

## 黄土塬区土壤饱和导水率对果园还耕的响应特征

李舒怡<sup>1</sup>, 袁遥遥<sup>1</sup>, 张晨晨<sup>2</sup>, 乔江波<sup>1,4</sup>, 朱元骏<sup>1</sup>, 贾小旭<sup>3</sup>, 邵明安<sup>3</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院(水土保持研究所), 陕西 杨凌 712100; 2.陕西省林业科学院, 西安 710082; 3.中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 4.中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室, 西安 710061)

**摘要:** [目的]为探明果园还耕后土壤饱和导水率( $K_s$ )变化规律及影响因素。[方法]选取黄土塬区衰老期果园(AO)和果园不同还耕年限(2 a、4 a、6 a、10 a)农田为研究对象, 纯农田(CK)作为对照, 测定不同样地 0~200 cm 土层  $K_s$  和土壤基本性质, 利用 Pearson 相关性分析, 揭示黄土塬区  $K_s$  对果园还耕的响应特征及影响因素。[结果]随着还耕年限增加, 农田 0~200 cm 土层黏粒和粉粒质量分数平均值呈减小趋势; 砂粒质量分数平均值呈增大趋势。不同样地  $K_s$  平均值大小为  $(2.25 \pm 1.19)$  cm/h(6 a)  $>$   $(1.60 \pm 0.71)$  cm/h(AO)  $>$   $(1.49 \pm 0.29)$  cm/h(4 a)  $>$   $(1.46 \pm 0.44)$  cm/h(2 a)  $>$   $(1.40 \pm 0.40)$  cm/h(CK)  $>$   $(1.04 \pm 0.61)$  cm/h(10 a), 整体上随还耕年限的增加,  $K_s$  平均值呈先升高后降低趋势。随着土层深度增加, 不同样地  $K_s$  均呈减小趋势。0~40 cm 土层  $K_s$  影响因素是有机质质量分数, 40~100、100~200 cm 土层  $K_s$  影响因素是土壤体积分量和有机质质量分数。[结论]果园还耕显著影响  $K_s$  的时空分布特征, 且不同深度影响因素不同, 具有深度依赖性。研究结果可为黄土高原果园还耕后土壤水循环研究提供数据基础及理论依据。

**关键词:** 饱和导水率; 果园还耕; 土壤理化性质; 剖面分布; 黄土塬区

中图分类号: S157.2

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0066-07

## Response Characteristics of Soil Saturated Hydraulic Conductivity after Returning Orchard to Farmland on the Loess Plateau

LI Shuyi<sup>1</sup>, YUAN Yaoyao<sup>1</sup>, ZHANG Chenchen<sup>2</sup>, QIAO Jiangbo<sup>1,4</sup>,

ZHU Yuanjun<sup>1</sup>, JIA Xiaoxu<sup>3</sup>, SHAO mingan<sup>3</sup>

(1.College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2.Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China; 3.Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 4.State Key Laboratory of Loess and Quaternary Geology, Institute of Earth Environment, Chinese Academy of Sciences, Xi'an 710061, China)

**Abstract:** [Objective] To explore the change rule and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) after returning orchard to farmland. [Methods] Aging apple orchards (AO) and orchards with different tillage years (2 a, 4 a, 6 a, 10 a) on the Loess Plateau were selected as the research objects, and the pure farmland (CK) was used as the control. The  $K_s$  and soil basic properties of the 0—200 cm layer in different plots were measured. Pearson correlation analysis was used to analyze the response characteristics and influencing factors of  $K_s$  after returning orchard to farmland on the Loess Plateau. [Results] With the increase of returning years, the average clay and silt content in 0—200 cm soil layer of farmland showed a decreasing trend, the average sand content showed an increasing trend. The order of the mean values of  $K_s$  in different plots was  $(2.25 \pm 1.19)$  cm/h (6 a)  $>$   $(1.60 \pm 0.71)$  cm/h (AO)  $>$   $(1.49 \pm 0.29)$  cm/h (4 a)  $>$   $(1.46 \pm 0.44)$  cm/h (2 a)  $>$   $(1.40 \pm 0.40)$  cm/h (CK)  $>$   $(1.04 \pm 0.61)$  cm/h (10 a). On the whole, with the

收稿日期: 2024-06-27

修回日期: 2024-09-11

录用日期: 2024-10-13

网络首发日期(www.cnki.net): 2024-12-09

资助项目: 国家自然科学基金项目(42307412, 42377316); 中国科学院地球环境研究所黄土与第四纪地质国家重点实验室开放资助项目(SKLLQG2207); 陕西林业科技创新青年人才培养专项(SXLK2023-06-7)

第一作者: 李舒怡(1999—), 女, 硕士研究生, 主要从事旱区土壤水文过程研究。E-mail: 2022051529@nwafu.edu.cn

通信作者: 乔江波(1991—), 男, 博士, 副研究员, 主要从事土壤水环境研究。E-mail: jiangboqiao815@163.com

increase of returning years, the average value of  $K_s$  increased first and then decreased. With the increase of soil depth,  $K_s$  in different plots showed a decreasing trend. The influencing factor of  $K_s$  in the 0—40 cm soil layer was organic matter content, and the influencing factors of  $K_s$  in the 40—100 and 100—200 cm soil layers were soil bulk density and organic matter content. [Conclusion] Returning orchard to farmland significantly affected the temporal and spatial distribution characteristics of  $K_s$ , and the influencing factors were different at different depths, which were depth-dependent. The results can provide a data basis and theoretical basis for the study of soil water cycle after returning orchard to farmland on the Loess Plateau.

**Keywords:** saturated hydraulic conductivity; apple orchards returning to farmland; soil physical and chemical properties; section distribution; Loess Plateau region

Received: 2024-06-27

Revised: 2024-09-11

Accepted: 2024-10-13

Online(www.cnki.net): 2024-12-09

土壤饱和导水率( $K_s$ )是重要的土壤水力学参数<sup>[1-2]</sup>,对于理解和预测土壤水分运动和土壤侵蚀等<sup>[3]</sup>过程至关重要。明确  $K_s$  分布特征及其影响因素不仅对揭示土壤水分、溶质运移规律有重要意义,而且可为建立相关水文模型提供数据基础<sup>[4-5]</sup>。

黄土高原是我国典型的生态环境脆弱区,地下水埋深,水资源短缺,水土流失严重。自 1999 年退耕还林(草)工程实施以来,植被覆盖率显著增加,水土流失明显减少<sup>[6-7]</sup>。植被恢复过程导致  $K_s$  发生变化,目前,黄土高原植被恢复对  $K_s$  的影响进行大量研究,且取得重要进展。已有研究<sup>[8-9]</sup>表明, $K_s$  受植被根系、植被恢复措施、土地利用方式及海拔坡向等多种因素影响。王晨光等<sup>[10]</sup>研究黄土丘陵沟壑区不同根系构型草本与灌木复合时的根土性质的差异对  $K_s$  的影响表明,随着根长密度、根表面积密度的降低, $K_s$  降低;王子龙等<sup>[11]</sup>研究不同退耕年限草地  $K_s$  及其影响因素表明,随退耕年限增加, $K_s$  显著增加,土壤水稳性大团聚体和有机质质量分数是影响  $K_s$  的主要因素;许小明<sup>[12]</sup>、梁向锋等<sup>[13]</sup>研究发现,植被恢复(草地、灌木和乔木)改善土壤入渗性能,导致  $K_s$  增加;李志等<sup>[14]</sup>研究王东沟流域不同地形部位和不同土地利用方式对  $K_s$  的影响表明,沿坡面从上向下,土壤趋向黏重, $K_s$  增大,相对于草地和林地,耕地和果园  $K_s$  较小。

苹果(*Malus pumila* Mill.)由于其经济和生态效益,是黄土高原的优势树种。近年来,果园面临着老龄化严重、品种结构单一、价低滞销、投入与产出不呈正比、农村劳动力短缺等问题<sup>[15]</sup>,同时为保障国家粮食安全,黄土塬区部分衰老期的果园重新转换成农田,果树被砍伐后,留在土壤中的根系会发生腐烂,影响土壤  $K_s$ 。但目前,关于果园还耕后土壤  $K_s$  的变化尚未报道。因此,本研究以黄土高原典型塬区-长武塬区衰老期果园和果园不同还耕年限(2 a, 4 a, 6 a, 10 a)的农田为研究对象,纯农田作为对照,分析不同还耕年限农田 0~200 cm 土层  $K_s$  变化规律及影响因素,以期对黄土塬区土地利用变化下的水循环研究提供一定的科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

本研究选择在陕西长武农田生态系统国家野外科学观测研究站(35°14'N, 107°40'E)开展(图 1)。研究区位于黄土高原中南部,属暖温带半湿润大陆性季风气候,海拔 96~1 226 m,年平均降水量 584 mm,平均气温 9.1 °C,无霜期 171 d,地下水位 50~80 m。该区是黄土高原沟壑区的典型代表,塬面与沟壑分别占 35%和 65%,地带性土壤为黑垆土,母质是深厚的中壤质马兰黄土,土质均匀疏松,具有较好的透水性。年蒸发量高达 940 mm,农业属典型的旱作农业区。主要土地利用方式为农田和果园,深厚的土层和良好的物理性质,给植物生长提供有利条件。

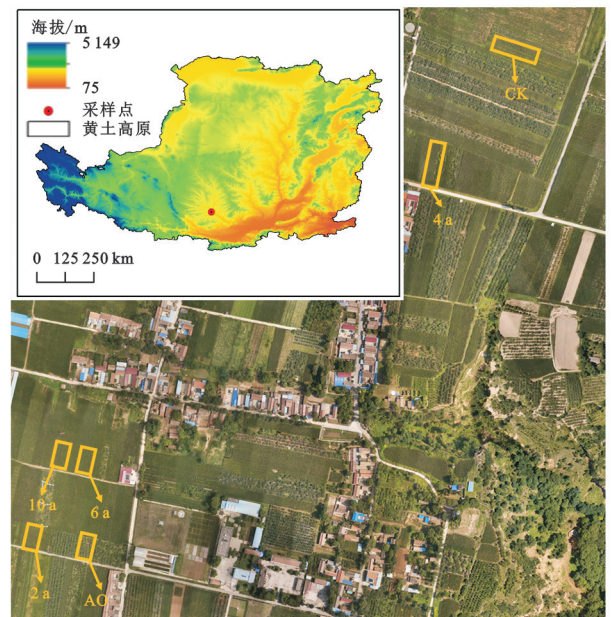


图 1 研究区位置及采样点

Fig.1 Location of the study area and distribution of the sampling points

### 1.2 样品采集

为避免地形、地貌等因素对试验结果的影响,采样点均位于平坦的塬面,且水平间距较小(图 1)。本

研究选取长武塬区衰老期果园(apple orchard, AO)和果园不同还耕年限(2 a、4 a、6 a、10 a)的农田为研究对象,纯农田(CK)作为对照。不同还耕年限农田种植作物和耕作管理措施均相同。本研究于 2023 年 10 月在 AO、果园不同还耕年限的农田和 CK 中各挖 2 个 200 cm×70 cm×200 cm 的剖面,每个剖面 0~100,100~200 cm 分别间隔 10、20 cm 采样,各土层 3 个重复,使用铝盒、自封袋采集扰动土,用环刀采集各土层的原状土,带回实验室待测。

### 1.3 室内分析

扰动土经室内风干、研磨后过 2、0.25 mm 筛,采用重铬酸钾热容量法测定有机质质量分数,采用马尔文激光粒度分析仪(Mastersizer 2 000)测定其颗粒组成,粒径划分依据国际制标准,即黏粒直径(<0.002 mm)、粉粒直径(0.002~0.02 mm)、砂粒直径(0.02~2 mm)。

采用定水头法测定  $K_s$ ,环刀法<sup>[16]</sup>测定土壤体积质量。计算公式为:

$$K_s = \frac{QL}{AtH} \quad (1)$$

式中: $K_s$  为饱和导水率,cm/h; $Q$  为环刀下方出水量,cm<sup>3</sup>; $L$  为原状土高度,近似等于环刀高度,cm; $A$  为原状土横截面面积,近似等于环刀横截面面积,cm<sup>2</sup>; $t$  为时间(h); $H$  为水头高度,cm。

$$\text{土壤体积质量} = \frac{M_1 - M_0}{V} \quad (2)$$

式中: $M_0$  为环刀质量,g; $M_1$  为环刀加干土质量,g; $V$  为环刀体积,为 100 cm<sup>3</sup>。

变异系数(coefficient of variation, CV)用来解释土壤基本性质变异程度的指标:

$$CV = \frac{s}{\bar{x}} \times 100\% \quad (3)$$

式中: $s$  为标准偏差; $\bar{x}$  为平均值; $CV < 10\%$  为弱变异; $10\% \leq CV \leq 90\%$  为中等变异; $CV > 90\%$  为高变异。

### 1.4 数据处理

利用 Microsoft Excel 2021 软件进行数据整理并计算平均值、标准偏差、变异系数等;利用 SPSS 23.0 软件进行正态分布检验,同时,使用单因素方差分析(ANOVA)果园还耕不同年限农田土壤理化性质间的差异性,使用 Pearson 相关性分析果园还耕不同年限农田土壤理化性质间的相关性;采用 Origin 2024 软件绘图。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本性质

由表 1 可知,不同样地土壤基本理化性质描述性统计特征。随着还耕年限增加,农田 0~200 cm 土层黏粒和粉粒质量分数平均值呈减小趋势( $p < 0.05$ );

砂粒质量分数平均值呈增大趋势( $p < 0.05$ );土壤体积质量和有机质质量分数平均值无明显规律。

变异系数表示变量离散程度。不同样地砂粒质量分数除 CK 接近中等变异外,其余均属于弱变异。不同样地的土壤体积质量、黏粒和粉粒质量分数均属于弱变异,有机质质量分数均属于中等变异。

Shapiro-Wilk(S-W)检验结果表明,AO、2 a、6 a 和 CK 样地土壤基本性质数据均属于正态分布;4 a 样地土壤体积质量、黏粒质量分数、砂粒质量分数和有机质质量分数数据属于正态分布,而粉粒质量分数不属于正态分布;10 a 样地土壤体积质量、砂粒质量分数和有机质质量分数属于正态分布,而黏粒质量分数和粉粒质量分数不属于正态分布,对于不符合正态分布的数据,对其进行相应转换(如对数、平方等),以便进行下一步分析。

图 2 为不同样地土壤基本性质随土层深度的变化特征。随着土层深度增加,不同样地土壤体积质量整体上均呈增加趋势,而土壤有机质质量分数整体上均呈减小趋势。不同样地土壤颗粒成分分布随土层深度增加变化特征不同,其中 10 a 和 CK 样地的黏粒和粉粒质量分数呈上升趋势,而砂粒质量分数则呈下降趋势;相比之下,AO、2 a、4 a 和 6 a 样地的黏粒和粉粒质量分数呈下降趋势,砂粒质量分数则相应上升。

### 2.2 土壤饱和导水率

表 2 为不同样地 0~200 cm 土层  $K_s$  描述性统计特征,不同样地  $K_s$  平均值大小依次为(2.25±1.19) cm/h(6 a) > (1.60±0.71) cm/h(AO) > (1.49±0.29) cm/h(4 a) > (1.46±0.44) cm/h(2 a) > (1.40±0.40) cm/h(CK) > (1.04±0.61) cm/h(10 a),整体上随还耕年限增加, $K_s$  平均值呈先升高后降低趋势,6 a 达到最大,且不同年限间差异显著( $p < 0.05$ )。不同样地的变异系数大小顺序为 58.82%(10 a)、52.97%(6 a)、44.36%(AO)、30.09%(2 a)、28.46%(CK)和 19.26%(4 a),均属于中等变异。由 Shapiro-Wilk(S-W)检验结果表明,AO、4 a、6 a、10 a 和 CK 的  $K_s$  均呈正态分布,2 a 的数据不属于正态分布,对于不符合正态分布的数据,对其进行相应转换(如对数、平方等),以便进行下一步分析。随着土层深度的增加,不同样地  $K_s$  均呈减小趋势(图 3)。

### 2.3 土壤饱和导水率的影响因素

还耕年限、土壤体积质量、土壤颗粒组成(黏粒、粉粒和砂粒质量分数)和有机质质量分数共 6 个土壤基本参数与  $K_s$  进行 Pearson 相关分析(图 4)。由于不同土层影响因素不同<sup>[4-17]</sup>,因此,将 0~200 cm 土层分为 3 层进行分析,0~40 cm(耕作层)、40~100 cm(作物根系分布密集层)<sup>[18]</sup>和 100~200 cm(剩余



土层)。0~40 cm 土层中,还耕年限、土层体积质量和土壤颗粒组成与  $K_s$  关系不显著 ( $p > 0.05$ ),有机质质量分数与  $K_s$  呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.65(图 4a)。40~100 cm 土层中,还耕年限和土壤颗粒组成与  $K_s$  关系不显著 ( $p > 0.05$ ),土层体积质量与  $K_s$  呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),相关系数为

-0.37,而有机质质量分数与  $K_s$  呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.55。100~200 cm 土层中,还耕年限和土壤颗粒组成与  $K_s$  关系不显著 ( $p > 0.05$ ),土壤体积质量与  $K_s$  呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ),相关系数为 -0.64,而有机质质量分数与  $K_s$  呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ),相关系数为 0.46。

表 1 土壤基本性质描述性统计特征

Table 1 Descriptive statistical characteristics of soil basic properties

样地	统计特征	土壤体积质量/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	有机质质量分数/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )
果园(AO)	平均值	1.36ab	27.68ab	38.00a	34.32cd	10.06a
	CV	4.19	5.35	4.69	6.98	27.98
	S-W	0.05	0.97	0.82	0.70	0.09
还耕 2 a	平均值	1.32ab	26.93b	35.33bc	37.55b	9.78a
	CV	4.06	6.53	4.28	8.12	25.48
	S-W	0.83	0.85	0.09	0.47	0.95
还耕 4 a	平均值	1.37a	28.47a	38.50a	33.04d	10.50a
	CV	4.41	4.44	4.22	7.09	14.22
	S-W	0.25	0.52	0.04	0.78	0.41
还耕 6 a	平均值	1.34ab	24.96c	33.91c	41.13a	10.34a
	CV	5.38	7.86	5.04	8.06	22.32
	S-W	0.08	0.15	0.80	0.62	0.05
还耕 10 a	平均值	1.37a	24.71c	33.91c	41.27a	7.81b
	CV	4.40	5.77	6.73	7.08	39.78
	S-W	0.73	0.02	0.01	0.21	0.08
纯农田(CK)	平均值	1.32b	27.75ab	36.18b	36.05bc	10.11a
	CV	4.49	5.80	6.95	10.40	20.29
	S-W	0.67	0.94	0.55	0.17	0.99

注:CV 为变异系数;S-W 为 Shapiro-Wilk 检验;同列不同字母表示不同样地差异显著 ( $p < 0.05$ )。下同。

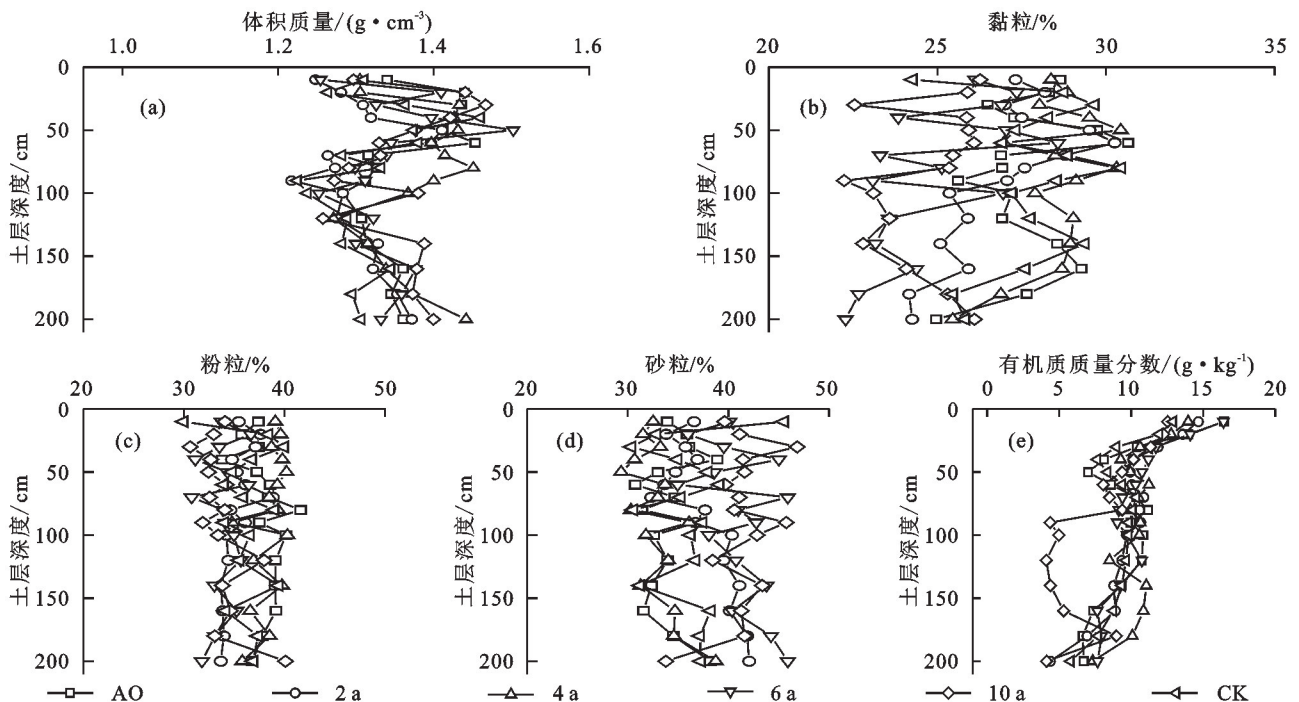


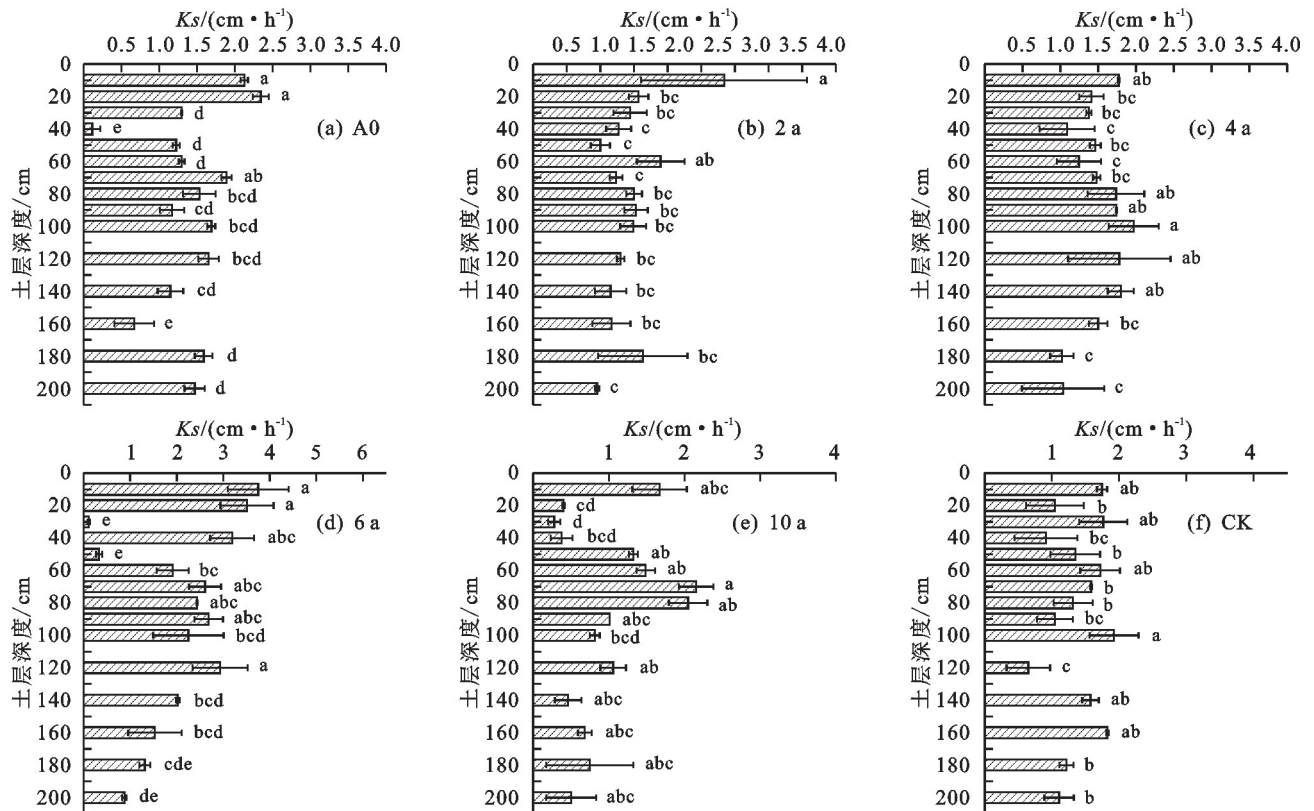
图 2 不同样地土壤基本性质垂直分布

Fig.2 Vertical distribution map of soil properties in different plots

表 2 不同样地土壤饱和和导水率描述性统计特征

Table 2 Descriptive statistical characteristics of saturated soil hydraulic conductivity in different plots

样地	最小值/ ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	最大值/ ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	平均值/ ( $\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$ )	标准偏差	变异 系数/%	偏度	峰度	S-W
AO	0.11	2.90	1.60b	0.71	44.36	-0.12	-0.05	0.93
2 a	0.95	2.84	1.46b	0.44	30.09	2.07	3.47	0.01
4 a	0.74	1.98	1.49b	0.29	19.26	-0.22	-0.96	0.58
6 a	0.11	3.95	2.25a	1.19	52.97	-0.32	-0.99	0.53
10 a	0.28	2.15	1.04c	0.61	58.82	0.50	-1.16	0.13
CK	0.65	2.18	1.40b	0.40	28.46	0.01	-0.52	0.94



注:不同小写字母表示不同土层间差异显著,  $p < 0.05$ 。

图 3 不同样地土壤饱和和导水率垂直分布

Fig.3 Vertical distribution map of saturated soil hydraulic conductivity in different plots

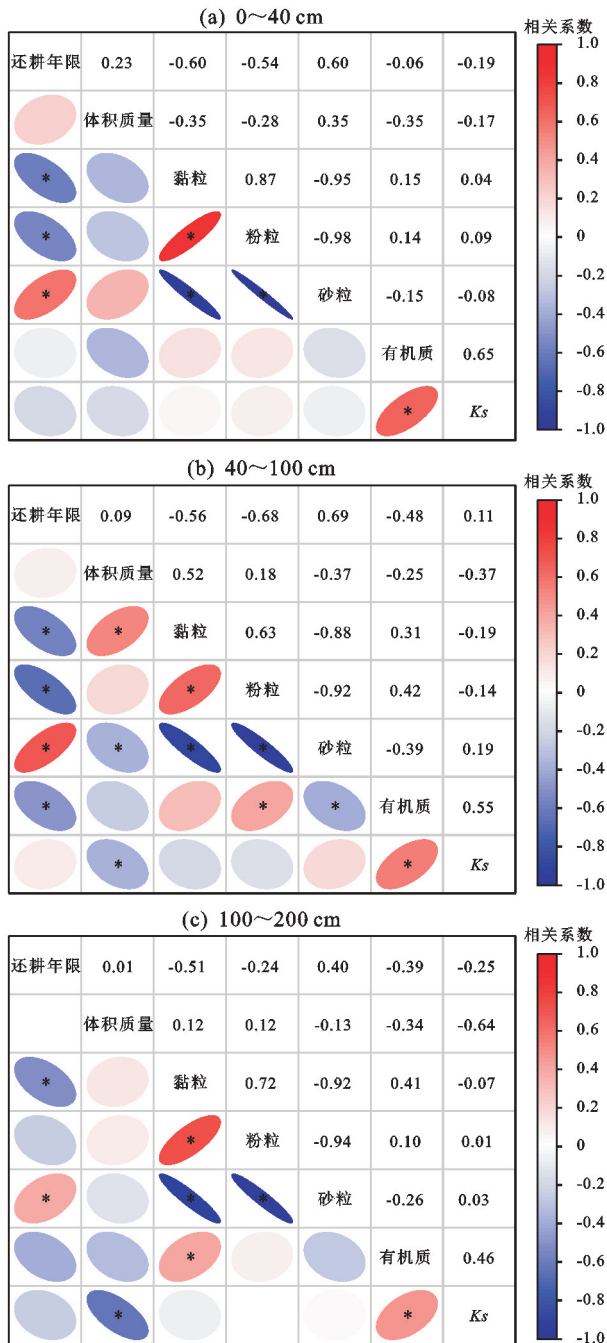
### 3 讨论

本研究得出,随着还耕年限增加,黏粒和粉粒质量分数平均值呈减小趋势,而砂粒质量分数平均值呈增大趋势。是由于土壤黏粒和粉粒由于其粒径较小,在土壤剖面中容易随降水入渗向剖面深处运移;而砂粒的粒径较大,向剖面深处运移的能力较小<sup>[19]</sup>。有研究<sup>[15]</sup>得出,果园砍伐后,深层土壤水分短时间内迅速恢复,在水分向下入渗的同时,可能导致粒径较小的黏粒和粉粒向下迁移,因此,随着还耕年限增加,黏粒和粉粒质量分数平均值呈减小趋势,砂粒质量分数平均值呈增大趋势。本研究认为,随着还耕年限增加,  $K_s$  平均值呈先升高后降低趋势,可能与果树根系的腐烂有关。果树在砍伐时主要去除地上部分和粗根,大量细根系继续留在土壤中<sup>[15]</sup>,随着时间推移,果树根系逐渐腐烂,根系腐烂

后土壤中存在较多的孔隙<sup>[20-21]</sup>,导致  $K_s$  一开始呈升高趋势。有研究<sup>[15]</sup>得出,果园砍伐后,深层土壤水分增加,在水分增加的同时,细颗粒随水分向下移动,此过程中可能堵塞由于根系腐烂形成的孔隙<sup>[19]</sup>,因此,  $K_s$  呈先升高后降低趋势。

相关性分析表明,0~40 cm 土层  $K_s$  的影响因素是土壤有机质质量分数,且与  $K_s$  呈显著正相关。杨震等<sup>[22]</sup>在黄土丘陵区的研究中也发现,土壤有机质质量分数与  $K_s$  呈显著正相关,可能是由于土壤有机质质量分数高,易形成土壤团聚体,进而使土壤结构更稳定,从而使  $K_s$  增大<sup>[23]</sup>。40~100、100~200 cm 土层  $K_s$  的影响因素是土壤体质量和有机质质量分数,其中,体质量与  $K_s$  呈显著负相关。梁向锋等<sup>[13]</sup>在黄土高原丘陵沟壑区的研究结果与本文相

同,是因为随着土壤体积质量增大,土壤中的孔隙体积逐渐减小,水分在土壤中的运动受到更多阻碍,因此  $K_s$  降低<sup>[24]</sup>。相关性分析还表明,土壤体积质量主要对 40 cm 以下土层土壤有影响,而对 40 cm 以上土层无影响。主要是由于表层土壤受到的外界影响较多,如耕作、降雨等,导致体积质量对其没有影响。



注: \* 表示  $p < 0.05$ 。

图 4 各土层土壤理化性质间 Pearson 相关系数

Fig.4 Pearson correlation coefficients between soil physical and chemical properties of each soil layer

本研究还得出,不同深度  $K_s$  影响因素不同,且具有深度依赖性。与其他研究结果相同,于冬雪等<sup>[17]</sup>在黄土区研究发现,影响 0~20 cm 土层土壤  $K_s$  的主要

因素是土壤体积质量、饱和水分体积分数、海拔、气温、田间持水量和土地利用,而影响 20~40 cm 土层土壤  $K_s$  的主要因素是黏粒质量分数、砂粒质量分数、土壤体积质量、饱和水分体积分数和土地利用。WANG 等<sup>[4]</sup>在黄土高原的研究发现,影响 0~5 cm 土层土壤  $K_s$  的主要因素是砂粒质量分数、粉粒质量分数、坡度、饱和水分体积分数、植被覆盖和土地利用,而影响 20~25 cm 土层土壤  $K_s$  的主要因素是黏粒质量分数、饱和水分体积分数、海拔、植被生长年限和土地利用。

## 4 结论

随着还耕年限增加,农田黏粒和粉粒质量分数平均值呈减小趋势;砂粒质量分数平均值呈增大趋势;随着还耕年限增加, $K_s$  平均值呈先升高后降低趋势;有机质质量分数是影响 0~40 cm 土层  $K_s$  的主要影响因素,土壤体积质量和有机质质量分数是影响 40~100、100~200 cm 土层  $K_s$  的主要影响因素。

### 参考文献:

[1] 于航,冯天骄,卫伟,等.晋西黄土区土壤理化特征对长期植被恢复的响应[J].生态学报,2024,44(7):2873-2885.  
YU H, FENG T J, WEI W, et al. Response of soil physicochemical characteristics to long-term vegetation in loess region of western Shanxi province[J].Acta Ecologica Sinica,2024,44(7):2873-2885.

[2] DUAN X Q, DENG Y S, TAO Y, et al. Variation in soil saturated hydraulic conductivity along the hillslope of collapsing granite gullies [J]. Hydrological Sciences Journal,2018,63:803-817.

[3] 王玮璐,贺康宁,张潭,等.青海高寒区水源涵养林土壤机械组成和理化性质对其饱和导水率和持水能力的影响[J].植物资源与环境学报,2020,29(2):69-77.  
WANG W L, HE K N, ZHANG T, et al. Effects of mechanical components and physical and chemical properties of soil in water conservation forests in cold highland area of Qinghai on its saturated hydraulic conductivity and water holding capacity [J].Journal of Plant Resources and Environment,2020,29(2):69-77.

[4] WANG Y Q, SHAO M A, HORTON R, et al. Regional scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J].Journal of Hydrology,2013,487(2):13-23.

[5] TOMMASO P, RENATO M, ALESSIAN F, et al. A pedotransfer function for field-scale saturated hydraulic conductivity of a small watershed[J].Vadose Zone Journal,2019,18(1):1-15.

[6] FU B J, WANG S, LIU Y, et al. Hydrogeomorphic ecosystem responses to natural and anthropogenic changes in the Loess Plateau of China[J].Annual Review of Earth and Planetary Sciences,2017,45:223-243.

- [7] 刘国彬,上官周平,姚文艺,等.黄土高原生态工程的生态成效[J].中国科学院院刊,2017,32(1):11-19.  
LIU G B, SHANGGUAN Z P, YAO W Y, et al. Ecological effects of soil conservation in Loess Plateau[J]. Bulletin of Chinese Academy Sciences, 2017, 32(1): 11-19.
- [8] 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.
- [9] GU C J, MU X M, GAO P, et al. Influence of vegetation restoration on soil physical properties in the Loess Plateau, China[J]. Nature Review Cancer, 2019, 19(2): 716-728.
- [10] 王晨光,曹文华,马波,等.不同根系构型草本与灌木复合对土壤饱和导水率的影响因素分析及模拟[J].水土保持通报,2023,43(4):10-16.  
WANG C G, CAO W H, MA B, et al. Analysis and simulation of factors affecting soil saturated hydraulic conductivity by combinations of grasses and shrub with different root configurations [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2023, 43(4): 10-16.
- [11] 王子龙,赵勇钢,赵世伟,等.退耕典型草地土壤饱和导水率及其影响因素研究[J].草地学报,2016,24(6):1254-1262.  
WANG Z L, ZHAO Y G, ZHAO S W, et al. Study on soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in typical grassland of farmland conversion[J]. Acta Agrestia Sinica, 2016, 24(6): 1254-1262.
- [12] 许小明.黄土丘陵区不同植被恢复方式的土壤生态水文效应[D].陕西 杨凌:西北农林科技大学,2022.  
XV X M. Soil ecohydrological effects of different vegetation restoration patterns in the Loess Hilly Region[D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A&F University, 2022.
- [13] 梁向锋,赵世伟,张扬,等.子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响[J].生态学报,2009,29(2):636-642.  
LIANG X F, ZHAO S W, ZHANG Y, et al. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling Forest Area [J]. Acta Ecologica Sinica, 2009, 29(2): 636-642.
- [14] 李志,刘文兆,王秋贤.黄土塬区不同地形部位和土地利用方式对土壤物理性质的影响[J].应用生态学报,2008,19(6):1303-1308.  
LI Z, LIU W Z, WANG Q X. Effects of land use type and slope position on soil physical properties in loess tableland area[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(6): 1303-1308.
- [15] 牛虎虎,赵西宁,高晓东,等.苹果园改种粮食作物渭北旱塬深层土壤水氮变化特征[J].生态学报,2023,43(14):5926-5936.  
NIU H H, ZHAO X N, GAO X D, et al. Variation characteristics of the deep soil water and nitrogen in orchards in Weibei dry plateau after replanting food crops[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(14): 5926-5936.
- [16] 中国科学院南京土壤研究所物理研究室.土壤物理性质测定[M].北京:科学出版社,1978:25-26.  
Institute of Soil Science, Chinese Academy of Sciences. Measurement of physical properties of soil[M]. Beijing: Science Press, 1978: 25-26.
- [17] 于冬雪,贾小旭,黄来明.黄土区不同土层饱和导水率空间变异与影响因素[J].土壤通报,2018,49(5):1073-1079.  
YU D X, JIA X X, HUANG L M. Spatial variation and influencing factors of saturated hydraulic conductivity in different soil layers of the loess area[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2018, 49(5): 1073-1079.
- [18] LIU Z Q, JIA G D, YU X X. Water uptake and WUE of apple tree-corn agroforestry in the loess hilly region of China [J]. Agricultural Water Management, 2020, 234: e106138.
- [19] TRANTER G, minASNY B, MCBRATNEY A B, et al. Building and testing conceptual and empirical models for predicting soil bulk density[J]. Soil Use and Management, 2007, 23(4): 437-443.
- [20] WU G L, LIU Y, YANG Z, et al. Root channels to indicate the increase in soil matrix water infiltration capacity of arid reclaimed mine soils [J]. Journal of Hydrology, 2017, 546: 133-139.
- [21] GUO L, LIU Y, WU G L, et al. Preferential water flow: Influence of alfalfa (*Medicago sativa* L.) decayed root channels on soil water infiltration [J]. Journal of Hydrology, 2019, 578: e124019.
- [22] 杨震,黄萱,余冬立.晋西北黄土丘陵区土壤饱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.
- [23] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J].土壤,2019,51(2):381-389.  
MAO N, HUANG L M, SHAO M A. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region[J]. Soils, 2019, 51(2): 381-389.
- [24] 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.  
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.