

DOI: 10.5846/stxb201404140716

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):

Zhu F H, Wang Y Q, Shi Z L, Zhang R X, Ran 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):

# 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

祝飞华,王益权\*,石宗琳,张润霞,冉艳玲,王亚城

西北农林科技大学资源环境学院,杨凌 712100

**摘要:**针对关中地区土壤连续单一耕作存在的主要问题,进行了土壤轮耕效应研究。2009年至2012年在关中一年两熟区采用连续4年旋耕(RT)、翻耕-免耕-翻耕-免耕(PNT)和深松-免耕-深松-免耕(SNT)3种耕作处理,对土壤容重、紧实度及小麦根系生长进行了研究。结果表明,与试验前相比,夏玉米收获后(2013年10月)两种轮耕处理显著( $P < 0.05$ )降低了0—10、10—20 cm土壤容重,旋耕处理在0—10 cm处差异不显著,而10—20 cm土壤容重显著增大;与旋耕处理相比,两种轮耕处理0—10、10—20 cm土壤容重在第4季冬小麦整个生育期内变异系数较小,土壤紧实度较低,且改善效果在冬小麦生育中后期10—20 cm土层体现更为显著;旋耕处理0—10、10—20 cm土壤紧实度与含水量均呈显著负相关,相关系数分别为-0.89、-0.85,两种轮耕处理相关性不显著;0—40 cm土层根重密度和根系活力表现为:两种轮耕处理>连年旋耕。可见,长期旋耕后进行轮耕(免耕与翻耕、深松)有利于改善土壤物理状况,促进作物根系生长。

**关键词:**轮耕;容重;紧实度;动态变化;根系生长

## Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area

ZHU Feihua, WANG Yiquan\*, SHI Zhonglin, ZHANG Runxia, RAN Yanling, WANG Yacheng

College of Resources and Environment, Northwest A&F University, Yangling 712100, China

**Abstract:** Rotary tillage is a very common practice in the Guanzhong area. However, many problems occur for winter wheat fields with long-term rotary tillage, including poor soil water vapor transmission and low soil fertility, which are not favorable to winter wheat growth. To solve these problems, a 4-year field experiment was carried out from 2009 to 2012 in Yangling, Shaanxi Province of China, which is an annual double cropping area. The experiment compared three tillage patterns: RT (rotary tillage for 4 years), PNT (a deep plowing followed by a non-tillage year alternation) and SNT (a subsoiling year followed by a non-tillage year alternation). This study evaluated the impacts of the three tillage patterns on soil bulk density, soil compaction across the 0—40 cm soil profile, and winter wheat root growth. Results showed that after the summer maize harvest (October, 2013), the soil bulk density under the SNT and PNT treatments significantly ( $P < 0.05$ ) decreased at 0—10 and 10—20 cm compared with the previous treatment, but the soil bulk density significantly increased under the RT treatment at 10—20 cm, with no significant difference at 0—10 cm. The dynamic changes of soil bulk density at 0—10 and 10—20 cm at different times were a measure of the ability of the soil to maintain structural stability. During the whole growth period of the fourth season winter wheat, the variation coefficient of soil bulk density

基金项目:陕西省农业厅项目(k332021312);陕西省科研推广项目(413020211203533)

收稿日期:2014-04-14; 网络出版日期:2015-04-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: Soilphysics@163.com

under the SNT and PNT treatments at 0—10 and 10—20 cm was lower than that under the RT treatment. The soil compaction under the SNT and PNT treatments at 0—10 and 10—20 cm was also lower than that under the RT treatment. The improved efficiency of the SNT and PNT treatments on soil physics was more evident at 10—20 cm during the late growth period of winter wheat. There was a significant negative correlation between the soil compaction and soil water content under the RT treatment at 0—10 and 10—20 cm, with correlation coefficients of  $-0.89$  and  $-0.85$ , respectively, but there was no significant correlation at these depths between the SNT and PNT treatments. This indicated that the soil structure in the RT treatment was more sensitive to the change in environment than in the SNT and PNT treatments. Soil aggregates were decomposed into smaller aggregates and particles during the frequent tillage, and this would be the main factor causing the reduced porosity and poor soil structure performance. The SNT and PNT treatments were more effective in increasing root weight density and root vigor of winter wheat in the 0—40 cm soil layer than the RT treatment. The results suggested that the effects of the SNT and PNT treatments on soil physical properties and root development were better than those of the RT treatment. After long-term rotary tillage, deep plowing and subsoiling alternated with non-tillage can improve soil physical properties and increase crop yield.

**Key Words:** alternate tillage; bulk density; compaction; dynamic changes; root development

土壤物理性状决定着土壤水、肥、气、热的循环和供应,这些都直接影响着根系的生长发育和生理功能,且预示着土壤供给作物养分的能力<sup>[1, 2]</sup>。近 15 年来,陕西关中地区大面积采用冬小麦旋耕条播—夏玉米免耕条播的种植方式<sup>[3]</sup>,长年连续旋耕导致土壤亚表层紧实化,土体的通透性变差,加之有机肥施用越来越少,致使关中地区农田土壤肥力日趋下降,粮食产量徘徊不前,经济效益不明显<sup>[4-7]</sup>。因此,寻求合适的耕作技术体系对维持土壤肥力,保证稳产丰产有着重要意义。

现国内外大多数的研究表明,长期翻耕则会导致表层土壤结构稳定性和团聚体质量下降,加剧农田表层土壤退化<sup>[8]</sup>,而以免耕、少耕为代表的保护性耕作措施能够有效的增强土壤特性,改良土壤结构,促进土壤有机质的积累,从而提高了土壤的供水供肥能力,增加了作物产量<sup>[9, 10]</sup>。张国盛等<sup>[11]</sup>的研究认为,长期免耕有利于提高表层土壤有机碳含量和结构稳定性,从而改善土壤的供肥供水能力;陈浩等<sup>[12]</sup>研究表明,保护性耕作可以改善土壤容重,促进水稳定性团聚体的形成,提高土层蓄水能力。然而,也有一些学者认为过分强调少耕、免耕等保护性耕作措施并不有利于改善土壤理化性状<sup>[13, 14]</sup>。在这一背景下,国内外学者积极研究探寻翻耕、深松、免耕等土壤耕作措施的合理搭配模式和周期,形成与种植制度相适应的土壤耕作技术体系,以解决长期的单一耕作措施所带来的问题<sup>[15, 16]</sup>。陕西关中地区长期采用单一旋耕制度,亚表层土壤严重紧实化,土壤质量明显下降<sup>[17, 18]</sup>。鉴于此,本研究以陕西关中具有代表性的杨陵区一年两熟制农田为基点,通过 4 年的定位试验,分析了翻耕-免耕-翻耕-免耕、深松-免耕-深松-免耕与连续 4 年旋耕 3 种耕作模式对麦田土壤物理性质和冬小麦根系生长及生理活性的影响,旨在寻求能够改善土壤结构稳定性、培肥地力的有效耕作模式,维持土壤的持续生产力,为该地区小麦高产优质栽培提供技术参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验区概况

该地区海拔 540 m,年平均降水量为 650 mm 左右,且年内降水分配不均,主要集中在 7、8、9 三个月,年蒸发量平均在 800 mm 左右,年平均温度在 11.0—14.0 °C,无霜期 228 d,属于半干旱偏湿润易旱地区,常年实行冬小麦旋耕条播—夏玉米免耕条播,土壤类型为壤土(系统分类命名为土垫旱耕人为土, Earth-cumuli-orthic-anthrosols)。试验开始前(2009 年 10 月 2 日)测定土壤基本理化性状见表 1。

表 1 试验区土壤基本性质

Table 1 Basic soil properties of experiment field

土层厚度 Depth /cm	粘粒 Clay (g/kg)	粉粒 Silt (g/kg)	砂粒 Sand (g/kg)	容重 Bulk density (g/cm <sup>3</sup> )	紧实度 Compaction (Kpa)	有机质 Organic matter (g/kg)	全氮 Total N (g/kg)	速效磷 Available P (mg/kg)	速效钾 Available K (mg/kg)
0~10	192.54	690.88	116.58	1.39±0.02	456±62	23.22	0.98	8.9	161
10~20	183.25	723.54	93.201	1.50±0.01	1436±155	14.16	0.89	7.6	152

## 1.2 试验设计

试验于陕西关中地区杨凌头道塬进行,试验田种植制度为冬小麦→夏玉米轮作,一年两熟,在 2009 年至 2012 年夏玉米季各小区均采用小麦秸秆留茬(10 cm)覆盖、免耕播种玉米的方式,而在冬小麦播种前设置 3 种耕作处理,具体见表 2。随机区组设计,3 次重复,每个小区面积 300 m<sup>2</sup>(10 m×30 m)。

表 2 试验设计

Table 2 Experimental design

代码 Code	处理 Treatments	冬小麦具体耕作措施 Specific operation of winter wheat			
		2009 年 10 月 October 2009	2010 年 10 月 October 2010	2011 年 10 月 October 2011	2012 年 10 月 October 2012
RT	连年 4 年旋耕	旋耕	旋耕	旋耕	旋耕
PNT	翻耕-免耕-翻耕-免耕	翻耕	免耕	翻耕	免耕
SNT	深松-免耕-深松-免耕	深松	免耕	深松	免耕

注: RT—Rotary tillage for 4 years, 连续 4 年旋耕; PNT—Deep plowing followed by a non-tillage year alternation, 翻耕与免耕隔年交替进行; SNT—Subsoiling followed by a non-tillage year alternation, 深松与免耕隔年交替进行,下同

## 1.3 田间管理

试验期间,所有试验地除小麦季耕作模式不同外,其他管理模式与当地习惯相同。具体耕作方法如下:①翻耕处理,在前茬玉米收获及秸秆移除后,用拖拉机带三铧犁进行翻耕,深度为 25 cm,然后条播冬小麦。②深松处理,冬小麦在前茬玉米收获及秸秆移除后,用冀铲式深松机进行间隔深松整地,深松深度 30 cm,宽度间隔 40 cm,然后播种冬小麦;③常规旋耕处理,冬小麦在前茬玉米连秸秆收获后,使用拖拉机带旋耕机进行,旋耕深度为 5 cm。④免耕处理,玉米秸秆全部移出,10 月中旬直接免耕条播冬小麦。冬小麦品种为西农 2611,播种量为 120 kg/hm<sup>2</sup>。采用 2BF-14 行圆盘式小麦播种机(西安播种机械厂生产)分别与 2009 年 10 月 12 日、2010 年 10 月 18 日、2011 年 10 月 14 日、2012 年 10 月 10 日播种。播种时基尿素(N≥46%) 600 kg/hm<sup>2</sup>,过磷酸钙(P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>≥12%) 750 kg/hm<sup>2</sup>,并结合冬灌施尿素 150 kg/hm<sup>2</sup>,除草剂为乙阿合剂。

## 1.4 研究方法

### 1.4.1 农田土壤容重变化研究

分别在实验处理前(2009.10.2)、第 4 年冬小麦主要生育期(播种 2012.10.10、出苗 2012.11.15、越冬 2013.1.15、返青 2013.2.15、拔节 2013.3.15、抽穗 2013.4.15、开花 2013.5.15、灌浆 2013.5.30、成熟 2013.6.15)及第 4 季夏玉米收获后(2013.10.9),在每试验小区按 S 形布设了 5 个样点,每个样点分别用环刀法采取 0—10 cm 和 10—20 cm 2 个土层的土样测定土壤容重。

### 1.4.2 土壤紧实度与含水量测定关系研究

在第 4 年冬小麦主要生育期(播种、出苗、拔节、抽穗、开花、成熟)间,在每个试验小区按 S 形布设 7 个样点,用 SC-900 型土壤紧实度仪按照 2.5 cm 的间距现场测定 0—20 cm 范围内的土壤紧实度。并用土钻采取 0—10 cm、10—20 cm 土层土样,以测定相应时刻土壤的含水量。

### 1.4.3 根重密度与根系活力测定

分别在第 4 年冬小麦返青期(2013.2.15)、拔节期(2013.3.15)、开花期(2013.5.15)和成熟期(2013.6.15)

调查不同土层耕重密度及根系活力。

**根重密度:**选取生长正常、分布均匀的植株作为测试对象,用根系取土钻采取直径 10 cm,深度 20 cm 土壤容积内的小麦根系量。为了消除小麦根系分布的水平空间差异性,每个小区选定 3 个点作为重复,每个样点的每个土层取 3 钻,第 1 钻设在小麦行的正下方,第 2 钻设在小麦行距正中央,第 3 钻设在与麦行紧相切的一边。将 3 个钻点样品合在一起作为同一土层的根系样品,采样深度为 40 cm,共分为 0—20 cm 和 20—40 cm 共 2 层,以探索小麦根系垂直分布。将采取的带根土样装入 100 目的尼龙网中,用水浸泡 0.5 h,充分冲洗并去除杂质后,在 80 ℃ 条件下烘至恒重。在室温平衡 0.5 h,用平称重(g),然后计算单位体积土壤内的小麦根系干重即根重密度。

**根系活力:**选定具有活力和代表性的待测鲜根样,运用改良 TTC 法测定根系活力。即用 1% 的 TTC 溶液使根系还原着色,产生不溶于水的 TTCH;用 95% 的甲醇溶液作为提取液,提取 TTCH,在 485 nm 处比色,读取 OD 值。与标准曲线对照,计算出根系活力( $\mu\text{g}^{-1}\text{FW h}^{-1}$ )。

### 1.5 数据分析

试验数据采用 SPASS 18.0 进行单因素方差(ANOVA)分析,并 ORIGIN 8.0 作图。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同耕作处理对土壤物理性状的影响

#### 2.1.1 不同耕作模式对土壤稳定容重的影响

不同耕作措施对土壤稳定容重的影响较为明显(图 1),试验开始前(2009 年 10 月 2 日)供试土壤 0—10 cm、10—20 cm 土层容重分别为 1.39 g/cm<sup>3</sup>、1.50 g/cm<sup>3</sup>,经过 4 年的不同轮耕处理,夏玉米收获后(2013 年 10 月 9 日)PNT 和 SNT 处理下土壤容重均显著( $P < 0.05$ )降低。

0—10 cm 土层,SNT 和 PNT 处理土壤容重分别降低到 1.32 和 1.31 g/cm<sup>3</sup>,降幅分别为 5.10%、6.18%;10—20 cm 土层容重降低到 1.42 和 1.41 g/cm<sup>3</sup>,降幅分别达到了 5.01%、5.67%,而 RT 处理在 0—10 cm 和 10—20 cm 处的土壤容重有继续增大趋势,其中在 10—20 cm 处已达显著水平。与 RT 处理的相比,0—10 cm 土层 SNT 和 PNT 处理土壤容重分别降低了 7.49% 和 8.26%;10—20 cm 土层分别降低了 8.13% 和 8.78%,差异达到显著水平( $P < 0.05$ ),但 SNT 与 PNT 间差异不显著。可见,旋耕处理有增大 0—10、10—20 cm 土壤容重的趋势,而两种轮耕能在一定程度上能降低耕层土壤容重,改善土壤通透性能。

#### 2.1.2 不同耕作模式下土壤容重的动态变化

从试验的第 4 年度冬小麦整个生育期来看,不同耕作模式下 0—10 cm、10—20 cm 土壤容重变化趋势大体一致,均呈现先增大后减小再增大,最后趋于稳定的变化规律(图 2),这与季节变化具有一定的相似性。小麦生育期间不同耕作处理的土壤容重增幅不同,0—10 cm 土层,SNT 与 PNT 处理土壤容重增幅相对较小,二者从 1.25 和 1.24 g/cm<sup>3</sup>分别增大到 1.32 和 1.30 g/cm<sup>3</sup>,涨幅分别为 5.43% 和 5.40%,处理间差异不显著( $P > 0.05$ ),RT 处理的土壤容重在播种期显著小于 SNT 和 PNT 处理,但从苗期便开始增大,到小麦孕穗期就已显著高于两种轮耕处理,容重从 1.06 g/cm<sup>3</sup>增大到 1.43 g/cm<sup>3</sup>,涨幅为 35.35%,显著高于两种轮耕处理。10—20

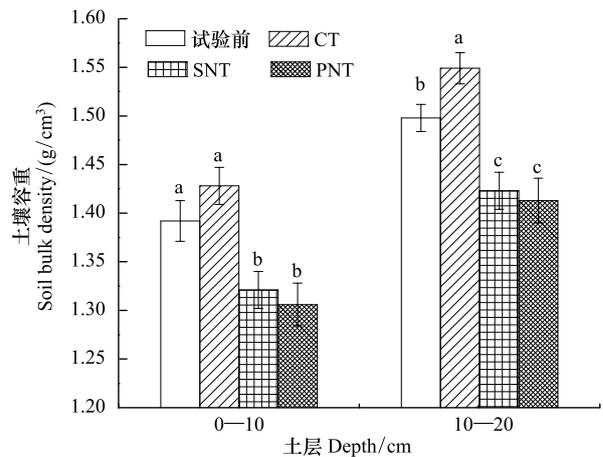


图 1 不同耕作模式下 0—10、10—20 cm 土壤稳定容重的变化  
Fig. 1 The change of soil bulk density at 0—10, 10—20 cm depth under different tillage systems

注: RT—Rotary tillage for 4 years, 连续 4 年旋耕; PNT—Deep plowing followed by a non-tillage year alternation, 翻耕与免耕隔年交替进行; SNT—Subsoiling followed by a non-tillage year alternation, 深松与免耕隔年交替进行,下同

cm 土层, SNT 和 PNT 处理的土壤容重在整個生育期維持在基本穩定的水平, 二者漲幅分別為 7.32% 和 7.09%, 差異不顯著, RT 處理的土壤容重在整個生育期都顯著高於 SNT 和 PNT 處理, 平均容重高達 1.49 g/cm<sup>3</sup>, 漲幅為 8.17%。以上結果可以看出 RT 處理下, 土壤容重僅在播種期到苗期且只有表層 0—10 cm 處於較低水平, 剩餘生育期均維持著較高的水平, 尤其是在亞表層 10—20 cm 處, 土壤容重最大值可達到 1.55 g/cm<sup>3</sup>, 同時土壤容重變化幅度較大。

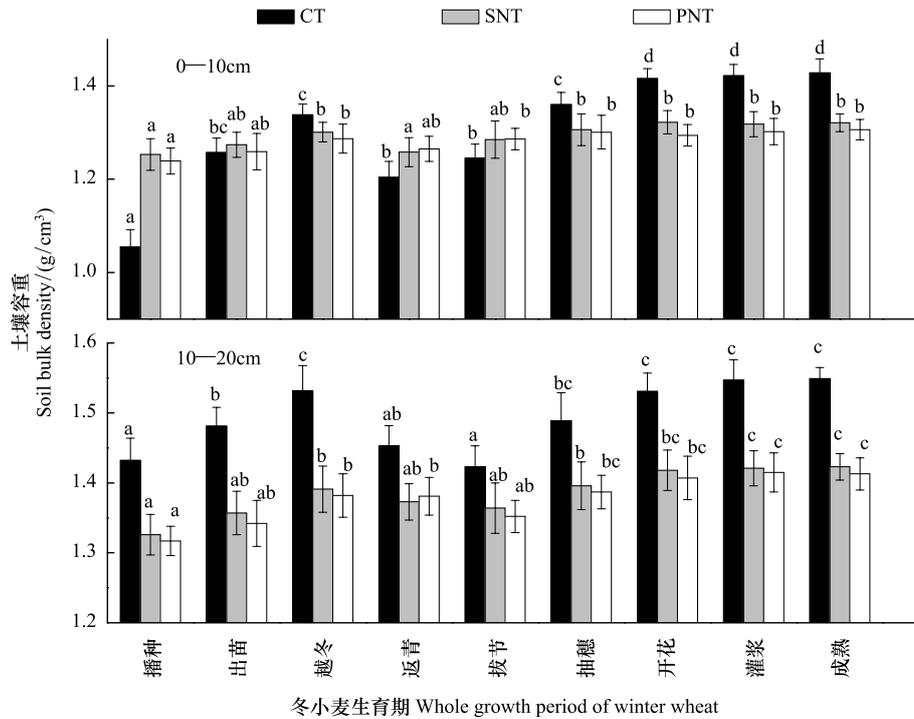


图 2 不同时期 0—10, 10—20 cm 土壤容重的动态变化

Fig. 2 The dynamic changes of soil bulk density at 0—10, 10—20 cm depth in different time

### 2.1.3 不同耕作模式下土壤紧实度的动态变化

从表 3 可以看出, 各耕作处理 10—20 cm 土层紧实度在整个生育期都显著高于 0—10 cm 土层 ( $p < 0.05$ )。从冬小麦整个生育期来看, 0—10 cm 土层, 3 种不同耕作处理土壤紧实度均呈现显著的增加趋势, RT 处理涨幅达到 224%, 显著高于 PNT 和 SNT 处理的 72%、54%, SNT 和 PNT 处理间差异不显著; 10—20 cm 土层, 3 种不同耕作处理土壤紧实度也呈现显著的增加趋势, RT、SNT 和 PNT 处理的涨幅分别达到 57%、53% 和 78%, 各

表 3 不同耕作模式下 0—10, 10—20 cm 土壤紧实度动态变化 (Kpa)

Table 3 The dynamic change of soil compaction under four treatments in the 0—10, 10—20 cm soil profile (Kpa)

土层 Depth	处理 Treatments	冬小麦生育期 Whole growth period of winter wheat						
		播种 Sowing	出苗 Seedling	拔节 Jointing	抽穗 Heading	开花 Flowering	灌浆 Grain-filling	成熟 Ripening
0—10 cm	RT	145±53a	249±65b	343±72c	367±49c	415±56cd	470±38d	492±69d (a)
	SNT	236±47a	268±75ab	298±48ab	332±69b	359±46b	396±53b	406±71b (a)
	PNT	197±64a	248±47a	315±57b	364±49bc	395±37bc	421±43c	427±56c (a)
10—20 cm	RT	1079±136a	1163±147a	1487±152b	1612±163c	1692±157c	1507±148b	1576±139bc (b)
	SNT	784±189a	863±201ab	931±146ab	1145±193bc	1201±183c	1047±167bc	964±186b (a)
	PNT	673±172a	721±169a	954±187b	1210±216c	1147±197bc	1108±158bc	1053±177bc (a)

注: 同行不同小写字母表示冬小麦生育期内的差异显著性 ( $P < 0.05$ ), ( ) 内的小写字母表示处理间的差异显著性 ( $P < 0.05$ ), RT—连续 4 年旋耕; SNT—深松-免耕; PNT—翻耕-免耕。

处理间差异不显著,而 RT 处理的土壤紧实度在整个生育期都显著高于 SNT 和 PNT 处理,SNT 和 PNT 处理差异不显著,3 种耕作处理在整个生育期的平均值依次为 1445、991 和 981 Kpa。可知,RT 处理 0—10 cm 土层紧实度仅在小麦生长前较低,生长中后期逐渐增大,且 10—20 cm 紧实度在整个生育均较高,而 SNT 和 PNT 处理在小麦整个生育期对 0—10 cm、10—20 cm 土层紧实度均有所改善。

#### 2.1.4 不同耕作模式下土壤紧实度与水分的关系

从图 3、图 4 可以看出,RT、PNT 和 SNT 处理的 0—20 cm 土壤紧实度在一定含水量的范围内均随含水量的减小而增大。在 0—10 cm、10—20 cm 土层,RT 处理土壤紧实度与含水量均呈显著负相关,相关系数分别为 -0.886、-0.854,而 PNT 和 SNT 处理的相关性不显著,相关系数分别为 -0.605、-0.622 和 -0.464、-0.672。这说明了 RT 处理 0—20 cm 土壤的紧实度对含水量的变化较 SNT 和 PNT 处理敏感。

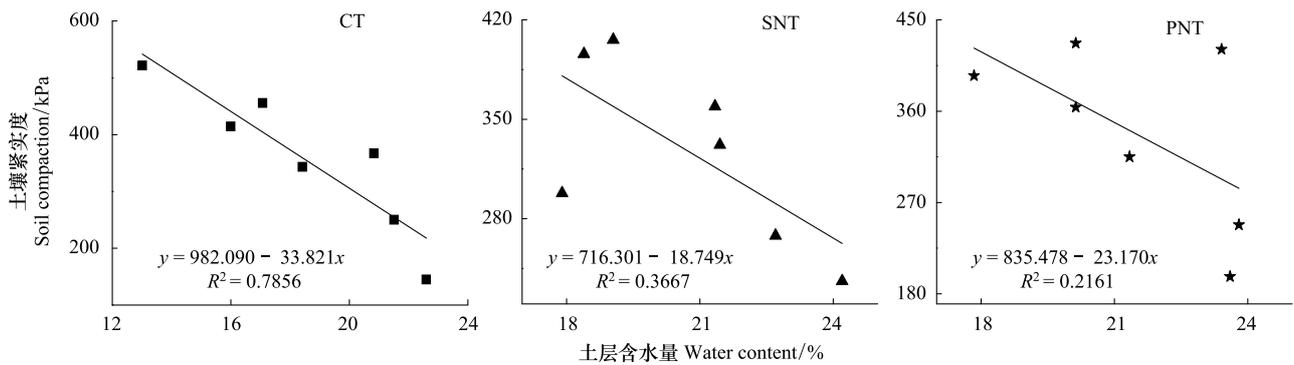


图 3 不同耕作模式下 0—10 cm 土壤紧实度与含水量的关系

Fig. 3 The relationship between soil compaction and moisture at 0—10 cm depth under different tillage systems

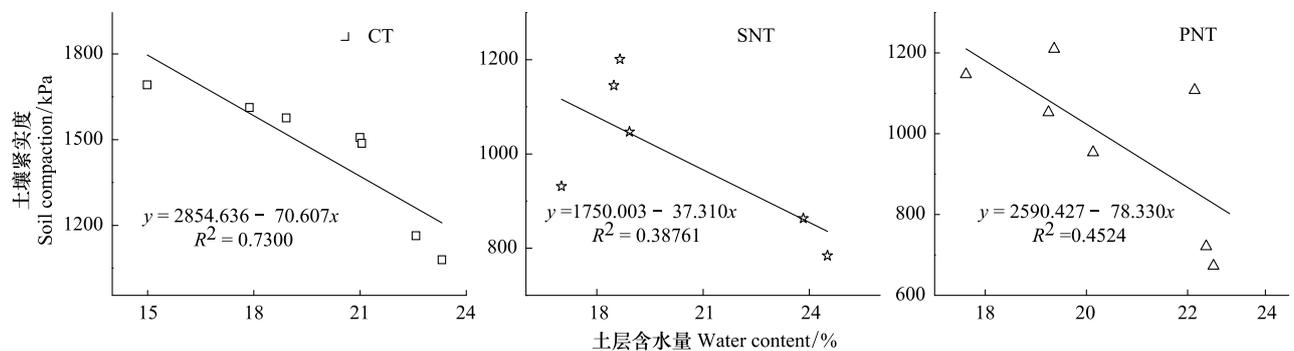


图 4 不同耕作模式下 10—20 cm 土壤紧实度与含水量的关系

Fig. 4 The relationship between soil compaction and moisture at 10—20 cm depth under different tillage systems

## 2.2 不同耕作处理对小麦根系生长的影响

### 2.2.1 不同耕作模式对小麦根重密度的影响

土壤物理状态的直接效应就在于影响作物根系的延伸,从图 5(a)可以看出,各生育期小麦根系集中在 0—20 cm 范围内,其下层根系量极少,对于增加作物抗旱性极为不利。3 种耕作处理在返青期前 0—20 cm 和 20—40 cm 土层的根重密度差异不显著,在返青期以后,0—40 cm 土层 SNT 和 PNT 处理根系量均高于 RT 处理,而 SNT 和 PNT 处理间差异不显著。

与 RT 处理相比,0—20 cm 土层 SNT 和 PNT 处理在拔节期、开花期和成熟期根系增幅分别达到 15.99%—18.40% 和 19.88%—21.07%;0—40 cm 土层 SNT 和 PNT 处理的增幅分别为 180.00%—192.39% 和 150.01%—243.96%。表明 SNT 和 PNT 处理能够增加冬小麦生育过程中、后期根系密度,尤其是增加了深层土壤中根系的量,有助于提高作物抗旱性能。

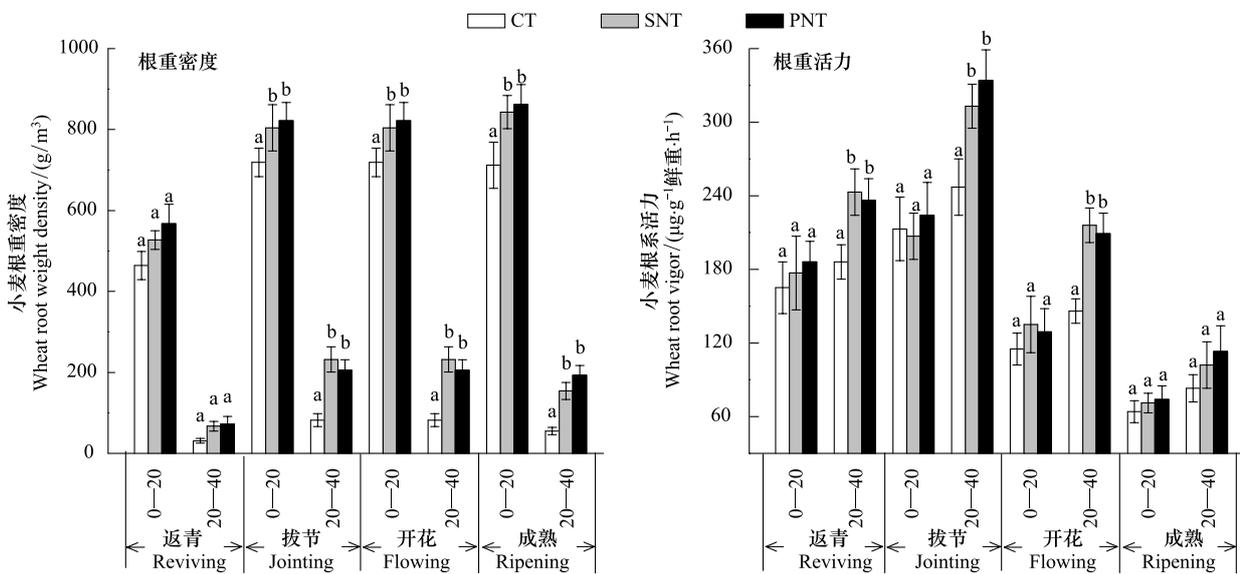


图5 不同耕作模式下小麦根重密度和根系活力的动态变化

Fig. 5 The dynamic changes of wheat root weight density and vigor under different tillage systems

### 2.2.2 不同耕作模式对小麦根系活力的影响

小麦生育期间3种耕作处理根系活力的变化趋势大体一致(图5(b)),均呈现出在拔节期前逐渐递增然后递减的趋势。0—20 cm 土层不同耕作处理的根系活力在全生育期差异均不显著;但在20—40 cm 土层内SNT和PNT处理在小麦开花期前均高于RT处理,而SNT和PNT处理间差异不显著。到了小麦成熟期不同耕作处理间根系活力差异逐渐缩小,均未达到显著水平。表明SNT和PNT两种耕作处理均能有效地提高小麦根系活力,对延缓20—40 cm小麦生育后期根系衰老有积极作用。

## 3 讨论

### 3.1 不同耕作模式对土壤稳定容重的影响

研究表明,保护性耕作、深耕和深松均能够降低土壤容重<sup>[19, 20]</sup>,姜桂英等<sup>[21]</sup>认为不同耕作措施下土壤容重的变化趋势表现为免耕>旋耕>翻耕,而长期单一耕作会导致土壤结构稳定性和团聚体质量下降,土壤通透性变差<sup>[22]</sup>,本研究的结果与上述相似,与试验前相比,经过4年不同耕作处理后,0—10、10—20 cm 土壤容重均表现为连年旋耕>试验前>翻耕-免耕、深松-免耕处理,这说明了长期采用单一旋耕措施能够增大土壤容重,降低通透性;同时孔凡磊等<sup>[23]</sup>研究认为多年免耕后进行土壤耕作(翻耕)可以显著降低土壤容重,朱利群等<sup>[24]</sup>研究表明一年免耕一年深耕+秸秆还田处理能够有效的降低土壤容重,本试验的轮耕模式与其不尽相同,但结论基本一致,免耕和翻耕、深松的轮耕处理能够改善0—10、10—20 cm 土壤容重;这主要由于免耕结合翻耕、深松的轮耕处理既可以疏松土壤,又减少了因机械频繁操作而造成的土壤压实,有效改善土壤结构<sup>[16]</sup>。

### 3.2 不同耕作模式下土壤容重的动态变化

可以看出3中耕作处理下土壤容重均呈现季节性动态变化,从播种到冬前,容重从扰动以后的最小值逐渐因为土壤沉实而增大,从越冬期到孕穗期间受冬季冻融交替过程的影响,土壤容重有所减小,从孕穗期开始到小麦收获期间因土壤逐渐失水,土壤收缩作用使得土壤容重又呈现出增大的过程,到开花期土壤容重基本趋于稳定并逐渐达到最大值。这种土壤容重随季节的动态变化过程在一定程度上说明了土壤结构的不稳定性<sup>[25]</sup>,旋耕处理0—10、10—20 cm 土壤容重变异系数显著高于两种轮耕处理,且仅在生育前期只有表层0—10 cm 处于较低水平,其余生育期均维持着较高的水平,尤其是在亚表层10—20 cm 处,土壤容重最大值可达

到  $1.55 \text{ g/cm}^3$ 。这在一定程度上表明旋耕处理下土壤对环境变化过程更加敏感,土壤结构稳定性较两种轮耕处理差<sup>[26, 27]</sup>,由于连年旋耕,表层土壤受到频繁的扰动,土壤结构稳定性下降,而在亚表层形成紧实的底土层<sup>[28]</sup>。

### 3.3 不同耕作模式下土壤紧实度的动态变化

相关研究表明,播前施行旋耕处理的土壤紧实度较高,在亚表层表现得较为明显,而深耕松土处理能够有效降低各层土壤的紧实度<sup>[29, 30]</sup>。本研究也表明,免耕结合翻耕、深松的轮耕处理 10—20 cm 土壤紧实度明显小于旋耕处理,其改善效果在小麦整个生育期间都能得到明显的体现;而旋耕处理的改善效果多体现在作物生育前期,且仅限 0—10 cm 土层。这主要是因为紧实度与土壤粘结力和孔性有关,旋耕仅能使表层土壤疏松,增加扩散率,但同时也能使耕区以下形成坚硬的紧实层<sup>[31]</sup>,而免耕结合翻耕、深松的轮耕处理有效的打破了犁底层,增加了土壤总孔隙度,增强了土壤的通气能力<sup>[32]</sup>,根系及微生物的活动能力增强,使耕层土壤孔隙度增加,在整个生育期,土壤结构都得到一定程度的改善<sup>[33]</sup>。

### 3.4 不同耕作模式下土壤紧实度与水分的关系

3 种耕作处理土壤紧实度在一定含水量的范围内的变化趋势相同,均随含水量的减小而增大,这与 Hoefler 等<sup>[34]</sup>人的研究结果相一致,土壤紧实度增加的原因之一是孔隙空间降低导致土壤颗粒排列更为紧密,当含水量降低时,土壤结构空间收缩,所以紧实度呈现增大的趋势。而连年旋耕耕作处理的 0—10、10—20 cm 土壤紧实度对含水量的变化比两种轮耕处理(翻耕-免耕、深松-免耕)更敏感,呈显著负相关,这可能是由于旋耕处理频繁扰动土壤,使团聚体被挤压破碎,稳定性低,土壤结构性较差<sup>[35]</sup>;两种轮耕处理减少了耕作次数,从而减少对土壤结构体的机械破坏,能够在一定程度上改善土壤结构性,对增加跑外界环境变化的缓冲能力,对环境抵抗能力更强<sup>[36]</sup>。

### 3.5 不同耕作处理对小麦根系生长的影响

王群等<sup>[37]</sup>研究认为土壤物理性状对作物根系时空分布及活力都有较大影响,本研究表明,与连续 4 年旋耕相比,两种轮耕处理能够有效提高冬小麦生育中、后期 20—40 cm 根重密度及根系活力,这不仅扩大了根系的吸收范围,而且能够延缓根系衰老,提高作物抗旱能力。这与前人研究结果一致,其中韩宾<sup>[38]</sup>等研究认为,连续免耕造成亚表层土壤容重接近阈值,严重阻碍了根系正常下扎,而耕翻 1 年、免耕 2 年的周期轮换模式,能促进根系下扎。这有可能是由于免耕与翻耕、深松轮耕使土壤容重减小、紧实度降低,有效改善了耕层团聚体含量与稳定性<sup>[39]</sup>,增强了土壤的蓄水保墒能力<sup>[31]</sup>,使得根系生长处于适宜的环境<sup>[40, 41]</sup>。

孔凡磊研究认为,免耕与深松的轮耕模式改善了土壤的孔隙状况,播种前土壤水分较高,有利于根系生长,形成了适宜小麦生长发育的种床,促进了冬小麦籽粒的萌发和生长发育,有效穗数和穗粒数显著增加,小麦平均产量较单一耕作显著增加了 12%<sup>[23]</sup>。李涛研究表明,免耕与翻耕轮耕处理增强了土壤通透性,有利于根系下扎和吸收深层土壤水分,小麦根系发达,叶面积系数大,干物质积累较多<sup>[42]</sup>。

可见,与连年旋耕相比,免耕结合翻耕、深松的轮耕处理能有效改善土壤物理状况,促进根系生长发育,改善作物根系数量、活性以及分布状况,对提高冬小麦地上部生长发育和产量具有一定效果<sup>[43]</sup>。

## 4 结论

通过 4a 定位试验表明,免耕与翻耕、深松的轮耕处理与连年旋耕处理相比,可有效小降低 0—10、10—20 cm 土壤容重,改善土壤紧实状况,且改善效果在冬小麦整个生育期均有体现;与两种轮耕处理相比,连年旋耕处理 0—10、10—20 cm 土壤容重、紧实度的变异系数较大,紧实度与含水量呈现显著负相关,且根系密度和活力较差,这表明关中地区连年旋耕土壤物理性状较差,不利与作物根系生长,而适时采用免耕结合传统耕作(翻耕、深松)的轮耕模式有利于改善土壤物理性状,促进冬小麦根系生长,能在一定程度上提高农作物产量。本文初步研究了关中旱地麦玉两熟区长期旋耕土壤轮耕的物理效应及根系生长效应,以为为进一步研究土壤轮耕提供参考。

## 参考文献 (References):

- [ 1 ] Zuazo V H D, Pleguezuelo C R R, Flanagan D, Tejero I G, Fernández J L M. Sustainable land use and agricultural soil // Lichtfouse E. Alternative Farming Systems, Biotechnology, Drought Stress and Ecological Fertilisation. City: Springer Netherlands, 2011, 6: 107-192.
- [ 2 ] 李潮海, 李胜利, 王群, 郝四平, 韩锦峰. 下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响. 中国农业科学, 2005, 38(8): 1706-1711.
- [ 3 ] 薛少平, 朱瑞祥, 杨青, 韩思民, 韩文霆. 旱地冬小麦自然降水机械化高效生产技术研究. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2006, 34(1): 1-8.
- [ 4 ] 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.
- [ 5 ] 彭文英, 张雅彬. 免耕对粮食产量及经济效益的影响评述. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4): 113-118.
- [ 6 ] 孙国峰, 陈阜, 肖小平, 伍芬琳, 张海林. 轮耕对土壤物理性状及水稻产量影响的初步研究. 农业工程学报, 2007, 23(12): 109-113.
- [ 7 ] 张桃林, 李忠胤, 王兴祥. 高度集约农业利用导致的土壤退化及其生态环境效应. 土壤学报, 2006, 43(5): 843-850.
- [ 8 ] 李素娟, 陈继康, 陈阜, 李琳, 张海林. 华北平原免耕冬小麦生长发育特征研究. 作物学报, 2008, 34(2): 290-296.
- [ 9 ] Bhattacharyya R, Prakash V, Kundu S, Gupta H S. Effect of tillage and crop rotations on pore size distribution and soil hydraulic conductivity in sandy clay loam soil of the Indian Himalayas. Soil and Tillage Research, 2006, 86(2): 129-140.
- [ 10 ] 王改玲, 郝明德, 许继光, 洪竖平. 保护性耕作对黄土高原南部地区小麦产量及土壤理化性质的影响. 植物营养与肥料学报, 2011, 17(3): 539-544.
- [ 11 ] 张国盛, Chan K Y, Li G D, Heenan D P. 长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响. 生态学报, 2008, 28(6): 2722-2728.
- [ 12 ] 陈浩, 李洪文, 高焕文, 王晓燕, 何进, 李问盈, 王庆杰. 多年固定道保护性耕作对土壤结构的影响. 农业工程学报, 2008, 24(11): 122-125.
- [ 13 ] Franzluebbers A J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. Soil and Tillage Research, 2002, 66(2): 95-106.
- [ 14 ] 焦彩强, 王益权, 刘军, 赵加瑞, 宋晓燕. 关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析. 干旱地区农业研究, 2009, 27(3): 7-12.
- [ 15 ] Gozubuyuk Z, Sahin U, Ozturk I, Celik A, Adiguzel M C. Tillage effects on certain physical and hydraulic properties of a loamy soil under a crop rotation in a semi-arid region with a cool climate. CATENA, 2014, 118: 195-205.
- [ 16 ] 侯贤清, 李荣, 韩清芳, 贾志宽, 王维. 轮耕对宁南旱区土壤理化性状和旱地小麦产量的影响. 土壤学报, 2012, 49(3): 592-600.
- [ 17 ] 王金贵, 王益权, 徐海, 冯小龙, 李建波, 王永健, 夏发生. 农田土壤紧实度和容重空间变异性研究. 土壤通报, 2012, 43(3): 594-598.
- [ 18 ] 张育林, 王益权, 胡海燕, 孙蕾, 徐海. 陕西关中地区农田土壤物理状态初探. 干旱地区农业研究, 2011, 29(1): 75-79, 101-101.
- [ 19 ] 刘爽, 何文清, 严昌荣, 刘勤. 不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(2): 65-70.
- [ 20 ] 刘绪军, 荣建东. 深松耕法对土壤结构性能的影响. 水土保持应用技术, 2009, (1): 9-11.
- [ 21 ] 姜桂英, 黄绍敏, 郭斗斗. 不同耕作和轮作方式下作物生育期内土壤酶活性的动态变化特征. 河南农业大学学报, 2009, 43(3): 335-342.
- [ 23 ] 孔凡磊, 陈阜, 张海林, 黄光辉. 轮耕对土壤物理性状和冬小麦产量的影响. 农业工程学报, 2010, 26(8): 150-153.
- [ 24 ] 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. 土壤通报, 2011, 42(1): 81-85.
- [ 25 ] Spaccini R, Piccolo A. Effects of field managements for soil organic matter stabilization on water-stable aggregate distribution and aggregate stability in three agricultural soils. Journal of Geochemical Exploration, 2013, 129: 45-51.
- [ 26 ] Cavalieri K M V, Da Silva A P, Tormena C A, Leão T P, Dexter A R, Håkansson I. Long-term effects of no-tillage on dynamic soil physical properties in a Rhodic Ferrasol in Paraná, Brazil. Soil and Tillage Research, 2009, 103(1): 158-164.
- [ 27 ] Singh A, Phogat V K, Dahiya R, Batra S D. Impact of long-term zero till wheat on soil physical properties and wheat productivity under rice - wheat cropping system. Soil and Tillage Research, 2014, 140: 98-105.
- [ 28 ] 蒋向, 贺德先, 任洪志, 刘清瑞, 胡敏. 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.
- [ 29 ] 高建华, 张承中. 不同保护性耕作措施对黄土高原旱作农田土壤物理结构的影响. 干旱地区农业研究, 2010, 28(4): 192-196.
- [ 30 ] 梁淑敏, 谢瑞芝, 李朝苏, 杨锦忠, 汤永禄, 吴春, 王灵便, 李少昆. 成都平原不同耕作模式的农田效应研究——II. 土壤综合质量评价. 中国农业科学, 2011, 44(4): 738-744.
- [ 31 ] 秦红灵, 高旺盛, 马月存, 马丽, 尹春梅. 两年免耕后深松对土壤水分的影响. 中国农业科学, 2008, 41(1): 78-85.
- [ 32 ] Thierfelder C, Mwila M, Rusinamhodzi L. Conservation agriculture in eastern and southern provinces of Zambia; Long-term effects on soil quality and maize productivity. Soil and Tillage Research, 2013, 126: 246-258.
- [ 33 ] Plaza C, Courtier-Murias D, Fernández J M, Polo A, Simpson A J. Physical, chemical, and biochemical mechanisms of soil organic matter

- stabilization under conservation tillage systems: A central role for microbes and microbial by-products in C sequestration. *Soil Biology and Biochemistry*, 2013, 57: 124-134.
- [34] Hoefer G, Hartge K H. Subsoil compaction: cause, impact, detection, and prevention. // Dedousis A P, Bartzanas T. *Soil Engineering*. Berlin Heidelberg: Springer, 2010: 121-145.
- [35] Osunbitan J A, Oyedele D J, Adekalu K O. Tillage effects on bulk density, hydraulic conductivity and strength of a loamy sand soil in southwestern Nigeria. *Soil and Tillage Research*, 2005, 82(1): 57-64.
- [36] Chen H, Billen N, Stahr K, Kuzyakov Y. Effects of nitrogen and intensive mixing on decomposition of <sup>14</sup>C-labelled maize (*Zea mays* L) residue in soils of different land use types. *Soil and Tillage Research*, 2007, 96(1-2): 114-123.
- [37] 王群, 李潮海, 李全忠, 薛帅. 紧实胁迫对不同类型土壤玉米根系时空分布及活力的影响. *中国农业科学*, 2011, 40(10): 2039-2050.
- [38] 韩宾, 李增嘉, 王芸, 宁堂原, 郑延海, 史忠强. 土壤耕作及秸秆还田对冬小麦生长状况及产量的影响. *农业工程学报*, 2007, 23(2): 48-52.
- [39] 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. *中国农业科学*, 2013, 46(18): 3800-3808.
- [40] 高飞, 贾志宽, 路文涛, 韩清芳, 杨宝平, 侯贤清. 秸秆不同还田量对宁南旱区土壤水分、玉米生长及光合特性的影响. *生态学报*, 2011, 31(3): 777-783.
- [41] 李荣, 侯贤清, 贾志宽, 韩清芳, 王敏, 杨宝平, 丁瑞霞, 王俊鹏. 沟垄全覆盖种植方式对旱地玉米生长及水分利用效率的影响. *生态学报*, 2013, 33(7): 2282-2291.
- [42] 李涛, 李金铭, 赵景辉, 常志斌. 深耕对小麦发育及节水效果影响的研究. *山东农业科学*, 2003, (3): 18-20.
- [43] 王法宏, 任德昌, 王旭清, 曹宏鑫, 余松烈, 于振文. 施肥对小麦根系活性、延缓旗叶衰老及产量的效应. *麦类作物学报*, 2001, 21(3): 51-54.