

DOI:10.13870/j.cnki.stbxb.2024.06.008

彭心,倪玲珊,纪柯言,等.黄土高原梯田土壤饱和导水率长期变化及其影响因素[J].水土保持学报,2024,38(6):122-129.

PENG Xin, NI Lingshan, JI Keyan, et al. The long-term variations and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in terraces on the Loess Plateau[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2024, 38(6): 122-129.

## 黄土高原梯田土壤饱和导水率长期变化及其影响因素

彭心<sup>1</sup>, 倪玲珊<sup>1,2</sup>, 纪柯言<sup>3</sup>, 戴伟<sup>1</sup>, 王卓霄<sup>1</sup>, 常恒<sup>1</sup>, 方怒放<sup>1,2</sup>

(1.西北农林科技大学水土保持科学与工程学院,陕西 杨凌 712100;2.中国科学院水利部

水土保持研究所,黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室,陕西杨凌

712100;3.西北农林科技大学水利与建筑工程学院,陕西 杨凌 712100)

**摘要:** [目的] 探究黄土高原梯田土壤饱和导水率( $K_s$ )的长期变化及其主控因素。[方法] 选取农田、果园及草地 3 种土地利用类型的梯田,以坡面为对照,采集坡面及修筑年限为 7, 20, 30, 40 年梯田的土壤样品,测定  $K_s$  及土壤理化性质。使用 Kruskal-Wallis  $H$  检验、Spearman 相关性分析、偏最小二乘路径模型 (PLS-PM) 分析修筑梯田对  $K_s$  的影响、 $K_s$  随时间的变化及其影响因素。[结果] (1) 不同利用类型梯田  $K_s$  随修筑年限增加表现出不同的规律。7, 20, 30, 40 年农田  $K_s$  持续增长,从 0.18 mm/min 增加至 0.28 mm/min, 增长率为 55.56%。果园  $K_s$  先增加,30 年后出现下降趋势,其中 30 年果园  $K_s$  显著高于 7 年果园  $K_s$ , 从 0.12 mm/min 增加至 0.35 mm/min, 增长率为 191.67%。草地  $K_s$  先增加,20 年后则保持相对稳定,其中 20 年草地  $K_s$  显著高于 7 年草地  $K_s$ , 从 0.14 mm/min 增加至 0.31 mm/min, 增长率为 121.43%。(2) 影响  $K_s$  的主要因素为土壤粒径分布、土壤质量密度、团聚体平均重量直径,其路径系数分别为 -0.431, -0.561, 0.226。[结论] 梯田利用类型对土壤性质影响程度的差异导致梯田  $K_s$  随修筑年限的增加呈现不同规律,研究结果可为梯田后续管理及发展高效旱作农业提供依据。

**关键词:** 土壤饱和导水率; 梯田; 黄土高原; 土地利用

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2024)06-0122-08

## The Long-term Variations and Influencing Factors of Soil Saturated Hydraulic Conductivity in Terraces on the Loess Plateau

PENG Xin<sup>1</sup>, NI Lingshan<sup>1,2</sup>, JI Keyan<sup>3</sup>, DAI Wei<sup>1</sup>, WANG Zhuoxiao<sup>1</sup>, CHANG Heng<sup>1</sup>, FANG Nufang<sup>1,2</sup>

(1. College of Soil and Water Conservation Science and Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences and Ministry of Water Resources, State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Yangling, Shaanxi 712100, China;

3. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

**Abstract:** [Objective] The long-term variations of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and its primary controlling factors in terraces on the Loess Plateau were explored. [Methods] Terraces were selected for three land use types, i.e. farmland, orchard, and grassland, with slope designated as the control. Soil samples were collected from slopes and terraces with construction ages of 7, 20, 30 and 40 years to determine the  $K_s$  and soil physicochemical properties. The Kruskal-Wallis  $H$  test, Spearman correlation analysis, and partial least squares path model (PLS-PM) were conducted to examine the impact of terrace construction on  $K_s$  and its temporal variations, as well as the influencing factors. [Results] (1) The  $K_s$  of terraces under different land use types exhibited varying patterns with increasing ages of terrace construction. The  $K_s$  of farmland increased continuously with construction age of 7, 20, 30 and 40 years, increasing from 0.18 mm/min to 0.28 mm/min, with a growth rate of 55.56%. The  $K_s$  of orchard increased with the increase of construction years

收稿日期: 2024-06-14

修回日期: 2024-07-11

录用日期: 2024-07-20

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-10-30

资助项目: 国家自然科学基金项目 (42107361); 大学生创新创业训练计划项目 (X202310712311)

第一作者: 彭心 (2000—), 男, 在读硕士研究生, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: pengx@nwfufu.edu.cn

通信作者: 倪玲珊 (1984—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事土壤侵蚀研究。E-mail: lsni@ms.iswc.ac.cn

<http://stbxb.alljournal.com.cn>

firstly, then showed a decreasing trend after 30 years, and the  $K_s$  of orchard with a construction age of 30 years was significantly higher than that of orchard with a construction age of 7 years, increasing from 0.12 mm/min to 0.35 mm/min, with a growth rate of 191.67%. The  $K_s$  of grassland increased with the increase of construction years firstly, then remained relatively stable after 20 years, and the  $K_s$  of grassland with a construction age of 20 years was significantly higher than that of grassland with a construction age of 7 years, increasing from 0.14 mm/min to 0.31 mm/min, with a growth rate of 121.43%. (2) The primary factors influencing  $K_s$  included soil particle size distribution, soil bulk density, and mean weight diameter of aggregates, with the path coefficients being  $-0.431$ ,  $-0.561$  and  $0.226$ , respectively. [Conclusion] The variation in the impact of terrace land use types on soil properties resulted in varying patterns of  $K_s$  with increasing ages of terrace construction. The results can provide a basis for the subsequent management of terraces and the development of efficient dryland farming.

**Keywords:** soil saturated hydraulic conductivity; terrace; the Loess Plateau; land use

Received: 2024-06-14

Revised: 2024-07-11

Accepted: 2024-07-20

Online(www.cnki.net): 2024-10-30

土壤饱和导水率( $K_s$ )是指土壤处于饱和状态下,单位水势梯度单位时间内通过单位面积的水量。它能够反映土壤入渗能力,影响着降雨的重新分配和地表径流的形成。 $K_s$ 受土地利用、土壤质地等因素影响,是模拟土壤溶质运移及水分运动的重要水文参数,也是常用生态水文模型(如 SWAT 模型、InHM 模型、TOPMODE 模型等)中最重要的基本参数之一<sup>[1-3]</sup>,因此研究  $K_s$  动态变化对于生态水文调控、水资源管理及农业生产具有十分重要的意义。

梯田在兼备水土保持功能的同时还能够有效增加耕地面积<sup>[4]</sup>,是世界上应用最为广泛的水土保持措施之一<sup>[5]</sup>。我国黄土高原地区实施大规模的梯田建设,至 2019 年黄土高原梯田面积约为  $9.02 \times 10^4$  km<sup>2</sup>,占黄土高原总面积的 13.90%<sup>[6]</sup>,梯田建设为防治水土流失做出重要贡献<sup>[7]</sup>。《关于加强新时代水土保持工作的意见》<sup>[8]</sup>及《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》<sup>[9]</sup>中均提出,要推进黄土高原旱作梯田建设,加强雨水集蓄利用,发展高效旱作农业。预计到 2030 年,黄土高原地区将新修约  $2.61 \times 10^4$  km<sup>2</sup> 梯田<sup>[10]</sup>。由于农业劳动力流失、农业政策调整等原因,除种植粮食作物外,苹果作为黄土丘陵沟壑区经济发展的支柱产业,大量梯田被用于发展经济果木,而部分耕作机械化程度低的梯田被撂荒转变为草地,使得该地区梯田利用类型呈现多样化<sup>[11-12]</sup>。梯田修筑过程对土壤存在剧烈扰动,使土壤条件发生改变,同时梯田在后续使用中,土壤性质也发生变化<sup>[13]</sup>,进而影响土壤的水分运动过程,改变  $K_s$  特征。

已有学者对区域<sup>[14-16]</sup>、流域<sup>[17-18]</sup>及坡面<sup>[19-20]</sup>等不同尺度  $K_s$  的分布及其影响因素进行研究,土壤性质差异引起  $K_s$  变化<sup>[21]</sup>,包括土壤孔隙、土壤质

量密度、土壤团聚体等。此外,植物类型、根系等因素也对  $K_s$  存在影响<sup>[22-23]</sup>。目前关于  $K_s$  的研究更多集中在  $K_s$  水平或垂直方向上的空间分布,修筑梯田对  $K_s$  的影响及  $K_s$  随时间变化的研究尚未得到关注,梯田修筑后  $K_s$  的长期变化规律尚不明晰。在主流水文模型应用中, $K_s$  取值均没有考虑梯田土壤性质的长时间变化特征,可能带来较大误差。因此,本研究选取黄土高原丘陵沟壑区典型小流域,采集不同修筑年限梯田的表层土壤,揭示梯田  $K_s$  随修筑年限的变化过程,探究影响  $K_s$  的主要因素,结果可为梯田后续管理和发展高效旱作农业提供依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于黄河中游无定河流域内的沙堰沟小流域(图 1),地理坐标  $37^{\circ}54'28''$ — $37^{\circ}55'02''$ N,  $110^{\circ}08'59''$ — $110^{\circ}09'39''$ E。地貌类型属典型黄土丘陵沟壑区,流域面积 0.69 km<sup>2</sup>,海拔 1 024~1 124 m。气候类型为半干旱大陆性季风气候,年平均降水量 451 mm。流域内主要从事农业活动,经调查走访当地农民,得知流域内耕作方式多为传统耕作,每年耕作前对表层土壤进行翻耕。梯田在流域内分布广泛,主要利用类型为农田、果园及草地,主要农作物包括大豆(*Glycine max* (L.) Merr.)、马铃薯(*Solanum tuberosum* L.)、玉米(*Zea mays* L.)、苹果(*Malus pumila* Mill.)、杏(*Prunus armeniaca* L.)等,流域典型植被类型有紫花苜蓿(*Medicago sativa* L.)、铁杆蒿(*Artemisia gmelinii* Weber ex Stechm.)等。研究团队长期在该流域进行定位观测和野外试验,已积累大量的气象、土地利用、农业活动等资料。

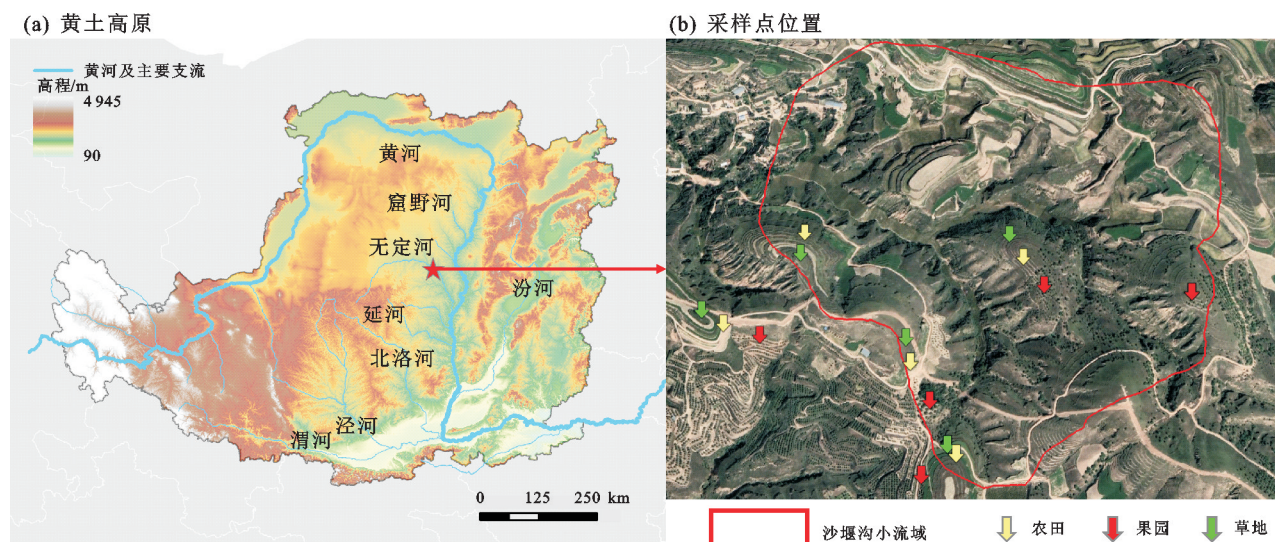


图 1 研究区及采样点位置

Fig.1 Location of the study area and sampling sites

## 1.2 土壤样品采集及性质测定

选择农田、果园及草地 3 种土地利用类型的梯田,将相应利用类型的坡面设置为对照,梯田修筑年限分别为 7,20,30,40 年(分别于 2015 年,21 世纪 00 年代初,20 世纪 90 年代初,20 世纪 80 年代初修筑),样地详情见表 1(以下使用简称,如  $n$  年农田表示的是修筑年限为  $n$  年且利用类型为农田的梯田,果园、草地亦同)。在选择样地时尽量选择坡向、坡度相近的样地,农作物尽量保持一致,以控制其他因素带来的影响。每个样地在上、中、下层共选择 3 个地块,尽量选择平整均匀的地块,每个地块沿对角线选择 3 个采样点。在合适的土壤湿度下进行采样,具体表现为土不粘锹、经接触不变形时采集。

采集样品前,先去除土壤表面的植被覆盖,小心地将土壤表面整平,使用  $100\text{ cm}^3$  标准环刀采集表层原状土样(0—5 cm)。随后使用铁锹在半径 10 cm 范围内收集土样,注意不要使土块受挤压,小心剥去直接与铁锹接触而变形的土壤,均匀地取内部保持原先结构状态的土壤约 2 kg,置于不易变形的硬质塑料盒中。于 2022 年 9 月采集 270 个土壤样品,其中环刀原状土样、盒装原状土样各 135 个。

盒装原状土样在自然状态下风干,待干燥后沿土壤自然结构小心剥开,避免受到机械压力变形,剥成 10 mm 左右的小土块,去除植物根系及石块,取部分风干土样混合均匀,用于测定土壤粒径分布(PSD)及土壤有机质含量(SOM),其余用于测定土壤团聚体。使用湿筛法测定团聚体平均重量直径(MWD),作为团聚体水稳性指标;土壤有机质的测定采用重铬酸钾氧化-外加加热法<sup>[24]</sup>;土壤粒径分布使用激光粒度仪测定。根据美国

农业部土壤质地分类标准,研究采集的土壤类型为砂质壤土和粉质壤土。环刀土样用于测定土壤质量密度( $BD$ )、土壤饱和含水量( $SWC$ )、田间持水量( $FC$ )及土壤总孔隙度( $TP$ )<sup>[25]</sup>。将环刀置于平底托盘中,使水位维持在环刀上沿,静置 12 h 使土壤饱和,称重( $m_1, \text{g}$ ),所有称重过程包含环刀及环刀盖,随后使用恒定水头法测定  $K_s$ 。在  $K_s$  测定完成后,将土样放置在铺有细干砂的托盘中,静置 48 h,称重( $m_2, \text{g}$ ),随后将土样置于  $105\text{ }^\circ\text{C}$  的烘箱中烘干至恒重( $m_3, \text{g}$ ),然后将土样倒出,环刀清洗干净并风干,获取空环刀重( $m_4, \text{g}$ )。

各指标计算公式为:

$$\text{MWD} = \sum_{i=1}^n x_i \omega_i \quad (1)$$

$$\text{SWC} = \frac{m_1 - m_3}{m_3 - m_4} \quad (2)$$

$$\text{FC} = \frac{m_2 - m_3}{m_3 - m_4} \quad (3)$$

$$\text{BD} = \frac{m_3 - m_4}{V} \quad (4)$$

$$\text{TP} = 1 - \frac{\text{BD}}{\text{PD}} \quad (5)$$

$$K_s = 10 \times \frac{QL}{STH} \quad (6)$$

式中:  $\text{MWD}$  为团聚体平均重量直径( $\text{mm}$ );  $\text{BD}$  为土壤质量密度( $\text{g}/\text{cm}^3$ );  $K_s$  为土壤饱和导水率( $\text{mm}/\text{min}$ );  $\text{SWC}$  为土壤饱和含水量(无量纲);  $\text{FC}$  为田间持水量(无量纲);  $\text{TP}$  为土壤总孔隙度(无量纲);  $x_i$  为每一粒级团聚体的平均直径( $\text{mm}$ );  $\omega_i$  为每个粒级团聚体的重量百分含量;  $V$  为环刀容积( $100\text{ cm}^3$ );  $\text{PD}$  为土壤密度,指单位体积土壤(不含孔隙)的烘干

重量,通常取常数  $2.65 \text{ g/cm}^3$ ;  $Q$  为通过饱和土芯横截面的水的体积( $\text{cm}^3$ );  $L$  为饱和土芯厚度( $\text{cm}$ );  $S$  为饱和土芯的横截面积( $\text{cm}^2$ );  $T$  为透过  $Q$  水量所需的时间( $\text{min}$ );  $H$  为总水势差( $\text{cm}$ )。

表1 样地基本信息

Table 1 Basic information of the sample plots

土地利用类型	梯田修筑年限/a	高程/m	坡向	植被类型	管理措施
农田	坡地	1 079	东南	马铃薯、玉米	每年耕作前对土壤进行翻耕,作物成熟后全株收获
	7	1 016	西		
	20	1 074	西北		
	30	1 054	西北		
	40	1 070	东南		
果园	坡地	1 075	北	苹果、杏	7年果园管理维护细致,20年果园疏于管理,30,40年果园无人管理
	7	1 048	东		
	20	1 068	西南		
	30	1 087	西北		
	40	1 088	东		
草地	坡地	1 082	西南	苜蓿、铁杆蒿等	不适宜机械化耕作,位置较为偏僻,处于废弃状态,无人管理
	7	1 047	北		
	20	1 073	西北		
	30	1 072	北		
	40	1 072	南		

### 1.3 数据处理与统计分析

使用描述性统计分析梯田土壤理化性质及  $K_s$  的变化,使用 Shapiro-Wilk 检验判断数据正态性,使用 Kruskal-Wallis  $H$  检验进行土壤理化性质及  $K_s$  的多重比较,分析各种利用类型梯田土壤理化性质及  $K_s$  在坡面及不同修筑年限之间的差异性,显著性水平设置为 0.05。采用 Spearman 相关性分析判断  $K_s$  与土壤理化性质的相关性,构建偏最小二乘路径模型(PLS-PM)识别  $K_s$  的主要影响因素。模型中路径系数的绝对值表示影响程度,绝对值越大表明自变量对因变量的影响程度越高,使用拟合优度来评价模型的可靠性,当拟合优度  $> 0.7$  时,认为模型效果优良。使用 Excel 2019 软件完成数据整理,使用 SPSS 27.0 软件进行数据统计分析,借助 R 4.3.3 软件中“plsrm”包构建偏最小二乘路径模型。

## 2 结果与分析

### 2.1 不同利用类型梯田土壤理化性质的时间变化

由图 2 可知,相较于果园及草地,农田土壤理化性质随梯田修筑年限变化较小。果园及草地土壤质量密度随梯田修筑年限增加呈下降趋势,其中 30 年果园( $1.28 \text{ g/cm}^3$ )显著低于 7 年果园( $1.42 \text{ g/cm}^3$ ),20 年草地( $1.23 \text{ g/cm}^3$ )显著低于 7 年草地( $1.35 \text{ g/cm}^3$ ),而农田土壤质量密度在各修筑年限之间不存在显著差异。

农田、果园、草地团聚体平均重量直径随修筑年限增加均呈先上升后下降的变化规律,其中 30 年果

园( $1.36 \text{ mm}$ )显著大于 7 年果园( $0.37 \text{ mm}$ ),30 年后出现下降趋势;20 年草地( $1.43 \text{ mm}$ )显著大于 7 年草地( $0.36 \text{ mm}$ ),20 年后出现下降趋势;农田在 20 年后出现下降趋势,但各年限之间差异不显著。土壤粒径分布随梯田修筑年限增加没有表现出明显的变化规律。坡面农田及坡面果园土壤粒径分布与梯田相比,表现出较高的砂粒含量、较低的粉粒含量及黏粒含量。草地土壤粒径分布相对一致,土壤砂粒含量、粉粒含量及黏粒含量在不同修筑年限之间没有表现出显著差异。随修筑年限增加,田间持水量、土壤饱和含水量、总孔隙度、有机质含量整体呈上升趋势。

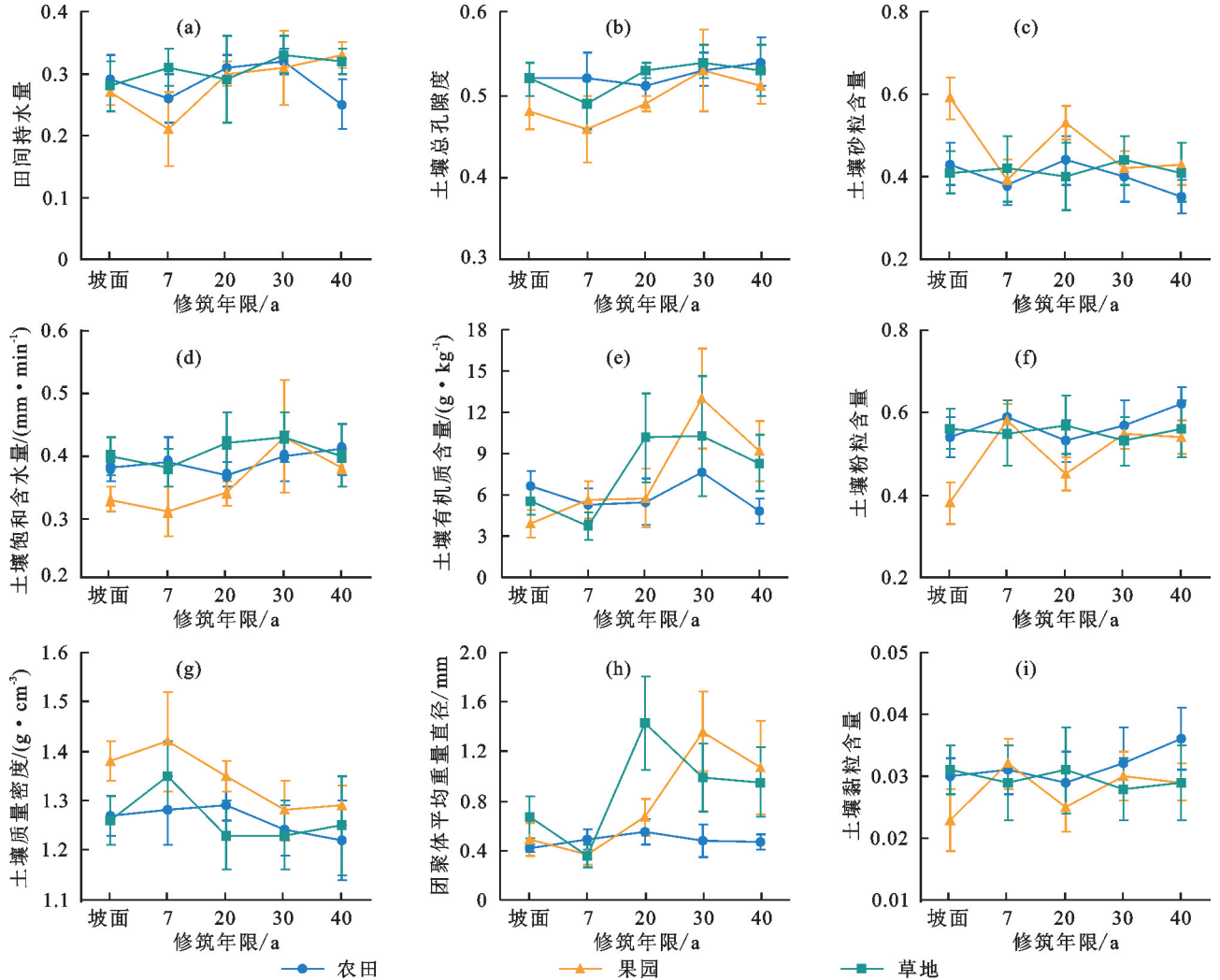
### 2.2 不同利用类型梯田土壤饱和导水率的时间变化

不同利用类型梯田  $K_s$  具体变化见图 3。将坡面修筑为梯田造成  $K_s$  显著降低,7 年农田、果园、草地  $K_s$  均显著低于相应利用类型的坡面  $K_s$  ( $p < 0.05$ ),其中农田  $K_s$  从  $0.30 \text{ mm/min}$  降低至  $0.18 \text{ mm/min}$ ,果园  $K_s$  从  $0.36 \text{ mm/min}$  降低至  $0.12 \text{ mm/min}$ ,草地  $K_s$  从  $0.28 \text{ mm/min}$  降低至  $0.14 \text{ mm/min}$ ,分别降低 40.00%,66.67%,50.00%。

不同利用类型梯田  $K_s$  随修筑年限增加表现出不同的规律。7,20,30,40 年农田  $K_s$  持续增长,从  $0.18 \text{ mm/min}$  增加至  $0.28 \text{ mm/min}$ ,增长率为 55.56%,但增长程度并不显著。果园  $K_s$  先随修筑年限的增加而增长,30 年后则出现下降趋势,其中 30 年果园  $K_s$  显著高于 7 年果园  $K_s$ ,从  $0.12 \text{ mm/min}$  增加至  $0.35 \text{ mm/min}$ ,增长率为 191.67%。草地  $K_s$  先随修筑年限的增加而增长,20 年后维持在一定水平内,保持相

对稳定,不发生显著变化,其中 20 年草地  $K_s$  显著高于 7 年草地  $K_s$ ,从 0.14 mm/min 增加至 0.31 mm/min,增长率为 121.43%。对于修筑年限为 30 年、20 年及 7 年的梯田,不同土地利用类型  $K_s$  之间存在显

著差异( $p < 0.05$ ),其中 30 年及 20 年梯田均表现为农田 < 果园 < 草地,7 年的梯田则表现为农田 > 草地 > 果园。梯田修筑完成后,草地  $K_s$  最先恢复至原先水平,果园次之,农田最慢。



注:标记点与误差棒分别表示平均值和标准差。下同。

图 2 不同利用类型梯田土壤理化性质随修筑年限的变化

Fig.2 The variation in the soil physicochemical properties of terraces under different land uses over the ages of construction

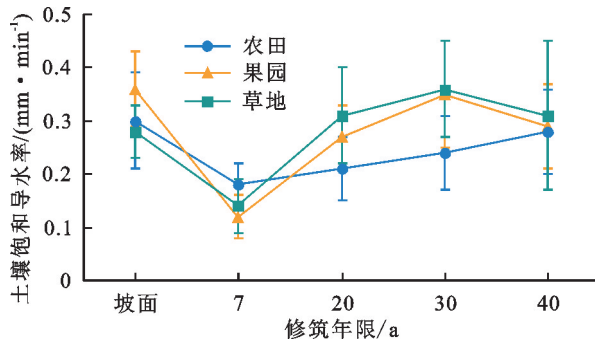


图 3 不同利用类型梯田  $K_s$  随修筑年限的变化

Fig.3 The variation in  $K_s$  of terraces under different land uses over the ages of construction

### 2.3 饱和导水率主要影响因素

由图 4 可知,土壤质量密度、土壤粉粒含量与  $K_s$

呈显著负相关,田间持水量、土壤饱和含水量、土壤总孔隙度、土壤有机质含量、团聚体平均重量直径、土壤砂粒含量与  $K_s$  呈显著正相关。土壤质量密度与土壤饱和含水量、土壤质量密度与土壤总孔隙度、土壤总孔隙度与土壤饱和含水量、土壤粒径含量之间的相关系数绝对值均  $> 0.8$ ,表现出高度的相关性,表明土壤性质之间可能存在相互作用而影响到  $K_s$ 。

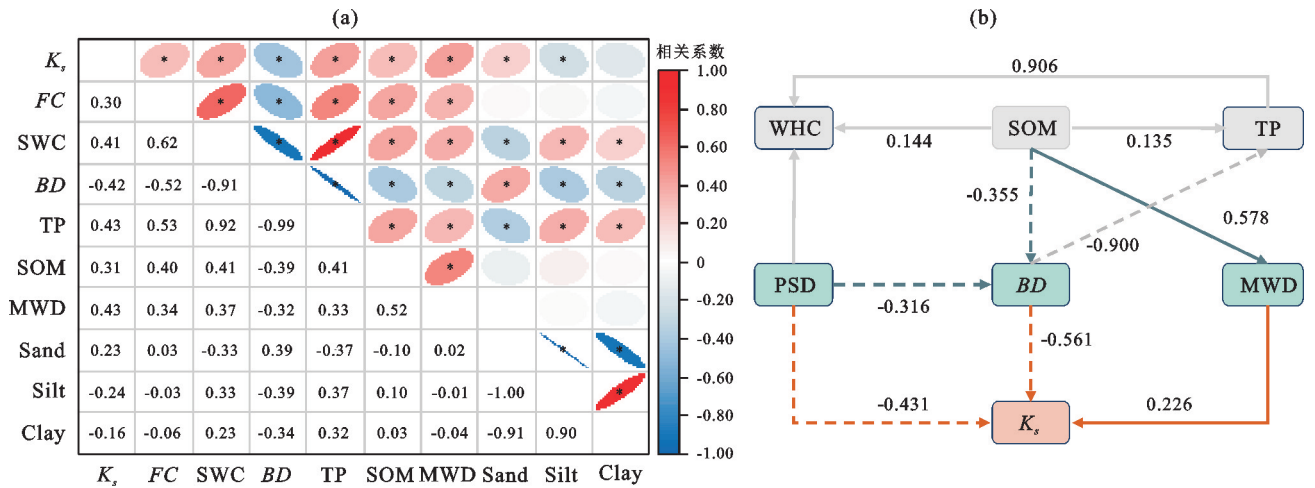
为了探究影响  $K_s$  的主要因素,使用偏最小二乘路径模型明晰土壤理化性质对  $K_s$  的影响路径。模型的拟合优度为 0.703,说明结果可靠。土壤粒径分布、土壤质量密度及团聚体平均重量直径直接显著影响  $K_s$ ,其路径系数分别为  $-0.431, -0.561, 0.226$ ,其中土壤粒径分布、土壤质量密度对  $K_s$  的影响为负效应,

团聚体平均重量直径对  $K_s$  的影响为正效应。土壤有机质是影响  $K_s$  的间接因素,其通过影响土壤质量密度及团聚体平均重量直径而间接影响  $K_s$ 。

### 3 讨论

#### 3.1 不同利用类型梯田土壤饱和和导水率随修筑年限的变化

本研究表明,不同利用类型使土壤性质发生不同的变化,使梯田  $K_s$  随修筑年限增加表现出不同变化规律。土地利用方式是人类活动与自然相互作用的体现,通过影响土壤结构、土壤质量等性质,进而导致土壤导水性能发生变化<sup>[17]</sup>。



注: Sand、Silt、Clay 分别为土壤砂粒、粉粒、黏粒含量; \* 表示存在显著相关性 ( $p < 0.05$ ); 图(b)为土壤理化性质对  $K_s$  的影响路径,其中 WHC 表示土壤持水能力,包括田间持水量及土壤饱和含水量;图中实线表示正效应,虚线表示负效应,线旁数字表示路径系数,箭头指向为因变量,所示路径均通过显著性检验 ( $p < 0.05$ )。

图 4 土壤理化性质与  $K_s$  的 Spearman 相关性及其影响路径

Fig.4 The spearman correlations between soil physicochemical properties and  $K_s$  and the influence path diagram

梯田的修筑过程中涉及大量的挖填方,使深层土壤裸露于地表,而表层土壤被掩埋,以往研究<sup>[19,21]</sup>表明,随着土层深度增加, $K_s$ 显著降低。梯田修筑过程中还存在机械碾压,土壤被压实,因此修筑梯田导致表层  $K_s$  显著降低。坡改梯后初期,农田翻耕使土壤质量密度迅速降低,低于果园及草地,而果园进行施肥、除草等管理维护,林下植被较为稀疏,草地则几乎不受人为扰动,因此果园及草地土壤性质的变化更多受到植被的影响。草地植被(苜蓿、铁杆蒿等)根系比苹果根系更浅,更易影响到表层土壤。但是当前阶段植被对土壤的改善作用尚不明显,徐远慧等<sup>[26]</sup>的研究证实,在退耕 5 年后土壤入渗能力没有显著提升,因此 7 年梯田  $K_s$  表现为农田 > 草地 > 果园。中期阶段,农田每年重复进行翻耕,耕作活动使土壤质量密度在不同修筑年限之间保持相对稳定。耕作过程中的机械应力使团聚体破碎,破坏土壤结构,不利于土壤团聚体形成<sup>[27]</sup>,因此农田  $K_s$  增长缓慢。在此阶段,植被显著改善土壤结构,导致土壤饱和和导水率迅速增加。一方面植物根系生长过程中,形成连通性良好的大孔隙通道,直接使  $K_s$  增加<sup>[28]</sup>;另一方面,植物向土壤输入更多的有机质,促进土壤团聚体形成,改善土壤结构,进而使  $K_s$  增加<sup>[22]</sup>。因此,20,30 年梯田

$K_s$  表现为草地 > 果园 > 农田。20 年后,草地植被发育处于相对稳定的状态,植物增加土壤团聚体,改善土壤孔隙状况及改善土壤结构的作用有限<sup>[27]</sup>,使得  $K_s$  保持相对稳定。30 年后,果园  $K_s$  出现下降趋势,这是因为苹果树在生长过程需要吸收土壤中的养分,QIAN 等<sup>[29]</sup>研究发现,随苹果种植年限增加,土壤养分及微生物活性出现先升高后降低的趋势。管理缺失后土壤中养分无法得到有效补充,进而降低土壤微生物活性,土壤有机质含量下降,导致土壤结构变差。随着苹果树龄的增加,其根系老化,根系活力下降,对土壤性质改善能力减弱,使  $K_s$  在 30 年后出现下降趋势。

#### 3.2 土壤饱和和导水率的主要影响因素

土壤质量密度、土壤粒径分布、团聚体平均重量直径为梯田  $K_s$  的主控因素。土壤质量密度能够反映土壤的松紧度及透水透气性<sup>[19]</sup>,果园及草地土壤质量密度随着修筑年限增加呈现降低趋势,土壤变得更为疏松,土壤通透性增强,导致  $K_s$  增加。土壤粒径分布对  $K_s$  的影响与土壤固结和封闭过程密切相关<sup>[22]</sup>,通常粗颗粒含量高的土壤对应较高的  $K_s$ ,细颗粒含量高的土壤对应较低的  $K_s$ <sup>[30]</sup>,这是因为粗颗粒有利于土壤大孔隙通道的形成,水流动阻力小使  $K_s$  增加,细颗粒易使土壤板结或堵塞土壤中的孔隙通道而对  $K_s$  起抑制

作用<sup>[17]</sup>,本研究土壤粉粒含量整体高于砂粒含量, $K_s$ 与粉粒含量呈负相关,与砂粒含量呈正相关,使土壤粒径分布对 $K_s$ 影响呈负效应。土壤团聚体是土壤结构组成的基本单元,是构建土壤孔隙网络的基础<sup>[31]</sup>。王子龙等<sup>[32]</sup>研究发现,每增加 1 个单位水稳性大团聚体含量,土壤饱和导水率提高 2.4%。果园及草地受到植被影响,随着年限增加,团聚体数量增加,团聚体稳定性提升,改善土壤结构,使 $K_s$ 显著提升。

## 4 结论

本研究选取黄土高原不同利用类型不同修筑时间的梯田,分析 $K_s$ 的时间变化发现,修筑梯田导致 $K_s$ 下降,在后续利用过程中,不同利用类型使土壤性质发生不同的变化,进而使梯田 $K_s$ 表现出不同的变化规律。7,20,30,40 年农田 $K_s$ 持续缓慢增加;果园 $K_s$ 先增加,30 年后出现下降趋势;草地 $K_s$ 先迅速增加,20 年后保持相对稳定。土壤粒径分布、土壤质量密度、团聚体平均重量直径为影响梯田 $K_s$ 的主要因素,其中团聚体平均重量直径为正效应,土壤粒径分布、土壤质量密度为负效应。

### 参考文献:

- [1] TAN M L, GASSMAN P W, YANG X Y, et al. A review of SWAT applications, performance and future needs for simulation of hydro-climatic extremes [J]. *Advances in Water Resources*, 2020, 143: e103662.
- [2] RAN Q H, HONG Y Y, CHEN X X, et al. Impact of soil properties on water and sediment transport: A case study at a small catchment in the Loess Plateau [J]. *Journal of Hydrology*, 2019, 574: 211-225.
- [3] BEVEN K J, KIRKBY M J, FREER J E, et al. A history of TOPMODEL [J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2021, 25(2): 527-549.
- [4] RAN Q H, CHEN X X, HONG Y Y, et al. Impacts of terracing on hydrological processes: A case study from the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 588: e125045.
- [5] ARNÁEZ J, LANA-RENAULT N, LASANTA T, et al. Effects of farming terraces on hydrological and geomorphological processes. A review [J]. *Catena*, 2015, 128: 122-134.
- [6] LU Y H, LI X B, XIN L J, et al. Mapping the terraces on the Loess Plateau based on a deep learning-based model at 1.89 m resolution [J]. *Scientific Data*, 2023, 10(1): e115.
- [7] TIAN P, TIAN X J, GENG R, et al. Response of soil erosion to vegetation restoration and terracing on the Loess Plateau [J]. *Catena*, 2023, 227: e107103.
- [8] 新华社.中共中央办公厅 国务院办公厅印发《关于加强新时代水土保持工作的意见》[Z]. 中华人民共和国国务院公报, 2023(2): 5-8.
- Xinhua News Agency. The General Office of the Central Committee of the CPC and the General Office of the State Council Print and Issue the Opinions on Strengthening Water and Soil Conservation in the New Era [Z]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2023(2): 5-8.
- [9] 新华社.中共中央 国务院印发《黄河流域生态保护和高质量发展规划纲要》[Z]. 中华人民共和国国务院公报, 2021(30): 15-35.
- Xinhua News Agency. The Central Committee of the CPC and the State Council Print and Issue the Outlines for the Plan for Ecological Protection and High-quality Development of the Yellow River Basin [Z]. *Gazette of the State Council of the People's Republic of China*, 2021(30): 15-35.
- [10] 中华人民共和国国家发展和改革委员会.黄土高原地区综合治理规划大纲(2010-2030 年)[Z]. 2010: 39.
- National Development and Reform Commission People's Republic of China. Outline of the Comprehensive Management Plan for the Loess Plateau (2010-2030) [Z]. 2010: 39.
- [11] 董世杰, 辛良杰, 李升发, 等. 中国梯田撂荒程度及空间格局分异研究 [J]. *地理学报*, 2023, 78(1): 3-15.
- DONG S J, XIN L J, LI S F, et al. The extent and spatial distribution of terrace abandonment in China [J]. *Acta Geographica Sinica*, 2023, 78(1): 3-15.
- [12] 李宗善, 杨磊, 王国梁, 等. 黄土高原水土流失治理现状、问题及对策 [J]. *生态学报*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- LI Z S, YANG L, WANG G L, et al. The management of soil and water conservation in the Loess Plateau of China: Present situations, problems, and counter-solutions [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39(20): 7398-7409.
- [13] 薛蕙, 刘国彬, 张超, 等. 黄土高原丘陵区坡改梯后的土壤质量效应 [J]. *农业工程学报*, 2011, 27(4): 310-316.
- XUE S, LIU G B, ZHANG C, et al. Effects of terracing slope cropland on soil quality in Hilly Region of Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(4): 310-316.
- [14] ZHAO W, WANG M H, CHEN C B, et al. Variations, controls and predictions of soil saturated hydraulic conductivity under different land use types in the alpine region of Tibet, China [J]. *Geoderma Regional*, 2023, 35: e00723.
- [15] WU X T, YANG Y, HE T, et al. Temporal variability of saturated hydraulic conductivity on a typical black soil slope of Northeast China [J]. *Catena*, 2024, 236: e107742.
- [16] HE L, DUAN X Q, DING S W, et al. Construction and evaluation of pedotransfer functions for saturated hydraulic conductivity in the granite red soil regions of Southern China [J]. *Journal of Hydrology: Regional*

- Studies, 2023, 50: e101539.
- [17] 杨震, 黄莹, 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.
- [18] LIU S Z, WANG Y Q, AN Z S, et al. Watershed spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity as affected by landscape unit in the critical zone[J]. Catena, 2021, 203: e105322.
- [19] 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.
- [20] 赵春雷, 邵明安, 贾小旭. 黄土高原北部坡面尺度土壤饱和导水率分布与模拟[J]. 水科学进展, 2014, 25(6): 806-815.  
ZHAO C L, SHAO M A, JIA X X. Distribution and simulation of saturated soil hydraulic conductivity at a slope of northern Loess Plateau[J]. Advances in Water Science, 2014, 25(6): 806-815.
- [21] 王紫薇, 邵明安, 黄来明, 等. 青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和导水率分布及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 150-155.  
WANG Z W, SHAO M A, HUANG L M, et al. Distribution and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in eastern Qinghai Province[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(3): 150-155.
- [22] ZHU P Z, ZHANG G H, ZHANG B J. Soil saturated hydraulic conductivity of typical revegetated plants on steep gully slopes of Chinese Loess Plateau[J]. Geoderma, 2022, 412: e115717.
- [23] 张益, 林毅雁, 贾国栋, 等. 北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2022, 36(6): 171-178.  
ZHANG Y, LIN Y Y, JIA G D, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical vegetation types in Beijing mountainous area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(6): 171-178.
- [24] 鲍士旦. 土壤农化分析[M]. 3版. 北京: 中国农业出版社, 2000: 20-34.  
BAO S D. Soil and Agricultural Chemistry Analysis[M]. 3rd ed. Beijing: China Agriculture Press, 2000: 20-34.
- [25] 中华人民共和国国家林业局. LY/T 1215—1999, 森林土壤水分—物理性质的测定[S]. 北京: 标准出版社, 1999: 22-24.  
State Forestry Administration of the People's Republic of China. LY/T 1215—1999, Determination of forest soil water-physical properties [S]. Beijing: Standards Press, 1999: 22-24.
- [26] 徐远慧, 冯璐, 屈媛媛, 等. 黄土丘陵沟壑区退耕还草年限对土壤性质和入渗性能的影响[J]. 水土保持学报, 2022, 36(2): 57-63.  
XU Y H, FENG L, QU Y Y, et al. Effects of different restoration years of Grain for Green on soil properties and infiltration performance in loess Gully Region[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2022, 36(2): 57-63.
- [27] ZHU P Z, ZHANG G H, WANG C S, et al. Variation in soil infiltration properties under different land use/cover in the black soil region of Northeast China[J]. International Soil and Water Conservation Research, 2024, 12(2): 379-387.
- [28] HAO H X, WEI Y J, CAO D N, et al. Vegetation restoration and fine roots promote soil infiltrability in heavy-textured soils [J]. Soil and Tillage Research, 2020, 198: e104542.
- [29] QIAN X, GU J, SUN W, et al. Changes in the soil nutrient levels, enzyme activities, microbial community function, and structure during apple orchard maturation[J]. Applied Soil Ecology, 2014, 77: 18-25.
- [30] WANG Y Q, SHAO M A, LIU Z P, 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: 13-23.
- [31] 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 土壤—植被—水文耦合过程与机制研究进展[J]. 中国科学: 地球科学, 2022, 52(11): 2105-2138.  
LI Z K, LI X Y, ZHOU S, et al. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil—vegetation—hydrology, and recent research advances[J]. Scientia Sinica (Terrae), 2022, 52(11): 2105-2138.
- [32] 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.