/ (g · kg ⁻¹)
1	耕 层	0.50±0.07 ^a	0.68±0.06 ^a	16.39±1.72 ^a
	亚耕层	0.22±0.05 ^A	0.40±0.03 ^A	11.53±1.35 ^A
2	耕 层	0.52±0.02 ^b	0.68±0.04 ^a	17.29±1.65 ^b
	亚耕层	0.30±0.06 ^B	0.45±0.05 ^A	13.59±1.54 ^B
3	耕 层	0.61±0.05 ^c	0.68±0.02 ^a	16.96±1.36 ^b
	亚耕层	0.33±0.04 ^B	0.44±0.01 ^A	12.59±1.28 ^B
4	耕 层	0.82±0.06 ^d	0.68±0.06 ^a	16.93±1.56 ^b
	亚耕层	0.35±0.03 ^B	0.40±0.07 ^A	11.93±1.54 ^B
5	耕 层	0.76±0.05 ^d	0.68±0.07 ^a	17.23±1.38 ^b
	亚耕层	0.32±0.08 ^B	0.44±0.03 ^A	15.23±1.19 ^B
6	耕 层	0.64±0.02 ^c	0.70±0.05 ^a	17.46±1.57 ^b
	亚耕层	0.30±0.04 ^B	0.43±0.02 ^A	14.86±1.67 ^B
7	耕 层	0.78±0.03 ^d	0.68±0.08 ^a	17.29±1.19 ^b
	亚耕层	0.29±0.05 ^B	0.41±0.04 ^A	14.93±1.28 ^B
8	耕 层	0.62±0.07 ^c	0.68±0.06 ^a	17.26±1.64 ^b
	亚耕层	0.33±0.04 ^B	0.40±0.06 ^A	14.83±1.55 ^B

注:同列不同小写字母代表耕层各处理之间差异显著($p<0.05$),同列不同大写字母代表亚耕层各处理之间差异显著($p<0.05$)。下同。

表 4 收获季不同处理水平梯田土壤
速效 N、P、K 和有机 C 含量

处理 编号	碱解 N/ (mg · kg ⁻¹)	速效 P/ (mg · kg ⁻¹)	速效 K/ (mg · kg ⁻¹)	有机 C/ (g · kg ⁻¹)
1	220.23±1.65 ^a	30.63±1.15 ^a	184.95±1.02 ^a	16.40±0.88 ^a
2	223.56±1.98 ^b	30.96±1.12 ^b	185.19±1.06 ^a	16.60±0.86 ^a
3	227.78±1.25 ^c	33.73±1.35 ^c	185.75±0.98 ^a	17.50±0.91 ^b
4	231.56±1.34 ^d	35.52±1.14 ^d	186.15±0.88 ^a	17.70±1.11 ^b
5	230.89±1.68 ^d	35.09±1.26 ^d	186.13±0.93 ^a	17.70±1.03 ^b
6	229.12±1.45 ^c	33.65±1.44 ^c	185.86±1.21 ^a	18.00±1.05 ^c
7	228.03±1.58 ^c	31.96±1.54 ^c	185.39±1.13 ^a	18.20±0.94 ^c
8	227.74±2.01 ^c	32.66±1.11 ^c	185.59±1.02 ^a	18.30±0.67 ^c

2.2 地力提升措施对梯田土壤物理性状的影响

由图 1 可知,各处理土壤含水量 6—9 月逐渐升高,9—10 月逐渐降低。除处理 2 外,各处理均能显著提高土壤含水率($p<0.05$)。其中,处理 3—8 在 6, 7, 8, 9, 10 月提高土壤含水率的范围分别为 21.10%~48.70%, 15.30%~44.40%, 14.60%~34.30%, 5.90%~14.60%, 28.20%~42.00%。且由图 1 可知,有机肥+秸秆不仅可有效提高土壤含水率,而且也能够维持土壤水分含量在一定水平。由表 5 可知,除处理 2 外,各种地力提升措施显著改善土壤物理性质。

各措施提高土壤含水率的范围为 7.00%~69.10%,降低容重的范围为 7.60%~11.40%,提高总孔隙度的范围为 5.80%~11.10%,均差异显著($p<0.05$)。其中,处理 7 和处理 8 效果较为明显,即化肥、有机肥和秸秆混施改善土壤物理性质效果最好。

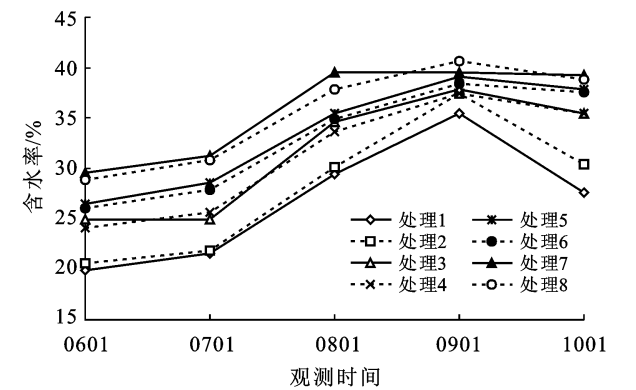


图 1 生长季不同处理水平梯田土壤水率

表 5 收获季不同处理水平梯田土壤物理性状

处理 编号	土壤 层次	含水率/ %	容重/ (g · cm ⁻³)	总孔隙 度/%
1	耕层	21.40±1.54 ^a	1.31±0.25 ^a	50.56±0.98 ^a
2	耕层	22.40±1.23 ^b	1.30±0.36 ^a	50.94±0.86 ^b
3	耕层	23.10±1.24 ^b	1.26±0.14 ^b	52.45±0.18 ^b
4	耕层	29.10±1.54 ^c	1.21±0.28 ^c	54.33±0.16 ^d
5	耕层	25.70±1.36 ^b	1.23±0.24 ^b	53.58±0.87 ^c
6	耕层	22.90±1.67 ^b	1.25±0.26 ^b	52.83±0.81 ^c
7	耕层	35.60±0.98 ^d	1.16±0.31 ^c	56.22±0.76 ^d
8	耕层	36.20±0.81 ^d	1.19±0.13 ^c	55.09±1.23 ^d

2.3 地力提升措施对土壤 C、N、P 化学计量的影响

由表 6 可知,各种地力提升措施显著降低了 C : N,提高了 N : P、C : P,均差异显著($p<0.05$)。其中,C : N 的降低范围为 3.70%~34.20%,N : P 的提高比例为 3.30%~62.90%,C : P 的提高比例为 1.20%~11.50%。相比其他混合措施,单施化肥的化学计量特征值变化较小。

表 6 收获季不同处理水平梯田土壤 C、N、P 化学计量特征

处理编号	C : N	N : P	C : P
1	32.80	0.74	24.12
2	31.92	0.76	24.41
3	28.69	0.90	25.74
4	21.59	1.21	26.03
5	23.29	1.12	26.03
6	28.13	0.91	25.71
7	23.33	1.15	26.76
8	29.52	0.91	26.91

2.4 水平梯田收获季各处理土壤理化性质主成分分析评价

根据特征值 ≥ 1 的原则选择主成分共 3 个。由表 7 可知,3 个主成分的累计共为 93.13%。由表 8 可知,各土壤理化性质指标在 3 个主成分中的荷载。施用不同地力改良措施后各指标在土壤理化特征中的重要程度详见表 7。由表 7 可知,所有指标中只有土壤容重是负载荷指标,即指标越大土壤质量越差。在主成分 1 种,载荷前 3 的指标分别为:碱解 N $>$ 总孔隙度 $>$ 有机 C,荷载均超过 0.90;在主成分 2 种,荷载前 3 的指标分别为:含水率 $>$ 全 P $>$ 速效 P,荷载均超过 0.50;在主成分 3 种,荷载前 3 的指标分别为:全 P $>$ 全 K $>$ 速效 P(表 8)。根据图 2 可知,水平梯田各地力改良措施的效果评分排序为:处理 4 $>$ 处理 7 $>$ 处理 5 $>$ 处理 8 $>$ 处理 6 $>$ 处理 3 $>$ 处理 2 $>$ 处理 1。处理 4,5,7 评分达 3.00 以上,地力提升效果较好,处理 6,8 评分达 2.00~3.00 效果适宜,处理 2,3 评分负值,效果较差。即化肥+有机肥+秸秆处理提升地力效果最好,化肥+秸秆处理效果也较为理想,化肥+有机肥的处理不够理想,技术有待提升。

表 7 各主成分的特征值及贡献率			
主成分编号	特征值	贡献率/%	累积贡献率/%
1	4.26	61.80	61.80
2	2.30	18.00	79.80
3	1.12	13.33	93.13

表 8 土壤理化指标在不同主成分中的荷载			
项 目	主成分编号		
	1	2	3
全 N	0.87	0.00	0.32
全 P	0.15	0.55	0.73
全 K	0.60	0.05	0.63
碱解 N	0.94	0.29	0.12
速效 P	0.75	0.53	0.36
速效 K	0.80	0.53	0.23
有机 C	0.91	0.16	0.24
含水率	0.65	0.74	0.02
容 重	-0.87	-0.46	0.00
总孔隙度	0.94	0.19	0.13

2.5 地力提升措施对玉米农艺性状和产量的影响

由图 3 可知,各措施可显著促进玉米株高生长($p<0.05$),其中,6 月 1 日、7 月 1 日、8 月 1 日、9 月 1 日、10 月 1 日株高提升百分比范围分别为 10.00%~32.00%,23.80%~57.14%,13.80%~63.86,9.60%~38.40%,4.50%~32.00%。由表 9 可知,各措施可以显著改善除出籽率外所有的玉米农艺性状和产量

状况指标。各措施改善穗长、穗行数、穗粗、穗重、穗粒重、千粒重和产量的范围分别为:11.60%~13.60%,9.80%~30.80%,6.10%~96.30%,15.10%~17.00%,10.20%~16.20%,2.40%~26.20%,34.87%~81.29%。其中,各处理组提高产量比例排序为:处理 4 $>$ 处理 5 $>$ 处理 3 $>$ 处理 6 $>$ 处理 8 $>$ 处理 7 $>$ 处理 2,差异显著($p<0.05$)。即,化肥 0.75 t/hm²+有机肥 3.75 t/hm²和化肥 0.75 t/hm²+秸秆还田 3.00 t/hm²处理改善产量效果最为优异。

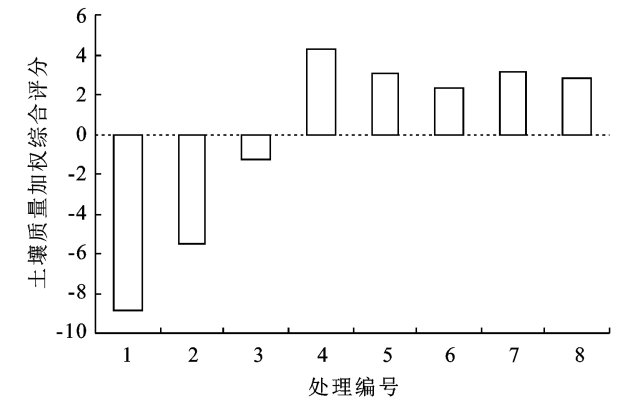


图 2 水平梯田不同处理土壤质量综合评分

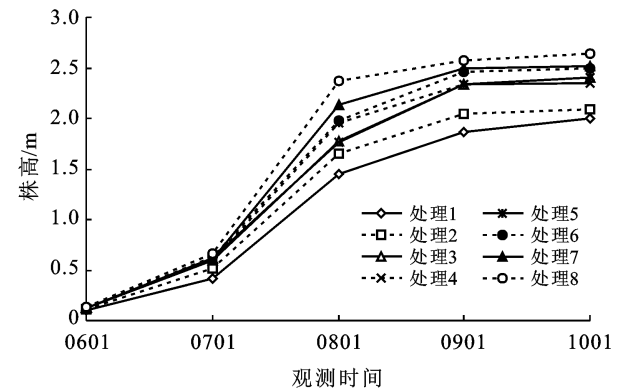


图 3 不同处理水平梯田玉米株高生长影响

2.6 土壤因子与作物因子的典范对应分析

由表 10 可知,作物因子和土壤因子作物第一排序轴和第二排序轴的相关性分别为 0.92 和 0.91,作物因子与土壤因子关系的变化累计比例在作物第一轴和第二轴分别为 86.00%和 97.60%。由表 11 可知,土壤因子与第一轴的相关系数绝对值在 0.17~0.99 之间,与第二轴的相关系数绝对值在 0.12,0.92 之间。在第一轴中,相关系数绝对值超过 0.80 的因子分别为:土壤含水率 $>$ 容重 $>$ 总孔隙度 $>$ 有机 C,第二轴中相关系数超过 0.80 的因子为:速效 K $>$ 速效 P $>$ 全 N。说明上述土壤物理性状与有机质含量是影响黑土丘陵区新开梯田玉米生长和产量最重要的因子。

表 9 不同处理水平梯田玉米农艺性状、产量状况

处理 编号	穗长/ cm	穗行数	穗粗/ cm	穗重/ g	穗粒重/ g	出籽率/ %	千粒重/ g	产量/ (t·hm ⁻²)
1	15.40±1.26	37.60±1.68	16.27±1.09	139.62±2.56	122.70±2.56	0.91±0.06	24.72±1.36	5.96±0.05
2	17.20±1.34	41.30±1.95	16.60±1.25	160.70±2.64	135.22±1.58	0.87±0.08	31.20±1.56	8.03±0.07
3	21.07±1.56	48.30±1.82	17.20±1.34	237.83±3.12	199.10±2.36	0.86±0.05	30.48±1.69	9.56±0.05
4	19.07±1.23	48.20±2.03	17.27±1.85	202.30±3.64	168.28±3.21	0.86±0.04	30.56±1.48	10.80±0.06
5	20.33±1.64	43.30±2.01	16.87±0.98	190.71±3.84	164.44±1.68	0.89±0.05	25.32±1.87	10.30±0.05
6	18.40±1.78	44.80±1.54	15.67±1.67	167.62±1.25	144.19±1.78	0.88±0.05	26.35±1.35	9.25±0.06
7	20.33±1.54	43.30±1.65	16.87±1.59	181.37±1.68	158.47±2.68	0.90±0.06	28.61±1.26	8.61±0.08
8	17.40±1.23	49.20±1.35	16.53±1.46	163.07±3.24	140.96±3.01	0.89±0.09	28.90±1.89	8.77±0.07

表 10 CCA 排序轴特征值及生长因子与环境因子的相关性

项 目	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 3 排序轴	第 4 排序轴
特征值	0.40	0.30	0.10	0.00
作物因子与土壤因子的相关性	0.92	0.91	0.84	0.66
作物因子与土壤因子关系的变化累计比例/%	86.00	97.60	99.30	99.60

表 11 土壤因子与 CCA 作物排序轴的相关系数

土壤因子	第 1 排序轴	第 2 排序轴	第 3 排序轴	第 4 排序轴
全 N	0.47	−0.82	−0.22	−0.16
全 P	−0.19	−0.53	0.70	−0.17
全 K	0.40	−0.40	0.52	−0.40
速效 P	0.17	−0.89	−0.40	−0.02
速效 K	0.21	−0.91	−0.29	−0.08
有机 C	0.80	−0.45	0.08	−0.35
含水率	0.99	0.11	−0.04	−0.01
容 重	−0.94	0.20	0.12	0.16
总孔隙度	0.85	−0.50	0.09	0.01

3 讨 论

土壤肥力状况是土壤特征的重要组成部分,也是直接决定作物生长、产量状况的重要因子^[13]。在本文中研究区土壤全量 N,P,K 的含量都为耕层大于亚耕层($p<0.05$)。这与邹文秀等的研究结果相似^[14]。同时邹文秀等^[13]认为,秸秆中富含有机酸,施用到土壤中能够提高土壤养分有效态含量。多位学者也认为混施无机肥、有机肥和秸秆是改善地力的高效措施。王传杰等称施用化肥提高作物产量,但加速土壤 N 素的耗竭,而有机物料为土壤带来了较多的 N 源,且促进微生物对土壤的固 N 效应,因此配施效果更好^[15]。王忠波等^[16]认为,施用 N 肥能够促进秸秆腐化和发挥作用,秸秆腐化率与土壤养分含量呈正相关。而本研究施用秸秆、有机肥、无机肥等措施能够有效提升土壤全 N、全 K、有机 C、碱解 N、速效 P 含量,但对耕层全 P、耕层和亚耕层速效 K 没有显著作用,且单施化肥改善全 N、碱解 N、速效 P 和有机 C 的

效果远不如搭配有机肥或秸秆处理。各种地力提升措施显著改善土壤物理性质,而化肥、有机肥和秸秆混施改善土壤物理性质效果最好。这与左婷等和王庆鲁等的研究结论相似^[17-18]。化学计量比强调的是 C,N,P 等元素在生命体中的平衡与耦合,其在一定程度上能够反映土壤元素水平和养分供给状况,本研究土壤肥力化学计量中,各措施显著降低了 C : N,提高了 N : P,C : P,均差异显著($p<0.05$),相比其他混合措施,单施化肥的化学计量变化较小。较低的 CN 比,通常更适宜土壤中各种细菌群落的发育与生长,进而促进微生物固化 N,降低 N 矿化速率和 C : N^[13]。此外,本研究水平梯田各地力改良措施的效果评分排序为:处理 4>处理 7>处理 5>处理 8>处理 6>处理 3>处理 2>处理 1,即化肥+有机肥+秸秆处理提升地力效果最好,化肥+秸秆处理效果也较为理想,化肥+有机肥的处理不够理想,技术有待提升。

农作物的生长状况和产量状况是经济效益的基础,也是土壤等生态环境条件质量的重要指征^[14]。合适的有机肥和无机肥施用配比有利于改善玉米水分利用效率和生长状况^[19]。本研究表明,各措施可以显著改善除出籽率外所有的玉米农艺性状和产量状况指标,化肥 0.75 t/hm²+有机肥 3.75 t/hm² 和化肥 0.75 t/hm²+秸秆还田 3.00 t/hm² 处理改善产量效果最为优异。典范对应分析结果表明,与作物因子第一轴相关系数绝对值超过 0.80 的因子分别为:土壤含水率>容重>总孔隙度>有机 C,说明改善土壤持水能力与有机质含量是提升区域玉米生长和产量的关键因子,即想要改善作物经济效益从土壤水分、

疏松程度和有机 C 含量方面加强管理。前人也有相似结论。有学者认为,施用秸秆主要能够改善玉米的百粒重、穗粒数,并降低秃尖长^[20]。黑土区施用有机肥和秸秆后,改良效果较明显,且有机肥和秸秆配施土壤肥力改良和玉米产量提高效果最为显著^[13]。此外,郭占强称在一定范围内,提高土壤有机 C 含量有利于增强玉米的光合作用能力,从而改善玉米的生长、产量状况^[21]。

图 1 与表 5 表明秸秆与有机肥的添加可有效改善土壤蓄水能力,减少产生地表径流的概率,进而提高土壤抗蚀能力。而土壤有机质的增加,更是进一步削弱土壤产沙的可能。众多学者的研究也有类似发现,即施用秸秆、有机肥能够改良土壤、增加玉米产量与其水土保持作用有关。李飞等^[22]的研究结果称,秸秆还田对黑土坡耕地地表径流和土壤流失阻控率均超过 90.00%,对土壤中总 N、总 P 阻控率均超过 85%。曹允淞等^[23]研究得出,秸秆还田能够减缓径流移动,滞后初始产流时间,从而减少产流产沙。贺云锋等^[24]研究表明,秸秆还田方式的水土保持效果排序为:免耕留茬>碎混>深还。有学者^[8]认为,施用有机肥能够促进大粒径水稳性团聚体形成,从而增加土壤抗蚀性,减少侵蚀量。因此,秸秆和有机肥作用下拦蓄住的土壤和营养物质能够为玉米的生长、增产提供更好的条件。

综上所述,未来还应对各种地力改良措施与坡改梯埂坎稳定性保存状况和养分流失的关系进行研究。

4 结 论

(1) 秸秆配施有机肥措施对耕层大部分土壤养分元素起到了非常显著的改良作用,仅对全 P 和速效 K 效果不明显;

(2) 添加秸秆与有机肥均可显著改善土壤物理性质,且化肥、有机肥和秸秆混施改善土壤物理性质效果最好;

(3) 地力提升措施显著降低了 C : N,提高了 N : P, C : P,为土壤微生物群落发育提供了更为理想的环境;

(4) 土壤物理性状与有机 C 是对作物产量影响最大的因素;

(5) 化肥混合有机肥 3.75 t/hm² 或秸秆 3.00 t/hm²是提高黑土丘陵区梯田产量的最佳施肥量。

[参 考 文 献]

[1] 窦森.吉林省黑土地保护与高值化利用工程[J].吉林农业大学学报,2020,42(5):473-476.

[2] 孟祥宇,冉成,刘宝龙,等.秸秆还田配施 N 肥对东北黑土稻区土壤养分及水稻产量的影响[J].作物杂志,2021,37(3):167-172.

[3] 槐圣昌,刘玲玲,汝甲荣,等.增施有机肥改善黑土物理特性与促进玉米根系生长的效果[J].中国土壤与肥料,2020,57(2):40-46.

[4] 高洪军,彭畅,张秀芝,等.秸秆还田量对黑土区土壤及团聚体有机 C 变化特征和固 C 效率的影响[J].中国农业科学,2020,53(22):4613-4622.

[5] 王帅,朱涵宇,杨占惠,等.秸秆还田方式对不同土壤条件下玉米苗期生长发育的影响[J].生态学报,2022,41(3):479-486.

[6] 逢娜,程松,张水梅,等.化肥配施有机肥对黑土肥力与春玉米产量的影响[J].华北农学报,2021,36(4):124-131.

[7] 徐忠山,刘景辉,逯晓萍,等.施用有机肥提高黑土土壤酶活性、增加细菌数量及种类多样性[J].中国土壤与肥料,2020(4):50-55.

[8] 苑亚茹,邹文秀,郝翔翔,等.黑土团聚体结合 C 对不同有机肥施用量的响应[J].生态学报,2019,39(9):3235-3242.

[9] 李欣伦,屈晓泽,李伟彤,等.有机肥与化肥配施对黑土理化性质及玉米产量的影响[J].国土与自然资源研究,2017(4):45-48.

[10] 张秀芝,高洪军,彭畅,等.长期有机培肥黑土有机 C、全 N 及玉米产量稳定性的变化特征[J].植物营养与肥料学报,2019,25(9):1473-1481.

[11] 杨彦明,周祎,张兴隆,等.秸秆有机肥交替施用对黑土理化特性及菌群结构的影响[J].中国土壤与肥料,2021,58(4):1-10.

[12] 闫雷,李思莹,孟庆峰,等.秸秆还田与有机肥对黑土区土壤团聚性的影响[J].东北农业大学学报,2019,50(12):58-67.

[13] 尹思佳,李慧,徐志强,等.东北典型黑土区旱地耕层土壤肥力指标的纬度变化特征及其关系[J].中国农业科学,2021,54(10):2132-2141.

[14] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.肥沃耕层构建对东北黑土区旱地土壤肥力和玉米产量的影响[J].应用生态学报,2020,31(12):4134-4146.

[15] 王传杰,王齐齐,徐虎,等.长期施肥下农田土壤—有机质—微生物的碳氮磷化学计量学特征[J].生态学报,2018,38(11):3848-3858.

[16] 王忠波,董海丽,郑文生.秸秆还田与水 N 调控对土壤养分的影响[J].东北农业大学学报,2022,53(2):20-26,90.

[17] 左婷,王新霞,侯琼,等.稻—麦轮作体系不同施肥模式对 N 肥利用效率和土壤有效养分平衡的影响[J].水土保持学报,2021,35(1):213-221,228.

- [17] Chen Zuoqi, Yu Bailang, Yang Chengshu, et al. An Extended time series (2000—2018) of global NPP (Ⅷ): RS-like nighttime light data from a cross-sensor calibration [J]. *Earth System Science Data*, 2021, 13(3):889-906.
- [18] 汤佳, 胡希军, 韦宝婧, 等. 基于 FLUS 模型的流域土地利用变化预测及水文响应评估[J]. *长江科学院院报*, 2022, 39(4):63-69.
- [19] Liu Xiaoping, Liang Xun, Li Xia, et al. A future land use simulation model(FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects [J]. *Landscape and Urban Planning*, 2017, 168: 94-116.
- [20] Li X, Yeh A G O. Neural-network-based cellular automata for simulating multiple land use changes using GIS [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2002, 16(4):323-343.
- [21] 张宝光. 人工神经网络在遥感数字图像分类处理中的应用[J]. *国土资源遥感*, 1998(1):23-29.
- [22] 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 基于 FLUS 模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. *干旱区研究*, 2021, 38(4):1152-1161.
- [23] Chen Junfei, Yang Yang. SPI-based regional drought prediction using weighted Markov chain model [J]. *Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology*, 2012, 4(21):4293-4298.
- [24] Liang Xun, Liu Xiaoping, Li Dan, et al. Urban growth simulation by incorporating planning policies into a CA-based future land-use simulation model [J]. *International Journal of Geographical Information Science*, 2018, 32(11):2294-2316.
- [25] 王会, 郭超艺. 线性无量纲化方法对熵值法指标权重的影响研究[J]. *中国人口·资源与环境*, 2017, 27(S2): 95-98.
- [26] 张世伟, 魏璐瑶, 金星星, 等. 基于 FLUS-UGB 的县域土地覆被模拟及城镇开发边界划定研究[J]. *地球信息科学学报*, 2020, 22(9):1848-1859.
- [27] 许晓聪, 李冰洁, 刘小平, 等. 全球 2000—2015 年 30 m 分辨率逐年土地覆盖制图[J]. *遥感学报*, 2021, 25(9): 1896-1916.
- [28] Luo GePing, Yin ChangYing, Chen Xi, et al. Combining system dynamic model and CLUE-S model to improve land use scenario analyses at regional scale: A case study of Sangong watershed in Xinjiang, China [J]. *Ecological Complexity*, 2010, 7(2):198-207.
- [29] 陈颖锋. 珠穆朗玛峰自然保护区植被覆盖变化研究[D]. 四川 成都: 成都理工大学, 2012.
- [30] 杨续超, 张懿铨, 张玮, 等. 珠穆朗玛峰地区近 34 年来气候变化[J]. *地理学报*, 2006, 61(07):687-696.
- [31] 王毅, 李景吉, 韩子钧, 等. 珠穆朗玛峰自然保护区湖泊动态及对区域气候变化的响应[J]. *冰川冻土*, 2018, 40(2):378-387.

(上接第 196 页)

- [18] 王庆鲁, 祝鹏飞, 丁凡. 地膜覆盖和有机肥施用对农田土壤和作物 C, N, P 化学计量学的影响[J]. *生态学杂志*, 2020, 39(4):1191-1197.
- [19] 陈倩, 谢军红, 李玲玲, 等. 不同比例有机肥替代化肥对玉米生长及水分利用效率的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2021, 39(6):162-170.
- [20] 傅敏, 郝敏敏, 胡恒宇, 等. 土壤有机 C 和微生物群落结构对多年不同耕作方式与秸秆还田的响应[J]. *应用生态学报*, 2019, 30(9):3183-3194.
- [21] 郭占强, 肖国举, 李秀静, 等. 不同土壤有机 C 含量对玉米光合生理及生长发育的影响[J]. *干旱地区农业研究*, 2022, 40(1):238-246.
- [22] 李飞, 韩兴, 马秀兰, 等. 秸秆覆盖对东北黑土区坡耕地产流产沙及氮磷流失的阻控[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(4):37-42.
- [23] 曹允淞, 李和平, 肖波. 秸秆覆盖量对不同容重黑土坡耕地水土流失的影响[J]. *水土保持通报*, 2021, 41(3):56-61.
- [24] 贺云锋, 沈海鸥, 张月, 等. 黑土区坡耕地不同秸秆还田方式的水土保持效果分析[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(6):89-94.