

陕西省农田土壤物理障碍评价

石磊¹, 许明祥², 董丽茹², 师晨迪³, 邱宇洁³

(1. 陕西省农业厅土壤肥料工作站, 陕西 西安 710000; 2. 西北农林科技大学水土保持研究所, 陕西 杨凌 712100;

3. 国土资源部退化及未利用地重点实验室, 陕西省土地工程建设集团工程技术部, 陕西 西安 710075)

摘要: 为了探明陕西省农田土壤物理障碍状况, 2013 年在全省选取了 228 个调查点, 对 1100 多块地的农田土壤紧实度进行了调查, 从土层厚度、土壤容重和紧实度几方面评价了农田土壤物理障碍状况。结果表明: (1) 陕西省农田土壤耕层厚度平均为 17.3 cm, 其中陕北地区耕层较薄, 平均为 14.4 cm; 全省犁底层平均厚度接近 20 cm, 其中陕北、关中和陕南犁底层厚度平均为 14.5、18.1 cm 和 20.1 cm。(2) 全省耕层土壤容重平均为 $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 其中陕北耕层土壤容重平均为 $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 容重偏大; 全省犁底层土壤容重平均为 $1.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$, 陕北、关中和陕南地区犁底层容重都明显偏大, 影响作物根系生长。(3) 陕西省农田耕层土壤紧实度平均为 781 kPa, 犁底层紧实度平均为 2901 kPa。全省耕层土壤紧实度尚合适, 但犁底层土壤紧实度过大, 形成明显的障碍层。

关键词: 农田土壤; 物理障碍; 耕层; 犁底层; 紧实度; 陕西省

中图分类号: S152.5 **文献标志码:** A

Evaluation of soil physical obstacles on cropland in Shaanxi Province

SHI Lei¹, XU Ming-xiang², DONG Li-ru², SHI Chen-di¹, QIU Yu-jie¹

(1. Soil and Fertilizer Workstation, Department of Agriculture of Shaanxi Province, Xi'an, Shaanxi 710000, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. Shaanxi Land Engineering Construction Group, Institute of Land Engineering Technology in Shaanxi Province Co., Ltd., Key Laboratory of Degraded and Unused Land Consolidation Engineering, Ministry of Land and Resources, PRC, Xi'an, Shaanxi 710075, China)

Abstract: In order to understand the situation of soil physical obstacles on farmland in Shaanxi Province, a comprehensive investigation of soil layer thickness, soil bulk density and compaction was conducted in 1100 plots from 228 sites over the whole province in 2013. Soil physical obstacles were evaluated based on the indicators mentioned above. The results showed that the average thickness of top soil was 17.3 cm in the whole province, and a thinner value of 14.4 cm was found in northern Shaanxi. The average thickness of plow pan was around 20 cm, and 14.5 cm, 18.1 cm and 20.1 cm were present in northern Shaanxi, Guanzhong and southern Shaanxi, respectively. In addition, the bulk density of topsoil averaged at $1.25 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ in the whole province. However, bulk density in northern Shaanxi Province was $1.35 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ in average. The average bulk density of plow pan was $1.49 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ in the province, which was higher than the threshold value of $1.45 \text{ g}\cdot\text{cm}^{-3}$ and could be an obstacle for crop root growth. Moreover, the average compaction of tillage layer and plow pan in the province was 781 kPa and 2901 kPa, respectively. The compaction of tillage layer was suitable for crop growth; however, the compaction of plow pan was too tight for crops to growth normally.

Keywords: crop land soil; physical obstacles; tillage layer; plow pan; compaction; Shaanxi Province

维持和提高土壤质量是土壤管理的中心任务。随着我国人口和粮食需求的增长, 提高农田土壤质量以保障粮食安全显得尤其重要。土壤物理性状是土壤质量的重要方面, 制约着土壤协调水、肥、气、热的能力。近几十年来随着土地集约化经营和农业机械化的迅速发展, 农作效率得到极大提高, 然而耕作

和经营方式的改变引起了土壤物理质量发生退化^[1-2]。长期机械化耕作以及单一耕作、施肥和种植方式导致我国大部分粮食主产区农田出现明显的影响作物生长的土壤物理障碍, 主要表现在耕层变薄, 犁底层加厚, 土壤紧实度增加, 孔隙度和渗透性降低, 加剧土壤侵蚀, 增加机耕阻力, 作物根系生长

收稿日期: 2015-07-30

基金项目: 科技基础性工作专项“黄土高原生态系统与环境考察”(2014FY210100)

作者简介: 石磊 (1972—), 男, 陕西洋县人, 学士, 主要从事土壤肥料及农田土壤管理工作。E-mail: shilei@163.com。

通信作者: 许明祥 (1972—), 男, 陕西吴起人, 副研究员, 主要从事土壤质量演变与调控研究。E-mail: xumx@nwsuaf.edu.cn。

受阻,土壤环境破坏,导致作物产量降低^[3-6]。

有关土壤紧实障碍相关研究已经开展较多,涉及土壤紧实发生原因及影响因素、紧实度对作物根系生长的影响、土壤紧实的防治措施等方面^[3]。相关研究表明,农业机械、耕作制度和水肥管理是导致农田土壤紧实的重要外因^[1,7],同时,土壤紧实度还受土壤质地、容重和含水量的影响^[1,8-9]。土壤紧实度影响作物根系穿透和生长,阻止水分入渗,降低化肥利用率,进而影响作物产量^[1-3]。但不同作物对土壤紧实的耐受能力有所差别^[7]。

陕西省是一个农业大省,机械化程度较高,农业生产在国民经济中占有重要的地位^[10-11]。有研究发现关中地区农田土壤过紧实问题已呈区域化发生的态势^[1,12]。然而有关陕西省域农田土壤物理障碍状况、土壤紧实度空间分布特征及影响因素等还缺乏研究报道。为此,本文对全省农田土壤耕层和犁底层厚度、容重和紧实度进行了调查,就省域农田土壤物理障碍现状进行了分析评价,以期对陕西省区域土壤耕作管理和农业生产具有一定现实指导意义。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

陕西省位于黄河中游,南北长约 870 km,东西最宽 430 km,全省地势南北高、中间低,自西向东倾斜,南北纵跨近 8 个纬度。以北山、秦岭为界,分为三个自然区——陕北、关中、陕南。陕西省自然条件复杂,气候从南至北跨越北亚热、暖温、中温三个气候带及湿润、半湿润和半干旱三个气候区;土壤种类众多、分布复杂,从北至南,主要的土壤类型有灰钙土、栗钙土、风沙土、黄绵土、黑垆土、瘠土、水稻土等,受气候、土壤及地形等因素制约,陕西省不同区域耕作制度不同,陕北种植制度为一年一熟,以玉米、马铃薯、小杂粮为主要种植作物,关中北部为一年一熟,以小麦、玉米为主;而关中中部与陕南种植制度为一年两熟,关中主要以小麦与玉米进行轮作,陕南除了小麦与玉米外,也种植水稻与油菜。

1.2 样地选取

土壤类型、耕作制度及方法、农田管理措施等差异是土壤障碍形成的重要影响因素^[1,3],为此,考虑到陕西省不同区域气候、土壤类型及耕作制度的差异,调查路线沿省级及以下公路沿线展开,在陕北、关中及陕南主要耕作区均衡分布。调查样点按 10 km 左右的间隔,选择距离主干道路较近、耕地成片、具有代表性的田块设置采测田块,每调查点选典型

田块 4~6 个。全省调查点 228 个(包括 1100 多块样地),其中陕北 44 个点、关中 122 个点、陕南 62 个点(图 1)。

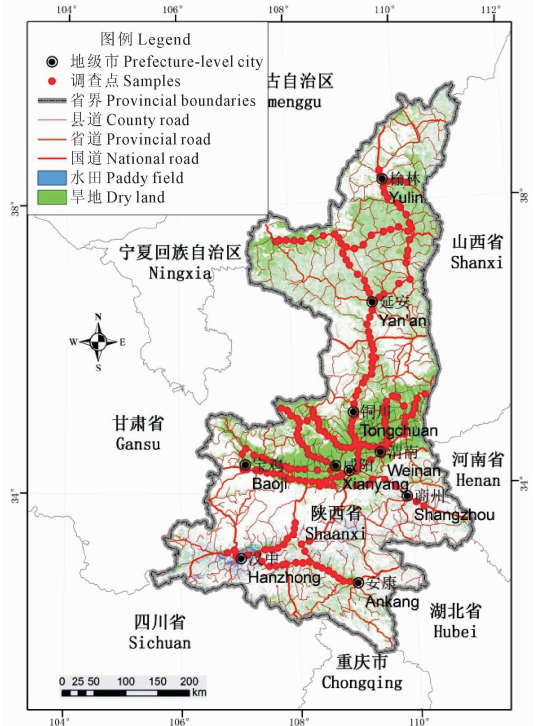


图 1 陕西省农田土壤物理障碍调查点分布图
Fig.1 Survey sites distribution of physical obstacles on farmland soil in Shaanxi Province

1.3 调查指标及方法

调查于 2013 年 11 月中旬至下旬进行。依据设计的调查点,选取代表性田块,在田块中间进行 GPS 定位,记录位置、土壤类型、立地条件,并通过走访调查样地的耕作方式、作物及耕作管理等信息。然后,挖剖面测定耕层和犁底层的厚度和紧实度,并取样测定耕层及犁底层的土壤容重和土壤含水量。其中,耕层和犁底层厚度依据紧实度突变点的位置判定。容重采用环刀法测定,含水量用烘干法测定。紧实度采用 SC900(美国,空间分辨率为 2.5 cm,精确度为 35 kPa)土壤紧实度测定仪(单位 kPa)。

1.4 数据分析

根用 SPSS 18.0 软件对土层厚度及紧实度指标进行描述性统计和分布频率分析。

2 结果与分析

2.1 土层厚度

陕西省耕地土壤中,大于 100 cm 的深厚土层土壤占到 84%,60~100 cm 的厚土层土壤 7.2%,即全省 90% 以上的耕地土层厚度不成为耕地的障碍因

素^[13]。

耕层厚度与耕作方式有关,深耕土壤耕层厚度一般可达 30.0 cm,机械旋耕导致耕层厚度降低,土壤紧实度增加,影响降水入渗,妨碍作物根系下扎,不利于蓄水保墒及根系对深层土壤水分的利用^[1]。调查结果表明(表 1),陕西省农田耕层土壤平均厚度为 17.3 cm,其中陕北最薄,为 14.4 cm,陕北北部的定边、榆阳、横山、子洲、绥德、佳县、清涧、延川等县耕层厚度不足 14.0 cm。关中地区农田耕层较厚,平均为 19.0 cm,其中周至、户县、淳化、宝鸡、长武等县农田耕层厚度大于 30.0 cm。陕南农田耕层居中,平均为 16.0 cm,其中西乡、石泉、汉阴、洋县、城固、旬阳等县耕层不足 14.0 cm。

从分布频率看(表 2),全省耕层较薄的 < 15 cm 的样点占 27.2%,耕层较厚的 > 20 cm 的样点占 32.9%。陕北地区耕层 < 15 cm 的样点占 52.3%,耕层 > 20 cm 的样点仅占 9.1%。关中地区耕层 < 15 cm 的样点占 19.8%,耕层 > 20 cm 的样点达到 49.4%。陕南地区耕层 < 15 cm 的样点占 22.6%,耕层 > 20 cm 的样点占 27.9%。整体而言,全省农田土壤耕层较薄,以陕北地区比较严重,陕南次之,关中地区尚可。

犁底层是位于耕作层以下较为紧实的土层,由于长期耕作经常受到犁的挤压和降水时黏粒随水沉积所致。对耕作土壤来说,具有不太紧实的犁底层对保持养分、保存水分有益。但犁底层过厚、坚实,对作物根系下伸不利。调查表明,陕西省不同区域

农田土壤均存在明显的犁底层,全省土壤犁底层平均厚度接近 20.0 cm。陕北犁底层厚度最小,平均为 14.5 cm,其中陕北北部的榆阳、佳县、绥德等区县调查点未发现犁底层,而定边、甘泉、子洲、清涧等县(区)犁底层厚度超过 25.0 cm。关中次之,平均可达 18.1 cm,但蒲城、富平、眉县、高陵、武功、户县、白水、长武、凤翔、周至、杨凌、扶风等县犁底层厚度超过 25.0 cm。陕南犁底层厚度最大,平均为 20.1 cm,其中石泉、汉阴、西乡县、旬阳、柞水、镇安等县犁底层厚度超过 30.0 cm。从变异性可见,犁底层厚度变异较大,陕南犁底层厚度变异较强($CV = 35\%$),关中和陕北两个区域耕层与犁底层厚度变异性较弱。

农田土壤耕层厚度一般按照 20 cm 计,但未见有关犁底层厚度适宜性分级相关资料。为了量化研究区农田耕层和犁底层厚度分布状况,依据研究区农田耕层和犁底层厚度分布频率,划分了耕层和犁底层厚度分级并统计调查样点在各个级别的分布特征。从分布频率看(表 2),全省犁底层较薄的 < 15 cm 的样点占 19.%,犁底层较厚的 > 20 cm 的样点占 53.5%。陕北地区耕层 < 15 cm 的样点占 38.6%,耕层 > 20 cm 的样点达 54.5%。关中地区耕层 < 15 cm 的样点占 9.9%,耕层 > 20 cm 的样点达到 51.7%。陕南地区耕层 < 15 cm 的样点占 19.4%,耕层 > 20 cm 的样点占 54.8%。整体而言,全省农田土壤犁底层较厚,大于 20 cm 的样点占到调查样点的一半以上,较厚的犁底层可能已经影响到作物正常生长发育。

表 1 陕西省农田耕层和犁底层厚度描述性统计

Table 1 Descriptive statistics related to the thickness of plow layer and plow pan on farmland soil in Shaanxi Province

层次 Layer	区域 Region	样本/个 Samples/No.	均值 Mean /cm	标准误差 SE	95%置信区间 95% confidence		极小值 Minimum /cm	极大值 Maximum /cm	变异系数 Coefficient of variance
					下限/cm Lower limit	上限/cm Upper limit			
耕层 厚度 Thickness of plow layer	陕北 Northern Shaanxi	44	14.4	0.38	13.59	15.11	10	21	17.4
	关中 Guanzhong	122	19.0	0.46	18.13	19.94	12	35	26.4
	陕南 Southern Shaanxi	62	16.0	0.40	15.18	16.79	11	25	19.8
	全省 Whole province	228	17.3	0.30	16.70	17.90	10	35	26.6
犁底层 厚度 Thickness of plow pan	陕北 Northern Shaanxi	44	14.5	1.82	10.86	18.18	0	32	82.9
	关中 Guanzhong	122	18.1	0.42	17.26	18.92	10	32	25.7
	陕南 Southern Shaanxi	62	20.1	0.88	18.35	21.88	10	31	34.5
	全省 Whole province	228	18.0	0.49	16.98	18.92	0	32	41.5

与第二次土壤普查相比,全省农田耕层厚度减少了 2.7 cm,减幅为 14.1%;犁底层厚度增加了 6.4 cm,增幅为 64%(表 3)。就不同区域而言,陕北耕层厚度减少 7.5 cm,减幅为 35.9%,其中分布面积最

大的黄绵土耕层厚度减少 5 cm 以上。陕北地区犁底层厚度增加了 2.1 cm,增幅为 21.6%,其中黄绵土犁底层厚度增加了 6.6 cm。关中地区耕层厚度减少 0.4 cm,其中分布面积最大的褐土耕层厚度减

少 0.7 cm。关中犁底层厚度增加了 8.1 cm,增幅为 80.2%,其中褐土犁底层厚度增加了 8.7 cm。陕南地区耕层厚度减少 1.3 cm,其中分布面积较大的黄棕壤耕层厚度减少 1.5 cm。陕南犁底层厚度增加了 9 cm,增幅为 87.4%,其中黄棕壤和棕壤犁底层

厚度分别增加了 13.1 cm 和 6.8 cm。综上所述,陕南北地区耕层厚度明显减少,犁底层厚度也明显增加。关中和陕南地区耕层厚度变化较小,但犁底层厚度增加幅度较大。

表2 陕西省农田耕层和犁底层土壤厚度分布频率/%

Table 2 Frequency distribution related to the thickness of top soil on farmland soil in Shaanxi Province

层次 Layer	区域 Region	< 15 cm 薄 Thin	15 ~ 20 cm 较薄 Thinner	20 ~ 25 cm 中等 Moderate	25 ~ 30 cm 较厚 Thicker	≥30 cm 厚 Thick
耕层 Plow layer	陕北 Northern Shaanxi	52.3	38.6	9.1		
	关中 Guanzhong	19.8	30.8	25.3	16.5	7.6
	陕南 Southern Shaanxi	22.6	49.5	24.7	3.2	
	全省 Whole province	27.2	39.9	21.9	7.9	3.1
犁底层 Plow pan	陕北 Northern Shaanxi	38.7	6.8	22.7	29.5	2.3
	关中 Guanzhong	9.9	38.4	33.0	15.4	3.3
	陕南 Southern Shaanxi	19.4	25.8	34.4	3.2	17.2
	全省 Whole province	19.3	27.2	31.5	13.2	8.8

表3 陕西省农田耕层与犁底层厚度近30年变化情况

Table 3 Thickness changes of top soil and plow pan on farmland soil in Shaanxi Province over the past 30 years

土壤类型/区域 Soil type/Region	2013年 样本数/个 Survey samples in 2013/No.	耕层厚度 Top soil thickness/cm			犁底层厚度 Plow pan thickness/cm		
		1980	2013	变幅 Range/%	1980	2013	变幅 Range/%
风沙土 Aeolian Sandy soils	5	24.5	15.4	37.1	—	6.3	—
黄绵土 Cultivated loessial soils	62	20.1	17.4	13.3	10.7	17.3	61.7
黑垆土 Dark loessial soils	2	20.4	15.0	26.5	8.2	7.5	-8.5
瘠土 Cumulic cinnamon soil	76	19.4	18.8	3.4	9.8	18.3	86.2
潮土 Fluvo-aquic soils	6	20.7	18.3	11.8	9.8	10.0	2.0
黄褐土 Yellow cinnamon soils	13	16.8	14.2	15.8	8.6	19.2	123.6
黄棕壤 Yellow brown soils	17	16.9	15.4	8.8	12.1	25.2	108.6
水稻土 Paddy soils	14	17.5	15.0	14.3	11.9	17.2	44.7
新积土 Alluvial soils	28	20.5	16.9	17.5	10.2	17.6	72.6
陕北 Northern Shaanxi	43	20.9	13.4	35.9	9.7	11.8	21.6
关中 Guanzhong	121	20.2	19.8	2.0	10.1	18.2	80.2
陕南 Southern Shaanxi	60	17.5	16.2	7.4	10.3	19.3	87.4
平均 Average	223	19.2	16.5	14.1	10.0	16.4	64.0

2.2 土壤容重评价

土壤容重反映土壤结构、透气性、透水性能以及保水能力的高低,也常用于反映土壤的紧实度。一般认为耕层土壤容重以 $1.14 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为适宜,犁底层容重以不超过 $1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 为适宜^[12,14-17]。不同作物适宜的土壤容重因土壤质地而异,有研究提出不同质地土壤容重的适宜范围^[14],粘土和轻粘土为 $1.00 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,轻壤为 $1.10 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,砂壤为 $1.20 \sim 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,砂土为 $1.25 \sim 1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

陕西省农田耕层土壤容重均值为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,而犁底层土壤容重均值为 $1.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ (表4),全省农田耕层土壤容重适宜,犁底层土壤过紧实。有研究表明^[16],土壤容重与小麦根量呈显著的直线负相关,根系适宜的容重为 $1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 左右,限制根系生长的土壤紧实度阈值为容重大于 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。玉米适宜土壤容重为 $1.20 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,当土壤容重超过 $1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 时,会严重限制玉米根系的伸展,根系不能穿过容重为 $1.60 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的土壤。可见,陕西省犁底层土壤在一定程度上限制了小麦与

玉米根系的发育和分布,特别是严重影响了玉米根系的下扎,成为农田作物生长的物理障碍。

就区域分布而言,陕北地区耕层土壤容重平均为 $1.35 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。陕北地区土壤质地以轻壤和沙壤为主,因此该区耕层土壤容重尚在适宜范围。犁底层土壤容重在陕北、关中和陕南都明显偏大。北部榆林地区,包括府谷、神木、榆阳区、米脂、佳县、吴堡和横山县北部以及关中地区表现突出,其农田犁底层土壤容重均在 $1.50 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 以上,其中关中的部分县,如宝鸡地区陇县、千阳、陈仓区、太白、眉县,西安地区户县和渭南地区的蒲城和大荔部分老农耕区犁底层土壤容重甚至可高达 $1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,成为明显的物理障碍。

基于前人对土壤容重与作物适宜性相关研究结果^[12,14,16-17],我们对陕西省农田耕层和犁底层土壤容重进行了分级。从调查样点在各级别的分布频率看(表 5),全省耕层容重在 $1.10 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 适宜范围的样点占 53.1%,耕层容重 $1.30 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 27.9%,耕层容重 $> 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 11%。陕北地区耕层容重在 $1.20 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 适宜范围的样点占 20.5%,耕层容重 $1.30 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 54.5%,耕层容重 $> 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的

样点占 25%。关中地区耕层容重在 $1.10 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 适宜范围的样点占 59.6%,耕层容重 $1.30 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 21.3%,耕层容重 $> 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 9%。陕南地区耕层容重在 $1.10 \sim 1.30 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 适宜范围的样点占 62.3%,耕层容重 $1.30 \sim 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 21.5%,耕层容重 $> 1.40 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 6.5%。

全省犁底层土壤容重 $> 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 70.8%,犁底层容重 $> 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 26.1% (表 6)。陕北地区犁底层土壤容重 $> 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 68.1%,犁底层容重 $> 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 4.5%。关中地区犁底层土壤容重 $> 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 89.8%,犁底层容重 $> 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 35.9%。陕南地区犁底层土壤容重 $> 1.45 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 53.7%,犁底层容重 $> 1.55 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的样点占 24.7%。整体而言,全省农田 70% 以上的样点犁底层容重较大,形成物理障碍,其中严重障碍的样点接近 1/3。以关中地区尤为严重,近 90% 的样点存在犁底层物理障碍且 1/3 以上的样点障碍程度较严重,陕南地区有 50% 以上样点存在犁底层障碍,陕北地区近 70% 的样点存在犁底层障碍但障碍程度较轻。

表 4 陕西省农田耕层和犁底层土壤容重描述性统计

Table 4 Descriptive statistics related to the bulk density of top soil and plow pan on farmland soil in Shaanxi Province

层次 Layer	区域 Region	样本/个 Samples /No.	均值 Mean /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	标准误差 SE	95% 置信区间 95% confidence		极小值 Minimum /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	极大值 Maximum /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	变异系数 Coefficient of variance
					下限 Lower limit /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	上限 Upper limit /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)			
					耕层容重 Bulk density of plow layer	陕北 Northern Shaanxi			
	关中 Guanzhong	120	1.24	0.011	1.21	1.26	0.93	1.58	10.0
	陕南 Southern Shaanxi	62	1.23	0.013	1.20	1.25	1.02	1.45	8.1
	全省 Whole province	226	1.25	0.008	1.24	1.27	0.93	1.58	9.2
犁底层容重 Bulk density of plow pan	陕北 Northern Shaanxi	44	1.46	0.009	1.44	1.48	1.29	1.55	3.9
	关中 Guanzhong	120	1.52	0.008	1.51	1.54	1.16	1.74	5.9
	陕南 Southern Shaanxi	62	1.44	0.016	1.41	1.47	1.21	1.82	9.0
	全省 Whole province	226	1.49	0.007	1.47	1.50	1.16	1.82	7.0

表 5 陕西省农田耕层土壤容重分布频率/%

Table 5 Frequency distribution related to the bulk density of top soil on farmland soil in Shaanxi Province

区域 Region	耕层容重 Top soil bulk density/($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)				
	< 1.10 小 Small	1.10 ~ 1.20 较小 Smaller	1.20 ~ 1.30 中等 Moderate	1.30 ~ 1.40 较大 Larger	≥ 1.40 大 Large
陕北 Northern Shaanxi			20.5	54.5	25.0
关中 Guanzhong	10.1	28.1	31.5	21.3	9.0
陕南 Southern Shaanxi	9.7	29.0	33.3	21.5	6.5
全省 Whole province	8.0	23.0	30.1	27.9	11.0

表6 陕西省农田犁底层土壤容重分布频率/%

Table 6 Frequency distribution related to the bulk density of plow pan on farmland soil in Shaanxi Province

区域 Region	犁底层容重 Plow pan bulk density/(g·cm ⁻³)				
	< 1.35 较小 Small	1.35 ~ 1.45 中等 Moderate	1.45 ~ 1.55 较大 Larger	1.55 ~ 1.65 大 Large	≥ 1.65 极大 Extreme large
陕北 Northern Shaanxi	4.5	27.3	63.6	4.5	
关中 Guanzhong	3.4	6.7	53.9	29.2	6.7
陕南 Southern Shaanxi	19.4	26.9	29.0	20.4	4.3
全省 Whole province	10.2	19.0	44.7	21.7	4.4

与第二次土壤普查相比,全省各类土壤耕层容重无明显变化,犁底层容重大约增加了 0.10 g·cm⁻³,增幅为 6.4%(表 7)。就不同区域而言,陕北耕层和犁底层土壤容重略有增加,其中分布面积最大的黄绵土耕层容重增加了 0.1 g·cm⁻³。关中地区耕层土壤容重略有减小,但犁底层容重明显增加,增幅为 8.6%,其中犁底层容重增加了 0.13 g·cm⁻³。第二次土壤普查时关中地区各类土壤犁

底层容重平均为 1.39 g·cm⁻³,当前犁底层容重普遍大于 1.45 g·cm⁻³这一临界值。陕南地区耕层容重有所减小,犁底层容重整体上变化不大。综上所述,陕北地区耕层和犁底层容重都有所增加,关中地区犁底层容重有明显增加,陕南地区耕层和犁底层容重变化不大。第二次土壤普查时全省各类土壤的犁底层容重有 30% 超过 1.45 g·cm⁻³,目前全省耕地土壤犁底层容重有 70% 超过 1.45 g·cm⁻³。

表7 陕西省农田土壤容重近30年变化情况

Table 7 Bulk density changes of top soil and plow pan on farmland soil in Shaanxi Province over the past 30 years

土壤类型/区域 Soil type/Region	2013年 样本数/个 Survey samples in 2013/No.	耕层容重/(g·cm ⁻³) Bulk density of plow layer		变幅 Range /%	犁底层容重/(g·cm ⁻³) Bulk density of plow pan		变幅 Range /%
		1980	2013		1980	2013	
风沙土 Aeolian Sandy soils	5	1.37	1.40	1.9	1.42	1.56	9.9
黄绵土 Cultivated loessial soils	62	1.23	1.27	3.5	1.35	1.48	9.6
黑垆土 Dark loessial soils	2	1.25	1.29	3.2	1.36	1.34	-1.3
瘠土 Cinnamon soils	76	1.27	1.24	-2.5	1.40	1.52	8.7
潮土 Fluvo-aquic soils	6	1.37	1.29	-6.1	1.47	1.53	4.2
黄褐土 Yellow cinnamon soils	13	1.38	1.25	-9.4	1.56	1.45	-7.2
黄棕壤 Yellow brown soils	17	1.27	1.25	-1.9	1.46	1.45	-0.7
水稻土 Paddy soils	14	1.26	1.20	-4.4	1.42	1.51	6.0
新积土 Alluvial soils	28	1.26	1.27	0.7	1.35	1.45	7.3
陕北 Northern Shaanxi	43	1.30	1.40	6.2	1.40	1.40	3.6
关中 Guanzhong	121	1.28	1.21	-5.5	1.39	1.51	8.6
陕南 Southern Shaanxi	60	1.26	1.20	-4.8	1.40	1.40	0.0
平均 Average	223	1.29	1.26	-2.3	1.40	1.49	6.4

2.3 土壤紧实度评价

土壤紧实度是衡量土壤抵抗外力压实和破碎能力的一个指标。土壤紧实度影响作物根系穿透和生长、水分入渗等,进而影响作物产量。土壤紧实度主要受土壤质地、容量和含水量的影响,其中含水量的影响最大。土壤紧实度对根系的影响与作物类型及土壤质地有关。一般认为,植物根系细胞在土壤中穿插受到细胞壁和周围土壤强度的限制,根系细胞膨压是根在土壤中穿插的驱动力。根细胞的膨压一般约为 700 ~ 1 200 kPa,土壤紧实度若高于此值,植

物就会受到机械胁迫作用^[18]。砂壤土上穿透阻力大于 1 470 kPa 时根系生长开始受阻,阻力大于 2 450 kPa 时则严重阻碍根系的生长^[19]。Lhotskv 和 Zrubic 依据土壤质地类型提出限制作物根系生长的土壤紧实度范围,粘土为 2 800 ~ 3 200 kPa、重壤土为 3 200 ~ 3 700 kPa、中壤土为 3 700 ~ 4 200 kPa、轻壤为 4 500 ~ 5 000 kPa、壤土 5 500 kPa、砂土为 6 000 kPa^[12]。

陕西省农田耕层土壤紧实度平均为 781 kPa,变化于 250 ~ 2 080 kPa 之间(表 8),变异性中等。陕

北、关中、陕南耕层土壤紧实度分别为 514、779、989 kPa,从北至南呈增加趋势。全省各区犁底层紧实度平均为 2 901 kPa,变化于 716~5 650 kPa 之间,中等变异。陕北、关中、陕南犁底层土壤紧实度分别为 1 824、3 382、2 792 kPa,关中地区犁底层紧实度最大。全省犁底层土壤紧实度显著高于耕层,平均紧实度是耕层的 3.7 倍,特别是关中地区,犁底层平均紧实度达到耕层的 4.3 倍。全省耕层土壤紧实度适宜,但犁底层土壤紧实度过大,形成明显的障碍层。

基于有关土壤紧实度与作物生长关系研究结果^[12,18-19],对研究区土壤紧实度分布状况进行了分级。从分布频率看(表 9,10),全省耕层紧实度 > 1 000 kPa 的样点占 25.4%,其中陕北地区耕层紧实度均小于 1 000 kPa,关中地区耕层紧实度 > 1 000 kPa 的样点仅占 7.7%,而陕南地区耕层紧实度

> 1 000 kPa 的样点占 54.9%。全省犁底层紧实度 > 1 500 kPa 的样点占 94.3%,其中陕北地区 90% 以上的样点犁底层紧实度小于 1 500 kPa,在 1 500~2 500 kPa 紧实度的样点仅占 9.1%;关中地区犁底层紧实度 > 1 500 kPa 的样点达 95.6%,紧实度 > 2 500 kPa 的样点达 76.9%,有 34% 的样点紧实度超过 3 500 kPa;陕南地区犁底层紧实度几乎全部大于 1 500 kPa,紧实度 > 2 500 kPa 的样点达 73.1%,有 41.9% 的样点紧实度超过 3 500 kPa。整体而言,陕北和关中地区耕层土壤紧实度适中,而陕南地区 50% 的样点耕层土壤紧实度偏大,可能影响作物正常生长。全省 90% 以上样点犁底层土壤紧实度偏大,近 70% 的样点紧实度过大,形成明显的物理障碍,其中关中和陕南地区 30% 以上的样点障碍程度严重。

表 8 陕西省农田耕层和犁底层土壤紧实度描述性统计

Table 8 Descriptive statistics related to the compaction of top soil and plow pan on farmland soil in Shaanxi Province

层次 Layer	区域 Region	样本/个 Samples /No.	均值 Mean /kPa	标准误差 SE	95% 置信区间 95% confidence		极小值 Minimum /kPa	极大值 Maximum /kPa	变异系数 Coefficient of variance
					下限/kPa Lower limit	上限/kPa Upper limit			
耕层 Top soil	陕北 Northern Shaanxi	44	504	22.9	457.4	549.7	275	849	30.1
	关中 Guanzhong	122	776	31.7	713.2	838.6	250	2080	45.1
	陕南 Southern Shaanxi	62	989	27.6	934.0	1044.4	450	1430	22.0
	全省 Whole province	228	781	21.9	738.2	824.4	250	2080	42.3
犁底层 Plow pan	陕北 Northern Shaanxi	44	1785	69.2	1645.3	1924.3	716	2715	25.7
	关中 Guanzhong	122	3358	90.2	3179.6	3536.6	1200	5650	29.7
	陕南 Southern Shaanxi	62	2792	98.3	2595.3	2988.5	1380	4800	27.7
	全省 Whole province	228	2901	69.0	2764.5	3036.6	716	5650	35.9

表 9 陕西省农田耕层土壤紧实度分布频率/%

Table 9 Frequency distribution related to the compaction of top soil on farmland soil in Shaanxi Province

区域 Region	耕层紧实度 Top soil compaction/kPa			
	< 500 松 Loose	500 ~ 1 000 较松 Looser	1 000 ~ 1 500 较紧实 Tighter	1 500 ~ 2 000 紧实 Tight
陕北 Northern Shaanxi	50.0	50.0		
关中 Guanzhong	23.1	69.2	7.7	
陕南 Southern Shaanxi	1.1	44.1	49.5	5.4
全省 Whole province	19.3	55.3	23.2	2.2

表 10 陕西省农田犁底层土壤紧实度分布频率/%

Table 10 Frequency distribution related to the compaction of plow pan on farmland soil in Shaanxi Province

区域 Region	犁底层紧实度 Plow pan compaction/kPa				
	< 1500 较松 Looser	1 500 ~ 2 500 较紧实 Tighter	2 500 ~ 3 500 紧实 Tight	3 500 ~ 4 500 过紧实 Excessive tight	≥ 4 500 坚实 Solid
陕北 Northern Shaanxi	18.2	72.7	9.1		
关中 Guanzhong	4.4	18.7	42.9	34.0	
陕南 Southern Shaanxi	1.1	25.8	31.2	23.7	18.2
全省 Whole province	5.7	32.0	31.6	23.2	7.5

3 小结

1) 全省农田土壤耕层较薄,以陕北地区比较严重,陕南次之,关中地区尚可。与第二次土壤普查相比,陕北减少 5 cm,关中减少 1.5 cm,陕南减少 2 cm。犁底层较厚,全省超过 5 成农田犁底层过厚(>20 cm),较厚的犁底层可能已经影响到作物正常生长发育。

2) 全省农田耕层土壤容重适宜,犁底层土壤容重偏大。犁底层土壤容重平均为 $1.49 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,超出了小麦、玉米生长的适宜范围,在一定程度上限制了小麦与玉米根系的发育和分布,成为农田作物生长的物理障碍。

3) 全省耕层土壤紧实度尚合适,但犁底层土壤紧实度过大,形成明显的障碍层。粮食主产区关中地区最为突出,近 90% 的样点存在犁底层物理障碍,且 1/3 以上的样点障碍程度较严重;陕南地区 50% 以上样点存在犁底层障碍;陕北地区近 70% 的样点存在犁底层障碍但程度较轻。

参考文献:

[1] 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.

[2] 冯耀祖,耿庆龙,陈署晃,等.基于 GIS 的县级耕地地力评价及土壤障碍因素分析[J].新疆农业科学,2011,48(12):2281-2288.

[3] 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.

[4] 向万胜,古汉虎.湖北江汉平原四湖地区湿地农田土壤的养分

状况及主要障碍因子[J].土壤通报,1997,28(3):119-120.

[5] 李淑芬,张庆利.深耕后累积降雨量对沿海壤沙土紧实度的影响[J].水土保持科技情报,2003,(4):28-30.

[6] 刘宁,李新举,郭斌,等.机械压实过程中复垦土壤紧实度影响因素的模拟分析[J].农业工程学报,2014,30(1):184-190.

[7] 张兴义,隋跃宇.土壤压实对农作物影响概述[J].农业机械学报,2005,36(10):161-164

[8] Mari G R,姬长英,周俊.土壤压实对土壤物理性质及小麦氮磷钾吸收的影响[J].农业工程学报,2008,24(1):74-79.

[9] 王恩旭,柴亚凡,陈祥伟.大机械作业对黑土区耕地土壤结构性特征的影响[J].应用生态学报,2008,19(2):351-356.

[10] 杨青,朱瑞祥,张捷,等.陕西省农业机械化对农业生产贡献率的研究[J].农业工程学报,2000,16(6):64-67.

[11] 李竹,王龙昌.陕西省农业可持续发展能力主成分分析[J].干旱地区农业研究,2007,25(2):180-184.

[12] 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.

[13] 郭兆元,黄自立,冯立孝.陕西土壤[M].北京:科学出版社,1992:318-321

[14] E. B. Шенн, В. М. Гончаров. Агрофизика Высшее образование [M]. Москва:Издательство Феникс, 2006.

[15] Brereton J C, McGowan M, Dawkins T C K. The relative sensitivity of spring barley spring field beans and sugar beets to soil compaction[J]. Field Crops Research, 1986,13:223-237.

[16] 黄细喜.土壤紧实度及层次对小麦生长的影响[J].土壤学报,1988,25(1):59-65.

[17] 宋家祥,庄恒扬,陈后庆,等.不同土壤紧实度对棉花根系生长的影响[J].作物学报,1997,23(6):719-726.

[18] Taylor I B, Hussain A, Black C R, et al. Soil compaction: A role for ethylene in regulating leaf expansion and shoot growth in tomato [J]. Plant Physiol, 1999,121:1227-1237.

[19] 黄细喜,刘世平.不同耕作对土壤紧实度和小麦根系生长的影响[J].上海农业学报,1989,5(1):61-66.

(上接第 30 页)

[11] 王宏伟,张连忠,路克国.有机肥对红富士苹果生长及品质的影响[J].安徽农业科学,2002,37(28):13572-13573.

[12] 李庆军,陈宝江,李建军,等.“国光”苹果树施用生物有机肥试验初报[J].北方果树,2010,3(2):7-9.

[13] 黄爱星.琯溪蜜柚施用有机肥试验初报[J].福建果树,2011,(4):21-22.

[14] 冯启云,孙红超,王广玉.几种生物有机肥对果树生长发育的影响[J].北方果树,2005,11(6):7-8.

[15] 高晓燕,李天忠,李松涛,等.有机肥对梨果实品质及土壤理化性状的效应[J].中国果树,2007,(5):26-28.

[16] 刘艳,高遐虹,姚允聪.不同植物源有机肥对沙质土壤黄金梨幼树营养效应的研究[J].中国农业科学,2008,41(8):2546-2553.

[17] 秦玲,魏钦平,李嘉瑞,等.根区不同改土模式对葡萄根区生长的影响[J].中国农学通报,2005,21(7):270-272.

[18] 习金根,周文钊,石伟琦,等.部分根系施肥对剑麻植株和根系生长的影响[J].安徽农业科学,2009,37(29):14171-14172.

[19] 原丽娜,胡田田.局部施氮对玉米生理生化特性和产量的影响[J].干旱地区农业研究,2008,26(4):49-52.

[20] 黄绍文,金继运,杨俐苹,等.分区平衡施肥技术对氮肥利用率和土壤养分平衡的影响[J].土壤肥料,2002,(6):3-7.

[21] 李晓华.梯田玉米有机肥最佳施用量的研究[J].生态农业研究,2000,8(3):44-46.

[22] Dave Swift. Excess organic matter is no laughing matter at the straits [J]. Usqa Green Section Record, 2005,43(1):14-17.

[23] 时晓伟,洪霞.小麦早熟高产品种光合生理特性分析[J].华北农学报,2002,17(2):5-10.

[24] 姜霞,张喜,谢双喜,等.木兰科主要树种幼苗的光合生理特征比较[J].贵州农业科学,2005,33(3):12-15.

[25] 金剑,刘晓冰,王光华,等.水肥耦合对春小麦群体叶面积及产量的影响[J].吉林农业大学学报,2005,27(3):241-244,247.

[26] 张依章,张秋英,孙菲菲,等.水肥空间耦合对冬小麦光合特性的影响[J].干旱地区农业研究,2006,24(2):57-60.