

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2025.04.004

CSTR:32310.14.stbxb.2025.04.004

李泽坤, 谢军红, 杨通, 等. 耕作方法与施氮量对旱作农田土壤团聚体稳定性及玉米产量的影响[J]. 水土保持学报, 2025, 39(4): 313-323.

LI Zekun, XIE Junhong, YANG Tong, et al. Effects of tillage methods and nitrogen application rates on dryfed maize yield and stability of soil aggregates[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2025, 39(4): 313-323.

耕作方法与施氮量对旱作农田土壤 团聚体稳定性及玉米产量的影响

李泽坤^{1,2}, 谢军红^{2,3}, 杨通^{1,2}, 董芬榕^{1,2}, 司佳昂^{1,2}, 王海强^{1,2}, 王婷婷³

(1. 省部共建干旱生境作物学重点实验室, 甘肃农业大学, 兰州 730070; 2. 甘肃农业大学农学院, 兰州 730070; 3. 实验室与基地管理中心, 兰州 730070)

摘要: [目的] 针对黄土高原半干旱区连续旋耕、翻耕与施氮不科学破坏土壤结构, 造成土壤质量变差, 作物产量下降等问题。研究耕作方法与施氮量对土壤团聚体稳定性与玉米产量的影响, 以期挖掘能提高旱区土壤质量的耕作方法与施氮量, 为旱作玉米可持续生产提供技术理论支撑。[方法] 依托长期定位试验研究旋耕(RT)、翻耕(CT)、免耕(NT)、深松耕(SS) 4 种耕作方法和 N1(200 kg/hm²)、N2(300 kg/hm²) 2 种施氮量对 0~50 cm 土层土壤水稳性团聚体质量分数、稳定性指数及玉米产量的影响。[结果] 耕作方法与施氮量影响玉米产量, SS 和 NT 较 RT、CT 分别显著提高 8.3%、10.7% 与 16.7%、19.3%, N1 较 N2 显著提高 3.7%。耕作与施氮显著影响不同土层水稳性团聚体质量分数, NT 提高 0~50 cm 土层 > 5 mm 粒径团聚体质量分数, 降低 < 0.25 mm 粒径团聚体质量分数, SS 提高 5~10 cm 土层 1~2、0.25~1 mm 粒径团聚体质量分数, N1 处理 0~5、5~10 cm 土层 0.25~1 mm 粒径团聚体质量分数较 N2 分别显著提高 15.1%、9.1%。NT 提高 0~50 cm 土层团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD), 降低团聚体破碎率(PAD); SS 对 MWD、GMD、PAD 的影响表现出土层分异特征; 施氮量仅影响 10~30、30~50 cm 土层 PAD, N1 较 N2 分别显著降低 4.4%、3.3%。相关性分析表明, 土壤体积质量、土壤孔隙度与 MWD、GMD 呈极显著负相关, 玉米产量与 GMD、MWD 呈极显著正相关。[结论] 施用 200 kg/hm² N 结合免耕与深松耕显著增加土壤团聚稳定性, 改善土壤结构, 提高产量, 建议在生产中应用。

关键词: 玉米; 耕作方法; 施氮量; 土壤团聚体稳定性; 产量

中图分类号: S513.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2025)04-0313-11

Effects of Tillage Methods and Nitrogen Application Rates on Dryfed Maize Yield and Stability of Soil Aggregates

LI Zekun^{1,2}, XIE Junhong^{2,3}, YANG Tong^{1,2}, DONG Fenrong^{1,2},

SI Jiaang^{1,2}, WANG Haiqiang^{1,2}, WANG Tingting³

(1. Key Laboratory of Crop Science in Arid Habitats, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Agronomy, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China; 3. Laboratory and

Practice Base Management Center, Gansu Agricultural University, Lanzhou 730070, China)

Abstract: [Objective] The objective of this study is to solve the problems of unscientific destruction of soil structure, deterioration of soil quality and decline of crop yield in the semi-arid area of the Loess Plateau. The effects of tillage methods and nitrogen application rates on the stability of soil aggregates and maize yield were studied, in order to explore tillage methods and nitrogen application rates that can improve soil quality in arid areas, and provide technical and theoretical support for sustainable production of maize in dry farming. [Methods] Four

收稿日期: 2024-11-27

修回日期: 2025-03-03

录用日期: 2025-04-26

网络首发日期(www.cnki.net): 2025-05-20

资助项目: 甘肃省高校科研创新平台重大培育项目(2024CXPT-01); 国家自然科学基金项目(32360545); 国家重点研发计划项目(2022YFD1900300); 农业农村部加厚地膜项目(GSAU-JSFW-2022-23, GSAU-JSFW-2023-32, GSAU-JSYF-2024-12)

第一作者: 李泽坤(2001—), 男, 硕士研究生, 主要从事旱作农业研究。E-mail: 2647233077@qq.com

通信作者: 谢军红(1981—), 男, 博士, 研究员, 博士研究生导师, 主要从事旱作农业研究。E-mail: xiejh@gsau.edu.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

tillage methods [rotary tillage (RT), ploughing (CT), no-till (NT), subsoiling tillage (SS)] and two nitrogen application rates [N1 (200 kg/hm²), N2 (300 kg/hm²)] on soil water stability aggregate content, stability index and maize yield in 0–50 cm soil layers. [Results] Compared with RT and CT, SS and NT significantly increased by 8.3%, 10.7%, 16.7% and 19.3%, respectively, and N1 was significantly higher than N2. Tillage and nitrogen application significantly affected the content of aggregates in different soil layers, NT increased the content of aggregates with a particle size of >5 mm each soil layer at 0–50 cm, decreased the content of aggregates with a particle size of <0.25 mm, increased the content of aggregates with a particle size of 1–2 and 0.25–1 mm in soil layers of 5–10 cm with SS, and increased the content of aggregates with a particle size of 0.25–1 mm in soil layers of 0–5 and 5–10 cm in N1 treatment by 15.1 and 9.1 percentage points, respectively, compared with N2. NT can increase the average weight diameter (MWD) and geometric average diameter (GMD) of aggregates in each soil layer at 0–50 cm, and reduce the aggregation fragmentation rate (PAD). The effects of SS on MWD, GMD and PAD showed the characteristics of soil strata differentiation. The nitrogen application rate only affected the PAD of 10–30 and 30–50 cm soil layers, and N1 was significantly lower than that of N2 by 4.4% and 3.3%, respectively. Correlation analysis showed that soil volume quality and soil porosity were significantly negatively correlated with MWD and GMD, while maize yield was significantly positively correlated with GMD and MWD. [Conclusion] Under the experimental conditions, the application of N 200 kg/hm² combined with no tillage and subsoiling tillage can significantly improve the stability of soil agglomeration, improve soil structure and increase yield, and it is recommended to apply it in production.

Keywords: maize; tillage practices; nitrogen application; soil aggregates stability; crop yield

Received: 2024-11-27

Revised: 2025-03-03

Accepted: 2025-04-26

Online (www.cnki.net): 2025-05-20

良好的耕地质量直接关系到国家粮食安全、生态安全和农业可持续发展。稳定的土壤结构、适宜的土壤有机质质量分数与水分条件能促进作物生长,提高作物应对气候变化的能力与生产可持续性^[1]。土壤耕作能有效改善耕层土壤结构,调节土壤水、肥、气、热等关系^[2]。合理的耕作方法有利于增加表层土壤水分体积分数,增强土壤结构稳定性^[3]。目前,我国农业生产中土壤耕作仍以传统翻耕、旋耕为主。已有研究^[4]发现,长期连续翻耕破坏土壤团粒结构,加速土壤有机质的分解,长期旋耕形成坚硬的犁底层,导致耕层变浅、土壤结构恶化等问题。免耕能降低土壤体积质量,增强土壤结构稳定性和抵御土壤抗侵蚀能力,有效提高土壤保水性能,增加作物产量^[5]。但也有研究^[6]发现,长期免耕增加土壤紧实度,造成耕层富营养化,水分难以入渗等问题。深松耕能打破犁底层,增加耕作深度,降低土壤体积质量,促进作物根系下扎和深层土壤养分的利用,提高作物产量^[7]。但长期深耕也造成土壤孔隙过于疏松,土壤颗粒间的结合能力减弱,土壤养分流失^[8]。氮肥是农田土壤氮素的主要来源,适宜的氮肥用量有利于作物生长发育,提高作物产量与品质,改善土壤环境^[9]。但过量施氮造成作物产量下降、氮素利用效率降低、土壤质量恶化

等问题^[10]。

土壤团聚体作为土壤结构的基本单元,其组成与稳定性是决定土壤压实、板结和侵蚀等过程的重要指标,是评价耕地质量与肥力基础的关键参数^[11-12]。耕作通过扰动土壤,改变土壤物理性状,从而影响土壤团聚体稳定性。已有研究^[12]表明,传统翻耕、旋耕表层土壤易受水分、温度等外界因素的影响,导致土壤生物活性受到抑制,不仅使团聚体受到干扰,亦减少团聚体间胶结剂的产生。SIX等^[13]在研究长期耕作对团聚体影响时发现,翻耕、旋耕对团聚体的影响主要发生在表层,免耕土壤的大团聚体质量分数、稳定性均高于翻耕、旋耕土壤^[14]。免耕和深松耕通过减少扰动增加对土壤的保护,相对于翻耕、旋耕更利于促进团聚体形成,增强团聚体稳定性。适宜的氮肥用量能提高土壤团聚体稳定性,但过量施氮降低土壤微生物丰度及降低土壤团聚体稳定性,提高团聚体破碎率,导致土壤抗侵蚀能力减弱^[15]。陈津赛^[16]通过 3 a 试验发现,施氮显著降低土壤水稳定性团聚体的平均粒径,致使团聚体稳定性下降。但也有研究^[17]表明,长期施氮有效增加大团聚体比例,显著提高团聚体平均重量直径和几何平均直径,有利于团聚体稳定性的提高。

黄土高原半干旱区是我国典型的旱作农业区,该区土壤以黄绵土为主,质地松软,土层深厚,土壤粒径以粉粒为主,自身特性与长期不合理的利用,导致土壤耕层结构破坏,土壤肥力持续衰减^[18]。全膜双垄沟播玉米是区域典型的高产种植模式^[19],该技术以连年传统翻耕和旋耕为主,造成犁底层上移、耕层结构变差,氮肥的过量投入导致土壤板结、酸化、有机质质量分数降低等问题,严重影响作物产量。土壤团聚体是土壤耕层构建和耕地质量提升的重要内容。目前,该地区关于土壤团聚体的研究多在秸秆覆盖条件下开展,而对地膜覆盖条件下,尤其是全膜双垄沟播玉米高产系统在耕作方法与施氮双重影响下土壤团聚体变化的研究不足。因此,本试验依托全膜双垄沟播玉米耕作方法与施氮的长期定位试验,研究不同耕作方法与施氮量对土壤水稳定性团聚体及玉米产量的影响,探讨团聚体稳定性与作物产量间的相关性,以期从团聚体尺度比较不同耕作方法与施氮量对黄绵土土壤物理特性的影响,挖掘有利于改善该地区土壤结构的耕作方法与施氮量,为区域耕地质量培育提供理论与技术参考。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验于2022—2023年在甘肃省定西市甘肃农业大学旱作农业综合试验站(104° 74' N, 35° 46' E)进行,该区属中温带半干旱偏旱区,≥0℃积温2 934℃,≥10℃积温2 236.2℃。平均日照时间2 478 h;年平均气温6.4℃,多年平均无霜期为140 d;年蒸发量1 532.3 mm,试验区为典型一年一熟雨养农业区。0~20 cm土层土壤饱和导水率为28.4%,pH为8.32,有机质质量分数11.9 g/kg,全氮0.8 g/kg,全磷1.8 g/kg。2022年、2023年玉米生育期内降雨量分别为217.80、290.67 mm(图1)。试区土壤类型为典型黄绵土,质地较为均匀,土层绵软深厚,贮水性能较好。

表 1 试验地土壤主要理化性状

Table 1 Soil chemical and physical properties							
土层深度/cm	土壤体积质量/ (g·cm ⁻³)	有机碳/ (g·kg ⁻¹)	全氮/ (g·kg ⁻¹)	全磷/ (g·kg ⁻¹)	速效磷/ (mg·kg ⁻¹)	速效钾/ (mg·kg ⁻¹)	pH
0~5	1.21	7.63	0.85	1.89	13.3	349.6	8.4
5~10	1.23	7.46	0.81	1.92	11.9	330.2	8.3
10~30	1.32	6.93	0.78	1.82	4.9	244.0	8.4

1.3 测定项目与方法

1.3.1 土壤团聚体 2023年10月上旬玉米收获后在田间将各小区0~5、5~10、10~30、30~50 cm 4个土层的土壤原状土样品取出并放入硬质塑料盒中带回室

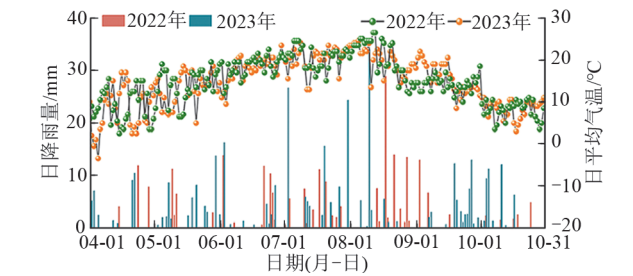


图 1 2022年、2023年试区玉米全生育期内降雨量与气温
Fig.1 Rainfall and temperature during the whole growth duration of maize in the experimental area in 2022 and 2023

1.2 试验设计

本试验依托于2012年在甘肃农业大学旱作综合试验站建立的全膜双垄沟播玉米耕作方法与施氮量长期定位试验。采用二因素裂区设计,主区设置4种耕作方法。翻耕(CT):用兰驼铧式犁翻耕机进行作业,深度20 cm,用人工全膜双垄沟播起垄机起大小垄(大垄高15 cm,宽70 cm;小垄高20 cm,宽40 cm)后完成覆膜作业;旋耕(RT):用1 GQN-125型旋耕机进行作业,深度15 cm;免耕(NT):不进行机械耕作,揭去旧膜后在原有垄沟的基础上用人工起垄器简单整理培垄,然后完成覆膜作业;深松耕(SS):用间隔深松机进行深松作业,深度35 cm,深松铲间隔40 cm。旋耕、深松耕起垄覆膜方式与翻耕一致。副区设置2种施氮水平,N1(200 kg/hm²):玉米收获后移除地表所有秸秆不揭膜,将农田免耕至翌年土壤解冻后,揭去旧膜,各小区基施N 200 kg/hm²;N2(300 kg/hm²):在N1基础上,于拔节期在副区用点播器穴施N 100 kg/hm²。各小区除基施氮肥外,再施用150 kg/hm²的磷肥,氮肥为尿素(N 46%),磷肥为过磷酸钙(P₂O₅16%)。各小区施基肥后进行土壤耕作。8个处理,3次重复,共24个小区,小区面积为44 m²(10 m×4.4 m)。覆膜完成后于每年4月下旬用点播器进行播种,10月上旬收获。玉米品种为“先玉335”,密度5.25万株/hm²(株距35 cm),试验地耕层基础理化性状见表1。

内,注意运输过程中避免受力。样品取回后将原状土中大土块沿土壤的自然裂痕剥离为约1 cm³的小块,剔除样品中的根系等杂物放置室内自然阴干^[20]。风干后分别过孔径为5、2、1、0.25 mm的筛子,将其分为>5、

2~5、1~2、0.25~1、<0.25 mm 5 个粒径,计算各粒径土样占比。依据干筛团聚体各粒级占比配制 100 g 的各粒径混合土样,采用湿筛法测定水稳定性团聚体,将混合土样放入直径约为 10 cm 的套筛中,再把套筛转入装有水的桶中,水面没入筛网套筛(孔径依次为 5、2、1、0.25 mm)浸泡 5 min。设置团聚体分析仪(DM200-IV 型,中国)转速 30 次/min,上下振幅为 4 cm,振荡 20 min。分离出 >5、2~5、1~2、0.25~1、<0.25 mm 的各粒径水稳定性团聚体,最后将各粒径放在 60 °C 下烘干,称重计算各粒径水稳定性团聚体的质量^[21]。

1.3.2 土壤体积质量和水分体积分数 玉米收获后采用烘干法测定各小区 0~5、5~10、10~30、30~50 cm 4 个土层土壤水分体积分数。采取环刀法测定收获后各小区 0~5、5~10、10~30、30~50 cm 土层的土壤体积质量。土壤孔隙度(%)=(1-土壤体积质量/比重)×100%,土壤比重近似值取 2.65 g/cm³。

1.3.3 玉米产量及产量构成因素 玉米成熟后在各小区内选取 10 株具有代表性植株带回室内进行考种,测定果穗穗粒数、穗行数、百粒重等指标,并将各小区玉米单独收获装袋,风干后脱粒,脱粒时测定各小区籽粒水分体积分数,以体积含水率 14% 为安全储藏水分进行换算,最后折算为 hm² 产量。

1.4 土壤水稳定性团聚体稳定指数

采用土壤团聚体平均重量直径(MWD)、几何平均直径(GMD)、团聚体破碎率(PAD)、分形维数(D)、土壤可侵蚀因子(K)、>0.25 mm 土壤水稳定性大团聚体质量分数($R_{>0.25}$)表征土壤水稳性团聚体稳定性^[22]。

$$MWD = \sum_{i=1}^n X_i W_i \quad (1)$$

$$GMD = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n M_i \ln x_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

$$PAD = (W_d - W_w) \times \frac{100}{W_d} \quad (3)$$

$$D = 3 - \frac{\lg \left(\frac{W_i}{m} \right)}{\lg \left(\frac{X_i}{X_{\max}} \right)} \quad (4)$$

$$R_{>0.25} = \frac{m_i}{m} \times 100\% \quad (5)$$

$$K = 7.954 \times \left\{ 0.0017 + 0.0494 \times \exp \left[-0.5 \times \left(\frac{\log GMD + 1.675}{0.6986} \right)^2 \right] \right\} \quad (6)$$

式中: X_i 为第*i*级粒径大小的团聚体平均粒径,mm; W_i 为粒径小于 X_i 的团聚体总重量,g; n 指筛子的个数; W_d 为>0.25 mm 粒径机械团聚体质量分数,%; W_w 为>0.25 mm 粒径水稳性团聚体质量分数,%; m 为各土样的总质量,g; $X_{\max}$ 为最大粒级的平均直径,mm; m_i 为>0.25 mm 粒径水稳性大团聚体质量,g。

1.5 数据统计与分析

采用 Excel 2019 与 Origin 2021 软件进行数据分析与作图,采用 SPSS 27.0 软件进行方差分析,采用 Duncan 新复极差法进行差异显著性检验与多重比较。

2 结果与分析

2.1 耕作方法与施氮量对土壤水稳定性团聚体组成的影响

由图 2 可知,耕作方法及施氮量显著影响土壤水稳定性团聚体质量分数。0~5 cm 土层>5 mm 粒径 NT 和 SS 较 RT、CT 分别提高 14.1%、20.2% 与 8.4%、14.4%;<0.25 mm 粒径 NT 和 SS 较 RT、CT 分别降低 2.0%、3.0% 与 1.2%、2.9%。5~10 cm 土层>5 mm 粒径土壤团聚体质量分数 NT 较 RT、CT 分别提高 13.3%、10.6%;1~2 mm 粒径 SS 较 RT、CT 分别提高 12.8%、13.7%;0.25~1 mm 粒径 SS 较 RT、CT 分别提高 8.2%、6.7%。10~30 cm 土层<0.25 mm 粒径 NT 较 RT、CT 分别降低 3.3%、4.2%。30~50 cm 土层>5 mm 粒径团聚体质量分数 NT 和 SS 较 RT 分别提高 9.3%、8.3%;0.25~1 mm 粒径 NT 较 CT 提高 12.2%。施氮量影响 0~5、5~10 cm 土层 0.25~1 mm 粒径团聚体质量分数,N1 较 N2 分别提高 15.7%、9.1%。

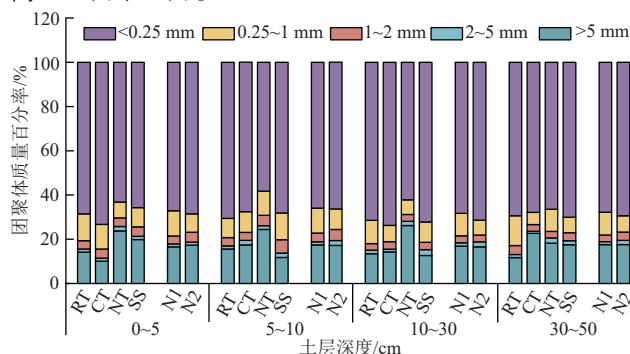


图 2 耕作方法与施氮量对土壤水稳定性团聚体质量分数的影响
Fig.2 Effects of tillage method and nitrogen application rate on soil water stability aggregate content

2.2 耕作方法与施氮量对土壤水稳定性团聚体稳定指数的影响

2.2.1 耕作方法与施氮量对土壤水稳定性大团聚体质量分数的影响 由图 3 可知,耕作方法显著影响土壤水稳定性大团聚体质量分数,施氮量对水稳定性大团聚体无显著影响。0~5 cm 土层 NT 和 SS 较 RT、CT 分

别增加4.2%、8.0%与2.0%、5.8%。5~10、10~30 cm土层NT较RT、CT分别增加9.3%、7.2%与7.9%、9.8%。30~50 cm土层NT较RT增加2.1%。

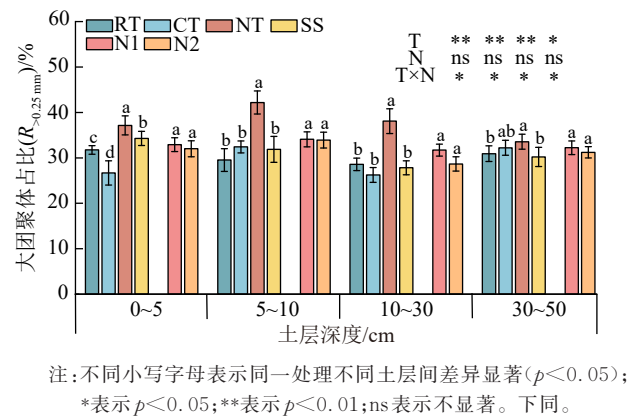


图3 耕作方法与施氮量对水稳定性大团聚体质量分数的影响
Fig.3 Effects of tillage methods and nitrogen application rates on the content of large aggregates in water stability

表2 不同耕作方法与施氮量下土壤水稳性团聚体MWD、GMD、分形维数(D)的变化

Table 2 Changes of soil water-stable aggregates MWD, GMD and fractal dimension D under different tillage methods and nitrogen application rates

因素	水平	0~5 cm			5~10 cm			10~30 cm			30~50 cm		
		MWD	GMD	D	MWD	GMD	D	MWD	GMD	D	MWD	GMD	D
耕作方法 (T)	RT	1.34±0.33c	0.31±0.03c	2.83±0.33b	1.42±0.13b	0.31±0.05bc	2.83±0.39a	1.27±0.33b	0.28±0.09b	2.83±0.14a	1.16±0.12c	0.29±0.02c	2.85±0.23a
		1.03±0.45d	0.26±0.07d	2.87±0.47a	1.58±0.20b	0.35±0.08b	2.80±0.28b	1.30±0.29b	0.27±0.07b	2.84±0.16a	1.64±0.26b	0.36±0.07ab	2.79±0.33b
	CT	2.04±0.21a	0.44±0.12a	2.74±0.38d	2.13±0.31a	0.49±0.01a	2.72±0.36c	2.22±0.22a	0.47±0.06a	2.71±0.54b	1.90±0.35a	0.39±0.01a	2.77±0.41c
		1.70±0.18b	0.38±0.15b	2.78±0.24c	1.20±0.27c	0.30±0.06c	2.84±0.25a	1.24±0.35b	0.29±0.09b	2.82±0.19a	1.57±0.27b	0.33±0.17	2.81±0.25b
	NT	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**	**
		1.57±0.13a	0.34±0.04a	2.82±0.34a	1.64±0.11a	0.37±0.03a	2.80±0.34a	1.50±0.23a	0.32±0.06a	2.82±0.15a	1.58±0.27a	0.34±0.02a	2.81±0.31a
	SS	1.50±0.25a	0.33±0.02a	2.81±0.28a	1.57±0.16a	0.36±0.07a	2.79±0.17a	1.52±0.29a	0.34±0.01a	2.81±0.23a	1.56±0.17a	0.33±0.06a	2.80±0.44a
		ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	RTN1	1.23±0.06c	0.30±0.01c	2.85±0.01b	1.43±0.04b	0.32±0.01b	2.82±0.01a	1.24±0.15b	0.26±0.03b	2.85±0.02a	1.18±0.06c	0.29±0.11c	2.85±0.21a
		1.02±0.02d	0.26±0.01d	2.88±0.03a	1.56±0.17b	0.35±0.03b	2.80±0.03a	1.36±0.02b	0.29±0.01b	2.83±0.11a	2.03±0.04a	0.35±0.02b	2.80±0.33b
耕作方法× 施氮量 (T×N)	CTN1	2.18±0.08a	0.47±0.02a	2.72±0.01d	2.18±0.12a	0.51±0.03a	2.71±0.02b	2.20±0.06a	0.45±0.04a	2.72±0.07b	1.60±0.08b	0.41±0.01a	2.75±0.34c
		1.86±0.04b	0.39±0.01b	2.76±0.02c	1.21±0.11b	0.30±0.03b	2.85±0.05a	1.20±0.01b	0.27±0.01b	2.86±0.23a	1.50±0.13b	0.32±0.03bc	2.82±0.14b
	NTN1	1.44±0.23c	0.3±0.02c	2.82±0.03b	1.41±0.12bc	0.30±0.05b	2.83±0.11a	1.29±0.01b	0.30±0.13b	2.84±0.45a	1.14±0.25b	0.29±0.07b	2.85±0.31a
		1.03±0.06d	0.27±0.03d	2.87±0.11a	1.59±0.24b	0.35±0.01b	2.79±0.23a	1.25±0.24b	0.28±0.02b	2.85±0.37a	1.78±0.38a	0.36±0.66a	2.79±0.47b
	SSN1	1.90±0.10a	0.41±0.01a	2.76±0.15d	2.09±0.33a	0.47±0.04a	2.73±0.05b	2.24±0.21a	0.49±0.04a	2.71±0.26b	1.68±0.09a	0.37±0.32a	2.78±0.56b
		1.62±0.49b	0.37±0.09b	2.79±0.07c	1.19±0.04c	0.31±0.02b	2.84±0.34a	1.28±0.33b	0.31±0.06b	2.83±0.23a	1.64±0.19a	0.35±0.14a	2.79±0.47c
	RTN2	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	*	*	**	**
		1.23±0.06c	0.30±0.01c	2.85±0.01b	1.43±0.04b	0.32±0.01b	2.82±0.01a	1.24±0.15b	0.26±0.03b	2.85±0.02a	1.18±0.06c	0.29±0.11c	2.85±0.21a
	CTN2	1.02±0.02d	0.26±0.01d	2.88±0.03a	1.56±0.17b	0.35±0.03b	2.80±0.03a	1.36±0.02b	0.29±0.01b	2.83±0.11a	2.03±0.04a	0.35±0.02b	2.80±0.33b
		2.18±0.08a	0.47±0.02a	2.72±0.01d	2.18±0.12a	0.51±0.03a	2.71±0.02b	2.20±0.06a	0.45±0.04a	2.72±0.07b	1.60±0.08b	0.41±0.01a	2.75±0.34c

注:表中数据为平均值±标准差;同列不同小写字母表示不同处理间差异显著($p<0.05$);*表示 $p<0.05$; **表示 $p<0.01$; ns表示不显著。下同。

2.2.3 耕作方法与施氮量对水稳性团聚体土壤可侵蚀性因子的影响 由图4可知,耕作方法显著影响土壤可侵蚀因子(K),施氮量对土壤可侵蚀因子(K)无显著影响,二者交互效应显著影响0~5、30~50 cm土层土壤可侵蚀因子(K)。0~5 cm土层NT和SS处理较RT、CT处理分别降低26.8%、37.8%与19.1%、28.6%。5~10、10~30 cm土层NT处理较RT、CT处理分别降低34.5%、27.8%。30~50 cm土层NT和SS处理较RT处理分别降低17.5%、11.7%。

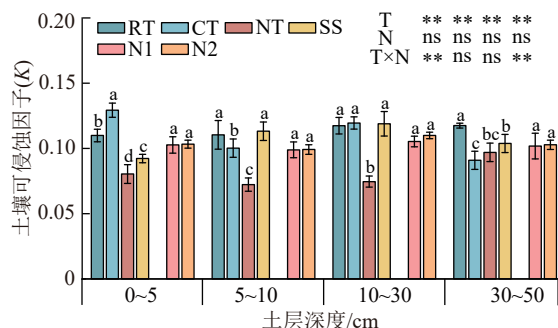


图4 耕作方法与施氮量对水稳性团聚体土壤可侵蚀性因子(K)的影响

Fig.4 Effects of tillage method and nitrogen application rate on soil erosibility factor *K* of water-stable aggregates

2.2.4 耕作方法与施氮量对团聚体破碎率的影响 由图5可知,耕作方法及施氮量显著影响不同土层团聚体破碎率。0~5 cm土层团聚体破碎率NT处理较RT、CT处理分别降低6.1%、14.3%,SS处理较CT处理降低13.9%。5~10、10~30 cm土层NT处理较RT、CT分别降低16.7%、14.9%与13.1%、16.3%。N1水平10~30、30~50 cm土层团聚体破碎率较N2水平分别降低4.3%、3.2%。

2.3 耕作方法与施氮量对土壤体积质量、孔隙度及土壤水分体积分数的影响

由表3可知,耕作方法及施氮量显著影响土壤体积质量、孔隙度及土壤水分体积分数。10~30 cm土层SS和NT土壤体积质量较RT分别降低1.6%、2.4%;30~50 cm土层NT较RT、CT分别降低2.4%、4.0%,SS较CT降低1.6%。10~30 cm土层NT和SS土壤孔隙度较CT分别提高4.0%、1.7%;30~50 cm土层NT较RT、CT分别提高2.1%、3.4%,SS较CT提高2.3%。0~5、5~10 cm土层NT土壤水分体积分数较RT、CT分别提高17.3%、35.0%与15.9%、8.9%;10~30 cm土层NT和SS较CT分别提高18.0%、6.7%;30~50 cm土层NT、SS较RT、CT分别提高21.8%、18.5%和14.7%、11.6%。N1水平0~5、5~10 cm土层土壤体积质量较N2分别降低2.0%、2.1%,土壤孔隙度较N2分别提高1.8%、2.6%。

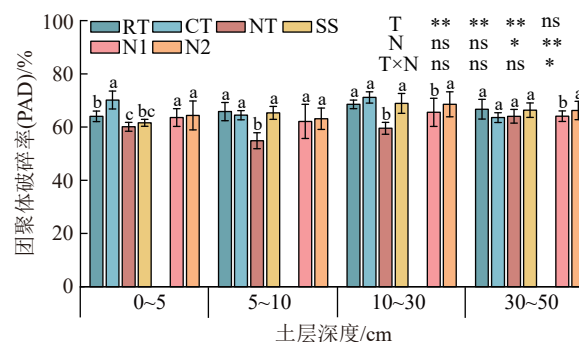


图5 耕作方法与施氮量对土壤团聚体PAD的影响

Fig.5 Effects of tillage methods and nitrogen application rates on soil aggregate PAD

2.4 耕作方法与施氮量对旱作玉米产量与产量构成的影响

由表4可知,2022年耕作方法显著影响玉米穗行数及籽粒产量。其中玉米穗行数NT较RT、CT分别提高6.6%与7.3%;NT、SS籽粒产量较CT分别提高10.1%、13.4%。施氮量显著影响玉米生物产量N1较N2提高5.0%。2023年耕作方法显著影响玉米籽粒产量与生物产量。NT、SS籽粒产量较RT、CT分别提高16.7%、19.3%与8.3%、10.7%,NT、SS生物产量较RT、CT分别提高19.2%、21.8%与8.7%、11.0%。施氮量显著影响玉米百粒重与籽粒产量,N1较N2分别提高8.6%、3.7%。

2.5 土壤团聚体稳定性指数、土壤体积质量、孔隙度及土壤水分体积分数与产量间的相关性分析

通过对团聚体稳定性指数、土壤体积质量、孔隙度、水分体积分数及玉米产量进行相关性分析(图6)表明,SP与GMD、MWD、SMC呈显著正相关,与PAD、K、D呈显著负相关。SBD与GMD、MWD、SMC呈显著负相关,与PAD、K、D呈显著正相关。GY与GMD、R、SMC呈极显著正相关,与PAD、K、D、SBD呈极显著负相关。GB与R、SMC、MWD、GMD呈显著正相关,与PAD、K、D呈显著负相关。

3 讨论

3.1 土壤水稳定性团聚体对耕作方法与施氮量的响应

土壤水稳定性团聚体与土壤结构稳定性及抗侵蚀能力密切相关^[23]。本研究表明,免耕、深松耕较旋耕、翻耕显著提高0~50 cm土层水稳性大团聚体质量分数,与董立国等^[24]研究结果一致。其原因可能是传统翻耕、旋耕耙耱易破坏土壤结构,导致土壤有机质损失,团粒间的胶结作用下降,使大粒径团聚体易发生崩解,形成更多不稳定的微团聚

体^[25]。团聚体 MWD、GMD、分形维数(*D*)及 PAD、土壤可侵蚀因子(*K*)通常用来反映土壤团聚体稳定性,GMD、MWD 值越大,表明土壤大团聚体质量分数越高,土壤结构越稳定;而分形维数(*D*)、团聚体 PAD、土壤可侵蚀因子(*K*)与之相反,值越小,土壤抗侵蚀能力及防止养分流失的能力越强。本研究发现,免耕、深松耕较其他耕作方法显著提高团聚体 GMD、MWD,降低分形维数(*D*)、PAD 及土壤可侵蚀性因子(*K*)。是由于免耕、深松耕通过减少对

土壤的扰动,降低土壤大团聚体转化为微团聚体的速率,有利于维持土壤结构稳定,为微生物建立适宜的活动场所,促进团聚体的团聚能力^[26]。本研究表明,N1(200 kg/hm²)较 N2(300 kg/hm²)处理能更好地提高水稳定性大团聚体质量分数及团聚体稳定性。是氮素水平过高加快土壤矿化速率,降低土壤有机质质量分数,导致团聚体间胶结剂难以产生,进而降低团聚体稳定性,使团聚体更容易破碎^[16]。

表 3 不同耕作方法与施氮量下土壤体积质量、孔隙度及水分体积分数的变化

Table 3 Changes in soil volume mass, porosity and water volume fraction under different tillage methods and nitrogen application rates

因素	水平	0~5 cm			5~10 cm			10~30 cm			30~50 cm		
		土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/ %	土壤水 分体积 分数/%	土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/ %	土壤水分 体积分 数/%	土壤体积 质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙度/ %	土壤水 分体积 分数/%	土壤体 积质量/ (g·cm ⁻³)	孔隙度 /%	土壤水 分体积 分数/%
耕作 方法(T)	RT	1.25± 0.01a	53.01± 0.32a	17.88± 2.03b	1.24± 0.01a	53.68± 0.40a	18.13± 1.39b	1.27± 0.02b	52.07± 0.68b	18.11± 1.06bc	1.23± 0.01ab	53.46± 0.52bc	16.73± 1.46b
		1.24± 0.01a	53.22± 0.34a	15.53± 1.96b	1.23± 0.02a	53.66± 0.80a	19.29± 1.05b	1.26± 0.01a	51.28± 0.54b	17.63± 1.28c	1.25± 0.02a	52.80± 0.94c	17.20± 0.54b
	CT	1.22± 0.02a	52.98± 0.79a	20.97± 0.42a	1.20± 0.01a	54.62± 0.39a	21.01± 0.61a	1.24± 0.01a	53.31± 0.84a	20.80± 1.17a	1.20± 0.01c	54.59± 0.19a	20.38± 1.22a
		1.23± 0.04a	52.97± 1.48a	18.23± 1.69b	1.22± 0.03a	53.57± 1.31a	18.22± 1.47b	1.25± 0.02a	52.16± 0.37a	18.81± 1.93b	1.22± 0.01bc	54.03± 0.37ab	19.19± 0.92a
	SS	ns	ns	**	ns	ns	**	*	*	*	**	**	**
	N1	1.23± 0.02a	53.77± 0.70a	19.14± 2.05a	1.21± 0.01b	54.37± 0.56a	19.40± 1.70a	1.25± 0.02a	52.66± 0.88a	18.71± 2.12a	1.22± 0.01a	54.01± 0.53a	18.09± 2.20a
		1.25± 0.02a	52.82± 0.87a	18.16± 2.08b	1.23± 0.02a	53.40± 0.89b	18.92± 1.57a	1.27± 0.02a	52.25± 0.62a	18.59± 1.85a	1.23± 0.02a	53.43± 1.04a	17.91± 1.29a
		**	**	ns	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
	N2	1.25± 0.01a	52.87± 0.37c	19.34± 1.35ab	1.23± 0.01a	53.60± 0.23c	19.38± 0.30b	1.26± 0.02a	52.57± 0.09b	18.73± 0.81ab	1.23± 0.02a	53.71± 0.58b	15.98± 1.74b
		1.23± 0.06b	53.48± 0.25b	17.38± 2.41b	1.22± 0.01a	54.29± 0.40b	19.93± 1.01b	1.27± 0.01a	52.00± 0.57b	17.41± 1.19b	1.22± 0.01a	53.52± 0.29b	17.23± 0.12b
	NTN1	1.21± 0.03c	54.42± 0.02a	21.14± 0.38a	1.20± 0.03b	54.89± 0.13a	21.29± 0.56a	1.22± 0.02b	53.86± 0.88a	20.43± 1.23a	1.20± 0.01b	54.59± 0.22a	21.06± 1.02a
耕作方 法×施 氮量 (T×N)	SSN1	1.22± 0.02ab	54.31± 0.28a	18.72± 2.07ab	1.21± 0.05a	54.69± 0.12ab	17.01± 0.25c	1.25± 0.04ab	52.20± 0.18b	19.28± 2.89ab	1.21± 0.01ab	54.21± 0.22ab	19.08± 1.21b
	RTN2	1.24± 0.01b	53.16± 0.25a	16.42± 1.44b	1.23± 0.02bc	53.77± 0.58ab	16.89± 0.28c	1.28± 0.02a	51.58± 0.63b	17.49± 1.01b	1.24± 0.01b	53.21± 0.38b	17.48± 0.78b
		1.25± 0.04b	52.96± 0.16a	17.68± 1.93b	1.24± 0.01ab	53.03± 0.49bc	18.65± 0.70b	1.26± 0.01b	52.56± 0.40a	17.37± 1.42b	1.27± 0.02a	52.08± 0.75c	17.17± 0.85b
	NTN2	1.23± 0.02b	53.53± 0.97a	20.81± 0.47a	1.21± 0.01c	54.35± 0.36a	20.73± 0.61a	1.25± 0.01b	52.75± 0.21a	21.17± 1.24a	1.20± 0.01c	54.59± 0.22a	19.69± 1.12a
	SSN2	1.28± 0.01a	51.64± 0.20b	17.74± 1.47b	1.26± 0.02a	52.46± 0.75c	19.42± 0.99ab	1.27± 0.01ab	52.11± 0.55ab	18.33± 0.48b	1.22± 0.01bc	53.84± 0.44ab	19.30± 0.42b
		**	**	ns	**	**	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns

3.2 全膜双垄沟播生产体系下耕作方法与施氮量显著影响玉米产量

黄土高原半干旱区水热资源严重不足,全膜双垄

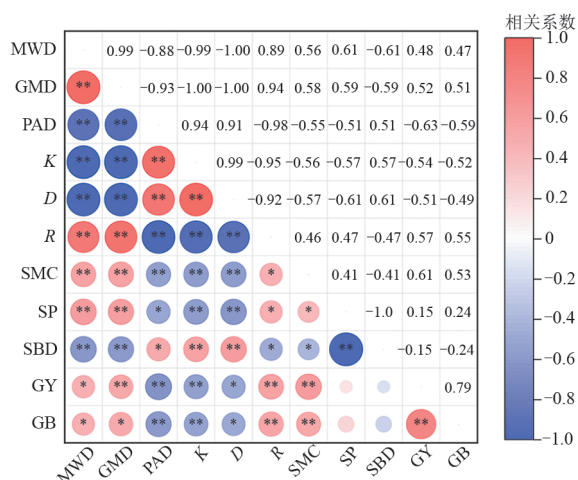
沟播玉米集成地膜覆盖抑蒸保墒、沟垄集雨与 C₄作物高光效于一身的生产模式,有效地提高玉米产量及水分利用效率^[19]。但该地区连年传统翻耕导致土壤表土疏

松裸露、易蚀、蓄水保墒效果差、影响作物春播出苗率，导致作物产量低而不稳^[19]。本研究结果表明，2种施氮水平下，免耕与深松耕较传统旋耕、翻耕显著提高玉米穗行数、籽粒产量与生物产量。分析其原因因为深松耕、免耕可有效改善土壤结构，增加土壤保水能力，减少水分蒸发及流失，提高作物水分利用效率，从而促进玉米增产^[27]。氮素是玉米生长发育进程中不可或缺的重要营养元素之一，但氮肥的过度施用导致农田土壤板结、耕层变浅、加剧土壤酸化、降低作物产量等一系列问

题^[28]。本研究表明，N1水平玉米百粒重较N2显著提高8.6%，籽粒产量较N2显著提高3.7%。分析其原因可能是，随着施氮量增加，外源氮素介入过多，导致土壤C/N受到影响，使作物生长难以发挥其最大潜能^[29]；另一方面，干旱地区高施氮水平下作物易受水分胁迫的影响，使叶片叶绿素质量分数降低，光合能力下降，叶片气孔关闭，阻碍二氧化碳的进入，使光合碳同化过程受到抑制，导致光合速率降低，光合产物积累减少，无法满足作物生长发育的需求，最终影响作物产量^[30]。

表 4 耕作方法与施氮量对玉米产量及产量构成的影响

Table 4 Effects of tillage methods and nitrogen application rates on yield and yield composition of maize							
年份	因素	水平	穗行数/行	穗粒数/粒	百粒重/g	籽粒产量/(kg·hm ⁻²)	生物产量/(kg·hm ⁻²)
2022	耕作方法(T)	RT	16.34±0.28b	537.93±40.10b	26.83±4.80a	8 457.6±360.9ab	22 231.6±1 755.3a
		CT	16.22±0.40b	544.20±40.65b	27.80±3.01a	7 763.4±899.8b	21 814.8±2 093.8a
		NT	17.41±0.85a	629.74±97.21a	30.21±5.60a	8 543.8±930.8a	23 384.5±2 587.3a
		SS	16.64±0.40b	563.30±47.53ab	28.91±2.92a	8 804.4±449.4a	22 521.5±1 030.6a
	施氮量(N)		**	ns	ns	*	ns
		N1	16.61±0.48a	579.88±55.11a	28.77±5.27a	8 270.9±770.03b	23 035.8±1 740.4a
		N2	16.69±0.86a	557.69±79.94a	28.10±2.86a	8 263.7±755.3a	21 940.4±1 989.3b
			ns	ns	ns	ns	*
	耕作方法× 施氮量(T×N)	RTN1	16.48±0.67bc	569.69±107.96ab	28.57±8.65a	8 389.6±852.5ab	22 974.5±3 204.0a
		CTN1	16.03±0.56c	529.41±22.48ab	26.05±3.88a	7 530.5±610.1c	21 863.5±465.5a
		NTN1	17.19±0.51ab	630.75±44.44a	31.85±2.61a	8 409.5±599.5ab	24 067.7±615.5a
		SSN1	16.74±0.50abc	589.69±32.92ab	28.61±5.23a	8 753.9±440.3a	23 237.5±1 792.7a
		RTN2	16.20±0.59bc	506.16±81.38ab	31.35±3.62a	7 854.9±756.4b	21 225.7±1 295.3a
		CTN2	16.40±0.23bc	558.99±40.66ab	36.92±0.93a	7 996.2±224.2b	21 766.2±862.6a
		NTN2	17.63±0.36a	628.72±20.56ab	35.71±0.83a	8 678.1±136.8a	22 701.2±1 406.7a
		SSN2	16.53±1.69bc	536.91±121.64ab	36.51±4.13a	8 525.6±657.7a	22 068.4±2 354.6a
			*	ns	ns	*	**
2023	耕作方法(T)	RT	15.53±0.50ab	610.18±65.76a	24.36±1.54ab	7 552.4±481.0c	20 116.2±1 121.0b
		CT	14.73±0.88b	518.81±74.42b	22.79±1.88b	7 389.7±214.1c	19 689.7±221.3c
		NT	15.77±0.63a	580.69±42.40ab	26.16±3.37a	8 813.5±615.2a	23 975.1±1 752.4a
		SS	15.52±0.54ab	608.35±26.10a	24.14±1.49ab	8 178.7±320.6b	21 858.4±1 582.7b
	施氮量(N)		ns	ns	ns	**	**
		N1	15.30±0.82a	578.56±73.91a	25.37±2.81a	8 255.6±1 088.0a	21 207.9±3 087.2a
		N2	15.48±0.66a	580.45±55.87a	23.36±23.36b	7 961.5±952.3a	21 861.8±3 007.5a
			ns	ns	*	*	ns
	耕作方法× 施氮量 (T×N)	RTN1	15.70±0.46a	633.08±62.17a	24.98±0.40b	7 835.8±119.3cd	20 489.0±1 419.1b
		CTN1	14.28±0.48b	487.58±58.09b	23.12±2.41b	7 258.8±200.4 e	19 542.0±327.5c
		NTN1	15.58±0.92a	581.69±61.59ab	28.70±2.83a	8 978.5±529.2a	24 325.5±3 443.5a
		SSN1	15.62±0.57a	611.91±21.35a	24.68±2.09b	8 949.3±599.1bcd	20 475.2±3 821.5b
		RTN2	15.37±0.59ab	587.28±73.31ab	22.47±2.15b	7 268.9±568.4d	20 743.3±1 543.5b
		CTN2	15.17±1.07ab	550.04±86.86ab	23.62±1.80b	7 520.7±151.2 e	19 837.4±179.5c
		NTN2	15.97±0.21a	579.70±26.42ab	23.75±0.71b	8 648.5±292.2ab	23 624.8±1 310.9a
		SSN2	15.41±0.62ab	604.78±34.77a	23.60±0.55b	8 408.1±277.4abc	23 241.6±554.7a
			ns	ns	*	**	**



注: GMD、MWD、PAD、K、D、R、SMC、SP、SBD、GY、GB 分别表示平均重量直径、几何平均直径、团聚体破碎率、土壤可侵蚀因子、分形维数、>0.25 mm 团聚体占比、土壤水分体积分数、土壤孔隙度、土壤体积质量、籽粒产量和生物产量。

图6 团聚体稳定指数、土壤体积质量、孔隙度、水分体积分数与玉米产量间的相关分析

Fig.6 Correlation analysis between aggregate stability index, soil volume mass, porosity, water volume fraction and maize yield

3.3 土壤物理性状与玉米产量的关系

相关性分析表明,团聚体稳定性与土壤体积质量呈显著负相关,与土壤孔隙度、土壤水分体积分数呈显著正相关。分析其原因,土壤体积质量过大导致土壤紧实度增加,土壤生物活动受到限制,土壤胶结物质分泌减少,不利于土壤团聚体维持稳定。较大的孔隙度有利于土壤微生物活动保持土壤水分,增强微生物分泌胶结物质,促进团聚体稳定性的提高。团聚体稳定性与玉米产量呈显著正相关。因为具有稳定团粒结构的土壤松紧程度适中,土壤通气保温保水性能较好,作物扎根条件良好,能够从水、肥、气、热等诸多方面满足作物生长发育的需求,从而获得高产^[31]。谢军红等^[32]通过对全膜双垄沟播玉米不同耕作方法的研究发现,免耕、深松耕较传统翻耕、旋耕能显著降低土壤体积质量,同时增加土壤孔隙度。本研究中2种施氮量下,免耕、深松耕较翻耕、旋耕均能显著降低土壤体积质量,增大土壤孔隙度及土壤水分体积分数。土壤水分体积分数、土壤孔隙度与玉米产量呈显著正相关,土壤体积质量与作物产量存在负相关。是因为连续连年翻耕对地表土壤结构造成破坏,同时,在作物生育期内土壤因受到外界环境因素的干扰,不断堵塞大孔隙,从而使得地表土壤体积质量增大;免耕、深松耕通过减少对土壤的扰动,促进土壤稳定性大团聚体的形成^[17],有利于维持良好的土壤结构,使土壤有效毛细管数量增加,土壤孔隙连续性得到改善^[33],利于土壤水分贮存与

气体交换,促进作物生长^[34]。

4 结论

黄土高原半干旱区全膜双垄沟播玉米生产体系中,耕作、施氮水平与二者交互效应显著影响土壤水稳性团聚体稳定性指数及玉米产量。其中,免耕、深松耕通过降低土壤体积质量,增大土壤孔隙度及土壤保水能力来提高团聚体稳定性,维持耕地土壤结构,促进玉米增产。低施氮水平较高施氮水平显著降低表层土壤体积质量、增大孔隙度,提高表层土壤0.25~1 mm 粒径团聚体质量分数,降低深层土壤团聚体破碎率,提高玉米产量。在200 kg/hm²施氮水平下免耕、深松耕能改善地区耕地土壤结构,提升耕地土壤质量,有利于土壤保持肥力,促进玉米增产。

参考文献:

- [1] 丁文成,宋大利,周卫.我国耕地质量主控因素及提升策略[J].植物营养与肥料学报,2024,30(8):1580-1594.
DING W C, SONG D L, ZHOU W. Dominant factors driving the farmland quality in China and strategies for improvement[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2024, 30(8): 1580-1594.
- [2] 蒋云峰,屈明秋,王月,等.不同耕作方式对耕层土壤性质的影响[J].吉林师范大学学报(自然科学版),2016,37(1):144-146.
JIANG Y F, QU M Q, WANG Y, et al. Effects of different tillage methods on the soil properties [J]. Jilin Normal University Journal (Natural Science Edition), 2016, 37(1): 144-146.
- [3] 隋鹏祥,罗洋,李瑞平,等.不同耕作措施土壤结构特征及其影响因素的研究进展[J].玉米科学,2022,30(4):83-89.
SUI P X, LUO Y, LI R P, et al. Research progress on the effects of tillage on soil structure in dry farming regions[J]. Journal of Maize Sciences, 2022, 30(4): 83-89.
- [4] 王立春,马虹,郑金玉.东北春玉米耕地合理耕层构造研究[J].玉米科学,2008,16(4):13-17.
WANG L C, MA H, ZHENG J Y. Research on rational plough layer construction of spring maize soil in northEast China[J]. Journal of Maize Sciences, 2008, 16(4): 13-17.
- [5] 蒋发辉,钱泳其,郭自春,等.基于Meta分析评价东北黑土地保护性耕作与深耕的区域适宜性:以作物产量为例[J].土壤学报,2022,59(4):935-952.
JIANG F H, QIAN Y Q, GUO Z C, et al. Evaluating the regional suitability of conservation tillage and deep tillage based on crop yield in the black soil of northeast China: A meta-analysis [J]. Acta Pedologica Sinica, 2022, 59(4): 935-952.
- [6] PITTELKOW C M, LIANG X Q, LINQUIST B A, et al. Productivity limits and potentials of the principles of

- conservation agriculture [J]. *Nature*, 2015, 517 (7534): 365-368.
- [7] MU X Y, ZHAO Y L, LIU K, et al. Responses of soil properties, root growth and crop yield to tillage and crop residue management in a wheat-maize cropping system on the north China plain [J]. *European Journal of Agronomy*, 2016, 78:32-43.
- [8] 郭墅. 玉米保护性耕作及全程机械化种植技术的研究与示范[D]. 长春: 吉林农业大学, 2015.
- GUO S. Research and demonstration of maize conservation tillage and whole-process mechanized planting technology[D]. Changchun: Jilin Agricultural University, 2015.
- [9] 赵亚南, 徐霞, 黄玉芳, 等. 河南省小麦、玉米氮肥需求及节氮潜力[J]. *中国农业科学*, 2018, 51(14):2747-2757.
- ZHAO Y N, XU X, HUANG Y F, et al. Nitrogen requirement and saving potential for wheat and maize in Henan Province[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(14):2747-2757.
- [10] 丁永刚, 李福建, 王亚华, 等. 稻茬小麦氮高效品种产量构成和群体质量特征[J]. *作物学报*, 2020, 46(4):544-556.
- DING Y G, LI F J, WANG Y H, et al. Characteristics of yield components and population quality in high-nitrogen-utilization wheat cultivars [J]. *Acta Agronomica Sinica*, 2020, 46(4):544-556.
- [11] 安婉丽, 高灯州, 潘婷, 等. 水稻秸秆还田对福州平原稻田土壤水稳性团聚体分布及稳定性影响[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(5):1833-1840.
- AN W L, GAO D Z, PAN T, et al. Effect of rice straw returning on paddy soil water-stable aggregate distribution and stability in the paddy field of Fuzhou plain [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(5):1833-1840.
- [12] 武均, 蔡立群, 齐鹏, 等. 不同耕作措施下旱作农田土壤团聚体中有机碳和全氮分布特征[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(3):276-284.
- WU J, CAI L Q, QI P, et al. Distribution characteristics of organic carbon and total nitrogen in dry farmland soil aggregates under different tillage methods in the Loess Plateau of central Gansu Province [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(3):276-284.
- [13] SIX J, PAUSTIAN K, ELLIOTT E T, et al. Soil structure and organic matter: Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2000, 64(2):681-689.
- [14] 金鑫鑫, 汪景宽, 孙良杰, 等. 稳定 ^{13}C 同位素示踪技术在农田土壤碳循环和团聚体固碳研究中的应用进展[J]. *土壤*, 2017, 49(2):217-224.
- JIN X X, WANG J K, SUN L J, et al. Progress of carbon cycle in farmland and sequestration in soil aggregates revealed by stable ^{13}C Isotope [J]. *Soils*, 2017, 49(2):217-224.
- [15] 姚俊红, 武俊男, 王呈玉, 等. 长期不同施氮量下黑土团聚体稳定性及有机碳质量分数的变化[J]. *农业环境科学学报*, 2024, 43(1):102-110.
- YAO J H, WU J N, WANG C Y, et al. Changes in aggregates stability and organic carbon content of black soil following the use of different long-term nitrogen application rates [J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2024, 43(1):102-110.
- [16] 陈津赛. 水氮管理对滴灌冬小麦耕层土壤团聚体及碳氮排放的影响[D]. 北京: 中国农业科学院, 2021.
- CHEN J S. Effect of water and nitrogen management on soil aggregates in plough layer and carbon and nitrogen emissions of winter wheat [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2021.
- [17] 刘红梅, 李睿颖, 高晶晶, 等. 保护性耕作对土壤团聚体及微生物学特性的影响研究进展[J]. *生态环境学报*, 2020, 29(6):1277-1284.
- LIU H M, LI R Y, GAO J J, et al. Research progress on the effects of conservation tillage on soil aggregates and microbiological characteristics [J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2020, 29(6):1277-1284.
- [18] 涂坤, 胡斐南, 许晨阳, 等. 小麦秸秆及其生物炭添加对黄绵土表面电化学性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(1):360-367.
- TU K, HU F N, XU C Y, et al. Effect of wheat straw and its biochar addition on surface electrochemical characteristics of loessal soil [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(1):360-367.
- [19] 谢军红, 张仁陟, 李玲玲, 等. 耕作方法对黄土高原旱作玉米产量和土壤水温特性的影响[J]. *中国生态农业学报*, 2015, 23(11):1384-1393.
- XIE J H, ZHANG R Z, LI L L, et al. Effect of different tillage practice on rain-fed maize yield and soil water/temperature characteristics in the Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2015, 23(11):1384-1393.
- [20] 王利文, 齐鹏, 张连科, 等. 陇中黄土高原不同类型土壤团聚体稳定性及抗蚀性研究[J]. *国土与自然资源研究*, 2024(3):40-45.
- WANG L W, QI P, ZHANG L K, et al. Study on stability and anti-erodibility of different types of soil aggregates in the Loess Plateau of central Gansu Province [J]. *Territory and Natural Resources Study*, 2024(3):40-45.
- [21] 杨琼会. 轮作和秸秆还田对水稻土团聚体及固碳特征的影响[D]. 四川 绵阳: 西南科技大学, 2021.
- YANG Q H. Effects of crop rotation and straw returning on paddy soil aggregates and carbon sequestration characteristics [D]. Mianyang, Sichuan: Southwest University of Science and Technology, 2021.
- [22] 白芹菲, 王艳琪, 鲍玉海, 等. 黑龙江水库消落带植被恢复模式对土壤水稳性团聚体组成及其稳定性的影响[J].

- 水土保持学报, 2024, 38(3): 168-176.
- BAI Q F, WANG Y Q, BAO Y H, et al. Effects of vegetation restoration patterns on soil water-stable aggregates composition and their stability in the water level fluctuation zone of the Heilongtan Reservoir [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(3): 168-176.
- [23] 吴宪, 张婷, 王蕊, 等. 化肥减量配施有机肥和秸秆对华北潮土团聚体分布及稳定性的影响[J]. 生态环境学报, 2020, 29(5): 933-941.
- WU X, ZHANG T, WANG R, et al. Effects of chemical fertilizer reduction combined with application of organic fertilizer and straw on fluvo-aquic soil aggregate distribution and stability in north China [J]. Ecology and Environmental Sciences, 2020, 29(5): 933-941.
- [24] 董立国, 白晓雄, 许浩, 等. 免耕和休耕改善黄绵土水稳性团聚体组成及稳定性[J]. 土壤与作物, 2024, 13(3): 294-304.
- DONG L G, BAI X X, XU H, et al. No-tillage and fallow improve the composition and stability of soil water-stable aggregates for cultivated loessial soils [J]. Soils and Crops, 2024, 13(3): 294-304.
- [25] 曹琪琪, 肖辉杰, 刘涛, 等. 乌兰布和沙漠东北部不同耕作年限农田土壤有机碳密度及其影响因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2628-2634.
- CAO Q Q, XIAO H J, LIU T, et al. Soil organic carbon density and its influencing factors in croplands with different cultivation years in the northeastern Ulan Buh Desert, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2628-2634.
- [26] ABDULLAH A S. Minimum tillage and residue management increase soil water content, soil organic matter and canola seed yield and seed oil content in the semiarid areas of northern Iraq [J]. Soil and Tillage Research, 2014, 144: 150-155.
- [27] 公臣, 王世伟, 冯尚宗, 等. 不同耕作施肥模式对夏玉米干物质积累、产量和氮肥利用率的影响[J]. 山东农业科学, 2024, 56(8): 96-102.
- GONG C, WANG S W, FENG S Z, et al. Effects of cultivation and fertilization modes on dry matter accumulation, yield and nitrogen use efficiency of summer maize [J]. Shandong Agricultural Sciences, 2024, 56(8): 96-102.
- [28] 张福锁, 王激清, 张卫峰, 等. 中国主要粮食作物肥料利用率现状与提高途径[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 915-924.
- ZHANG F S, WANG J Q, ZHANG W F, et al. Nutrient use efficiencies of major cereal crops in China and measures for improvement [J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(5): 915-924.
- [29] 孙晨, 胡树平, 孙继颖, 等. 氮肥配施生物炭对土壤性状及春玉米根系特性的影响[J]. 玉米科学, 2024, 32(3): 93-100.
- SUN C, HU S P, SUN J Y, et al. Effects of nitrogen fertilizer combined with bio-char on soil properties and root characteristics of spring maize [J]. Journal of Maize Sciences, 2024, 32(3): 93-100.
- [30] 杨阳, 申双和, 王润元, 等. 干旱胁迫对半干旱雨养区春小麦生长发育及产量的影响[J]. 江苏农业科学, 2019, 47(3): 82-85.
- YANG Y, SHEN S H, WANG R Y, et al. Effects of drought stress on growth and yield of spring wheat in semi-arid rainfed region [J]. Jiangsu Agricultural Sciences, 2019, 47(3): 82-85.
- [31] 余海英, 彭文英, 马秀, 等. 免耕对北方旱作玉米土壤水分及物理性质的影响[J]. 应用生态学报, 2011, 22(1): 99-104.
- YU H Y, PENG W Y, MA X, et al. Effects of no-tillage on soil water content and physical properties of spring corn fields in semiarid region of northern China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2011, 22(1): 99-104.
- [32] 谢军红, 李玲玲, 张仁陟, 等. 一膜两年覆盖条件下耕作方法对旱作玉米产量及土壤物理性状的影响[J]. 水土保持学报, 2016, 30(3): 184-189.
- XIE J H, LI L L, ZHANG R Z, et al. Effect of tillage system on rain-fed maize yield and soil physical characteristics for one film used two years [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2016, 30(3): 184-189.
- [33] 潘雅文, 樊军, 郝明德, 等. 黄土塬区长期不同耕作、覆盖措施对表土理化性状和玉米产量的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2016, 22(6): 1558-1567.
- PAN Y W, FAN J, HAO M D, et al. Effects of long-term tillage and mulching methods on properties of surface soil and maize yield in tableland region of the Loess Plateau [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2016, 22(6): 1558-1567.
- [34] 刘敏, 赵财, 范虹, 等. 长期间作及免耕对土壤物理性状及作物产量的影响[J]. 中国农学通报, 2023, 39(2): 28-35.
- LIU M, ZHAO C, FAN H, et al. Effects of long-term intercropping and no-tillage on soil physical properties and crop yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2023, 39(2): 28-35.