

不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响

侯贤清^{1,2}, 贾志宽^{1,2,3}, 韩清芳^{1,2,3*}, 孙红霞^{1,2},
王 维^{1,2}, 聂俊峰^{1,2,3}, 杨宝平^{1,2}

(1. 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 杨凌 712100;
2. 农业部旱地作物生产与生态重点开放实验室, 杨凌 712100;
3. 西北农林科技大学农学院, 杨凌 712100)

摘 要: 为了探索免耕与深松隔年轮耕对土壤结构及入渗蓄水性能的影响, 2007—2010 年在宁南旱区采用免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松与连年翻耕 3 种耕作模式, 对土壤体积质量、团聚体、入渗率及水分利用效率等方面的影响进行了研究。结果表明: 与连年翻耕相比, 免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理使 0~60 cm 各土层土壤体积质量平均降低 3.5%、6.2% ($P<0.05$); 使 0~20 cm 土层 >0.25 mm 机械稳定性团聚体数量平均分别增加 10.3% ($P<0.05$) 和 20.3% ($P<0.01$), $>20\sim40$ cm 土层分别平均增加 17.2% ($P<0.05$) 和 23.6% ($P<0.01$)。免耕/深松/免耕处理 0~10 cm 和 $>30\sim40$ cm 土层的水稳性团聚体稳定率分别比连年翻耕提高 35.1% 和 45.8% ($P<0.05$), 深松/免耕/深松处理 $>10\sim20$ cm 和 $>20\sim30$ cm 土层水稳性团聚体稳定率分别提高 101.7% 和 61.7% ($P<0.01$)。不同轮耕模式显著增强了土壤的入渗性能, 提高对土壤水分的有效利用及降水利用率, 免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理降雨入渗率较连年翻耕分别提高 35.2% 和 15.3% ($P<0.05$), 水分利用效率平均提高 7.2% 和 7.7% ($P<0.05$), 降水生产效率平均提高 9.6% 和 10.7% ($P<0.05$)。

关键词: 土壤, 水分, 入渗, 轮耕模式, 水分利用效率, 宁南旱区

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.05.015

中图分类号: S341.1, S511

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-05-0085-010

侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同轮耕模式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 85—94.
Hou Xianqing, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(5): 85—94. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

在半干旱区, 旱地农业发展的主要技术目标是充分地利用自然降水, 减少地表径流, 增加土壤水分。土壤的入渗能力决定了降雨再分配过程中地表径流和土壤的蓄水性能, 土壤渗透性能的好坏, 直接关系到土壤蓄水量的多少^[1-2]。

土壤的入渗特性与土壤结构、土壤剖面含水率有关。有研究表明, 随土壤体积质量的增加, 土壤团粒结构丧失、土壤孔隙和入渗率减小^[3]。田积莹^[4]和蒋定生等^[5]研究认为, 土壤入渗能力的大小主要取决于土壤机械组成和水稳性团粒含量。土壤入渗率随 >0.25 mm 的水稳性团粒含量的增加而增加。另外, 土壤初始含水率的状况也直接影响降雨后土壤水分的入渗状况。Bodman 等^[6]认为在入渗初期, 随含水率的增加, 土壤入渗速率减小,

随着时间的延续, 含水率对入渗的影响变小。对土壤入渗特性的研究, 可以为提高降水利用效率, 发挥旱地土壤生产潜力和改善生态环境提供科学的理论依据, 并有助于评价各种耕作模式的蓄水效果。

宁南黄土高原丘陵区沟壑纵横, 表层土壤结构疏松, 水土流失十分严重。广大旱区普遍采用的传统耕作技术, 致使水土流失加剧, 生态环境恶化, 生产成本提高^[7], 已愈来愈不适应旱区农业发展需要。因此, 研究和推广“用、养、保”型的保护性耕作技术就显得尤为重要。近年来, 有关保护性耕作对水土保持的研究已有报道, 主要集中在耕作措施对土壤理化性状、蓄水保墒、作物产量及经济效益评价等方面^[8-11], 对土壤结构、降水入渗影响等方面的研究鲜有报道^[12]。另外, 对土壤降水入渗的测定也因方法的不同而结果有所差异。本研究于 2007—2010 年通过定位试验, 研究了免耕和深松隔年轮耕及传统耕作 3 种耕作方式对旱地土壤结构及入渗蓄水特性的影响, 期为评价不同轮耕模式及完善保护性耕作技术提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 试验区概况

试验于 2007—2010 年在黄土高原丘陵沟壑区宁夏彭阳县旱作农业试验站进行。该区位于宁夏回族自治区南

收稿日期: 2011-04-10 修订日期: 2011-07-06

基金项目: “十一五”国家科技支撑课题“农田集雨保水关键技术研究”(2006BAD29B03)及“节水共性技术研究”(2007BAD88B10)

作者简介: 侯贤清, 男, (1981—), 博士生。主要从事旱地农业研究。杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 712100。

Email: houxianqing1981@126.com

*通信作者: 韩清芳 (1969—), 女, 汉族, 教授, 主要从事旱区农业水分高效利用研究。杨凌西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院, 712100。

Email: hanqf88@126.com

部边缘、六盘山东麓, 介于 $E106^{\circ}32 \sim 106^{\circ}58$ 、 $N35^{\circ}41 \sim 36^{\circ}17$ 之间, 海拔 1 800 m, 多年平均降水量为 430.4 mm, 降雨年度分配极度不均匀且集中在夏季, 7~9 月降雨占全年降水的 46.3%~69.1%, 冬小麦生长期 (10 月一次年 6 月) 与降水严重错位。3 年试验期 2007—2008 年、2008—2009 年和 2009—2010 年年降水总量分别为 331.4、370.0 和 427.8 mm, 其中夏闲期降雨量达 154.3~255.6 mm, 而小麦生育期降雨量仅为 114.4~205.1 mm。

试验田为旱平地, 土壤质地为黄绵土, 前茬作物为冬小麦。试验小麦播种前耕层 0~40 cm 有机质质量分数为 7.18 g/kg, 碱解氮 50.32 mg/kg, 速效磷 8.55 mg/kg, 速效钾 84.82 mg/kg, pH 值为 8.5, 属低等肥力水平。

1.2 试验方法

试验设 2 年免耕 1 年深松 (免耕/深松/免耕)、2 年深松 1 年免耕 (深松/免耕/深松)、传统耕作 (连年翻耕) 3 种耕作处理。免耕/深松/免耕处理 ($N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$): 第 1 年冬小麦收获后进行免耕处理, 第 2 年冬小麦收获后进行深松处理, 第 3 年冬小麦收获后进行免耕处理; 深松/免耕/深松处理 ($S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$): 第 1 年冬小麦收获后进行深松处理, 第 2 年冬小麦收获后进行免耕处理, 第 3 年, 冬小麦收获后进行深松处理; 传统耕作处理 (CT): 冬小麦收获后, 进行连年翻耕处理。随机区组设计, 3 次重复, 小区面积 45 m² (5 m×9 m)。

该试验地 2007 年试验处理前采用传统翻耕的耕作方式, 试验期间无灌溉, 整个试验为不覆盖。免耕处理: 冬小麦收获留茬 5~8 cm, 9 月下旬直接免耕播种。深松处理: 耕作深度 30~35 cm, 宽度间隔 40 cm。传统耕作: 犁耕深度 20 cm, 耕后耙地。冬小麦分别于 2007 年 9 月 18 日、2008 年 9 月 15 日、2009 年 9 月 20 日播种, 2008 年 6 月 27 日、2009 年 6 月 24 日、2010 年 7 月 10 日收获, 冬小麦品种为西峰 26 号, 种植深度 5~8 cm, 播种密度 350 万株/hm²。播种时基施尿素 ($N \geq 46\%$) 675 kg/hm²、过磷酸钙 ($P_2O_5 \geq 12\%$) 750 kg/hm², 冬小麦拔节期追施尿素 150 kg/hm², 试验期间进行人工除草。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤体积质量及孔隙度

在 2007 年 6 月 24 日试验处理前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后, 以 S 形布置 5 个采样点, 按 0~20、>20~40 和 >40~60 cm 用环刀取样, 采用环刀法测定各土层土壤体积质量并计算孔隙度^[13]; 土壤孔隙度 (%) = $(1 - \text{土壤体积质量} / \text{土壤体积质量}) \times 100\%$, 土壤体积质量近似值取 2.65 g/cm³。

1.3.2 土壤团聚体粒级和稳定性

1) 取样方法。在 2007 年 6 月 24 日试验处理前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后, 按 S 型 5 点取土法在 0~10、>10~20、>20~30 和 >30~40 cm 4 个土层采集原状土样, 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。将风干土样分别过孔径为 5 和 2 mm 的筛子, 分为 >5 mm、>2~5 mm、≤2 mm 3 个级别。然后按 3 个级别土样在原状土中所占比例取混合土样 200 g。

2) 测定方法。土壤团聚体粒级分布和稳定性利用干筛法和湿筛法测定^[14]。干筛法: 取土样 200 g, 放入孔径依次分别为 5, 2, 1, 0.5 及 0.25 mm 的套筛最上面, 底层安放底盒, 顶部盖筛盖, 用振荡式机械筛分仪, 在最大运动频率 300 次/min 振荡 2 min 后, 从上部依次取筛, 得到 >5 mm, ≥2~5 mm, ≥1~2 mm, ≥0.5~1 mm, ≥0.25~0.5 mm 以及 <0.25 mm 的土壤团聚体, 分别收集称质量。湿筛法: 用团粒分析仪。取土样 200 g, 将其放置在孔径依次为 5、2、1、0.5、0.25 mm 的套筛最上层, 调整桶内水面的高度, 使筛子移动到最高位置时最上一层筛子中的团聚体刚好淹没在水面以下, 待测土样在水面下浸泡 10 min 时开动仪器, 以 30 次/min 的速度筛 5 min 后, 将每一层筛上的团聚体分别洗入铝盆并烘干称质量, 并分别计算出各粒级机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量。

>0.25 mm 机械稳定性团聚体含量^[13]:

$$DR_{0.25} = \sum_{i=1}^n (W_i)$$

式中, $DR_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数, %; W_i 为对应粒级团聚体质量分数, %。

团聚体平均重量直径^[15]:

$$MWD = \sum_{i=1}^n W_i [X_i \cdot (W_i)]$$

式中, MWD 为团粒平均重量直径, mm; X_i 为任一级别范围内团聚体的平均直径, mm; W_i 为对应于 X_i 的团聚体质量分数, %。

水稳性团聚体稳定率^[16]:

$$WSAR = WSA/A \times 100\%$$

式中, $WSAR$ 为水稳性团聚体稳定率, %; WSA 为 >0.25 mm 水稳性团聚体的质量, g; A 为 >0.25 mm 水稳性团聚体的质量, g。

构体破碎率^[17]:

$$SDR = (DR_{0.25} - WSAR) / DR_{0.25} \times 100\%$$

式中, SDR 为构体破碎率, %; $DR_{0.25}$ 为 >0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数, %; $WSAR$ 为水稳性团聚体稳定率, %。

不稳定团粒指数^[17]:

$$E_{LT} = (A - WSA) / A \times 100\%$$

式中, E_{LT} 为不稳定团粒指数, %; A 为 >0.25 mm 水稳性团聚体的质量, g; WSA 为 >0.25 mm 水稳性团聚体的质量, g。

1.3.3 土壤水分及小麦产量的测定

试验期降雨量由雨量器连续定位观测记录。在试验年份没有发生强的、持续性的大降水, 因此没有通过地面径流或向下渗漏出 2 m 土层而引起水分损失。地下水埋深, 因此可以不考虑地下水补给影响。同时, 本试验田较平, 小区之间没有发生过任何侧向水分交换。冬小麦播种前和收获后各处理小区每 20 cm 土层分层取样测定 0~200 cm 土层的土壤含水率, 小麦成熟期每处理小区取 1 m² 测定产量。

土壤蓄水量:

$$W = h \times a \times b \times 10 / 100$$

式中, W 为土壤蓄水量, mm; h 为土层深度, cm; a 为土壤体积质量, g/cm^3 ; b 为土壤含水率, %。

作物耗水量:

$$ET_a = W_1 - W_2 + P$$

式中, ET_a 为作物耗水量, mm; W_1 为播前土壤蓄水量, mm; W_2 为收获后土壤蓄水量, mm; P 为生育期内降雨量, mm, 式中土壤蓄水量及耗水量均以 2 m 土层含水率计算。

水分利用效率:

$$WUE = Y / ET_a$$

式中, WUE 为水分利用效率, $kg/(hm^2 \cdot mm)$; Y 为小麦籽粒产量, kg/hm^2 。

降水生产效率:

$$PUE = Y / P$$

式中, PUE 为作物降水生产效率, $kg/(hm^2 \cdot mm)$; Y 为小麦籽粒产量, kg/hm^2 ; P 为生育期内降雨量, mm。

1.3.4 土壤入渗性能的测定

在 2007 年试验处理前及 2010 年小麦收获后, 采用自行研制的简易模拟降雨装置测定土壤入渗率^[18], 该装置为底部密布 7 号注射针头 (每 $7.5\text{ cm} \times 6\text{ cm}$ 一枚) 的水箱, 其工作的基本原理是: 依据针头出水速度 v (mL/h) 与水箱内水面高度 h (mm) 间的线性关系 (该装置为 $v = 1.842 + 0.183 h$) 通过控制水面的高度和降水时间实现不同的降水强度和降雨量。

土壤的入渗速率^[19]:

$$V = (Q_n \times 10) / (T_n \times S)$$

式中, V 为土壤在某一时刻的入渗速度, mm/min; Q_n 为第 n 次测定时间内注水量, mL; T_n 为第 n 次测定时间间隔的时间, min; S 为渗透面面积, cm^2 , 取 1.6×10^3 。

1.4 统计方法

采用 SAS 8.0 统计分析软件对数据进行统计分析, 并采用 LSD 法进行多重比较。

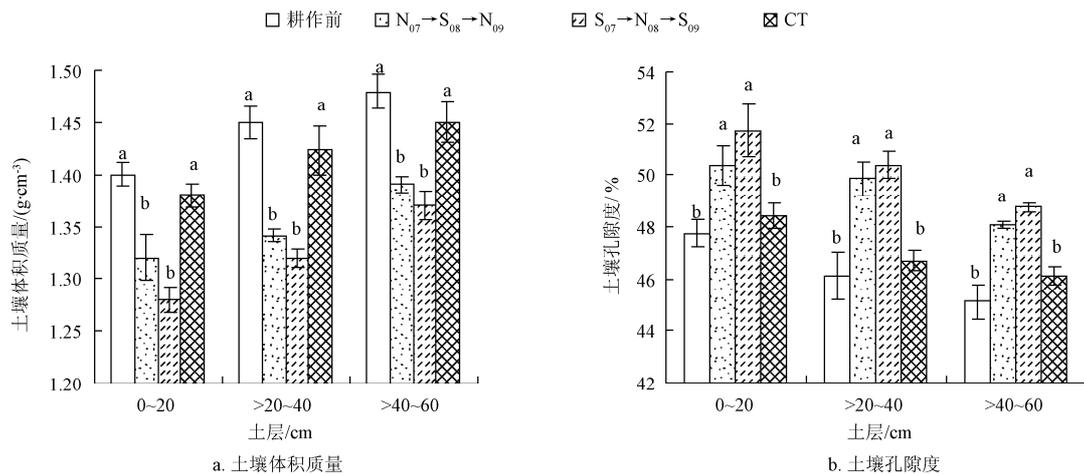
2 结果与分析

2.1 不同耕作模式对旱地土壤结构的影响

2.1.1 对土壤体积质量和土壤孔隙性状的影响

3 a 后, 3 种耕作模式的 0~60 cm 各土层土壤体积质量均比 2007 年耕作处理前有所减小 (图 1 a), 其中免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理降幅显著 ($P < 0.05$), 达 5.6%~9.0%, 而连续翻耕无显著变化。免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理的 0~60 cm 土层平均土壤体积质量分别较连续翻耕降低 3.5% 和 6.2%, 其中: 0~20 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理的土壤体积质量分别比 CT 处理降低 ($P < 0.05$) 4.4% 和 7.3%; >20~40 cm 土层, 分别比 CT 处理降低 ($P < 0.05$) 2.1% 和 5.7%; >40~60 cm 土层, 分别比 CT 处理降低 ($P < 0.05$) 4.1% 和 5.5%。说明免耕与深松隔年轮耕可有效降低土壤体积质量, 改善土壤结构。

处理 3 a 后, 免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理的 0~60 cm 土层土壤孔隙度均比处理前显著 ($P < 0.05$) 增加, 而连续翻耕增幅不显著 (图 1 b): 0~20 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理土壤孔隙度分别高于连续翻耕 4.1% 和 6.8%; 在 >20~40 cm 和 >40~60 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理较 CT 处理分别提高 2.1% 和 4.3%, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理较 CT 处理分别提高 5.5% 和 5.7%, 表明 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式能有效打破犁底层, 经过免耕和深松轮耕后使土壤的通气能力加强, 0~60 cm 土层土壤孔隙状况得到显著 ($P < 0.05$) 改善。



注: $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 为免耕/深松/免耕处理; $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 为深松/免耕/深松处理; CT 为传统耕作处理。

图 1 不同耕作模式下 0~60 cm 土壤体积质量和孔隙度的变化

Fig.1 Change of soil bulk density and soil porosity at 0-60 cm depth under different tillage patterns

2.1.2 对耕层土壤团聚体数量及其稳定性的影响

1) 对不同粒级土壤团聚体数量的影响

经过 3 a 不同耕作处理, 3 种不同耕作处理 0~10 cm 和 >10~20 cm 土层 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体数量

均比处理前显著增加, 而 >20~30 cm 和 >30~40 cm 土层增幅不显著, 且 0~10 cm 和 >10~20 cm 土层高于 >20~30 cm 和 >30~40 cm 土层 (表 1), 其中 0~10 cm 和 >10~20 cm 土层免耕/深松/免耕处理增幅最大 (平均为 60.0%),

而深松/免耕/深松处理次之(平均为 54.8%)。0~40 cm 土层免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理 0.25~5 mm 团聚体数量显著 ($P<0.05$) 高于连年翻耕处理: 0~10 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理提高 12.4%, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 >2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理提高 37.8%; >10~20 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理分别提高 12.4%和 18.4%, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 >2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理提高 46.2%; >20~30 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 和 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 >5 mm 团聚体数量分别较 CT 处理提高 86.9%和 131.6% ($P<0.01$); >30~40 cm 土层, 分别提高 44.8%和 29.9% ($P<0.05$)。>20~30 cm 和 >30~40 cm 土层, >5 mm 团聚体数量 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理与处理前相比增幅显著 ($P<0.05$), 平均提高 41.8%和 49.2%, 而 0~10 cm 和 >10~20 cm 土层增幅不显著。

与 2007 年处理前相比, 2010 年小麦收获期 3 种不同耕作处理 0~40 cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体含量均

显著 ($P<0.05$) 增加, 处理间 <0.25 mm 水稳性微团聚体含量在各土层差异均不显著。在 0~10 和 >10~20 cm 土层 >0.25 mm 水稳性团聚体含量与处理前相比增幅达 6.1~6.7 倍, >20~30 和 >30~40 cm 土层, 免耕/深松/免耕、深松/免耕/深松处理 >0.25 mm 各粒级水稳性团聚体含量均比 CT 显著增加, 其中 0.25~1 mm 水稳性团聚体含量远高于 >1 mm 大团聚体。0~10 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 0.5~1 mm 水稳性团聚体含量分别比 CT 处理提高 ($P<0.05$) 47.8%和 46.2%, 1~5 mm 水稳性团聚体含量分别提高 ($P<0.05$) 89.3%和 25.2%; >10~20 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 1~5 mm 团聚体含量分别比 CT 处理提高 ($P<0.01$) 2.4 倍和 4.9 倍; 在 >20~30 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 0.25~1 mm 团聚体含量分别较 CT 处理增加 ($P<0.05$) 1.5 倍和 1.6 倍, 1~5 mm 水稳性团聚体含量分别增加 1.1 倍 ($P<0.05$) 和 0.5 倍; >30~40 cm 土层 0.25~1 mm 水稳性团聚体含量分别较 CT 处理增加 ($P<0.05$) 1.5 倍和 1.4 倍。

表 1 不同耕作模式下 0~40 cm 土层不同粒径土壤团聚体分布
Table 1 Soil aggregate size distribution at 0-40 cm depth under different tillage patterns

土层/cm	处理	机械稳定性团聚体含量 水稳性团聚体含量						%
		>5 mm	5~≥2 mm	2~≥1 mm	1~≥0.5 mm	0.5~≥0.25 mm	<0.25 mm	
0~10	耕作前	15.42bB	14.42aA	8.43cC	13.78cC	9.35dC	38.60aA	
		—	—	—	0.68cC	1.51bB	97.81aA	
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	15.15bB	11.73bB	16.16aA	16.72aA	14.51aA	25.72cC	
		—	1.01a	2.59a	8.86aA	3.46aA	84.09bB	
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	17.83aA	14.45aA	14.25bB	14.87bB	12.11cB	26.49cC	
	—	0.71b	1.67b	8.76aA	3.76aA	85.10bB		
	CT	11.13cC	12.29bB	14.05bB	15.07bB	13.04bB	34.42bB	
		—	0.59b	1.31b	5.99bB	3.88aA	88.22bB	
>10~20	耕作前	26.65aA	15.71bB	9.15cC	10.79bB	6.83cC	30.87bA	
		—	—	—	0.46dC	0.73dD	98.81aA	
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	9.78cC	12.78cC	16.76aA	16.54aA	12.17bA	31.97bA	
		1.23a	0.68b	1.59bB	6.82bA	6.55aA	83.13cC	
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	16.40bB	17.12aA	16.91aA	16.50aA	14.50aA	18.57cB	
	0.45b	1.43a	4.27aA	8.44aA	2.89cC	82.53cC		
	CT	10.86bB	12.07cC	14.61bB	15.16bA	10.70bB	36.59aA	
		—	0.37c	0.68bB	3.61cB	4.01bB	91.34bB	
>20~30	耕作前	30.89cC	11.05a	9.30aA	9.67ab	5.98c	33.11bB	
		—	—	—	0.58c	1.35c	98.07a	
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	42.87bB	10.58ab	6.96bB	8.71b	7.06b	23.82cC	
		—	0.47a	0.63a	2.67a	3.53a	92.70c	
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	53.11aA	9.82bc	6.84bB	6.60c	6.96b	16.66dD	
	—	0.41a	0.41b	2.86a	3.71a	92.61c		
	CT	22.93dD	8.80c	9.41aA	10.72a	8.40a	39.75aA	
		—	0.20b	0.33b	1.24b	2.80b	95.43b	
>30~40	耕作前	35.89bB	15.73aA	8.44bA	9.53aA	6.11a	24.30bB	
		—	—	—	0.46	1.12c	98.42a	
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	51.85aA	5.77bB	6.47cB	6.69bB	4.86b	24.37bB	
		—	0.39a	0.31b	2.90a	4.11a	92.29b	
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	26.65cC	6.36bB	8.00bA	9.25aA	6.17a	23.72bB	
	—	0.25b	0.41a	2.82a	3.69ab	92.83b		
	CT	35.80bB	9.45aA	9.25aA	9.45aA	6.11a	29.95aA	
		—	0.18b	0.29b	2.00a	2.82bc	94.71b	

注: 各列不同大写字母间差异极显著 ($P<0.01$), 不同小写字母间差异显著 ($P<0.05$)。下同。

由表 2 可知, 各处理下干筛法得到的 >0.25 mm 机械稳定性团聚体含量 ($DR_{0.25}$) 在 61.4%~81.4%之间; 湿筛

法得到的 >0.25 mm 水稳性团聚体含量, 即水稳性团聚体稳定率 ($WSAR$), 在 1.2%~16.9%之间, 说明该土壤的

团聚体大部分为非水稳性团聚体。在 0~10 cm 和>20~30 cm 土层,3种耕作处理的 $DR_{0.25}$ 比处理前显著($P<0.05$)提高,增幅达 61.4%~81.34%。免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理 0~20 cm 土层>0.25 mm 团聚体的数量平均分别比连年翻耕增加 10.3% ($P<0.05$) 和 20.3% ($P<0.01$),>20~40 cm 土层分别平均增加 17.2% ($P<0.05$) 和 23.6% ($P<0.01$), 其中: 0~10 cm 土层 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 $DR_{0.25}$ 分别较 CT 处理增加 ($P<0.05$) 13.3%和 12.1%; >20~30 cm 土层分别增加 ($P<0.01$) 26.4%和 38.3%; >10~20 cm 和>30~40 cm 土层, 只有 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 $DR_{0.25}$ 显著 ($P<0.05$) 高于处理前, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理在>10~20 cm 土层 $DR_{0.25}$ 分别较 CT 处理增加 7.3% ($P<0.05$) 和 28.4% ($P<0.01$), >30~40 cm 土层分别增加 ($P<0.05$) 8.0%和 8.9%。说明 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式可显著提高 0~40 cm 各土层>0.25 mm 机械稳定性团聚体的数量。

2) 对土壤团聚体稳定性参数的影响
各处理干筛法下团聚体平均重量直径 ($DMWD$) 远

高于湿筛法下团聚体平均重量直径 ($WMWD$) (表 2)。不同耕作处理 3 年后, 在 0~10、>20~30 和>30~40 cm 土层各处理 $DMWD$ 值均明显高于处理前。0~10 cm 土层 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 $DMWD$ 值分别比 CT 处理提高 14.6% ($P<0.05$) 和 27.1% ($P<0.01$); >20~30 cm 土层分别极显著 ($P<0.01$) 提高 53.9%和 78.9%; >30~40 cm 土层分别显著提高 24.8% ($P<0.01$) 和 16.5% ($P<0.05$)。而>10~20 cm 土层 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 $DMWD$ 值较 CT 极显著 ($P<0.01$) 提高 33.1%, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理与传统翻耕无显著差异。0~40 cm 土层各处理 $WMWD$ 值均明显高于 2007 年耕作处理前, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理与连年翻耕差异显著 ($P<0.05$): 0~10 cm 土层 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理分别比 CT 处理提高 12.5%和 6.3%;>10~20 cm 土层分别提高 13.8%和 34.5%; >20~30 cm 土层均提高 7.4%; >30~40 cm 土层分别提高 7.4%和 3.7%。说明与传统翻耕相比, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式使 0~10、>20~30、>30~40 cm 土层 $DMWD$ 值和 0~40 cm 各土层 $WMWD$ 值显著提高。

表 2 不同耕作模式对土壤团聚体稳定性参数的影响
Table 2 Effect of different tillage patterns on stability parameter of aggregates

土层/cm	处理	>0.25 mm 机械稳定性团聚体质量分数±SD($DR_{0.25}$)/%	平均重量直径±SD (干筛)($DMWD$)/mm	平均重量直径±SD (湿筛)($WMWD$)/mm	不稳定团粒指数±SD (E_{LT})/%	水稳性团聚体稳定率±SD ($WSAR$)/%	结构体破碎率±SD (SDR)/%
0~10	耕作前	61.40±0.58cB	1.63±0.05bB	0.26±0.010cC	97.81±0.66aA	2.19±0.12cC	96.43±0.66aA
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	74.28±0.42aA	1.65±0.01bB	0.36±0.004aA	84.09±0.35bB	15.91±0.06aA	78.28±0.21cB
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	73.51±0.31aA	1.83±0.03aA	0.34±0.007aAB	85.10±0.81bB	14.90±0.04aA	79.73±0.70cB
	CT	65.58±0.66bB	1.44±0.04cC	0.32±0.009bB	88.22±0.06aB	11.78±0.08bB	82.04±0.63bB
>10~20	耕作前	69.13±0.83bB	2.20±0.02aA	0.25±0.003cC	98.81±0.31aA	1.19±0.33cC	98.28±0.35aA
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	68.03±0.63bB	1.43±0.04cB	0.33±0.006bB	83.13±1.02cB	16.87±1.09aA	75.2±0.67cB
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	81.43±0.96aA	1.89±0.06bA	0.39±0.003aA	82.53±1.71cB	17.47±1.34aA	78.55±0.43cB
	CT	63.41±0.89bB	1.42±0.01cB	0.29±0.003cC	91.34±0.27bAB	8.66±0.77bB	86.34±0.70bB
>20~30	耕作前	66.89±0.53cC	2.25±0.04cC	0.25±0.001cC	98.07±0.42aA	1.93±0.41cC	97.11±1.17aA
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	76.18±1.25bB	2.77±0.02bB	0.29±0.004aA	92.70±0.56bB	7.30±0.55aA	90.42±1.17bB
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	83.34±0.88aA	3.22±0.053aA	0.29±0.002aA	92.61±0.43bB	7.39±0.47aA	91.13±0.43bB
	CT	60.25±1.33dD	1.80±0.02dD	0.27±0.002bB	95.43±0.30bB	4.57±0.72bB	92.41±0.60±bB
>30~40	耕作前	75.70±0.36aA	2.62±0.02cC	0.25±0.005c	98.42±0.30aA	1.58±0.88cC	97.91±1.77aA
	$N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$	75.63±0.28aA	3.02±0.05aA	0.29±0.006a	92.29±0.38bB	7.71±1.11aA	89.8±1.92bB
	$S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$	76.28±0.60aA	2.82±0.01bB	0.28±0.004ab	92.83±0.55bB	7.17±0.78aA	90.61±0.82abB
	CT	70.05±1.00bB	2.42±0.02dD	0.27±0.004bc	94.71±0.73bB	5.29±0.54bB	92.44±1.06bB

注: SD 为标准差, 下同。

3 a 后, 3 种耕作处理 0~40 cm 土层水稳性团聚体稳定率 ($WSAR$) 均明显高于处理前, 表层 (0~20 cm) 水稳性团聚体稳定率均显著高于耕层 (>20~40 cm) (表 2)。在 0~10 cm 和>30~40 cm 土层, $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理分别显著 ($P<0.05$) 高于 CT 处理 35.1%和 45.8%, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理分别显著 ($P<0.05$) 高于 CT 处理 26.5%和 35.5%; >10~20 cm 和>20~30 cm 土层 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理分别高于 ($P<0.01$) CT 处理 94.8%和 59.7%, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理高于 ($P<0.01$) CT 处理 101.7%和 61.7%。说明 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 处理对于提高 0~10 cm 和>30~40 cm 土层的水稳性团聚体稳定率效果最佳, $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理极

显著提高了>10~20 cm 和>20~30 cm 土层的水稳性团聚体稳定率。

2010 年各处理 0~40 cm 土层土壤结构体破碎率 (SDR) 和不稳定团粒指数 (E_{LT}) 均比 2007 年处理前有不同的降低, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理表层 (0~20 cm) 降幅均显著高于连年翻耕, 耕层 (>20~40 cm) 与连年翻耕无显著差异。 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 0~10 cm 土层 SDR 值分别比 CT 处理降低 ($P<0.05$) 4.6%和 2.8%, E_{LT} 值分别降低 ($P<0.05$) 4.7%和 3.5%; >10~20 cm 土层 $N_{07} \rightarrow S_{08} \rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07} \rightarrow N_{08} \rightarrow S_{09}$ 处理 SDR 值分别比 CT 处理降低 ($P<0.05$) 12.9%和 9.0%,

E_{LT} 值分别降低 ($P<0.05$) 9.0%和 9.7%; 而 $>20\sim 30$ cm 和 $>30\sim 40$ cm 土层与传统翻耕差异不显著。说明轮耕模式可以显著降低表层土壤结构体破碎率和不稳定团粒指数, 利于提高土壤结构体的稳定性。

2.2 不同耕作模式对土壤入渗蓄水特性的影响

2.2.1 对土壤入渗性能的影响

2010 年作物收获后, 不同耕作处理的降雨入渗量、入渗深度和平均入渗率均比处理前明显提高(表 3), 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理与连年翻耕差异显著 ($P<0.05$): $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理的降雨入渗率分别比 CT 处理提高 35.2%和 15.3%, 入渗量比传统翻耕分别增加 2.0 和 1.2 L, 入渗深度增加 8.2、6.6 cm, 处理间差异均达到显著水平 ($P<0.05$)。表明轮耕模式能使土壤长时间保持较高的入渗速率, 增加入渗量和入渗深度, 增强土壤的水分入渗能力。

表 3 不同耕作模式下土壤水分入渗性能指标比较

处理	入渗量 \pm SD/ L	入渗深度 \pm SD/ cm	平均入渗率 \pm SD/ (mm \cdot min $^{-1}$)
耕作前	3.00 \pm 0.08c	20.5 \pm 2.72cB	1.81 \pm 0.15b
$N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$	5.23 \pm 0.12a	31.66 \pm 2.44aA	2.65 \pm 0.18a
$S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$	4.36 \pm 0.15b	30.12 \pm 4.76aA	2.26 \pm 0.15ab
CT	3.21 \pm 0.09c	23.48 \pm 3.39bB	1.96 \pm 0.08b

2.2.2 对土壤水分状况的影响

旱作耕地夏季休闲期的蓄水效果与耕作方式有关。小麦播种前, 3 a 不同耕作处理 0~200 cm 土壤蓄水量免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理均显著 ($P<0.05$) 高于连年翻耕(表 4), 2007~2008 年 $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理分别较 CT 高 12.8%和 13.3%; 2008~2009 年分别较 CT 高 9.8%和 8.3%; 2009~2010 年分别较 CT 高 8.0%和 13.0%。可见, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松 2 种轮耕模式可以更好地接纳蓄存 7~9 月份休闲期的降雨于土壤, 供下季作物生长需要。6 月底冬小麦收获后, 2007~2008 年 0~200 cm 土层土壤蓄水量 $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理分别较 CT 高 6.3%和 7.8%; 2008~2009 年分别较 CT 高 6.5%和 4.5%; 2009~2010 年分别较 CT 高 3.8%和 7.5%。2009~2010 年各处理 0~200 cm 土壤蓄水量均高于 2007~2008 和 2008~2009 年同期。说明经过 3 a, 轮耕模式在耕层土壤中创造了一个纵向(时间上)虚实并存的耕层结构, 较连年翻耕提高了土壤的降水入渗能力和持水性能。

在旱作农业区通过耕作措施, 储蓄天然降水, 对提高作物产量非常关键。3 a 周期内 $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理较连年翻耕平均增产 ($P<0.05$) 9.6%和 10.7%, 作物水分利用效率 (WUE) 分别平均提高 ($P<0.05$) 7.2%和 7.7% (表 4)。可见, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式通过更大幅度提高产量而提高了作物的水分利用效率, 也显著 ($P<0.05$) 提高了作物的降水生产效率。 $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理 3 a

平均降水生产效率分别较 CT 处理提高 ($P<0.05$) 9.6%和 10.7%, 其中, 2007~2008 年提高 8.7%和 9.7%, 2008~2009 年提高 14.1%和 10.1%; 2009~2010 年提高 6.9%和 12.0%。

表 4 不同耕作模式对小麦田土壤水分及利用状况的影响

Table 4 Effects of different tillage patterns on water use in wheat field

年份	处理	播种前蓄水量 \pm SD/ mm	收获后蓄水量 \pm SD/ mm	生育期 降水量 /mm	产量 \pm SD/ (kg \cdot hm $^{-2}$)	水分利用 效率 \pm SD/ (kg \cdot hm $^{-2}$ · mm $^{-1}$)	降水生产 效率 \pm SD/ (kg \cdot hm $^{-2}$ · mm $^{-1}$)
2007~2008	$N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$	349.05 \pm 1.02aA	225.52 \pm 1.18aA	157.1	2547.6 \pm 21.6aAB	9.08 \pm 0.04a	16.22 \pm 0.08a
	$S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$	350.73 \pm 0.89aA	228.66 \pm 2.42aA		2570.9 \pm 17.9aA	9.21 \pm 0.21a	16.36 \pm 0.13a
	CT	309.50 \pm 2.04bB	212.21 \pm 2.14bB		2343.4 \pm 24.8bB	8.54 \pm 0.24b	14.92 \pm 0.18b
	$N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$	335.05 \pm 0.88aA	216.13 \pm 1.16aA		114.4	2314.1 \pm 35.86bB	10.36 \pm 0.39a
$S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$	330.64 \pm 0.80bA	212.26 \pm 2.07aA	2233.2 \pm 32.30aA	10.02 \pm 0.26a		19.52 \pm 0.17a	
CT	305.21 \pm 1.83cB	203.04 \pm 2.39bB	2027.7 \pm 20.30cC	9.36 \pm 0.18b		17.72 \pm 0.15b	
$N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$	316.20 \pm 2.39bB	239.15 \pm 2.14bAB	229.6	2823.4 \pm 24.10bB		9.52 \pm 0.39a	12.30 \pm 3.33a
$S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$	330.93 \pm 2.28aA	247.70 \pm 2.04aA		2958.1 \pm 22.30aA	9.77 \pm 0.23a	12.88 \pm 2.75a	
CT	292.79 \pm 2.09cC	230.42 \pm 2.05cB		2641.6 \pm 23.30cC	9.05 \pm 0.47b	11.51 \pm 2.59b	
3 年平 均	$N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$	333.43 \pm 2.17aA		226.93 \pm 1.70aA	167.0	2561.7 \pm 5.60bB	9.60 \pm 0.33a
	$S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$	337.43 \pm 1.09aA	229.54 \pm 1.48aA	2587.4 \pm 4.50aA		9.65 \pm 0.56a	15.49 \pm 0.03a
	CT	302.50 \pm 2.22bB	215.22 \pm 0.93bB	2337.6 \pm 3.40cC		8.96 \pm 0.79b	14.00 \pm 0.05b

3 讨论

1) 已有研究认为免耕使土壤体积质量增大^[20], 而另有研究则认为免耕使土壤体积质量降低^[21]。深松相对传统翻耕, 能使 0~30 cm 土层体积质量降低 0.1 t/m³ 左右^[22]。本研究结果表明, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理 0~60 cm 各土层土壤体积质量分别比连年翻耕平均降低 ($P<0.05$) 3.5%和 6.2%, 说明免耕与深松隔年轮耕可有效降低表层土壤体积质量, 改善土壤结构。同时 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式增大了土壤孔隙度, 提高了土壤的蓄水保水能力。经过 3 a 轮耕试验, $N_{07}\rightarrow S_{08}\rightarrow N_{09}$ 、 $S_{07}\rightarrow N_{08}\rightarrow S_{09}$ 处理的 0~60 cm 各土层土壤孔隙度分别比 CT 处理平均提高 ($P<0.05$) 3.5%和 6.0%。

2) 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^[23], 进而影响土壤结构的稳定性及抗侵蚀能力^[24]。本试验结果表明, 经过 3 a 不同耕作处理, 与传统耕作相比, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式使 0~20 cm 土层 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体数量显著增加 ($P<0.05$), $>20\sim 40$ cm 土层 >5 mm 机械稳定性团聚体含量极显著增加 ($P<0.01$)。这可能由于免耕、深松等保护性耕作措施减少了对土壤的机械扰动, 改善了表层土壤结构^[25], 而传统翻耕进行频繁的田间作业, 使土壤有机质快速矿化, 减少了稳定性胶结剂的产生, 不利于大团聚体的形成^[26]。 >1 mm 水稳性大团聚体对耕作处理响应最为敏感, 可以作为指示耕作方式对团聚体特征短期影

响的一个指标^[27]。与连年翻耕相比, 在 0~10 cm 土层, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理 1~5 mm 水稳性团聚体含量分别提高 89.3% ($P<0.05$) 和 5.2%, >10~20 cm 土层, 分别提高 ($P<0.01$) 2.4 倍和 4.9 倍, 这与严波等^[28]的研究结果一致。

3) 相关研究表明, 免耕使土壤各级水稳性团聚体增加。徐阳春等^[29]的研究认为, 免耕条件下>0.25 mm 的团聚体总量增加了 25%左右。据 Sprague 等^[30]在印第安那州的研究, 玉米免耕种植 1 a 后, 0~5 cm 表层的水稳性团聚体比翻耕高 0.3%; >5~15 cm 土层比翻耕高 13.6%。West 研究^[31]也表明, 经 5 年免耕覆盖耕作后, 与传统耕作相比, 0~15 cm 土层中水稳性团聚体增加 35%, Dexter^[32]也得出类似的结论。本研究结果表明, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理 0~20 cm 土层机械稳定性团聚体的数量 ($DR_{0.25}$) 平均分别比连年翻耕增加 10.3% ($P<0.05$) 和 20.3% ($P<0.01$), >20~40 cm 土层分别平均增加 17.2% ($P<0.05$) 和 23.6% ($P<0.01$) 这与前人的研究结果相似。

土壤团聚体平均重量直径可以较好地总体上反映各耕作处理下团聚体粒级分布特征^[33]。本研究结果发现, 与连年翻耕相比, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理使 0~10 cm 土层干筛法下团聚体平均重量直径 ($DMWD$) 分别提高 ($P<0.05$) 14.6%和 27.1%, >20~40 cm 土层平均分别提高 ($P<0.01$) 39.3%和 47.7%; 使 0~20 cm 土层湿筛法下团聚体平均重量直径 ($WMWD$) 平均分别提高 ($P<0.05$) 13.2%和 20.4%, >20~40 cm 土层平均分别提高 7.4%和 5.6%, 表明实施免耕与深松隔年轮耕模式有利于犁底层的消失, 使土壤团粒结构含量增加, 有助于土壤结构的改善^[34]。

保护性耕作可以提高表层土壤团聚体的稳定性^[35-36]。本研究结果表明, 免耕/深松/免耕轮耕处理具有提高 ($P<0.05$) 0~10 cm 和>30~40 cm 土层的水稳性团聚体稳定率的效果, 深松/免耕/深松轮耕处理可以显著提高 ($P<0.05$) >10~20 cm 和>20~30 cm 土层的水稳性团聚体稳定率。土壤结构体破碎率 (SDR) 和不稳定团粒指数 (E_{LT}) 随土壤退化程度的增加而增加, 可以较好地反映土壤结构的稳定性^[17]。本研究结果表明, 经过 3 年不同耕作处理, 表层土壤结构体破碎率和不稳定团粒指数均比处理前明显下降, 0~20 cm 土层结构体破碎率免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理分别较连年翻耕平均降低 ($P<0.05$) 8.7%和 5.9%, 不稳定团粒指数分别平均降低 ($P<0.05$) 6.8%和 6.6%。说明轮耕模式减少了机械对土壤的频繁扰动, 明显降低了土壤结构体破碎率和不稳定团粒指数。

4) 有研究表明, 免耕在对保持土壤水分, 提高土壤的蓄水能力方面具有显著作用^[37-39]。深松可以有效打破犁底层加深耕层, 并使耕层内土壤疏松, 改善土壤的通透性, 提高土壤的渗水能力, 增强土壤蓄纳天然降雨的能力^[40]。本研究结果表明, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式能保持较高 ($P<0.05$) 的入渗速率, 增加入

渗量和入渗深度, 增强土壤的水分入渗能力, 使土壤的蓄水、保墒能力增强。传统耕作破坏了土壤结构, 易使表层土壤产生结皮, 降低土壤入渗速率^[12]。王育红等^[33]通过长期定位试验表明, 与传统耕作比较, 结合覆盖措施, 土壤入渗性能会得到进一步提高, 免耕和深松的平均入渗速率是传统耕作的 1.40 倍。

耕作措施对土壤水分分配影响较大, 保护性耕作处理土壤渗透性较好, 降水贮蓄的增量是传统耕作增量的 2 倍多^[33]。李友军等^[41]对豫西旱坡地的研究表明, 深松覆盖和免耕覆盖能明显提高土壤水分保蓄和小麦的水分利用能力。本试验结果表明, 在小麦播前, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理能有效保蓄雨季休闲期降水, 土壤蓄水量均显著高于连续翻耕处理, 经过 3 a, 在冬小麦收获后, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理较连年翻耕显著 ($P<0.05$) 提高了 0~200 cm 土层土壤蓄水量, 尤其在降水较少的年份 (2007~2008 年、2008~2009 年), 轮耕处理的保水效果更为明显。免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理的作物产量、水分利用效率和降水生产效率均显著 ($P<0.05$) 高于传统连年翻耕。

4 结 论

1) 与连年翻耕相比, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式均可有效降低表层土壤体积质量, 增大土壤孔隙度, 同时具备较强的保水力和通气性, 提高土壤的蓄水保水能力。

2) 与连年翻耕相比, 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式下 0~10 cm、>20~30 cm 土层的>0.25 mm 机械稳定性团聚体的数量显著提高了, >10~20 cm 土层湿筛法下团聚体平均重量直径和>20~40 cm 土层干筛法下团聚体平均重量直径显著增加; 2 年免耕 1 年深松模式显著提高了 0~10 cm 和>30~40 cm 土层的水稳性团聚体稳定率, 而 2 年深松 1 年免耕模式显著提高了>10~30 cm 土层的水稳性团聚体稳定率。2 种轮耕模式也显著降低了土壤结构体破碎率和不稳定团粒指数, 提高土壤结构体的稳定性。

3) 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式能够显著改善土壤的入渗性能, 增加入渗深度, 使平均入渗率分别提高 35.2%和 15.3%, 从而显著提高了土壤对降水的有效利用及作物水分利用效率。

4) 2 年免耕 1 年深松和 2 年深松 1 年免耕模式显著提高了对土壤水分的有效利用及降水利用率, 免耕/深松/免耕和深松/免耕/深松处理的 3 a 平均水分利用效率分别较连年翻耕提高 7.2%、7.7%, 降水生产效率分别提高 9.6%、10.7%。

[参 考 文 献]

- [1] 蒋定生. 黄土高原水土流失与治理模式[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1997.
- [2] 蔡进军, 蒋齐, 张源润, 等. 宁南山区典型旱作农耕地土壤特性分析[J]. 西北农业学报, 2007, 16(2): 7-80.

- Cai Jinjun, Jiang Qi, Zhang Yuanrun, et al. The soil characteristic analysis of model dry farmlands in the south mountainous area of Ningxia[J]. *Acta Agriculturae Boreali-Occidentalis Sinica*, 2007, 16(2): 75–80. (in Chinese with English abstract)
- [3] 马履一, 翟明普, 王勇. 京西山地棕壤和淋溶褐土饱和和导水率的分析[J]. *林业科学*, 1999, 35(3): 109–112.
Ma Lüyi, Zhai Mingpu, Wang Yong. Analysis of saturated soil hydraulic conductivity of mountain brown earth and eluvial cinnamon soil in Beijing Xishan[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 1999, 35(3): 109–112. (in Chinese with English abstract)
- [4] 田积莹. 黄土地区土壤的物理性质及与黄土成因的关系[J]. *中国科学院西北水保所集刊*, 1987(5): 1–12.
Tian Jiying. The soil physical properties with relation to the loess genesis in the Loess Region[J]. *Bulletin of Northwest Institute of Soil and Water Conservation in Chinese Academy of Sciences*, 1987(5): 1–12. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蒋定生, 黄国俊, 谢永生. 黄土高原土壤入渗能力野外测试[J]. *水土保持通报*, 1984, 4(4): 7–9.
Jiang Dingsheng, Huang Yongjun, Xie Yongsheng. Soil infiltration capacity of field testing in the Loess Plateau[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 1984, 4(4): 7–9. (in Chinese with English abstract)
- [6] Bodman G B, Colman E A. Moisture and energy condition during downward entry of water into soil[J]. *Soil Sci. Soc. A M J*, 1944, 8(2): 166–182.
- [7] 王育红, 姚宇卿, 吕军杰, 等. 豫西旱坡地高留茬深松对冬小麦生态效应的研究[J]. *中国生态农业学报*, 2004, 12(2): 462–481.
Wang Yuhong, Yao Yuqing, Lü Junjie, et al. Ecological effect of subsoiling high stubble on the winter wheat in sloping land of western Henan[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2004, 12(2): 462–481. (in Chinese with English abstract)
- [8] 赵小蓉, 赵燮京, 陈先藻. 保护性耕作对土壤水分和小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(增刊1): 6–10.
Zhao Xiaorong, Zhao Xiejing, Chen Xianzao. Effects of conservation tillage on soil moisture and wheat yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2009, 25(Supp.1): 6–10. (in Chinese with English abstract)
- [9] 孙国峰, 陈阜, 肖小平, 等. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究[J]. *农业工程学报*, 2007, 23(12): 109–113.
Sun Guofeng, Chen Fu, Xiao Xiaoping, et al. Preliminary study on effects of rotational tillage on soil physical properties and rice yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2007, 23(12): 109–113. (in Chinese with English abstract)
- [10] 雷金银, 吴发启, 王健, 等. 保护性耕作对土壤物理特性及玉米产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(10): 40–45.
Lei Jinyin, Wu Faqi, Wang Jian, et al. Effects of conservation tillage on soil physical properties and corn yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(10): 40–45. (in Chinese with English abstract)
- [11] 毛红玲, 李军, 贾志宽, 等. 旱作麦田保护性耕作蓄水保墒和增产增收效应[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 44–51.
Mao Hongling, Li Jun, Jia Zhikuan, et al. Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures on dryland wheat field[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2010, 26(8): 44–51. (in Chinese with English abstract)
- [12] 杨永辉, 赵世伟, 雷廷武, 等. 耕作对土壤入渗性能的影响[J]. *生态学报*, 2006, 26(5): 1624–1630.
Yang Yonghui, Zhao Shiwei, Lei Tingwu, et al. Tillage on soil infiltration under simulated rainfall conditions[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2006, 26(5): 1624–1630. (in Chinese with English abstract)
- [13] 中国科学院南京土壤研究所. 土壤理化分析[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1983: 62–126.
- [14] Limon-Ortega A, Govaerts B, Deckers J, et al. Soil aggregate and microbial biomass in a permanent bed wheat-maize planting system after 12 years[J]. *Field Crops Research*, 2006, 97: 302–309.
- [15] Youker R E, McGuinness J L. A short method of obtaining mean weight-diameter values of aggregate analysis of soil[J]. *Soil Science*, 1957, 83: 291–294.
- [16] Yang X M, Wander M M. Temporal changes in dry aggregate size and stability: tillage and crop effects on a silty loam Mollisol in Illinois[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 49: 173–183.
- [17] 宫阿都, 何毓蓉. 金沙江干热河谷典型区(云南)退化土壤的结构性与形成机制[J]. *山地学报*, 2001, 19(3): 213–219.
Gong Adu, He Yuerong. The structure feature and formation mechanism of the degraded soil in dry-hot valley region of the Jinsha River, Yunnan Province, China[J]. *Journal of Mountain Science*, 2001, 19(3): 213–219. (in Chinese with English abstract)
- [18] 韩清芳, 李向拓, 王俊鹏, 等. 微集水种植技术的农田水分调控效果模拟研究[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(2): 78–82.
Han Qingfang, Li Xiangtuo, Wang Junpeng, et al. Simulated study on soil moisture of field under water micro-collecting farming conditions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2004, 20(2): 78–82. (in Chinese with English abstract)
- [19] 蔡进军, 李生宝, 蒋齐, 等. 宁南黄土丘陵区典型水保工程措施对土壤入渗性能的影响[J]. *水土保持通报*, 2010, 30(1): 22–26.
Cai Jinjun, Li Shengbao, Jiang Qi, et al. Effects of typical soil and water conservation project on infiltration capacity in loess hilly regions of southern Ningxia[J]. *Bulletin of Soil*

- and Water Conservation, 2010, 30(1): 22—26. (in Chinese with English abstract)
- [20] Cassel D K. Tillage effects on corn production and soil physical conditions[J]. Soil Science Society of America Journal, 1995, 59(5): 1436—1443.
- [21] Aase J K, Pikul J L. Crop and soil response to long term tillage practice in the northern Great Plains[J]. Agronomy Journal, 1995, 87(4): 652—656.
- [22] 孟庆秋, 谢佳贵, 胡会军, 等. 土壤深松对玉米产量及其构成因素的影响[J]. 吉林农业科学, 2000, 25(2): 25—28. Meng Qingqiu, Xie Jiagui, Hu Huijun, et al. Effect of deep tillage of soil to maize yield and its component factors[J]. Jilin Agricultural Sciences, 2000, 25(2): 25—28. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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.
- [24] Yoder R E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses[J]. Journal of the American Society of Agronomy, 1936, 28: 337—351.
- [25] Kasper M, Buchan G D, Mentler A, Blum W E H. Influence of soil tillage systems on aggregate stability and the distribution of C and N in different aggregate fractions[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 105: 192—199.
- [26] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作方式对黑土团聚体含量及特征的影响[J]. 中国农业科学, 2010, 43(18): 3767—3775. Fan Ruqin, Liang Aizhen, Yang Xueming, et al. Effects of tillage on soil aggregates in black soils in northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2010, 43(18): 3767—3775. (in Chinese with English abstract)
- [27] 梁爱珍, 杨学明, 张晓平, 等. 免耕对东北黑土水稳性团聚体中有机碳分配的短期效应[J]. 中国农业科学, 2009, 42(8): 2801—2808. Liang Aizhen, Yang Xueming, Zhang Xiaoping, et al. Short-term impact of no tillage on soil organic carbon associated with water-stable aggregates in black soil of northeast China[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2009, 42(8): 2801—2808. (in Chinese with English abstract)
- [28] 严波, 贾志宽, 韩清芳, 等. 不同耕作方式对宁南旱地土壤团聚体的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2010, 28(3): 58—63. Yan Bo, Jia Zhikuan, Han Qingfang, et al. Effects of different tillage on soil aggregates in the arid areas of south Ningxia[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2010, 28(3): 58—63. (in Chinese with English abstract)
- [29] 徐阳春, 沈其荣, 雷宝坤, 等. 水旱轮作下长期免耕和施用有机肥对土壤某些肥力性状的影响[J]. 应用生态学报, 2000, 11(4): 549—552. Xu Yangchun, Shen Qirong, Lei Baokun, et al. Effect of long-term no-tillage and application of organic manure on some properties of soil fertility in rice/wheat rotation[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2000, 11(4): 549—552. (in Chinese with English abstract)
- [30] Sprague M A, Triplett G B. No-tillage and surface-tillage agriculture, the tillage revolution[J]. New York: John Wiley, 1986, 319—346.
- [31] West L T, Miller W P, Langdale G W, et al. Cropping system effects on intertill soil loss in Georgia piedmont[J]. SSSA, 1991: 1—3.
- [32] Dexter A R. Advances in characterization of soil structure[J]. Soil and Tillage Research, 1988, 11: 199—238.
- [33] 王育红, 蔡典雄, 姚宇卿, 等. 保护性耕作对豫西黄土坡耕地降水产流、土壤水分入渗及分配的影响[J]. 水土保持报, 2008, 22(2): 29—31. Wang Yuhong, Cai Dianxiong, Yao Yuqing, et al. Effects of conservation tillage on rainfall runoff, soil water infiltration and distribution on loess sloping farming in the western part of Henan[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2008, 22(2): 29—31. (in Chinese with English abstract)
- [34] 张国盛, Chan K Y, Li G D, 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. Zhang Guosheng, Chan K Y, Li G D, et al. Long-term effects of tillage systems and rotation on selected soil properties in cropping zone of southern NSW, Australia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(6): 2722—2728. (in Chinese with English abstract)
- [35] 李映强, 曾觉廷. 不同耕作制下水稻土有机物质变化及其团聚作用[J]. 土壤学报, 1991, 28(4): 4084—4091. Li Yingqiang, Zeng Jueting. Change in organic matter and its role in aggregation of paddy soils under different cropping systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 1991, 28(4): 4084—4091. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李爱宗, 张仁陟, 王晶. 耕作方式对黄绵土水稳性团聚体形成的影响[J]. 土壤通报, 2008, 39(3): 481—484. Li Aizong, Zhang Renzhi, Wang Jing. Effect of tillage methods on the formation of water-stable aggregates in loess soil[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2008, 39(3): 481—484. (in Chinese with English abstract)
- [37] Brandt S A. Zero and conventional tillage and their effects on crop yield and moisture[J]. Canadian Journal of Plant Science, 1992, 72: 679—688.
- [38] 李友军, 吴金芝, 黄明, 等. 不同耕作方式对小麦旗叶光合特性和水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2006, 22(12): 44—48. Li Youjun, Wu Jinzhi, Huang Ming, et al. Effects of different tillage systems on photosynthesis characteristics of flag leaf and water use efficiency in winter wheat[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(12): 44—48. (in Chinese with English abstract)
- [39] 王晓燕, 高焕文, 杜兵, 等. 保护性耕作的不同因素对降雨入渗的影响[J]. 中国农业大学学报, 2001, 6(6): 42—47. Wang Xiaoyan, Gao Huanwen, Du Bing, et al. Rainfall infiltration related to different conservation tillage factors[J].

- Journal of China Agricultural University, 2001, 6(6): 42—47. (in Chinese with English abstract)
- [40] 郑东辉, 王保民, 王雪峰. 机械超深松的作用与发展[J]. 农机化研究, 2005(5): 288.
Zheng Donghui, Wang Xuefeng. Function and development of mechanical super subsoiling[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2005(5): 288. (in Chinese with English abstract)
- [41] 李友军, 黄明, 吴金芝, 等. 不同耕作方式对豫西旱区坡耕地水肥利用与流失的影响[J]. 水土保持学报, 2006, 20(2): 42—45.
Li Youjun, Huang Ming, Wu Jinzhi, et al. Effects of different tillage on utilization and run-off of water and nutrient in sloping farmland of Yuxi dryland area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2006, 20(2): 42—45. (in Chinese with English abstract)

Effects of different rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics in dryland

Hou Xianqing^{1,2}, Jia Zhikuan^{1,2,3}, Han Qingfang^{1,2,3*}, Sun Hongxia^{1,2}, Wang Wei^{1,2},
Nie Junfeng^{1,2,3}, Yang Baoping^{1,2}

(1. The Chinese Institute of Water-saving Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China;
2. Key Laboratory of Crop Production and Ecology, Minister of Agriculture, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China; 3. College of Agronomy, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China)

Abstract: In order to determine the effects of no-tillage (NT), subsoiling (ST) rotational tillage patterns on soil structure, infiltration and water storage characteristics, the rotational tillage experiments were conducted to study on soil bulk density, aggregate, infiltration rate and water use efficiency in arid areas of southern Ningxia from 2007 to 2010. Tillage treatments comprised NT/ST/NT (no-tillage in first year, subsoiling in second year, again no-tillage in third year), ST/NT/ST (subsoiling in first year, no-tillage in second year, again subsoiling in third year) and CT (conventional tillage in 3 years). The results showed that, compared with CT, the soil bulk density of NT/ST/NT and ST/NT/ST treatments in 0-60 cm soil layers decreased averagely by 3.5% and 6.2% ($P < 0.05$); The number of elastic-stable aggregate (>0.25 mm, $DR_{0.25}$) in 0-20 cm layer increased averagely by 10.28% ($P < 0.05$) and 20.26% ($P < 0.01$), and which increased by 17.2% ($P < 0.05$) and 23.6% ($P < 0.01$) respectively in $>20-40$ cm soil layer. The water-stable aggregates stability rate ($WSAR$) of NT/ST/NT treatment in 0-10 cm and $>30-40$ cm layers increased by 35.1% and 45.8% ($P < 0.05$), and which increased by 101.7% and 61.7% ($P < 0.01$) respectively in $>10-20$ cm and $>20-30$ cm layers. The different rotational tillage patterns significantly enhanced soil infiltration characteristics, improved soil water use efficiency and rainfall use rate; The rainfall infiltration rate of NT/ST/NT and ST/NT/ST treatment increased averagely by 35.2% and 15.3% ($P < 0.05$), water use efficiency (WUE) increased by 7.2% and 7.7% ($P < 0.05$), precipitation use efficiency (PUE) increased by 9.6% and 10.7% ($P < 0.05$) respectively compared with CT.

Key words: soils, water, infiltration, rotational tillage pattern, water use efficiency, arid areas of southern Ningxia