植物营养与肥料学报 2015,21(3):694-701 doi: 10.11674/zwyf.2015.0316
Journal of Plant Nutrition and Fertilizer http://www.plantnutrifert.org

渭北果园土壤物理退化特征及其机理研究

魏彬萌,王益权*
(西北农林科技大学资源环境学院,陕西杨凌 712100)

摘要:【目的】针对我国渭北苹果主产区出现的随植果年限增加,果园土壤质量严重退化,树势衰弱、树体过早衰老、抗性降低、腐烂病及早期落叶病频繁发生,果品产量与品质下降等问题,开展了渭北苹果园土壤物理质量退化特征、退化机理及危害程度等问题的研究,以期查明制约果业可持续发展的因素,为果园土壤科学管理提供依据。**【方法】**在渭北黄土塬区选取了<10 a、10～20 a、>20 a 3 个园龄段果园各 4 个,并以土壤条件相同的农田作对照,在果树冠层投影范围内距树干 2/3 处采取土样,测定土壤剖面不同层次容重、紧实度、孔隙度、饱和导水率、粘粒含量等物理性指标。**【结果】**渭北果园土壤容重和紧实度随园龄和土层深度的增加而增大,尤其在表层(20 cm)以下,土壤容重已经达到了 1.45～1.61 g/cm^3,紧实度达到 933～2433 kPa,严重超出果树健康生长的阈值。土壤孔隙度仅在 0—20 cm 土层能够保持在 50% 以上,属于良好状态,而 20—60 cm 土层维持在 40%～46%,已处于紧实和严重紧实状态。土壤饱和导水率在果园表层和紧实层均表现出随植果园龄的增大而减小的趋势,尤其是 10～20 a 和 >20 a 的果园亚表层土壤饱和导水率低至 46.88 cm/d 和 20.89 cm/d,制约着降水入渗和土壤蓄墒。3 个园龄段果园土壤剖面上粘粒含量随土层深度呈递增趋势,且在 0—30 cm 土层随园龄的增加而明显减少,而在 30 cm 以下则随园龄的增加而呈递增趋势。进一步分析发现,粘粒含量与土壤容重、紧实度以及孔隙度之间呈极显著的相关关系。以压实密度(PD)为指标,对渭北果园土壤压实程度进行评估,发现渭北果园 20 cm 土层以下的土壤压实密度都在 1.40 g/cm^3 以上,均达到了中度压实的程度,严重影响果树根系的健康生长及对养分的吸收。**【结论】**渭北果园 20 cm 以下的亚表层土壤孔隙密实、容重和紧实度增大,土壤饱和导水率递减是其土壤物理性质退化的主要特征,表层土壤粘粒的深层移动与淀积是土壤物理退化的主要过程和机理,果园土壤翻耕扰动少、对物理退化干预少是其土壤物理退化程度逐渐加剧的外在原因,土壤团聚体稳定性差是土壤物理状态退化的根本原因。

关键词:苹果园土壤;物理退化;容重;紧实度;饱和导水率
中图分类号:S152.5;S606$^+$.1 **文献标识码:**A **文章编号:**1008-505X(2015)03-0694-08

Physical degradation characteristics and mechanism of orchard soil in Weibei Region

WEI Bin-meng, WANG Yi-quan*
(*College of Resources and Environmental Sciences, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China*)

Abstract:【Objectives】Apple production contributes to the economy in Shaanxi province greatly. But soil quality of the orchard land has degradated greatly after years of fruit production. That may has led to many issues such as trees weakening, fast aging and reduced resilience. Specifically the apple tree valsa canker and leaf defoliation diseases occur more frequently, and fruit yield and quality decreases greatly. The objective of this study was to investigate the characteristics, mechanism and degree of soil physical degradation in different aged orchards, to provide scientific basis for orchard soil management and eventually to improve the yield and quality of apple production.**【Methods】**Four replicates of <10-, 10-20- and >20-year old orchards were selected for the study. Soil samples within two-thirds of the radius of the tree canopy projection to the trunk were taken. Soil samples were used to measure physical properties such as soil bulk density, compaction, porosity, saturated

收稿日期:2014-04-09 **接受日期:**2014-11-16 **网络出版日期:**2015-01-27
基金项目:陕西省农业厅项目"陕西苹果土壤与施肥标准化管理技术研究"资助。
作者简介:魏彬萌(1989—),女,陕西咸阳人,硕士研究生,主要从事土壤质量方面的研究。E-mail:442516031@qq.com
* 通信作者 E-mail:soilphysics@163.com

hydraulic conductivity, and clay content. Comparison was conducted between the orchard and adjacent similar farmland soils. 【**Results**】Soil bulk density and compaction increased with orchard age and soil depth. Especially at 20 cm soil layer, soil bulk density reached 1.45–1.61 g/cm^3, compaction reached 933–2433 kPa. Porosity of the soil profile in 0–20 cm soil layer remained 50%, and the soil structure was in good condition. However, soil porosity reached 40%–46% in the 20–60 cm soil layer, which was in a state of compaction and severe compaction. Soil saturated hydraulic conductivity decreased even in the surface layer as the orchard aged. In the 10–20 and > 20-year-old orchards, soil saturated hydraulic conductivity in the subsurface declined to 46.88 and 20.89 cm/d, reducing the infiltration of the rainfall and the capacity of soil water storage. Soil clay content increased with the depth of soil profile. Clay content at the 0–30 cm depth decreased with increasing orchard age but increased below the 30 cm layer. Further analysis found that the clay content was significantly correlated with soil bulk density, compactness, and porosity. Using packing density as index to evaluate the degree of compaction in orchard soil, the result showed that the soil packing density of orchards was above 1.40 g/cm^3 underneath 20 cm depth in Weibei region. The orchard soils in this area have reached the moderate degree of compaction. 【**Conclusions**】The main characteristics of soil physical degradation of orchards in Weibei Region were reduced soil porosity, increased soil bulk density and compaction, and decreased soil saturated hydraulic conductivity. The main processes and mechanism of orchard soil degradation are clay translocation and accumulation of clay at deep soil. Reduced plow and aeration on soils is the main external cause to anabatic dominanted soil degradation. This is reflected with less soil aggregates.

Key words: orchard soil; physical degradation; soil bulk density; soil compaction; soil saturated hydraulic conductivity

良好的土壤环境是果树健康生长的基本条件。土壤质地轻、土层深厚、土体疏松、通透性强、酸碱度适宜、保水保肥力强、富含有机质是果树健康生长对土壤的最基本要求[1],也是渭北地区被作为苹果优生基地的基本条件,由于该区气候条件独特,所生产的苹果品质优良,优质苹果生产已成为该地区乃至陕西省发展经济的支柱产业之一,为促进该区域的经济发展,解决“三农”问题,改善生态环境做出了巨大的贡献[2-3]。然而,随着植果年限的增加,一些果园出现了树势衰弱,树体衰老,抗性降低,腐烂病及早期落叶病频繁发生,盛果期缩短,果品产量与品质明显下降及耐储藏性降低等问题,已严重影响着该区果业的健康发展[4]。

对于渭北果树早期衰老与果品质量退化的原因已有一些报道,但均是从果园土壤养分的递减与不平衡、土壤有机质含量衰减及重金属累积等化学质量退化方面进行了研究[2,5],而对渭北果园土壤物理质量的退化问题则少有报道。渭北地区土壤虽有满足苹果优生的优势条件,却也有自身的缺陷和不足[6]。如该区土壤为壤质土,有机质含量相对欠缺,土壤团聚作用差、“稳定性”不强,属于结构活跃型土壤,即易结块和易散碎[4,7]。因土壤团聚体的不稳定性和易散碎,植果期间土壤中分散的粘粒会向下移动,“淀积粘化”过程明显,在土壤剖面的亚表层发生着明显的紧实化过程,难以维持其应有的土体疏松状态[8]。另外也与人为管理不当有一定关系[5,9]。由于果园土壤极少翻耕扰动,导致粘粒累积和土体紧实化程度逐渐增大,不利于果树根区内水、气、热的交换和果树根系的延伸,从而影响果树的健康生长。然而,至今人们对渭北果园土壤物理退化问题仍未足够关注,对其退化机理的研究文献极其鲜见,很难找到可以借鉴的研究资料和信息。本文以不同园龄段果园土壤为研究对象,以土壤物理性状指标的变化为切入点,深入分析了果园土壤物理质量退化的部位、退化特征、退化机理及危害程度,以期为揭示果树衰老机理,为获取具有可持续性特征的果园土壤管理措施提供科学依据。

1　材料与方法

1.1　试验区概况

试验选在具有较长植果历史的苹果主产区之一的陕西省彬县新民镇黄土塬区。该地属渭北旱塬的塬梁沟壑区,海拔约 1 108 m,年平均气温 9.7 ℃,昼夜温差 11.7 ℃,多年平均降水量 579 mm,无霜期 180 d,属典型大陆性暖温带半干旱气候特征。地带性土壤类型为黑垆土(系统分类名称为堆垫干润均

腐土,Cumuli-Ustic Isohumosols)。具有海拔较高、光照资源充足、昼夜温差大、气候较为干燥、环境污染小、土层深厚、土体疏松等优越的自然条件。苹果种植历史在整个渭北旱塬果区具有很好的代表性。

1.2 采样及分析方法

试验于2013年9月苹果采收期间进行。在两个乡镇地域范围内选择自然生态条件相同,园龄分别为<10年(<10 a)、10～20年(10～20 a)和>20年(>20 a)3个园龄段苹果园各4个(重复)作为研究对象,果树品种均为"红富士",并在果园附近选取土壤条件相同的农田作对照。在每个果园果树冠层投影范围内距树干2/3处用土钻按照0—10 cm、10—20 cm、20—30 cm、30—40 cm、40—50 cm、50—60 cm、60—80 cm和80—100 cm逐层采取土样,每个果园随机取2钻,将相同土层土样混匀,在室内风干、研磨、过筛等,用于土壤相关性质的测定;用镶有100 cm^3环刀的原状土取土钻,在剖面0—60 cm范围内,按照10 cm的间距从上到下依次采取各层次的原状土样,每个果园取2个剖面点,测定土壤容重;在各果园用原状土取土钻分别采取表层(0—10 cm)和下部(20—30 cm)紧实土层的土壤,每个果园各取2个采样点,测定耕层土壤和紧实化土层的饱和导水率。这样相当于相同园龄段的果园设有8个重复,确保资料的可信度。

1.3 测定项目与方法

土壤容重用环刀法;含水率用烘干法(105℃烘干12 h)测定[10]。

土壤坚实度用SC-900型土壤坚实度仪测定,在田间按2.5 cm的间距测定0—45 cm内果园土壤坚实度,每个果园布置3个以上点测定。

土壤比重用比重瓶法测定;土壤总孔隙度通过容重和比重计算而得[10]。

土壤饱和导水率用"恒定水头法"测定[11-12],从饱和水传导开始第一滴起,每隔5 min记录一次马氏瓶水位下降高度,直至马氏瓶水位下降速率稳定为止,其测定结果换算成10℃下的饱和导水率。

土壤颗粒采用国际粒级分类制,用沉降分析的吸管法测定[10]。

1.4 数据分析

试验数据采用Excel 2007进行处理,用SPSS 19.0进行$LSD_{0.05}$差异显著性检验和相关性分析。

2 结果与分析

2.1 果园土壤物理性状退化的主要特征及退化趋势

2.1.1 果园土壤容重的变化趋势与评价　土壤容重是表征土壤松紧状况的指标,是影响作物根系发育的重要因素之一,不同类型作物因根系构造不同对土壤容重的要求差异很大。对于果树而言,一般认为适宜的土壤容重应在1.00～1.30 g/cm^3之间[4],而不同质地类型的土壤影响作物根系生长的容重阈值也应有所不同,根据前人的研究结果,对于中壤质土壤(渭北地区土壤质地类别),其容重阈值应当为1.35～1.40 g/cm^3[13]。

本研究发现,渭北果园只有在表层0—20 cm范围内的土壤容重变化在1.22～1.35 g/cm^3,基本满足果树正常生长的需求。在20—60 cm各土层容重变化在1.45～1.61 g/cm^3之间,已经超过了果树根系适宜的容重阈值。特别是在20—30 cm土层,<10 a、10～20 a、>20 a 3个园龄段果园的土壤容重比0—20 cm土层处分别增大了17.89%、18.39%、13.83%,而农田土壤只增加了6.19%。20 cm以下底层土壤容重明显超过了根系生长的"适宜容重"范围,必然制约果树根系的延伸和发育、根区土壤水分入渗和气体交换与更新等,尤其对于旱地果树来说,底层土壤紧实化必然会威胁果树的抗旱性。

与当地春播玉米的农田相比,表层(0—20 cm)范围的果园土壤容重与农田土壤基本相当,具有明显差异的是在20—60 cm土层处。果园土壤受耕作翻动次数少和深度浅的影响,容重均明显高于农田(图1),显著体现出种植果树对土壤物理性状的作用范围主要在底土层,而影响的趋势表现为在0—60 cm范围内果园土壤容重均随园龄增加显著增大。目前,表层(0—20 cm)土壤容重虽有增大态势,但暂未达到威胁果树生长的程度,而底土层容重极为明显地规律性增大,已经威胁到果树根系的延伸。由此可见,渭北果园土壤容重在0—20 cm土层较小,土壤较为疏松,但在20—60 cm底土层明显增大,亚表层以下土层的紧实化成为渭北果园土壤物理退化的显著特征,但是在空间上具有很强的隐蔽性,至今仍未被人们所觉察。

2.1.2 果园土壤紧实度的变化与评价　紧实度对土壤的水、肥、气、热及其物理、化学和生物学过程等都有调控作用[14],进而影响植物对养分的吸收和植株根、叶等器官的生长发育[15]。土壤紧实已被广泛认为是对农业、林业和园艺生产越来越具有挑战性的问题[16-17]。许多研究表明,适当紧实的土壤可以增加根和土的密切接触程度,提高根系对养分的吸收

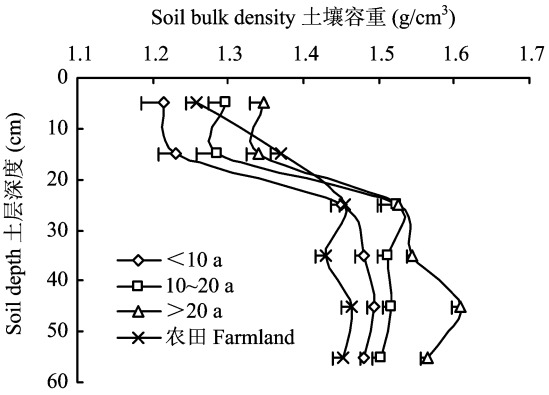

图 1　不同园龄段果园土壤容重的变化

Fig. 1　Soil bulk density in orchards with different planting ages

利用率。但土壤过于紧实,一方面可使土壤容重增加,大孔隙减少,水分渗透率和持水能力明显降低等[18-19]。Singhk 等[20]在沙壤土上研究表明,随容重增加,土壤水分渗透率由 12.35 cm/h 降为 3.46 cm/h。另一方面,土壤机械阻力过大,根系生长受阻,不能在土体中均匀分布,不利于根系吸收土壤中的养分。尚庆文等[21]测定了不同容重土壤中生姜植株的主要生理特性,结果表明紧实土壤加速了生姜植株的衰老。

对于渭北果园土壤管理而言,尽管机械化使用程度并不高,却同样存在着土壤紧实度增大的问题,影响了果树根系的穿插能力,进而减小了根系觅水、觅肥的空间与能力。因此,探讨渭北果园土壤紧实度变化规律与影响因子,是评价果园土壤物理退化的重要内容。

土壤紧实度是孔隙度和含水量共同作用的结果,孔隙度和含水量的递减都会使紧实度增大。为此,在同一时刻土壤含水量变化在 17.64% ~ 20.23%(图 2),相当于该土壤田间持水量(22%)的 80%,即无土壤水分胁迫,且在各果园之间土壤水分差异不显著的情况下,分别测定 3 个园龄段果园的土壤紧实度。结果表明,各园龄段果园土壤紧实度有随土层深度和园龄的增加而呈显著增大的趋势(图 3)。就农田土壤而言,尽管其土壤剖面含水量远低于果园,但土壤紧实度与果园的差异并不明显,说明土壤孔隙度减小是左右渭北地区果园土壤紧实度的主导因素。

关于制约作物根系延伸的紧实度值已有不少学者进行了研究,Shaw[22]提出当土壤紧实度超过 1 MPa,作物根系生长将变缓;当超过 5 MPa,根系生长基本停止。Barley 等[20]研究表明,抑制根生长的机械阻力为 800 ~ 5000 KPa。以这些为依据,可以看出,只有 <10 a 和 10 ~ 20 a 果园在 10 cm 以上土层对根系延伸无制约外,>20 a 的果园和所有果园 10 cm 以下土层土壤紧实度均超过或远远超过了限制根系延伸标准(图 2),必须给予足够重视。

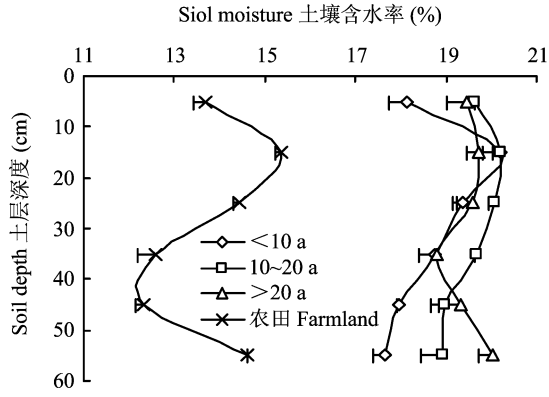

图 2　不同园龄段果园土壤含水率变化

Fig. 2　Soil moisture in orchards with different planting ages

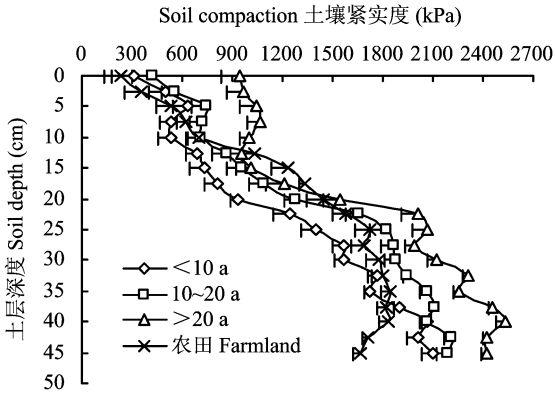

图 3　不同园龄段果园土壤紧实度变化

Fig. 3　Soil compaction in orchards with different planting ages

2.1.3 果园土壤孔隙度的变化与评价　孔隙度是表征土壤团聚性、透水性、导热性和疏松程度的重要指标,其大小也说明土壤水分和空气容量的大小[23-24]。孔隙度是土壤容重和比重共同决定的,对于黑垆土而言,其土壤剖面属非均质的土层构造,根据本研究土壤剖面容重和比重的结果,得到渭北果园及农田土壤孔隙度的剖面状况(图 4)。

3 个园龄段果园土壤剖面孔隙度大体以 20 cm 处为界,具有明显的"上松下实"的变异特征。各果园 0—20 cm 土壤孔隙度基本一致,保持在 50% 以

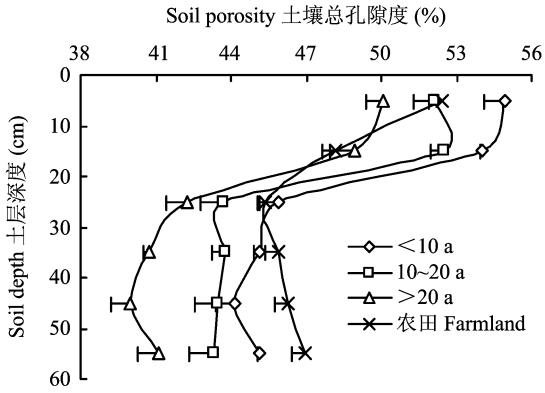

图4 不同园龄段果园土壤总孔隙度变化

Fig. 4 Soil porosity in orchards with different planting ages

上,而20—60 cm土层基本维持在40%～46%,明显低于0—20 cm土层。且随果园年龄的增加0—60 cm范围内的土壤孔隙度均显著减小。按照Шеин[13]提出的孔隙度在50%以上,属于结构良好状态,45%～50%属于压实状态,40%～45%属于严重压实状态的标准,渭北果园土壤耕层属于物理结构良好状态外,20—60 cm已处于压实和严重压实状态,不利于果树根系的延伸。

果园土壤孔隙度在0—20 cm土层基本均大于农田土壤,而20 cm以下土层农田土壤孔隙度却均高于果园土壤。这与农田土壤表层频繁扰动与压实以及地面保护条件较差有直接关系,也佐证了该区土壤团聚体的活跃性和不稳定性。果园土壤由于人为耕作扰动次数少及树冠对降雨的缓冲作用,有效地保护了表层土壤结构,其土壤总孔隙度也较大。

2.1.4 果园土壤饱和导水率的变化与评价　饱和导水率是土壤最为重要的水分动力学参数,可表征土壤的透水性能[25-26]。在旱塬地区关系到自然降水进入土壤水库的性能和土壤的蓄墒能力。图5显示,果园表层(0—10 cm)和紧实层(20—30 cm)的土壤饱和导水率均表现出随种植园龄的增加而减小的趋势,且各果园土壤紧实层的饱和导水率小于表层,主要原因是紧实层的土壤容重大,而容重是影响土壤饱和导水率的主导因素[27]。各果园表层土壤的饱和导水率均小于农田,主要是因为农田表层受耕作扰动,土壤中大孔隙比较多,而果园土壤耕作扰动少、土壤大孔隙少;农田底土紧实层的饱和导水率也很小,与农田土壤机械作业以及人为踩踏严重使该土层出现紧实化有关。

土壤饱和导水率也是评价土壤质量和土壤退化状态的重要指标之一。Шеин等[13]很早就提出了依据土壤饱和导水率评价土壤质量的分级指标,只要土壤饱和导水率在70 cm/d以上,就属于渗透性良好的土壤。土壤饱和导水率受土壤质地和结构状态的影响,Шеин等[13]提出了针对不同土壤质地类别土壤饱和导水率的评价阈值,对于中壤质土而言,良好的土壤饱和导水率阈值不小于50 cm/d,以此为依据不难看出,只有<10 a和10～20 a果园的表层土壤以及农田表层土壤的饱和导水率处于良好的物理状态,而10～20 a果园底层、>20 a果园以及农田底土层土壤饱和导水率均低于50 cm/d,即已经处于不良物理状态,尤其是亚表层土壤导水能力的显著下降,已经严重制约了自然降水的入渗性能,诱发表层土壤侵蚀和养分流失,这对于气候干旱的旱地环境而言无疑是最严重的土壤退化。

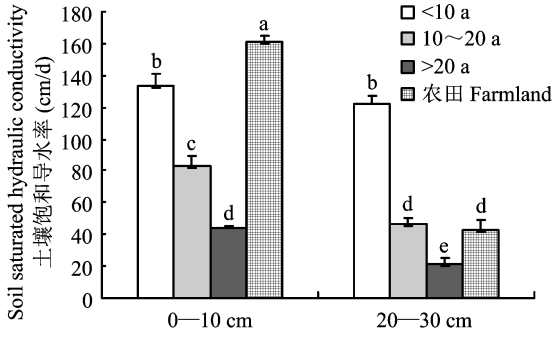

图5 不同园龄段果园土壤饱和导水率变化

Fig. 5 Soil saturated hydraulic conductivity in orchards with different planting ages

从理论上来讲,土壤饱和导水率应该是一个常数,但这是建立在土壤团聚体稳定的基础上。对于"结构活跃性土壤"而言,在导水期间受团聚体分散的影响,其导水孔隙发生了变化,使得土壤饱和导水率不再是常数。即使在室内恒定水头情况下,土壤饱和导水率因土壤团聚体的不稳定性而随时间发生着变化。因此,某种程度上饱和导水率的变化过程也可以表征土壤团聚体的稳定性。渭北果园土壤饱和导水率随时间的变化规律见图6。在恒定水头情况下,连续历时200 min,各处理土壤饱和导水率变化均处于递减趋势,递减幅度最大的是<10 a果园和农田的表层土壤,其次是<10 a果园的紧实层和10～20 a果园的表层土壤,其余土壤均维持着较低的导水能力和较低的递减速率,说明仅从饱和导水率的变化来看,不同园龄果园土壤团聚体的稳定性和退化状态差异明显,对于园龄较大的果园,其土壤

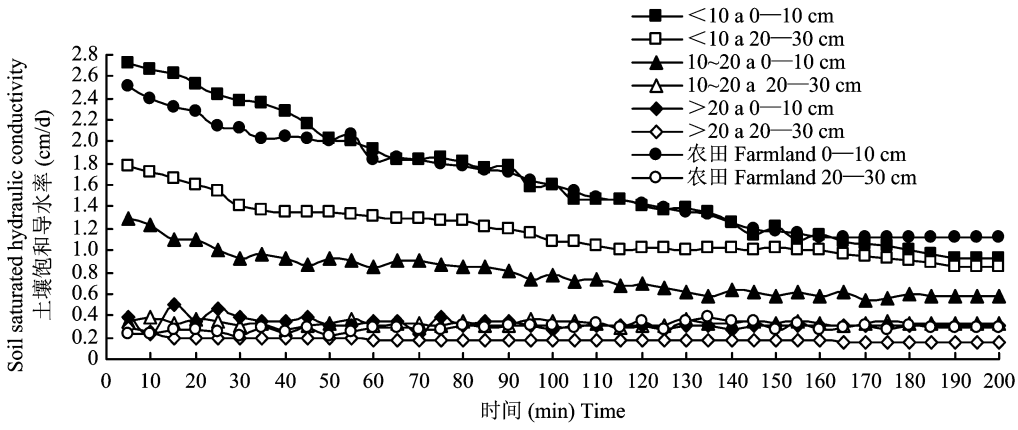

图 6　不同园龄段果园土壤饱和导水率随时间的变化

Fig. 6　The change of soil saturated hydraulic conductivity in orchards with different planting ages

团聚体几乎退化到相对稳定的水平,即“结构孔隙”已经不明显,只有“质地孔隙”的水平。

2.2　果园土壤物理性状退化的原因分析

以上分析表明,底层土壤紧实化是渭北果园土壤物理质量退化的主要特征,探究其土壤紧实化的原因对于评价土壤质量演化趋势和防止土壤紧实化显得极为重要。一般土壤紧实化有诸如耕作、交通和灌溉等人为活动与自然因素等方面的作用。对于渭北果园而言,耕作扰动次数很少,几乎不涉及机械压实,更无灌溉的影响,可底层土壤紧实化问题仍较为严重,这只能是土壤粘粒向下迁移的自然结果。为此,本研究测定了 3 个园龄段果园土壤剖面的粘粒含量(图 7)。

从图 7 可以看出,供试土壤在剖面 50—100 cm 处是黑垆土层,其较高的粘粒含量缘于发生学过程,而 0—50 cm 是黄土的沉积与多年使用土粪形成的覆盖层,从发生学角度讲,该土层应具有基本一致的颗粒组成。但是 3 个园龄段果园土壤剖面粘粒含量存在明显的差异,尤其在 0—30 cm 处土壤粘粒含量随种植年限的增加而明显减少, 30 cm 以下则随种植年限的增加而呈增加趋势,说明植果期间黑垆土覆盖层因团聚作用差,在降雨期间团聚体分散,“活性粘粒”向深层移动淀积,产生了明显的淀积粘化作用。并因果园土壤翻耕少,使得粘粒在底土层逐渐积累,并填充了底层土壤孔隙,造成底土层土壤紧实化和坚实化。进一步分析发现,土壤粘粒含量与容重、紧实度以及孔隙度之间呈极显著的相关关系(表 1),再次证明渭北果园土壤物理退化的主要原因在于粘粒的迁移与分化。培肥果园土壤,促进土壤颗粒的团聚化程度是防止土壤物理退化的根本措施。

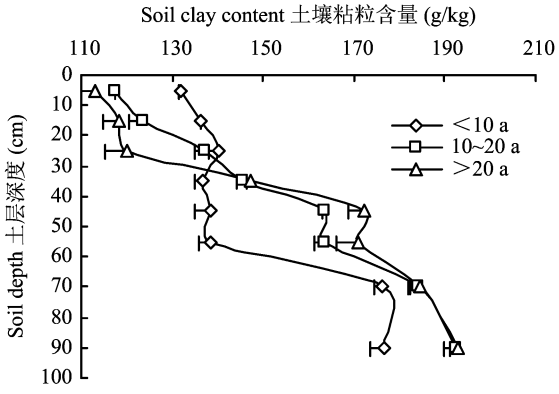

图 7　不同园龄段果园土壤粘粒含量变化

Fig. 7　Soil clay content in orchards with different planting ages

2.3　果园土壤物理性状退化程度的评价

压实密度(packing density)是衡量土壤压实程度的量化指标,主要在德国和英国等欧洲国家被使用。压实密度采用公式:PD = BD + 0.09C

式中, PD—压实密度(g/cm^3); BD—土壤容重(g/cm^3); C—土壤粘粒含量。

压实密度(PD)在 1.40 g/cm^3 和 1.75 g/cm^3 可视为压实程度低、中、高阈值[28]。渭北果园在 20 cm 土层以下土壤压实密度都已达到了中度压实的程度,而且在同一土层,果园土壤压实密度比农田土壤大(表 2)。说明渭北土壤团聚体的弱结持性引起的自然压实是限制该区果业可持续发展的一个重要问题,应该引起人们足够重视。

表1 土壤物理参数间的相关性分析

Table 1 Correlation analysis of soil physical parameters

项目 Item	容重 Soil bulk density	总孔隙度 Soil porosity	紧实度 Soil compactness	粘粒含量 Clay content
容重 Soil bulk density	1.000	-0.992**	0.964**	0.618**
总孔隙度 Soil porosity		1.000	-0.971**	-0.598**
紧实度 Soil compactness			1.000	0.674**
粘粒含量 Clay content				1.000

注(Note): *—$P<0.05$; **—$P<0.01$.

在果园土壤管理方面,增加有机物投入,促进土壤稳定性团聚体的形成,适度地深翻土壤,干扰粘粒在深层的聚集等,将有助于保证疏松土体构造,提高土壤蓄水、透气和保肥能力等,为果树健康生长营造最佳的土壤物理条件。同时,疏松的土体也有助于果树根系的延伸和扩展活动范围,增加根系吸收功能,有利于维持果树的健康树势,延缓果树衰老等[29]。

表2 不同园龄段果园土壤压实密度(g/cm^3)

Table 2 Soil packing density in orchards with different planting ages

土层深度 Soil depth (cm)	种植年限 Planting age			农田 Farmland
	<10 a	10～20 a	>20 a	
0—10	1.23	1.31	1.36	1.27
10—20	1.24	1.30	1.35	1.38
20—30	1.46	1.53	1.54	1.47
30—40	1.49	1.53	1.56	1.44
40—50	1.51	1.53	1.62	1.48
50—60	1.49	1.52	1.58	1.47

3 结论

渭北果园土壤物理退化的主要特征是容重和紧实度随植果园龄和土层深度的增加而增大,尤其是在20 cm土层以下,土壤容重已经达到1.45～1.61 g/cm^3,紧实度达到933～2433 KPa。孔隙度在0—20 cm土层基本保持在50%以上,属于结构良好状态,而20—60 cm土层基本维持在40%～46%,已经处于压实和严重压实状态。土壤饱和导水率在果园土壤表层和紧实层均表现出随种植园龄的增加而减小的趋势。因此,亚表层及其以下土层的紧实化是渭北果园土壤物理退化的主要特征。以压实密度为指标,对渭北果园土壤压实程度进行评估,发现渭北果园20 cm土层以下均达到了中度压实的程度,严重影响了果树根系的健康生长及对养分的吸收。

渭北果园土壤物理退化的主要原因是,该区土壤质地为壤质土,有机质含量相对欠缺,土壤团聚作用差,团聚体"稳定性"不强,加之果园土壤翻耕扰动少,对物理退化干预少,在植果期间土壤粘粒逐渐向深层移动与累积,最终造成果园土壤亚表层及其以下土层的紧实化,影响果园的健康、可持续发展。

参考文献:

[1] 陈军. 果树生长与土壤条件的关系探析[J]. 现代农业科技, 2010,(9): 155-156.
Chen J. Analysis of the relationship between the fruit tree growth and soil conditions [J]. Modern Agricultural Sciences and Technology, 2010,(9): 155-156.

[2] 石宗琳, 王益权, 张露, 等. 渭北果园土壤有机质及酶活性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2012, 30(4): 86-91.
Shi Z L, Wang Y Q, Zhang L *et al*. Soil organic matter and enzyme activity in orchards of Weibei[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2012, 30(4): 86-91.

[3] 李会科, 张广军, 赵政阳, 李凯荣. 渭北黄土高原旱地果园生草对土壤物理性质的影响[J]. 中国农业科学, 2008, 41(7): 2070-2076.
Li H K, Zhang G J, Zhao Z Y, Li K R. Effects of different herbage on soil quality characteristics of non-irrigated apple orchard in Weibei loess plateau[J]. Scientia Agricultura Sinica, 2008, 41(7): 2070-2076.

[4] 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.
Sun L, Wang Y Q, Zhang Y L *et al*. Dual effect of fruit tree cultivation on soil physical characteristics[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(1): 19-23.

[5] 同延安, 王留好, 刘剑. 陕西渭北地区苹果园土壤有机质现状评价[J]. 干旱地区农业研究, 2007, 25(6): 189-192.
Tong Y A, Wang L H, Liu J. Assessment on current situation of soil organic matter of apple orchards in Weibei areas [J].

Agricultural Research in the Arid Areas, 2007, 25(6): 189-192.

[6] 郭兆元. 陕西土壤[M]. 北京：科学出版社，1992.
Guo Z Y. Shaanxi soil [M]. Beijing: Science Press, 1992.

[7] 胥继东，王益权，刘军，等. 渭北旱塬不同树龄果园土壤营养状况演化趋势[J]. 安徽农业科学，2008，36(31)：13722-13724，13752.
Xu J D, Wang Y Q, Liu J *et al*. Research on the evolution trend of soil nutrient of different tree ages in Weibei dry plateau[J]. Journal of Anhui Agricultural Sciences. 2008, 36(31): 13722-13724, 13752.

[8] 季耿善. 黑垆土的形成环境[J]. 土壤学报，1992，29(2)：114-125.
Ji G S. Genetic environment of dark loessial soil [J]. Acta Pedologica Sinica, 1992, 29(2): 114-125.

[9] 刘侯俊，巨晓棠，同延安，等. 陕西省主要果树的施肥现状及存在问题[J]. 干旱地区农业研究，2002，20(1)：39-44.
Liu H J, Ju X T, Tong Y A *et al*. The status and problems of fertilization of main fruit trees in Shaanxi Province[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2002, 20(1): 39-44.

[10] 郑必昭. 土壤分析技术指南[M]. 北京：中国农业出版社，2012.
Zheng B Z. Analysis method guide for soil [M]. Beijing: China Agriculture Press, 2012.

[11] 刘亚敏，程林. 渗透桶法测定土壤饱和导水率的改进[J]. 人民黄河，2011，33(8)：106-107.
Liu Y M, Cheng L. Improvement of saturated soil hydraulic conductivity measured by using method of permeating bucket[J]. Yellow River, 2011, 33(8): 106-107.

[12] GB 7838-1987. 森林土壤渗透性的测定[S].
GB 7838-1987. Determination of forest soil permeability [S].

[13] Шеин Е В, Гончаров В М. агрофизика[M]. Россия, Феникс, 2006.
Шеин Е В, Гончаров В М. Agrophysics[M]. Russia, Phoenix, 2006.

[14] 刘晚苟，山仑，邓西平. 植物对土壤紧实度的反应[J]. 植物生理学通讯，2001，37(3)：254-260.
Liu W G, Shan L, Deng X P. Responses of plant to soil compaction[J]. Plant Physiology Communications, 2001, 37(3): 254-260.

[15] 张国红，张振贤，黄延楠，梁勇. 土壤紧实程度对其某些相关理化性状和土壤酶活性的影响[J]. 土壤通报，2006，37(6)：1094-1097.
Zhang G H, Zhang Z X, Huang Y N, Liang Y. Effect of compaction on soil properties and soil enzyme activities[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2006, 37(6): 1094-1097.

[16] 王金贵，王益权，徐海，等. 农田土壤紧实度和容重空间变异性研究[J]. 土壤通报，2012，43(3)：594-598.
Wang J G, Wang Y Q, Xu H *et al*. Spatial variability of soil compaction and bulk density in farmland[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2012, 43(3): 594-598.

[17] 孙艳，王益权，徐伟君，等. 紧实胁迫对土壤呼吸强度及黄瓜生长和品质的影响[J]. 土壤学报，2008，45(6)：1128-1134.
Sun Y, Wang Y Q, Xu W J *et al*. Effect of soil compaction on soil respiration intensity, plants growth and fruit quality of cucumber[J]. Acta Pedologica Sinica, 2008, 45(6): 1128-1134.

[18] Rao M, Kathavate Y V. Effect of soil compaction on the yield of wheat and maize[J]. Indian Journal of Agronomy, 1972, 17(3): 199-295.

[19] Carman K. Compaction characteristics of wed wheels on clay loam in soil bin[J]. Soil and Tillage Research, 2002, 65(1): 37-43.

[20] Singhk K, Verma G. Effect of soil compaction on physical properties of loamy sand soil and yield of groundnut [J]. Research on Crops, 2001, 2(2): 145-147.

[21] 尚庆文，孔祥波，王玉霞，徐坤. 土壤紧实度对生姜植株衰老的影响[J]. 应用生态学报，2008，19(4)：782-786.
Shang Q W, Kong X B, Wang Y X, Xu K. Effect of soil compaction on ginger plant senescence[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(4): 782-786.

[22] Shaw B T(冯兆林译). 土壤物理条件与植物生长[M]. 北京：科学出版社，1965.
Shaw B T(Translation by Feng Z L). Soil physical conditions and plant growth [M]. Beijing: Science Press, 1965.

[23] 张扬. 陕西省渭北苹果园表层土壤物理性质与水分特征研究[D]. 陕西杨凌：西北农林科技大学硕士学位论文，2010.
Zhang Y. Topsoil physical properties and water characteristics of apple orchards in weibei region Shaanxi province [D]. Yangling, Shaanxi: Ms Thesis of Northwest A&F University, 2010.

[24] 周虎，李保国，吕贻忠，等. 不同耕作措施下土壤孔隙的多重分形特征[J]. 土壤学报，2010，47(6)：1094-1100.
Zhou H, Li B G, Lü Y Z *et al*. Multifractal characteristics of soil pore structure under different tillage systems[J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47(6): 1094-1100.

[25] 方 堃，陈效民，张佳宝，等. 红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报，2008，27(4)：67-69.
Fang K, Chen X M, Zhang J B *et al*. Saturated hydraulic conductivity and its influential factors of typical farmland in red soil region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 67-69.

[26] 姚淑霞，赵传成，张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J]. 土壤学报，2013，42(3)：469-477.
Yao S X, Zhao C C, Zhang T H. A comparison of soil saturated hydraulic conductivity(kfs) in different Horqin sand land[J]. Acta Pedologica Sinica, 2013, 42(3): 469-477.

[27] 郑纪勇，邵明安，张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报，2004，18(3)：53-56.
Zheng J Y, Shao M A, Zhang X C. Spatial variation of surface soil's bulk density and saturated hydraulic conductivity on slope in loess region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2004, 18(3): 53-56.

[28] 周健民，沈仁芳. 土壤学大辞典[M]. 北京：科学出版社，2013. 212.
Zhou J M, Shen R F. Dictionary of soil science [M]. Beijing: Science Press, 2013. 212.

[29] 马宝焜. 红富士苹果—优质果品生产技术[M]. 北京：农业出版社，1993.
Ma B K. Fuji apple - High quality fruit production technology [M]. Beijing: Agriculture Press, 1993.