

关中农田土壤剖面的主要物理性态研究

祝飞华,王益权,胡卫光,张润霞,冉艳玲

(西北农林科技大学 资源环境学院, 陕西 杨凌 712100)

摘 要: 为了探明现代长期集约化生产和耕作管理模式下土壤物理状态的变化特征,对关中地区农田 0~60 cm 剖面范围内的土壤物理特性进行了研究。结果显示:(1) 土壤剖面容重呈现先增大后减小的变化趋势,表层 0~10 cm 土壤容重最小,为 $1.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,20~40 cm 土层容重高达 $1.67\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$,达到了制约根系延伸的极限容重;(2) 土壤紧实度随着剖面深度增加逐渐增大,0~15 cm、15~25 cm、25~45 cm 土层范围内的平均值分别为 482 kPa、1 647 kPa、2 268 kPa;(3) 土壤饱和导水率随着土层深度增加而逐渐减小,其中 0~10 cm 土层的饱和导水率最高,平均为 $0.968\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$,且各土层之间的差异达到显著水平。研究表明只有 0~10 cm 土层土壤结构性较好,而 10 cm 以下土壤的物理状态具有明显的退化趋势,制约着作物根系的延伸、气体交换和水分入渗,应予以足够的重视。

关键词: 容重;紧实度;饱和导水率;关中;农田土壤

中图分类号: S152.2 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)04-0145-06

Physical properties in soil profile of farmlands in Central Shaanxi

ZHU Fei-hua, WANG Yi-quan, HU Wei-guang, ZHANG Run-xia, RAN Yan-ling

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

Abstract: In order to reveal the effects of intensive production and cultivation model on the variation of soil quality, the physical properties were determined in 0~60 cm soil profile of farmlands in Central Shaanxi. The results showed: (1) The bulk density in 0~60 cm soil profile showed an initial increase followed by a steady decrease with the increase of depth. The bulk density was lowest in 0~10 cm layer (a mean of $1.34\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$) and highest in 20~40 cm layer ($1.67\text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$). (2) The compactness in 0~60 cm soil profile increased with the increase of depth, and the average compactness in 0~15 cm, 15~25 cm and 25~45 cm layers was 482 kPa, 1 647 kPa and 2 268 kPa, respectively. (3) The saturated hydraulic conductivity (Ksat) showed a sharp decrease with the increase of soil depth, and the highest Ksat was $0.968\text{ mm}\cdot\text{min}^{-1}$ in 0~10 cm layer. There was a statistically significant difference in Ksat among soil layers. In conclusion, the soil structure was relatively ideal only in 0~10 cm layer, and the subsurface layers were universally degenerated, which limited severely root extension, gas exchange and water infiltration. Therefore, great attentions should be paid to the improvement of soil physical properties.

Keywords: bulk density; compactness; saturated hydraulic conductivity; Central Shaanxi; farmland soil

随着人口的不断增长和土地面积的锐减,关中地区和全国其它区域一样,土地的集约化经营与使用程度都在不断提高,显著增加了土壤物理质量退化的风险^[1]。导致该地区虽然土层深厚,但土体却不再疏松,土壤剖面的物理质量退化已经成为一个不容忽视的问题,其集中体现在土壤对环境的协调能力逐渐减弱,作物生长对水肥供给的依赖程度逐渐提高等方面,这将严重制约农业生产。因此探明

现代土地利用管理模式下土壤剖面物理状态以及演化态势对于农业可持续发展具有重要意义^[2]。

集约化生产模式所产生的危害性在国内外已经得到了普遍共识,主要表现为农业生产成本逐年增加,土壤养分利用率低等问题。对此国内外学者开展了卓有成效的研究,主要集中在提高农田养分利用效率与管理措施^[3-4]、培育作物新品种^[5]和开发农田病虫害防治技术^[6]等方面,以期通过研究不同

收稿日期:2013-10-05
基金项目:农业部农村能源综合建设项目(1251005507);陕西省农业厅项目(k332021312)
作者简介:祝飞华(1989—),男,江西鹰潭人,硕士研究生,主要从事土壤物理方面的研究。E-mail: zhufeihua090424@163.com。
通信作者:王益权(1957—),男,陕西旬邑人,博士,教授,主要从事土壤物理与改良方面的研究。E-mail: Soilphysics@163.com。

作物类型和不同管理模式下养分的输入、输出状况,寻求高效的农田生产管理措施。而上述一系列问题的实质是土壤质量退化,尤其是土壤物理状态的退化,因为良好的土壤物理状态能够协调养分、水分、空气、热量的循环和供应,维持根系的各项生理功能,提高养分与水分的利用率,同时增加了作物地境的稳定性,提高作物对环境的协调能力等^[7-8]。孙利军^[9]、刘继龙^[10]等研究了不同耕作模式对土壤饱和和导水率的影响;Chen^[11]、李志洪^[12]等研究了土壤容重对土壤理化性质以及作物生长的影响;然而上述有关土壤物理性质的研究大多数集中在土壤表层,对下层土壤的物理性质研究较少,且李潮海^[13]、Cairns^[14]、Grzesiak^[15]等认为下层土壤物理性质对作物的影响远大于表层。因此,探究亚表层土壤物理状态更具有实际意义,揭示土壤剖面的物理性状对于科学调控土壤环境,促进作物高产优质具有重要的意义。

基于上述几个方面,本研究以关中旱地农田土壤为研究对象,探讨集约化生产模式下农田土壤剖面 0~60 cm 范围内容重、紧实度及饱和导水率等物理性质的变异规律,以期掌握该区域土壤质量状况,为寻求合理的农业管理模式及农业可持续发展提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 试验区概况

试验区位于陕西关中西部,地处东经 107°59′~108°09′,北纬 34°14′~34°24′,属于暖温带湿润季风气候区,年平均温度 12.9℃,极端最高气温 42℃,最低气温 -19.4℃,全年无霜期 221 d。年平均降水量 637.6 mm,多集中在 7、8、9、10 四个月,年平均蒸发量 884 mm,土壤类型为塋土(土垫旱耕人为土)。

1.2 样品采集与分析方法

依据该地区土壤剖面构型及作物根系的发育特征,本试验的研究范围仅限于塋土的土垫层(覆盖层)0~60 cm,试验于 2013 年 4 月分别在渭头道塋的岐山、杨凌、兴平 3 个县区的旱地农田进行,在每个县区分别选取 4 个具有代表性的采样小区,所选定的采样小区均采用相同的轮作制度(常年实行冬小麦—夏玉米 1 年两熟制)、耕作模式(旋耕),施肥制度(化肥)。每个小区随机选取 4 个剖面测点,共计采集 48 个剖面点,按照农作物根系的主要活动空间,于每个采样点用镶有 100 cm³ 环刀的原状取土钻,在 0~60 cm 土层范围内从上到下依次按 10 cm 的间距分层采集原状土样,测定土壤容重,及用恒定水头法测定饱和导水率;用 SC-900 型土壤坚实度仪(北京东方安诺生化有限公司生产,精度为 35 kPa),按 2.5 cm 间距现场测定各采样点 0~45 cm 剖面范围内的土壤紧实度,每个采样点重复 3 次。同时分别采集土壤剖面样品,测定土壤基本理化性状(表 1)。土壤机械组成采用吸管法测定,并采用卡钦斯基制进行质地分类;土壤田间持水量采用威尔科斯法,以上土壤物理性质的测定均采用《土壤分析技术指南》^[16]中的有关方法;有机质采用重铬酸钾容量法测定;碳酸钙采用气量法测定,以上土壤化学性质的测定均采用《土壤农化分析》^[17]中的有关方法。依据容重获知土壤孔度,再依据土壤田间持水量计算土壤毛管孔度,从土壤孔度与毛管孔度的差值得到非毛管孔度(通气孔度)^[18]。所有分析数据均为 12 个小区测定的平均值。

1.3 数据处理

数据处理和制图采用 Origin 8.0 和 Excel 2003 软件。

表 1 供试土壤基本性状
Table 1 Properties of tested soil

土层厚度 Depth /cm	颗粒组成/% Particle composition		质地类型 Texture type	有机质 Organic matter /(g·kg ⁻¹)	田间持水量 Field water capacity/%	碳酸钙 CaCO ₃ /(g·kg ⁻¹)
	0.01~1 mm	<0.01 mm				
0~10	44.61±0.71 a	55.39±0.71 b	重壤土 Heavy loam	23.22±4.67 c	21.81±1.24 b	98±10 a
10~20	45.35±0.48 a	54.65±0.48 b		14.16±3.56 b	19.82±1.08 ab	104±11 b
20~30	45.21±0.43 a	54.79±0.43 b		12.32±2.78 b	19.16±1.56 ab	106±13 b
30~40	47.99±0.89 b	53.01±1.07 a		8.07±1.76 a	18.15±1.01 a	97±9 a
40~50	48.74±0.49 b	51.26±0.49 a		7.49±1.87 a	18.27±0.98 a	84±12 a
50~60	49.04±0.47 b	50.96±0.47 a		7.89±1.38 a	18.96±1.14 ab	61±13 a

注:不同小写字母表示不同土壤深度各项指标差异显著(P<0.05)。下同。
Note: Different lowercase letter stand for significance at P<0.05 among different soil layers. The same below.

2 结果与分析

2.1 农田土壤剖面容重及孔隙状况

土壤容重、孔隙度是反映土壤物理性状的主要指标,也是表征土壤质量的重要参数,它直接影响着土壤水肥供应、通气状况及作物根系穿透阻力等^[19]。近年来,关中地区土壤耕作管理的对象依然在土壤表层,长期实行旋耕制度,土壤对水肥的依赖程度越来越高、生产成本逐年增加等问题极为普遍。基于上述事实,于小麦拔节期对关中地区根区范围内土壤容重和孔隙特性进行了研究。图 1 和图 2 分别为容重和孔隙度的剖面变异情况,从中可以看出,作物根区 0~60 cm 范围内容重普遍偏大,介于 1.32~1.69 g·cm⁻³之间,整体呈现出先增大后减小的变化趋势。其中表层 0~10 cm 的平均容重最低,为 1.34 g·cm⁻³,显著低于其它土层,而 20~40 cm 土层的平均容重达到最大值,为 1.67 g·cm⁻³,显著高于其它土层。10~20 cm 和 40~50 cm 土层容重分别达到 1.55 g·cm⁻³和 1.58 g·cm⁻³,二者之间无明显差异,但都显著高于 50~60 cm 土层。土壤容重对作物生长的影响程度与质地类别有很大关系,对于轻壤质土到轻粘土范围内,适宜作物生长的最佳容重应当在 1.00~1.30 g·cm⁻³,极限容重为 1.60 g·cm⁻³^[20]。现国内外学者在土壤容重方面的研究较为深入,李潮海^[21]认为作物最适耕层容重为 1.2~1.3 g·cm⁻³,De Neve^[22]研究表明作物根系正常生长的土壤临界值的容重为 1.5 g·cm⁻³,同时 Acuna 认为 1.8 g·cm⁻³的土壤容重对玉米的根系生长是一个阈值^[23]。

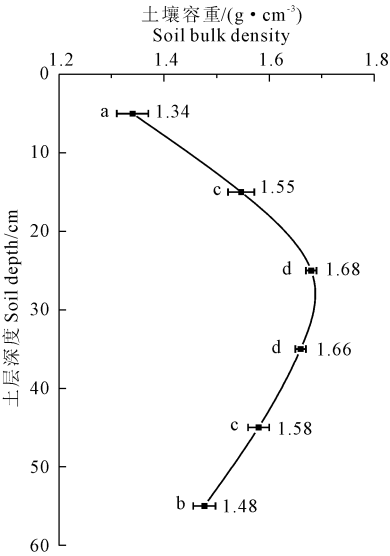


图 1 农田土壤剖面容重的变化

Fig.1 Variation of bulk density in soil profile

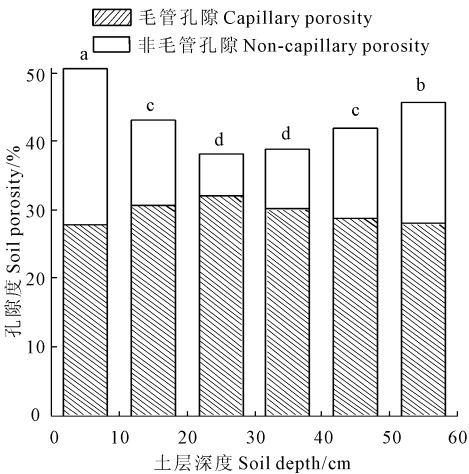


图 2 农田土壤剖面孔隙状况

Fig.2 State of porosity in soil profile

已有资料表明,物理状态良好的土壤总孔隙度应在 50%左右,其中非毛细孔隙(通气孔隙)占1/5~2/5时的土壤持水性和通气性才较好^[14]。从图 2 可知,关中农田土壤在 20~40 cm 土层范围内孔隙度才达到 38.6%,其中毛细孔隙占 31.2%,而非毛细孔隙仅占 7.4%。多数研究表明,当通气孔隙 < 10%时,会对作物生长造成不利影响^[24]。

综上所述,长期集约化生产与现代耕作管理模式下,关中地区农田只有表层 0~10 cm 的土壤容重和孔隙状况相对较好,基本符合作物根系生长需求;而 20~40 cm 土层的容重达到最大,土壤最为密实,且毛细孔隙与非毛细孔隙比例不协调,多以小孔隙为主,土壤通透性较差,将严重影响作物生长。这主要是由于该地区常年实行的旋耕制度和作物类型单一所造成的,旋耕措施对改善表层土壤容重和孔隙状况具有良好效果,这与刘爽^[25]、张国盛^[26]等研究结果相一致,而旋耕措施对亚表层土壤作用效果不明显^[27],由于长时间得不到深松,下层土壤越来越密实,加上作物类型相对单一,根系分布和下扎深度较一致,减弱了对土壤的穿透力,进一步加剧了土壤的密实度^[28];同时由于化肥的施用量逐年增加,下层土壤有机质得不到补给,有机质所胶结的团聚体减少,土壤孔隙状况得不到改善,造成亚表层土壤容重较大^[29],对作物根系生长和养分吸收产生较大影响,这将增加了作物对环境的敏感性,不利于农业生产。

2.2 农田作物根区土壤紧实度的变化趋势

土壤紧实是影响农田土壤质量和作物生长的关键障碍因子之一,是当前土壤功能及农田生态健康研究领域的重点^[30]。紧实导致土壤颗粒的重新排

列,最为直接的影响就是降低了孔隙度,改变了作物生长的最适三相比^[31]。土壤过度紧实将会阻碍根系正常伸长、影响根系形态、新陈代谢和其他生理功能,因此了解农田土壤紧实状况的剖面变化规律,对于建立及时有效的农业管理制度具有重要意义和科学价值。图 3 为小麦拔节期间关中农田土壤剖面紧实度的变化状况,从图中可以看出在 0~15 cm 处土壤紧实度变化范围为 115~963 kPa,平均值为 482 kPa,15~25 cm 范围内土壤紧实度急剧增加,增加幅度约为 1 000 kPa,平均值为 1 647 kPa。25~45 cm 土层紧实度基本维持稳定,但是达到了测定范围内的最大值,平均为 2 268 kPa。Bengough^[32]认为当土壤紧实度超过 1 000 kPa 时,作物生长将受到机械胁迫的作用,根系生长明显变缓;Saqib^[33]进一步研究发现 10 cm 以下壤质土的紧实度达到 1 000 kPa 时,小麦根长减少了 19%~36%,根长与紧实度呈显著负相关;同时 Marsili、Materechera^[34-35]等认为土壤紧实度达到 2 000 kPa 时将严重影响作物生长,当阻力达到 3 600 kPa 时,作物根系生长完全停滞。从上可以看出 0~15 cm 土层紧实度小于 1000 kPa,相对其它土层较为疏松,对作物生长影响不大。而 15~25 cm 紧实度的平均值已经超过 1 000 kPa,比表层 0~15 cm 土层的 3 倍还多,受到紧实胁迫使作物根系生长受阻。25~45 cm 土层的平均紧实度已经超过 2 000 kPa,虽然没有达到完全抑制作物根系生长的水平,但也将严重影响作物生长。

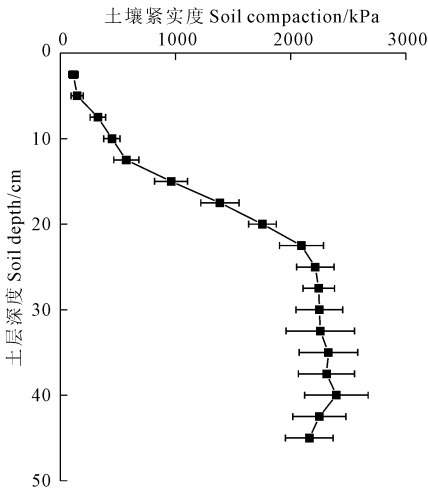


图 3 农田土壤剖面紧实度的变化

Fig.3 Variation of compaction in soil profile

集约化生产模式下,关中农田土壤紧实度的剖面特征为上松下紧,这足见土地管理制度对土壤物理性质有着显著和深刻的影响^[36]。可以看出,旋耕能使表层土壤疏松,增加扩散率,但同时也能使耕区

以下形成坚硬的紧实层。石彦琴^[30]研究发现随着耕作年限的增加,心土层紧实状况也变的更加严重,其紧实层厚度可达 30~60 cm,同时由于常年大量使用化肥,致使土壤胶体的调控机能严重受损,土壤抗逆性降低,再加上单一种植使根系周围离子平衡被打破,从而影响团粒结构体的形成,上层粘粒向下移动,造成下层土壤板结^[28],亚表层土壤紧实化。

2.3 农田土壤饱和和导水率的剖面变化规律和影响因素

土壤饱和和导水率是土壤重要的物理性质之一^[37],图 4 为关中农田 0~60 cm 剖面范围内土壤饱和和导水率的变化特征。从图中可以看出,随着土层深度的增加,饱和和导水率呈现逐渐减小的趋势,其中 0~30 cm 范围内饱和和导水率的减小趋势达到极显著水平,在 30~60 cm 范围内基本维持稳定,平均值为 0.071 mm·min⁻¹,处于极低水平。0~10 cm 土层的饱和和导水率达到最大值,为 0.968 mm·min⁻¹,其大小分别是 10~20、20~30、30~40、40~50、50~60 cm 土层的 4、10、12、13、15 倍。可以看出 20 cm 以下土壤的导水性能极显著受到抑制,这与 Blanco - Canqui 等^[38]的研究结果相一致,认为长期高强度的利用和单一耕作管理模式加速下层土壤物理性质的退化速度,导致 20~80 cm 土层范围内的导水率均显著低于表层土壤,这将导致雨水、灌溉水不能有效地补给下层土壤,造成地表径流和水分、养分的流失。

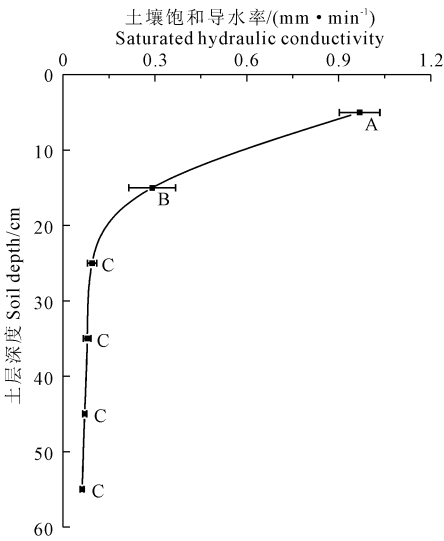


图 4 农田土壤剖面饱和和导水率的变化

Fig.4 Variation of saturated hydraulic conductivity in soil profile

注:不同字母表示 1% 水平极显著差异。

Note: Different letters are significantly different at 1% level.

土壤的导水性能不仅决定于质地类型、有机质

含量等内因,更受人为利用及管理水平的影响^[39]。图5为0~60 cm剖面范围内土壤粘粒分布图,作为黄土堆垫覆盖的土层,从发生学上讲其上下土层粘粒含量应具有基本一致的特征,然而,从图5看出,关中土壤0~60 cm的粘粒(<0.001 mm)有着明显的向下迁移趋势即淀积粘化作用明显,从0~10 cm的16.28%增加到50~60 cm的23.47%,这与导水率的剖面变化趋势正好相反,二者相关系数 r 为-8.34,为显著负相关。这也再次佐证前人的研究结果,认为农田土壤由于频繁扰动和压实以及地面保护条件较差,导致土壤黏粒向深层移动^[40-41],堵塞下层土壤孔隙,严重影响土壤水分纵向传导。在一定范围内,土壤水分含量与紧实度呈显著负相关^[42],由于亚表层土壤导水性能减弱,使得原本较为紧实的土壤变得更为坚硬,在作物生长期,作物根系大多数时候都将遭受干燥和紧实双重胁迫,最终表现在对水、肥的依赖性增强,对环境协调能力的减弱。

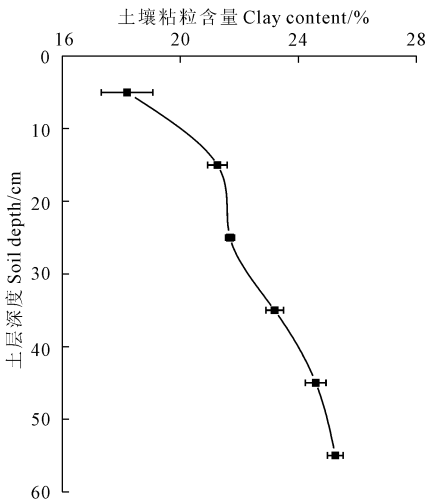


图5 农田土壤剖面粘粒(<0.001 mm)含量的变化
Fig.5 Variation of clay content in soil profile

前人有关塿土物理性质的研究成果也颇为丰富,多数研究认为亚表层土壤容重处于1.23~1.51 g·cm⁻³之间,其对作物生长影响较小,这明显小于本研究的测定值^[43-44]。同时近年有关塿土物理性质的研究结果与本研究较为一致,其中庞奖励等^[45]对塿土的剖面构造空间变异进行了综合分析和对比,发现亚表层土壤孔隙较少,土壤相对密实;张育林等^[46]研究发现,关中塿土亚表层平均容重为1.60 g·cm⁻³,达到很紧实以上水平的土壤样品数占到96%。综上所述,当前农田亚表层土壤物理状态存在明显的退化趋势,隐蔽性较强,应予以足够的重视。

3 结 论

土壤物理性质退化是土壤本身性状、长期管理与利用过程共同作用产生的结果。本试验从土壤容重、紧实度和饱和导水率三个方面研究了长期集约化生产和单一耕作管理模式该农田土壤剖面的主要物理性状及变异特征,研究发现,在0~60 cm剖面范围内,土壤物理性状在垂直方向上存在着巨大的差异性。农田土壤仅在表层0~10 cm范围内维持着对作物生长无明显物理障碍的状态,其土壤紧实度和结构状况良好,适合农作物生长;而亚表层土壤物理质量相对较差,其容重和紧实度急剧增大,饱和导水率显著减小,土壤持水透气性较差,这将导致作物根系遭受干燥和紧实双重胁迫。由此可见,在集约化生产水平不断增加的情况下,亚表层土壤物理状态有着明显的退化趋势,而且隐蔽性很强,应给予足够的重视。

参 考 文 献:

[1] Pires L F, Borges J A R, Bacchi O O S, et al. Twenty-five years of computed tomography in soil physics: A literature review of the Brazilian contribution[J]. Soil and Tillage Research, 2010, 110(2): 197-210.

[2] Blum W H. Physical Degradation of Soils, Risks and Threats[M]. Berlin: Springer Netherlands. 2011:562-563.

[3] Fan S, Liu C, Yu D, et al. Differences in leaf nitrogen content, photosynthesis, and resource - use efficiency between Eichhornia crassipes and a native plant Monochoria vaginalis in response to altered sediment nutrient levels[J]. Hydrobiologia, 2013, 711(1): 129-137.

[4] 战秀梅,李秀龙,韩晓日,等.深耕及秸秆还田对春玉米产量、花后碳氮积累及根系特征的影响[J].生态学报,2012,43(3):461-466.

[5] Haileslassie A, Blmmel M, Wain S P, et al. Extractable soil nutrient effects on feed quality traits of crop residues in the semiarid rainfed mixed crop livestock farming systems of Southern India[J]. Environ Dev Sustain, 2013, 15(3): 723-741.

[6] 张京,宋坚利,何雄奎,等.“II”型循环喷雾机防飘性能试验[J].农业机械学报,2012,43(4):37-39,125.

[7] Zuazo V, Pleguezuelo C, Flanagan D, et al. Sustainable Land Use and Agricultural Soil[M]. Berlin: Springer Netherlands, 2011: 107-192.

[8] Shierlaw J, Alston A M. Effect of soil compaction on root growth and uptake of phosphorus[J]. Plant and Soil, 1984, 77(1): 15-28.

[9] 孙利军,张仁陟,黄高宝.保护性耕作对黄土高原旱地地表土壤理化性状的影响[J].干旱地区农业研究,2007,25(6):207-211.

[10] 刘继龙,张振华,谢恒星,等.烟台棕壤土饱和导水率的初步研究[J].农业工程学报,2007,122(11):129-132.

[11] Guihua C, Ray R W. Root growth and yield of maize as affected by soil compaction and cover crops[J]. Soil and Tillage Research, 2011, 117(12): 17-27.

[12] 李志洪,王淑华.土壤容重对土壤物理性状和小麦生长的影响[J].土壤通报,2000,31(2):55-57.

[13] 李潮海,李胜利,王 群,等.下层土壤容重对玉米根系生长及吸收活力的影响[J].中国农业科学,2005,38(8):1706-1711.

[14] Cairns J E, Impa S M, O'Toole J C, et al. Influence of the soil physical environment on rice (*Oryza sativa* L.) response to drought stress and its implications for drought research[J]. Field Crops Research, 2011, 121(3):303-310.

[15] Grzesiak S, Grzesiak M T, Hura T, et al. Changes in root system structure, leaf water potential and gas exchange of maize and triticale seedlings affected by soil compaction[J]. Environmental and Experimental Botany, 2013, 88(0):2-10.

[16] 郑必昭.土壤分析技术指南[M].北京:中国农业出版社,2013:37-61.

[17] 鲍士旦.土壤农化分析[M].(第三版).北京:中国农业出版社,2000:56-106.

[18] 王 钰,杨少杰.贵州喀斯特峡谷地区花椒林地土壤物理性质研究[J].中国水土保持,2007,(11):48-49.

[19] 李庆梅,侯龙鱼,刘 艳,等.黄河三角洲盐碱地不同利用方式土壤理化性质[J].中国生态农业学报,2009,17(6):1132-1136.

[20] Шенин Е. В., Гоняров В. М. Агрофизика [М]. Высшее образование, 2006:386-388.

[21] 李潮海,梅沛沛,王 群,等.下层土壤容重对玉米植株养分吸收和分配的影响[J].中国农业科学, 2007,40(07):1371-1378.

[22] DE Neve S, Hofman G. Influence of soil compaction on carbon and nitrogen mineralization of soil organic matter and crop residues[J]. Biology and Fertility of Soils, 2000,30(5-6):544-549.

[23] Acuat L B, He X, Wade L J. Temporal variation in root penetration ability of wheat genotypes through thin wax layers in contrasting water regimes and in the field[J]. Field Crops Research, 2012, 138(0):1-10.

[24] 杨晓娟,李春俭.机械压实对土壤质量、作物生长、土壤生物及环境的影响[J]. 中国农业科学,2008,41(07):2008-2015.

[25] 刘 爽,何文清,严昌荣,等.不同耕作措施对旱地农田土壤物理特性的影响[J].干旱地区农业研究,2010,28(2):65-70.

[26] 张国盛,Chan K Y, LI G D,等.长期保护性耕种方式对农田表层土壤性质的影响[J].生态学报,2008,(6):2722-2728.

[27] 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.

[28] Dejong - Hughes J, Moncrief J F, Voorhees W B, et al. Soil compaction cause, effects and control [EB/OL]. [2009 - 12 - 12]. <http://www.extension.umn.edu/distribution/cropsystems/DC3115.html>.

[29] 曹国栋,陈接华,夏 军,等.玛纳斯河流域扇缘带不同植被类型下土壤物理性质[J].生态学报,2013,33(1):195-204.

[30] 石彦琴,陈源泉,隋 鹏,等.农田土壤紧实的发生、影响及其改良[J].生态学杂志,2010,29(10):2057-2064.

[31] Gentos T A, Lellis T. Effects of soil compaction, water and organic matter contents on emergence and initial plant growth of cotton and sugar beet[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1997, 66(2):121-134.

[32] Bengough A G. Modelling rooting depth and soil strength in a drying soil profile[J]. Journal of Theoretical Biology, 1997, 186(3):327-338.

[33] Saqib M, Akhtar J, Qureshi R H. Pot study on wheat growth in saline and waterlogged compacted soil: II. Root growth and leaf ionic relations[J]. Soil and Tillage Research, 2004,77(2):179-187.

[34] Marsili A, Servadio P, Pagliai M, et al. Changes of some physical properties of a clay soil following passage of rubber- and metal-tracked tractors[J]. Soil and Tillage Research, 1998,49(3):185-199.

[35] Materecher A S A, Dexter A R, Alston A M. Penetration of very strong soils by seedling roots of different plant species[J]. Plant and Soil, 1991,135(1):31-41.

[36] 赵锦梅,张德罡,刘长仲,等.祁连山东段高寒地区土地利用方式对土壤性状的影响[J].生态学报,2012,32(2):0548-0556.

[37] 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[J]. Journal of Geochemical Exploration, 2013,129(0):45-51.

[38] Blanco-Canqui H, Cantzer C J, Anderson S H, et al. Grass barrier and vegetative filter strip effectiveness in reducing runoff, sediment, nitrogen, and phosphorus loss[J]. Soil Science Society of America Journal, 2004,68(5):1670-1678.

[39] Amer A M. Effects of water infiltration and storage in cultivated soil on surface irrigation[J]. Agricultural Water Management, 2011,98(5):815-822

[40] Seymour R M. Air entrapment and consolidation occurring with saturated hydraulic conductivity changes with intermittent wetting[J]. Irrigation Science, 2000,20(1):9-14.

[41] 孙 蕾,王益权,张育林,等.种植果树对土壤物理性状的双重效应[J].中国生态农业学报,2011,19(1):19-23.

[42] 焦彩强,王益权,刘 军,等.关中地区耕作方法与土壤紧实度时空变异及其效应分析[J].干旱地区农业研究,2009,27(3):7-12.

[43] 高 宗,刘杏兰,刘存寿,等.长期施肥对关中塬土肥力和作物产量的影响[J].西北农业学报,1992,1(3):65-68.

[44] 高 瑞,吕家珑,田福忠.连续施肥对塬土肥力和产量的影响[J].土壤通报,2006,37(4):824-826.

[45] 庞奖励,黄长春,查小春,等.关中地区塬土诊断层的形成过程及意义探讨[J].中国农业科学,2008,41(4):1064-1072.

[46] 张育林,王益权,胡海燕,等.陕西关中地区农田土壤物理状态初探[J].干旱地区农业研究,2011,29(1):75-79.