

土壤耕作技术对小麦出苗质量、根系功能及粒重的影响

申冠宇¹, 杨习文¹, 周苏玫¹, 梅晶晶¹, 陈旭¹, 彭宏扬¹, 蒋向², 贺德先¹

(¹河南农业大学农学院/河南粮食作物协同创新中心/省部共建小麦玉米作物学国家重点实验室, 郑州 450002; ²河南省农业技术推广总站, 郑州 450002)

摘要: 【目的】针对黄淮平原农作区一年两熟条件下玉米秸秆还田严重影响麦苗质量的突出问题, 探索适宜的土壤耕作技术以提高小麦幼苗质量, 最终提高产量。【方法】2016—2018 年连续 2 年, 在河南省新郑市辛店镇黄岗村开展田间试验。采用随机区组设计, 将翻耕、耙、镇压 3 个因素组合配套实施 8 个处理, 分别为深翻耕+旋耕 (DT+RT; DT: 30 cm, RT: 15 cm)、深翻耕+耙 (DT+H)、深翻耕+旋耕+镇压 (DT+RT+C)、深翻耕+耙+镇压 (DT+H+C)、旋耕 (RT)、旋耕+耙 (RT+H)、旋耕+镇压 (RT+C)、旋耕+耙+镇压 (RT+H+C)。对小麦出苗率及幼苗质量进行调查, 并在越冬期、返青期、拔节期、抽穗期、灌浆期、蜡熟期对根系进行调查分析, 分别在灌浆期对小麦籽粒性状、收获后对小麦产量及其构成因素进行调查分析。【结果】小麦播种后 20 d, 不同土壤耕作处理间幼苗质量差异显著。旋耕后出苗整齐度高于深翻耕, 而深翻耕后出苗率、基本苗数和株高高于旋耕。相同耕、镇压因素处理下, 耙后出苗率增幅为 1.0%—5.7%, 相同耕、耙因素处理下, 镇压后出苗率增幅为 0.06%—8.3%; 同时深翻耕后, 极少出现缺苗、断垄, RT 处理缺苗、断垄的累计长度最高, 两年平均为 55 cm。从越冬期到蜡熟期, 不同土壤耕作处理的根系活力均呈现“高—低—高—低”的变化趋势, DT+H+C 处理最高; 在越冬期和拔节期, 镇压和耙处理后, 与无镇压、耙处理相比, 根系活力均提高。单株次生根数目在抽穗期达到最大, DT+H+C 处理最高, 两年最高值分别为 45.2 条与 40.2 条; 与无耙处理相比, 耙处理后, 单株次生根数目最高增加 14.8%, 与无镇压处理相比, 镇压处理后, 单株次生根数目最高增加 12.2%。花后 5—10 d, DT+H+C 和 RT+H+C 处理的籽粒灌浆速率增长幅度显著高于其他处理, 开花后 20 d 达到峰值, 其中 DT+H+C 处理籽粒灌浆速率比其他处理高 1.0%—19.4%, 达显著水平。灌浆期籽粒千粒重, 在花后 0—15 d, DT+H+C 处理增长最快, DT+RT 处理增长最慢, 花后 25—30 d, DT+H+C 处理千粒重最高, 较 RT 处理提高 20.8%。从不同土壤耕作技术对籽粒产量及其构成因素的影响来看, DT+H+C 处理的籽粒产量最高; 耙和镇压处理的单位面积穗数、穗粒数和千粒重的变化并不规律, 籽粒产量均有明显提升, 幅度为 1.4%—12.2%。经济效益方面, 与当地以往耕作方式 RT 相比, RT+H、RT+H+C、RT+C、DT+H+C、DT+H 处理所得效益均高于 RT 处理, 其中 DT+H+C 处理产生经济效益最高, 两年平均比 RT 处理高 12.3%。【结论】黄淮平原农作区当前一年两熟制条件下, 不同土壤耕作技术影响幼苗质量, 旋耕有利于出苗的整齐度提高, 而深翻耕则有利于出苗率及幼苗均匀度提高, 株高增高, 为冬前形成壮苗奠定基础; 深翻耕将耕层加深, 利于根系下扎, 促进次生根数目的增加以及耕层根系活力的提高, 间接影响籽粒产量。综合考虑植株根系生长发育、生育后期籽粒灌浆速率、粒重形成和产量表现等, 研究认为黄淮农作区 DT+H+C 处理土壤耕作技术是当前的最佳选择。

关键词: 小麦; 土壤耕作技术; 出苗质量; 单株次生根数; 根系活力; 灌浆速率; 籽粒产量

Impacts of Soil Tillage Techniques on Seedling Quality, Root Function and Grain Weight in Wheat

SHEN GuanYu¹, YANG XiWen¹, ZHOU SuMei¹, MEI JingJing¹, CHEN Xu¹, PENG HongYang¹,
JIANG Xiang², HE DeXian¹

收稿日期: 2019-01-10; 接受日期: 2019-03-18

基金项目: 国家重点研发计划“粮食丰产增效科技创新”重点专项 (2018YFD0300701)

联系方式: 申冠宇, E-mail: shenguanYu0@163.com。通信作者蒋向, E-mail: jiangxiang84@126.com。通信作者贺德先, E-mail: hedexian@126.com

(¹College of Agronomy, Henan Agricultural University/Collaborative Innovation Center of Henan Grain Crops/State Key Laboratory of Wheat and Maize Crop Science, Zhengzhou 450002; ²Henan Extension Station for Agricultural Techniques, Zhengzhou 450002)

Abstract: 【Objective】 In view of the prominent problem that corn straw to the field seriously affects the quality of wheat (*Triticum aestivum* L.) seedlings under the condition of double cropping per year of Huang-Huai Plain, appropriate soil tillage techniques were explored to improve quality of wheat seedlings and ultimately to increase wheat yield. **【Method】** The experiment was carried out at Huanggang village, Xindian town, Xinzheng city, Henan province for 2 consecutive years (from 2016 to 2018). By using a randomized block design, 8 treatments were carried out by combining three factors of plowing, harrow and compacting: deep depth tillage + rotary tillage (DT + RT; DT: 30 cm, RT: 15 cm), deep tillage + harrow (DT + H), deep depth tillage + rotary tillage + compacting (DT + RT + C), rotary tillage (RT), rotary tillage + harrow (RT + H), rotary tillage + compacting (RT + C), and rotary tillage + harrow + compacting (RT + H + C). Emergence rate and seedling quality of wheat were investigated, root characteristics were investigated during wintering stage, re-growing stage, jointing stage, heading stage, grain filling stage, dough stage, and grain characters, yield and its components were analyzed during the filling period, respectively. **【Result】** 20 days sowing, quality of seedlings in different soil tillage treatments was significantly different. In rotary tillage treatments, emergence uniformity was higher than that in deep tillage treatments, while in deep tillage method, seedling emergence rate, basic seedlings and plant height were higher than those in rotary tillage method. Under the same plowing and compacting, emergence rate in harrow treatment emergence was 1.0%-5.7%; Under the same plowing and harrow, emergence rate in compacting treatment emergence was 0.06%-8.3%. At the same time, after deep depth tillage, seedling deficiency and wedging were rarely seen. Cumulative length of seedling deficiency and wedging under RT treatment was the highest, and the average length of the two years was 55 cm. From the wintering to dough stage, root activity in different soil tillage treatments showed a "high-low-high-low" trend, and it was the highest in treatment "DT + H + C". In wintering and at jointing stage, root activity was increased after treated with compacting and harrow compared with that in treatments with neither compacting nor harrow. Secondary roots per plant reached the maximum in DT + H + C treatment at heading stage with the highest values were 45.2 and 40.2 in 2017 and 2018, respectively. After treated with harrow, secondary roots per plant were increased by 14.8% compared with those in treatments without harrow. After compacted treatment, secondary roots per plant were increased by 12.2% compared with those in treatments without compacting. Grain filling rate in DT + H + C treatment was significantly higher than that under other treatments during 5-10 days after anthesis, and reached its peak at 20 days after anthesis. Grain filling rate of DT + H + C treatment was higher than that under other treatments, while grain filling rate in DT + H + C treatment was higher than that under other treatments, and grain filling rate under DT + H + C treatment was 19.4% higher than that under other treatments ($\alpha=0.05$). During grain filling stage, 1000-grain weight increased the most at 0-15 days after anthesis; Under DT + H + C treatments, it was increased the most; Under DT + RT treatments, it was increased the least; under DT + H + C treatments, it increased the most at 25-30 days after anthesis, which was 20.8% higher than that when treated by RT. According to the effects of different tillage techniques on grain yield and its components, the highest grain yield was obtained under DT + H + C treatment. Ears per unit area, kernels per ear and 1000-grain weight were not regular under harrow milling and repressing treatment, and grain yield increased obviously, with a range of 1.4%—12.2%. Economic benefits, in RT + H, RT + H + C, RT + C, DT + H + C, or DT + H treatment were all higher than those in RT treatment compared with the previous farming methods in the local area. Among them, the highest economic benefits was produced under DT + H + C treatment, and the two-year average was 12.3% higher than that under RT treatment **【Conclusion】** Under the current condition of two cropping systems in the Huang-Huai plain, different soil tillage techniques affected seedling quality, rotation tillage was beneficial to uniformity of seedling emergence, while deep tillage was beneficial to increasing seedling emergence rate, seedling evenness and plant height, laying a foundation for the formation of strong seedlings before wintering. The deep tillage deepened soil surface layer, which was beneficial to rooting, increased secondary roots and root activity in soil surface layer, and indirectly affected grain yield. Considering root system growth, grain filling rate, grain weight formation and yield performance, it was concluded that DT + H + C soil tillage technique was the best choice in Huang-Huai area.

Key words: wheat; soil tillage techniques; seedling quality; secondary roots per plant; root vigor; grain filling rate; grain yield

0 引言

【研究意义】农田土壤耕作是作物生产技术体系中一项重要内容^[1-3], 选用适宜的耕作方式和方法, 对土壤改良和小麦生长发育和产量形成具有重要作用^[4-7]。近年来, 在黄淮平原区农业生产中, 玉米秸秆还田导致小麦分蘖缺位或规律性丧失、穗分化进程和抽穗不集中等问题越来越严重, 不仅不利于减灾保优, 而且影响化肥农药水分减量措施的运用, 因而亟需建立一套新的土壤耕作制度和新的栽培技术体系, 促进小麦生产从“重数量、轻质量、低效益”转变为“数量、质量效益并重”。“整地播种和培育壮苗”是作物栽培体系中两个重要的因素, 而小麦生产中整地、播种则更是基础性和关键性技术措施, 打好整地播种基础, 培育冬前壮苗, 关乎小麦生产全局^[8-9]。黄淮平原区当前由于麦田常年大面积、大规模旋耕且没有配套以适当的镇压措施, 导致播种过深或播种质量差, 出苗率低、苗情弱且不壮, 进而引致抗病抗逆性变差、田间管理难度增大等一系列生长发育和生产管理问题, 严重制约小麦产量提高和农业可持续发展^[10]。【前人研究进展】研究指出, 常年旋耕导致土壤耕层变浅, 耕层以下形成犁底层, 土壤紧实, 透水通气性变差^[11-13], 严重影响作物根系生长发育, 制约了作物产量。旋耕导致土壤孔隙增大、播种深度不一、出苗不齐, 出现较多的缺苗、断垄现象^[14]; 深耕能够打破犁底层, 降低深层土壤紧实度, 改善土壤孔隙状况, 促进根系向深处生长, 有利于根系吸收水分和养分, 进而提高作物产量^[15-16]。耕翻+镇压有利于增加小麦有效穗数, 促进籽粒灌浆, 提高小麦千粒重, 耕翻+镇压处理下的小麦产量明显高于旋耕+镇压及旋耕处理, 且与旋耕处理的差异达到极显著水平^[17]。耕作措施影响是双向的, 长期采用翻耕、旋耕、深松耕等任何单一耕作措施均会对土壤生产性能产生不利影响, 降低作物产量^[18]。【本研究切入点】前人对麦田土壤耕作技术采用不同耕作方式组合的研究较少, 缺乏将耕、耙、镇压的结合以及将耕作方式与小麦根系的结合, 耙对小麦出苗质量、根系的生长以及产量的影响也尚不明确; 而本研究则针对黄淮平原农区农民的耕作习惯, 将耕、耙和镇压 3 个因素组合配套实施, 对小麦出苗质量、根系以及产量进行系统研究, 筛选出最适合的耕作技术, 与以往研究比较, 更综合更具有实践意义。【拟解决的关键问题】采用随机区组试验方法, 通过 2

年的试验研究, 分析土壤耕作技术对小麦幼苗质量、次生根发根数目及根系活力、籽粒灌浆速率和粒重形成等的影响, 筛选出经济有效、实用的麦田土壤耕作技术, 为该区小麦丰产增效栽培提供理论依据和技术支撑。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验于 2016—2018 年度连续 2 年在河南省新郑市辛店镇黄岗村 (34°20′39.63″N, 113°35′24.95″E) 进行, 2016—2018 年降雨量分别为 583.3、642.1、453.9 mm。供试土壤为黄土 (褐土亚类), 试验田在本研究之前连年采用旋耕技术, 2 年麦田耕作之前土壤墒情分别为 15.91%、16.24%, 供试小麦品种为半冬性中晚熟品种百农 207 (国审麦 2013010)。

1.2 试验设计

在玉米秸秆还田条件下, 采用随机区组试验设计, 共设 8 个处理, 分别为深翻耕+旋耕 (DT+RT)、深翻耕+耙 (DT+H)、深翻耕+旋耕+镇压 (DT+RT+C)、深翻耕+耙+镇压 (DT+H+C)、旋耕 (RT)、旋耕+耙 (RT+H)、旋耕+镇压 (RT+C)、旋耕+耙+镇压 (RT+H+C), 小区面积 200 m² (40 m×5 m), 重复 3 次。旋耕机深度 15 cm, 宽 2.5 m; 深耕处理采用深耕犁进行机械深翻耕, 耕深平均达到 30 cm, 宽 1.1 m, 3 个犁面; 耙深度 20 cm, 宽 2.5 m; 镇压重量 180 kg, 宽 2.47 m。小麦等行距播种, 行距 18 cm。试验开始前农田土壤基础养分为有机质 18.64 g·kg⁻¹, 全氮 0.96 g·kg⁻¹, 有效磷 17.8 mg·kg⁻¹, 速效钾 154.3 mg·kg⁻¹, pH 6.83。底肥为复合肥 (N-P₂O₅-K₂O=25:15:5) 900 kg·hm⁻², 拔节期追肥硝铵磷 150 kg·hm⁻²。2016 年 10 月 13 日上午整地下午播种, 播量 165 kg·hm⁻², 2017 年 6 月 2 日收获; 2017 年 10 月 28 日上午整地下午播种, 播量 210 kg·hm⁻², 2018 年 6 月 3 日收获。

1.3 测定项目与方法

1.3.1 田间出苗情况 出苗后 20 d, 调查基本苗数。每个试验区随机挑选长势均匀区域, 数一米双行苗数, 计算田间出苗率与基本苗数。基本苗数 (hm⁻²) = (666.7 m²/行距) × 一米单行苗数 × 15; 田间出苗率 = 单位面积基本苗/单位面积有效种子粒数 × 100%; 单位面积有效种子粒数 = 单位面积播种量 (kg) × 1 kg 种子粒数 × 发芽率; 1 kg 种子粒数 = 1000/(千粒重 (g)/1000)。

每个处理随机调查 6 m²，调查区域中，株行缺苗长度小于 10 cm 以下即为正常（0），10—17 cm 无苗为缺苗记为 1 处，17 cm 以上无苗计为断垄记为 1 处，每个处理缺苗、断垄长度累加即为累计长度，共 3 次重复。

1.3.2 单株次生根数及生理活性测定 分别在越冬期（12 月中旬）、返青期（2 月中旬）、拔节期（3 月中旬）、抽穗期（4 月中旬）、灌浆期（5 月中旬）、蜡熟期（6 月上旬）进行取样，测定根系活力及调查单株次生根数。选择有代表性、长势一致分布均匀的小麦，避开之前取样点（与之前取样点距离在 20 cm 以上），挖根深度 20 cm，将带有泥土的植株根系带回实验室冲洗、计数。结合上述单株次生根数分析，选定具有代表性的待测鲜根样，放入冰盒带回实验室，采用改良 TTC 法测定根系活力。

1.3.3 籽粒灌浆速率测定 于开花期每小区选择长势一致的麦穗 100 个，挂牌标记。自开花后 5 d 起，每隔 5 d 随机取标记穗 10 个，在每个穗中部取籽粒 20 粒，共 200 粒，105℃下杀青 20 min，80℃烘干至恒重，测定千粒重，直至成熟，计算灌浆速率：

$$K = (M_2 - M_1) / N$$

式中，K 为灌浆速率，M₂ 为本次测定的千粒重，M₁ 为前一次测定的千粒重，N 为两次测定的间隔日数。

1.3.4 产量及其构成要素的测定 成熟期，每小区取 1 m² 植株，调查成穗数，每小区随机取 15 株，

室内考种，测定穗粒数、千粒重；每小区单独收获计产。

1.4 数据统计分析

使用 Microsoft Excel 2016 进行数据处理，利用 SPASS 21.0 软件对数据处理和统计分析，用 Originlab 2017 软件画图。

2 结果

2.1 土壤耕作技术对小麦出苗质量的影响

试验结果表明，DT+H+C 处理小麦出苗率最高，其次是 RT+H+C 处理，2 个处理 2 年平均出苗率分别为 91.65%和 86.35%，RT 处理出苗率最低，2 年平均出苗率只有 81.65%。相同耕、镇压因素条件下，耙处理后，出苗率提高 1.0%—5.7%；相同耕、耙因素条件下，镇压处理后，出苗率增长在 0.06%—8.3%。因此，在相同的旋耕或者深翻耕耕作方式下，通过耙、镇压可以改善种子发芽生长环境，增强种子与土壤的接触，促进种子萌发出苗，提高出苗率。从出苗情况上来看，深翻耕耕作方式播种质量以及出苗质量好于旋耕耕作方式，相同耙、镇压因素处理，深翻耕耕作方式极少出现缺苗、断垄，旋耕耕作方式出现缺苗、断垄最多，出苗质量是最差的。经过 2016 年的试验，改善试验之前连年旋耕导致耕层变浅现象，第二年试验在出苗率情况上，深翻耕耕作方式出苗情况有所提升，缺苗、断垄现象均减少（表 1）。

表 1 不同土壤耕作技术对小麦出苗的影响
Table 1 Effects of different soil tillage techniques on wheat emergence

处理 Treatment	2016–2017				2017–2018			
	缺苗处 Seedling missing	断垄处 Dis-continuous row	累计长度 Total length of missing seedlings and discontinuous row (cm)	出苗率 Emergence rate (%)	缺苗处 Seedling missing	断垄处 Dis-continuous row	累计长度 Total length of missing seedlings and discontinuous row (cm)	出苗率 Emergence rate (%)
RT+H	1	0	15	77.7	0	1	31	87.2
RT+H+C	0	0	0	78.7	1	0	35	94.0
RT+C	1	0	16	77.7	0	1	26	85.7
RT	2	2	78	77.0	0	1	32	86.3
DT+RT	0	0	0	79.1	0	2	25	90.7
DT+RT+C	1	0	14	78.2	1	1	42	89.9
DT+H+C	0	0	0	87.8	0	0	0	95.5
DT+H	2	1	53	81.2	1	2	65	88.1

出苗情况的变异系数越大,说明各观测点出苗变异程度越大,即观测点出苗基本苗数、株高越不均匀;反之,变异系数越小,则表明出苗基本苗数、株高越均匀。从2年平均变异系数来看,基本苗数方面,各处理变异系数最大的是RT+C处理(3.71%),最小的是RT处理(0.02%);株高方面,各处理变异系数最大的是DT+RT处理(1.25%),最小的是DT+H+C处理(0.29%),耙、镇压后,出苗基本苗数、株高均有所提高(表2—3)。由此可得,深翻耕耕作方式有利于出苗率的提高以及出苗的整齐,但是对于出苗

基本苗数,旋耕耕作方式表现较好;耙以及镇压均有利于出苗率、出苗基本苗数和株高的提高。

2.2 土壤耕作技术对小麦次生根数目和根系活力的影响

2.2.1 对单株次生根发根数目的影响 从越冬期开始,随着生育时期的推进,单株次生根的发生能力受到的影响越明显,处理间的差异越大,在拔节期,处理间差异越来越显著,抽穗期达到峰值,到蜡熟末期,处理间差异减小。从图1中可以看出,不同耕作技术条件下,在小麦全生育期单株次生根数均在抽穗期达

表 2 不同土壤耕作技术下小麦基本苗数的变化

Table 2 Variation of basic seedling number of wheat under different soil tillage techniques

处理 Treatment	2016–2017			2017–2018		
	基本苗数 Number of seedling ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)	基本苗数 Number of seedling ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)
RT+H	307.52ab	4.93	4.46	438.91b	0.82	0.52
RT+H+C	311.13ab	7.21	6.44	472.25a	7.04	4.13
RT+C	307.52ab	11.15	10.08	430.58b	1.25	0.8
RT	304.74b	4.51	4.11	433.36b	5.31	3.4
DT+RT	321.41ab	8.14	7.04	455.58ab	4.03	2.45
DT+RT+C	309.18ab	5.51	4.95	452.80ab	3.74	2.3
DT+H+C	347.24a	9.54	7.63	480.58a	2.16	1.25
DT+H	313.07ab	8.02	7.12	444.47b	6.85	4.29

小写字母表示在 5%水平上的差异显著性。下同

Small letters among different treatments within each column are significantly different at 0.05 level. The same as below

表 3 不同土壤耕作技术下小麦出苗株高的变化

Table 3 Variation of plant height of wheat seedling under different soil tillage techniques

处理 Treatment	2016–2017			2017–2018		
	株高 Seedling height (cm)	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)	株高 Plant height (cm)	标准差 Standard deviation	变异系数 CV (%)
RT+H	11.46b	0.50	4.33	10.18bcd	0.55	5.43
RT+H+C	10.64c	0.52	4.89	10.58b	0.44	4.12
RT+C	10.66c	0.45	4.18	11.52a	0.61	5.31
RT	11.50b	0.37	3.25	9.44d	0.52	5.51
DT+RT	11.56b	0.34	2.98	9.96bcd	0.55	5.48
DT+RT+C	11.88b	0.50	4.24	11.44a	0.26	2.25
DT+H+C	12.12b	0.44	3.67	9.74cd	0.30	3.09
DT+H	12.84a	0.36	2.81	10.26bc	0.50	4.84

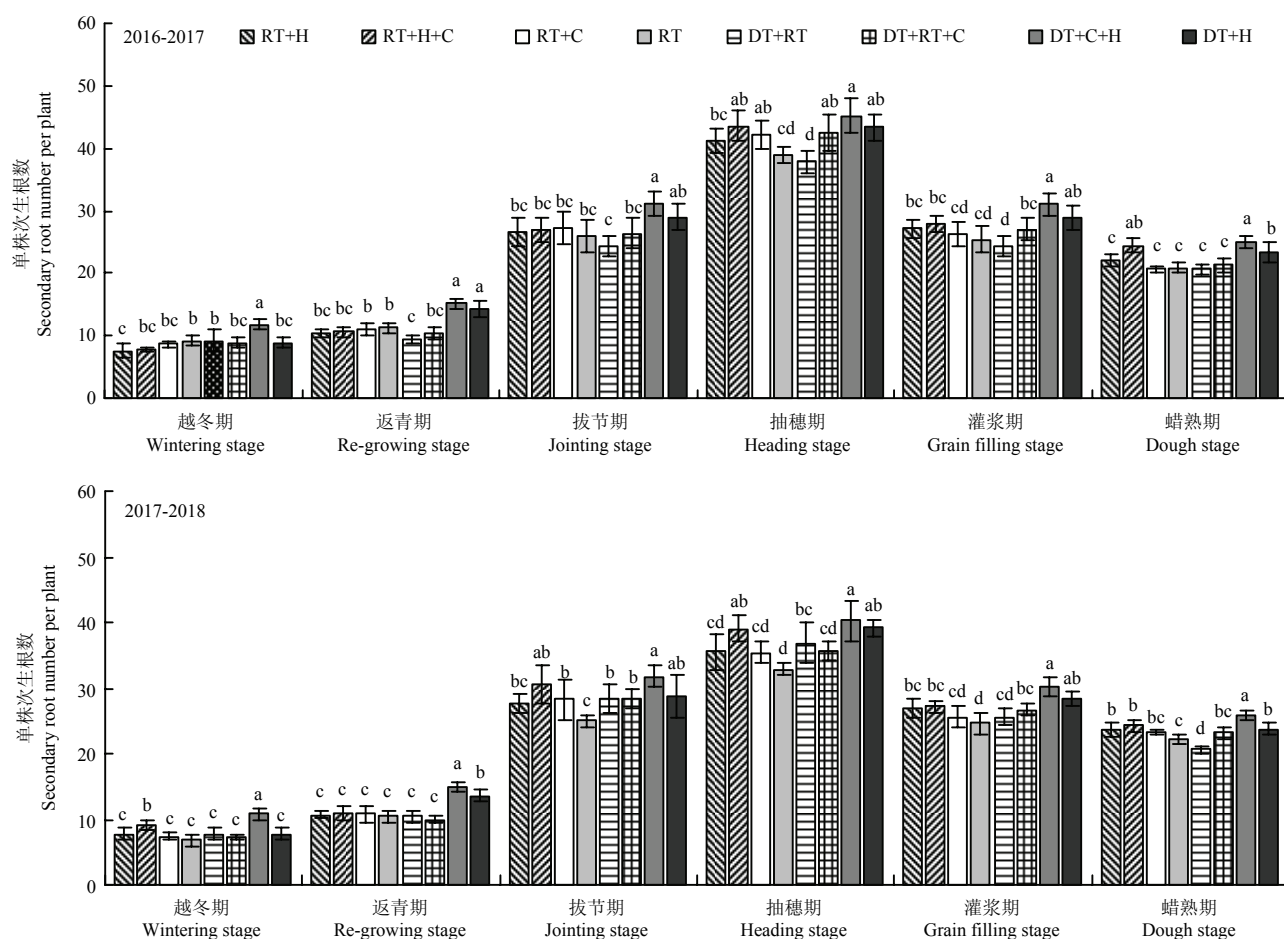


图1 不同土壤耕作技术下小麦单株次生根数的变化

Fig. 1 Changes of wheat secondary roots under different soil tillage techniques

到最高，其中 DT+H+C 处理最高，2 年分别为 45.2 条与 40.2 条，与其他处理差异显著；抽穗期后，随着无效分蘖的死亡，单株次生根数逐渐降低。在灌浆期，DT+H+C 处理与 DT+H 处理间差异不显著，但与其他处理差异显著，表明在深翻耕耕作方式与耙结合的条件下，促进了生育后期次生根的发生，有利于分蘖成穗和籽粒的灌浆。在抽穗期相同耙和镇压下，深翻耕耕作方式较旋耕耕作方式相比，单株次生根数增加 0.5%—10.1%；相同耕、镇压因素下，耙后与不耙相比，单株次生根数增加 3.3%—14.8%；相同耕、耙因素下，镇压后与不镇压相比，单株次生根出增加 2.6%—12.2%。这可能主要是由于深翻耕耕作方式过后，加深耕层，促进根系深层次的生长及发育；耙、镇压后，粉碎土块，减小土壤之间空隙，提高单株次生根数增加速度。

2.2.2 对不同生育时期根系生理活性的影响 由图 2

可以得出，小麦生育期间不同处理间根系变化范围为 0—250 $\mu\text{g}\cdot\text{g}^{-1}\text{FW}\cdot\text{h}^{-1}$ 。不同处理根系活力的变化趋势大体一致，均呈现先升后降的趋势，于越冬期和拔节期达较高水平。根系活力以 DT+H+C 处理最高，在越冬期达到最大值。耙和镇压措施对不同生育时期根系活力的影响存在较大差异，抽穗后不同耕作处理对根系活力的影响均小于抽穗前；越冬期和拔节期不同处理间根系活力下降幅度明显高于返青期和抽穗期，相同耕、镇压因素下，经过耙后，越冬期根系活力提升幅度为 3.7%—15.5%，拔节期根系活力提升幅度为 0.5%—47%；相同耕、耙因素下，经过镇压后，越冬期根系活力提升幅度为 10.5%—37%，拔节期根系活力提升幅度为 3.5%—49.9%。由此可见耙与镇压对根系活力的调控影响较明显，在生育前、中期提高根系活力，生育末期同时也具有延缓根系衰老的作用。

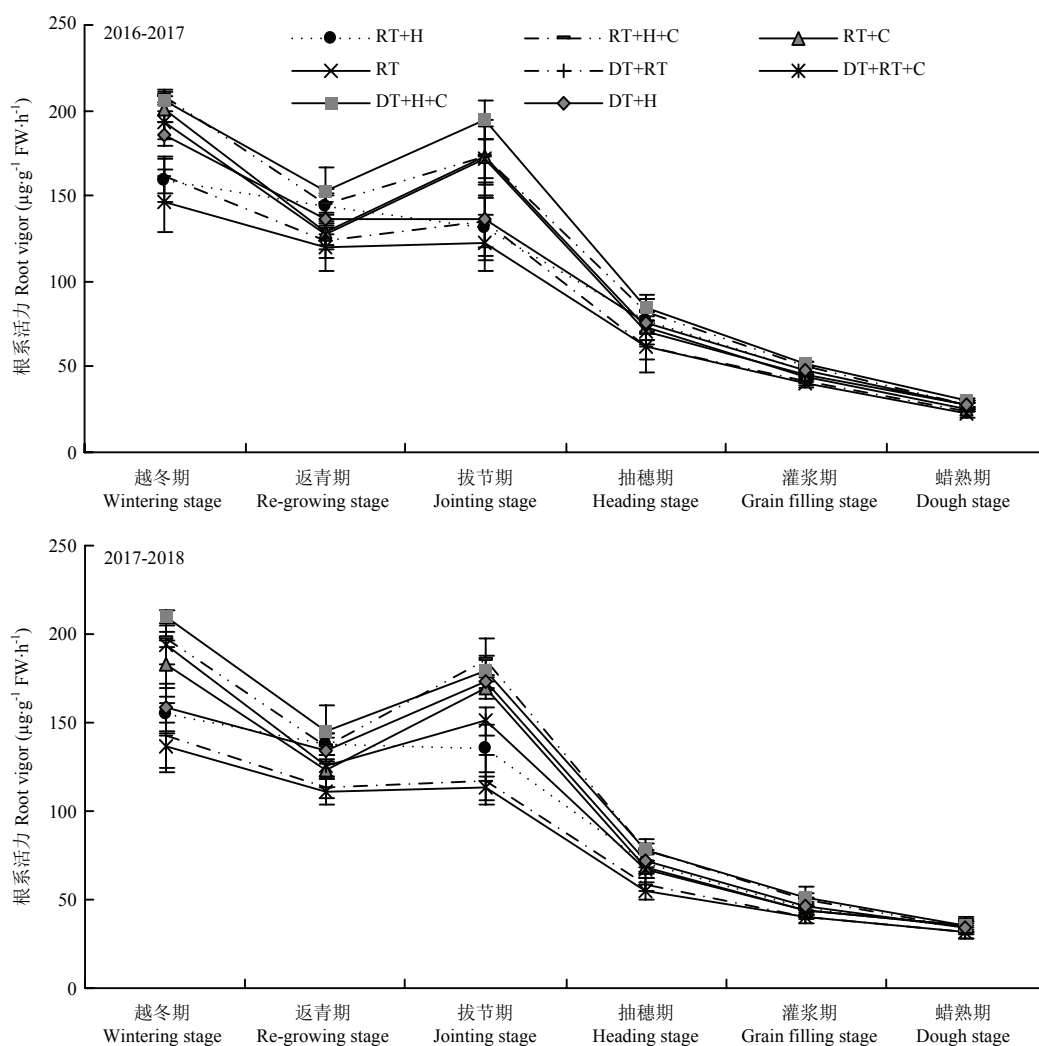


图2 不同土壤耕作技术下小麦根系活力的动态变化

Fig. 2 Dynamics of wheat root vigor (improved TTC method) under different soil tillage techniques

2.3 土壤耕作技术对小麦粒重形成和籽粒产量的影响

2.3.1 对籽粒灌浆速率和粒重形成的影响 由图3可知,籽粒灌浆速率在2年的试验中均呈现先升高后降低的变化趋势,花后5—10 d, DT+H+C处理和 RT+H+C 处理增长幅度显著高于其他处理,开花后20 d达到峰值;花后20 d, DT+H+C处理籽粒灌浆速率明显高于其他处理,同比提高1.0%—19.4%。

由图4可知,开花后籽粒千粒重变化呈“S”型曲线,灌浆初期,籽粒千粒重增长缓慢,灌浆中期是千粒重急剧增长的时期,灌浆后期籽粒千粒重的增加又趋缓慢,直至成熟收获。不同土壤耕作技术间千粒

重变化存在差异,综合2年情况来看,前期 DT+H+C处理增长最快,DT+RT处理增长最慢;中后期深翻耕耕作方式增重速度高于旋耕耕作方式,灌浆末期千粒重表现为 DT+H+C处理最高,同比高于其他处理2%—20.8%,RT处理最低。

2.3.2 对籽粒产量及其构成因素的影响 由表4可以看出,不同的耕作技术对籽粒产量及其构成因素具有明显的调控效应。在2年试验中,单位面积穗数 RT处理最低,DT+H+C处理最高,比RT处理增加23.9%、14.1%。2016—2017年度,穗粒数 RT+H+C处理最低,DT+RT+C处理最高,增长15.1%;千粒重 RT处理最低,RT+H+C处理最高,增长22.7%。2017—2018年度,穗粒数和千粒重在 DT+RT处理中最低,

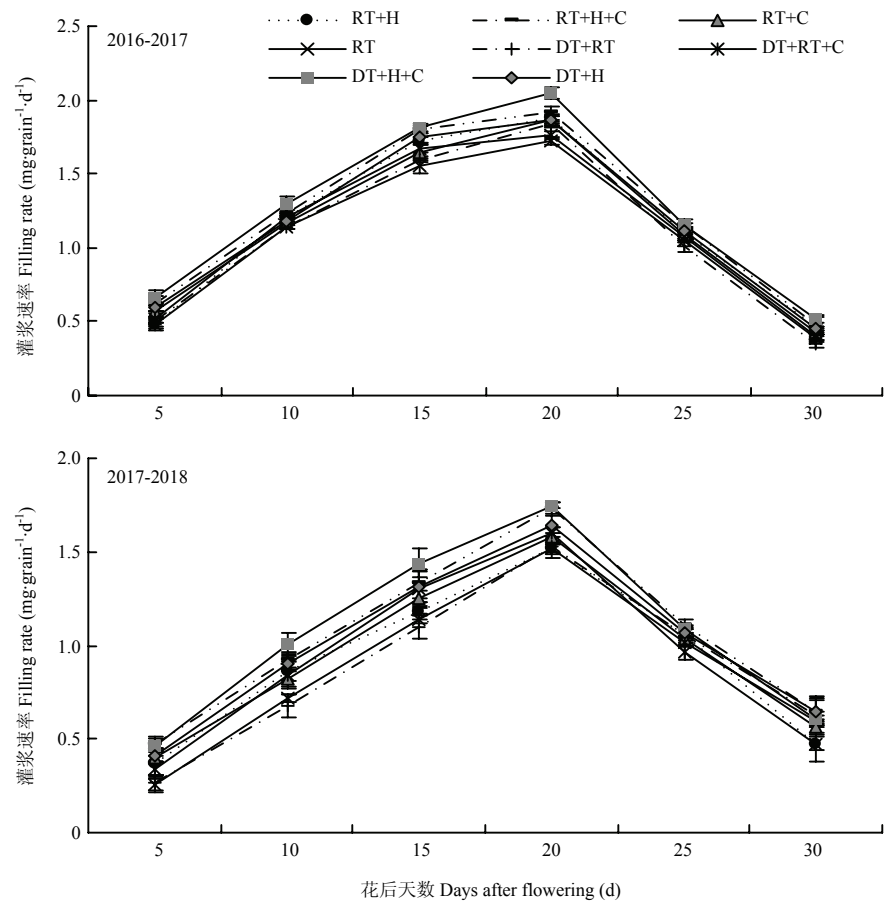


图 3 不同土壤耕作技术对小麦灌浆速率的影响（灌浆速率单位改为： $\text{mg grain}^{-1} \text{d}^{-1}$ ）
Fig. 3 Effects of different soil tillage techniques on grain filling rate of wheat

表 4 不同土壤耕作技术对小麦产量及其构成因素的影响
Table 4 Effects of different soil tillage techniques on wheat grain yield and its components

年份 Year	处理 Treatment	穗数 Spikes per unit soil area ($\times 10^4 \cdot \text{hm}^{-2}$)	穗粒数 Grains per spike	千粒重 1000-grain weight (g)	籽粒产量 Grain yield ($\text{kg} \cdot \text{hm}^{-2}$)
2016–2017	RT+H	543.79a	45.33abc	37.97b	7932.50bc
	RT+H+C	533.42ab	42.00c	42.80a	8003.00ab
	RT+C	580.85a	42.33bc	39.37ab	7634.50d
	RT	468.75c	46.00ab	34.87b	7295.00e
	DT+RT	492.84bc	45.33abc	36.93b	7230.00e
	DT+RT+C	549.35a	48.33a	35.00b	7719.50cd
	DT+H+C	544.36a	47.33a	36.83b	8192.00a
	DT+H	546.57a	46.67a	36.87b	7662.50d
2017–2018	RT+H	605.77ab	40.53b	36.46b	6156.25bc
	RT+H+C	652.62ab	42.87b	38.34b	6257.20b
	RT+C	636.41ab	41.07b	34.60c	6013.10cd
	RT	594.66b	40.33b	33.02c	5487.15e
	DT+RT	600.03ab	39.13b	32.81c	5960.10d
	DT+RT+C	627.62ab	42.00b	37.97b	6052.35cd
	DT+H+C	678.37a	47.60a	44.23a	6501.10a
	DT+H	606.51ab	41.27b	36.84b	6042.15cd

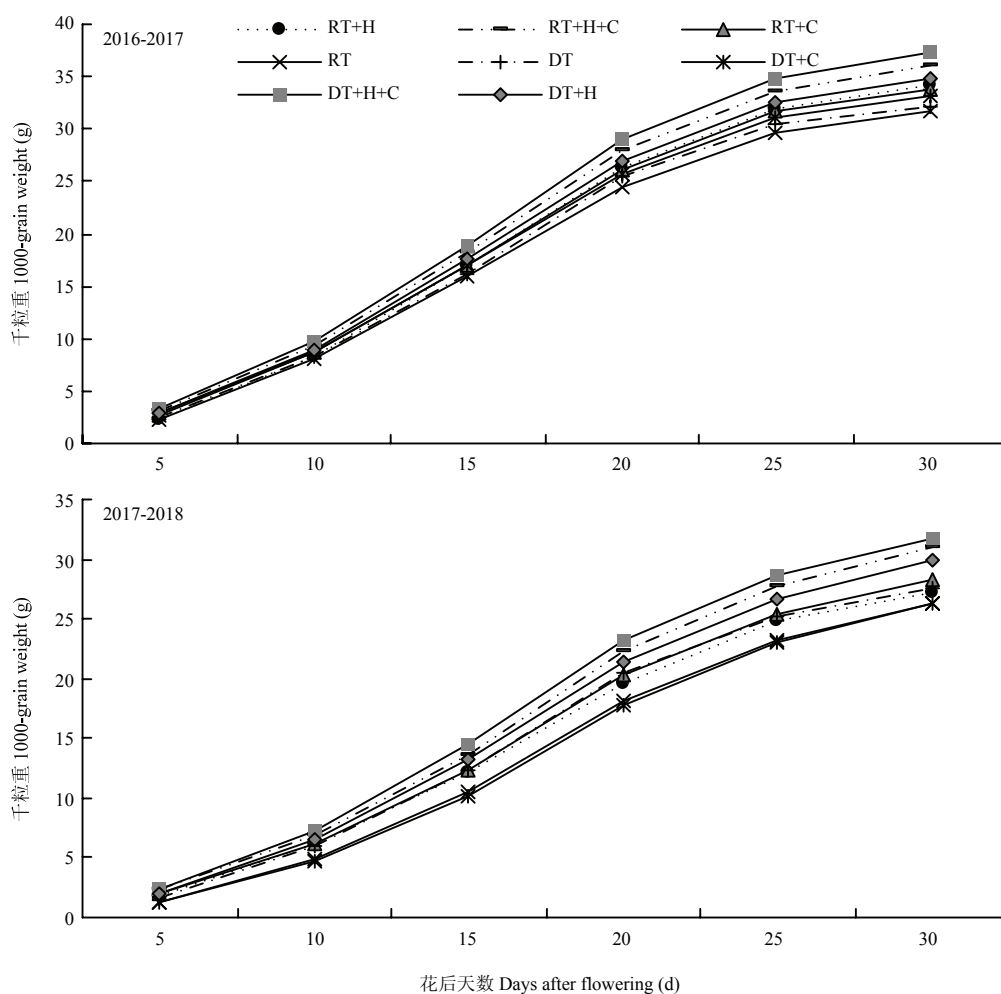


图 4 不同土壤耕作技术条件下小麦籽粒千粒重的变化

Fig. 4 Dynamics of 1000-grain weight of wheat under different soil tillage techniques

DT+H+C 处理最高, 分别增长 21.6%、34.8%。耙和镇压后, 单位面积穗数、穗粒数和千粒重并未出现规律性变化。DT+H+C 处理籽粒产量在 2 年中均为最高。经过耙和镇压后, 千粒重以及籽粒产量都有明显提升, 相同耕、镇压因素下, 耙后产量提升幅度为 1.4%—12.2%, 相同耕、耙因素下, 镇压后产量提升幅度为 1.5%—9.6%。

经过 2018 年 4 月 3 日至 7 日晚霜冻害后, 通过 2 年的产量对比, 2017—2018 年产量降低, 降低幅度在 21.3%—28.9%; 在旋耕耕作方式下, 平均降低幅度为 29.2%, 深翻耕耕作方式下, 平均降低幅度为 25.4%。由此可表明, 深翻耕与旋耕相比, 能够在冻害发生时降低产量损失, 加上耙以及镇压, 可将产量损失降至最低。与试验之前当地平均产量 ($9\ 240\ \text{kg}\cdot\text{hm}^{-2}$) 相比, 2 年试验产量均在灾害性天气下

有所降低。

2.4 土壤耕作技术对麦田经济效益的影响

不同耕作技术产生的经济效益如表 5 所示。与 RT 处理相比, RT+H、RT+H+C、RT+C、DT+H+C、DT+H 处理经济效益在 2 年试验中均提高, 2016—2017 年经济效益增加在 3.4%—9.9%; 2017—2018 年经济效益增加在 8.2%—15.6%。其中 DT+RT+C、DT+RT、RT 处理差异不显著; DT+H+C 的经济效益最高, 与 RT 处理相比, 两年平均经济效益增加 12.3%。

3 讨论

3.1 不同土壤耕作技术与小麦出苗质量的关系

深翻耕后, 耕层土壤大土块较多, 土块间存在大空隙, 播种时部分种子处于悬空状态; 旋耕后土

表 5 不同土壤耕作技术对麦田经济效益的影响
Table 5 Effects of different soil tillage techniques on economic benefits of wheat fields (yuan/hm²)

年份	处理	机械生产成本	产值	经济效益
Year	Treatment	Machinery cost	Output value	Economic benefits
2016–2017	RT+H	975	18721bc	17746bc
	RT+H+C	1125	18887ab	17762ab
	RT+C	960	18017d	17057d
	RT	675	17216e	16541e
	DT+RT	1425	17063e	15638e
	DT+RT+C	1650	18218cd	16568cd
	DT+H+C	1155	19333a	18178a
	DT+H	975	18084d	17109d
2017–2018	RT+H	975	14529bc	13554bc
	RT+H+C	1125	14767b	13642b
	RT+C	960	14191cd	13231cd
	RT	675	12950e	12275e
	DT+RT	1425	14066d	12641d
	DT+RT+C	1650	14284cd	12634cd
	DT+H+C	1155	15343a	14188a
	DT+H	975	14259cd	13284cd

壤暄松，导致部分播种过深，这些耕作技术都将影响出苗率，增加缺苗、断垄现象的出现。前人研究表明，秸秆还田前提下，播种 20 d 后，旋耕、免耕处理中，二叶、一叶一心等较小苗龄比例均明显高于翻耕^[19]；秸秆还田后进行镇压处理则可显著提高小麦出苗率，对幼苗素质提高也有一定效果，但未达到显著水平^[20]。本研究结果显示，DT+H+C 处理的出苗率最高，其次是 RT+H+C 处理，深翻耕处理有利于出苗率的提高以及出苗的整齐，旋耕处理有利于提高出苗的均匀度，深翻耕与旋耕相比，可大幅度减少缺苗、断垄，耙、镇压处理后，出苗率、均匀度和整齐度有所提高，这与前人研究结果一致^[15,20]。冬前幼苗质量直接影响其能否安全越冬，因此，打好整地播种基础，培育冬前壮苗，更是重中之重。根据各处理表现，DT+H+C 处理，更容易获得高质量幼苗，以达到安全越冬、丰产目的。

3.2 不同土壤耕作技术对小麦根系的影响

小麦作为须根系作物，根系下扎越深，越有利于利用深层土壤水分和养分^[21]，但由于连年旋耕，不利于蓄水保墒以及对深层土壤水分的吸收利用，耕作过后没有采取耙以及镇压措施，易造成在冬季

寒、早交加时出现冻害和死苗现象。研究表明，深松与旋耕相比，增加小麦次生根，增强植株抗倒能力^[22]、作物根系活性及数量，直接影响着植株地上部生长发育和产量的形成；不同耕作方式形成的各种土壤环境中，表土干旱和紧实的土壤环境对次生根形成及根系活力变化影响较大，影响根系进一步的生长发育^[23-26]。同时，迟仁立等^[27]研究显示，播后大拖重压或小拖多次碾压反而使土壤的水肥气状况变劣，影响作物的生长发育，导致地下根量和籽粒产量下降，这与本试验镇压过后，促进根系活力以及次生根发根能力的结果相反，这可能因为迟仁立等试验土壤为潮土，秸秆未还田，播前用铁牛-55 和 11 kW（15 马力）小四轮拖拉机处理小区轮迹排压地 1—10 遍，而本试验土壤为黄土，播前用重量 180 kg，宽 2.47 m 的镇压器镇压，且秸秆还田造成不同的土壤环境，因而镇压过后出现不同效果。本试验抽穗期相同耙、镇压因素下，深翻耕与旋耕相比，单株次生根数增加 0.5%—10.1%，深翻耕大量改善根系生长的土壤环境，在次生根旺发期促进次生根发生，明显提升次生根数目^[24]。本研究表明，在小麦生育期间，不同处理根系活力的变化趋势大

体一致,均呈现先升后降的趋势,在越冬期和拔节期出现峰值,均以DT+H+C处理最高。耙和镇压措施对根系活力的调控影响较明显,在生育前、中期提高根系活力,生育末期同时也具有延缓根系衰老的作用。

3.3 不同土壤耕作技术与小麦籽粒产量的关系

前人对不同土壤耕作技术对小麦产量的影响有很多研究。深翻耕与旋耕相比,打破了因常年旋耕而形成的犁底层,促进根系下扎以及发育,保证生育后期的水肥供给,增强植株抗倒能力,增加穗数和千粒重,增加产量^[23,28-30]。靳海洋^[31]、任爱霞^[32]和黄明等^[33]等认为,耕作方式对各阶段灌浆速率影响大,株行配置对灌浆持续期影响明显,进而影响小麦千粒重以及产量;不同耕作方式可影响籽粒各阶段灌浆持续天数、籽粒灌浆速率和粒重,在灌浆各阶段,免耕各处理的灌浆速率均比传统耕作高^[34-35],同时深松秸秆还田与免耕秸秆还田可减缓光合午休现象,使冬小麦维持较高的光合速率,有利于干物质积累和产量的提高^[36]。本试验结果表明,土壤耕作技术影响籽粒产量,同时千粒重的变化趋势与籽粒产量变化趋势一致。通过2年的产量对比得出,深翻耕与旋耕相比,深翻耕在遇到冻害灾害性天气,可以最大程度的减少产量损失,加上耙以及镇压处理,可将产量损失降至最低,这与前人研究结果相反^[27],可能与后期管理以及温度变化有关。2017—2018年灌浆速率峰值明显低于2016—2017年,同比降低10.0%—20.3%。这可能是因为2018年4月3日至7日,河南省中部及北部地区出现大范围降温,降温幅度在15℃,低温至-2.8℃,出现晚霜冻害,严重影响幼穗发育,进而影响灌浆期灌浆速率与籽粒千粒重。花后25—30 d,2016—2017年灌浆速率下降幅度明显大于2017—2018年,这可能是受到2017年5月10日至18日干热风,及5月22日强对流大风出现倒伏的影响,加速根系死亡,提前早熟,进而影响灌浆速率,最终影响籽粒成熟及粒重的形成。两次灾害性天气,对试验籽粒影响较大,但处理间仍差异显著。本试验研究的2年,籽粒灌浆分别受到干热风以及倒春寒的灾害性天气,进而影响产量。但从经济效益来看,虽然深翻耕耕作方式机械成本费用较高于旋耕耕作方式处理,但是耙和镇压后,提高出苗率,深翻耕处理后比旋耕处理苗壮,减少中后期麦田管理费用,增加产量,最终提高农民经济收益。

4 结论

在黄淮平原农区当前秸秆还田耕作模式中,深翻耕显著提高出苗率、整齐度,获得高质量幼苗,同时耕层增加提高植株发根能力和根系活力,进而间接影响生育后期灌浆速率以及籽粒产量。深翻耕+耙+镇压(DT+H+C)处理出苗率以及产量最高,旋耕(RT)处理缺苗、断垄最高,出苗率低,2年平均产量最低;耙以及镇压措施,可提高出苗率及幼苗均匀度和整齐度,促进次生根增多,生育前、中期根系活力提高,生育后期具有明显延缓根系衰老的作用,增强植株抗逆能力。综上所述,深翻耕+耙+镇压能够明显增加出苗率和提高幼苗质量,增强抗灾减灾能力,减少田间管理投入,促进产量提高,可作为黄淮平原农区一年两熟制农田黄土类土壤类型适宜的耕作方式。

References

- [1] 王红光,于振文,张永丽,石玉,王东.耕作方式对旱地小麦耗水特性和干物质积累的影响.作物学报,2012,38(4): 675-682.
WANG H G, YU Z W, ZHANG Y L, SHI Y, WANG D. Effects of tillage regimes on water consumption and dry matter accumulation in dryland wheat. *Acta Agronomica Sinica*, 2012, 38(4): 675-682. (in Chinese)
- [2] 陈宇.保护性耕作对小麦玉米周年水分利用及生长发育的影响[D].杨凌:西北农林科技大学,2015.
CHEN Y. Effects of conservation tillage on growth and water use of wheat-maize rotation[D]. Yangling: Northwest A&F University, 2015. (in Chinese)
- [3] 王绍中,田云峰,郭天财,王志和.河南小麦栽培学.北京:中国农业科学技术出版社,2009: 188-189.
WANG S Z, TIAN Y F, GUO T C, WANG Z H. *Wheat Cultivation in Henan Province*. Beijing: China Agricultural Science and Technology Press, 2009: 188-189. (in Chinese)
- [4] SISTI C P J, DOS SANTOS H P, KOHHANN R, ALVES B J R, URQUIAGE S, BODDEY R M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. *Soil & Tillage Research*, 2004, 76(1): 39-58.
- [5] 罗珠珠,黄高宝,辛平,张国盛.陇中旱地不同保护性耕作方式表土层土壤结构和有机碳含量比较分析.干旱地区农业研究,2008,26(4): 53-58.
LUO Z Z, HUANG G B, XIN P, ZHANG G S. Effects of tillage measures on soil structure and organic carbon of surface soil in semi-arid

- area of the western Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2008, 26(4): 53-58. (in Chinese)
- [6] 赵洪利, 李军, 贾志宽, 王学春, 王蕾. 不同耕作方式对黄土高原旱地麦田土壤物理性状的影响. *干旱地区农业研究*, 2009, 27(3): 17-21.
- ZHAO H L, LI J, JIA Z K, WANG X C, WANG L. Effect of different tillages on soil physical properties of dryland wheat field in the Loess Plateau. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2009, 27(3): 17-21. (in Chinese)
- [7] 陈冬林. 多熟复种稻田土壤耕作和秸秆还田的效应研究[D]. 长沙: 湖南农业大学, 2009.
- CHEN D L. Studies on effect of soil tillage and straw returning to field in multi-cropping paddy field[D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2009. (in Chinese)
- [8] 卫荣. 基于经营主体视角下的粮食生产适度规模研究——以黄淮海地区为例[D]. 北京: 中国农业科学院, 2016.
- WEI R. Study on the moderate scale operation of grain production based on the agricultural management entities — Taking the Huang_huai_Hai Region as an Example[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2016. (in Chinese)
- [9] 李向东, 郭天财, 高旺盛, 胡廷积. 河南传统农业作物起源与耕作制度演变. *中国农学通报*, 2006, 22(8): 574-579.
- LI X D, GUO T C, GAO W S, HU T J. The crop origin and farming system of traditional agriculture in Henan province. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2006, 22(8): 574-579. (in Chinese)
- [10] 胡艳. 河南省小麦关键生产技术推广应用现状与对策分析[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- HU Y. Analysis on current situation of extension & application and countermeasures of key production techniques of wheat in Henan province[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [11] 黄细喜. 土壤紧实度及层次对小麦生长的影响. *土壤学报*, 1988, 25(1): 59-65.
- HUANG X X. The wheat growth affected by the soil compaction and layers. *Acta Pedologica Sinica*, 1988, 25(1): 59-65. (in Chinese)
- [12] 陈金. 耕作模式与施氮量对土壤质量及冬小麦产量的调控效应[D]. 泰安: 山东农业大学, 2017.
- CHEN J. The regulation of tillage practice and nitrogen rate for improving soil quality and grain yield of winter wheat[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2017. (in Chinese)
- [13] 张军. 分层旋耕对稻茬麦生长与土壤物理的影响研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2015.
- ZHANG J. The effect of stratified rotary tillage on post-paddy wheat and soil physics[D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [14] 冯宇鹏. 耕作方式与施氮量对小麦玉米一年两熟农田土壤质量与生产力的影响[D]. 泰安: 山东农业大学, 2014.
- FENG Y P. Effects of tillage and nitrogen rate on soil quality and crop productivity in wheat-cropping system[D]. Tai'an: Shandong Agricultural University, 2014. (in Chinese)
- [15] 杨永辉, 武继承, 张洁梅, 潘晓莹, 王越, 何方. 耕作方式对土壤水分入渗、有机碳含量及土壤结构的影响. *中国生态农业学报*, 2017, 25(2): 258-266.
- YANG Y H, WU J C, ZHANG J M, PAN X Y, WANG Y, HE F. Effect of tillage method on soil water infiltration, organic carbon content and structure. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2017, 25(2): 258-266. (in Chinese)
- [16] MRBET R. Differential response of wheat to tillage management systems in a semiarid area of Morocco. *Field Crops Research*, 2000, 66(2): 165-174.
- [17] 董慧, 仲延龙, 齐龙昌, 汪和廷, 张玉琼, 宋贺, 董召荣. 耕作方式对冬小麦内源激素含量及产量的影响. *麦类作物学报*, 2015, 35(4): 542-547.
- DONG H, ZHONG Y L, QI L C, WANG H T, ZHANG Y Q, SONG H, DONG Z R. Effect of tillage methods on endogenous hormone content and yield of winter wheat. *Journal of Triticeae Crops*, 2015, 35(4): 542-547. (in Chinese)
- [18] 赵竹, 乔玉强, 李玮, 陈欢, 杜世州, 张向前, 曹承富. 自然降水条件下耕作方式对小麦生长、产量及土壤水分的影响. *麦类作物学报*, 2014, 34(9): 1253-1259.
- ZHAO Z, QIAO Y Q, LI W, CHEN H, DU S Z, ZHANG X Q, CAO C F. Effects of Different Tillage Methods on Growth, Yield of Wheat and Soil Moisture under Natural Rainfall Condition *Journal of Triticeae Crops*, 2014, 34(9): 1253-1259. (in Chinese)
- [19] 王玉玲, 李军, 柏炜霞. 轮耕体系对黄土台塬麦玉轮作土壤生产性能的影响. *农业工程学报*, 2015, 31(1): 107-116.
- WANG Y L, LI J, BAI W X. Effects of rotational tillage systems on soil production performance in wheat-maize rotation field in Loess Platform region of China. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(1): 107-116. (in Chinese)
- [20] 李少昆, 王克如, 冯聚凯, 谢瑞芝, 高世菊. 玉米秸秆还田与不同耕作方式下影响小麦出苗的因素. *作物学报*, 2006, 32(3):

- 463-465, 478.
- LI S K, WANG K R, FENG J K, XIE R Z, GAO S J. Factors affecting seeding emergence in winter wheat under different tillage patterns with maize stalk mulching returned to the field. *Acta Agronomica Sinica*, 2006, 32(3): 463-465, 478. (in Chinese)
- [21] 贾春林, 郭洪海, 张勇, 孟庆升, 杨秋玲, 隋学艳. 玉米秸秆全量还田下不同播种方式对土壤结构及小麦苗期生长的影响. *中国农学通报*, 2010, 26(8): 243-248.
- JIA C L, GUO H H, ZHANG Y, MENG Q S, YANG Q L, SUI X Y. Effects of different seeding manner on the soil structure and wheat seedling growth under maize stalk full returned to the field. *Chinese Agricultural Science Bulletin*, 2010, 26(8): 243-248. (in Chinese)
- [22] 祝飞华, 王益权, 石宗琳, 张润霞, 冉艳玲, 王亚城. 轮耕对关中一年两熟区土壤物理性状和冬小麦根系生长的影响. *生态学报*, 2015, 35(22): 7454-7463.
- ZHU F H, WANG Y Q, SHI Z L, ZHANG R X, RANG Y L, WANG Y C. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area. *Acta Ecologica Sinica*, 2015, 35(22): 7454-7463. (in Chinese)
- [23] 赵亚丽, 刘卫玲, 程思贤, 周亚男, 周金龙, 王秀玲, 张谋彪, 王群, 李潮海. 深松(耕)方式对砂姜黑土耕层特性、作物产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2018, 51(13): 2489-2503.
- ZHAO Y L, LIU W L, CHENG S X, ZHOU Y N, ZHOU J L, WANG X L, ZHANG M B, WANG Q, LI C H. Effects of pattern of deep tillage on topsoil features, yield and water use efficiency in lime concretion black soil. *Scientia Agricultura Sinica*, 2018, 51(13): 2489-2503. (in Chinese)
- [24] 蒋向, 贺德先, 任宏志. 轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响. *麦类作物学报*, 2012, 32(4): 711-715.
- JIANG X, HE D X, REN H Z. Effects of different patterns of rotational tillage on soil bulk density in wheat field and wheat root development. *Journal of Triticeae Crops*, 2012, 32(4): 711-715. (in Chinese)
- [25] 陈信信, 丁启朔, 李毅念, 薛金林, 何瑞银. 南方稻麦轮作系统下小麦根系的三维分形特征. *中国农业科学*, 2017, 50(3): 451-460.
- CHEN X X, DING Q S, LI Y N, XUE J L, HE R Y. Three dimensional fractal characteristics of wheat root system for rice-wheat rotation in southern China. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(3): 451-460. (in Chinese)
- [26] 王法宏, 王旭清, 任德昌, 于振文, 余松烈. 土壤深松对小麦根系活性的垂直分布及旗叶衰老的影响. *核农学报*, 2003, 17(1): 56-61.
- WANG F H, WANG X Q, REN D C, YU Z W, YU S L. Effect of soil deep tillage on root activity and vertical distribution. *Acta Agriculturae Nucleatae Sinica*, 2003, 17(1): 56-61. (in Chinese)
- [27] 迟仁立, 左淑珍, 夏平, 刘宏, 刘喜财. 不同程度压实对土壤理化性状及作物生育产量的影响. *农业工程学报*, 2001, 17(6): 39-43.
- CHI R L, ZUO S Z, XIA P, LIU H, LIU X C. Effects of different level compaction on the physicochemical characteristics of soil and crop growth. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2001, 17(6): 39-43. (in Chinese)
- [28] 何建宁, 于振文, 石玉, 赵俊晔, 张永丽. 长期耕作方式对小麦光合特性和产量的影响. *应用生态学报*, 2017, 28(4): 1204-1210.
- HE J N, YU Z W, SHI Y, ZHAO J Y, ZHANG Y L. Effects of long-term tillage practices on photosynthetic characteristics and grain yield of wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(4): 1204-1210. (in Chinese)
- [29] XIA L L, WANG S W, YAN X Y. Effects of long-term straw incorporation on the net global warming potential and the net economic benefit in a rice-wheat cropping system in China. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2014, 197: 118-127.
- [30] 穆心愿. 耕作方式与秸秆还田对黄淮潮土性质及小麦玉米生长的调控效应[D]. 郑州: 河南农业大学, 2016.
- MU X Y. Responses of soil properties, crop growth and yield to tillage and residue management in a wheat-maize cropping system on the North China Plain[D]. Zhengzhou: Henan Agricultural University, 2016. (in Chinese)
- [31] 靳海洋, 谢迎新, 李梦达, 刘宇娟, 贺德先, 冯伟, 王晨阳, 郭天财. 连续周年耕作对砂姜黑土农田蓄水保墒及作物产量的影响. *中国农业科学*, 2016, 49(16): 3239-3250.
- JIN H Y, XIE Y X, LI M D, LIU Y J, HE D X, FENG W, WANG C Y, GUO T C. Effects of annual continuous tillage on soil water conservation and crop yield in lime concretion black soil farmland. *Scientia Agricultura Sinica*, 2016, 49(16): 3239-3250. (in Chinese)
- [32] 任爱霞, 孙敏, 王培如, 薛玲珠, 雷妙妙, 薛建福, 高志强. 深松蓄水和施磷对旱地小麦产量和水分利用效率的影响. *中国农业科学*, 2017, 50(19): 3678-3689.
- REN A X, SUN M, WANG P R, XUE L Z, LEI M M, XUE J F, GAO Z Q. Effects of sub-soiling in fallow period and phosphorus fertilizer

- on yield and water use efficiency in dry-land wheat. *Scientia Agricultura Sinica*, 2017, 50(19): 3678-3689. (in Chinese)
- [33] 黄明, 吴金芝, 李友军, 王贺正, 付国占, 陈明灿, 李学来 马俊利. 耕作方式和秸秆覆盖对旱地麦豆轮作下小麦籽粒产量、蛋白质含量和土壤硝态氮残留的影响. 草业学报, 2018, 27(9): 34-44.
- HUANG M, WU J Z, LI Y J, WANG H Z, FU G Z, CHEN M C, LI X L, MA J L. Effects of tillage method and straw mulching on grain yield and protein content in wheat and soil nitrate residue under a winter wheat and summer soybean crop rotation in drylands. *Acta Prataculturae Sinica*, 2018, 27(9): 34-44. (in Chinese)
- [34] 翟云龙, 魏燕华, 张海林, 陈阜. 耕种方式对冬小麦籽粒灌浆特性及产量的影响. 干旱地区农业研究, 2017, 35(4): 211-216.
- ZHAI Y L, WEI Y H, ZHANG H L, CHEN F. Effect of tillage and seeding methods on grain filling and yield of winter wheat. *Agricultural Research in the Arid Areas*, 2017, 35(4): 211-216. (in Chinese)
- Chinese)
- [35] ABU-HAMDEH N H, ISMAIL S M, AL-SOLAIMANI S G, HATAMLEH R I. Effect of tillage systems and polyacrylamide on soil physical properties and wheat grain yield in arid regions differing in fine soil particles. *Archives of Agronomy And Soil Science*, 2019, 65(2): 182-196.
- [36] 张向前, 赵秀玲, 王钰乔, 濮超, 保尔江·马合木提, 陈阜, 张海林. 耕作方式对冬小麦灌浆期光合性能日变化和籽粒产量的影响. 应用生态学报, 2017, 28(3): 885-893.
- ZHANG X Q, ZHAO X L, WANG Y Q, PU C, BAOER JIANG M H M T, CHEN F, ZHANG H L. Effects of tillage practices on photosynthetic performance diurnal variation during filling stage and grain yield of winter wheat. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2017, 28(3): 885-893. (in Chinese)

(责任编辑 杨鑫浩)