

毛乌素沙地不同土地利用方式下土壤饱和导水率垂向分布特征

刘星廷¹, 乔江波¹, 杨涛^{2,3}, 马雅莉^{2,3}, 田涵洋¹, 韩晓阳¹, 朱元骏^{1*}

1. 西北农林科技大学水土保持研究所, 杨凌 712100

2. 陕西省林业科学院, 西安 710082

3. 国家林业和草原局长柄扁桃工程技术研究中心, 榆林 719000

摘要: 土壤饱和导水率(K_s)是土壤水文循环中的关键参数,然而当前对毛乌素沙地 K_s 的特征及影响因素还认识不足。通过测定毛乌素沙地4种土地利用方式下(农田、乔木、灌木和草地)0—100 cm土层的 K_s 和土壤基本理化性质(有机质、容重及颗粒组成),分析 K_s 的垂向变异性及其影响因素、建立估算 K_s 的传递函数。研究表明:农田、乔木和灌木地的 K_s 随着土层深度增加而逐渐增大,草地无明显变化。4种土地利用方式下的 K_s 均为中等程度的垂向变异性,平均值排序为草地(1.38 mm·min⁻¹)<乔木(1.76 mm·min⁻¹)<农田(1.82 mm·min⁻¹)<灌木(3.30 mm·min⁻¹),其中灌木地的 K_s 显著高于其他土地利用方式($P<0.05$)。 K_s 与有机质、容重、土壤颗粒组成存在显著相关性,通过提取 K_s 的主导因素,用逐步多元回归方法建立了估算 K_s 的传递函数。相关研究有助于毛乌素沙地 K_s 参数的获取和预测。

关键词: 毛乌素沙地; 土壤饱和导水率; 垂直分布; 传递函数

Vertical distribution characteristics of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in the Mu Us sandy land

LIU Xingting¹, QIAO Jiangbo¹, YANG Tao^{2,3}, MA Yali^{2,3}, TIAN Hanyang¹, HAN Xiaoyang¹, ZHU Yuanjun^{1*}

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

2. Shaanxi Academy of Forestry, Xi'an 710082, China

3. Engineering Technology Research Center for Amygdalus Pedunculata, National Forestry and Grassland Administration, Yulin 719000, China

Abstract: Background, aim, and scope Soil saturated hydraulic conductivity (K_s) is a key parameter in the hydrological cycle of soil; however, we have very limited understanding of K_s characteristics and the factors that influence this key parameter in the Mu Us sandy land (MUSL). Quantifying the impact of changes in land use in the Mu Us sandy land on K_s will provide a key foundation for understanding the regional water

收稿日期: 2022-06-09; 录用日期: 2022-08-01; 网络出版: 2022-08-25

Received Date: 2022-06-09; **Accepted Date:** 2022-08-01; **Online first:** 2022-08-25

基金项目: 陕西省科学技术厅青年项目(2021JQ-168); 中国科学院战略性先导科技专项(XDB40020303); 国家自然科学基金项目(41530854); 中国科学院西部青年学者B类(XAB2019B11)

Foundation Item: Youth Project of Shaanxi Provincial Department of Science and Technology (2021JQ-168); Strategy Priority Research Program of Chinese Academy of Sciences (XDB40020303); National Natural Science Foundation of China (41530854); Western Young Scholar of Chinese Academy of Sciences (XAB2019B11)

通信作者: 朱元骏, E-mail: zhuyj@nwafu.edu.cn

Corresponding Author: ZHU Yuanjun, E-mail: zhuyj@nwafu.edu.cn

引用格式: 刘星廷, 乔江波, 杨涛, 等. 2024. 毛乌素沙地不同土地利用方式下土壤饱和导水率垂向分布特征 [J]. 地球环境学报, 15(4): 665–674.

Citation: Liu X T, Qiao J B, Yang T, et al. 2024. Vertical distribution characteristics of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in the Mu Us sandy land [J]. Journal of Earth Environment, 15(4): 665–674.

cycle, but will also provide a scientific basis for the governance of the MUSL. **Materials and methods** In this study, we determined K_s and the basic physical and chemical properties of soil (i.e., organic matter, bulk density, and soil particle composition) within the first 100 cm layer of four different land use patterns (farmland, tree, shrub, and grassland) in the MUSL. The vertical variation of K_s and the factors that influence this key parameter were analyzed and a transfer function for estimating K_s was established based on a multiple stepwise regression model. **Results** The K_s of farmland, tree, and shrub increased gradually with soil depth while that of grassland remained unchanged. The K_s of the four patterns of land use were moderately variable; mean K_s values were ranked as follows: grassland ($1.38 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) < tree ($1.76 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) < farmland ($1.82 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) < shrub ($3.30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$). The correlation between K_s and organic matter, bulk density, and soil particle composition, varied across different land use patterns. A multiple stepwise regression model showed that silt, coarse sand, bulk density, and organic matter, were key predictive factors for the K_s of farmland, tree, shrub, and grassland, in the MUSL. **Discussion** The vertical distribution trend for K_s in farmland is known to be predominantly influenced by cultivation, fertilization, and other factors. The general aim is to improve the water-holding capacity of shallow soil on farmland (0—30 cm in depth) to conserve water and nutrients; research has shown that the K_s of farmland increases with soil depth. The root growth of tree and shrub in sandy land exerts mechanical force on the soil due to biophysical processes involving rhizospheres, thus leading to a significant change in K_s . We found that shallow high-density fine roots increased the volume of soil pores and eliminated large pores, thus resulting in a reduction in shallow K_s . Therefore, the K_s of tree and shrub increased with soil depth. Analysis also showed that the K_s of grassland did not change significantly and exhibited the lowest mean value when compared to other land use patterns. This finding was predominantly due to the shallow root system of grasslands and because this land use pattern is not subject to human activities such as cultivation and fertilization; consequently, there was no significant change in K_s with depth; grassland also had the lowest mean K_s . We also established a transfer function for K_s for different land use patterns in the MUSL. However, the predictive factors for K_s in different land use patterns are known to be affected by soil cultivation methods, vegetation restoration modes, the distribution of soil moisture, and other factors, thus resulting in key differences. Therefore, when using the transfer function to predict K_s in other areas, it will be necessary to perform parameter calibration and further verification. **Conclusions** In the MUSL, the K_s of farmland, tree, and shrub gradually increased with soil depth; however, the K_s of grassland showed no significant variation in terms of vertical distribution. The mean K_s values of different land use patterns were ranked as follows: shrub > farmland > tree > grassland; all land use patterns showed moderate levels of variability. The K_s for different land use patterns exhibited differing degrees of correlation with soil physical and chemical properties; of these, clay, silt, sand, bulk density, and organic matter, were identified as important variables for predicting K_s in farmland, tree, shrub, and grassland, respectively. **Recommendations and perspectives** In this study, we used a stepwise multiple regression model to establish a transfer function prediction model for K_s for different land use patterns; this model possessed high estimation accuracy. The ability to predict K_s in the MUSL is very important in terms of the conservation of water and nutrients.

Key words: Mu Us sandy land; saturated hydraulic conductivity; vertical distribution; transfer function

土壤饱和导水率(K_s)即土壤处于饱和状态下的导水速率(郭迎香等, 2022), 是描述土壤水分运动规律和水文建模中的重要参数(傅子洹等, 2015)。 K_s 反映了气候、植被、土壤类型

等因素对土壤物理性质的综合影响。量化 K_s 的变化特征不仅有助于深化对气候、植被、土壤三者之间相互作用的认识, 还有助于更为精确地对地表径流、溶质运移和水土流失进行模拟和预测

(Chandrasoma et al., 2016)。

针对 K_s 分布特征及影响因素已开展了很多研究。 K_s 受地形条件、土地利用方式和土壤理化性质等诸多因素影响, 且表现出一定的时空变异规律。在黄土坡面尺度上 K_s 呈波动状分布, 表现为中等变异强度, 其变化程度为坡下>坡上(刘春利和邵明安, 2009)。不同土层深度下 K_s 的大小及变异强度不同(于冬雪等, 2018)。对六盘山华北落叶松坡面 K_s 进行测定, 发现随土层深度增加 K_s 逐渐增大, 40—60 cm 土层表现为强变异, 其他土层为中等变异(邓佳楠等, 2022)。还有研究发现 K_s 变异性主要受林地、农田、草地斑块化分布等因素影响(康文蓉等, 2021)。四面山区 4 种土地利用下 K_s 的测定结果为林地>农地>草地>荒地(阮芯竹等, 2015)。不同土地利用方式是人为和自然综合作用的结果, 植被覆盖类型、植物根系发育、耕作活动是影响 K_s 变化的重要因素(张君玉等, 2013; 杨震等, 2020)。此外, 不同的土地利用类型下, K_s 存在明显差异, 相较于有机质含量, 土壤孔隙度对 K_s 的正向影响更大(覃森等, 2015)。也有研究发现容重、毛管孔隙度、黏粒含量直接影响黄土丘陵区 K_s (梁向锋等, 2009)。而非毛管孔隙度是影响喀斯特地区 K_s 的主要因素(蔡路路等, 2020)。毛乌素沙地自 20 世纪 90 年代以来, 植被覆盖度显著增加、土地利用发生较大变化。随之而来的是植被用水需求增加, 地下水位不断下降, 区域水资源承载力接近极限(Zhao et al., 2011; Zhang et al., 2021)。量

化土地利用变化对关键土壤水文参数 K_s 的影响, 不仅是认识区域水循环的基础, 还可为毛乌素沙地治理提供科学依据。

本研究基于毛乌素沙地圪丑沟小流域的 4 种典型土地利用方式(农田、乔木、灌木、草地), 探究治沙过程中导致的土地利用变化对 K_s 垂直分布的影响因素, 建立适于沙地 K_s 的传递函数, 为干旱半干旱地区沙地水文模型构建提供关键土壤水文参数。

1 研究方法

1.1 研究区概况

陕西省神木市毛乌素治沙造林基地位于锦界镇以南 30 km 圃丑沟小流域($38^{\circ}48' - 38^{\circ}54'N$ 、 $109^{\circ}11' - 109^{\circ}29'E$)(图 1)。该地区属温带半干旱大陆性季风气候, 海拔 1250—1280 m。年均气温约 6—9 ℃, 多年降水量为 420—450 mm, 多暴雨且集中分布在 7—9 月, 占全年降水量的 60%—75%, 年潜在蒸发量 2400 mm; 流域内地形起伏较小, 以固定和半固定沙丘为主, 坡度介于 0—30°; 土壤类型主要为风沙土。流域内植被主要有樟子松(*Pinus sylvestris*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa L.*)、长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata*)、沙柳(*Salix cheilophila*)、沙蒿(*Artemisia desertorum*)等(孙树臣和邵明安, 2021)。主要的土地利用方式有农田、乔木、灌木和草地, 其中农田进行翻耕和增施有机肥, 乔木、灌木和草地均为人工栽植。

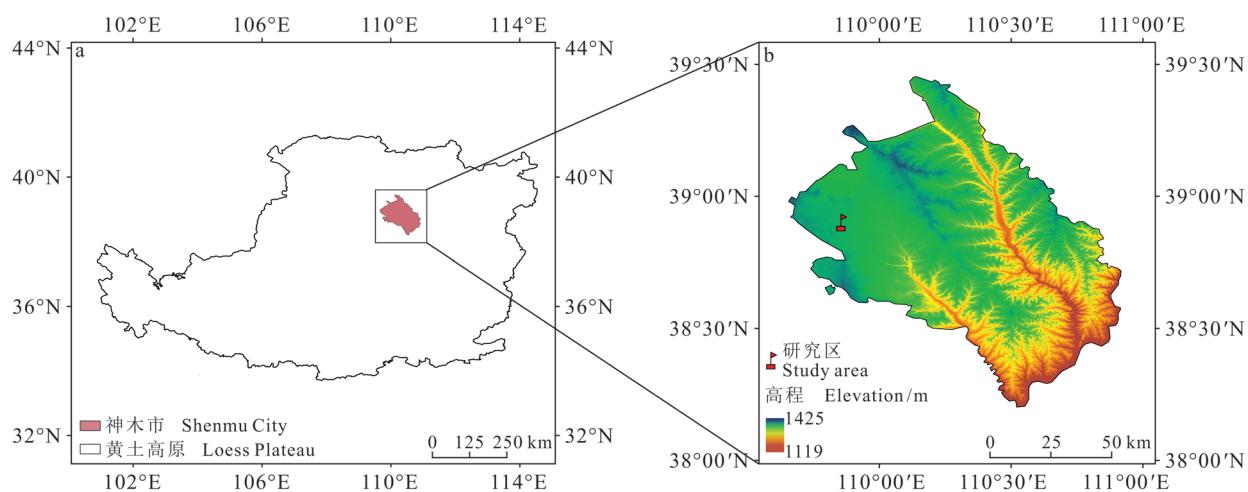


图 1 研究区概况图
Fig. 1 Study area overview map

1.2 土壤样品采集

2021 年 6 月 28 日—7 月 4 日, 选取 4 种典型土地利用方式 (农田、乔木、灌木、草地) 下的土壤为研究对象, 其中农田作为对照。每块样地划分 $50\text{ m} \times 20\text{ m}$ 的小区, 并按照 “S” 形挖取 3 个 100 cm 土壤剖面, $0\text{--}40\text{ cm}$ 间隔 10 cm 取样, $40\text{--}100\text{ cm}$ 间隔 20 cm 取样。分别采集不同土层原状土和扰动土, 每层用环刀获取 3 个原状土样, 扰动土放入自封袋中, 共采集扰动土样品 84 个, 原状土样品 252 个, 带回实验室处理。

1.3 土壤理化性质测定

K_s 采用双环刀恒定水头法测定 (张一璇等, 2019), 计算方法如下:

$$K_s = 10 \times Q \times L \div A \div H \div T \quad (1)$$

式中: K_s 为土壤饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) ; Q 为固定时间段内的稳定水流 (mL); L 为土层厚度 (cm); A 为环刀的横截面积 (cm^2); H 为双环刀总高度与稳定水位高度的差值 (cm); T 为导水时间 (min)。

土壤水分运动受温度影响, 根据哈赞公式换算为标准温度下导水率, 具体如下:

$$K_{10} = K_t \div (0.7 + 0.03 \times t) \quad (2)$$

式中: K_{10} 为 $10\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 K_s ; K_t 为 $t\text{ }^\circ\text{C}$ 下的 K_s , t 为水温。

将土样自然风干, 除去残根杂物后过 2 mm 和 0.25 mm 筛用于理化性质测定。有机质采用重铬酸钾-外加热法测定; 土壤容重采用环刀法测定; 土壤颗粒组成采用马尔文激光粒度仪测定。按照中国土粒分级标准将土壤颗粒分为粉黏粒 ($<0.05\text{ mm}$)、细砂粒 ($[0.05, 0.25]\text{ mm}$)、粗砂 ($>0.25\text{ mm}$), 由于沙地土壤黏粒含量极低, 本研究将粉粒和黏粒含量合二为一。

1.4 数据处理

采用 Excel 2016 进行数据处理, SPSS 22.0 进行统计分析, Origin 2018 进行作图。采用方差分析 (ANOVA) 进行显著性分析, 用 Pearson 法对不同样点的 K_s 和土壤理化性质进行相关性分析, 用多元逐步线性回归模型建立 K_s 的传递函数。传递函数的预测精度由 3 个指标确定 (乔江波, 2019), 即决定系数 (R^2)、均方根误差 (RMSE) 和平均误差 (ME), 定义如下:

$$R^2 = 1 - \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \div \sum_{i=1}^N (y_i - \bar{y})^2 \quad (3)$$

$$R_{\text{mse}} = \sqrt{\sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \div N} \quad (4)$$

$$M_e = \sum_{i=1}^N (y_i - \hat{y}_i)^2 \div N \quad (5)$$

式中: y_i 是测量值, \hat{y}_i 是预测值, \bar{y} 是测量值的平均值, N 是样本数。 R_{mse} 代表 RMSE, M_e 代表 ME。

变异系数 (CV) :

$$C = \delta \div \bar{X} \quad (6)$$

式中: δ 为标准差, \bar{X} 为样本均值, C 代表 CV。根据变异系数对变异强度进行划分, 当 $C < 0.1$ 为弱变异, $0.1 \leq C \leq 1$ 为中等变异, $C > 1$ 为强变异 (赵文举等, 2015)。

2 结果与分析

2.1 K_s 垂直分布

随着土层深度的增加, 农田、乔木和灌木地 K_s 呈增加趋势, 而草地无明显变化 (图 2a)。农田 [$0, 40]$ cm 土层内, K_s 随深度增加变化趋势较小, $(40, 100]$ cm 土层内呈逐渐增大趋势。乔木地 [$0, 40]$ cm 土层内, K_s 随深度增加呈波浪状分布, $(40, 100]$ cm 土层内呈逐渐增大趋势。而灌木地 [$0, 40]$ cm 土层内, K_s 随深度增加呈逐渐增大趋势, $(40, 100]$ cm 土层内呈波浪状分布。不同土地利用方式下 K_s 均值为灌木 ($3.30\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) $>$ 农田 ($1.82\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) $>$ 乔木 ($1.76\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) $>$ 草地 ($1.38\text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) (表 1), 其中灌木地 K_s 显著大于其他土地利用方式 ($P < 0.05$)。各土地利用类型下 K_s 变异系数分别为 26% (农田)、41% (乔木)、33% (灌木)、40% (草地), 表现出中等程度空间变异性。

2.2 土壤理化性质

不同土地利用方式下土壤有机质含量总体随土层深度增加呈下降趋势 (图 2b)。 $0\text{--}40\text{ cm}$ 不同土地利用方式有机质含量差异显著 ($P < 0.05$), 40 cm 以下无明显差异 ($P > 0.05$)。可见不同土地利用方式对土壤有机质的影响主要集中在 $0\text{--}40\text{ cm}$ 浅层。有机质含量平均值为农田 ($4.69\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 乔木 ($3.27\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 灌木 ($1.55\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) $>$ 草地 ($0.86\text{ g} \cdot \text{kg}^{-1}$) (表 1), 其中农田含量最高, 主要由于农田受施肥影响。随着深度增加, 不同土地利用方式容重逐渐增大, 其中农田最为明显 (图 2c), 这是由于农田浅层常年耕作, 导致土

壤结构疏松多孔, 容重较小。农田、灌木和草地粉黏粒含量随深度增加呈下降趋势, 而乔木地粉黏粒含量随土层增加变化平缓(图2d)。农田和草地细砂粒含量整体上波动较小, 乔木地随深度增

加呈减少趋势, 而灌木地呈相反趋势(图2e)。农田和草地粗砂粒含量整体上波动较小, 乔木地粗砂粒含量随土层深度增加逐渐增加, 灌木地呈相反趋势(图2f)。

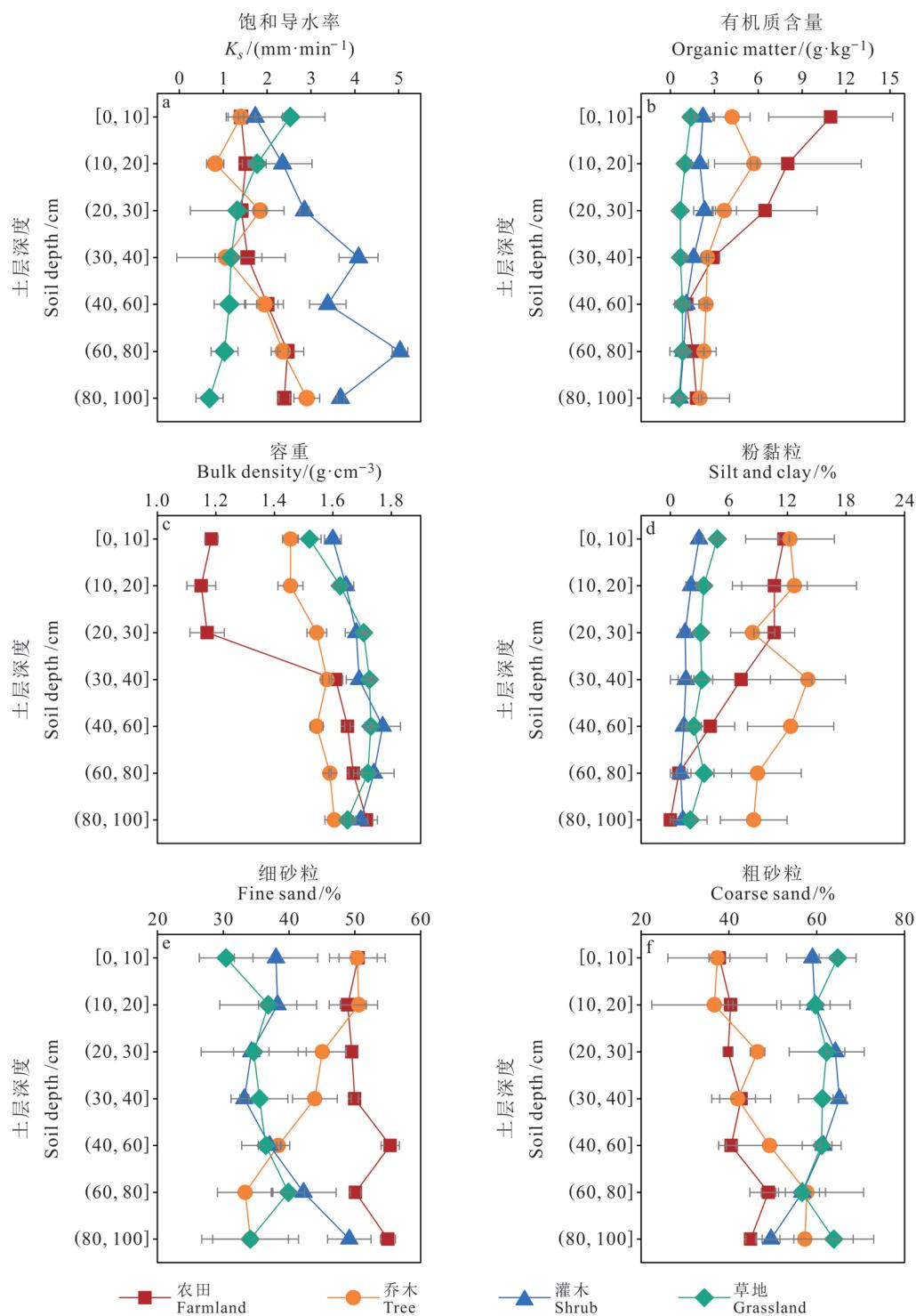


图2 不同土地利用方式土壤理化性质剖面分布
Fig. 2 Profile distribution of soil physicochemical properties in different land use patterns

表 1 0—100 cm 土层不同土地利用方式下土壤理化性质描述性统计特征值

Tab. 1 Descriptive statistical characteristics of soil physicochemical properties under different land use patterns in 0—100 cm soil layers

土壤理化性质 Soil physicochemical properties	农田 Farmland		乔木 Tree		灌木 Shrub		草地 Grassland	
	平均值 Mean	变异系数 CV	平均值 Mean	变异系数 CV	平均值 Mean	变异系数 CV	平均值 Mean	变异系数 CV
	1.82b	0.26	1.76b	0.41	3.30a	0.33	1.38b	0.40
土壤饱和导水率 $K_s/(\text{mm} \cdot \text{min}^{-1})$	1.82b	0.26	1.76b	0.41	3.30a	0.33	1.38b	0.40
有机质 Organic matter/(g·kg ⁻¹)	4.69a	0.76	3.27ab	0.42	1.55bc	0.41	0.86c	0.33
容重 Bulk density/(g·cm ⁻³)	1.45c	0.17	1.54bc	0.04	1.69a	0.03	1.67ab	0.04
粉黏粒 Silt and clay/%	6.45b	0.70	10.90a	0.20	1.70c	0.36	3.21c	0.26
细砂粒 Fine sand/%	51.35a	0.05	42.45b	0.13	38.89bc	0.13	35.41c	0.08
粗砂粒 Coarse sand/%	42.19b	0.08	46.65b	0.14	59.41a	0.08	61.38a	0.04

表中不同小写字母表示相同土层不同土地利用方式间差异显著性 ($P < 0.05$)。Different lowercase letters in the table indicate the significance of differences between different land use patterns of the same soil layer ($P < 0.05$).

2.3 K_s 与土壤理化性质相关性分析

沙地 K_s 主要受有机质、容重、土壤颗粒等因素影响 (夏江宝等, 2013), 基于此, 本文选取不同土地利用方式下的有机质、容重、土壤颗粒与 K_s 进行 Pearson 相关性分析 (图 3)。由图 3 可知:

农田、乔木和灌木地 K_s 与有机质呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与容重呈显著正相关 ($P < 0.05$); 而草地 K_s 与有机质呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与容重呈显著负相关 ($P < 0.05$); 农田、乔木、草地 K_s 与粗砂粒呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

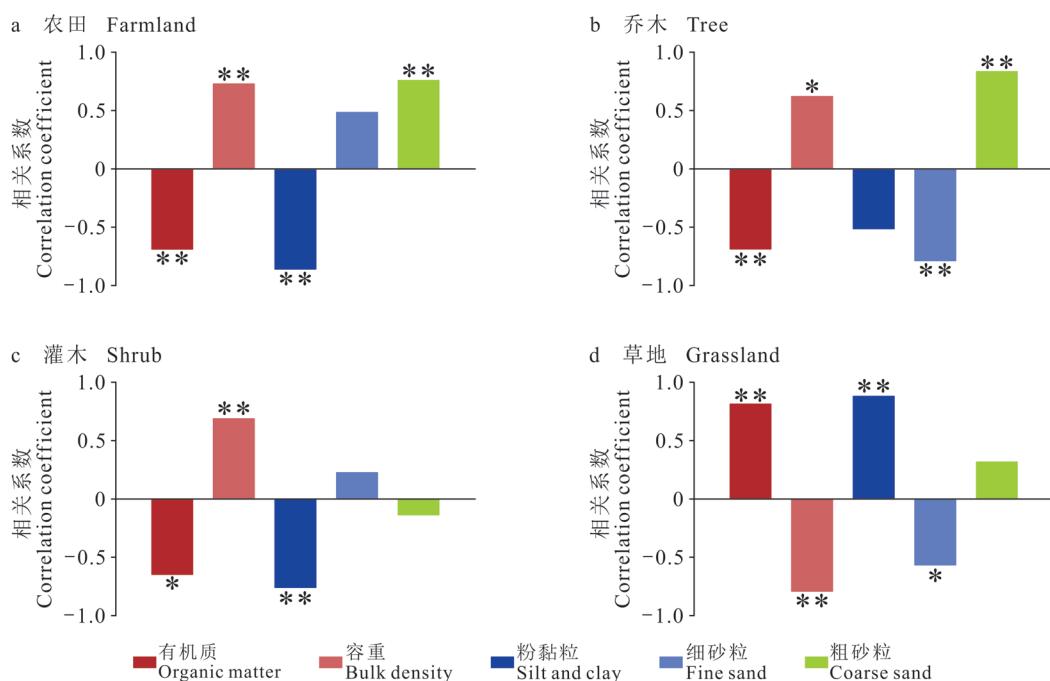
** 表示显著性水平 $P < 0.01$, * 表示显著性水平 $P < 0.05$ 。** denotes significance level $P < 0.01$, * denotes significance level $P < 0.05$.图 3 不同土地利用方式下 K_s 与土壤理化性质相关系数分布

Fig. 3 Distribution of correlation coefficients between saturated hydraulic conductivity and soil physicochemical properties of different land use patterns

2.4 K_s 传递函数建立

通过对不同土地利用方式下 K_s 与土壤基本理化性质 (容重、有机质和颗粒组成) 进行相关性

分析, 筛选出与 K_s 具有显著相关性的因子。利用多元逐步线性回归模型, 排除显著相关因子的共线性, 建立不同土地利用方式下 K_s 的传递函数,

其中每个土地利用方式的 2/3 数据用于传递函数的建立, 1/3 数据用于验证(表 2)。由表 2 可知: 不同土地利用方式下 K_s 的决定系数 (R^2) 为 0.47—0.74, 具有较好的拟合效果。为了验证建立传递函数的精度, 利用均方根误差 (RMSE) 和平均

均误差 (ME) 两个评价指标验证传递函数的精确性。由表 2 可知: RMSE 变化范围为 0.26—0.86, ME 变化范围为 0.072—0.751, 两个评价指标的值均较低, 意味着有较好的预测效果, 可用于本地区 K_s 传递函数的预测。

表 2 不同土地利用方式下 K_s 传递函数拟合
Tab. 2 Soil K_s transfer function fitting for different land use patterns

土地利用方式 Land use patterns	传递函数表达式 Multiple regression analysis	R^2	均方根误差 RMSE	平均误差 ME	显著性水平 Significance level
农田 Farmland	$K_s = 2.417 - 0.092 \times S_c$	0.74	0.26	0.072	$P < 0.001$
乔木 Tree	$K_s = -2.457 + 0.09 \times C_s$	0.69	0.43	0.188	$P < 0.001$
灌木 Shrub	$K_s = -20.501 + 14.097 \times B_D$	0.47	0.86	0.751	$P < 0.001$
草地 Grassland	$K_s = 0.01 + 1.596 \times S_{OM}$	0.66	0.35	0.123	$P < 0.001$

K_s 为饱和导水率 ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$) ; S_{OM} 为有机质 ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$) ; B_D 为容重 ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$) ; S_c 为粉黏粒 (%) ; C_s 粗砂粒 (%) ; RMSE 为均方根误差; ME 为平均误差。

K_s is saturated hydraulic conductivity ($\text{mm} \cdot \text{min}^{-1}$); S_{OM} is organic matter ($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$); B_D is bulk density ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$); S_c is silt and clay (%); C_s is coarse sand (%); RMSE is root mean square error; ME is mean error.

3 讨论

本研究发现农田、乔木和灌木地 K_s 的垂向分布随土层深度增加而增加, 而草地 K_s 随深度增加无明显变化。这是由于农田 K_s 的垂向分布趋势主要受耕作、施肥等因素影响(蔡立群等, 2012), 通过提高农田浅层土壤 [0, 30] cm 的持水性达到保水保肥的目的, 因此农田 K_s 随着土层深度增加而增加。沙地乔木和灌木的根系生长对土壤产生机械作用力(根际生物物理过程), 造成 K_s 的显著变化(Chen et al., 2021), 且浅层高密度细根在增加土壤孔隙体积的同时消除了大孔隙, 导致浅层 K_s 降低(李中恺等, 2022)。草地 K_s 无明显变化, 且相较于其他土地利用方式 K_s 均值最低, 这主要是由于草地根系较浅, 且未受到人类活动(耕作、施肥等)的影响。此外, 乔木和草地 K_s 随土层深度增加的变化趋势与科尔沁沙地相同, 而灌木地 K_s 变化趋势不一致(姚淑霞等, 2012), 原因可能是根系径级的垂向差异对土壤剖面影响程度不同。

土壤有机质是土壤结构形成和稳定作用的重要物质, 通过改善土壤结构、土壤胶体状况等影响 K_s , 起到调控水分运动的作用(Li and Shao, 2006)。相关性分析表明毛乌素沙地中农田、乔木和灌木地的 K_s 与有机质呈负相关关系, 而草地的 K_s 与有机质呈正相关关系(图 3)。有研究表明黄土区不同坡面尺度下西坡林地 K_s 与有机质

含量呈显著正相关关系, 而西坡草地 K_s 与有机质含量呈负相关关系(毛娜等, 2019)。张鼎华等(2003)认为通过提高沙地土壤有机质含量, 可增加土壤水分, 有机质含量与 K_s 呈负相关关系。而张一璇等(2019)认为有机质调节孔隙结构, 利于水分传导, 与典型林分(侧柏、油松和山杏等) K_s 呈正相关关系。上述研究之间 K_s 与有机质的相关关系差异的直接原因是土壤质地存在明显差异。本研究区内的土壤质地为风沙土, 张一璇等(2019)的研究区土壤质地为砂壤土, 且不同研究区内粉黏粒含量存在明显差异。综上, 不同土地利用方式和土壤质地差异都会影响 K_s 与有机质之间的相关关系。

尽管本研究农田、乔木、灌木地 K_s 与有机质存在显著负相关关系($P < 0.05$), 但不是该区域农田、乔木和灌木 K_s 的主要预测因子。多元逐步回归模型表明农田、乔木、灌木和草地 K_s 的预测因子分别为粉黏粒、粗砂粒、容重和有机质。王紫薇等(2021)研究表明青海省东部林地、草地和农田 K_s 的预测因子主要为土壤孔隙度、容重和饱和含水量。毛娜等(2019)研究表明黄土区坡面尺度下林地和草地 K_s 的预测因子主要为容重、土壤颗粒组成(黏粒、粉粒和沙粒)和有机质。可见, 不同土地利用方式 K_s 的预测因子受土壤耕作方式、植被恢复模式、土壤水分分布等因素的影响产生差异(刘春利和邵明安, 2008; 张扬等, 2009; Jiang and Shao, 2014)。此外, 不同

土地利用方式也是影响 K_s 的预测因子的重要因素 (Jorda et al., 2015)。

传统的 K_s 测量方法费时、费力, 难以实现大面积的测量, 造成 K_s 数据缺失, 而传递函数的建立可以为大面积获取 K_s 数据提供有效途径。康文蓉等 (2021) 建立了河西走廊荒漠绿洲过渡带 K_s 的传递函数, 发现容重、土壤水分和黏粒是预测 K_s 的重要变量; 孙丽等 (2015) 发现有机质、平均粒径和标准偏差是预测科尔沁沙地 K_s 的重要变量; 均与本研究建立的 K_s 传递函数存在差异。虽然研究区都位于沙地, 但是不同的研究结果均不同, 可见 K_s 传递函数的适用具有区域性, 在应用 K_s 传递函数预测其他地区 K_s 时应进行参数率定并做进一步验证。

4 结论

(1) 毛乌素沙地农田、乔木和灌木地 K_s 随着土层深度增加而逐渐增大, 草地呈相反趋势。不同土地利用方式下 K_s 均值为灌木 ($3.30 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 农田 ($1.82 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 乔木 ($1.76 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$) > 草地 ($1.38 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$), 其中灌木显著大于其他土地利用方式 ($P < 0.05$), 且均属于中等变异强度。

(2) 农田、乔木和灌木地 K_s 与有机质呈显著负相关 ($P < 0.05$), 与容重呈显著正相关 ($P < 0.05$); 而草地 K_s 与有机质呈显著正相关 ($P < 0.05$), 与容重呈显著负相关 ($P < 0.05$); 农田和乔木地 K_s 与粗砂粒呈显著正相关关系 ($P < 0.05$)。

(3) 利用多元逐步回归模型, 明确了毛乌素沙地农田、乔木、灌木和草地 K_s 的预测因子分别为粉黏粒、粗砂粒、容重和有机质。本研究可为干旱半干旱地区沙地水文模型构建、 K_s 模拟和预测提供参考。

参考文献

- 蔡立群, 罗珠珠, 张仁陟, 等. 2012. 不同耕作措施对旱地农田土壤水分保持及入渗性能的影响研究 [J]. 中国沙漠, 32(5): 1362–1368. [Cai L Q, Luo Z Z, Zhang R Z, et al. 2012. Effect of different tillage methods on soil water retention and infiltration capability of rainfed field [J]. *Journal of Desert Research*, 32(5): 1362–1368.]
- 蔡路路, 刘子琦, 李渊, 等. 2020. 喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和导水率的影响 [J]. 水土保持研究, 27(1): 119–125. [Cai L L, Liu Z Q, Li Y, et al. 2020. Effect of different land use types on soil saturated hydraulic conductivity in Karst areas [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 27(1): 119–125.]
- 邓佳楠, 张军, 刘泽彬, 等. 2022. 六盘山华北落叶松坡面土壤饱和导水率空间异质性及其影响因素 [J]. 水土保持研究, 29(5): 144–148, 163. [Deng J N, Zhang J, Liu Z B, et al. 2022. Spatial heterogeneity of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors on a larch plantation hillslope in Liupan Mountain [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 29(5): 144–148, 163.]
- 傅子洹, 王云强, 安芷生. 2015. 黄土区小流域土壤容重和饱和导水率的时空动态特征 [J]. 农业工程学报, 31(13): 128–134. [Fu Z H, Wang Y Q, An Z S. 2015. Spatio-temporal characteristics of soil bulk density and saturated hydraulic conductivity at small watershed scale on Loess Plateau [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(13): 128–134.]
- 郭迎香, 马波, 曾建辉, 等. 2022. 冻融交替对不同生物结皮土壤饱和导水率的影响 [J]. 土壤通报, 53(2): 324–332. [Guo Y X, Ma B, Zeng J H, et al. 2022. Influence of freeze-thaw alternation on saturated hydraulic conductivity of soil covered with different biological crusts [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 53(2): 324–332.]
- 康文蓉, 张勇勇, 赵文智, 等. 2021. 荒漠绿洲过渡带土壤饱和导水率的空间变异特征 [J]. 水土保持学报, 35(5): 137–143. [Kang W R, Zhang Y Y, Zhao W Z, et al. 2021. Spatial variation characteristics of soil saturated hydraulic conductivity in a desert-oasis ecotone [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 35(5): 137–143.]
- 李中恺, 李小雁, 周沙, 等. 2022. 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, 52(11): 2105–2138. [Li Z K, Li X Y, Zhou S, et al. 2022. A comprehensive review on coupled processes and mechanisms of soil-vegetation-hydrology, and recent research advances [J]. *Scientia Sinica (Terra)*, 65(11): 2083–2114.]
- 梁向锋, 赵世伟, 张扬, 等. 2009. 子午岭植被恢复对土壤饱和导水率的影响 [J]. 生态学报, 29(2): 636–642. [Liang X F, Zhao S W, Zhang Y, et al. 2009. Effects of vegetation rehabilitation on soil saturated hydraulic conductivity in Ziwuling forest area [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 29(2): 636–642.]
- 刘春利, 邵明安. 2008. 黄土高原六道沟流域不同土地利用方式下土壤水力特性及其对土壤水分的影响 [J]. 应

- 用生态学报, 19(11): 2400–2407. [Liu C L, Shao M A. 2008. Soil hydraulic properties and their influences on soil water content under different land uses in Liudaogou watershed of Loess Plateau [J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 19(11): 2400–2407.]
- 刘春利, 邵明安. 2009. 黄土高原坡地表层土壤饱和导水率和水分含量空间变异特征 [J]. 中国水土保持科学, 7(1): 13–18. [Liu C L, Shao M A. 2009. Spatial variation of saturated hydraulic conductivity and soil water of the surface layer of a slope on the Loess Plateau [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 7(1): 13–18.]
- 毛 娜, 黄来明, 邵明安. 2019. 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, 51(2): 381–389. [Mao N, Huang L M, Shao M A. 2019. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region [J]. *Soils*, 51(2): 381–389.]
- 乔江波. 2019. 黄土高原关键带深剖面土壤物理性质及传递函数研究 [D]. 杨凌: 西北农林科技大学. [Qiao J B. 2019. Study on soil physical properties and transfer function of deep profile in key zone of Loess Plateau [D]. Yangling: Northwest A&F University.]
- 阮芯竹, 程金花, 张洪江, 等. 2015. 重庆市四面山不同土地利用类型饱和导水率 [J]. 水土保持通报, 35(1): 79–84. [Ruan X Z, Cheng J H, Zhang H J, et al. 2015. Saturated hydraulic conductivity of different land use types in Simian Mountain of Chongqing City [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 35(1): 79–84.]
- 孙 丽, 刘廷玺, 段利民, 等. 2015. 科尔沁沙丘-草甸相间地区表土饱和导水率的土壤传递函数研究 [J]. 土壤学报, 52(1): 68–76. [Sun L, Liu T X, Duan L M, et al. 2015. Prediction of saturated hydraulic conductivity of surface soil in sand-dune-and-meadow interlaced region of Horqin with pedo-transfer functions method [J]. *Acta Pedologica Sinica*, 52(1): 68–76.]
- 孙树臣, 邵明安. 2021. 毛乌素沙地人工长柄扁桃灌丛生态系统 CO₂ 通量特征 [J]. 应用与环境生物学报, 27(2): 380–388. [Sun S C, Shao M A. 2021. CO₂ flux characteristics of an artificial *Amygdalus pedunculata* Pall. shrubland ecosystem in Mu Us Desert, China [J]. *Chinese Journal of Applied and Environmental Biology*, 27(2): 380–388.]
- 覃 森, 翟禄新, 周正朝. 2015. 桂北地区土地利用类型对土壤饱和导水率和持水能力的影响研究 [J]. 水土保持研究, 22(3): 28–32, 39. [Qin M, Zhai L X, Zhou Z C, et al. 2015. Influence of land use types on soil saturated hydraulic conductivity and water retention in northern Guangxi [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 22(3): 28–32, 39.]
- 王紫薇, 邵明安, 黄来明, 等. 2021. 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, 35(3): 150–155. [Wang Z W, Shao M A, Huang L M, et al. 2021. 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*, 35(3): 150–155.]
- 夏江宝, 张淑勇, 王荣荣, 等. 2013. 贝壳堤岛 3 种植被类型的土壤颗粒分形及水分生态特征 [J]. 生态学报, 33(21): 7013–7022. [Xia J B, Zhang S Y, Wang R R, et al. 2013. Water ecology and fractal characteristics of soil particle size distribution of three typical vegetations in Shell Island [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 33(21): 7013–7022.]
- 杨 震, 黄 萱, 余冬立. 2020. 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, 34(6): 178–184. [Yang Z, Huang X, She D L. 2020. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in loess hilly region of northwestern Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 34(6): 178–184.]
- 姚淑霞, 张铜会, 刘新平, 等. 2012. 科尔沁地区不同类型沙地土壤饱和导水率特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 26(4): 123–126. [Yao S X, Zhang T H, Liu X P, et al. 2012. Feature of soil saturated hydraulic conductivity in various lands of Horqin Sandy Land [J]. *Journal of Arid Land Resources and Environment*, 26(4): 123–126.]
- 于冬雪, 贾小旭, 黄来明. 2018. 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, 49(5): 1073–1079. [Yu D X, Jia X X, Huang L M. 2018. Spatial variation and influencing factors of saturated hydraulic conductivity in different soil layers of the loess area [J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 49(5): 1073–1079.]
- 张鼎华, 翟明普, 贾黎明, 等. 2003. 沙地土壤有机质与土壤水动力学参数的关系 [J]. 中国生态农业学报, 11(1): 74–77. [Zhang D H, Zhai M P, Jia L M, et al. 2003. Relationship between organic matter content in sandy soil

- and hydrodynamic parameters [J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 11(1): 74–77.]
- 张君玉, 程金花, 吕湘海. 等. 2013. 晋西不同土地利用方式下土壤饱和导水率的影响因素 [J]. *水土保持通报*, 33(6): 57–61. [Zhang J Y, Cheng J H, Lü X H, et al. 2013. Influence factors of actors of soil saturated hydraulic conductivity in different landuse type in western Shanxi Province [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 33(6): 57–61.]
- 张 扬, 赵世伟, 华 娟. 2009. 宁南山区草地植被恢复方式对土壤饱和导水率的影响 [J]. *中国水土保持科学*, 7(5): 100–104. [Zhang Y, Zhao S W, Hua J. 2009. Effects of grassland vegetation restoration on soil saturated hydraulic conductivity in mountain area of southern Ningxia [J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 7(5): 100–104.]
- 张一璇, 史常青, 杨 浩, 等. 2019. 永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和导水率研究 [J]. *生态学报*, 39(18): 6681–6689. [Zhang Y X, Shi C Q, Yang H, et al. 2019. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River watershed [J]. *Acta Ecologica Sinica*, 39(18): 6681–6689.]
- 赵文举, 李晓萍, 范严伟, 等. 2015. 西北旱区压砂地土壤水分的时空分布特征 [J]. *农业工程学报*, 31(17): 144–151. [Zhao W J, Li X P, Fan Y W, et al. 2015. Spatial-temporal stability distribution characteristics of soil moisture in gravel-sand mulched field in northwestern arid area [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 31(17): 144–151.]
- Chandrasoma J M, Udwatta R P, Anderson S H, et al. 2016. Soil hydraulic properties as influenced by prairie restoration [J]. *Geoderma*, 283: 48–56.
- Chen J Z, Wu Z L, Zhao T M, et al. 2021. Rotation crop root performance and its effect on soil hydraulic properties in a clayey Utisol [J]. *Soil and Tillage Research*, 213: 105136. DOI: 10.1016/j.still.2021.105136.
- Jiang Y L, Shao M A. 2014. Effects of soil structural properties on saturated hydraulic conductivity under different land-use types [J]. *Soil Research*, 52(4): 340. DOI: 10.1071/SR12309.
- Jorda H, Bechtold M, Jarvis N, et al. 2015. Using boosted regression trees to explore key factors controlling saturated and near-saturated hydraulic conductivity [J]. *European Journal of Soil Science*, 66(4): 744–756.
- Li Y Y, Shao M A. 2006. Change of soil physical properties under long-term natural vegetation restoration in the Loess Plateau of China [J]. *Journal of Arid Environments*, 64(1): 77–96.
- Zhang Y Y, Zhao W Z, Li X B, et al. 2021. Contribution of soil macropores to water infiltration across different land use types in a desert-oasis ecoregion [J]. *Land Degradation & Development*, 32(4): 1751–1760.
- Zhao H L, Guo Y R, Zhou R L, et al. 2011. The effects of plantation development on biological soil crust and topsoil properties in a desert in northern China [J]. *Geoderma*, 160(3/4): 367–372.