

黄土塬区土地利用方式对土壤 主要理化性质的影响

白晨赞^{1,2}, 田涵洋^{1,2}, 乔江波^{1,3}, 韩晓阳^{1,3}, 朱元骏^{1,2,3}

(1.中国科学院水利部水土保持研究所,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院大学,北京 100049;

3.西北农林科技大学水土保持研究所,陕西 杨凌 712100)

摘要:通过对陕西长武4种典型土地利用方式下0~500 cm 土层土壤主要理化性质分析,以明确土地利用方式对土壤理化性质的影响。结果表明:农田、果园土壤有机质、全氮含量显著高于荒地和刺槐林地,土壤粘粒含量与土壤容重呈显著负相关关系,与土壤饱和导水率呈显著正相关关系;农田0~100 cm 土层土壤容重达 $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,显著高于同深度荒地($1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、果园($1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)、刺槐林地($1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$)土层;400~500 cm 土层土壤含水量为刺槐林地($86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)<果园($113 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)<荒地($152 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$)<农田($165 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$);果园和刺槐林地0~500 cm 土层土壤平均饱和导水率分别为 0.37 、 $0.36 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,显著高于农田($0.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)和荒地($0.23 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$)。退耕还林(草)导致土壤容重降低、饱和导水率增加,有助于降水入渗,但退耕后深层土壤有干燥化的倾向。

关键词:黄土塬区;土地利用方式;土壤理化性质

中图分类号:S152;S158.2 **文献标志码:**A

Effects of land use patterns on soil physical and chemical properties in the Loess Plateau

BAI Chenyun^{1,2}, TIAN Hanyang^{1,2}, QIAO Jiangbo^{1,3}, HAN Xiaoyang^{1,3}, ZHU Yuanjun^{1,2,3}

(1. Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR, Yangling, Shaanxi 712100, China;

2. University of Chinese Academy of sciences, Beijing 10049, China;

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

Abstract: To understand the impact of land use patterns on soil physical and chemical properties, the principal physical and chemical properties of 0~500 cm soil under four typical land uses in Changwu, Shaanxi Province were measured and analyzed. The results showed that the contents of soil organic matter and total nitrogen in farmland and orchard were significantly higher than those in the wasteland and black locust forest lands. The content of soil clay was significantly negatively correlated with soil bulk density and positively correlated with soil saturated hydraulic conductivity. The bulk density of 0~100 cm soil in farmland was $1.44 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$, which was significantly higher than that in the wasteland ($1.27 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$), orchard ($1.38 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$) and black locust lands ($1.32 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$). The soil water content of 400~500 cm showed an order of black locust forest ($86 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) < orchard ($113 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) < wasteland ($152 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) < farmland ($165 \text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$). The average saturated hydraulic conductivity for the 0~500 cm soils in orchard and black locust land were $0.37 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ and $0.36 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$, respectively, which were significantly higher than that in farmland ($0.25 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) and wasteland ($0.23 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). The implementation of grain for green project led to the decrease of soil bulk density and the increase of saturated hydraulic conductivity, which benefiting precipitation infiltration, but the deep soil had a trend of being dry after the implementation.

Keywords: Loess Plateau; land use patterns; soil physical and chemical properties

退耕还林(草)是促进黄土高原水土保持、提高生态效益的有效措施。近 30 年的植被建设对黄土高原土地利用方式和格局产生了重要影响,但不合理的植被建设会导致土壤干层、地下水位降低等问题,威胁生态系统的可持续发展^[1-2]。土壤理化性质与土壤中水分、物质运移和养分循环等密切相关,对土壤水、肥、气、热及微生物活性等产生显著影响,进而影响根系对水分养分的吸收以及植被地上部分的生长^[3-5]。

针对不同土地利用方式下土壤理化性质的相关研究较多^[6-7]。杨婷等^[8]在黄土丘陵区发现不同植被类型下 0~100 cm 土层土壤颗粒组成有显著差异,农田与自然林草地的土壤粘粒含量与土壤容重、有机质、全氮有显著相关性,且坡耕地土壤粘粒含量显著高于自然林草地。杨震等^[9]发现与草地、农田相比,林地能有效提升表层土壤饱和导水率,增强土壤水分入渗能力,从而减缓水土流失。黄亚楠等^[10]在洛川塬的研究发现,将农田或荒地转化为耗水量较高的果园,会出现严重水分亏缺甚至形成土壤干层,高龄果园的土壤含水量随土层深度增加而显著降低。但目前关于土地利用方式对土壤理化性质影响的相关研究主要集中在 0~100 cm 土壤,其对深层土壤理化性质影响还不明确^[8-12]。

本研究在陕西省长武县王东沟流域选取了荒地、农田、果园和刺槐等 4 种土地利用方式,通过对 0~500 cm 土层原状土和扰动土样品土壤理化性质的分析,量化深层土壤理化性质的分布特征和土地利用方式的影响,深刻了解退耕还林(草)后深层土壤理化性质的变化规律,为黄土塬区植被建设及生态可持续发展提供科学依据。

1 材料与方 法

1.1 研究区概况

试验地位于陕西省长武县王东沟流域(35°12′-35°15′N,107°40′-107°42′E),该流域属于黄土高塬沟壑区,年均温 9.1℃,年均降水量 584 mm,为暖温带半湿润大陆性季风区。土壤类型为黑垆土和黄绵土,成土母质深厚,土层厚度超过 35 m,地下水埋深 50~80 m。流域地貌类型为塬、梁、沟,其面积约各占 1/3,土地利用方式以耕地、林地、荒地和居住用地为主。流域内的主要农作物为小麦(*Triticum aestivum* Linn.)和玉米(*Zea mays* Linn.),林地主要为苹果(*Malus pumila* Mill.)、刺槐(*Robinia pseudoacacia* Linn.)和油松(*Pinus tabulaeformis* Carr.),荒地以铁杆蒿(*Artemisia sacrorum*)、白羊草

(*Bothriochloa ischaemum* (L.) Keng)为优势种群。

1.2 研究方法

于 2020 年 6 月在王东沟流域选取远离居住区、道路和沟道的荒地、农田、果园和刺槐林 4 种典型土地利用方式。荒地为未受人为干扰、优势种群为铁杆蒿和白羊草的天然草地;农田为连作冬小麦并秸秆还田的耕地,施尿素 120 kg·hm⁻²·a⁻¹;果园为 25 a 树龄的苹果园,施尿素 746 kg·hm⁻²·a⁻¹,施 K₂O 597 kg·hm⁻²·a⁻¹;刺槐林地生长年限为 30 a。4 块样地均为平地,气候条件一致。取样时,清除土壤表层枯枝落叶,人工挖掘直径 100 cm、深 450 cm 的圆形剖面,采集 0~100、100~200、200~300、300~400、400~500 cm 土层原状土及扰动土样品。在每一层中间位置用容积为 100 cm³的环刀取 3 个原状土样品,用四分法采集扰动土样。所有土样装袋密封并置于阴凉处贴标签保存。

测定指标包括:土壤容重、土壤含水量、土壤饱和导水率、土壤颗粒组成及土壤有机质、土壤全氮含量。土壤容重采用环刀法测定,孔隙度以 2.65 g·cm⁻³为土粒密度进行计算(公式 1)^[13];土壤含水量用烘干法测定;饱和导水率采用恒定水头法室内测定^[9];土壤颗粒组成(粘粒<0.002 mm、粉粒 0.002~0.05 mm 及砂粒>0.05 mm)采用 Masterize 2000 激光粒度仪(Malvern Instruments, England)进行测定^[8];土壤有机质含量采用重铬酸钾容量法测定;土壤全氮含量采用凯式法测定^[6];土壤干燥化指数(SDI)以 15%为田间稳定湿度值、8%为田间凋萎湿度进行计算(公式 2)^[10]。

$$\text{土壤孔隙度}(\%) = \left(1 - \frac{\text{土壤容重}}{\text{土粒密度}}\right) \times 100\% \quad (1)$$

土壤干燥化程度(SDI)% =

$$\frac{\text{土壤含水量}(\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}) / 10 - \text{凋萎湿度}(\%)}{\text{田间稳定湿度}(\%) - \text{凋萎湿度}(\%)} \times 100\% \quad (2)$$

根据 SDI 值,土壤干燥化程度可分为 6 级(表 1)。

1.3 数据处理

采用 Excel 2019 对数据进行处理,数据为 3 次重复的平均值。使用 SPSS 25.0 软件对土壤容重、土壤孔隙度、土壤含水量、土壤饱和导水率、土壤颗粒组成、土壤有机质和土壤全氮含量等指标进行二因素完全随机区组设计方差分析;使用 Duncan 法对不同土地利用类型及不同剖面之间差异显著性进行多重比较,利用 Origin 2021Pro 软件进行相关性分析和绘图。

2 结果与分析

2.1 不同土地利用方式下土壤有机质和全氮含量

整体而言,4种土地利用方式的0~100 cm土层平均土壤有机质、土壤全氮含量分别为4.68、0.35 g·kg⁻¹,在5个土层中最高。农田、果园在0~500 cm土层内土壤有机质含量分别为5.39、4.28 g·kg⁻¹,土壤全氮含量分别为0.40、0.30 g·kg⁻¹,显著高于荒地、刺槐林地($P<0.05$)。果园除200~300 cm土层土壤有机质含量低于农田,其他土层有机质含量及全氮含量均显著高于农田($P<0.05$)。100~200 cm土层荒地土壤有机质含量为3.32 g·kg⁻¹,显著低于刺槐土壤(3.92 g·kg⁻¹),200~500 cm土层荒地土壤有机质含量显著高于刺槐林地。0~500 cm土层,刺槐林土壤有机质、全氮含量均最低,仅为2.73 g·kg⁻¹和0.25 g·kg⁻¹,且随土层深度增加,刺槐林土壤有机质和全氮含量有降低趋势(图1)。

2.2 不同土地利用方式下土壤物理性质的分布特征

2.2.1 土壤颗粒组成 农田土壤随着土层深度增加,粘粒含量从26.8%下降到22.9%,砂粒含量从8.9%上升到11.5%($P<0.05$),果园、刺槐林土壤粘粒变化趋势与农田相反,随土层深度增加,土壤粘粒含量显著上升($P<0.05$)(图2)。0~100 cm土层的粘粒含量表现为农田26.8%,果园25.0%,显著高

于荒地(23.0%)和刺槐林(22.8%)。荒地土壤粘粒含量在200~300、300~400 cm土层达到峰值,分别为37.5%和36.9%,显著高于其他3种土地利用方式,而砂粒含量显著低于其他3种土地利用方式。400~500 cm土层的土壤粘粒含量依次为刺槐林>果园>荒地>农田。随着土层深度增加,各土地利用方式土壤粘粒变化趋势与土壤砂粒变化趋势相反(图2)。

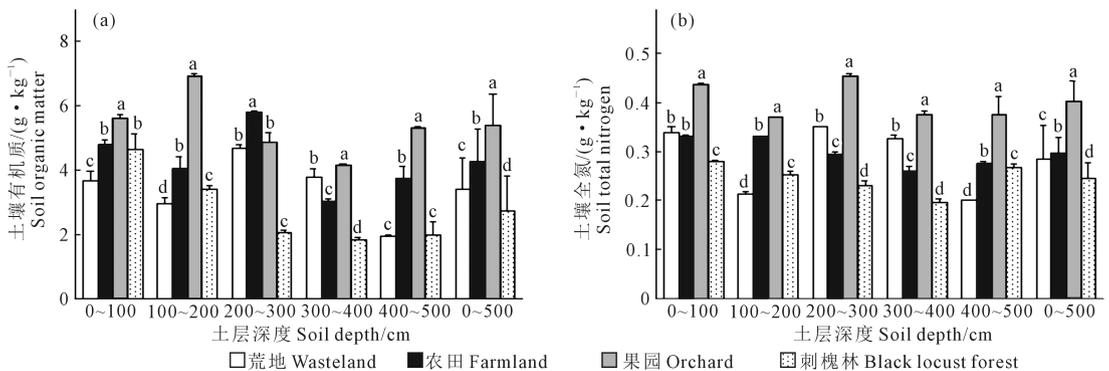
2.2.2 土壤容重和孔隙度 4种土地利用方式下的土壤容重范围为1.27~1.59 g·cm⁻³。农田0~100 cm土层土壤容重为1.44 g·cm⁻³,显著高于其他3种土地利用方式($P<0.05$)。农田、果园0~100 cm土层土壤容重高于100~200 cm土层,而荒地、刺槐100~200 cm土层土壤容重高于0~100 cm土层。4种土地利用方式200~500 cm土层土壤容重表现为荒地>刺槐林>农田>果园,在300~400 cm土层,荒地土壤容重为1.59 g·cm⁻³,显著高于其他3种土地利用方式。随土层深度增加,各土地利用方式下土壤容重均具有上升趋势,但速率有差异(图3)。土壤孔隙度与土壤容重变化情况相反。

2.2.3 土壤饱和导水率 果园、刺槐地0~500 cm土层土壤平均饱和导水率分别为0.37、0.36 mm·min⁻¹,显著高于农田(0.25 mm·min⁻¹)、荒地(0.23 mm·min⁻¹)。0~100 cm土层土壤饱和导水率为果园>刺槐林>荒地>农地,其中农地为0.02 mm·min⁻¹。除农田外,果园、刺槐林、荒地土壤饱和导水

表1 干燥化指数与干燥化程度

Table 1 Dryness index and degree

项目 Item	SDI<0	0<SDI<25%	25<SDI<50%	50<SDI<75%	75<SDI<100%	SDI>100%
干燥化程度 Degree of dryness	极度 Extreme	强烈 Intense	严重 Severe	中度 Moderate	轻度 Mild	无 No

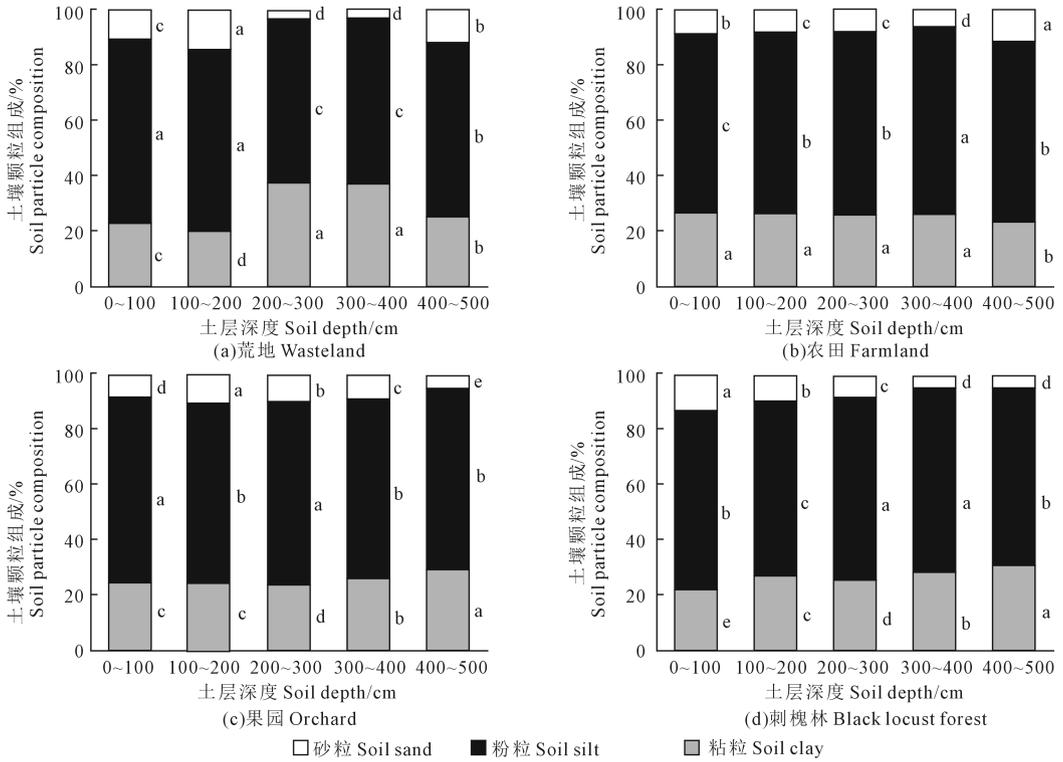


注:不同字母表示同一土层深度下不同土地利用方式在 $P<0.05$ 水平下差异显著。

Note: Different letters indicate significant difference ($P<0.05$) among different land use patterns under the same soil depth.

图1 不同土地利用方式下土壤有机质和土壤全氮含量

Fig.1 Contents of soil organic matter and total nitrogen under different land use patterns



注:不同字母表示不同土层深度的同一粒级土壤颗粒百分比在 $P < 0.05$ 水平差异显著。

Note: Different letters indicate that the percentage of soil particles of the same particle size in different soil depths is significantly different at the level of $P < 0.05$.

图 2 不同土地利用方式下土壤颗粒组成剖面分布

Fig.2 Profile distribution of soil particle composition under different land use patterns

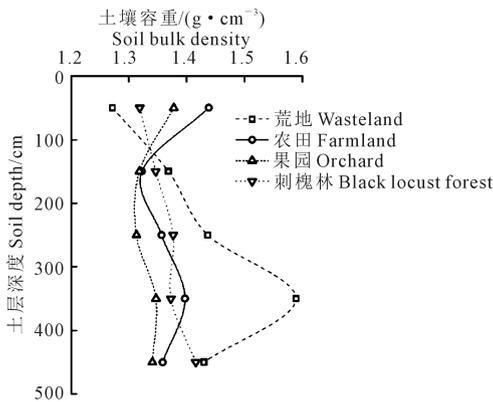


图 3 不同土地利用方式下土壤容重

Fig.3 Soil bulk density under different land use patterns

率均在 0~200 cm 土层达到峰值,分别为 0.70、0.47、0.41 $mm \cdot min^{-1}$ 。农田在 0~500 cm 土层随深度增加,土壤饱和导水率先升后降,并在 200~300 cm 土层达到峰值,为 0.37 $mm \cdot min^{-1}$ 。刺槐林地 在 0~500 cm 土层土壤饱和导水率呈线性下降趋势 ($R^2 = 0.87$),在 400~500 cm 土层降到谷值。荒地土壤饱和导水率在 300~400 cm 土层达到谷值,为 0.09 $mm \cdot min^{-1}$ (图 4a)。

2.2.4 土壤含水量和土壤干燥化程度 0~500 cm

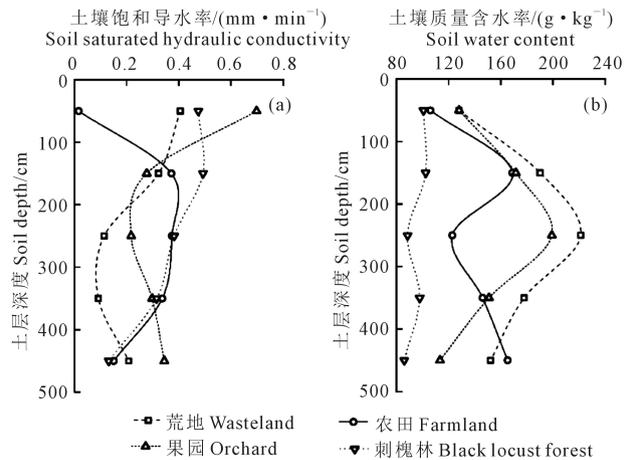


图 4 不同土地利用方式下土壤饱和导水率和土壤质量含水量

Fig.4 Soil saturated hydraulic conductivity and soil moisture content under different land use patterns

土层土壤含水量为荒地 ($174 g \cdot kg^{-1}$) > 果园 ($152 g \cdot kg^{-1}$) > 农田 ($142 g \cdot kg^{-1}$) > 刺槐林 ($95 g \cdot kg^{-1}$), 其中刺槐林地土壤含水量在 $86 \sim 102 g \cdot kg^{-1}$ 间小幅波动,所有土层均低于其他样地。0~200 cm 土层土壤含水量随土层深度增加均上升,荒地、农田、果园和刺槐林地涨幅分别达 48.7%、59.2%、34.1%、

1.8%。200~500 cm 土层内,农田土壤含水量呈线性上升趋势,而果园、荒地土壤含水率呈线性下降趋势,其中荒地土壤含水率降低速度低于果园(图4b)。由表1、表2可知,荒地0~100 cm 土层土壤呈中度干燥化,在100~500 cm 土层水分条件较好,无土壤干燥化。农田0~100 cm 土层土壤干燥化最为严重,达严重干燥化。果园和刺槐地土壤在400~500 cm 土层干燥化严重。刺槐地土壤在0~500 cm 土层均呈严重或强烈干燥化程度,相较荒地,土壤

水分亏缺严重。

2.3 土壤物理性质间的相关性分析

土壤颗粒组成、土壤孔隙度、土壤含水量、土壤饱和导水率的相关性分析结果表明:土壤饱和导水率与土壤孔隙度、粉粒含量呈极显著正相关关系,与粘粒含量、容重呈极显著负相关关系($P<0.01$);粉粒、砂粒含量越高,土壤孔隙度越大,土壤容重越大及粘粒含量越多,土壤孔隙度越小;土壤容重与土壤颗粒组成、饱和导水率、孔隙度等密切相关(表3)。

表2 不同土地利用方式下土壤干燥化程度

Table 2 Soil drying degree under different land use patterns

土地利用方式 Land use patterns	0~100 cm		100~200 cm		200~300 cm		300~400 cm		400~500 cm		0~500 cm	
	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness	SDI /%	干燥化程度 Degree of dryness
荒地 Wasteland	68	中度 Moderate	157	无 No	201.9	无 No	140	无 No	103	无 No	134	无 No
农田 Farmland	37	严重 Severe	127	无 No	61.1	中度 Moderate	94.4	轻度 Mild	121.7	无 No	88.3	轻度 Mild
果园 Orchard	39	中度 Moderate	131	无 No	170.1	无 No	101	无 No	47.6	严重 Severe	104	无 No
刺槐林 Black locust forest	30	严重 Severe	32	严重 Severe	12.1	强烈 Intense	25.4	严重 Severe	8.4	强烈 Intense	21.5	强烈 Intense

表3 土壤物理性质间的相关性分析

Table 3 Correlation analysis of soil physical properties

	土壤粉粒含量 Soil silt content	土壤砂粒含量 Soil sand content	土壤容重 Soil bulk density	土壤孔隙度 Soil porosity	土壤饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity of soil	土壤含水量 soil moisture content
土壤粘粒含量 Soil clay content	-0.74 **	-0.88 **	0.58 **	-0.40 **	-0.42 **	0.081
土壤粉粒含量 Soil silt content		0.33 **	-0.56 **	0.41 **	0.47 **	-0.23
土壤砂粒含量 Soil sand content			-0.42 **	0.27 *	0.26 *	0.045 *
土壤容重 Soil bulk density				-0.79 **	-0.48 **	0.11
土壤孔隙度 Soil porosity					0.59 **	0.041
土壤饱和导水率 Saturated hydraulic conductivity of soil						-0.32 *

注:“**”代表极显著相关($P<0.01$),“*”代表显著相关($P<0.05$)。

Note:“**” represents extremely significant correlation ($P<0.01$), “*” represents significant correlation ($P<0.05$).

3 讨论

3.1 土地利用方式对土壤有机质和全氮含量的影响

本研究发现随着土层深度增加,各土地利用方式的土壤有机质与全氮含量均有降低趋势,与朱广宇等^[14]、刘艳丽等^[15]研究结果一致。这可能是由于相比深层土壤,浅层土壤具有丰富的动植物、微生物残体,为土壤有机质的形成提供了丰富的原料,导致浅层土壤有机质含量高于深层土壤^[16]。土壤全氮与土壤有机质的分布具有显著正相关性,土

壤全氮的形成主要包括降水引入土壤的含氮化合物、土壤有机质的分解和生物固氮等过程,深层土壤中,土壤全氮形成过程微弱,造成土壤全氮含量随着土层由浅到深逐渐降低的分布格局^[16]。研究发现,土壤有机质和土壤全氮含量:果园>农田>荒地>刺槐林地,这是由于果园和农田受人为养分调控(施化肥、添加有机物料)及田间管理(耕作和灌溉)等措施影响,其土壤有机质含量显著高于荒地和刺槐地,而果园相比于农田,土壤有机质和全氮含量更高,是因为果园投入了更多的养分,土壤肥力较高,这与杨世琦等^[17]、张义等^[18]的研究结果一

致。刺槐林地 0~200 cm 土层内土壤有机质含量高于荒地,是因为相较荒地,刺槐林具有丰富的凋落物和根系作为土壤有机质的原料。但在 200~400 cm 土层,荒地土壤有机质含量高于刺槐林,这可能是由于刺槐根系较深,深层土壤养分被刺槐根系吸收,土壤有机质含量较低^[19]。

3.2 土地利用方式对土壤颗粒组成和土壤容重的影响

荒地、果园和刺槐林地土壤砂粒含量均在 0~200 cm 土层达到峰值,而粘粒含量在 200~500 cm 土层内达到峰值,这可能是由于粘粒粒径较小,易随水向土层深处运移,而砂粒粒径较大,在土壤中的运移能力较弱,易滞留在浅层土层,因此形成浅层土壤砂粒含量相对较高、深层土壤粘粒含量相对较高的分布格局^[20]。在农田土壤中,0~100 cm 土层土壤粘粒含量显著高于其他土层,这可能是由于长期耕作扰动有助于小粒径土壤颗粒形成^[21-22]。本研究发现,土壤容重与土壤颗粒组成极显著相关,农田 0~100 cm 土层土壤容重最高。这是因为小粒径土壤颗粒可填充土壤孔隙,增大土壤容重,大粒径土壤颗粒之间可形成土壤孔隙,降低土壤容重。研究发现,随着土层深度增加,4 种土地利用方式土壤容重均有上升趋势。一方面是由于压实作用随土层深度增加而增强,深层土壤因承压增大而变紧实,土壤容重增大;另一方面,浅层土壤中植被根系较多,较高的土壤有机质含量可降低土壤容重^[23-25]。

3.3 土地利用方式对土壤饱和导水率和土壤水分的影响

在 0~500 cm 土层内,果园和刺槐林地土壤饱和导水率显著高于农田和荒地,可能是由于果园和刺槐总根系生物量多于荒地,受根系影响,土壤饱和导水率显著增高,这是 0~200 cm 土层内荒地、果园、刺槐林地土壤饱和导水率均达到峰值的可能原因^[9,26]。由于农田长期单一耕作和连年旋耕,土壤中易形成紧实的犁底层,且采样期正值小麦成熟期,人为踩踏和大型收割机械作业将浅层土壤进一步压实,造成该土层土壤饱和导水率仅为 $0.02 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$,随着土层深度增加,人为干扰因素逐渐减弱,农田土壤饱和导水率显著提高。荒地和农田覆被为浅根系植物,苹果树和刺槐林地均为深根系植物,地表覆被对土壤水分运移有显著影响。果园和刺槐林地深层(400~500 cm)土壤含水量显著低于荒地和农田,土壤呈严重和强烈干燥化,这是因为深根植物在深层土壤根系生物量远大于浅根植物,其对深层土壤水分的消耗远高于浅根植物。

黄土高原土层深厚,地下水位深,水分补给困难,随着苹果树、刺槐种植年限增加,导致土壤水分长期盈亏失衡,易形成土壤干层,削弱水文循环能力,对区域生态带来不利影响。植物根系影响土壤理化性质,土壤理化性质反过来影响根系的生长发育,未来可对根系与土壤理化性质间的耦合关系进行探索,并根据区域环境特点,确定植被种类和种植年限,实现对黄土高原生态建设的有效调控^[1,10,27]。

4 结 论

通过分析长武黄土塬区不同土地利用方式 0~500 cm 土层土壤理化性质的分布特征,得出以下结论:

1) 4 种土地利用方式下 0~100 cm 土层土壤有机质、全氮含量高于深层土壤,果园和农田土壤有机质、全氮含量显著高于荒地和刺槐。

2) 土壤粘粒含量与土壤容重呈显著正相关关系,与土壤饱和导水率呈显著负相关关系;农田 0~100 cm 土层土壤粘粒含量及容重显著高于荒地、果园、刺槐土壤。

3) 果园、刺槐林地的土壤饱和导水率显著高于荒地、农田;荒地、果园、刺槐林地土壤饱和导水率在 0~200 cm 土层内达到峰值。果园和刺槐林地 400~500 cm 土层土壤含水率显著低于荒地和农田,土壤干燥化严重;荒地和农田土壤除 0~100 cm 土层外,土壤水分条件较好。

参 考 文 献:

- [1] 邵明安,贾小旭,王云强,等.黄土高原土壤干层研究进展与展望[J].地球科学进展,2016,31(1):14-22.
SHAO M A, JIA X X, WANG Y Q, et al. A review of studies on dried soil layers in the Loess Plateau[J]. Advances in Earth Science, 2016, 31(1): 14-22.
- [2] 胡良军,邵明安.黄土高原植被恢复的水分生态环境研究[J].应用生态学报,2002(08):1045-1048.
HU L J, Shao M A. Review on water eco-environment in vegetation restoration in Loess Plateau[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2002, 13(8): 1045-1048.
- [3] 谭学进,穆兴民,高鹏,等.黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响[J].中国环境科学,2019,39(2):713-722.
TAN X J, MU X M, GAO P, et al. Effects of vegetation restoration on changes to soil physical properties on the Loess Plateau[J]. China Environmental Science, 2019, 39(2): 713-722.
- [4] LI Y Y, SHAO M A. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China[J]. Journal of Arid Environments, 2006, 64(1): 77-96.
- [5] GUL S, WHALEN J K, THOMAS B W, et al. Physico-chemical properties and microbial responses in biochar-amended soils: mechanisms and future directions [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2015, 206: 46-59.

- [6] 李青华,张静,王力,等.黄土丘陵沟壑区山地苹果林土壤干化及养分变异特征[J].土壤学报,2018,55(2):503-514.
LI Q H, ZHANG J, WANG L, et al. Desiccation and nutrient status of the soil in apple orchards in Hilly-Gully Region of the Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(2): 503-514.
- [7] JIAO F, WEN Z M, AN S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. Catena, 2011, 86(2): 110-116.
- [8] 杨婷,景航,姚旭,等.黄土丘陵不同土地利用方式下土壤颗粒组成及其分形维数特征[J].水土保持研究,2016,23(3):1-5,24.
YANG T, JING H, YAO X, et al. Soil particle composition and its fractal dimension characteristics of different land uses in Loess Hilly Region[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(3): 1-5, 24.
- [9] 杨震,黄莹,余冬立.晋西北黄土丘陵区土壤饱和和导水率的空间分布特征及影响因素[J].水土保持学报,2020,34(6):178-184.
YANG Z, HUANG X, SHE D L. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in the Loess Hilly Region of northwestern Shanxi[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2020, 34(6): 178-184.
- [10] 黄亚楠,李晨曦,林国伟,等.洛川塬土壤水分特征及其对土地利用变化的响应[J].水土保持通报,2017,37(6):106-112.
HUANG Y N, LI C X, LIN G W, et al. Soil moisture characteristics and their responses to land use change on Luochuan Loess Tableland [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2017, 37(6): 106-112.
- [11] 杨轩,李娅芸,安韶山,等.宁南山区典型植物根系分解特征及其对土壤养分的影响[J].生态学报,2019,39(8):2741-2751.
YANG X, LI Y Y, AN S S, et al. Effects of typical plant root decomposition on soil nutrients in southern Ningxia[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(8): 2741-2751.
- [12] 刘贤赵,衣华鹏.渭北旱塬土壤水分空间变异性[J].山地学报,2004,22(5):521-527.
LIU X Z, YI H P. The spatial heterogeneity of soil moisture in Weiwei dry highland [J]. Journal of Mountain Science, 2004, 22(5): 521-527.
- [13] 唐国勇,高成杰,李昆.植被恢复对干热河谷退化土壤改良的影响[J].生态学报,2015,35(15):5157-5167.
TANG G Y, GAO C J, LI K. Effects of vegetation restoration on the amelioration of degraded soil in a dry-hot valley[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5157-5167.
- [14] 刘艳丽,李成亮,高明秀,等.不同土地利用方式对黄河三角洲土壤物理特性的影响[J].生态学报,2015,35(15):5183-5190.
LIU Y L, LI C L, GAO M X, et al. Effect of different land-use patterns on physical characteristics of the soil in the Yellow River delta region[J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(15): 5183-5190.
- [15] ZHU G Y, SHANGGUAN Z P, DENG L. Variations in soil aggregate stability due to land use changes from agricultural land on the Loess Plateau, China[J]. CATENA, 2021, 200: 105181.
- [16] 马祥华,焦菊英,白文娟,等.黄土丘陵沟壑区退耕地土壤养分因子对植被恢复的贡献[J].西北植物学报,2005,25(2):328-335.
MA X H, JIAO J Y, BAI W J, et al. Contribution of soil nutrient in abandoned lands to vegetation restoration in hilly and gully regions on the Loess Plateau [J]. Acta Botanica Boreali-Occidentalia Sinica, 2005, 25(2): 328-335.
- [17] 杨世琦,张爱平,杨正礼,等.黄土高原果园土壤有机质变化趋势分析--以陕西省为例[J].水土保持研究,2009,16(1):27-31.
YANG S Q, ZHANG A P, YANG Z L, et al. Study on the changing tendency of orchard soil organic matter in typical region-a case study of Shaanxi Province [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2009, 16(1): 27-31.
- [18] 张义,谢永生,郝明德,等.黄土塬面果园土壤养分特征及演变[J].植物营养与肥料学报,2010,16(5):1170-1175.
ZHANG Y, XIE Y S, HAO M D, et al. Characteristics and evolution of soil nutrients in apple orchards at the gully region of Loess Plateau [J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizers, 2010, 16(5): 1170-1175.
- [19] 王志强,刘宝元,海春兴.土壤厚度对天然草地植被盖度和生物量的影响[J].水土保持学报,2007,21(4):164-167.
WANG Z Q, LIU B Y, HAI C X. Effects of soil depth on vegetation cover and above ground biomass in east part of Inner Mongolia [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2007, 21(4): 164-167.
- [20] 邹文秀,韩晓增,陆欣春,等.不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响[J].水土保持学报,2015,29(5):187-193,199.
ZOU W X, HAN X Z, LU X C, et al. Effect of land use types on physical properties of black soil profiles [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2015, 29(5): 187-193, 199.
- [21] 王加旭,王益权,李欣,等.关中农田土壤物理状态与分析[J].干旱地区农业研究,2017,35(3):245-252.
WANG J X, WANG Y Q, LI X, et al. Evaluation of soil physical state in Guanzhong farmland [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2017, 35(3): 245-252.
- [22] 祝飞华,王益权,石宗琳,等.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[J].生态学报,2015,35(22):7454-7463.
ZHU F H, WANG Y Q, SHI Z L, et al. Effects of rotational tillage on soil physical properties and winter wheat root growth on annual double cropping area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2015, 35(22): 7454-7463.
- [23] 徐香菇,汪景宽.土壤团聚体与有机碳稳定机制的研究进展[J].土壤通报,2017,48(6):1523-1529.
XU X R, WANG J K. A review on different stabilized mechanisms of soil aggregates and organic carbon [J]. Chinese Journal of Soil Science, 2017, 48(6): 1523-1529.
- [24] 由政,姚旭,景航,等.不同演替阶段群落根系分布与土壤团聚体特征的协同变化[J].水土保持研究,2016,23(6):20-25,31
YOU Z, YAO X, JING H, et al. Coordinated variation between root distributions and soil aggregate characteristics at different successional stages [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2016, 23(6): 20-25, 31.
- [25] 熊毅,姚贤良,樊润成.土壤结构的性态研究[J].土壤学报,1965,13(4):411-417.
XIONG Y, YAO X L, FAN R W. Physical and morphological studies on soil structure [J]. Acta Pedologica Sinica, 1965, 13(4): 411-417.
- [26] 李永宁,王忠禹,王兵,等.黄土丘陵区典型植被土壤物理性质差异及其对导水特性影响[J].水土保持学报,2019,33(6):176-181,189.
LI Y N, WANG Z Y, WANG B, et al. Differences in soil physical properties of typical vegetation in Loess Hilly Region and effects on water conductivity [J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2019, 33(6): 176-181, 189.
- [27] JIA X X, SHAO M A, YU D X, et al. Spatial variations in soil-water carrying capacity of three typical revegetation species on the Loess Plateau, China [J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2019, 273: 25-35.