

DOI: 10.20103/j.stxb.202405281240

石正阳,程唱,邹星晨,左亚凡,李睿,刘仟仟,刘婧雯,彭小静,贺康宁.祁连山东部不同密度白桦天然次生林持水性能及土壤传递函数的构建.生态学报,2025,45(8):4059-4071.

Shi Z Y, Cheng C, Zou X C, Zuo Y F, Li R, Liu Q Q, Liu J W, Peng X J, He K N. Water-holding capacity and construction of pedo-transfer functions for natural secondary *Betula platyphylla* forests of different densities in the eastern Qilian Mountains. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(8): 4059-4071.

## 祁连山东部不同密度白桦天然次生林持水性能及土壤传递函数的构建

石正阳<sup>1,2,3</sup>,程 唱<sup>1,2,3</sup>,邹星晨<sup>1,2,3</sup>,左亚凡<sup>4</sup>,李 睿<sup>1,2,3</sup>,刘仟仟<sup>1,2,3</sup>,刘婧雯<sup>1,2,3</sup>,彭小静<sup>1,2,3</sup>,贺康宁<sup>1,2,3,\*</sup>

1 北京林业大学水土保持学院,北京 100083

2 北京林业大学北京市水土保持工程技术研究中心,北京 100083

3 北京林业大学林业生态工程教育部工程研究中心,北京 100083

4 山西农业大学林学院,晋中 030021

**摘要:**土壤饱和导水率( $K_s$ )作为评价土壤入渗与透水能力的核心指标,探究其影响因素对深入理解和评估森林水源涵养功能有着重要意义。研究聚焦于祁连山东部白桦天然次生林的土壤容重、有机碳、田间持水量、孔隙度等关键理化指标,对林地持水性能进行综合评价,并深入分析土壤理化性质对 $K_s$ 的影响。采用多元逐步回归分析法建立土壤传递函数模型,为验证模型的有效性,对比新建模型与现有6种土壤传递函数模型的预测精度,以确定适用于本研究区的最优模型。研究表明:(1)该区域 $K_s$ 值变化范围为0.25—3.94mm/min,均值为1.64mm/min。利用熵权法评估土壤持水能力发现 $K_s$ 所占权重较高,且林分密度在600—900株/hm<sup>2</sup>时,林地持水性能综合得分最高。(2)通过Pearson分析揭示了 $K_s$ 与粘粒、粉粒含量以及土壤容重呈显著负相关关系,与砂粒含量、有机碳含量以及孔隙度等指标呈显著正相关关系。(3)对比7个土壤传递函数模型的预测效能,研究构建的新模型在拟合效果上表现最优,预测值与实测值的决定系数( $R^2$ )高达0.85。综上, $K_s$ 可作为评价祁连山东部白桦天然林林地持水能力的关键指标,且林分密度在600—900株/hm<sup>2</sup>时,林地持水性能最佳。本研究新建土壤传递函数模型可用于估算该区 $K_s$ ,为祁连山东部水源涵养林的优化管理和生态建设提供了重要的数据支撑和科学依据。

**关键词:**土壤饱和导水率;土壤传递函数;白桦林;祁连山东部

## Water-holding capacity and construction of pedo-transfer functions for natural secondary *Betula platyphylla* forests of different densities in the eastern Qilian Mountains

SHI Zhengyang<sup>1,2,3</sup>, CHENG Chang<sup>1,2,3</sup>, ZOU Xingchen<sup>1,2,3</sup>, ZUO Yafan<sup>4</sup>, LI Rui<sup>1,2,3</sup>, LIU Qianqian<sup>1,2,3</sup>, LIU Jingwen<sup>1,2,3</sup>, PENG Xiaojing<sup>1,2,3</sup>, HE Kangning<sup>1,2,3,\*</sup>

1 Soil and Water Conservation College, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

2 Beijing Engineering Research Center of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

3 Engineering Research Center of Forestry Ecological Engineering, Ministry of Education, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

4 College of Forestry, Shanxi Agricultural University, Jinzhong 030021, China

**Abstract:** Soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) stands as the cornerstone index for assessing soil infiltration and

基金项目:青海省应用基础研究项目(2022-SF-160)

收稿日期:2024-05-28; 网络出版日期:2025-01-20

\* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: hkn@bjfu.edu.cn

permeability capabilities. Delving into its influencing factors is crucial for gaining a profound understanding and accurately evaluating the water conservation function transfer functions of forests. This study zeroes in on critical physicochemical indicators, including soil bulk density, organic carbon, field capacity, and porosity, within the natural secondary *Betula platyphylla* forest located in the eastern Qilian Mountains. By conducting a meticulous evaluation of the forestland's water-holding capacity and a thorough analysis of how soil physicochemical properties influence  $K_s$ , we aim to unravel the intricacies of this phenomenon. To achieve our objectives, we established a soil pedo-transfer function model utilizing the multiple stepwise regression analysis method. This model serves as a tool to predict and understand the variations in  $K_s$  based on soil properties. To validate the model's accuracy, we compared its predictive performance against six existing soil transfer function models, aiming to identify the optimal model tailored for our study area. Our findings are as follows: (1) The  $K_s$  values in this region span from 0.25 to 3.94 mm/min, averaging at 1.64 mm/min. Employing the entropy weight method to assess soil water-holding capacity underscores the significant weight carried by  $K_s$ . Notably, when the stand density falls within the range of 600 to 900 trees/hm<sup>2</sup>, the forestland demonstrates the highest comprehensive score for water-holding performance. (2) Pearson analysis further elucidates a negative correlation between  $K_s$  and clay, silt content, as well as soil bulk density. Conversely,  $K_s$  positively correlates with sand content, organic carbon content, and porosity. (3) In terms of predictive performance, the new model constructed in this study outperforms the other six soil transfer function models, with a coefficient of determination ( $R^2$ ) between predicted and measured values reaching an impressive 0.85. In summary,  $K_s$  emerges as a pivotal indicator for evaluating the water-holding capacity of natural *Betula platyphylla* forests in the eastern Qilian Mountains. Specifically, when the stand density is maintained between 600 and 900 trees/hm<sup>2</sup>, the forestland exhibits optimal water-holding performance. The newly formulated soil transfer function model in this study offers a reliable tool for estimating  $K_s$  in this region, providing invaluable data support and scientific rationale for the optimal management and ecological restoration of water conservation forests in the eastern Qilian Mountains. This research not only deepens our comprehension of soil water dynamics but also contributes significantly to the sustainable management and conservation of forest ecosystems, paving the way for more informed and effective conservation strategies.

**Key Words:** saturated water conductivity; soil pedo-transfer function; *Betula platyphylla* forests; the eastern Qilian Mountains

森林是陆地生态系统的主体和重要资源,具有极其重要的涵养水源、保持水土、调节气候等生态系统服务功能<sup>[1]</sup>,水源涵养功能在森林生态系统服务功能中占有重要地位,其时空变化不仅会影响流域内自然要素和生态系统过程的状况,还会影响人类的生产生活,引发人水交互协同效应<sup>[2]</sup>。土壤层在森林水文过程的垂直结构上,是森林发挥水源涵养功能和水土保持功能的主要功能层<sup>[3]</sup>,土壤的水力特性在对森林水源涵养功能的研究中占主导地位。其中,土壤饱和导水率(Soil saturated hydraulic conductivity,  $K_s$ )作为土壤水力特性的重要参数之一,不仅影响地表水文变化过程,还对水的转化储存起关键性作用<sup>[4]</sup>。因此,在评估和管理水源涵养功能时,必须充分考虑这一关键参数。

土壤传递函数(Pedo-transfer Functions, PTFs)是一种获取  $K_s$  值的间接估算方法。以较易获取的土壤参数为输入,通过算法推导出土壤水力特性,在一定程度上弥补了原位测量或野外取样进行室内测定等直接测量方式存在的成本高、耗时耗力等不足<sup>[5]</sup>,在全球及区域  $K_s$  的估算中得到了广泛应用。如石文豪<sup>[6]</sup>建立了天津地区土壤饱和导水率的 PTFs 模型,结果表明,所建立的传递函数能较为精确地预测天津地区土壤水力参数。Zhang 等<sup>[7]</sup>将土壤颗粒分布、容重、田间持水量作为输入因子建立了多个 PTFs 用于预测  $K_s$ 。孙志祥等<sup>[8]</sup>结合研究区特点增加土壤石砾含量,同时选取土壤容重、有机质含量和颗粒分布 3 种土壤基本特性参数作为输入变量,构建了横断山区的 PTFs,为山地森林水文过程和自然灾害预警研究提供实用的参数估算工具。然而,  $K_s$ 除了受容重、有机质和孔隙度<sup>[9]</sup>等土壤理化性质的影响,还受区域气候<sup>[10]</sup>、温度<sup>[11]</sup>等外部因素的影响。

以往研究<sup>[12-14]</sup>虽从不同角度对祁连山东部土壤持水性能进行了研究,但针对白桦天然林  $K_s$  分布特征的研究有所欠缺,运用 PTFs 模型不仅能够反映  $K_s$  及其影响因素间的定量关系,还能揭示其间的内在关联。宝库林场作为青海省西宁市的重要水源地,林区内的白桦天然林承担着涵养水源、保持水土等重要作用。然而,当前白桦林存在抚育管理不足、林分过密或过稀等问题,导致林地水源涵养功能的发挥严重受限。因此,对  $K_s$  分布特征及其影响因素进行深入分析并构建适用于该区的 PTFs 模型具有重要意义。本文以青海省大通县白桦天然次生林为研究对象,探讨影响白桦林土壤饱和导水率的土壤理化性质指标,基于研究区情况择优选取 PTFs 模型,为评价青海省大通县白桦天然次生林生态效能和水源涵养功能提供参考。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于青海省祁连山东部大通县宝库林场(图 1),地处青藏高原与黄土高原过渡地带( $36^{\circ}55'—37^{\circ}32'N, 100^{\circ}52'—101^{\circ}39'E$ )。该地区属高原大陆性气候,年平均气温为  $3.8^{\circ}C$ ,极端高温与低温分别为  $36.6$  和  $-33.8^{\circ}C$ ,降水少蒸发大,多年平均降水量为  $523.3mm$ ,多年平均蒸发量为  $1762.8mm$ 。海拔为  $2610—4600m$ ,地势西北高东南低。当地植被资源丰富,植被类型多样,主要包括乔木、灌木和草本三大类。乔木主要有白桦(*Betula platyphylla*)、红桦(*Betula albosinensis*)、青海云杉(*Picea crassifolia*)、华北落叶松(*Larix principis-rupprechtii*)等;灌木有沙棘(*Hippophae rhamnoides*)、秦岭小檗(*Berberis circumserrata*)、银露梅(*Potentilla glabra*)等;草本有野草莓(*Fragaria vesca*)、黑麦草(*Lolium perenne*)、茜草(*Carex spp*)、唐松草(*Thalictrum aquilegifolium*)等。土壤类型以黄土母质上发育的山地棕褐土和栗钙土为主<sup>[15]</sup>。

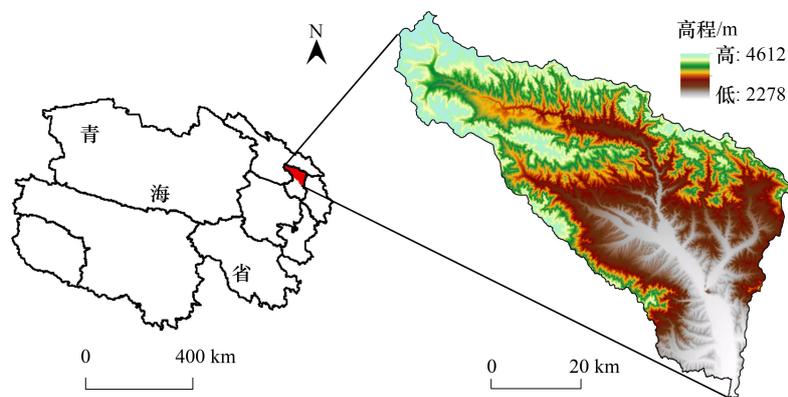


图 1 研究区位置图

Fig.1 Location map of study area

### 1.2 样地设置

2023 年 5—8 月,以林场提供的林分小班资料为依据,于青海大通县宝库林场白桦天然次生林林区开展野外实地调查。设置林相整齐、结构完整、受人为干扰较小、立地条件基本一致的白桦天然林样地 60 块,面积为  $24m \times 24m$ ,按研究区情况设置四个密度等级  $D_1$  ( $0—300$  株/ $hm^2$ )、 $D_2$  ( $300—600$  株/ $hm^2$ )、 $D_3$  ( $600—900$  株/ $hm^2$ )、 $D_4$  ( $900—1200$  株/ $hm^2$ )。调查并记录各样地海拔、坡度、平均胸径、郁闭度、平均树高等基本信息(表 1)。

### 1.3 指标测定

采用环刀法测量土壤饱和含水量( $SSWC, cm^3/cm^3$ )、总孔隙度( $P, \%$ )、容重( $BD, g/cm^3$ )、毛管孔隙度( $P_c, \%$ )、非毛管孔隙度( $P_{nc}, \%$ )和田间持水量( $FC, \%$ );采用恒定水头法<sup>[16]</sup>测量原状土壤的饱和导水率( $K_s, mm/min$ );采用重铬酸钾氧化-外加加热法<sup>[17]</sup>测定土壤有机碳( $SOC, g/kg$ );采用比重计法<sup>[18]</sup>测定土壤粒级

分布。按国际制土壤分类标准将土壤颗粒分为 3 级: 2—0.02mm 砂粒 ( $Sa, \%$ )、0.02—0.002mm 粉粒 ( $Si, \%$ ) 和 <0.002mm 粘粒 ( $Cl, \%$ )。

表 1 样地基本信息表

Table 1 Basic information of sample plots

样地编号 Sample plot number	林分密度 Stand density/(株/hm <sup>2</sup> )	变量 Variables	均值±标准差 Mean±SD	变异系数 Coefficients/%
D <sub>1</sub>	0—300	海拔/m	2905.38±67.69	2.33
		坡度/(°)	28.22±7.79	27.60
		郁闭度	0.49±0.04	7.69
		平均胸径/cm	22.61±9.06	40.07
		平均树高/m	11.58±5.29	45.65
D <sub>2</sub>	300—600	海拔/m	2865.42±70.04	2.44
		坡度/(°)	25.00±6.03	24.13
		郁闭度	0.53±0.06	10.59
		平均胸径/cm	20.90±7.75	37.06
		平均树高/m	13.16±5.08	38.60
D <sub>3</sub>	600—900	海拔/m	2839.38±58.48	2.06
		坡度/(°)	21.42±5.35	24.98
		郁闭度	0.58±0.06	10.50
		平均胸径/cm	14.64±5.95	40.65
		平均树高/m	10.60±4.22	39.84
D <sub>4</sub>	900—1200	海拔/m	2856.45±52.87	1.85
		坡度/(°)	24.92±5.00	20.06
		郁闭度	0.60±0.08	12.53
		平均胸径/cm	15.57±5.20	33.38
		平均树高/m	13.52±3.28	24.28

#### 1.4 土壤持水能力评价方法

根据各指标的变异程度,采用熵权法<sup>[19]</sup>得出各指标权重。主要步骤如下:

##### 1.4.1 数据标准化

对指标进行无量纲化处理,消除评价指标量纲的影响。 $a_{ij}$ 为第  $i$  个样本的第  $j$  个指标的数值 ( $i=1, 2, \dots, n; j=1, 2, \dots, m$ )。标准化公式为:

$$r_{ij} = \frac{|a_{ij} - \min_j a_{ij}|}{|\max_j a_{ij} - \min_j a_{ij}|} \quad (1)$$

##### 1.4.2 计算熵值

利用标准化公式得到评价矩阵  $R = (r_{ij})_{n \times m}$ 。对数据进行标准化后,计算各指标的信息熵。第  $j$  项指标下第  $i$  个样本所占该指标的比重:

$$p_{ij} = \frac{r_{ij}}{\sum_{i=0}^n a_{ij}} \quad i = 1, 2, \dots, n, j = 1, 2, \dots, m \quad (2)$$

第  $j$  项指标的信息熵:

$$e_j = -\frac{1}{\ln n} \sum_{i=1}^n p_{ij} \ln p_{ij} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (3)$$

其中,  $n$  是评价对象的数量,  $m$  是评价指标的数量。

##### 1.4.3 计算权重

根据各指标的熵值计算变异系数  $g_j$ ,再由各指标变异系数与总变异系数和的比值确定各指标的权重  $\omega_j$ ,

计算公式如下:

$$g_j = 1 - e_j \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (4)$$

$$\omega_j = \frac{g_j}{\sum_{j=1}^m g_j} \quad j = 1, 2, \dots, m \quad (5)$$

#### 1.4.4 计算综合评价值

将所求取的各项指标的权重,与评价对象的相应指标的标准化值相乘后相加,得出各评价对象的综合评价价值,综合评价价值越大越好。

计算公式为:

$$s_i = \sum_{j=1}^m \omega_j p_{ij} \quad (6)$$

#### 1.5 模型构建

将土壤理化性质指标 ( $S_i, Cl, Sa, SOC, BD, P, SSWC, P_C, P_{NC}, FC$ ) 作为输入变量,为保证模型的稳健性和准确性,选取总数据集 70% 的数据用于建模,剩余的 30% 用于验证模型的精度。通过主成分分析和多元逐步回归分析法得到影响  $K_s$  的主要变量,利用 Pearson 相关性分析选取输入变量的最优形式,进而构建土壤饱和导水率传递函数。将研究区实测数据分别代入不同 PTFs 模型计算  $K_s$ ,将平均误差 ( $ME$ )、平均相对误差 ( $MRE$ )、均方根误差 ( $RMSE$ )、决定系数 ( $R^2$ ) 和赤池信息准则 ( $AIC$ ) 作为检验指标,对本文引用的 6 种 PTFs 模型和新建 PTF 模型的结果进行精度分析。利用多元线性回归 (Multiple linear regression, MLR) 方法将预测因子与解释变量之间的关系处理为线性关系,具体的模型表达式为:

$$y = \alpha_0 + \alpha_1 x_1 + \alpha_2 x_2 + \alpha_3 x_3 + \dots + \alpha_n x_n \quad (7)$$

式中,  $y$  为因变量;  $x_1, x_2, x_3, x_n$  为解释变量;  $\alpha_0$  为偏差;  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_n$  为各解释变量对应的系数。

模型评价指标的计算:

$$MRE = \frac{1}{n} \sum \frac{|(k_i - l_i)|}{l_i} \times 100\% \quad (8)$$

$$ME = \frac{1}{n} \sum (k_i - l_i) \quad (9)$$

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (k_i - m_i)^2}{n}} \quad (10)$$

$$R^2 = \left[ \frac{\sum (k_i - \bar{k})(l_i - \bar{l})}{\sqrt{\sum (k_i - \bar{k})^2 \sum (l_i - \bar{l})^2}} \right]^2 \quad (11)$$

$$AIC = 2b + n \ln \left( \sum (k_i - l_i)^2 \right) \quad (12)$$

式中,  $n$  是所测数据的数量,  $k_i$  代表土壤饱和导水率 ( $\text{mm}/\text{min}$ ) 预测值;  $l_i$  表示土壤饱和导水率 ( $\text{mm}/\text{min}$ ) 实测值;  $\bar{k}$  和  $\bar{l}$  分别是预测值和实测值的平均值。  $b$  是 PTFs 中参数的数量。  $ME$  表示预测值与实测值的平均偏离程度;  $RMSE$  反映预测值与实测值的吻合程度;  $R^2$  反映预测值与实测值在变化趋势上的相似性。  $MRE$ 、 $RMSE$  和  $AIC$  越低,  $ME$  越接近 0,  $R^2$  越趋近于 1 时,模型预测性能越好。

#### 1.6 数据处理与分析

使用 Excel 2016 和 SPSS 26.0 软件进行数据分析与处理。采用 Origin 2021 制图, Excel 2016 制表。

## 2 结果与分析

### 2.1 土壤基本信息

在所测得的土壤理化性质指标 (表 2) 中,  $K_s$  与  $P_{NC}$  的变异程度较高 (50.00%, 63.61%)。  $K_s$  平均值为

1.64mm/min,变化范围介于0.25—3.94mm/min。土壤质地指土壤中不同粒径颗粒的组合状况,本研究  $Cl$ 、 $Si$ 、 $Sa$  比例分别为 10.15%—28.20%、51.04%—65.21%、11.20%—34.53%。 $BD$  表示单位体积的干土重,在 0.87—1.44g/cm<sup>3</sup>内变化,在不同土层间差异显著,随土层的加深而增大,40—60cm 土层  $BD$  最大。土壤有机质可通过改变土壤团聚体状况改善土壤结构,提高土壤导水能力<sup>[8]</sup>。本试验 SOC 介于 26.03—110.09g/kg,平均值为 65.46g/kg。

表 2 土壤指标的描述性统计

Table 2 Descriptive statistics of soil intems

数据 Data	指标 Intems	最小值 Minimum	最大值 Maximum	平均值 Mean	标准差 Standard deviation	变异系数 Coefficients/%
总数据集 Total dataset	$Cl/\%$	10.15	28.20	18.82	3.62	19.22
	$Si/\%$	51.04	65.21	58.50	3.03	5.17
	$Sa/\%$	11.20	34.53	22.67	4.66	20.55
	$SOC/(g/kg)$	26.03	110.09	65.46	14.27	21.86
	$BD/(g/cm^3)$	0.87	1.44	1.16	0.15	12.60
	$P/\%$	41.34	67.02	54.45	5.22	9.59
	$SSWC/(cm^3/cm^3)$	0.32	0.67	0.48	0.83	17.19
	$P_C/\%$	40.67	64.00	52.17	4.87	9.34
	$P_{NC}/\%$	0.19	6.94	2.29	1.46	63.61
	$FC/\%$	24.09	65.08	46.83	9.77	20.86
建模数据集 Modeling dataset	$K_S/(mm/min)$	0.25	3.94	1.64	0.82	50.00
	$Cl/\%$	11.29	28.20	18.82	3.69	19.62
	$Si/\%$	51.04	65.21	58.47	3.04	5.20
	$Sa/\%$	11.20	32.95	22.71	4.63	20.90
	$SOC/(g/kg)$	28.85	110.09	66.75	14.16	21.21
	$BD/(g/cm^3)$	0.87	1.44	1.17	0.15	12.91
	$P/\%$	41.34	67.02	54.60	5.60	10.25
	$SSWC/(cm^3/cm^3)$	0.32	0.67	0.48	0.88	18.13
	$P_C/\%$	40.67	64.00	52.12	5.07	9.74
	$P_{NC}/\%$	0.28	6.94	2.49	1.52	60.87
检验数据集 Test dataset	$FC/\%$	24.44	65.08	46.71	9.92	19.74
	$K_S/(mm/min)$	0.25	3.94	1.70	0.85	50.00
	$Cl/\%$	10.15	26.26	18.83	3.48	18.48
	$Si/\%$	51.47	64.75	58.58	3.03	5.17
	$Sa/\%$	13.48	34.53	22.59	4.79	21.19
	$SOC/(g/kg)$	26.03	88.35	62.30	14.23	22.84
	$BD/(g/cm^3)$	0.92	1.39	1.12	0.12	11.02
	$P/\%$	47.94	63.00	54.09	4.23	7.83
	$SSWC/(cm^3/cm^3)$	0.36	0.67	0.48	0.72	14.92
	$P_C/\%$	45.21	62.33	52.28	4.41	8.44
$P_{NC}/\%$	0.19	4.81	1.81	1.19	65.59	
$FC/\%$	24.09	61.94	47.10	9.53	20.23	
$K_S/(mm/min)$	0.36	3.20	1.52	0.72	47.37	

$Cl$ :粘粒 Clay;  $Si$ :粉粒 Silt;  $Sa$ :砂粒 Sand;  $SOC$ :土壤有机碳 Soil organic carbon;  $BD$ :土壤容重 Soil bulk density;  $P$ :总孔隙度 Total porosity;  $SSWC$ :土壤饱和含水量 Soil saturated water content;  $P_C$ :毛管孔隙度 Capillary porosity;  $P_{NC}$ :非毛管孔隙度 Non-capillary porosity;  $FC$ :田间持水量 Field capacity;  $K_S$ :土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity

## 2.2 不同密度白桦林土壤持水能力综合评价

结合前人研究<sup>[20-22]</sup>,选取  $K_S$ 、 $BD$ 、 $P$ 、 $SSWC$ 、 $P_C$ 、 $P_{NC}$  和  $FC$  作为白桦林土壤持水能力评价指标。利用熵权法对不同密度白桦林持水能力进行评价(表 3),将所得数据标准化后求平均值。将各指标的权重值与各林分指标标准化数据结合得出各林分密度的综合得分: $D_3(0.9633) > D_2(0.6136) > D_4(0.4465) > D_1(0.0591)$ ;各指标

所占权重从大到小依次为:  $BD(0.1714) > SSWC(0.1651) > K_s(0.1410) > P(0.1396) > P_c(0.1353) > FC(0.1283) > P_{NC}(0.1193)$ 。因此, 林分密度为  $D_3$  时, 林地持水能力较好;  $BD, SSWC, K_s$  可作为评价林地持水能力的关键指标。

表 3 不同林分密度白桦林持水能力综合评价

Table 3 Comprehensive evaluation of *Betula platyphylla* forest water holding capacity with different stand densities

指标 Index	权重 Weight	林分密度 Stand density			
		D <sub>1</sub>	D <sub>2</sub>	D <sub>3</sub>	D <sub>4</sub>
$K_s/(mm/min)$	0.1410	0.0005	0.2666	0.5001	0.2328
$BD/(g/cm^3)$	0.1714	0.0006	0.2699	0.5724	0.1571
$P/\%$	0.1396	0.1999	0.3282	0.4715	0.0005
$SSWC/(cm^3/cm^3)$	0.1651	0.0006	0.2678	0.5607	0.1709
$P_c/\%$	0.1353	0.0005	0.3206	0.4626	0.2164
$P_{NC}/\%$	0.1193	0.0004	0.3552	0.3632	0.2813
$FC/\%$	0.1283	0.0004	0.2456	0.3142	0.4398
综合得分 Comprehensive score	—	0.0591	0.6137	0.9633	0.4465
综合排序 Comprehensive rank	—	4	2	1	3

由研究区 0—20cm, 20—40cm 和 40—60cm 土层的土壤质地类型和国际土壤质地分类(图 2)可以看出, 采集的所有土样均涵盖两种土壤质地类型(粉壤土和粉质粘壤土), 在不同深度没有明显的异质性。因此, 为提高模型预测精度, 将所有土样作为整体采用单个 PTFs 模型预测土壤  $K_s$ 。

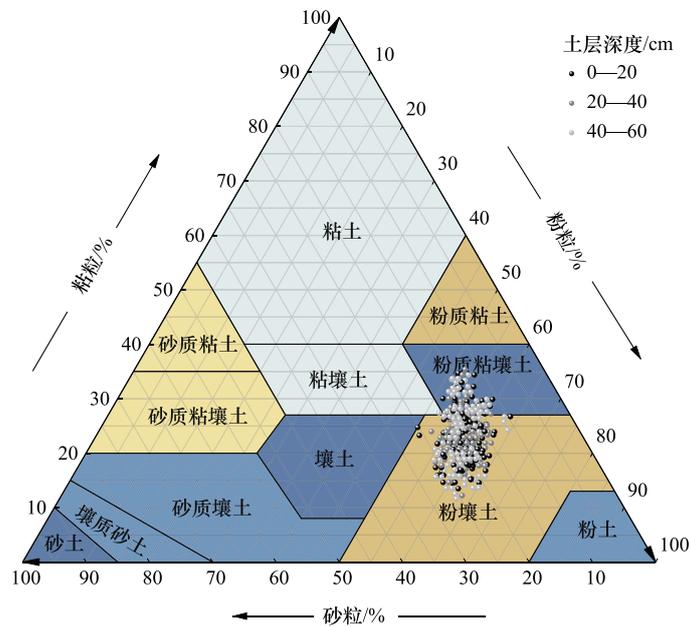


图 2 研究区土壤质地类型

Fig.2 Types of soil texture in the study area

### 2.3 本研究 PTFs 模型的建立

相关研究表明, 土壤  $K_s$  受多种理化性质的影响且并非属于简单的线性关系<sup>[23]</sup>, 因而将输入变量分别做  $X, X^2, \ln(X), e^X$  四种变形处理; 输出变量  $K_s$  处理为  $\ln(X)$ , 使其符合正态分布。将处理后的输入变量与输出变量做 Pearson 相关性分析(图 3), 最终选取与输出变量相关性最高的形式作为输入变量形式。

对 11 个土壤理化性质指标进行 Pearson 相关分析(图 3)表明, 在 55 个变量对中, 36 对显著相关 ( $P \leq$

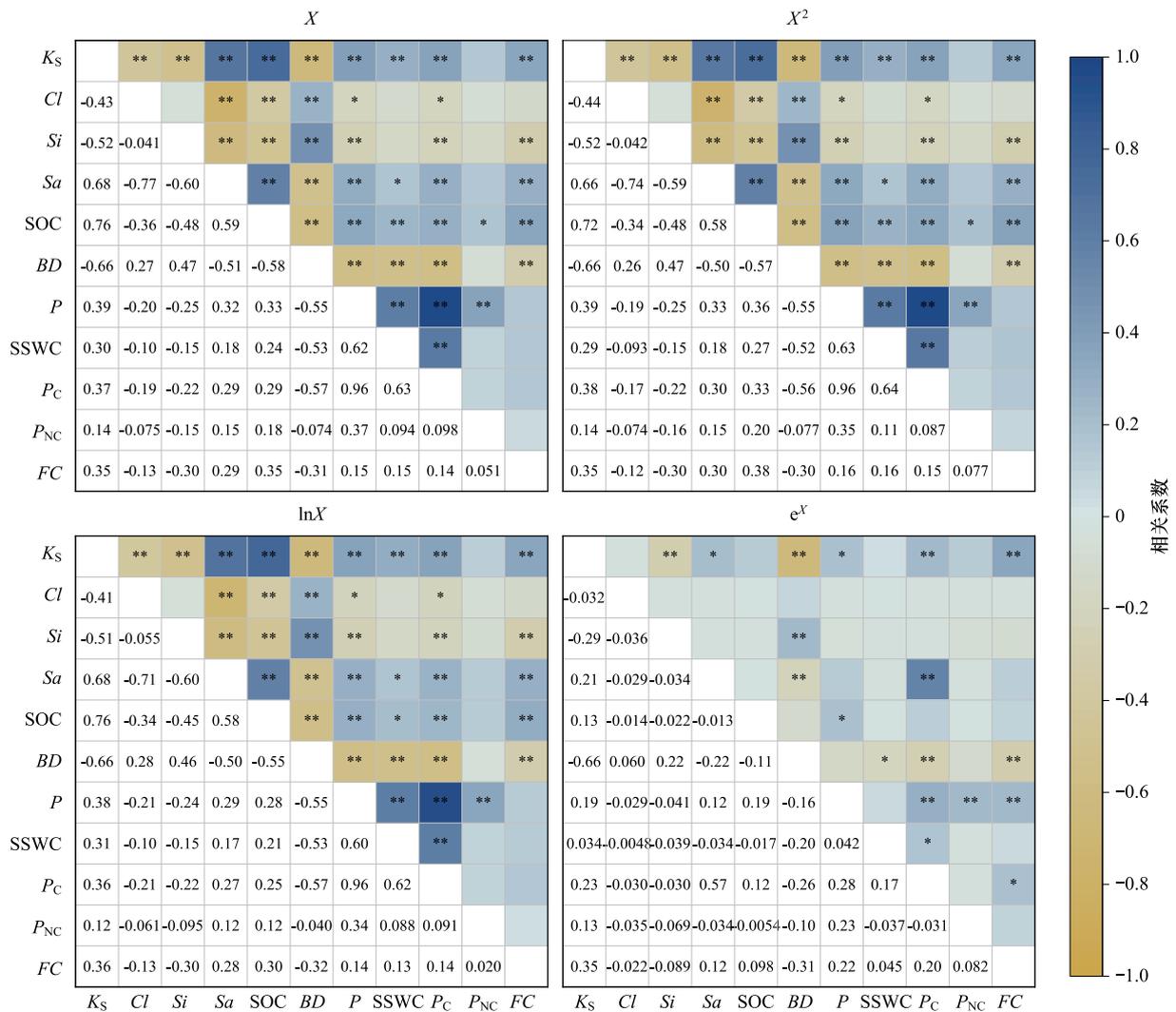


图3 各变形形式的相关系数矩阵

Fig.3 Correlation coefficient matrix of various deformation forms

Cl:粘粒 Clay;Si:粉粒 Silt;Sa:砂粒 Sand;SOC:土壤有机碳 Soil organic carbon;BD:土壤容重 Soil bulk density;P:总孔隙度 Total porosity;SSWC:土壤饱和含水量 Soil saturated water content;Pc:毛管孔隙度 Capillary porosity;Pnc:非毛管孔隙度 Non-capillary porosity;FC:田间持水量 Field capacity;Ks:土壤饱和导水率 Soil saturated hydraulic conductivity; \*:P≤0.05; \*\*:P≤0.01

0.05), 19对不相关(P>0.05)。其中Ks与Sa(0.68),SOC(0.76),P(0.39),SSWC(0.30),Pc(0.37),FC(0.35)呈极显著正相关关系,与Cl(-0.43),Si(-0.52)和BD(-0.66)呈现出极显著负相关关系,Ks受SOC(0.76),BD(-0.66)和Sa(0.68)影响最大。

依据四种变形对应的相关性系数矩阵,确定lnKs与10种输入变量的最佳变形形式(表4)。

通过多元逐步回归分析,得出lnKs和输入变量之间的回归方程:

$$\ln K_s = -6.237 + 1.011 \times \ln SOC - 0.255 \times e^{BD} + 1.041 \times \ln Sa$$

#### 2.4 不同PTFs模型估算结果对比

为探究青海大通县宝库林场天然白桦次生林Ks与土壤理化性质之间的复杂关系,获取研究区Ks的精细空间数据,选取Weynants模型<sup>[24]</sup>、Cosby模型<sup>[25]</sup>、Campbell模型<sup>[26]</sup>、Vereecken模型<sup>[27]</sup>、Jabro模型<sup>[28]</sup>、Julia模型<sup>[29]</sup>6个PTFs模型对研究区Ks进行预测,模型表达式见表5。

表 4 各输入变量最佳变形形式

Table 4 The optimal deformation form of each input variable

输入变量 Input variables	lnK <sub>s</sub>				输入变量 Input variables	lnK <sub>s</sub>			
	X	X <sup>2</sup>	lnX	e <sup>X</sup>		X	X <sup>2</sup>	lnX	e <sup>X</sup>
Cl/%		√			P/%		√		
Si/%		√			SSWC/(cm <sup>3</sup> /cm <sup>3</sup> )				√
Sa/%			√		P <sub>C</sub> /%		√		
SOC/(g/kg)			√		P <sub>NC</sub> /%	√			
BD/(g/cm <sup>3</sup> )				√	FC/%				√

表格中“√”表示输入变量在对应形式的变形处理时与 K<sub>s</sub> 相关性最强

表 5 本研究采用的 PTFs 估算模型表达式

Table 5 Expression of the PTFs estimation models used in this study

模型 Model	输入变量 Input variables	函数表达式 Function expressions
Weynants	Sa, BD, SOC	$K_s = 6.9444 \times 0.001 \times e^{(8.2927 - 0.0794 \times Sa - 1.9639 \times BD + 0.0192 \times SOC)}$
Cosby	Sa, Cl	$K = 0.4233 \times 10^{0.0126} \times Sa - 0.0064 \times Cl - 0.6$
Campbell	BD, Cl	$K_s = 6.851 \times \left(\frac{1.3}{BD}\right)^{1.3 \times b} \times e^{(-6.88 \times 0.01 \times Cl - 3.63 \times 0.01 \times Si - 0.025)}$ $b = (e^{(-2.5 \times 0.01 - 3.63 \times 0.01 \times Si - 6.88 \times 0.01 \times Cl)})^{0.5} + 0.2 \times e^{(0.133 \times Si + 0.47 \times 7Cl \times \ln 2 (e^{(-2.5 \times 0.01 - 3.63 \times 0.01 \times Si - 6.88 \times 0.01 \times Cl)})^{0.5})}$
Vereecken	Cl, Sa, BD, SOM	$K_s = 6.9444 \times 0.001 \times e^{(20.62 - 0.96 \times \ln Cl - 0.66 \times \ln Sa - 0.46 \times \ln SOM - 8.43 \times BD)}$
Jabro	Si, Cl, Sa, BD	$K_s = 6.9444 \times 0.001 \times e^{(-2.6611 + 0.687 \times \ln Si + 2.1362 \times \ln Cl - 2.2498 \times BD)}$
Julià	Sa	$K_s = 0.0153 \times e^{(0.0491 \times Sa)}$

SOM: 土壤有机质 Soil organic matter (g/kg); b: 与粒径有关的变量

由 7 个模型的预测值与实测值散点对比图(图 4)及模型精度评估(表 6)可知, 决定系数 R<sup>2</sup> 从大到小依次为: Cosby 模型(0.608) > Julià 模型(0.598) > Campbell 模型(0.529) > Vereecken 模型(0.336) > Weynants 模型(0.315) > Jabro 模型(0.308)。Cosby 模型 R<sup>2</sup> 最大, 说明该模型预测值的变化趋势最接近研究区实测值。Cosby 模型、Campbell 模型、Vereecken 模型与 Julià 模型预测结果总体分布偏离射线 y = x, 其中, Cosby 模型与

表 6 七种估算模型的估算精度评估

Table 6 Comparison of the accuracy of the seven methods

评价指标 Evaluation indicators	Weynants 模型	Cosby 模型	Campbell 模型	Vereecken 模型	Jabro 模型	Julià 模型	平均值 Mean	本研究 PTFs 模型 This research PTFs model
	Weynants model	Cosby model	Campbell model	Vereecken model	Jabro model	Julià model		
RMSE/(mm/min)	0.030	0.740	0.281	0.576	0.135	0.156	0.320	0.011
ME/(mm/min)	-0.003	0.062	-0.024	-0.049	0.011	-0.013	-0.003	-0.002
MRE	0.521	3.653	0.226	0.678	3.634	0.689	1.567	0.077
R <sup>2</sup>	0.315	0.608	0.529	0.336	0.308	0.598	0.449	0.702
AIC	287.869	616.956	344.154	550.367	140.330	176.276	352.659	117.889

RMSE: 均方根误差 Root mean square error; ME: 平均误差 Mean error; MRE: 平均相对误差 Mean relative error; R<sup>2</sup>: 决定系数 R-square; AIC: 赤池信息准则 Akaike information criterion

Campbell 模型预测值远高于实测值; 而 Vereecken 模型与 Julià 模型, 预测结果总体分布偏离射线 y = x, 且 ME 均小于 0, 说明其预测值远低于实测值。因此, 以上四种模型预测效果较差, 均不适用于预测该地区的 K<sub>s</sub>。Weynants 模型和 Jabro 模型的估算效果明显优于前面所述的四种模型, 其中 Weynants 模型预测值 RMSE (0.030) 最小, AIC 值(287.869) 较低, 模型估算结果总体分布在射线 y = x 周围, 预测效果较好。但与本研究建立的 PTF 模型相比, Weynants 模型预测结果离散程度较大, 说明新建 PTFs 模型对本研究区土壤饱和导水率

的预测具有更好的适用性。

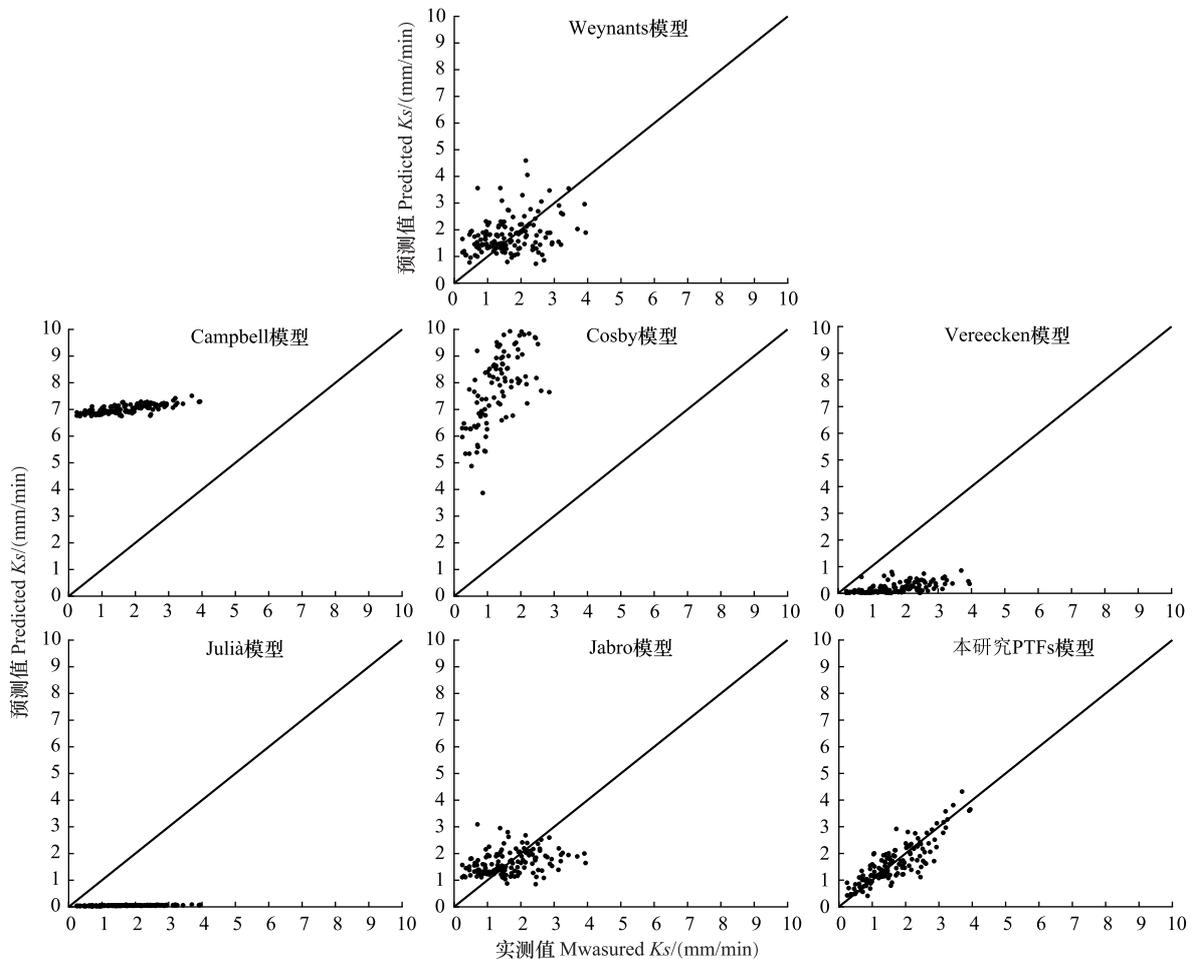


图4 7种PTFs模型对土壤饱和导水率估算值与实测值散点对比图

Fig.4 Scatter plots comparing estimated and measured values of soil saturated hydraulic conductivity using seven PTFs models

PTFs:土壤传递函数 Pedo-transfer functions

### 3 讨论

#### 3.1 林分密度对土壤持水指标响应特征

土壤参数在不同区域会呈现出相似的变异程度<sup>[30-31]</sup>。在所测土壤基本参数中, $K_s$ 的变异程度较高(50.00%),这可能与Cl含量在黄土高原的地带性分布有关<sup>[32]</sup>,高Cl含量增强土壤颗粒吸附作用,提高林地土壤持水能力<sup>[33]</sup>,从而影响土壤水力性质的空间分布特征,加剧土壤参数的空间变异。

研究表明, $K_s$ 值随着林分密度的增加呈现典型的先上升后下降的规律。在低密度林分条件下,植被稀疏,土壤缺乏足够的保护和改良措施,导致土壤结构疏松,水分易流失。相比之下,中等林分密度能有效保障林木生长空间,显著促进根系的生长与发育,进而增强根系的穿透能力,优化土壤结构,增加土壤孔隙度,最终提升土壤的通气性和透水性,以及土壤的导水率<sup>[34]</sup>。此外,中密度林分条件下,土壤水热条件适中,有利于枯落物的积累和分解,进而促进水分和养分的循环,提高土壤的水源涵养能力。然而,当林分密度超过某一阈值时,林分间的竞争效应加剧,林木生长受到抑制,导致其对土壤的改良作用减弱,土壤结构趋于紧密,通透性降低,水分渗透和储存能力下降,导致林地整体的导水性能下降<sup>[35]</sup>,进而削弱土壤的水源涵养能力<sup>[36]</sup>。综上,合理的林分密度(600—900株/hm<sup>2</sup>)能够有效保障植株的生长空间,增强林分冠层的通透性和群体透光能力,促进

水分的有效渗透和储存,从而确保林地水源涵养功能的有效发挥。

### 3.2 土壤理化指标相关性

由前文可知,土壤  $K_s$  能在一定程度上反应林地持水性能。在土壤形成的复杂过程中, $BD$ 、 $P$  等因素与  $K_s$  之间存在紧密的相关性<sup>[37]</sup>,这些因素的变化会直接影响土壤的持水能力。相关性分析进一步揭示了祁连山东部白桦天然林林地土壤  $K_s$  与  $BD$  之间呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),于冬雪等<sup>[38]</sup>对黄土区不同土层  $K_s$  空间变异及其影响因素的研究印证了这一结论,这是因为  $BD$  直接反映了土壤颗粒的紧实程度。随着  $BD$  的增加,土壤紧实度上升,水分难以入渗,降低  $K_s$ ,削弱林地持水能力。此外,本研究  $K_s$  与  $P$  和  $P_c$  呈极显著正相关关系,与  $P_{NC}$  的正相关关系不显著( $P > 0.05$ ),而邓佳楠等<sup>[39]</sup>认为  $K_s$  与  $P_{NC}$  呈显著( $P < 0.05$ )正相关,与  $P_c$  呈极显著( $P < 0.01$ )负相关。造成这种差异可能与土壤中石砾的存在有关,大块石砾阻塞土壤孔隙,降低非毛管孔隙的连通性,从而减缓水分的垂直移动速度<sup>[40]</sup>。 $K_s$  与土壤中的  $Cl$  和  $Si$  含量呈极显著负相关关系( $P < 0.01$ ),这是因为  $Cl$  作为一种土壤胶结物质,能影响土壤结构。随  $Cl$  含量的增高,相同体积下的土壤表面积增大,土壤基质势随之提高,抑制了土壤水分的下渗<sup>[9]</sup>,影响林地导水能力的发挥。相反, $K_s$  与土壤  $Sa$  含量具有极显著正相关关系( $P < 0.01$ )。当土壤  $Si$  含量较高而  $Sa$  含量较低时,土壤紧实度增加,大孔隙减少,导致水分入渗能力减弱和导水性能下降<sup>[41]</sup>。本研究结果显示, $K_s$  与  $SOC$  含量呈极显著正相关关系( $P < 0.01$ ),Zema 等<sup>[42]</sup>的研究也得出森林土壤有机质是影响土壤水力特性的关键参数。这是因为土壤  $SOC$  的增加可以促进土壤微生物的活动<sup>[43]</sup>,微生物在分解有机质的过程中会产生二氧化碳和其他气体,这些气体的释放有助于土壤孔隙的形成和扩大,改善土壤质地,提高  $K_s$ <sup>[44]</sup>。同时, $SOC$  作为土壤团聚体的重要胶结物质,其含量的增加能够促进土壤团聚体的形成,间接提高  $K_s$ <sup>[45]</sup>,使林地持水性能得以充分发挥。而刘星廷<sup>[46]</sup>等研究表明  $K_s$  与有机质呈负相关关系,可见  $K_s$  与其理化性质的相关关系可能与研究区域的植被类型、土地利用类型的不同有关。因此,在探讨  $K_s$  与土壤理化性质的关系时,需要充分考虑研究区域的具体条件和背景。

### 3.3 不同 PTFs 模型预测精度分析

本研究针对 7 种不同 PTFs 模型在该地区的  $K_s$  估算效果进行了对比和分析。结果显示, Cosby 模型、Campbell 模型、Vereecken 模型与 Julia 模型在该地区的  $K_s$  估算中并不适用,这可能是由于这些模型所选取的输入变量在该地区对  $K_s$  的影响并非主导因素。Weynants 和 Jabro 模型的估算效果存在较大的离散性,这可能是由于  $K_s$  的测量误差、土壤特性的空间变异性等多种因素共同作用的结果。为提升  $K_s$  估算效果,本研究探讨了变量间的潜在交互作用,并采用多元逐步回归分析法来筛选并剔除冗余变量。采用多元逐步回归分析法剔除冗余变量,最终选取  $SOC$ 、 $BD$ 、 $Sa$  作为输入变量建立 PTF 模型,该模型在本研究区域的  $K_s$  估算中显示出更好的适用性。

尽管本研究在 PTF 模型的优化上取得了进展,但在探索更先进的算法和模型的同时,也应重视直接测量技术的创新与发展。值得注意的是,本研究的建模数据和检验数据均经过随机分组处理,但建模和检验数据的选取对 PTF 的预测性能可能具有显著影响。因此,在未来的 PTF 比较和选择过程中,需要进行反复验证,以确保所选 PTF 的稳定性和可靠性。此外,本研究建立的 PTF 模型可能仅适用于当前的植被结构,对于其在未来几年内的适用性,仍需通过进一步的实地验证和模型优化来加以确认。

## 4 结论

(1) 土壤饱和导水率( $K_s$ )的变化范围为 0.25—3.94mm/min,平均值为 1.64mm/min。采用熵权法对表征土壤持水能力的 7 个关键指标进行综合评价,结果显示, $K_s$  作为评价林地持水能力的核心指标,其重要性显著。此外,当林分密度控制在 600—900 株/hm<sup>2</sup>时,林地能够发挥较好的水源涵养效益。

(2) 通过 Pearson 相关分析揭示了土壤饱和导水率( $K_s$ )与土壤理化性质之间的关系: $K_s$  与粘粒、粉粒和土壤容重之间存在显著的负相关关系,表明土壤紧实度的提高可能会削弱土壤导水能力。 $K_s$  与砂粒、有机碳和土壤孔隙度(包括毛管孔隙度和非毛管孔隙度)之间表现出显著的正相关关系,表明土壤结构的疏松程度、有

机质含量以及孔隙度的增加有助于提高土壤的导水性能。

(3) 为了进一步探究土壤饱和和导水率的影响因素,本研究运用多元线性回归分析方法,构建了白桦天然次生林的土壤饱和和导水率传递函数。该函数揭示了土壤饱和和导水率( $K_s$ )与土壤容重、有机碳含量以及砂粒含量之间的定量关系。通过回归分析,得到以下关系式:

$$\ln K_s = -6.237 + 1.011 \times \ln \text{SOC} - 0.255 \times e^{BD} + 1.041 \times \ln Sa, R^2 = 0.85$$

该关系式揭示了土壤饱和和导水率及其影响因素间的内在关联,同时也为祁连山东部白桦天然次生林水源涵养功能的评估和管理提供了科学指导。

#### 参考文献(References):

- [ 1 ] 邓雅丽,赵新宇,崔自杰,冯英杰,张卫强,刘效东. 中国森林生态系统林冠层降雨截留特征. 生态学报,2024,44 (7): 2981-2992.
- [ 2 ] Chen Q R, Xu X, Wu M Y, Wen Ji Mg, Zou J L. Assessing the Water Conservation Function Based on the InVEST Model: Taking Poyang Lake Region as an Example. Land,2022,11 (12): 2228.
- [ 3 ] 房园,梁中,张毓涛,师庆东,孙雪娇,李吉攻,李翔,董振涛. 天山云杉森林生态系统的水源涵养能力海拔梯度变化特征. 生态环境学报,2023,32 (9): 1574-1584.
- [ 4 ] 曾建辉,马波,郭迎香,张泽宇,李桂,李占斌,刘晨光. 冻融条件下生物结皮覆盖对土壤饱和和导水率的影响. 生态学报,2022,42 (1): 348-358.
- [ 5 ] 黎明扬,刘廷玺,罗艳云,段利民,张俊怡,周亚军,Scharaw Buren. 半干旱草原型流域表层土壤饱和和导水率传递函数及遥感反演研究. 土壤学报,2019,56 (1): 90-100.
- [ 6 ] 石文豪. 基于天津地区土壤水力参数的传递函数构建研究[D]. 天津: 天津大学,2021.
- [ 7 ] Zhang Y G, Marcel G. Schaap. Weighted recalibration of the Rosetta pedotransfer model with improved estimates of hydraulic parameter distributions and summary statistics (Rosetta3). Journal of Hydrology,2017,547: 39-53.
- [ 8 ] 孙志祥,崔俊芳,杨汝馨,唐翔宇,王根绪. 横断山区森林土壤饱和和导水率传递函数的评价与构建研究. 土壤,2022,54 (3): 594-601.
- [ 9 ] 张益,林毅雁,贾国栋,余新晓,王渝淞,雷自然. 北京山区典型植被类型土壤饱和和导水率及其影响因素. 水土保持学报,2022,36 (6): 171-178.
- [ 10 ] Tarek Z, Ólöf H A. Hydrologic performance of grass swales in cold maritime climates; Impacts of frost, rain-on-snow and snow cover on flow and volume reduction. Journal of Hydrology,2021,597: 126159.
- [ 11 ] Yang G Q, Xu Y F, Huo L J, Wang H, Guo D P. Analysis of Temperature Effect on Saturated Hydraulic Conductivity of the Chinese Loess. Water,2022,14 (9): 1327-1327.
- [ 12 ] 刘贤德,李效雄,张学龙,金铭,孙昌平,王顺利,罗龙发. 干旱半干旱区山地森林类型的土壤水文特征. 干旱区地理,2009,32 (5): 691-697.
- [ 13 ] 牛赞,刘贤德,李新,张学龙,赵维俊. 祁连山大野口流域森林空间结构及水源涵养功能. 中国沙漠,2014,34 (6): 1685-1691.
- [ 14 ] 袁杰,曹广超,曹生奎,赵青林. 祁连山南坡不同植被类型枯落物及其土壤持水特性分析. 生态科学,2018,37 (5): 180-190.
- [ 15 ] 王莉,林莎,李远航,陈梦飞,贺康宁. 青海大通典型林分冠层结构与林下植被物种多样性关系研究. 西北植物学报,2019,39 (3): 524-533.
- [ 16 ] 谭学进,穆兴民,高鹏,孙文义,赵广举,顾朝军. 黄土区植被恢复对土壤物理性质的影响. 中国环境科学,2019,39 (2): 713-722.
- [ 17 ] 吴宇萍,丁明军,张华,张月菊,徐欢,黄鹏. 高寒草甸重度退化阶段土壤碳氮磷生态化学计量特征及驱动因素. 环境科学,2024,45 (10): 6050-6060.
- [ 18 ] 马作豪,唐昊治,李文红,王如海. 吸管法和比重计法测定土壤机械组成的比对研究. 中国无机分析化学,2023,13 (6): 645-651.
- [ 19 ] 朱柱,杨海龙,黄乾,赵嘉玮. 青海高寒黄土区典型水源涵养林健康评价. 浙江农林大学学报,2019,36 (6): 1166-1173.
- [ 20 ] 陈凤怡,黄艳萍,严美,韩宇杰,王康,涂志华. 琼西北3种林分类型枯落物与土壤的持水能力. 森林与环境学报,2024,44(3): 233-241.
- [ 21 ] 伊怀虎,艾力夏提·库尔班,韦自强,任鹏,李士杰,辛颖. 不同结构落叶松人工林枯落物和土壤的持水特性. 森林与环境学报,2023,43(5): 481-490.
- [ 22 ] 孙玉,杨永胜,何琦,王军邦,张秀娟,李慧婷,徐兴良,周华坤,张宇恒. 三江源高寒草甸水源涵养功能及土壤理化性质对退化程度的响应. 草业学报,2023,32(6): 16-29.
- [ 23 ] Zeleke B T, Si C B. Scaling Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Physical Properties. Soil Science Society of America Journal,2005,69 (6): 1691-1702.
- [ 24 ] Weynants M, Vereecken H, Javaux M. Revisiting Vereecken Pedotransfer Functions: Introducing a Closed-Form Hydraulic Model. Vadose Zone

- Journal,2009,8(1): 86-95.
- [25] Cosby, Bernard, George M. Hornberger, Roger B. Clapp and Timothy R. Ginn. A Statistical Exploration of the Relationships of Soil Moisture Characteristics to the Physical Properties of Soils. *Water Resources Research*. 1984,20(6): 682-690.
- [26] Campbell G S, Shiozawa S. Prediction of hydraulic properties of soils using particle-size distribution and bulk density data. 1992; 317-328.
- [27] Vereecken H, Maes J, Feyen J. Estimating unsaturated hydraulic conductivity from easily measured soil properties. *Soil Science*, 1990, 149(1): 1-12.
- [28] Julià M F, Monreal T E, Jiménez A S D C, Garcia M. Constructing a saturated hydraulic conductivity map of Spain using pedotransfer functions and spatial prediction. *Geoderma*, 2004, 123(3/4): 257-277.
- [29] Jabro J D. Estimation of saturated hydraulic conductivity of soils from particle size distribution and bulk density data. *Transactions of the ASABE*, 1992, 35(2): 557-560.
- [30] 李平, 王冬梅, 丁聪, 任远. 黄土高寒区小流域土壤饱和导水率和土壤密度的分布特征. *中国水土保持科学*, 2019, 17(4): 9-17.
- [31] 张湘潭, 曾辰, 张凡, 央宗. 藏东南典型小流域土壤饱和导水率和土壤容重空间分布. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 69-72.
- [32] 赵春雷. 黄土高原南北样带土壤干层时空特征及模拟[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2018.
- [33] 曾锐, 张陶, 蒲俊兵, 李建鸿, 王赛男, 陈金珂. 岩溶断陷盆地不同地貌部位土壤水时空分布规律及其影响因素. *水土保持研究*, 2021, 28(1): 50-57.
- [34] 胡亚伟, 施政政, 刘畅, 徐勤涛, 张建军. 晋西黄土区刺槐林密度对林下植物多样性及土壤理化性质的影响. *生态学杂志*, 2023, 42(9): 2072-2080.
- [35] 刘凯, 贺康宁, 王先棒. 青海高寒区不同密度白桦林枯落物水文效应. *北京林业大学学报*, 2018, 40(1): 89-97.
- [36] 兰道云, 毕华兴, 赵丹阳, 王宁, 云慧雅, 王珊珊, 崔艳红. 晋西黄土区不同密度油松人工林保育土壤功能评价. *水土保持学报*, 2022, 36(2): 189-196.
- [37] 邹文秀, 韩晓增, 陆欣春, 郝翔翔, 江恒, 刘元明. 不同土地利用方式对黑土剖面土壤物理性质的影响. *水土保持学报*, 2015, 29(5): 187-193+199.
- [38] 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. *土壤通报*, 2018, 49(5): 1073-1079.
- [39] 邓佳楠, 张军, 刘泽彬, 刘帆, 郭建斌, 马水莲. 六盘山华北落叶松坡面土壤饱和导水率空间异质性及影响因素. *水土保持研究*, 2022, 29(5): 144-148+163.
- [40] 王玮璐, 贺康宁, 张潭, 王先棒, 张震中. 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. *植物资源与环境学报*, 2020, 29(2): 69-77.
- [41] Zeleke T B, Si B C. Scaling Relationships between Saturated Hydraulic Conductivity and Soil Physical Properties. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(6): 1691.
- [42] Zema A D, Plaza-Alvarez A P, Xu X, Carra B C. Influence of forest stand age on soil water repellency and hydraulic conductivity in the Mediterranean environment. *Science of the Total Environment*, 2021, 753: 142006-142006.
- [43] 张祎, 李鹏, 肖列, 赵宾华, 时鹏. 黄土高原丘陵区地形和土地利用对土壤有机碳的影响. *土壤学报*, 2019, 56(5): 1140-1150.
- [44] Wu H W, Cui H L, Fu C X, Li R, Qi F Y, Liu Z L, Yang G, Xiao K Q, Qiao M. Unveiling the crucial role of soil microorganisms in carbon cycling: A review. *The Science of the total environment*, 2023, 909: 168627.
- [45] 汪景宽, 徐英德, 丁凡, 高晓丹, 李双异, 孙良杰, 安婷婷, 裴久渤, 李明, 王阳, 张维俊, 葛壮. 植物残体向土壤有机质转化过程及其稳定机制的研究进展. *土壤学报*, 2019, 56(3): 528-540.
- [46] 刘星廷, 乔江波, 杨涛, 马雅莉, 田涵洋, 韩晓阳, 朱元骏. 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. *地球环境学报*, 2024, 15(4): 665-674.