

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.04.021

祁泽伟, 张慧芋, 李娜娜, 等. 不同秋耕措施对黄土高原春玉米田土壤物理质量的影响. 土壤, 2021, 53(4): 826–832.

不同秋耕措施对黄土高原春玉米田土壤物理质量的影响^①

祁泽伟¹, 张慧芋¹, 李娜娜^{2*}, 梁改梅², 杜天庆¹, 李军辉¹, 薛建福¹

(1 山西农业大学农学院/作物生态与旱作栽培生理山西省重点实验室, 山西太谷 030800; 2 山西农业大学山西有机旱作农业研究院, 山西太原 030031)

摘要: 合理耕作是改善土壤物理质量及构建合理耕层的重要措施之一, 对黄土高原农田改良具有重要意义。本研究采用旋耕、深翻和深松 3 种秋耕措施, 探究了不同秋耕措施对黄土高原春玉米田 0~30 cm 土壤物理质量的影响。结果表明: 深翻 5~30 cm 各层次土壤容重较旋耕显著降低了 10.1%~14.58%, 土壤总孔隙度和土壤充气孔隙度则分别显著增加了 11.59%~22.37% 和 26.52%~75.2%。深翻 10~30 cm 各层次土壤容重较深松显著降低了 6.56%~13.48%, 土壤总孔隙度则显著增加了 9.3%~17.1%。深翻 0~10 cm 各层次土壤毛细管孔隙度较深松显著增加了 7.41%~11.75%, 10~30 cm 各层次土壤质量含水量显著增加了 5.46%~16.57%。此外, 5~10 cm 土壤固、液、气三相相比偏离以旋耕最佳, 10~30 cm 各层次则以深翻为最佳。综合来看, 旋耕改善了 5~10 cm 土壤物理质量, 深翻改善了 10~30 cm 土壤物理质量, 采用旋耕+深翻轮耕模式可能是该研究区构建春玉米田合理耕层的潜在措施之一。

关键词: 秋耕措施; 土壤物理质量; 合理耕层; 春玉米; 黄土高原

中图分类号: S152 文献标志码: A

Effects of Different Autumn Tillage Practices on Soil Physical Quality of Maize Field on Loess Plateau of China

QI Zewei¹, ZHANG Huiyu¹, LI Nana^{2*}, LIANG Gaimei², Du Tianqing¹, LI Junhui¹, XUE Jianfu¹

(1 College of Agronomy, Shanxi Agricultural University / Crop Ecology and Dry Cultivation Physiology Key Laboratory of Shanxi Province, Taigu, Shanxi 030800, China; 2 Shanxi Institute of Organic Dryland Farming, Shanxi Agricultural University, Taiyuan 030031, China)

Abstract: Reasonable tillage is one of important measures to improve soil physical quality and to construct rational tillage layer on the Loess Plateau. In this study, three autumn tillage practices, including rotary tillage (RT), plough tillage (PT) and subsoiling (ST) were carried out to assess the effects of different autumn tillage on soil physical quality in 0-30 cm layer of maize field on the Loess Plateau. The results showed that, compared with RT, PT significantly reduced soil bulk density by 10.1%–14.58% while significantly increased total porosity by 11.59%–22.37% and air-filled porosity by 26.52%–75.2% in 5–30 cm layer, respectively. Moreover, compared with ST, PT significantly reduced soil bulk density by 6.56%–13.48% and increased total porosity by 9.3%–17.1% in 10–30 cm layer, increased capillarity porosity by 7.41%–11.75% in 0–10 cm layer and mass water content by 5.46%–16.57% in 10–30 cm layer. The most optimal deviation values of solid, liquid and gas appeared in 5–10 cm layer under RT and in 10–30 cm layer under PT. In conclusion, soil physical quality is improved in 5–10 cm layer under RT and in 10–30 cm layer under PT, therefore, adoption of RT/PT shifting tillage is a potential practice to construct rational tillage layer in the maize field on the Loess Plateau of China.

Key words: Autumn tillage; Soil physical quality; Rational tillage layer; Spring maize; Loess Plateau

土壤质量包括土壤物理质量、化学质量及生物学基础^[1]。土壤耕作是影响土壤物理质量的关键措施之一, 其能够直接作用于土壤而改变土壤物理质量^[2]。

①基金项目: 山西省农业科学院农业科技创新研究课题(YCX2018408, YCX2018409)和山西省优秀博士来晋工作奖励资金科研项目(SXYBKY201730)资助。

* 通讯作者(linana2002@163.com)

作者简介: 祁泽伟(1997—), 男, 山西侯马人, 硕士研究生, 主要研究方向为旱作栽培耕作与农田生态。E-mail:qzw002233@163.com

地处于干旱半干旱地区的黄土高原, 总耕地面积约 1691 万 hm^2 [3]。春玉米是黄土高原主要粮食作物之一 [4], 长期采用不合理的耕作措施, 造成了玉米田耕层变浅、土壤紧实、耕层土壤质量恶化等问题 [5]。因此, 如何采取有效的耕作措施改善土壤物理质量、构建合理耕层是实现农业可持续发展的重要环节。

不同耕作措施对土壤的扰动程度不一, 直接影响土壤容重、孔隙度及含水量等性质 [6-7]。与旋耕相比, 采用深松能有效降低 0~40 cm 土壤容重 [8], 但亦有学者认为深松对表层土壤容重影响相对较小 [9]。另外, 耕作措施对 0~40 cm 土壤含水量有显著影响, 合理的耕作措施有利于土壤含水量的增加 [10]。与旋耕相比, 深翻提升了 0~40 cm 土壤含水量 [11]。也有学者研究表明, 与翻耕和旋耕相比, 深松能提升 0~20 cm 土壤饱和导水率, 增加水分入渗, 提高土壤含水量 [12]。孔隙作为土壤结构的重要组成部分, 对土壤中水和空气的传导、运动及植物根的穿扎和吸水具有重要作用 [13]。研究表明, 与旋耕相比, 深松和深翻降低了 10~15 cm 土壤孔隙度, 但增加了 20~35 cm 土壤孔隙度 [14]。关于耕作对农田土壤物理质量影响的研究众多, 但因气候条件、土壤质地、取样时间、种植制度、有机质含量以及农机具大小等因素的差异, 不同研究的结果仍存在很大的争议 [15]。

秋耕是黄土高原春玉米种植区主要的耕作措施之一。目前, 黄土高原有关秋耕措施的研究报道较少, 特别是针对春玉米田秋耕措施对土壤物理质量的影响鲜有报道。因此, 本研究通过分析不同秋耕措施下春玉米田土壤容重、土壤孔隙度、土壤质量含水量及土壤固、液、气三相比偏离值的影响, 以期为黄土高原地区改善土壤物理质量, 构建合理耕层及实现农业可持续发展提供技术支撑和理论依据。

1 材料与方法

1.1 试验地概况

试验在山西农业大学东阳试验示范基地(37°32'44.28"N, 112°37'26.78"E)进行, 试验区为典型的温带大陆性季风气候, 中央平原区海拔为 750~850 m, 光照资源充足, 年均日照时数在 2 650 h 左右, ≥ 10 °C 活动积温约 2 600 °C 左右, 年均气温 8~12 °C, 无霜期 144~170 d, 年均降雨量 450~550 mm, 年平均湿度 55%~60%, 年均蒸发量在 1 996 mm 左右, 冬季昼夜温差大。试验地土壤为黏壤土至粉砂质黏壤土, 0~20 cm 土层土壤理化性状为有机质 10.2 g/kg, 全氮 0.118 g/kg, 全磷 0.089 g/kg, 全钾 2.09 g/kg,

有效磷 18.5 mg/g, 速效钾 141 mg/g, pH 8.2。

1.2 试验设计

试验开始于 2016 年, 采用单因素完全随机试验设计, 设置 3 种秋耕措施, 分别为旋耕(RT)、深翻(PT)、深松(ST), 各处理均秸秆不还田, 重复 3 次, 小区面积为 5 m × 30 m = 150 m^2 。供试玉米品种为大丰 30(中晚熟玉米杂交种), 种植密度为 67 500 株/ hm^2 。本试验中尿素(含 N 46%)、磷酸二铵(含 N 18%, P_2O_5 46%)和氯化钾(含 K_2O 62%)用量分别为 416.7、210 和 75 kg/hm^2 , 肥料随播种机一次性混合施入, 采用等行距种植(60 cm), 株距为 25 cm。各处理具体田间操作方法见表 1。在 2018 年和 2019 年取样测定, 2018 年试验期内降雨量为 309.3 mm, 2019 年试验期内降雨量为 249.6 mm。

表 1 耕作处理田间试验设计
Table 1 Tillage treatments of experiment

处理	耕作措施
旋耕	玉米收获后秸秆全部移出后进行旋耕作业, 耕作深度为 10~15 cm, 后进行浅旋镇压
深翻	玉米收获后秸秆全部移出后进行翻耕作业, 耕作深度为 20~25 cm, 后进行浅旋镇压
深松	玉米收获后秸秆全部移出后进行深松作业, 耕作深度为 40 cm, 后进行浅旋镇压

1.3 测定指标及方法

1.3.1 土壤容重 试验于 2018 年 10 月 10 日和 2019 年 10 月 19 日玉米收获时, 采用环刀法(100 cm^3)分层取样测定 0~5、5~10、10~20 和 20~30 cm 层次的土壤容重、土壤质量含水量和孔隙度。将带土样的环刀密封好带回实验室, 将环刀外的土壤擦拭干净, 测定鲜土加环刀的重量, 记重 M_1 。完毕后, 将环刀置于已放好纱布的托盘中, 给托盘加水至土壤吸水饱和和重量稳定记重 M_2 。此后, 将土样在 105 °C 烘箱中烘干至恒重, 记重 M_3 , 最后, 将环刀土壤去除后洗涤、干燥并称重, 记重 M_0 。采用公式(1)计算土壤容重:

$$\rho_b = \frac{M_3 - M_0}{V} \quad (1)$$

式中: ρ_b 为土壤容重(g/cm^3); M_3 为烘干后干土与环刀的总重量(g), M_0 为环刀的重量(g), V 为环刀的体积(cm^3)。

1.3.2 土壤质量含水量 土壤质量含水量采用公式(2)进行计算:

$$\theta_g = \frac{M_1 - M_3}{M_3 - M_0} \times 100 \quad (2)$$

式中: θ_g 为土壤质量含水量(%); M_1 为新鲜土壤与环刀的总重量(g); M_0 和 M_3 与公式(1)中相同。

1.3.3 土壤孔隙度 土壤总孔隙度通过土壤容重与土壤密度之间的关系计算得出^[16], 采用公式(3)进行计算:

$$P_t = (1 - \frac{\rho_b}{P_d}) \times 100 \quad (3)$$

式中: P_t 为土壤总孔隙度(%); P_d 是土壤(粒)密度, 通常为 2.65 g/cm^3 ; ρ_b 与公式(1)中相同。

土壤充气孔隙度利用总孔隙度减去体积含水量计算得出, 采用公式(4)计算:

$$P_a = P_t - \rho_b \times \theta_g \quad (4)$$

式中: P_a 为土壤充气孔隙度(%); P_t 和 ρ_b 与公式(3)中相同; θ_g 与公式(2)中相同。

土壤毛管孔隙度通过土壤容重与土壤毛管孔隙水含量计算得出^[17], 采用公式(5)计算:

$$P_c = \frac{\theta_c \times \rho_b}{v} \times 100 \quad (5)$$

$$\theta_c = \frac{M_2 - M_3}{M_3 - M_0} \times 100 \quad (6)$$

式中: P_c 为土壤毛管孔隙度(%); θ_c 为毛管孔隙含水量(%); 其余指标与上述中相同。

1.3.4 土壤固、液、气三相比偏离值 引出土壤固、液、气三相比偏离值来评价土壤结构, 采用公式(7)计算:

$$R = \sqrt{0.4 \times (X - 50)^2 + (Y - 25)^2 + 0.6 \times (Z - 25)^2}$$

$$X = 100 \times (1 - P_t)$$

$$Y = 100 \times \theta_g \times \rho_b$$

$$Z = 100 \times (P_t - \theta_g \times \rho_b) \quad (7)$$

式中: R 为土样三相比与适宜状态下土壤三相比在空间距离上的差值; X 为土样固相值公式; Y 为土样液相值公式; Z 为土样气相值公式; 0.4 为土壤固相数据所占权重; 0.6 为土样气相数据所占权重; 其余指标与上述公式中相同。

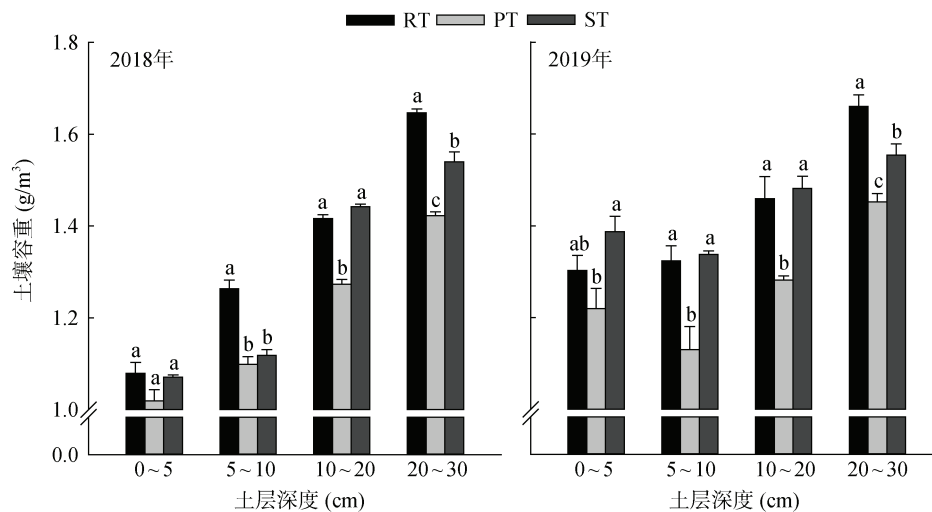
1.4 统计分析

采用 SPSS 16.0 进行单因素方差分析, 并用最小显著差异法(LSD)对土壤物理指标进行多重比较 ($P < 0.05$), 采用 Sigmaplot 12.0 进行制图。

2 结果与分析

2.1 不同秋耕措施对土壤容重的影响

整体而言, 不同秋耕措施 0~30 cm 土壤容重随土层加深而增大。2018—2019 年, 深翻处理 5~10 cm 层次的土壤容重较旋耕处理显著降低了 13.07%~14.6%, 而 10~20 cm 和 20~30 cm 土层的土壤容重则显著低于旋耕和深松处理。其中, 旋耕与深松处理间 10~20 cm 层次土壤容重无显著差异, 而深松处理 20~30 cm 层次较旋耕处理显著降低了 12.5%~13.63%。



(RT 代表旋耕, PT 代表深翻, ST 代表深松, 小写字母不同表示同一土层不同处理间差异显著 ($P < 0.05$), 下同)。

图 1 不同秋耕措施对土壤容重的影响

Fig. 1 Soil bulk densities under different autumn tillage practices

2.2 不同秋耕措施对土壤孔隙度的影响

2018—2019 年, 深翻处理 5~10 cm 土层土壤总孔隙度较旋耕显著增加了 11.92%~14.54%, 10~20 cm 和 20~30 cm 则较旋耕和深松处理分别显著提高

了 11.59%~22.37% 和 9.3%~17.1%(图 2)。其中在 10~20 cm 土层, 旋耕与深松处理间土壤总孔隙度无显著差异, 而在 20~30 cm 土层则深松较旋耕处理显著增加了 10.63%~10.74%。

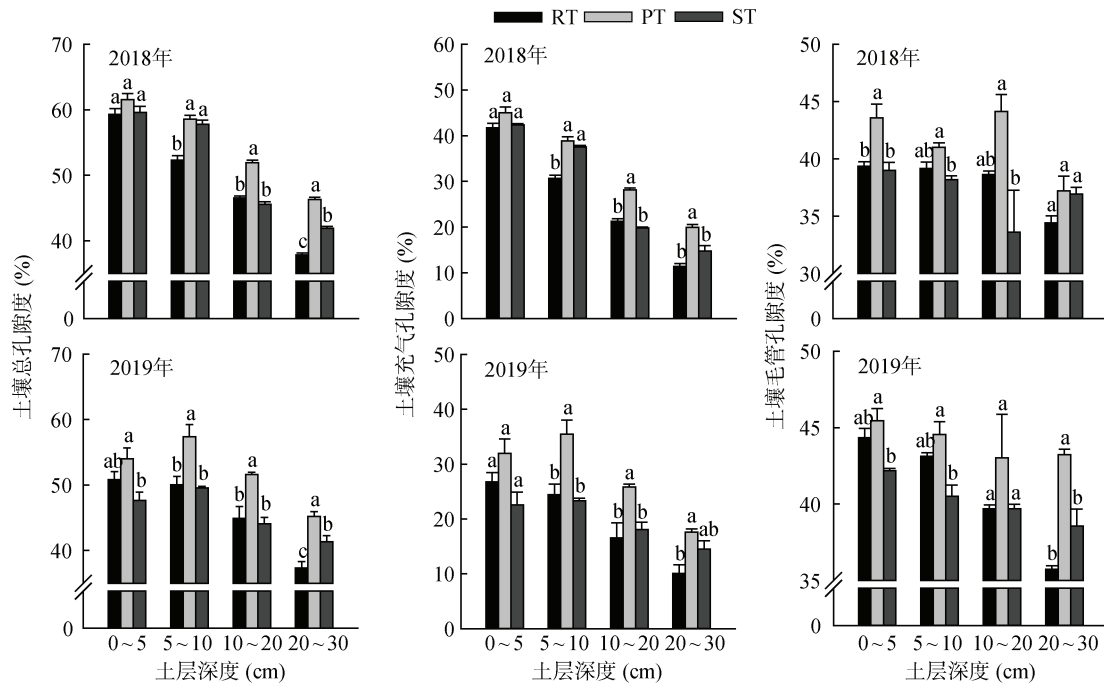


图 2 不同秋耕措施对土壤孔隙度的影响
 Fig. 2 Soil porosities under different autumn tillage practices

2018—2019年,深翻处理5~10 cm和20~30 cm土层的土壤充气孔隙度显著高于旋耕处理。其中,在5~10 cm土层,2018年深翻与深松处理间土壤充气孔隙度无显著差异,而2019年深翻较深松处理显著增加了52.06%。在20~30 cm土层,2018年深翻处理土壤充气孔隙度较深松显著增加了38.83%,但2019年深翻与深松处理间无显著差异。此外,深翻处理10~20 cm土层的土壤充气孔隙度显著高于旋耕和深松处理,后二者间无显著差异。

2018—2019年,深翻处理0~5 cm和5~10 cm土层土壤毛细管孔隙度显著高于深松处理,而旋耕与深

松处理间无显著差异。在10~20 cm土层,2018年深翻处理土壤毛细管孔隙度较深松显著增加了31.26%,但2019年各秋耕措施间无显著差异。在20~30 cm土层,2018年各秋耕措施间无显著差异,而2019年深翻处理较深松和旋耕处理显著增加了21.25%和75.2%。

2.3 不同秋耕措施对土壤质量含水量的影响

不同秋耕措施0~30 cm土壤质量含水量随土层加深先增加后降低(图3)。在0~5 cm和5~10 cm土层,2018—2019年,各秋耕措施间土壤质量含水量无显著差异。在10~20 cm土层,深翻处理土壤质量

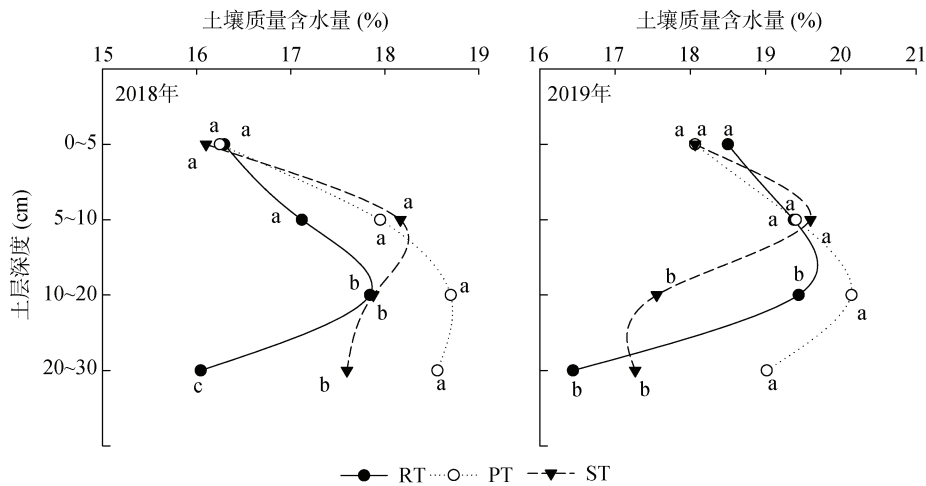


图 3 不同秋耕措施对土壤质量含水量的影响
 Fig. 3 Soil gravimetric moistures under different autumn tillage practices

含水量较深松处理显著增加了 4.6%~14.74%，较旋耕处理显著增加了 3.61%~4.81%。在 20~30 cm 土层，2018 年深翻处理土壤质量含水量显著高于旋耕和深松处理，其中，2018 年深松较旋耕处理显著增加了 16.57%。

2.4 不同秋耕措施对土壤固、液、气三相比偏离值的影响

2018—2019 年，各秋耕措施间 0~5 cm 土层土壤固、液、气三相比偏离值无显著差异(图 4)。2018 年，旋耕处理 5~10 cm 土层土壤固、液、气三相比偏离值

较深松和深翻显著降低了 51.09% 和 55.83%，后二者间无显著差异。深翻处理 10~20 cm 土层土壤固、液、气三相比偏离值较深松显著降低了 40.05%。在 20~30 cm 土层，土壤固、液、气三相比偏离值表现为深翻<深松<旋耕，三者间差异显著。2019 年，旋耕和深松处理 5~10 cm 层次土壤固、液、气三相比偏离值较深翻处理显著降低了 75.73% 和 81.44%。在 10~20 cm 土层，3 种秋耕措施间土壤固、液、气三相比偏离值无显著差异。在 20~30 cm 土层，深翻处理土壤固、液、气三相比偏离值较旋耕处理显著降低了 50.98%。

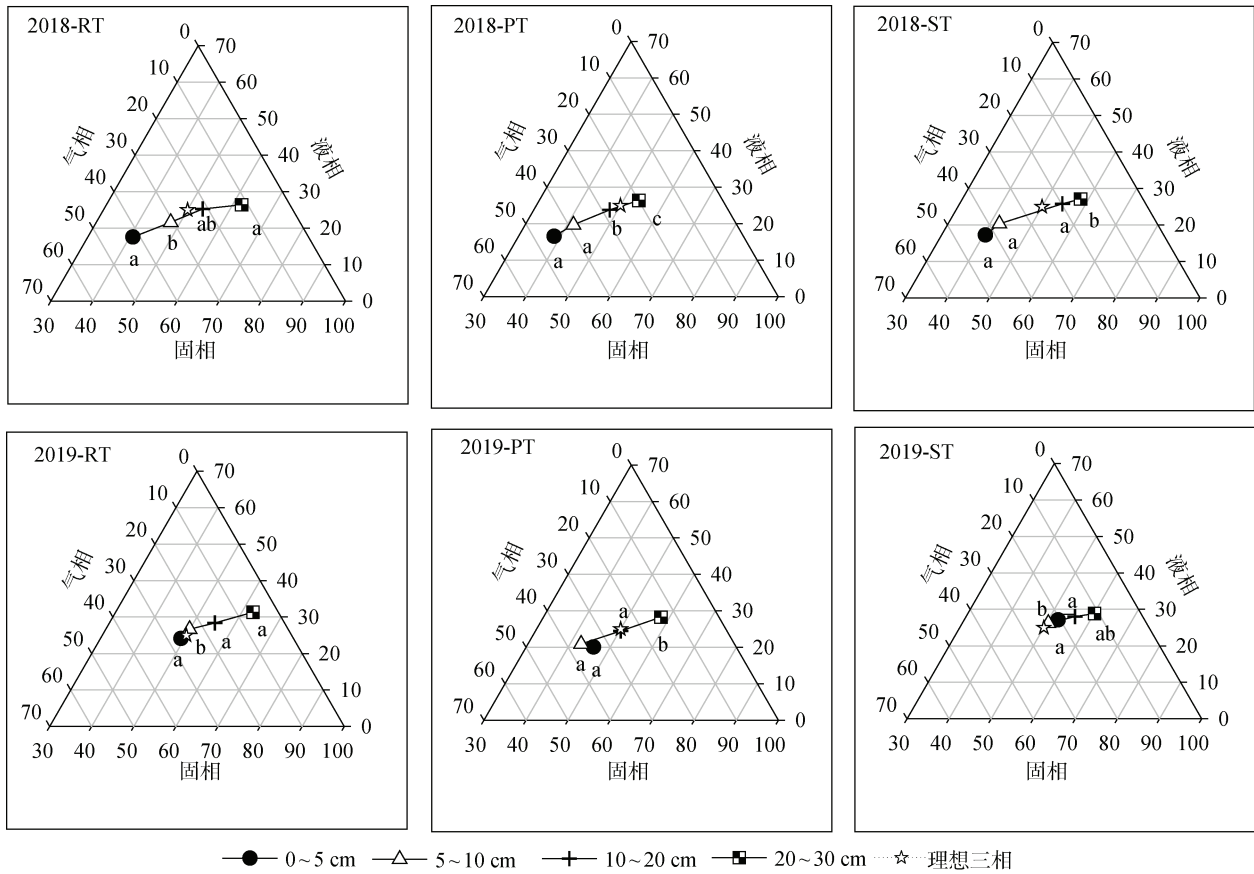


图 4 不同秋耕措施的土壤固、液、气三相比偏离值

Fig. 4 Deviation values of soil solid, liquid and gas phases under different autumn tillage practices

3 讨论

3.1 不同秋耕措施对土壤容重及孔隙度的影响

土壤容重与农田持水保水能力相关，直接或间接影响土壤质量，进而影响作物水分吸收利用和产量形成^[18]。土壤孔隙与水分的储存和运移、根系生长发育、气体的扩散以及土壤生物群落的分布有直接关系^[19]。本研究表明，与旋耕相比，深翻显著降低了 5~30 cm 土壤容重，显著增加了 5~30 cm 土壤总孔隙和土壤充气孔隙。这是因为旋耕耕作深度较

浅，亚表层土壤未受到扰动且长期受农机具和上层土壤的重力作用，孔隙空间不断减小，土壤容重不断增加^[20]。而深翻亚表层土壤与表层土壤充分混合，对降低土壤紧实程度具有明显效应，土壤处于较为疏松的环境^[21]。同时与旋耕相比，深翻处理下玉米根系丰富且分布均匀^[22-23]，发达的根系对降低土壤容重也起到了一定作用^[11]。本研究表明，对于同样可以打破犁底层的深松处理，在 10~30 cm 剖面其降低土壤容重和增加土壤孔隙的效果不如深翻。这可能是由于深松只打破犁底层但未改变上下土层顺序^[24]，且土

壤自身具有自我调节能力^[25], 经过一个休闲期和一个玉米生育周期后, 土壤压实状态在一定程度上得以恢复。本研究中秋耕措施间土壤容重、土壤总孔隙度和土壤充气孔隙度的差异主要表现在 5 ~ 30 cm 土层, 而在 0 ~ 5 cm 土层差异不显著。这主要是由于本研究各处理在秋耕后均进行浅旋(0 ~ 5 cm)并镇压处理, 作用于该土层的机械效果基本相同。

土壤毛管孔隙是孔隙直径小于 0.1 mm 的土壤孔隙, 毛管孔隙具有毛管作用, 既能疏导水分, 又能保持水分。本研究表明, 深翻处理下 0 ~ 5 cm 和 5 ~ 10 cm 层次土壤毛管孔隙度显著高于深松。这可能与根系分布以及土壤有机质含量等方面差异有关^[26]。本研究将前茬秸秆全部移出, 土壤有机质主要来自于前茬玉米根系, 深翻耕作下玉米根系丰富且分布均匀^[22-23], 利于土壤有机质的增加, 进而提高了毛管孔隙度。近年来, X 射线断层扫描技术(CT)被逐渐应用于农田土壤孔隙的研究中^[27-28], 该技术在 不损坏土壤孔隙结构的基础上能够得到原状土壤的孔隙结构三维立体成像^[29]。在今后的研究中, 运用 CT 技术研究不同耕作措施下土壤孔隙大小、数目、分布及连续性等土壤孔隙特征变化, 有助于深入理解土壤孔隙的功能特性。

3.2 不同秋耕措施对土壤质量含水量的影响

土壤水分是黄土高原干旱半干旱地区作物生长的主要限制因素。有学者研究表明, 深松^[30]和旋耕^[31]处理较深翻能显著提高土壤含水量, 但本研究表明, 深翻处理 10 ~ 20 cm 和 20 ~ 30 cm 土层土壤质量含水量显著高于深松和旋耕处理。这可能是因为本研究耕作时期为春玉米收获后进行。春季的黄土高原春玉米区常年干旱风大, 春耕后使原有土壤水分无效蒸发, 秋耕可提高冬春休闲期雨水的蓄积, 避免了春季土壤缺水的现象, 而深翻较深松和旋耕可能增加了休闲期的土壤蓄水, 改善了土壤结构。土壤结构上的巨大差异影响了水分动态变化过程^[17]。深翻显著增加了 <0.25 mm 粒径微团聚体, 提高了比表面积^[32], 为土壤水分的蓄积提供存储空间。同时, 土壤水分状况受降雨、地表蒸发、作物蒸腾耗水和降雨入渗等因素综合影响^[16]。深松促进了土壤水分的下渗^[33], 而深翻可能降低了土壤水分的下渗能力, 水分积聚在 10 ~ 30 cm 层次处。此外, 众多研究表明, 耕作措施能够影响 0 ~ 300 cm 的土壤水分蓄积^[34-35]。在未来的研究深入分析不同秋耕措施下土壤深层水分动态变化规律及蓄积机制是很有必要的。

3.3 不同秋耕措施对土壤固、液、气三相比偏离值的影响

旱作农业理想的土壤三相比是固相 50%, 液相和气相各 25%, 调节合理的三相比能够为农作物的生长提供优良的水、肥、气、热等条件。土壤固、液、气三相比偏离值代表土壤三相结构距离, 土壤固、液、气三相比偏离值越接近 0, 说明土壤三相结构越接近理想状态^[6]。有研究表明, 固相容积较大土层其相应土壤容重也较大, 土壤容重过大, 会影响土壤水肥气热等, 进而影响作物根系在土壤中的穿插, 对作物生长造成一定的影响^[36]。本研究表明, 在 10 ~ 30 cm 各层次, 深翻处理与其他两种秋耕措施相比具有较小的土壤固、液、气三相比偏离值, 同时, 深翻显著降低了土壤固相, 显著增加了土壤液相。说明深翻可有效增加土壤液相, 减少土壤固相所占比例, 进而增加土壤的持水性, 减缓土壤自身压实状态, 促进了根系的有效下扎。实现土壤中气、液、固三相的重新分配, 优化土壤结构。而 5 ~ 10 cm 以旋耕为宜, 这可能与旋耕降低了 5 ~ 10 cm 的气相比例有关。产生这种现象的原因可能是旋耕扰动土壤程度较大, 降低了 >0.25 mm 水稳性大团聚体^[37], 降低了土壤大孔隙, 进而降低土壤气相。

4 结论

各秋耕措施对 0 ~ 5 cm 土层各物理指标影响较小。与旋耕和深松相比, 深翻处理显著降低了 10 ~ 30 cm 土壤容重, 显著增加了 10 ~ 30 cm 土壤总孔隙度, 明显优化了 10 ~ 30 cm 土壤固、液、气三相比偏离值。与深松和深翻相比, 旋耕显著降低了 5 ~ 10 cm 土壤充气孔隙度, 明显优化 5 ~ 10 cm 土壤固、液、气三相比偏离值。综上所述, 旋耕改善了 5 ~ 10 cm 土层土壤物理质量, 深翻改善了 10 ~ 30 cm 土层土壤物理质量。因此, 采用旋耕+深翻轮耕模式可能是改善该地区春玉米田土壤物理质量、构建合理耕层的潜在措施。

参考文献:

- [1] 张仁陟, 罗珠珠, 蔡立群, 等. 长期保护性耕作对黄土高原旱地土壤物理质量的影响[J]. 草业学报, 2011, 20(4): 1-10.
- [2] 王岩, 刘玉华, 张立峰, 等. 耕作方式对冀西北粟钙土土壤物理性状及苜蓿生长的影响[J]. 农业工程学报, 2014, 30(4): 109-117.
- [3] 俄胜哲, 丁宁平, 李利利, 等. 黄土高原黑垆土施肥的作物累积产量及土壤肥力贡献[J]. 土壤学报, 2019, 56(1): 195-206.

- [4] 李嘉, 吕慎强, 杨泽宇, 等. 氮肥运筹对黄土塬区春玉米产量、效益和氮肥利用率的综合效应[J]. 植物营养与肥料学报, 2020, 26(1): 32–41.
- [5] 白伟, 孙占祥, 张立祯, 等. 耕层构造对土壤三相和春玉米根系形态的影响[J]. 作物学报, 2020, 46(5): 759–771.
- [6] 蒋发辉, 高磊, 韦本辉, 等. 粉垄耕作对红壤理化性质及红薯产量的影响[J]. 土壤, 2020, 52(3): 588–596.
- [7] 董建江, 邵伏文, 张林, 等. 不同耕作模式对稻田土壤理化性质及经济效益的影响[J]. 土壤, 2015, 47(3): 509–514.
- [8] 马阳, 吴敏, 王艳群, 等. 不同耕作施肥方式对夏玉米氮素利用及土壤容重的影响[J]. 水土保持学报, 2019, 33(5): 171–176.
- [9] 蒋向, 贺德先, 任洪志, 等. 轮耕对麦田土壤容重和小麦根系发育的影响[J]. 麦类作物学报, 2012, 32(4): 711–715.
- [10] Liu Y, Gao M S, Wu W, et al. The effects of conservation tillage practices on the soil water-holding capacity of a non-irrigated apple orchard in the Loess Plateau, China[J]. Soil and Tillage Research, 2013, 130: 7–12.
- [11] 王玥凯, 郭自春, 张中彬, 等. 不同耕作方式对砂姜黑土物理性质和玉米生长的影响[J]. 土壤学报, 2019, 56(6): 1370–1380.
- [12] Jabro J D, Stevens W B, Iversen W M, et al. Tillage depth effects on soil physical properties, sugarbeet yield, and sugarbeet quality[J]. Communications in Soil Science and Plant Analysis, 2010, 41(7): 908–916.
- [13] 李玉洁, 王慧, 赵建宁, 等. 耕作方式对农田土壤理化因子和生物学特性的影响[J]. 应用生态学报, 2015, 26(3): 939–948.
- [14] 战秀梅, 彭靖, 李秀龙, 等. 耕作及秸秆还田方式对春玉米产量及土壤理化性状的影响[J]. 华北农学报, 2014, 29(3): 204–209.
- [15] Tuzzin de Moraes M, Debiassi H, Carlesso R, et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil[J]. Soil and Tillage Research, 2016, 155: 351–362.
- [16] 柏炜霞, 李军, 王玉玲, 等. 渭北旱塬小麦玉米轮作区不同耕作方式对土壤水分和作物产量的影响[J]. 中国农业科学, 2014, 47(5): 880–894.
- [17] Feng X M, Hao Y B, Latifmanesh H, et al. Effects of subsoiling tillage on soil properties, maize root distribution, and grain yield on mollisols of northeastern China[J]. Agronomy Journal, 2018, 110(4): 1607–1615.
- [18] Krzic M, de Fortin M C, Bomke A A. Short-term responses of soil physical properties to corn tillage-planting systems in a humid maritime climate[J]. Soil and Tillage Research, 2000, 54(3/4): 171–178.
- [19] Pires L F, Borges J A R, Rosa J A, et al. Soil structure changes induced by tillage systems[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 165: 66–79.
- [20] Liu X W, Zhang X Y, Chen S Y, et al. Subsoil compaction and irrigation regimes affect the root-shoot relation and grain yield of winter wheat[J]. Agricultural Water Management, 2015, 154: 59–67.
- [21] Schneider F, Don A, Hennings I, et al. The effect of deep tillage on crop yield-What do we really know?[J]. Soil and Tillage Research, 2017, 174: 193–204.
- [22] 张万锋, 杨树青, 娄帅, 等. 耕作方式与秸秆覆盖对夏玉米根系分布及产量的影响[J]. 农业工程学报, 2020, 36(7): 117–124.
- [23] 李晓龙, 高聚林, 胡树平, 等. 不同深耕方式对土壤三相及玉米根系构型的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(4): 1–7, 29.
- [24] Çelik İ, Günal H, Acar M, et al. Strategic tillage may sustain the benefits of long-term no-till in a Vertisol under Mediterranean climate[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 185: 17–28.
- [25] 黄细喜. 土壤自调性与少免耕法[J]. 土壤通报, 1987, 18(3): 111–114.
- [26] 张向前. 耕作方式对华北平原麦玉两熟农田土壤固碳及作物生长的影响[D]. 北京: 中国农业大学, 2017.
- [27] Zhou H, Fang H, Mooney S J, et al. Effects of long-term inorganic and organic fertilizations on the soil micro and macro structures of rice paddies[J]. Geoderma, 2016, 266: 66–74.
- [28] 杨永辉, 武继承, 毛永萍, 等. 免耕对土壤剖面孔隙分布特征的影响[J]. 中国生态农业学报, 2018, 26(7): 1019–1028.
- [29] 赵玥, 刘雷, 韩巧玲, 等. 基于 CT 图像的土壤孔隙结构重构[J]. 农业机械学报, 2018, 49(S1): 401–406.
- [30] 李慧, 高志强, 薛建福. 夏闲期耕作对旱地麦田土壤物理质量的影响[J]. 山西农业大学学报(自然科学版), 2018, 38(2): 15–21.
- [31] 王秋菊, 焦峰, 韩东来, 等. 机械化整地方式对低洼水田土壤理化性质及水稻产量影响[J]. 农业工程学报, 2019, 35(18): 70–77.
- [32] 王世佳, 蒋代华, 朱文国, 等. 粉垄耕作对农田赤红壤团聚体结构的影响[J]. 土壤学报, 2020, 57(2): 326–335.
- [33] 平翠枝, 红梅, 王文东, 等. 不同耕作方式对黑土区农田土壤物理特性的影响[J]. 中国农学通报, 2020, 36(7): 83–89.
- [34] Xue L Z, Khan S, Sun M, et al. Effects of tillage practices on water consumption and grain yield of dryland winter wheat under different precipitation distribution in the loess plateau of China[J]. Soil and Tillage Research, 2019, 191: 66–74.
- [35] Sun M, Ren A X, Gao Z Q, et al. Long-term evaluation of tillage methods in fallow season for soil water storage, wheat yield and water use efficiency in semiarid southeast of the Loess Plateau[J]. Field Crops Research, 2018, 218: 24–32.
- [36] 汪洪, 高翔, 陈磊, 等. 硝态氮供应下植物侧根生长发育的响应机制[J]. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(4): 1005–1011.
- [37] 李锡锋, 许丽, 张守福, 等. 砂姜黑土麦玉农田土壤团聚体分布及碳氮含量对不同耕作方式的响应[J]. 山东农业科学, 2020, 52(3): 52–59.