

轮耕对冬春休闲旱地土壤结构及团聚体稳定性的影响

赵 冀¹,王 维^{1,2},张 鹏¹,侯贤清¹,贾志宽¹,韩清芳¹
(1.农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室/西北农林科技大学农学院,陕西 杨凌 712100;
2.宣化科技职业学院,河北 张家口 075100)

摘 要: 为了探索半干旱区合理的耕作制度,改善旱地土壤结构,提高农田生产力,于 2007—2010 年在宁南旱区进行了冬闲期免耕/深松/深松(N/S/S)、深松/免耕/免耕(S/N/N)、连年免耕(NT)及连年翻耕(CT)4 种不同耕作模式试验,研究了轮耕对土壤孔隙度、团聚体结构组成及其稳定性的影响。结果表明,N/S/S 轮耕处理较 CT 和 NT 显著降低了冬春休闲旱作农田 0~20 cm 土层的土壤容重和土壤孔隙度,降低幅度 2.5%~3.1%,较 S/N/N 轮耕处理 20~40 cm 土层土壤孔隙度提高了 2.8%($P<0.05$);NT 处理与 S/N/N 轮耕处理 0~40 cm 土层 >0.25 mm 机械稳定性与水稳性团聚体含量、平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)均高于翻耕处理。连续两年以上免耕处理(NT 和 S/N/N)能够促进旱作农田土壤团聚体的形成,增加了土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径,降低了土壤团聚体的破坏率,提高了土壤的结构稳定性。

关键词: 轮耕;团聚体;平均重量直径;几何平均直径;土壤容重;土壤孔隙度
中图分类号: S152.4 **文献标志码:** A

Effects of rotation tillage patterns on soil aggregates stability and soil structure of the dry land in winter and spring fallow period

ZHAO Ji¹, WANG Wei^{1,2}, ZHANG Peng¹, HOU Xian-qing¹, JIA Zhi-kuan¹, HAN Qing-fang¹
(1. Key Laboratory of Crop Physiological Ecology and Tillage in Northwestern Loess Plateau, Minister of Agriculture/ College of Agronomy, Northwest A&F University, Shaanxi, 712100, China;
2. Xuanhua Vocational College of Science and Technology, Hebei, Zhangjiakou, 075100, China)

Abstract: To further explore the reasonable farming system in semiarid area, the effects of rotation tillage patterns on soil aggregates stability and soil structure of the dry land in winter and spring fallow period were conducted in south Ningxia from 2007 to 2010. There were four tillage treatments: no-tillage→subsoiling tillage→subsoiling tillage (N/S/S), subsoiling tillage→subsoiling tillage→no-tillage (S/N/N), no-tillage→no-tillage→no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) as control. The effects of different tillage patterns on soil porosity, composition and stability of soil aggregate were examined. The results showed that in 0~20 cm soil layer, the soil bulk density and the soil porosity of N/S/S was significantly ($P<0.05$) decreased by 2.5%~3.1% compared with CT and NT. The soil porosity in 20~40 cm soil layer of N/S/S was significantly increased by 2.8% compared with S/N/N ($P<0.05$). NT and S/N/N treatments were higher content of mechanically stable aggregates, water-stable aggregates, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) than CT in 0~40 cm soil layer. No-tillage more than two consecutive years(NT and S/N/N) could increase the mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD) of soil aggregates, and decreased the destruction rate of aggregate, which could improved the soil structure stability and increased soil aggregates contents in semiarid regions.

Keywords: rotational tillage; soil aggregates; mean weight diameter (MWD); geometric mean diameter (GMD); soil bulk density; soil proosity

收稿日期:2017-03-27 修回日期:2017-05-03
基金项目:国家“十二五”863 课题(2013AA102902);“十二五”国家科技支撑计划课题(2012BAD09B03);高等学校学科创新引智计划项目(B12007);公益性行业(农业)项目(201303104)
作者简介:赵 冀(1989—),男,河北承德人,硕士,研究方向为作物高效栽培。E-mail:1518006807@qq.com。
通信作者:韩清芳,女,博士,教授,主要从事旱作节水农业理论与技术研究。E-mail: hanqf88@nwfau.edu.cn。

我国旱作农业区主要分布于年降水 350 ~ 550 mm 的半干旱地区,其中大量旱耕地以“春种秋收”一熟制为主要的种植制度,具有长达 6 个多月(10 月中旬—翌年 4 月)的冬春休闲期,传统的土壤耕作技术以单一的翻耕或免耕为主,给土壤带来不利影响,阻碍作物增产及农业的可持续发展。长期免耕会导致土壤出现有机碳和养分表层富集层化等质量问题^[1-2];而长期翻耕则会导致表层土壤结构稳定性和团聚体质量下降,加剧农田表层土壤的流失和风蚀^[3-4]。尤其近年来推广休耕、少耕、免耕为主的保护性耕作后,出现了土壤变硬、容重增大的问题,影响作物根系发育及对水分和养分的吸收,产量出现下降的趋势^[5]。针对连续翻耕和连续少免耕带来的诸多问题,合理组合土壤耕作措施,建立旱地适宜的翻耕、深松、免耕等轮耕技术体系对农田土壤健康发展具有重要意义。

旱地土壤耕作的目的是建立适宜作物生长的土壤环境条件,通过土壤的“蓄水保墒”促进作物增产。在干旱和半干旱地区,土壤团聚体的分布和稳定性与水分利用和土壤风蚀都有密切的联系^[6],不同大小的团聚体在营养元素的保持、供应及转化能力等方面发挥着不同的作用^[7],其组成和稳定性直接影响土壤肥力和农作物的生长^[8-9]。有研究表明,耕作与施肥等农田管理措施不仅影响团聚体的形成与数量,而且还对团聚体的稳定性有重要的影响^[10]。耕作方式会影响微团聚体与大团聚体之间的转化和再分布^[11],进而影响土壤结构稳定性和抗侵蚀能力^[12]。Dalal 等^[13]认为保护性耕作措施能使土壤表层的结构稳定性和有机碳含量得到一定程度的恢复。与常规耕作相比,保护性耕作可以降低土壤侵蚀,增加水稳性大团聚体及其结构稳定性,改善土壤结构。耕作扰动不仅不利于团聚体的形成,而且会降低大团聚体的稳定性^[14]。王殿武等^[15]认为,少免耕较传统耕作土壤紧实度增加,> 0.05 mm 微团聚体含量、结构系数和团聚水平明显高于传统耕作,明显促进了水稳性团聚体的形成,提高了土壤的保水性能。周虎等^[16]研究认为免耕使土壤的容重明

显增加,翻耕可使耕层土壤保持较低的容重值,但不利于土壤团聚体,尤其是水稳性团聚体的形成。大量研究认为,免耕、少耕等保护性耕作措施有利于增加团聚体含量,改善表层土壤结构^[17-18]。

近年来,由于保护性耕作在我国的推广应用加快,对保护性耕作技术的研究已不再仅关注土壤耕作技术本身及对当季作物生长的影响,而更注重耕作制度的周期、土壤轮耕及作物轮作等综合技术配置及其效应^[19]。为此,本文在西北黄土高原半干旱区的宁南山区,研究不同轮耕模式对旱地土壤物理性状、团聚体结构特征及其稳定性的影响,为完善旱地耕作技术体系,改良土壤物理结构、提高旱作农田生产力提供理论参考及技术支持。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2007 年 10 月—2010 年 9 月在宁夏回族自治区彭阳县白阳镇旱作农业试验区进行。该区海拔 1 800 m,年平均气温 6℃ ~ 8.5℃,无霜期 147 ~ 168 d,年降雨量 350 ~ 450 mm,全年 56%降水集中分布在 7—9 三个月,无效、微效降水日数多,气候干燥,蒸发强烈,土壤蓄墒率不足 30%。土壤质地为黄绵土,试验前耕层 0 ~ 40 cm 有机质含量为 7.2 g·kg⁻¹,碱解氮 50.3 mg·kg⁻¹,速效磷 8.6 mg·kg⁻¹,速效钾 84.8 mg·kg⁻¹,pH 值为 8.5,属低等肥力水平。试验期间化肥施用水平:纯氮 375 kg·hm⁻²(尿素 825 kg·hm⁻²),P₂O₅ 90 kg·hm⁻²(过磷酸钙 750 kg·hm⁻²)为基肥,播种时一次施入。

1.2 试验设计

试验设 4 个耕作处理,随机区组设计,小区面积 40 m²(10 m×4 m),3 次重复。试验地前茬作物为糜子,试验前一直采用传统翻耕,试验期间无灌溉,试验 3 年种植作物依次为糜子(2008 年)—谷子(2009 年)—糜子(2010 年),均为春季播种。2010 年糜子收获后田间每重复小区取土样测定相关指标。具体试验处理见表 1。

表 1 试验设计
Table 1 Experiment design

处理代码 Treatment code	处理名称 Treatment name	耕作处理方法 Tillage treatment method
NT	连年免耕 No-tillage	前茬作物秋季收获后均进行免耕处理
CT	连年翻耕 Conventional tillage	前茬作物秋季收获后均进行翻耕处理
N/S/S	免耕/深松/深松 No-tillage/Subsoiling-tillage/Subsoiling-tillage	2007 年前茬作物秋季收获后免耕,2008 年糜子、2009 年谷子收获后均深松
S/N/N	深松/免耕/免耕 Subsoiling-tillage/No-tillage/No-tillage	2007 年前茬作物秋季收获后深松,2008 年糜子、2009 年谷子收获后均免耕

1.3 土壤耕作与田间管理

前茬作物收获后留茬 3~5 cm, 免耕处理无任何耕作, 来年 4 月下旬直接免耕播种; 深松处理采用冀铲式深松机, 进行间隔深松, 耕作深度 30~35 cm, 间隔 40 cm; 传统翻耕处理采用专用铧犁翻耕, 耕深为 20 cm, 耕后耙耱。谷子品种为大同 10 号, 糜子为当地品种, 播种深度 3~5 cm, 行距 20 cm, 密度 35 万株·hm⁻², 采用可控制深度(压轮)的免耕 250 型播种机分别于 2008 年 4 月 21 日、2009 年 4 月 27 日和 2010 年 4 月 26 日播种, 播种时基施尿素(N≥46%) 825 kg·hm⁻²、过磷酸钙(P₂O₅≥12%) 750 kg·hm⁻², 试验期间进行人工除草。分别于 2008 年 9 月 27 日、2009 年 9 月 24 日和 2010 年 9 月 30 日收获。

1.4 测定指标与方法

1.4.1 土壤容重与孔隙度 每个试验小区以梅花形布置 5 个采样点, 按 0~20 cm、20~40 cm 和 40~60 cm 进行土壤分层, 用环刀取样, 测定各土层土壤容重并计算孔隙度^[20]; 土壤孔隙度(%) = (1 - 容重/比重) × 100%, 土壤比重近似值取 2.65 g·cm⁻³。

1.4.2 土壤团聚体数量及大小

(1) 取样方法 分 0~10、10~20、20~30 cm 和 30~40 cm 4 个土层各采集原状土样 2 kg 左右, 自然风干后除去粗根及小石块, 并将大土块按自然裂痕剥离为 1 cm³ 左右的小土块, 装入长、宽、高 20 cm 左右的硬纸盒无挤压运回实验室。将风干土样过孔径为 5 mm、2 mm 的筛子, 分为 >5 mm、5~2 mm、<2 mm 三个级别。然后按三个级别土样在原状土中所占比例取 2 份 200 g 的混合土样。

(2) 测定方法 土壤团聚体径级分布和稳定性利用干筛法和湿筛法测定。

机械稳定性团聚体(干筛法^[20]): 用震荡式机械筛分仪。取(1)中准备好的 200 g 混合土样, 放入孔径依次分别为 5、2、1、0.5 mm 及 0.25 mm 的套筛, 筛分称重得到 >5 mm、5~2 mm、2~1 mm、1~0.5 mm 和 0.5~0.25 mm 的土壤团聚体, 计算出各径级及 >0.25 mm 团聚体的重量百分含量(R_{0.25D})、机械稳定性团聚体平均重量直径(MWD_D)及机械稳定性团聚体几何平均直径(GMD_D)。

水稳性团聚体(湿筛法^[20]): 用团粒分析仪。取(1)中准备好的 200 g 混合土样, 放置在孔径依次分别为 5、2、1、0.5 mm 和 0.25 mm 的套筛最上层。筛分得到不同径级团聚体含量, 计算 >0.25 mm 水稳性团聚体的重量百分含量(R_{0.25W})、水稳性团聚体平均重量直径(MWD_W)、水稳性团聚体几何平均直径(GMD_W)及团聚体破坏率(PAD)。

1.4.3 土壤团聚状况指标及计算方法

(1) 团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)^[16]计算

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

$$GMD(\text{mm}) = \text{Exp} \left[\frac{\sum_{i=1}^n W_i \ln X_i}{\sum_{i=1}^n W_i} \right] \quad (2)$$

(1) 式中, *MWD* 为团聚体平均重量直径(mm); (2) 式中, *GMD* 为团聚体几何平均直径(mm); *X_i* 为任一径级范围内团聚体的平均直径(mm); *W_i* 为对应于 *X_i* 的团聚体重量百分含量。

(2) 团聚体破坏率(*PAD*)^[21] 计算

$$PAD = \frac{(R_{0.25D} - R_{0.25W})}{R_{0.25D}} \times 100\% \quad (3)$$

式中, *PAD* 为团聚体破坏率(%); *R_{0.25D}* 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量(%), *R_{0.25W}* 为 >0.25 mm 水稳性团聚体(%).

1.5 数据处理

采用 Excel 2003、SAS 8.0 软件对数据进行统计分析, Duncan 新复极差法进行多重比较。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式对土壤容重及土壤孔隙度的影响

经过 3 年不同耕作处理后, 不同耕作模式 0~60 cm 土层土壤容重出现了差异, 且差异主要在 0~20 cm 和 20~40 cm 土层(图 1A)。2010 年糜子收获后, 免耕/深松/深松(N/S/S)轮耕模式的容重较其它耕作模式降低, 0~20 cm 土层分别较连续免耕(NT)和连续翻耕(CT)降低 3.1% 和 2.6% (*P* < 0.05), 与深松/免耕/免耕(S/N/N)模式无显著差异。在 20~40 cm 土层, N/S/S 处理较 S/N/N 处理的容重显著降低 2.7% (*P* < 0.05), CT、NT、S/N/N 三种耕作模式土壤容重无显著差异。不同耕作模式对 40~60 cm 土层土壤容重无显著影响。与耕作处理前相比(表 2), N/S/S 处理显著降低了 0~20 cm 土层土壤容重, 其它耕作处理的 0~20 cm 土层土壤容重与处理前无显著差异; 不同耕作处理 20~60 cm 土层土壤容重较处理前基础值变化不大。

不同耕作处理的土壤孔隙度差异主要在 0~40 cm 土层(图 1B), NT/S/S 处理土壤孔隙度最高。0~20 cm 土层 N/S/S 与 S/N/N 轮耕处理无显著差异, 较 NT 和 CT 处理增加幅度分别为 3.0% 和 2.5% (*P* < 0.05)。20~40 cm 土层, 土壤孔隙度仍以 NT/S/S 处理最高, 较 S/N/N 提高幅度为 2.8% (*P* < 0.05),

较 NT 和 CT 耕作模式提高不显著。与耕作处理前相比,NT 和 CT 耕作处理 0~60 cm 孔隙度变化不明显,NT/S/S 处理显著增加了 0~20 cm 土层的土壤孔隙度,S/N/N 轮耕处理显著降低了 40~60 cm 土层的土壤孔隙度。

以上分析表明,N/S/S 轮耕处理显著降低 0~40 cm 土壤容重,增加了 0~20 cm 土层土壤孔隙度,改善了耕层土壤结构。

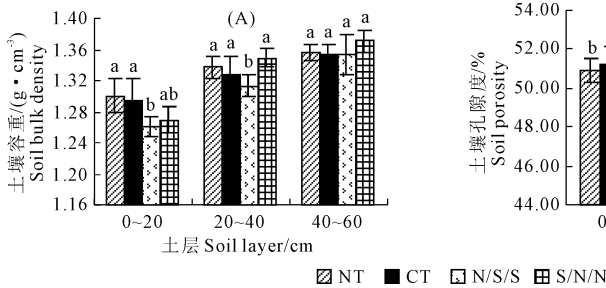


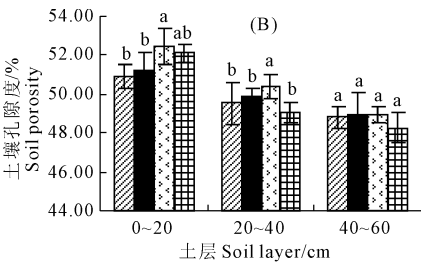
图 1 不同耕作处理 0~60 cm 土层的土壤容重及土壤孔隙度

Fig.1 Soil bulk density and soil porosity of different tillage treatments

表 2 耕作处理前 0~60 cm 土层的土壤容重及孔隙度

Table 2 The basic soil bulk density and soil porosity before tillage treatments

土层 Soil layer/cm	土壤容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	土壤孔隙度 Soil porosity/%
0~20	1.29	51.12
20~40	1.32	50.47
40~60	1.34	49.61



2.2 不同耕作模式对土壤有机质含量的影响

从图 2 可以看出,经过 3 年的不同耕作处理,2010 年糜子收获后,在 0~20 cm 土层,S/N/N 轮耕模式的有机质含量最高,达到 8.37 g·kg⁻¹,较 CT 增加了 15.5% ($P < 0.05$),且显著高于其它各处理;NT 处理的有机质含量较 CT 处理增加了 2.9%。20~40 cm 土层,S/N/N 和 NT 处理有机质含量较 CT 分别显著增加了 13.5% 和 9.4% ($P < 0.05$)。0~40 cm 土层各处理有机质含量总体次序为 S/N/N > NT > CT > N/S/S。由此可见,1 年深松后连续 2 年免耕能够显著增加土壤 0~40 cm 土壤有机质含量,提高土壤肥力。

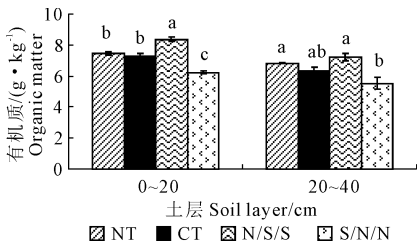


图 2 不同耕作处理 0~40 cm 土层的土壤有机质含量

Fig.2 The content of soil organic matter in 0~40 cm soil layer of different tillage treatments

2.3 不同耕作模式对土壤团聚体数量的影响

>0.25 mm 的团聚体称为土壤团粒结构体,其数量与土壤肥力状况呈正相关^[22]。表 3 为不同耕作处理 0~40 cm 土层 >0.25 mm 土壤团聚体含量。0~10 cm 土层,NT 和 S/N/N 处理 >0.25 mm 机械稳

定性团聚体($R_{0.25D}$)重量百分含量较 CT 分别提高 15.4% 和 14.9% ($P < 0.05$);10~20 cm 土层,NT、S/N/N 和 N/S/S 处理 $R_{0.25D}$ 含量较 CT 分别提高 10.3%、8.5% ($P < 0.05$) 和 6.5%;0~20 cm 土层 $R_{0.25D}$ 含量依次为 NT > S/N/N > N/S/S > CT。20~30 cm 土层,NT 和 S/N/N 处理 $R_{0.25D}$ 含量显著 ($P < 0.05$) 高于其它各处理,较 CT 分别提高 12.9% 和 10.4% ($P < 0.05$);30~40 cm 土层 $R_{0.25D}$ 含量高低依次为 S/N/N > NT > CT > N/S/S,处理 S/N/N 的 $R_{0.25D}$ 含量达 70.53%,较 CT 提高 23.5% ($P < 0.05$)。以上分析说明,连年免耕和一年深松后连续 2 年免耕的轮耕模式均显著地提高了 0~40 cm 土层内 >0.25 mm 机械稳定性团聚体的数量。

土壤水稳性团聚体含量能够更好地反映土壤结构保持和供应养分能力的强弱。从表 3 可以看出,>0.25 mm 土壤水稳性团聚体($R_{0.25W}$)含量远小于机械稳定性团聚体含量。经过 3 a 不同耕作处理后, $R_{0.25W}$ 含量在 0~40 cm 各土层均以 NT 处理和 S/N/N 轮耕处理显著 ($P < 0.05$) 高于 CT 及 N/S/S 处理,NT 处理从上往下依次分别为 8.56%、8.73%、8.63% 和 5.72%,较 CT 分别提高 192.2%、566.4%、442.8% 和 201.1% ($P < 0.05$),S/N/N 轮耕处理分别为 4.55%、3.11%、3.34% 和 2.22%。0~40 cm 土层内 N/S/S 处理的 $R_{0.25W}$ 含量最低。说明免耕有利于土壤水稳性团聚体的形成,而深松由于对土壤结构扰动可能导致团粒结构破坏,致使 >0.25 mm 土壤水稳性团聚体含量减少。

以上分析表明,耕作模式使旱作农田土壤团聚体的含量发生显著变化,连续两年以上免耕有利于耕层(0~40 cm)土壤机械稳定性团聚体的形成,NT处理和S/N/N轮耕处理有利于耕层土壤水稳性团聚体的形成,而深松不利于团聚体的形成。

2.4 不同耕作模式对土壤团聚体大小的影响

不同径级团聚体对土壤养分的保持和供应、孔隙组成、水力性质和生物运动具有不同的作用^[4-5],土壤团聚体的平均重量直径(MWD)与几何平均直径(GMD)是反映土壤团聚体大小分布状况的常用指

标。MWD和GMD值越大,团聚体的团粒直径越大,稳定性越强^[21]。如表4所示,0~10 cm土层土壤机械稳定性团聚体的MWDD、GMDD均以S/N/N处理与NT处理最高,较CT处理分别增加了26.4%、23.7%与23.0%、24.4%($P < 0.05$);10~20 cm土层大小次序为NT>S/N/N>N/S/S>CT,20~40 cm土层大小次序为NT>S/N/N>CT>N/S/S,在10~40 cm土层,MWDD和GMDD以NT处理最高。0~40 cm土层,土壤水稳性团聚体的MWDW和GMDW不同耕作处理间差异不显著。

表 3 不同耕作处理 > 0.25 mm 机械稳定性(R_{0.25}D)和水稳定性(R_{0.25}W)团聚体含量/%

Table 3 > 0.25 mm aggregates content by dry and wet sieving of different tillage treatments					
处理 Treatment		0 ~ 10 cm	10 ~ 20 cm	20 ~ 30 cm	30 ~ 40 cm
R _{0.25} D	NT	62.56 ± 1.21a	66.20 ± 1.78a	68.60 ± 1.55a	64.15 ± 0.87b
	CT	54.20 ± 3.91c	60.03 ± 1.12b	60.75 ± 0.94b	57.09 ± 0.81c
	N/S/S	57.70 ± 2.75b	63.91 ± 1.47a	60.42 ± 0.80b	56.77 ± 1.37c
	S/N/N	62.30 ± 2.99a	65.11 ± 1.02a	67.06 ± 1.16a	70.53 ± 1.01a
R _{0.25} W	NT	8.56 ± 0.54a	8.73 ± 0.10a	8.63 ± 0.07a	5.72 ± 0.10a
	CT	2.93 ± 0.29c	1.31 ± 0.11c	1.59 ± 0.05c	1.90 ± 0.07b
	N/S/S	1.62 ± 0.07d	0.36 ± 0.06d	0.41 ± 0.07c	0.58 ± 0.07b
	S/N/N	4.55 ± 0.58b	3.11 ± 0.49b	3.34 ± 0.10b	2.22 ± 0.11b

注:同列不同小写字母表示不同处理差异达显著水平($P < 0.05$)。下同。
Note: Different letters in same line indicate significant differences($P < 0.05$) under different tillage treatments . The same as below .

表 4 不同耕作处理 0~40 cm 土层土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)/mm

Table 4 MWD and GMD of dry and wet sieving of different tillage treatments					
土层 Depth/cm	处理 Treatment	机械稳性团聚体 Mechanical stable aggregate		水稳性团聚体 Water stable aggregate	
		MWD _D	DGM _D	MWD _W	GMD _W
0 ~ 10	NT	1.82 ± 0.07a	0.93 ± 0.06a	0.32 ± 0.02a	0.28 ± 0.01a
	CT	1.48 ± 0.08b	0.76 ± 0.08b	0.29 ± 0.02ab	0.26 ± 0.02a
	N/S/S	1.48 ± 0.10b	0.73 ± 0.05b	0.27 ± 0.03b	0.26 ± 0.01a
	S/N/N	1.87 ± 0.09a	0.94 ± 0.06a	0.29 ± 0.03ab	0.27 ± 0.02a
10 ~ 20	NT	2.42 ± 0.04a	1.23 ± 0.04a	0.32 ± 0.02a	0.28 ± 0.03a
	CT	1.75 ± 0.07c	0.84 ± 0.06c	0.28 ± 0.03ab	0.26 ± 0.02a
	N/S/S	1.77 ± 0.09c	0.94 ± 0.05b	0.26 ± 0.02b	0.25 ± 0.01a
	S/N/N	2.22 ± 0.03b	1.16 ± 0.08a	0.28 ± 0.03ab	0.26 ± 0.01a
20 ~ 30	NT	2.39 ± 0.08a	1.25 ± 0.06a	0.32 ± 0.02a	0.28 ± 0.03a
	CT	1.94 ± 0.07b	0.98 ± 0.06b	0.26 ± 0.02b	0.26 ± 0.02a
	N/S/S	1.78 ± 0.07c	0.91 ± 0.04b	0.26 ± 0.03b	0.25 ± 0.01a
	S/N/N	2.04 ± 0.09b	1.08 ± 0.10ab	0.28 ± 0.01ab	0.26 ± 0.02a
30 ~ 40	NT	2.29 ± 0.13a	1.28 ± 0.07a	0.29 ± 0.03a	0.27 ± 0.02a
	CT	1.92 ± 0.09b	0.99 ± 0.08b	0.27 ± 0.04a	0.26 ± 0.02a
	N/S/S	1.87 ± 0.06b	0.98 ± 0.07b	0.26 ± 0.03a	0.25 ± 0.02a
	S/N/N	2.14 ± 0.06a	1.07 ± 0.08b	0.27 ± 0.04a	0.26 ± 0.01a

注:MWD_D/MWD_W和GMD_D/GMD_W分别为干/湿筛法下团聚体平均重量直径和几何平均直径。
Note: MWD_D/MWD_W and GMD_D/GMD_W means mean weight and geometric diameter in dry/wet sieving.

2.5 不同耕作处理对土壤团聚体破坏率的影响

团聚体破坏率与作物产量之间有显著的相关性,其值越大,土壤结构的稳定性越差,相反,土壤结构的稳定性越强^[22]。从图3可看出,不同耕作处理在0~20 cm土层破坏率以NT处理显著低于其它耕作处理($P < 0.05$),N/S/S和CT处理无显著差异;20~30 cm土层则以CT和N/S/S处理间无显著差异,均显著高于S/N/N和NT处理;30~40 cm土层CT、N/S/S和S/N/N处理间无显著差异,均显著高于NT处理($P < 0.05$)。以上分析表明,一年深松两年免耕和连续免耕处理有利于减少旱作农田耕层土壤团聚体的破坏率,而连年翻耕及一年免耕两年深松处理则由于对土壤的扰动大,增加了土壤团聚体的破坏率,降低了土壤结构的稳定性。

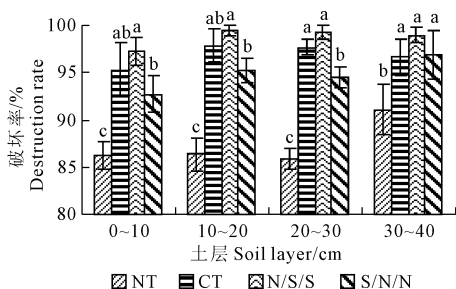


图3 不同耕作处理下0~40 cm土层土壤团聚体破坏率

Fig.3 Aggregates deterioration rate in 0~40 cm soil layer of different tillage treatments

3 讨论

团聚体是土壤结构的重要组成部分,在土壤中具有协调水、肥、气、热等因子之间的平衡、影响土壤酶的种类和活性、维持和稳定土壤的疏松及孔隙性^[4]的作用。不同耕作模式会导致土壤体积质量、孔隙度、有机质含量等方面存在差异,它们与团聚体的含量及稳定性关系密切。传统的频繁耕作是导致农田土壤质量下降的主要原因^[23]。近年来,免耕、深松等保护性耕作措施在农田的应用得到广泛重视。一般认为,免耕是保护性耕作最主要的技术之一,但连年免耕后会出现土壤变硬,容重增大,影响作物根系发育及对水分和养分的吸收,从而使产量呈下降的趋势^[24]。而深松由于田间操作需要较大动力,且劳作强度大,往往限制了其应用面积。可以通过免耕与深松轮耕来克服连续单一耕作的弊端^[25-26]。

Cassel^[27]的研究表明免耕使土壤容重增大,而Aase^[28]和Karlen^[29]的研究却得出了相反的结论,认为免耕使土壤容重降低。本研究通过3年不同耕作

方式的研究表明:一年免耕两年深松(N/S/S)耕作模式0~20 cm土层的土壤容重较NT和CT处理显著降低,可有效防止表层土壤板结,而连年免耕(NT)处理有增加0~60 cm土层的土壤容重的趋势。一年免耕两年深松处理较连年翻耕和连年免耕均显著提高了0~40 cm土层土壤孔隙度,较一年深松两年免耕轮耕处理提高了20~60 cm的土壤孔隙度。这可能是由于经过免耕和深松轮耕,通过免耕减少对土壤的剧烈扰动,而深松通过打破长期翻耕形成的犁底层,相对于连年翻耕降低了对土壤结构的破坏,从而增强了土壤的通气能力,使根系及微生物的活动能力增强,土壤孔隙度增加,土壤容重降低。

已有研究表明^[1,30-31]常规耕作使团聚体稳定性降低,机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量均比其它耕作方式有不同程度下降,且以大直径团聚体的下降最为明显。本研究在宁南旱作农田土壤进行3 a不同轮耕处理后发现,连年免耕和一年深松后连续2年免耕的轮耕模式均比连年翻耕显著地提高了0~40 cm土层内>0.25 mm机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的数量。就连续3年的效果来看,耕作模式使旱作农田土壤团聚体的含量发生显著变化,连续两年以上免耕有利于耕层(0~40 cm)土壤机械稳定性团聚体的形成,NT处理和S/N/N轮耕处理有利于耕层土壤水稳性团聚体的形成,但随着试验年限的增加其对土壤结构的影响效果尚有待于进一步研究。对一个具体地区和土壤类型来说,轮耕周期多长最有利于土壤结构的良性发展,也有待于各地在实践中继续探索。

土壤团聚体的形成是一个复杂的物理、化学以及生物化学过程。有人认为大团聚体首先形成,小团聚体再形成于大团聚体内部的有机质颗粒周围,或当有机质分解,大团聚体破碎后直接形成小团聚体^[8]。耕作对土壤团聚体的影响主要是通过机械扰动使土壤结构发生破碎、分散和混合,直接或间接地造成土壤有机质含量下降^[32]。土壤机械稳定性和水稳性团聚体含量分别反映了侵蚀发生后土壤团聚体的分布特征及土壤潜在的抗蚀能力^[33]。研究表明^[8,34],水稳性团聚体的数量和稳定性均与土壤有机质含量呈正相关,水稳性大团聚体的形成主要依靠有机质的胶结作用。本研究在旱地的研究表明,不同耕作处理后有机质含量在0~20 cm和20~40 cm土层均以S/N/N处理最高,而连年免耕处理较连年翻耕增加了20~40 cm土层的有机质。NT和S/N/N处理下 $R_{0.25}$ 、MWD和GMD均高于连年翻耕处理,说明实施免耕有利于犁底层的消失,使土壤

团聚体含量增加,有助于土壤结构的改善,这与在灌溉农田的研究结果^[16]一致。

土壤团聚体平均重量直径(MWD)和几何平均直径(GMD)与团聚体含量成正比,其值越大说明团聚体含量越高、稳定性较好。杨剑波等^[35]认为,团聚体结构破坏率与 $>0.25\text{ mm}$ 水稳定性团聚体的相关系数分别为 -0.899 和 -0.959 ($P<0.05$)。杨如萍^[36]等研究表明,土壤团聚体的稳定性与MWD、GMD和破坏率密切相关,团聚体的平均粒径团聚度越高,破坏率越小,稳定性越强。本研究表明,在 $0\sim10\text{ cm}$ 土层,S/N/N处理的MWD、GMD值最高, $10\sim30\text{ cm}$ 土层以NT最高。而在 $0\sim40\text{ cm}$ 土层土壤团聚体的破坏率以NT最小,其次为S/N/N处理,这与上述研究结论一致,说明大粒径团聚体的数量越少,结构破坏率就越大,反之则越小。目前关于耕作对团聚体破坏率的研究报道并不多见,需要进一步加强该方面的研究,并分析团聚体 $R_{0.25}$ 、MWD、GMD和PAD等指标的相关性,为全面评价土壤结构、通过耕作管理措施改善农田土壤环境提供参考。

4 结 论

一年免耕两年深松的轮耕模式较传统连年翻耕和连年免耕显著降低了冬春休闲旱作农田 $0\sim20\text{ cm}$ 土层的土壤容重;经过免耕和深松轮耕,通过免耕减少对土壤的剧烈扰动,而深松通过打破长期翻耕形成的犁底层,相对于连年翻耕降低了对土壤结构的破坏,从而增强了 $0\sim20\text{ cm}$ 土层土壤孔隙度。耕作模式使旱作农田土壤团聚体的含量发生显著变化,连年免耕和一年深松后连续2年免耕的轮耕模式均比连年翻耕显著提高了 $0\sim40\text{ cm}$ 土层内 $>0.25\text{ mm}$ 机械稳定性团聚体和水稳性团聚体的数量,增加了土壤团聚体平均重量直径和几何平均直径,降低了土壤团聚体的破坏率,提高了土壤的结构稳定性。

参 考 文 献:

- [1] 李素娟,陈继康,陈 阜,等.华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究[J].作物学报,2008,34(2):290-296.
- [2] Hammel J E. Long-term tillage and crop rotation effects on bulk density and soil impedance in northern idaho[J]. Soil Science Society of America Journal, 1989,53(5):1515-1519.
- [3] Hernanza J L, López R, Navarrete L, et al. Long-term effects of tillage systems and rotations on soil structural stability and organic carbon stratification in semiarid central spain[J]. Soil & Tillage Research, 2002,66:129-141.
- [4] Zhang G S, Chan K Y, Oates A. Relationship between soil structure and runoff/soil loss after 24 years of conservation tillage[J]. Soil & Tillage Research, 2006,65:45-51.
- [5] 何 进,李洪文,高焕文.中国北方保护性耕作条件下深松效应与经济效益研究[J].农业工程学报,2006,22(10):62-67.
- [6] Paustian K, Elliott E T. Soil structure and soil organic matter: Distribution of aggregate size classes and aggregate associated carbon[J]. Soil Science Society of America Journal, 2000,64:681-689.
- [7] 陈恩凤,周礼恺,武冠云.微团聚体的保肥供肥性能及其组成比例在评断土壤肥力水平中的意义[J].土壤学报,1994,31(1):18-25.
- [8] Six J, Elliott E T, Paustian K. Soil structure and soil organic matter: A normalized stability index and the effect of mineralogy[J]. Soil Science Society of America, 2000,64:1042-1049.
- [9] 彭新华,张 斌,赵其国.土壤有机碳库与土壤结构稳定性关系的研究进展[J].土壤学报,2004,41(4):618-623.
- [10] 高 飞,贾志宽,韩清芳,等.有机肥不同施用量对宁南土壤团聚体粒级分布和稳定性的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(3):100-106.
- [11] Puget P, Chenu C, Balesdent J. Dynamic of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregate[J]. European Journal of Soil Science, 2000,51:595-605.
- [12] Kemper W D, Rosenau R C. Aggregate stability and size distribution[J]. American Society of Agronomy, 1986,39:425-442.
- [13] Dalal R C, Chan K Y. Soil organic matter in rainfed cropping systems of the Australian cereal belt[J]. Australian Journal of Soil Research, 2001,39:435-464.
- [14] Paustian K, Six J, Elliot E T, et al. Management options for reducing CO_2 emissions from agricultural soils[J]. Biogeochemistry, 2000,48:147-163.
- [15] 王殿武,文宏达.半干旱高寒区保护性耕作法对土壤孔隙状况和微形态结构特征的影响[J].河北农业大学学报,1994,(S1):1-6.
- [16] 周 虎,吕怡忠,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,2007,40(9):1973-1979.
- [17] Carter M R. Influence of reduced tillage systems on organic matter, microbial biomass, macro-aggregate distribution and structural stability of the surface soil in a humid climate[J]. Soil & Tillage Research, 1992,23(4):361-372.
- [18] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, et al. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil & Tillage Research, 2009,105:192-199.
- [19] 侯贤清,李 荣,贾志宽,等.不同农作区土壤轮耕模式与生态效应研究进展[J].生态学报,2016,36(5):1215-1223.
- [20] 中国科学院,南京土壤研究所.土壤理化分析[S].上海:上海科学技术出版社,1983:62-126.
- [21] 刘晓利,何国球,李成亮,等.不同利用方式和肥力红壤中水稳性团聚体分布及物理性质特征[J].土壤学报,2008,45(3):459-465.
- [22] 刘 军,王益权,王 益,等.长期培肥过程中壤土物理性质演变规律[J].土壤通报,2004,35(5):542-545.
- [23] 张国盛, K Y Chan, G D Li, 等.长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J].生态学报,2008,28(6):2722-2728.

