

西北旱作农田不同耕作模式对土壤性状 及小麦产量的影响

侯贤清¹, 李荣¹, 贾志宽^{2*}, 韩清芳²

(1 宁夏大学农学院, 银川 750021; 2 西北农林科技大学中国旱区节水农业研究院/
农业部西北黄土高原作物生理生态与耕作重点实验室, 陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】在雨养农业区, 旱作区因连年翻耕而引起严重的土壤质量退化, 使作物生产力下降, 需定期改变其耕作方式。免耕深松隔年轮耕可以降低土壤容重, 增加耕层土壤团聚体和有机碳氮的含量, 增强土壤蓄水保墒能力, 对改善土壤性状和提高作物产量具有重要意义。【方法】本研究于 2007~2010 年在宁夏南部半旱区进行了两年免耕一年深松 (NT/ST/NT)、两年深松一年免耕 (ST/NT/ST)、连年翻耕 (CT) 3 种耕作模式试验, 研究了其对耕层土壤容重、团聚体、土壤有机碳氮含量、土壤水分及作物产量的影响。【结果】3 年耕作处理后, 与连年翻耕相比, NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理 0—20 cm 层土壤容重分别降低了 4.4% 和 7.3%, 20—40 cm 土层分别降低 2.1% 和 5.7%, 40—60 cm 土层分别降低 4.1% 和 5.5%; 土壤孔隙度 0—20 cm 土层分别提高了 4.1% 和 6.8%, 20—40 cm 土层提高了 2.1% 和 4.3%, 40—60 cm 土层提高了 5.5% 和 5.7%。0—20 cm 土层, NT/ST/NT 处理 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体含量平均较 CT 处理提高了 12.4%, ST/NT/ST 处理 > 2 mm 机械稳定性团聚体含量较 CT 处理平均提高了 42.0%; 20—40 cm 土层, NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理 > 2 mm 团聚体含量较 CT 处理平均分别提高了 44.3% 和 50.4%。两种轮耕模式使 0—40 cm 土层土壤团聚体平均重量直径分别显著高于 CT 处理 21.8% 和 22.5%, 几何平均直径分别高于 CT 处理 9.6% 和 9.5%。三个处理耕层土壤有机碳氮含量均比试验前有一定程度的增加, 轮耕处理 0—30 cm 土层 0.25~2 mm 粒级有机碳含量和 < 0.25 mm 粒级全氮含量显著高于 CT, 以 ST/NT/ST 处理效果最佳。NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0—10 cm 土层 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量较 CT 处理分别显著提高 7.9% 和 10.2%, 10—20 cm 土层分别提高 19.0% 和 15.7%, 20—30 cm 土层分别提高 10.6% 和 13.3%; 0—10 cm 土层 < 0.25 mm 粒级全氮含量显著提高 9.4% 和 10.9%, 10—20 cm 土层分别提高 6.8% 和 10.2%, 20—30 cm 土层分别提高 7.4% 和 9.3%。研究期间, NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理较 CT 处理可显著提高 0—200 cm 土壤贮水量, 其中以 ST/NT/ST 处理保蓄土壤水分效果最佳。在小麦生长前期, 轮耕处理土壤贮水量均高于连年翻耕, 生长后期 ST/NT/ST 处理土壤水分含量最高, NT/ST/NT 处理次之。轮耕处理的小麦生物量和籽粒产量显著高于连年翻耕, 其中小麦籽粒产量分别增加 9.6% 和 10.7%。【结论】免耕/深松轮耕可显著改善土壤的物理性状和水分环境, 显著增加耕层土壤有机碳氮含量, 提高作物的生产力, 在干旱半干旱区有重要的应用前景。

关键词: 旱作农田; 土壤耕作; 团聚体; 有机碳; 土壤水分; 小麦产量

Effects of different tillage practices on soil properties and wheat yields in dry farmland of northwest China

HOU Xian-qing¹, LI Rong¹, JIA Zhi-kuan^{2*}, HAN Qing-fang²

(1 School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China; 2 Chinese Institute of Water-saving Agriculture/
Key Laboratory of Crop Physiology-Ecology and Tillage Science in Northwestern Loess Plateau, Ministry of
Agriculture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

收稿日期: 2017-02-13 接受日期: 2017-05-22

基金项目: 国家自然科学基金 (31301280); 国家“十一五”科技支撑课题 (2006BAD29B03) 资助。

作者简介: 侯贤清 (1981—), 男, 河南商丘人, 副教授, 主要从事农业节水技术方面研究。E-mail: houxianqing1981@126.com

* 通信作者 E-mail: zhikuan@tom.com

Abstract: [Objectives] In rain-fed semi-arid agro-ecosystems in northwest China, continuous ploughing has led to serious soil deterioration and crop productivity decline. Adopting suitable tillage practices is very important for improving soil fertility and keeping stable crop yields. **[Methods]** A field experiment was conducted in arid area of southern Ningxia from 2007 to 2010. The treated tillage patterns included: 1) no-tillage in the first year(CT), subsoiling in the second year and no-tillage in the third year (NT/ST/NT); 2) subsoiling in the first year, no-tillage in the second year and subsoiling in the third year (ST/NT/ST); 3) ploughing before and after harvest every year. The soil bulk density, aggregate, soil organic carbon (SOC), total nitrogen (TN) content, soil water, and crop yields were determined. **[Results]** After 3 years' treatments, the soil bulk density under NT/ST/NT and ST/NT/ST was significantly decreased by 4.4% and 7.3% at the 0–20 cm depth, 2.1% and 5.7% at the 20–40 cm depth and 4.1% and 5.5% at the 40–60 cm depth, compared with CT. The total soil porosity under NT/ST/NT and ST/NT/ST was 4.1% and 6.8% higher than that under CT at the 0–20 cm depth, 2.1% and 4.3% at the 20–40 cm depth and 5.5% and 5.7% at the 40–60 cm depth, respectively. At 0–20 cm, the mean amount of the 0.25–2 mm elastic-stable aggregate in NT/ST/NT was 12.4% higher than in CT, and the mean amount of the > 2 mm elastic-stable aggregate in ST/NT/ST was 42.0% higher than in CT. At 20–40 cm, the mean amounts of the > 2 mm elastic-stable aggregate under NT/ST/NT and ST/NT/ST were 44.3% and 50.4% higher than CT, respectively. The mean weight diameter values in NT/ST/NT and ST/NT/ST were 21.8% and 22.5% higher than in CT respectively, and the geometric mean diameter values were 9.6% and 9.5% higher than CT at 0–40 cm depth. The soil organic carbon (SOC) and total nitrogen (TN) contents at 0–40 cm depth were increased in all treatments compared with the initial background value. Significant differences were detected in the SOC contents in aggregates of 0.25–2 mm and the TN contents in aggregates of < 0.25 mm size fractions at 0–10 cm, 10–20 cm, and 20–30 cm depths between the two rotational tillage treatments and the conventional tillage, and the ST/NT/ST treatment produced the highest increases. The SOC contents in 0.25–2 mm of aggregates in NT/ST/NT and ST/NT/ST treatments were significantly increased by 7.9% and 10.2% at the 0–10 cm depth, 19.0% and 15.7% at the 10–20 cm depth, and 10.6% and 13.3% at the 20–30 cm depth, compared with CT. The TN contents in < 0.25 mm of aggregates in NT/ST/NT and ST/NT/ST were significantly increased by 9.4% and 10.9% at the 0–10 cm depth, 6.8% and 10.2% at the 10–20 cm depth, and 7.4% and 9.3% at the 20–30 cm depth, compared with CT. During the three-year study, both the NT/ST/NT and ST/NT/ST treatments significantly increased soil water storage (0–200 cm) compared with CT treatment, and the ST/NT/ST treatment was better than NT/ST/NT. The rotational tillage treatments significantly increased the soil water storage at the early growing season of wheat, and the ST/NT/ST treatment produced the highest soil water storage, followed by the NT/ST/NT treatment at the later growing season of wheat. Biomass and grain yields of wheat with the rotational tillage practices were significantly and positively influenced over 3 years, and the 3-year mean wheat grain yields for NT/ST/NT and ST/NT/ST were increased by 9.6% and 10.7% compared with CT. **[Conclusions]** The rotation of no-tillage and subsoiling was a promising management option for enhancing soil C and N sequestration, with the benefit of maintaining soil physical properties, water environment, and crop productivity of tillage practices in arid areas of southern Ningxia.

Key words: dry farmland; soil tillage; aggregate; organic carbon; soil water; wheat yield

土壤性状的改善影响土壤水肥气热的协调和水分和养分的运移, 决定土壤供给作物养分的能力和产量的形成。西北黄土高原干旱、半干旱区旱作农田常年进行连年翻耕, 使土壤结构遭到一定的破坏, 使土壤有机质含量降低和养分流失, 耕地质量变差, 从而影响土地的可持续利用^[1-2]。众多研究表

明, 过度的连年翻耕严重破坏土壤的物理性状, 加速有机质分解和养分流失, 加剧了土壤理化性状和生态环境的恶化, 直接导致土壤肥力降低, 耕地质量日趋下降^[3-4]。因此, 如何通过合理的耕作措施来改善土壤肥力及生产力, 提高作物产量, 已成为目前亟待解决的重要问题。

保护性耕作措施(少耕、免耕和深松)在改善土壤结构、增加土壤团聚体含量、减少土壤有机碳矿化、增加土壤的保水保肥能力、提高产量等方面均具有显著效果。Gao 等^[5]和 Huang 等^[6]的研究发现,免耕可降低土壤容重、促进土壤团聚体的形成,从而能显著提高土壤的保水能力;尚金霞等^[7]和张丽华等^[8]研究表明,深松能改善耕层土壤结构,增加土壤入渗性能,提高土壤的蓄水保墒能力。但是长期免耕可导致土壤紧实,连年深松对土壤水分保蓄效果并不显著^[9-10]。可见,单一免耕和深松措施对土壤性状产生诸多问题,从而不利于作物的生长和产量的提高。

国内外学者研究表明,适时进行深松、免耕等土壤轮耕措施,形成与种植制度相适应的旱作土壤耕作技术体系,是解决长期连年翻耕弊病的有效措施^[11-12]。因此,我们在西北旱区连续进行了三年免耕/深松隔年轮耕田间试验,旨在探寻能够改善土壤理化性质、提高作物生产力的耕作模式,以减少土壤养分损失,维持土地的可持续利用。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

2007~2010 年试验在宁夏回族自治区固原市彭阳县旱作农业试验站进行。试验区位于宁夏南部半干旱区,海拔 1800 m,年蒸发量达 1050 mm,多年平均降雨量 435 mm,60% 的降雨发生在 7~9 月期间。年平均气温 8.1℃,无霜期 155 d,属典型温带半干旱大陆性季风气候。试验田土壤类型为黄绵土,土壤肥力较低,耕层 0—40 cm 有机质含量为 7.2 g/kg、碱解氮 50.3 mg/kg、有效磷 8.6 mg/kg、速效钾 84.8 mg/kg、pH 值为 8.5,属低肥力水平。

1.2 试验设计

试验地前茬作物为冬小麦,处理前一直采用传统翻耕方式;试验期间未进行灌溉,小麦收获时留茬 5~8 cm,作物秸秆清除出农田。试验设置 3 种耕作模式,随机区组设计,3 次重复。每个小区宽 6 m、长 15 m。耕作模式如下:1) 两年免耕一年深松(NT/ST/NT) 第 1 年冬小麦收获后进行免耕处理,第 2 年小麦收获后进行深松处理,第 3 年小麦收获后进行免耕处理。2) 两年深松一年免耕(ST/NT/ST) 第 1 年小麦收获后进行深松处理,第 2 年小麦收获后进行免耕处理,第 3 年小麦收获后进行深松处理。3) 连年翻耕(CT) 冬小麦收获后,进行连年翻耕处理。免耕处理:小麦收获后进行表土处理,清除杂草,9 月

下旬直接免耕播种。深松处理:采用中国农业大学生产的可调节深度的翼铲式深松机进行。耕作深度 30—35 cm,宽度间隔 40 cm。传统翻耕:采用专用铧犁拖拉机翻耕土壤,耕作深度 15—20 cm,耕后耙耱。

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。采用可控制深度(压轮)和行距(20 cm)的免耕 250 型播种机分别于 2007 年 9 月 18 日、2008 年 9 月 15 日和 2009 年 9 月 20 日播种,播种时基施尿素(N ≥ 46%) 675 kg/hm²、过磷酸钙(P₂O₅ ≥ 12%) 750 kg/hm²,冬小麦拔节期分别追施尿素 150 kg/hm²,试验期间进行人工除草。冬小麦分别于 2008 年 6 月 27 日、2009 年 6 月 24 日和 2010 年 7 月 10 日收获。

1.3 测定项目及方法

1.3.1 土壤容重的测定 在 2007 年 6 月 24 日试验处理前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后,各小区均按 0—20 cm、20—40 cm 和 40—60 cm 土层用环刀分别取土样,测定各土层土壤容重,并计算总孔隙度。

1.3.2 团聚体各粒级含量的测定 在 2007 年 6 月 24 日试验前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后,各小区均按 0—10、10—20、20—30 和 30—40 cm 土层分别采集原状土样,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 2 mm 和 0.25 mm 的筛子,分为 > 2 mm、0.25~2 mm、< 0.25 mm 三个级别。然后按三个级别土样在原状土中所占比例取混合土样 200 g。土壤团聚体粒级分布和稳定性利用干筛法和湿筛法测定,并分别计算出 > 2 mm、0.25~2 mm、> 0.25 mm 和 < 0.25 mm 各粒级机械稳定性团聚体和水稳性团聚体含量;机械稳定性团聚体平均重量直径(DMWD)、几何平均直径(DGMD);水稳性团聚体平均重量直径(WMWD)、几何平均直径(WGMD)。

1.3.3 土壤总有机碳和全氮含量的测定 在 2007 年 6 月 24 日试验前及 2010 年 7 月 10 日小麦收获后,各小区按 0—10、10—20、20—30 和 30—40 cm 土层分别取样,测定土壤有机碳和全氮;土壤总有机碳和全氮含量分别采用碳分析仪和凯氏定氮仪测定^[21]。

1.3.4 土壤水分含量的测定 在冬小麦生育期(播种期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期和成熟期)各小区采用土钻取土(0—200 cm),每 20 cm 土层分层取样,烘干法测定土壤质量含水量。

土壤贮水量(mm): $W = 10hab$

式中: h 为土层深度(cm); a 是土壤容重(g/cm³);

b 是土壤质量含水量 (%)。

1.3.5 作物生物量及产量的测定 小麦收获期, 分别测定小麦地上部生物量 (籽粒与秸秆)、地下部生物量 (根茬以下部分)。

1.4 数据分析

试验数据采用 SAS 8.01 进行单因素方差 (ANOVA) 分析, 采用 Duncan 新复极差法显著性检验 ($P < 0.05$), 各指标应用 DPS 6.55 软件进行逐步回归, Excel 2003 制图。

2 结果与分析

2.1 不同耕作模式下土壤容重及孔隙度

经过 3 年耕作试验后, 2010 年小麦收获期, 轮耕处理 (NT/ST/NT 和 ST/NT/ST) 显著降低了 0—60 cm 土层土壤容重, 降幅达 5.6%~9.0%, 而连年翻耕处理 (CT) 无明显变化 (图 1); 与 CT 处理相比, NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0—60 cm 土层土壤容重分别显著降低 3.5% 和 6.2%。0—20 cm 土层, 2010 年 NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理的土壤容重比 CT 处理分别降低 4.4% 和 7.3%; 20—40 cm 土层, 分别降低 2.1% 和 5.7%; 40—60 cm 土层, 分别降低 4.1% 和 5.5%, 而轮耕处理间无显著差异。轮耕处理的 0—60 cm 土层土壤孔隙度均比处理前显著增加, 而连年翻耕处理增幅不显著。NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理 0—20 cm 土壤孔隙度高于 CT 处理 4.1% 和 6.8%, 20—40 cm 提高 2.1% 和 4.3%, 40—60 cm 提高 5.5% 和 5.7%。

2.2 不同耕作模式下土壤团聚体粒级分布及稳定性

经过 3 年不同轮耕试验, 3 种耕作处理 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, 而轮耕处理 20—30 cm 和 30—40 cm 土层 > 2 mm 机械稳定性团聚体数量均比处理前显著增加, 连年翻耕处理增幅不显著 (表 1)。0—10 cm 土层, NT/ST/NT 处理 0.25~2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理提高 12.4%, ST/NT/ST 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, NT/ST/NT、ST/NT/ST 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%, ST/NT/ST 处理 > 2 mm 机械稳定性团聚体数量较 CT 处理提高 46.2%; 在 20—30 cm 和 30—40 cm 土层, NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理平均 > 2 mm 团聚体数量较 CT 处理分别提高 44.3% 和 50.4%。

通过 3 年不同耕作处理, 与连年翻耕处理相比, 轮耕处理 0—40 cm 土层 0.25~2 mm 水稳性团聚体含量均显著增加; < 0.25 mm 水稳性微团聚体含量 CT 处理均高于 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理; 各处理 > 2 mm 水稳性团聚体含量最低 (1.5%~2.6%)。轮耕处理 0—10 cm 土层 0.25~2 mm 水稳性团聚体含量较连年翻耕处理分别提高 24.7% 和 26.7%, 10—20 cm 土层分别提高 75.7% 和 48.7%, 20—30 cm 土层分别提高 53.5% 和 62.6%, 30—40 cm 土层分别提高 45.4% 和 35.1%。然而, 0—40 cm 土层平均 < 0.25 mm 团聚体含量分别降低 4.6% 和 4.4%。

不同耕作措施可显著影响土壤团聚体的平均重量直径和几何平均直径 (表 1)。各处理机械稳定性团聚体平均重量直径 (DMWD) 和几何平均直径 (DGMD) 远高于水稳性团聚体平均重量直径 (WMWD) 和几何平均直径 (WGMD)。3 年不同耕作

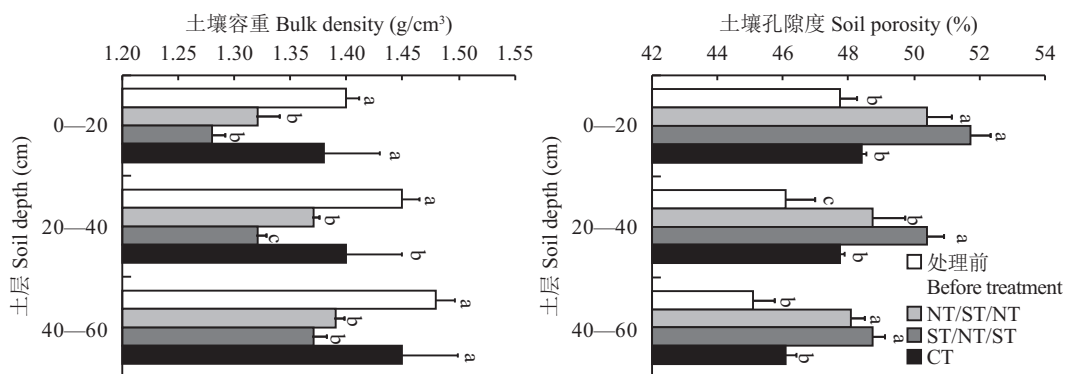


图 1 不同耕作模式不同土层土壤容重和孔隙度

Fig. 1 Bulk density and porosity of soil at different depths under different tillage patterns

[注 (Note): 柱上不同小写字母表示不同耕作模式间差异达显著水平 ($P < 0.05$)]

Different letters above the bars indicate significant differences between different tillage practices ($P < 0.05$).]

表 1 不同耕作模式 0—40 cm 土层土壤团聚体各粒级分布及稳定性
Table 1 Soil aggregate size distribution and stability at 0—40 cm depth under different tillage patterns

| 土层 Soil depth (cm) | 处理 Treatment | >2 mm | | | | 0.25~2 mm | | | | <0.25 mm | | | | 机械稳定团聚体 Elastic-stable aggregate | | 水稳定团聚体 Water-stable aggregate | | | | | | |
|--------------------------|-----------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|-------------------------------|----------------------------|--|---|--|---|--|---|----------------------------------|--------------|---------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | 机械稳定 Elastic-stable (%) | 水稳定 Water-stable (%) | 机械稳定 Elastic-stable (%) | 水稳定 Water-stable (%) | 机械稳定 Elastic-stable (%) | 水稳定 Water-stable (%) | 机械稳定 Elastic-stable (%) | 水稳定 Water-stable (%) | 平均重量直径 Mean weight diameter (mm) | 几何平均直径 Geometric mean diameter (mm) | 平均重量直径 Mean weight diameter (mm) | 几何平均直径 Geometric mean diameter (mm) | 平均重量直径 Mean weight diameter (mm) | 几何平均直径 Geometric mean diameter (mm) | | | | | | | |
| 0—10 | 处理前 | 29.8 ± 3.3 ab | — | 31.6 ± 1.9 c | 2.2 ± 0.1 c | 38.6 ± 4.6 a | 97.8 ± 1.1 a | 0.81 ± 0.15 b | 0.14 ± 0.04 d | 0.97 ± 0.09 b | 0.26 ± 0.03 c | NT/ST/NT | 26.9 ± 5.2 bc | 3.6 ± 0.2 a | 47.4 ± 2.5 a | 12.3 ± 0.1 a | 25.7 ± 5.1 b | 84.1 ± 1.8 c | 1.72 ± 0.20 a | 0.52 ± 0.02 a | 1.19 ± 0.13 a | 0.34 ± 0.05 a |
| | NT/ST/NT | 26.9 ± 5.2 bc | 3.6 ± 0.2 a | 47.4 ± 2.5 a | 12.3 ± 0.1 a | 25.7 ± 5.1 b | 84.1 ± 1.8 c | 1.72 ± 0.20 a | 0.52 ± 0.02 a | 1.19 ± 0.13 a | 0.34 ± 0.05 a | ST/NT/ST | 32.3 ± 4.1 a | 2.4 ± 0.2 b | 41.2 ± 3.1 b | 12.5 ± 0.1 a | 26.5 ± 3.3 b | 85.1 ± 1.8 bc | 1.81 ± 0.15 a | 0.48 ± 0.02 b | 1.23 ± 0.19 a | 0.33 ± 0.02 ab |
| | ST/NT/ST | 32.3 ± 4.1 a | 2.4 ± 0.2 b | 41.2 ± 3.1 b | 12.5 ± 0.1 a | 26.5 ± 3.3 b | 85.1 ± 1.8 bc | 1.81 ± 0.15 a | 0.48 ± 0.02 b | 1.23 ± 0.19 a | 0.33 ± 0.02 ab | CT | 23.4 ± 4.9 c | 1.9 ± 0.1 b | 42.2 ± 4.2 b | 9.9 ± 0.1 b | 34.4 ± 2.3 a | 88.2 ± 1.8 b | 1.54 ± 0.25 a | 0.44 ± 0.03 c | 0.99 ± 0.08 b | 0.31 ± 0.04 b |
| 10—20 | 处理前 | 42.4 ± 2.2 a | — | 26.8 ± 3.7 c | 1.2 ± 0.6 d | 30.9 ± 2.2 b | 98.8 ± 1.9 a | 0.98 ± 0.13 c | 0.13 ± 0.01 d | 1.24 ± 0.14 b | 0.26 ± 0.05 c | NT/ST/NT | 22.6 ± 5.2 c | 3.5 ± 0.4 b | 45.5 ± 4.1 a | 13.4 ± 0.5 a | 32.0 ± 3.8 b | 83.1 ± 1.7 c | 1.55 ± 0.12 b | 0.53 ± 0.03 b | 1.02 ± 0.06 c | 0.35 ± 0.03 a |
| | NT/ST/NT | 22.6 ± 5.2 c | 3.5 ± 0.4 b | 45.5 ± 4.1 a | 13.4 ± 0.5 a | 32.0 ± 3.8 b | 83.1 ± 1.7 c | 1.55 ± 0.12 b | 0.53 ± 0.03 b | 1.02 ± 0.06 c | 0.35 ± 0.03 a | ST/NT/ST | 33.5 ± 3.4 b | 6.2 ± 0.3 a | 47.9 ± 3.7 a | 11.3 ± 1.0 b | 18.6 ± 4.8 c | 82.5 ± 0.9 c | 1.94 ± 0.15 a | 0.59 ± 0.02 a | 1.43 ± 0.06 a | 0.36 ± 0.02 a |
| | ST/NT/ST | 33.5 ± 3.4 b | 6.2 ± 0.3 a | 47.9 ± 3.7 a | 11.3 ± 1.0 b | 18.6 ± 4.8 c | 82.5 ± 0.9 c | 1.94 ± 0.15 a | 0.59 ± 0.02 a | 1.43 ± 0.06 a | 0.36 ± 0.02 a | CT | 22.9 ± 4.3 c | 1.1 ± 0.3 c | 40.5 ± 2.9 b | 7.6 ± 0.6 c | 36.6 ± 4.8 a | 91.3 ± 1.2 b | 1.50 ± 0.08 b | 0.38 ± 0.04 c | 0.95 ± 0.01 c | 0.29 ± 0.02 b |
| 20—30 | 处理前 | 41.9 ± 4.2 c | — | 25.0 ± 3.6 b | 1.9 ± 0.1 c | 33.1 ± 4.5 b | 98.1 ± 1.3 a | 0.96 ± 0.05 c | 0.14 ± 0.03 c | 1.18 ± 0.11 c | 0.26 ± 0.03 b | NT/ST/NT | 53.5 ± 5.3 b | 1.1 ± 0.3 a | 22.7 ± 2.3 c | 6.2 ± 0.7 a | 23.8 ± 3.1 c | 92.7 ± 2.1 c | 2.27 ± 0.10 a | 0.36 ± 0.02 a | 1.54 ± 0.06 b | 0.29 ± 0.03 a |
| | NT/ST/NT | 53.5 ± 5.3 b | 1.1 ± 0.3 a | 22.7 ± 2.3 c | 6.2 ± 0.7 a | 23.8 ± 3.1 c | 92.7 ± 2.1 c | 2.27 ± 0.10 a | 0.36 ± 0.02 a | 1.54 ± 0.06 b | 0.29 ± 0.03 a | ST/NT/ST | 62.9 ± 2.0 a | 0.8 ± 0.3 a | 20.4 ± 1.8 c | 6.6 ± 0.6 a | 16.7 ± 2.8 d | 92.6 ± 1.8 c | 2.55 ± 0.20 a | 0.36 ± 0.02 a | 1.90 ± 0.06 a | 0.29 ± 0.04 a |
| | ST/NT/ST | 62.9 ± 2.0 a | 0.8 ± 0.3 a | 20.4 ± 1.8 c | 6.6 ± 0.6 a | 16.7 ± 2.8 d | 92.6 ± 1.8 c | 2.55 ± 0.20 a | 0.36 ± 0.02 a | 1.90 ± 0.06 a | 0.29 ± 0.04 a | CT | 31.7 ± 2.8 d | 0.5 ± 0.4 a | 28.5 ± 1.5 a | 4.0 ± 0.1 b | 39.8 ± 2.0 a | 95.4 ± 1.1 b | 1.64 ± 0.18 b | 0.32 ± 0.03 b | 0.96 ± 0.15 c | 0.27 ± 0.02 ab |
| 30—40 | 处理前 | 51.6 ± 3.6 b | — | 24.1 ± 2.2 a | 1.6 ± 0.2 c | 24.3 ± 2.2 b | 98.4 ± 0.8 a | 1.11 ± 0.19 b | 0.13 ± 0.05 c | 1.50 ± 0.09 a | 0.26 ± 0.03 b | NT/ST/NT | 57.6 ± 2.1 a | 0.7 ± 0.0 a | 18.0 ± 2.3 b | 7.0 ± 0.1 a | 24.4 ± 4.1 b | 92.3 ± 0.8 c | 2.35 ± 0.08 a | 0.36 ± 0.04 a | 1.58 ± 0.12 a | 0.29 ± 0.01 a |
| | NT/ST/NT | 57.6 ± 2.1 a | 0.7 ± 0.0 a | 18.0 ± 2.3 b | 7.0 ± 0.1 a | 24.4 ± 4.1 b | 92.3 ± 0.8 c | 2.35 ± 0.08 a | 0.36 ± 0.04 a | 1.58 ± 0.12 a | 0.29 ± 0.01 a | ST/NT/ST | 52.9 ± 4.2 b | 0.7 ± 0.0 a | 23.4 ± 4.4 a | 6.5 ± 0.5 a | 23.7 ± 1.8 b | 92.8 ± 0.5 c | 2.26 ± 0.25 a | 0.35 ± 0.03 ab | 1.53 ± 0.07 a | 0.29 ± 0.01 a |
| | ST/NT/ST | 52.9 ± 4.2 b | 0.7 ± 0.0 a | 23.4 ± 4.4 a | 6.5 ± 0.5 a | 23.7 ± 1.8 b | 92.8 ± 0.5 c | 2.26 ± 0.25 a | 0.35 ± 0.03 ab | 1.53 ± 0.07 a | 0.29 ± 0.01 a | CT | 45.3 ± 4.3 c | 0.5 ± 0.0 a | 24.8 ± 4.1 a | 4.8 ± 0.3 b | 30.0 ± 2.9 a | 94.7 ± 0.5 b | 2.03 ± 0.03 a | 0.33 ± 0.05 b | 1.29 ± 0.13 b | 0.28 ± 0.04 ab |

注 (Note) : NT/ST/NT—两年免耕—一年深松 No-tillage in the first year, subsoiling in the second year, no-tillage in the third year; ST/NT/ST—两年深松—一年免耕 Subsoiling in the first year, no-tillage in the second year, and subsoiling in the third year; CT—连年翻耕 Ploughing before and after harvest every year. 同列数值后不同字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

处理后, 各处理 DMWD 和 DGMD 值随土层的加深而增加, 而 WMWD 和 WGMD 值随土层的加深而下降。在 0—40 cm 土层, NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理的平均 DMWD 值分别显著高于 CT 处理 17.6% 和 27.7%, 平均 DGMD 值分别显著高于 CT 处理 27.5% 和 45.5%。NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0—40 cm 土层平均 WMWD 值分别显著高于 CT 处理 21.8% 和 22.5%, 平均 WGMD 值分别高于 CT 处理 9.6% 和 9.5%。

2.3 不同耕作模式下土壤有机碳和全氮含量

由表 2 可知, 经过 3 年耕作处理后, 与 2007 年试验前相比, 2010 年小麦收获期所有处理土壤有机碳和全氮含量均显著增加。这可能由于连年根茬还田, 使土壤有机碳含量有所提高。2010 年, 各处理 0—40 cm 土层 0.25~2 mm 粒级有机碳和全氮含量最高, 与 CT 处理相比, NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理显著增加了 0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm 土层 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量, 显著增加了土层 < 0.25 mm 粒级全氮含量, 而轮耕处理间无显著差异。NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0—10 cm 土层 0.25~2 mm 团聚体有机碳含量较 CT 处理显著提高 7.9% 和 10.2%, 10—20 cm 分别提高 19.0% 和 15.7%, 20—30 cm 土层分别提高 10.6% 和 13.3%。NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理 0—10 cm 土层 < 0.25 mm 粒级全氮含量较 CT 处理显著提高 9.4% 和 10.9%, 10—20 cm 分别提高 6.8% 和 10.2%, 20—30 cm 分别提高 7.4% 和 9.3%。而 30—40 cm 土层, 不同粒级有机碳和全氮含量各处理间无显著差异。

随着土层的加深, 所有处理各粒级团聚体有机碳和全氮含量降低, 0.25~2 mm 粒级的有机碳和全氮含量高于 > 2 mm 和 < 0.25 mm 粒级。轮耕对团聚体有机碳和全氮含量的影响在 0—20 cm 土层, 两年深松一年免耕模式在一定程度上减少对表层土壤的扰动, 维持较高的 < 2 mm 粒级土壤有机碳含量, 降低土壤的氮素损失, ST/NT/ST 处理 0.25~2 mm 和 < 0.25 mm 粒级的有机碳和全氮含量表现出明显的优势。在 20—40 cm, 两种轮耕处理 0.25~2 mm 粒级的有机碳含量较高, 相反, 连年翻耕处理 < 0.25 mm 粒级的有机碳和全氮含量最高, 这是因为大颗粒团聚体 (0.25~2 mm) 中的有机碳氮含量高于微团聚体 (< 0.25 mm), 而轮耕处理的大颗粒团聚体含量高于连年翻耕处理, 连年翻耕处理的微团聚体含量高于轮耕处理。

2.4 不同耕作模式下土壤水分状况

表 3 表明, 小麦不同生育期土壤水分状况受阶段降雨量的影响较大。不同耕作模式可有效贮藏夏季休闲期 (7~9 月) 降雨, 在小麦播种期 3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理分别显著高于 CT 处理 10.2% 和 11.5%。次年 3 月中旬小麦返青期, 各处理土壤水分含量较播种期略有下降, 3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理较 CT 处理分别提高 6.1% 和 6.2%。4 月中旬小麦拔节期, 作物耗水增加, 而降水稀少。3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理分别较 CT 处理提高 9.4% 和 7.7%, 其中试验第 1 年和第 3 年各处理间差异显著。4 月下旬小麦抽穗期, 小麦生长旺盛, 耗水强烈, 各处理土壤水分含量急剧下降。与 CT 处理相比, 3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理分别显著增加了 8.8% 和 12.9%。5 月下旬到 6 月底, 小麦灌浆, 耗水增强, 降雨较少, 各处理土壤水分含量降至最低。3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理分别显著较 CT 处理提高 13.5% 和 13.1%。6 月中旬小麦开始成熟, 降雨有所增加, 各处理土壤水分状况有所恢复, 轮耕处理与 CT 处理差异显著。3 年平均土壤贮水量 NT/ST/NT 和 ST/NT/ST 处理分别较 CT 处理提高 5.4% 和 6.7%。

2.5 不同耕作模式下作物产量

表 4 表明, 不同耕作模式可显著影响作物生物量和籽粒产量。研究期间, 两年免耕一年深松 (NT/ST/NT) 和两年深松一年免耕 (ST/NT/ST) 处理下小麦 3 年平均地下部生物量分别为 1962.9 kg/hm² 和 2007.5 kg/hm², 显著高于连年翻耕 (CT) 处理 (1848.2 kg/hm²)。NT/ST/NT、ST/NT/ST 处理 3 年小麦地上部生物量平均分别比 CT 处理提高 6.2% 和 7.3%, 籽粒产量增产 9.6% 和 10.7%, 以 ST/NT/ST 处理增产效果最为显著。其中, 两种轮耕模式下小麦生物量和产量无显著差异, 连年翻耕处理的小麦生物量和产量最低。

2.6 不同耕作模式下小麦籽粒产量与土壤理化指标的通径分析

对不同耕作模式下土壤物理、化学及小麦产量各指标应用 DPS 6.55 软件进行逐步回归, 得到小麦籽粒产量 (Y) 与各指标之间的回归方程:

$$Y = -59435.95 + 24223.72X_1 + 532.26X_2 + 0.51X_3 - 1.64X_4 + 1011.16X_5 + 848.32X_6 - 4840.86X_{10} + 6.69X_{11} - 3.21X_{12} + 0.79X_{13}$$

表 2 不同土层各处理土壤各粒级团聚体中土壤有机碳和全氮含量 (g/kg)

Table 2 Soil organic carbon and total nitrogen contents (0–40 cm) in different size of aggregates at different soil depth in the treatments

| 指标 Index | 处理 Treatment | 0—10 cm | | | 10—20 cm | | | 20—30 cm | | | 30—40 cm | | |
|-------------|-----------------|---------------|---------------|---------------|----------------|---------------|---------------|----------------|----------------|---------------|----------------|---------------|----------------|
| | | > 2 mm | 0.25~2 mm | < 0.25 mm | > 2 mm | 0.25~2 mm | < 0.25 mm | > 2 mm | 0.25~2 mm | < 0.25 mm | > 2 mm | 0.25~2 mm | < 0.25 mm |
| 有机碳 | | | | | | | | | | | | | |
| 处理前 | | | | | | | | | | | | | |
| Organic C | Before | 4.7 ± 0.1 c | 4.7 ± 0.1 c | 5.0 ± 0.2 bc | 4.3 ± 0.2 b | 3.9 ± 0.2 c | 3.7 ± 0.0 c | 3.3 ± 0.3 c | 3.4 ± 0.1 c | 3.3 ± 0.2 c | 3.5 ± 0.0 c | 3.6 ± 0.1 b | 3.3 ± 0.06 c |
| | NT/ST/NT | 5.3 ± 0.1 a | 5.6 ± 0.2 a | 5.2 ± 0.2 ab | 5.4 ± 0.0 a | 5.1 ± 0.1 a | 4.4 ± 0.1 a | 4.3 ± 0.1 ab | 4.5 ± 0.0 a | 4.3 ± 0.1 a | 4.1 ± 0.2 ab | 3.9 ± 0.1 ab | 3.8 ± 0.1 ab |
| | ST/NT/ST | 5.4 ± 0.1 a | 5.8 ± 0.2 a | 5.4 ± 0.1 a | 5.4 ± 0.1 a | 4.9 ± 0.2 a | 4.7 ± 0.2 a | 4.4 ± 0.0 a | 4.6 ± 0.1 a | 4.4 ± 0.1 a | 4.3 ± 0.1 a | 4.1 ± 0.2 a | 3.9 ± 0.1 a |
| | CT | 5.0 ± 0.2 b | 5.2 ± 0.2 b | 4.8 ± 0.2 c | 4.5 ± 0.1 b | 4.3 ± 0.2 b | 4.1 ± 0.1 b | 4.01 ± 0.0 b | 4.1 ± 0.1 b | 3.8 ± 0.2 b | 3.9 ± 0.2 b | 3.7 ± 0.2 ab | 3.6 ± 0.1 b |
| 全氮 | | | | | | | | | | | | | |
| 处理前 | | | | | | | | | | | | | |
| Total N | Before | 0.61 ± 0.01 b | 0.57 ± 0.03 b | 0.61 ± 0.01 b | 0.54 ± 0.02 c | 0.56 ± 0.02 b | 0.49 ± 0.01 c | 0.47 ± 0.01 c | 0.45 ± 0.02 c | 0.43 ± 0.02 c | 0.42 ± 0.01 c | 0.43 ± 0.02 b | 0.41 ± 0.01 c |
| | NT/ST/NT | 0.67 ± 0.02 a | 0.74 ± 0.01 a | 0.70 ± 0.02 a | 0.64 ± 0.00 ab | 0.65 ± 0.03 a | 0.63 ± 0.03 a | 0.57 ± 0.02 ab | 0.60 ± 0.01 ab | 0.58 ± 0.01 a | 0.53 ± 0.02 ab | 0.55 ± 0.02 a | 0.52 ± 0.02 ab |
| | ST/NT/ST | 0.68 ± 0.02 a | 0.76 ± 0.02 a | 0.71 ± 0.03 a | 0.65 ± 0.03 a | 0.67 ± 0.02 a | 0.65 ± 0.02 a | 0.59 ± 0.02 a | 0.62 ± 0.03 a | 0.59 ± 0.01 a | 0.55 ± 0.02 a | 0.57 ± 0.01 a | 0.54 ± 0.02 a |
| | CT | 0.63 ± 0.02 b | 0.71 ± 0.03 a | 0.64 ± 0.01 b | 0.62 ± 0.00 b | 0.64 ± 0.01 a | 0.59 ± 0.01 b | 0.54 ± 0.02 b | 0.57 ± 0.01 b | 0.54 ± 0.03 b | 0.50 ± 0.03 b | 0.53 ± 0.02 a | 0.49 ± 0.02 b |

注 (Note) : NT/ST/NT—两年免耕—一年深松 No-tillage in the first year, subsoiling in the second year, no-tillage in the third year; ST/NT/ST—两年深松—一年免耕 Subsoiling in the first year, no-tillage in the second year, and subsoiling in the third year; CT—连年翻耕 Ploughing before and after harvest every year. 同列数值后不同字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 3 不同耕作模式对冬小麦生育期土壤水分的影响 (mm)

Table 3 Effects of different tillage practices on soil water during growth stages of winter wheat

| 年份 Year | 处理 Treatment | 播种期 Sowing | 返青期 Returning green | 拔节期 Jointing | 抽穗期 Heading | 灌浆期 Filling | 成熟期 Maturity |
|------------|-----------------|----------------|------------------------|-----------------|----------------|----------------|-----------------|
| 2007~2008 | NT/ST/NT | 349.1 ± 1.0 a | 310.8 ± 2.2 a | 298.9 ± 1.0 a | 205.1 ± 1.5 a | 214.7 ± 2.5 a | 225.5 ± 1.2 a |
| | ST/NT/ST | 350.7 ± 0.9 a | 309.2 ± 1.1 a | 291.2 ± 2.2 a | 215.3 ± 1.2 a | 215.8 ± 1.1 a | 228.7 ± 2.4 a |
| | CT | 309.5 ± 2.0 b | 302.6 ± 1.8 a | 262.5 ± 0.8 b | 177.5 ± 2.1 b | 197.5 ± 2.3 b | 212.2 ± 2.1 b |
| 2008~2009 | NT/ST/NT | 335.1 ± 0.9 a | 322.5 ± 1.2 a | 316.9 ± 2.7 a | 260.2 ± 1.7 a | 237.9 ± 3.1 a | 216.1 ± 1.2 a |
| | ST/NT/ST | 330.6 ± 0.80 b | 322.8 ± 1.2 a | 308.1 ± 1.3 ab | 262.0 ± 1.7 a | 225.8 ± 2.6 ab | 212.3 ± 2.1 a |
| | CT | 305.2 ± 1.8 c | 300.5 ± 2.0 b | 299.6 ± 1.8 b | 252.4 ± 2.8 a | 209.9 ± 1.3 b | 203.0 ± 2.4 b |
| 2009~2010 | NT/ST/NT | 316.2 ± 2.4 b | 319.3 ± 2.2 a | 332.5 ± 2.1 a | 245.8 ± 1.7 b | 273.2 ± 2.4 a | 239.2 ± 2.1 b |
| | ST/NT/ST | 330.9 ± 2.3 a | 320.9 ± 1.9 a | 334.2 ± 1.7 a | 260.7 ± 1.4 a | 281.7 ± 3.1 a | 247.7 ± 2.0 a |
| | CT | 292.8 ± 2.1 c | 294.9 ± 1.6 b | 304.4 ± 2.6 b | 223.5 ± 2.9 c | 232.0 ± 2.0 b | 230.4 ± 2.1 b |
| 平均 Mean | NT/ST/NT | 333.4 ± 2.2 a | 317.5 ± 2.3 a | 316.1 ± 2.1 a | 237.1 ± 2.2 a | 241.9 ± 2.8 a | 226.9 ± 1.7 a |
| | ST/NT/ST | 337.4 ± 1.1 a | 317.6 ± 1.0 a | 311.2 ± 1.5 a | 246.0 ± 2.6 a | 241.1 ± 2.1 a | 229.5 ± 1.5 a |
| | CT | 302.5 ± 2.2 b | 299.3 ± 2.7 b | 288.9 ± 2.1 b | 217.8 ± 1.4 b | 213.1 ± 2.8 b | 215.2 ± 0.9 b |

注 (Note): NT/ST/NT—两年免耕一年深松 No-tillage in the first year, subsoiling in the second year, no-tillage in the third year; ST/NT/ST—两年深松一年免耕 Subsoiling in the first year, no-tillage in the second year, and subsoiling in the third year; CT—连年翻耕 Ploughing before and after harvest every year. 同列数值后不同字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

表 4 不同耕作模式对冬小麦生物量和籽粒产量的影响 (kg/hm²)

Table 4 Effects of different tillage patterns on biomass and grain yields of winter wheat

| 年份 Year | 处理 Treatment | 地下部生物量 Belowground biomass | 地上部生物量 Aboveground biomass | 籽粒产量 Grain yield |
|------------|-----------------|-------------------------------|-------------------------------|---------------------|
| 2007~2008 | NT/ST/NT | 1962.3 ± 100.4 a | 7895.6 ± 200.6 a | 2547.6 ± 75.9 a |
| | ST/NT/ST | 2010.1 ± 105.4 a | 7914.8 ± 188.8 a | 2570.9 ± 68.6 a |
| | CT | 1849.8 ± 114.7 b | 7464.1 ± 178.3 a | 2343.4 ± 58.4 b |
| 2008~2009 | NT/ST/NT | 1940.4 ± 93.8 a | 7597.7 ± 168.0 a | 2314.1 ± 79.2 a |
| | ST/NT/ST | 1964.3 ± 112.1 a | 7424.7 ± 198.7 a | 2233.2 ± 64.5 b |
| | CT | 1833.8 ± 126.0 b | 7081.4 ± 182.6 a | 2027.7 ± 88.2 c |
| 2009~2010 | NT/ST/NT | 1986.1 ± 85.3 a | 8054.6 ± 168.2 b | 2823.4 ± 76.5 b |
| | ST/NT/ST | 2048.2 ± 89.3 a | 8448.1 ± 192.5 a | 2958.1 ± 65.1 a |
| | CT | 1861.1 ± 95.7 b | 7632.8 ± 163.9 c | 2641.6 ± 92.2 c |
| 平均 Mean | NT/ST/NT | 1962.9 ± 98.5 a | 7849.3 ± 213.1 a | 2561.7 ± 81.2 a |
| | ST/NT/ST | 2007.5 ± 107.4 a | 7929.2 ± 225.0 a | 2587.4 ± 68.0 a |
| | CT | 1848.2 ± 104.7 b | 7392.7 ± 199.5 b | 2337.6 ± 77.6 b |

注 (Note): NT/ST/NT—两年免耕一年深松 No-tillage in the first year, subsoiling in the second year, no-tillage in the third year; ST/NT/ST—两年深松一年免耕 Subsoiling in the first year, no-tillage in the second year, and subsoiling in the third year; CT—连年翻耕 Ploughing before and after harvest every year. 同列数值后不同字母表示不同处理间差异达显著水平 ($P < 0.05$) Values followed by different letters in the same column indicate significant differences among treatments ($P < 0.05$).

式中: X_1 为 0—60 cm 土层土壤容重; X_2 为 0—60 cm 土层土壤孔隙度; X_3 为 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体含量; X_4 为 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量;

X_5 为 0—40 cm 土层机械稳定性团聚体平均重量直径; X_6 为 0—40 cm 土层水稳性团聚体平均重量直径; X_7 为 0—40 cm 土层机械稳定性团聚体几何平均

直径; X_8 为 0—40 cm 土层水稳性团聚体几何平均直径; X_9 为 0—40 cm 土层 > 0.25 mm 粒级土壤有机碳; X_{10} 为 0—40 cm 土层 > 0.25 mm 粒级土壤全氮; X_{11} 为作物关键生育期 (播种、拔节、抽穗和灌浆期) 土壤水分; X_{12} 为地下部生物量; X_{13} 为地上部生物量。样本数为 27, 回归方程决定系数为 0.9999, F 值 5909.28, 显著水平 P 为 0.0101, Durbin-Watson 统计量 $d = 2.04$ 。

通过逐步回归, 筛选出通径分析指标, 并进行通径分析 (表 5)。各变量直接作用大小为 $X_1 > X_2 > X_6 > X_{13} > X_{12} > X_{10} > X_{11} > X_8 > X_4 > X_3$, 其中 X_{10} 、 X_{12} 、 X_4 为负值。说明土壤容重 (X_1) 和土壤孔隙度 (X_2) 对小麦籽粒产量的影响最大, 且呈正相关关系; 其次为土壤有机碳 (X_6) 和地上生物量 (X_{13}), 也为正相关关系。而土壤总氮 (X_{10}) 和地下部生物量 (X_{12}) 为直接负作用, 作用较大; 其他变量相关性均较小。作物关键生育期土壤水分、> 0.25 mm 粒级团聚体数量和土壤有机碳虽然对小麦籽粒的直接关系较小, 但其通过作物地上部生物量的间接作用较大, 且为正作用, 而其通过其他变量的间接作用均较小。虽然土壤总氮 (X_{10}) 的直接作用为负, 但其通过土壤总碳 (X_6) 和地上生物量 (X_{13}) 的间接作用较大, 其均为正作用。而土壤 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量和小麦地下部生物量的间接作用为负作用, 说明 > 0.25 mm 水稳性团聚体含量和地下部生物量对于小麦籽粒产量的提高不利, 应通过调节土壤物理结构和作物地上部生物量来促进小麦籽粒产量的提高。由剩余通径系数为 0.00411 可知, 以上各指标能较好地表达对小麦产量的影响作用。

3 讨论

3.1 土壤容重及孔隙度

相关研究^[13-14]表明, 两年免耕后深松可以降低土壤容重, 连续两年深耕或一年免耕一年深耕对土壤容重的降低是最有效的。孔凡磊等^[15]研究也发现, 轮耕显著降低了 0—30 cm 土壤容重, 显著改善了 0—20 cm 土壤总孔隙度。本研究结果表明, 与连年翻耕相比, 两种轮耕模式能有效打破犁底层, 减小紧实度, 使 0—60 cm 土壤容重维持在较低的水平。这主要由于免耕结合深松轮耕可以疏松土壤, 打破犁底层, 减少因机械频繁操作而造成的土壤压实^[10]。相关研究^[16]表明, 耕作措施通常可以增加总孔隙度, 从而改善土壤的孔隙状况。在本研究中, 轮耕处理 0—60 cm 的土壤总孔隙度显著高于连年翻耕处理, 这是由于轮耕可以避免土壤频繁扰动, 减少机械压实, 降低土壤容重^[17], 从而使耕层土壤孔隙状况得到改善。

3.2 土壤团聚体含量及稳定性

不同耕作方式可通过影响团聚体不同粒径间的转化及分布, 进一步影响土壤结构的稳定性^[18]。程科等^[19]的研究认为, 免耕/深松保护性轮耕模式能提高耕层团聚体含量与稳定性, 改善旱地土壤结构。王丽等^[20]研究结果表明, 不同耕作处理对土壤团聚体含量、粒级分布及稳定性均有明显影响, 免耕和轮耕较连续翻耕提高了 0—30 cm 土层土壤大团聚体含量。本研究发现, 轮耕处理 0.25~2 mm 土壤团聚体含量显著高于连年翻耕处理, 相反, 连年翻耕处理的微团聚体 (< 0.25 mm) 含量较高, > 0.25 mm 大颗粒团聚体相应减少, 这是因为频繁的土壤耕作, 降

表 5 耕作模式下小麦籽粒产量与各指标的通径分析

Table 5 Path analysis on the relationship between grain yields of wheat and indexes under tillage practices

| 因子 Factor | $\rightarrow X_1$ | $\rightarrow X_2$ | $\rightarrow X_3$ | $\rightarrow X_4$ | $\rightarrow X_8$ | $\rightarrow X_9$ | $\rightarrow X_{10}$ | $\rightarrow X_{11}$ | $\rightarrow X_{12}$ | $\rightarrow X_{13}$ |
|-----------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|-------------------|----------------------|----------------------|----------------------|----------------------|
| X_1 | 3.971 | -3.276 | -0.006 | 0.024 | -0.105 | -1.318 | 0.729 | -0.092 | 0.388 | -0.024 |
| X_2 | -3.966 | 3.280 | 0.006 | -0.024 | 0.104 | 1.308 | -0.728 | 0.092 | -0.387 | 0.012 |
| X_3 | -1.753 | 1.443 | 0.014 | -0.008 | 0.062 | 0.626 | -0.241 | 0.319 | -0.708 | 0.715 |
| X_4 | -3.307 | 2.739 | 0.004 | -0.029 | 0.110 | 1.157 | -0.647 | 0.032 | -0.303 | -0.041 |
| X_8 | -3.504 | 2.870 | 0.007 | -0.027 | 0.119 | 1.173 | -0.622 | 0.134 | -0.450 | 0.150 |
| X_9 | -3.418 | 2.804 | 0.006 | -0.022 | 0.091 | 1.531 | -0.840 | -0.011 | -0.426 | 0.237 |
| X_{10} | -3.297 | 2.721 | 0.004 | -0.021 | 0.084 | 1.465 | -0.878 | -0.089 | -0.248 | -0.007 |
| X_{11} | -0.771 | 0.639 | 0.009 | -0.002 | 0.034 | -0.037 | 0.166 | 0.472 | -0.699 | 0.701 |
| X_{12} | -1.728 | 1.422 | 0.011 | -0.010 | 0.060 | 0.731 | -0.242 | 0.370 | -0.892 | 0.962 |
| X_{13} | -0.087 | 0.036 | 0.009 | 0.001 | 0.016 | 0.327 | 0.006 | 0.299 | -0.774 | 1.109 |

低了大颗粒土壤团聚体的含量, 而微团聚体与大颗粒团聚体相比, 稳定性更强, 不易受外界因素的影响^[21]。经过 3 年不同耕作处理, 与连年翻耕相比, 两年免耕一年深松和两年深松一年免耕模式使 0—30 cm 土层的 > 0.25 mm 机械稳定性团聚体的数量增加, 这可能由于免耕/深松隔年轮耕措施对土壤减少了机械扰动的次数, 改善耕层土壤团粒结构, 而连年翻耕频繁扰动土壤, 加速土壤有机碳的矿化, 不利于稳定性胶结剂的产生和大团聚体的形成^[22]。Chen 等^[23]报道, 免耕和深松处理下 0—30 cm 土层 0.25~2 mm 平均重量直径 (MWD) 和几何均重直径 (GMD) 均高于连年翻耕。Zibilske 等^[24]在伊达尔哥州土壤上的研究也表明, 0—5 cm 和 10—15 cm 土层连年翻耕比免耕和旋耕的 MWD 值显著降低。本研究结果发现, 免耕/深松隔年轮耕模式使 MWD 和 GMD 值明显增加, 团聚体稳定性增强, 而频繁的土壤耕作对大团聚体的机械破坏作用, 使团聚体稳定性降低^[23]。

3.3 土壤有机碳和全氮

相关研究^[20]表明, 耕作土壤中团聚体粒径在 0.25~2 mm 的土壤团聚体含量对有机碳含量的积累影响显著。本研究也表明, 不同耕作模式下 0—40 cm 土层 0.25~2 mm 粒级有机碳和全氮含量最高, 因此可通过测定 0.25~2 mm 土壤团聚体数量来衡量土壤有机碳含量。Chen 等^[23]研究表明, 与传统耕作相比, 深松和免耕处理 0—15 cm 土层团聚体各粒级土壤有机碳及全氮含量显著增加。McCarty 等^[25]也发现, 3 年连年翻耕后进行免耕可增加 0—10 cm 土层有机碳含量; 王丽等^[20]研究表明, 轮耕模式较连续翻耕有利于提高耕层土壤有机质和全氮含量。本研究中, 免耕/深松隔年轮耕 0—30 cm 土层团聚体中土壤有机碳和全氮含量均显著高于连年翻耕处理, 这是由于免耕/深松轮耕减少了对土壤的扰动, 减少了碳、氮损失, 加上作物秸秆残茬覆盖在地表, 使养分集中在土壤表层^[26], 而连年翻耕频繁扰动土壤, 加快有机碳氮的矿化, 降低了表层有机碳氮的积累^[27]。

3.4 土壤水分

保护性耕作措施能有力地促进土壤水分利用, 不同耕作处理对作物生育期土壤水分的影响较大^[28]。在小麦生长前期, 轮耕处理土壤贮水量与连年翻耕处理差异显著, 这主要与夏闲期不同耕作技术模式的应用有关^[29-30]。在生长后期, ST/NT/ST 处理土壤水分含量最高, NT/ST/NT 处理次之, 这是由于免耕/深松轮耕可以降低土壤容重^[31], 有效地接纳更多的降

水, 供作物关键需水阶段 (拔节至灌浆期) 利用, 而单一的连年翻耕处理土壤水分蒸发较强^[31], 在小麦整个生育期土壤水分含量一直保持最低。李娟等^[32]也认为采用合理的保护性耕作措施, 在播种前和作物主要生育期土壤水分都有了较大的改善。本研究中免耕/深松轮耕较连年翻耕有较好的蓄水保墒效应, 从而缓解作物播前及生育期干旱缺水的问题。

3.5 作物产量

通过对小麦籽粒产量与土壤性状及作物生产力的通径分析发现, 不同耕作模式下土壤容重、孔隙度、有机碳和土壤水分等土壤性质成为小麦籽粒产量的主导因子, 说明不同耕作模式在改善土壤容重和孔隙度及水分环境的同时, 提高了土壤有机碳含量, 最终直接影响小麦的籽粒产量, 反映了耕作措施下土壤性状与籽粒产量的内在联系。本研究结果表明, 小麦收获后轮耕处理的地下部生物量显著高于连年翻耕处理。这是由于不同耕作处理导致作物根茬有机物投入的不同, 相对于连年翻耕处理, 轮耕处理使土壤有机碳氮含量增加。研究期间, 轮耕处理比连年翻耕显著增加作物产量, 这是因为轮耕可减少对土壤结构的破坏, 从而改善了土壤的理化性状^[17]和增加了土壤贮水量^[32], 进而提高小麦的籽粒产量; 而连年翻耕经过频繁翻耕, 严重破坏土壤的结构, 加速有机质的分解, 使土壤性状恶化^[33], 影响土壤贮水能力和作物的地上部干物质的积累和籽粒产量的形成^[34]。

4 结论

1) 相对于连年翻耕, 轮耕模式可明显改善土壤物理性状, 主要表现在耕层土壤容重的降低, > 0.25 mm 粒级团聚体含量的增加和团聚体稳定性 (WMD 和 GMD) 增强。

2) 轮耕处理 0—30 cm 不同粒级有机碳含量 (0.25~2 mm) 和全氮含量 (< 0.25 mm) 显著高于连年翻耕处理。其中, 两年深松一年免耕处理 (ST/NT/ST) 的有机碳含量最高。

3) 在小麦生长前期, 轮耕处理土壤贮水量均高于连年翻耕, 生长后期, ST/NT/ST 处理土壤水分含量最高, NT/ST/NT 处理次之; 轮耕处理的小麦生物量和籽粒产量均显著高于连年翻耕处理, 两年深松一年免耕处理 (ST/NT/ST) 处理增产效果最为显著。

4) 对小麦产量与土壤性状各指标进行逐步回归发现, 轮耕模式通过改善土壤的理化性状, 提高作物的干物质积累, 最终影响小麦的籽粒产量。

总之, 免耕/深松轮耕措施可显著改善土壤的理化性状和土壤水分环境, 显著增加耕层土壤有机碳、氮含量, 维持了作物的生产力, 在宁南旱区有重要的应用前景。

参 考 文 献:

- [1] Mupangwa W, Twomlow S, Walker S. The influence of conservation tillage methods on soil water regimes in semi-arid southern Zimbabwe[J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 2008, 33(8): 762–767.
- [2] He J, Kuhn N J, Zhang X M, *et al.* Effects of 10 years of conservation tillage on soil properties and productivity in the farming-pastoral ecotone of Inner Mongolia, China[J]. *Soil and Use Management*, 2009, 25(2): 201–209.
- [3] Zhang X R, Li H W, He J, *et al.* Influence of conservation tillage practices on soil properties and crop yields for maize and wheat cultivation in Beijing, China[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2009, 47(4): 362–371.
- [4] 李荣, 侯贤清. 深松条件下不同地表覆盖对马铃薯产量及水分利用效率的影响[J]. *农业工程学报*, 2015, 31(20): 115–123.
Li R, Hou X Q. Effects of different ground surface mulch under subsoiling on potato yield and water use efficiency[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(20): 115–123.
- [5] Gao M, Luo Y J, Wang Z F, *et al.* Effect of tillage system on distribution of aggregates and organic carbon in a Hydragric Anthrosol[J]. *Pedosphere*, 2008, 18: 574–581.
- [6] Huang S, Sun Y, Rui W. Long-term effect of no-tillage on soil organic carbon fractions in a continuous maize cropping system of northeast China[J]. *Pedosphere*, 2010, 20(3): 285–292.
- [7] 尚金霞, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬春玉米田保护性耕作蓄水保墒效果与增产增收效应[J]. *中国农业科学*, 2010, 43(13): 2668–2678.
Shang J X, Li J, Jia Z K, *et al.* Soil water conservation effect, yield and income increments of conservation tillage measures in spring maize field on Weibei highland[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2010, 43(13): 2668–2678.
- [8] 张丽华, 李军, 贾志宽, 等. 渭北旱塬保护性耕作对冬小麦-春玉米轮作田蓄水保墒效果和产量的影响[J]. *应用生态学报*, 2011, 22(7): 1750–1758.
Zhang L H, Li J, Jia Z K, *et al.* Effects of conservation tillage on soil water conservation and crop yield of winter wheat/spring maize rotation field in Weibei highland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(7): 1750–1758.
- [9] Blanco-Canqui H, Lal R. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 95: 240–254.
- [10] He J, Li H, Wang X Y, *et al.* The adoption of annual subsoiling as conservation tillage in dryland maize and wheat cultivation in northern China[J]. *Soil and Tillage Research*, 2007, 94: 493–502.
- [11] López-Fando C, Pardo M T. Changes in soil chemical characteristics with different tillage practices in a semi-arid environment[J]. *Soil and Tillage Research*, 2009, 104(2): 278–284.
- [12] 孙国峰, 张海林, 徐尚起, 等. 轮耕对双季稻田土壤结构及水贮量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(9): 66–71.
Sun G F, Zhang H L, Xu S Q, *et al.* Effects of rotational tillage treatments on soil structure and water storage in double rice cropping region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(9): 66–71.
- [13] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 等. 两年免耕后深松对土壤水分的影响[J]. *中国农业科学*, 2008, 41(1): 78–85.
Qin H L, Gao W S, Ma Y C, *et al.* Effects of subsoiling on soil moisture under conservation tillage mode[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2008, 41(1): 78–85.
- [14] 朱利群, 张大伟, 卞新民. 连续秸秆还田与耕作方式轮换对稻麦轮作田土壤理化性状变化及水稻产量构成的影响[J]. *土壤通报*, 2011, 42(1): 81–85.
Zhu L Q, Zhang D W, Bian X M. Effects of continuous returning straws to field and shifting different tillage methods on changes of physical-chemical properties of soil and yield components of rice[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2011, 42(1): 81–85.
- [15] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 等. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 150–155.
Kong F L, Chen F, Zhang H L, *et al.* Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat yield[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 150–155.
- [16] Roseberg R J, McCoy E L. Tillage and traffic-induced changes in macroporosity and macropore community: air permeability assessment[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56(4): 1261–1267.
- [17] Li H W, Gao H W, Wu H D, *et al.* Effects of 15 years of conservation tillage on soil structure and productivity of wheat cultivation in northern China[J]. *Australian Journal of Soil Research*, 2007, 45(5): 344–350.
- [18] 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(4): 595–605.
- [19] 程科, 李军, 毛红玲. 不同轮耕模式对黄土高原旱作麦田土壤物理性状的影响[J]. *中国农业科学*, 2013, 46(18): 3800–3808.
Cheng K, Li J, Mao H L. Effects of different rotational tillage patterns on soil physical properties in rain-fed wheat fields of the Loess Plateau[J]. *Scientia Agricultura Sinica*, 2013, 46(18): 3800–3808.
- [20] 王丽, 李军, 李娟, 等. 轮耕与施肥对渭北旱作玉米田土壤团聚体和有机碳含量的影响[J]. *应用生态学报*, 2014, 25(3): 759–768.
Wang L, Li J, Li J, *et al.* Effects of tillage rotation and fertilization on soil aggregates and organic carbon content in corn field in Weibei Highland[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2014, 25(3): 759–768.
- [21] Angers D A. Water-stable aggregation of Québec silty clay soils: some factors controlling its dynamics[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 47(1/2): 91–96.
- [22] 范如芹, 梁爱珍, 杨学明, 等. 耕作与轮作方式对黑土有机碳和全氮储量的影响[J]. *土壤学报*, 2011, 48(4): 788–796.
Fan R Q, Liang A Z, Yang X M, *et al.* Tillage and rotation effects on soil organic carbon and total nitrogen stocks of a black soil[J]. *Acta*

- Pedologica Sinica, 2011, 48(4): 788–796.
- [23] Chen H Q, Hou R X, Gong Y S, *et al.* Effects of 11 years of conservation tillage on soil organic matter fractions in wheat monoculture in Loess Plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 106(1): 85–94.
- [24] Zibilske L M, Bradford J M. Soil aggregation, aggregate carbon and nitrogen, and moisture retention induced by conservation tillage[J]. Soil Science Society of America Journal, 2007, 71(3): 793–802.
- [25] McCarty G W, Lysenko N N, Starr J L. Short-term changes in soil carbon and nitrogen pools during tillage management transition[J]. Soil Science Society of America Journal, 1998, 62(6): 1564–1571.
- [26] Staley T E. Soil microbial and organic component alteration in no-tillage chronosequence[J]. Soil Science Society of America Journal, 1988, 52(4): 998–1005.
- [27] Balesdent J. Effects of tillage on soil organic carbon mineralization estimated from ^{13}C abundance in maize fields[J]. Soil Science, 1990, 41(4): 587–598.
- [28] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 等. 夏闲期不同耕作模式对土壤蓄水保墒效果及作物水分利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2012, 28(3): 94–100.
Hou X Q, Li R, Han Q F, *et al.* Effects of different tillage patterns during summer fallow on soil water conservation and crop water use efficiency[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2012, 28(3): 94–100.
- [29] Baumhardt R L, Jones O R. Residue management and tillage effects on soil-water storage and grain yield of dryland wheat and sorghum for a clay loam in Texas[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 68(2): 71–82.
- [30] 王小彬, 蔡典雄, 金轲, 等. 旱坡地麦田夏闲期耕作措施对土壤水分有效性的影响[J]. 中国农业科学, 2003, 36(9): 1044–1049.
Wang X B, Cai D X, Jin K, *et al.* Water availability for winter wheat affected by summer fallow tillage practices in sloping dryland[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2003, 36(9): 1044–1049.
- [31] Su Z Y, Zhang J S, Wu W L, *et al.* Effects of conservation tillage practices on winter wheat water-use efficiency and crop yield on the Loess Plateau, China[J]. Agricultural Water Management, 2007, 87(3): 307–314.
- [32] 李娟, 王丽, 李军, 等. 轮耕对渭北旱塬玉米连作系统土壤水分和作物产量的影响[J]. 农业工程学报, 2015, 31(16): 110–118.
Li J, Wang L, Li J, *et al.* Effects of rotational tillage on soil water content and crop yield of spring maize system on Weibei dryland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2015, 31(16): 110–118.
- [33] Debaeke P, Aboudrare A. Adaptation of crop management to water-limited environments[J]. European Journal of Agronomy, 2004, 21(4): 433–446.
- [34] 王玉玲, 李军. 利于小麦-玉米轮作田土壤理化性状和作物产量的耕作方式研究[J]. 植物营养与肥料学报, 2014, 20(5): 1139–1150.
Wang Y L, Li J. Study of tillage patterns suitable for soil physicochemical properties and crop yields in wheat/maize fields[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2014, 20(5): 1139–1150.