

# 北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素

张 益<sup>1,2</sup>, 林毅雁<sup>3</sup>, 贾国栋<sup>1,2</sup>, 余新晓<sup>1,2</sup>, 王渝淞<sup>1,2</sup>, 雷自然<sup>1,2</sup>

(1.北京林业大学水土保持学院,北京 100083;2.北京林业大学  
国家林业和草原局水土保持重点实验室,北京 100083;3.福建农业职业技术学院园艺园林学院,福州 350119)

**摘要:** 研究典型植被类型的土壤饱和导水率( $K_s$ )分布及其影响因素,可为北京山区植被建设提供有力借鉴,同时加深对于土壤水分运动的理解。选取北京山区最具代表性的 4 种植被类型,获取不同类型、不同层次的土壤饱和导水率,调查土壤理化性质与根系生物量、石砾体积,利用 Pearson 相关性分析、多元逐步回归、通径分析,明晰了北京山区典型植被类型下的土壤饱和导水率分布及其影响因素。结果表明:(1)土壤饱和导水率介于 0.05~2.23 mm/min,属于高度变异,随土层向下不断减小,侧柏×灌木混交林、侧柏纯林与侧柏×五角枫混交林的土壤饱和导水率存在显著差异( $p<0.05$ )。土壤饱和导水率与土层深度之间的关系符合对数函数关系式  $y=\pm a\ln x+b$ ,  $R^2\geq 0.858$ 。(2)相关性分析结果表明,土壤饱和导水率与容重、总孔隙度、毛管孔隙度、根系生物量、有机质含量均呈极显著相关关系( $p<0.01$ ),与非毛管孔隙度、自然含水率呈显著相关关系( $p<0.05$ )。(3)逐步回归分析得  $Y=3.42X_2+0.78X_6-1.333$ ,  $R^2=0.862$ 。进一步通径分析可知,根系生物量主要通过直接作用影响土壤饱和导水率,而总孔隙度通过间接作用影响土壤饱和导水率。可知,侧柏×灌木混交林的导水性能最佳,后续的植被建设应重点考虑侧柏×灌木混交林,以达到减少径流、涵养水源的目的。

**关键词:** 北京山区; 剖面分布; 土壤饱和导水率; 影响因素

**中图分类号:** S152.7      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1009-2242(2022)06-0171-08

**DOI:** 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.06.022

## Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Its Influencing Factors of Typical Vegetation Types in Beijing Mountainous Area

ZHANG Yi<sup>1,2</sup>, LIN Yiyan<sup>3</sup>, JIA Guodong<sup>1,2</sup>, YU Xinxiao<sup>1,2</sup>, WANG Yusong<sup>1,2</sup>, LEI Ziran<sup>1,2</sup>

(1.School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 2.Key Laboratory of State Forestry and Grassland Administration on Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083; 3.College of Horticulture and Forestry, Fujian Vocational College of Agriculture, Fuzhou 350119)

**Abstract:** The distribution of soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) and its influencing factors under typical vegetation types can provide a powerful reference for vegetation construction in Beijing mountainous area and deepen the understanding of soil water movement. In this study, four typical vegetation types in Beijing mountainous area were selected, and soil physical and chemical properties, root biomass and gravel volume were investigated. Based on Pearson correlation analysis, multiple stepwise regression analysis and path analysis, the distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors were obtained. The results showed that: (1) The soil saturated hydraulic conductivity ranged from 0.05 mm/min to 2.23 mm/min, which belonged to the height variation and decreased with the soil layer downward. The soil saturated hydraulic conductivity of the mixed forest of *Platycladus Orientalis* and Shrub, pure forest of *Platycladus Orientalis* and mixed forest of *Platycladus Orientalis* and *Acer elegantulum* were significantly different ( $p<0.05$ ). The relationship between soil saturated hydraulic conductivity and depth was in accordance with logarithmic function  $y=\pm a\ln x+b$ ,  $R^2\geq 0.858$ . (2) Correlation analysis showed that soil saturated hydraulic conductivity was significantly correlated with bulk density, total porosity, capillary porosity, root

biomass and organic matter content ( $p < 0.01$ ), there was significant correlation with non-capillary porosity and natural water content ( $p < 0.05$ ). (3) Stepwise regression analysis showed  $Y = 3.42X_2 + 0.78X_6 - 1.333$ ,  $R^2 = 0.862$ . Further path analysis showed that root biomass mainly affected soil saturated hydraulic conductivity directly, while total porosity affected soil saturated hydraulic conductivity indirectly. And as it turns out, the mixed forest of *Platycladus Orientalis* and shrub has the best water conductivity, and the latter vegetation construction should focus on the mixed forest of *Platycladus Orientalis* and shrub in order to reduce runoff and conserve water sources.

**Keywords:** Beijing mountainous area; profile distribution; soil saturated hydraulic conductivity; influencing factors

土壤饱和导水率( $K_s$ )是指土壤在饱和状态下,在单位水势梯度下通过固定面积的水流通量。 $K_s$ 是反映土壤渗透能力的重要参数<sup>[1]</sup>,对于土壤水分运动过程与溶质运移模型的研究具有重要意义。

$K_s$ 具有高度的空间变异性<sup>[2]</sup>,Fu 等<sup>[3]</sup>研究了  $K_s$ 在不同坡位上的差异;Yang 等<sup>[4]</sup>在南北长达数百公里的样带上研究了  $K_s$ 的空间变异性;杨震等<sup>[5]</sup>研究了流域横向梯度上的  $K_s$ 的空间分布特征。由此得知,目前对  $K_s$ 的空间变异性与分布特征的研究多为水平方向,垂直方向上对  $K_s$ 的空间变异研究相对缺乏<sup>[6]</sup>。 $K_s$ 受到许多因素的影响,现有研究<sup>[7-8]</sup>普遍认为, $K_s$ 与容重、毛管孔隙度、质地、水稳性团聚体含量、有机质含量等土壤理化性质关系密切。同时,植被群落特征也是重要因素。王子龙等<sup>[9]</sup>研究了不同退耕年限草地的  $K_s$ 及其影响因素,结果表明随退耕年限增加, $K_s$ 显著增加。除此之外,土壤大孔隙、根系状况、石砾体积在影响  $K_s$ 方面的重要性也得到证实<sup>[10]</sup>。刘目兴等<sup>[11]</sup>研究表明,占土壤大孔隙总数量 1.26%~8.55%的 >1 mm 土壤大孔隙,能够解释  $K_s$  84.7%的变异;刘玲等<sup>[12]</sup>、吴四平等<sup>[13]</sup>的研究表明,土壤石砾体积和根系生物量与  $K_s$ 达到显著相关关系。但已有研究统计方法多使用 Pearson 相关,较为单一,而实际上土壤理化性质之间存在相互作用,Pearson 相关不能正确表达各理化性质与  $K_s$ 之间的关系。通径分析是数量遗传学家 Sewall Wright 提出的一种多元统计方法,在遗传育种、水产养殖等领域得到了广泛应用<sup>[14]</sup>,它可将自变量、因变量之间的关系分为直接相关与间接相关。因此,在  $K_s$ 的研究上引入通径分析可以一定程度上弥补 Pearson 相关的不足。

综上所述,学者们对  $K_s$ 分布与影响因素进行了大量研究,但影响因素复杂,结果不尽相同,并且在数据处理上也有一定的局限。因此,需要对其进行进一步研究。且已有的研究多位于黄土区,对于华北土石山区的研究较少。北京山区位于北京市西北部,作为华北土石山区的重要组成部分,现有植被均来自建国后进行的

大规模植被建设,其生态、社会效益尚不明确。同时北京山区石砾含量高,充分生长发育的根系在土中穿梭交错,形成的根土石混合介质,对土壤导水能力产生显著影响。而现有的研究考虑根系与石砾对于  $K_s$ 的研究较少,同时考虑两者影响的更是鲜有报道。

近年来,北京极端降雨事件频发,造成巨大的人员财产损失。 $K_s$ 作为体现土壤渗透能力的重要指标,提高  $K_s$ 有利于降雨进入土壤,减小地表径流,从而达到减小灾害、涵养水源的目的。北京山区作为北京市的重要水源涵养区<sup>[15]</sup>,明晰典型植被建设下的土壤渗透能力及其影响因素,对于保障北京城市安全,建设首都生态屏障具有重要意义。基于以上认识,本试验获取研究北京山区典型植被类型下的剖面  $K_s$ ,研究  $K_s$ 分布特征及其影响因素,以期是北京山区的植被建设提供科学依据,同时为土壤水分运动提供理论支持。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区地处北京鹫峰国家森林公园,位于燕山山脉与太行山山脉的交界处。地理坐标为北纬 39°54' N,东经 116°28' E,面积 832.04 km<sup>2</sup>。主峰海拔 465 m,最高海拔位于萝芭地,为 1 153 m。气候为半湿润半干旱大陆性季风气候,秋冬寒冷干燥,夏季高温多雨,多年平均降水量 630 mm,集中在夏季。土壤发育程度低,多石砾,主要为淋溶褐土和棕壤土,成土母质主要为花岗岩、石灰岩和凝灰岩。土壤类型在研究区内呈现复杂的变化。研究区原生植被以落叶阔叶林与针叶林为主,在 20 世纪经历大规模人工造林后,森林覆盖率有大幅提高,植被以油松(*Pinus tabulaeformis*)、侧柏(*Platycladus orientalis*)、栓皮栎(*Quercus variabilis*)、五角枫(*Acer elegantulum*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等北方常见树种为主。山杨(*Populus davidiana*)、胡枝子(*Lespedeza bicolor*)等灌木在研究区也有广泛分布。

### 1.2 试验方法

#### 1.2.1 野外采样

选择五角枫纯林、侧柏纯林、侧柏×五角枫混交

林、侧柏×灌木混交林等 4 种北京山区具有代表性的植被类型,每种植被类型布设坡度、坡向、树龄、林分密度基本一致的 3 个 20 m×20 m 样地,样地具体情况见表 1。每个样地选取合适位置挖掘 3 个深度为 60 cm 的垂直剖面,用体积 500 cm<sup>3</sup> 的定制环刀(100 mm×63.7 mm)在剖面每 10 cm 进行 1 次取样,用于测量土壤饱和导水率和根系生物量、石砾体积。接着用体积 100 cm<sup>3</sup> 的标准环刀在每层进行取样,用于测量土壤物理性质。同时在每层多点取样并均匀混合装入自封袋,用于测量土壤质地和有机质含量,每层取样均进行 3 次重复。样品的采集工作在 2021 年 8 月进行,试验分析在 2021 年 8—11 月进行。取样结束后,用滤纸垫在环刀的下部,防止土漏出,运输过程减少颠簸以免破坏土壤结构。

| 表 1 样地概况  |            |                                   |                              |            |            |
|-----------|------------|-----------------------------------|------------------------------|------------|------------|
| 植被<br>类型  | 平均<br>树高/m | 平均<br>胸径/cm (株·hm <sup>-2</sup> ) | 密度/<br>(株·hm <sup>-2</sup> ) | 坡度/<br>(°) | 坡向/<br>(°) |
| 五角枫纯林     | 7.2        | 12.5                              | 2136                         | 8.1        | 东北 61      |
| 侧柏纯林      | 8.8        | 15.9                              | 2758                         | 9.5        | 东北 43      |
| 侧柏×五角枫混交林 | 4.8        | 9.5                               | 2091                         | 10.2       | 东 90       |
| 侧柏×灌木混交林  | 4.5        | 17.1/2.2                          | 2841                         | 9.8        | 东北 15      |

1.2.2 室内试验

土壤饱和导水率的测量使用定水头法<sup>[16]</sup>,公式为  $K_0 = (10QL) / At_n (H + L)$ 。式中: $K_0$  为试验测得的土壤饱和导水率(mm/min); $Q$  为所测时间内环刀的水流流量(cm<sup>3</sup>); $L$  为环刀的高度(cm); $A$  为环刀横截面积(cm<sup>2</sup>); $t_n$  为所测时间(min); $H$  为水头高度(cm)。同时将测得的数值统一换算为 10 ℃ 下的数值,公式为  $K_s = K_0 / (0.7 + 0.03t_0)$ 。式中: $K_s$  为换算为 10 ℃ 下的土壤饱和导水率(mm/min); $t_0$  为测定土壤饱和导水率时的温度(℃)。土壤孔隙度、土壤容重等土壤物理性质的测量使用标准环刀通过环刀法<sup>[17]</sup>测定。用重铬酸钾稀释热法测定土壤有机质含量,使用激光粒度仪 Malvern Mastersizer 3000 测定土壤质地,本试验以 0.002,0.05,2 mm 区分黏粒、粉粒、砂粒<sup>[18]</sup>。饱和导水率结束后洗出定制环刀中的根系与石砾。将根系放入烘箱烘至重量无变化,称重,即可得到根系生物量。石砾体积的测量使用排水法:先将石砾过 2 mm 筛,接着将石砾放入装满水的小量筒,根据排水量即可获取石砾的体积。

1.3 数据处理

首先对不同植被类型、不同土层深度的各参数进行正态检验,满足正态性检验后,进行单因素方差分析、多重比较判断不同植被类型、不同土层深度的各参数之间是否差异显著,最后进行方差齐性检验,判

断方差是否齐性;再将土壤饱和导水率与土壤物理性质、根系、石砾参数进行相关性分析,接着以  $K_0$  为因变量,土壤理化性质、根系生物量、石砾体积为自变量进行多元逐步回归分析,根据回归分析结果进行通径分析。数据的整理使用 Excel 2010,数据分析使用 SPSS 22.0,绘图使用 Origin 2021 软件。

2 结果与分析

2.1 土壤理化性质与根系生物量、石砾体积的分布特征

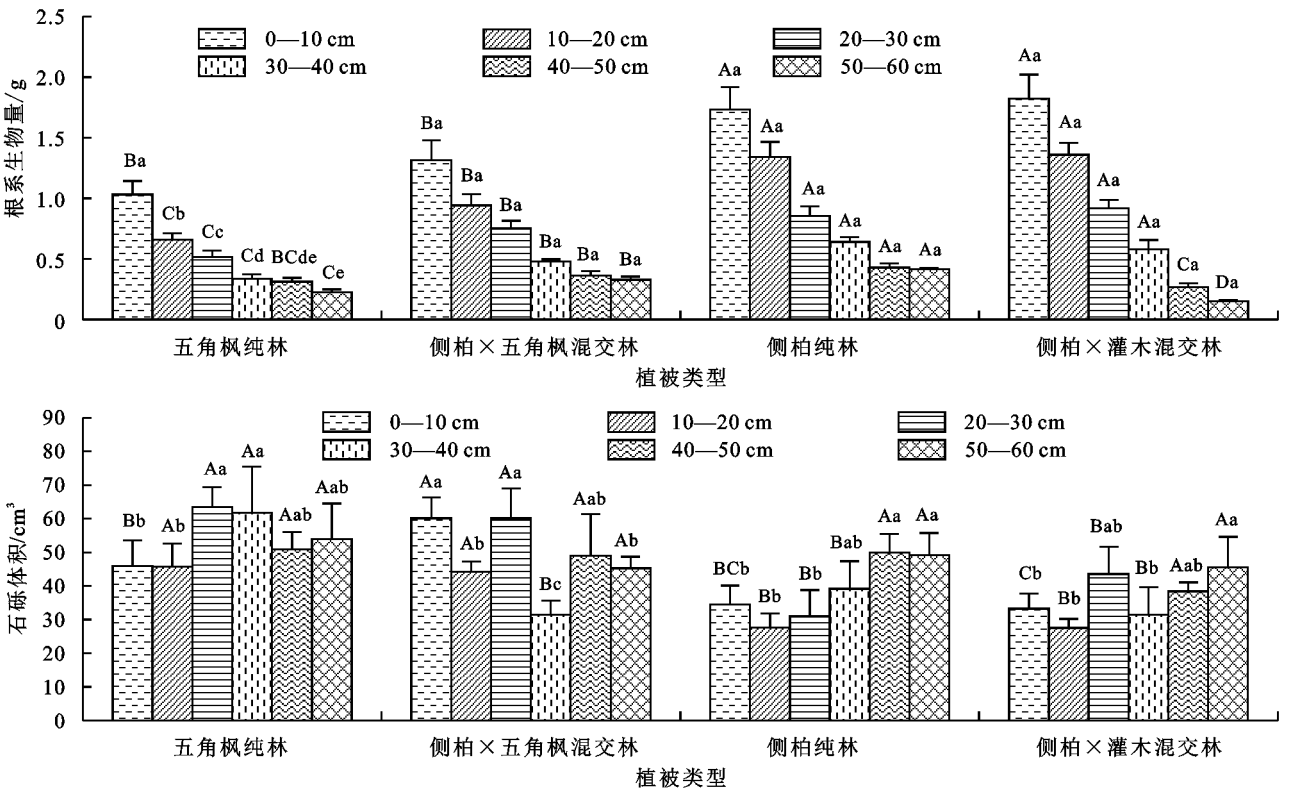
土壤理化性质与根系生物量、石砾体积分布见表 2 和图 1。土壤容重表示单位体积的干土重,本试验的土壤容重介于 1.29~1.64 g/cm<sup>3</sup>,且随着土层向下而逐渐变大,不同样地没有显著差异( $p > 0.05$ )。其中五角枫纯林的浅层和深层土壤容重有显著差异( $p < 0.05$ ),其他样地不同土层的容重随土层向下没有明显差异。土壤孔隙度是土壤的孔隙体积与总体积的比值,代表土壤的疏松程度。本试验总孔隙度、非毛管孔隙度和毛管孔隙度分别为 36.00%~56.40%,9.35%~25.07%,19.66%~39.10%,在各个样地之间没有显著差异( $p > 0.05$ ),随着土层向下逐渐减小。自然含水率代表土壤对于水分的保持能力,本试验为 9.37%~22.92%,在各个样地之间没有显著差异( $p > 0.05$ ),土壤水分沿着剖面向下呈现整体变小但变化不规则的情况。根系在土壤中的生长发育可以产生大孔隙,显著影响土壤导水性能。本试验根系生物量为 0.15~1.83 g,五角枫纯林与侧柏纯林之间存在显著差异( $p < 0.05$ ),表层的根系生物量高于深层。石砾是指颗粒直径>2 mm 的碎石,能够直接改变水流的运动轨迹,并且能够改变土壤理化性质,从而影响土壤导水能力<sup>[19]</sup>,本试验石砾体积为 27.55~63.42 cm<sup>3</sup>。从植被类型看,五角枫纯林与侧柏纯林没有显著差异,但与另 2 个样地存在显著差异( $p < 0.05$ )。土壤质地是指土壤中不同直径的颗粒的组成比例。砂粒、粉粒、黏粒比例分别为 46.64%~78.02%,21.34%~51.19%,0.22%~2.43%。除了五角枫纯林和侧柏×五角枫混交林的粉粒、砂粒外,其他样地的砂粒、粉粒、黏粒均存在显著差异( $p < 0.05$ )。土壤有机质可以通过改变土壤团聚体状况,改善土壤结构,从而增强土壤导水性能。本试验的土壤有机质含量为 7.83~32.13 g/kg,其中侧柏纯林与侧柏×五角枫混交林、侧柏×灌木混交林之间存在显著差异( $p < 0.05$ )。

描述性统计见表 3,根系生物量的变异系数最大,达到 64.60%,除根系生物量,黏粒、有机质含量的变异系数达到 60.19%,48.54%,属于高度变异。其他的参数变异系数均低于 30%,变异程度相对较弱。

表 2 土壤理化性质统计

| 样地  | 土层<br>深度/cm | 容重/<br>(g·cm <sup>-3</sup> ) | 总孔隙度/%         | 毛管<br>孔隙度/%    | 非毛管<br>孔隙度/%  | 自然<br>含水率/%   | 砂粒/%          | 粉粒/%          | 黏粒/%         | 有机质含量/<br>(g·kg <sup>-1</sup> ) |
|-----|-------------|------------------------------|----------------|----------------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|---------------------------------|
| I   | 0—10        | 1.29±0.10Ab                  | 56.40±2.97Aa   | 31.32±1.31Ba   | 25.07±1.81Aa  | 22.92±1.40Aa  | 61.29±0.11Ca  | 37.30±0.10Ba  | 1.41±0.01Ba  | 31.63±3.02Aa                    |
|     | 10—20       | 1.31±0.10Bb                  | 53.70±3.77Aab  | 29.54±2.90Bab  | 24.16±2.14Aa  | 16.27±1.53Ab  | 60.72±0.48Ba  | 38.36±0.25Ba  | 0.92±0.11Bcd | 13.27±0.60Ba                    |
|     | 20—30       | 1.38±0.12Aab                 | 49.56±3.27Ab   | 28.25±1.79Bab  | 21.31±1.55Ab  | 17.43±1.79Ab  | 57.22±0.52Bab | 41.53±1.67Aa  | 1.25±0.04Bb  | 12.00±0.39Ba                    |
|     | 30—40       | 1.55±0.16Aa                  | 41.76±0.80Ac   | 26.74±2.04Bb   | 15.02±1.61Bc  | 15.75±2.79Ab  | 52.81±0.39Db  | 46.14±2.45Aa  | 1.05±0.05Bc  | 11.95±0.27Ca                    |
|     | 40—50       | 1.54±0.13Aa                  | 39.14±2.71Bcd  | 29.80±2.17ABab | 9.35±1.04Cd   | 9.37±1.09Bc   | 58.51±1.05Cab | 40.48±0.98Aa  | 1.01±0.09Bcd | 8.08±0.34Ca                     |
|     | 50—60       | 1.58±0.07Aa                  | 36.00±1.64Bd   | 21.73±1.32Cc   | 14.27±0.38Ac  | 10.17±1.26Bc  | 62.17±1.26Ca  | 36.94±1.17Aa  | 0.89±0.09Bd  | 8.12±0.31Ca                     |
| II  | 0—10        | 1.40±0.14Aa                  | 50.62±3.13ABa  | 28.92±1.85BCa  | 21.70±1.31Ba  | 19.04±2.61Ba  | 46.64±0.40Dc  | 51.19±0.36Aa  | 2.17±0.04Ab  | 29.83±2.77Aa                    |
|     | 10—20       | 1.48±0.06Aa                  | 44.86±3.29Bb   | 23.79±1.71Cb   | 21.07±1.81ABa | 15.03±2.55Ab  | 58.47±1.40Cb  | 40.18±1.37Abc | 1.35±0.03Ad  | 24.61±2.09Ab                    |
|     | 20—30       | 1.48±0.12Aa                  | 42.09±3.11Bbc  | 20.65±1.34Cc   | 21.43±1.82Aa  | 12.53±2.23Bbc | 56.24±2.43Bb  | 41.97±2.25Ab  | 1.79±0.19Ac  | 23.69±1.29Ab                    |
|     | 30—40       | 1.47±0.07Aa                  | 43.47±3.25Ab   | 22.60±1.74Cbc  | 20.87±1.54Aa  | 13.54±1.23Abc | 58.05±0.63Cb  | 39.52±0.54Ac  | 2.43±0.24Aa  | 17.86±0.71Ac                    |
|     | 40—50       | 1.52±0.11Aa                  | 37.38±0.73Bc   | 19.66±1.87Cc   | 17.72±1.66Ab  | 10.78±1.19Bc  | 62.40±0.78Ba  | 35.88±0.71Bd  | 1.72±0.07Ac  | 14.67±0.49Ad                    |
|     | 50—60       | 1.53±0.16Aa                  | 38.15±2.84ABc  | 23.05±1.74BCbc | 15.10±1.13Ab  | 15.88±0.55Aab | 63.09±0.78Ca  | 35.45±0.40Ad  | 1.46±0.08Ad  | 13.66±1.36Ad                    |
| III | 0—10        | 1.36±0.11Aa                  | 53.67±2.98ABa  | 39.10±1.70Aa   | 14.56±1.37Ca  | 14.77±1.09Cb  | 67.85±1.08Bb  | 31.59±0.67Cc  | 0.56±0.06Dcd | 16.08±1.29Ba                    |
|     | 10—20       | 1.37±0.09ABa                 | 52.51±3.09ABa  | 38.73±2.16Aa   | 13.78±1.06Ca  | 14.34±1.13Ab  | 61.82±1.00Bd  | 37.56±0.66Ba  | 0.62±0.04Cc  | 12.94±0.42Bb                    |
|     | 20—30       | 1.37±0.10Aa                  | 50.20±1.71Aa   | 37.23±1.46Aa   | 12.97±0.28Ca  | 13.10±1.44Bbc | 71.14±0.79Aa  | 28.41±0.77Bd  | 0.45±0.02Cd  | 9.17±0.35Cc                     |
|     | 30—40       | 1.49±0.12Aa                  | 44.13±3.52Ab   | 32.93±2.40Ab   | 11.20±1.20Cb  | 15.09±1.34Aab | 65.46±0.70Bc  | 33.73±1.04Bb  | 0.81±0.04Cb  | 9.54±0.95Dc                     |
|     | 40—50       | 1.51±0.03Aa                  | 43.92±2.32Ab   | 32.66±1.28Ab   | 11.25±1.30Cb  | 17.30±0.95Aa  | 61.36±1.97Bd  | 37.66±1.83Ba  | 0.98±0.14Ba  | 8.57±0.37Cd                     |
|     | 50—60       | 1.49±0.11Aa                  | 40.60±1.81Ab   | 30.00±1.12Ab   | 10.59±0.85Bb  | 11.72±1.61Bc  | 65.97±0.38Bbc | 33.34±1.18Bbc | 0.69±0.03Cbc | 7.83±0.28Cd                     |
| IV  | 0—10        | 1.38±0.09Aa                  | 48.48±3.84Ba   | 28.02±1.91Cab  | 20.47±1.94Ba  | 13.87±1.24Cb  | 78.02±0.27Aa  | 21.34±0.30Dd  | 0.64±0.03Ca  | 32.13±1.45Aa                    |
|     | 10—20       | 1.37±0.08ABa                 | 46.92±2.84Bab  | 27.47±1.40BCab | 19.44±1.55Ba  | 17.94±2.48Aa  | 75.35±0.70Ab  | 24.12±0.58Cc  | 0.53±0.05Cb  | 28.80±1.61Ab                    |
|     | 20—30       | 1.41±0.06Aa                  | 46.63±3.11ABab | 30.77±2.19Ba   | 15.86±1.15Bb  | 18.09±2.19Aa  | 72.52±1.00Ac  | 27.14±0.56Bb  | 0.34±0.03Cc  | 23.61±1.10Ac                    |
|     | 30—40       | 1.57±0.17Aa                  | 42.32±2.77Ab   | 27.32±2.24Bab  | 15.00±0.54Bb  | 10.18±0.85Bc  | 72.51±0.95Ac  | 27.11±1.30Cb  | 0.38±0.03Dc  | 16.11±0.75Bd                    |
|     | 40—50       | 1.62±0.16Aa                  | 41.52±2.25ABb  | 27.10±1.69Bab  | 14.43±1.38Bb  | 10.58±0.95Bc  | 77.48±1.24Aa  | 22.30±0.55Cd  | 0.22±0.02Cd  | 12.70±0.89Be                    |
|     | 50—60       | 1.64±0.05Aa                  | 39.27±1.97ABb  | 25.38±2.75Bb   | 13.89±0.81Ab  | 11.07±1.32Bbc | 69.64±1.02Ad  | 30.12±0.76Ca  | 0.24±0.02Dd  | 10.19±0.72Bf                    |

注：I、II、III、IV 分别为五角枫纯林、侧柏×五角枫混交林、侧柏纯林、侧柏×灌木混交林；表中数据为平均值±标准差；不同大写字母表示同一土层不同植被类型差异显著( $p<0.05$ )；不同小写字母表示同一植被类型不同土层深度差异显著( $p<0.05$ )。



注：不同大写字母表示同一土层不同植被类型差异显著( $p<0.05$ )；不同小写字母表示同一植被类型不同土层深度差异显著( $p<0.05$ )。下同。

图 1 典型植被样地根系生物量与石砾体积

表 3 描述性特征统计

| 指标     | 最小值   | 最大值   | 平均值   | 偏度    | 峰度    | 标准差   | 变异系数/% |
|--------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| 容重     | 1.29  | 1.64  | 1.46  | 0.03  | −0.93 | 0.10  | 6.67   |
| 总孔隙度   | 36.00 | 56.40 | 45.14 | 0.33  | −0.88 | 0.06  | 12.64  |
| 毛管孔隙度  | 19.66 | 39.10 | 28.45 | 0.40  | −0.13 | 0.05  | 18.47  |
| 非毛管孔隙度 | 9.35  | 25.07 | 16.69 | 0.25  | −1.01 | 0.04  | 26.80  |
| 自然含水率  | 9.37  | 22.92 | 14.45 | 0.49  | 0.12  | 3.36  | 23.26  |
| 根系生物量  | 0.15  | 1.83  | 0.74  | 0.92  | −0.07 | 0.48  | 64.60  |
| 石砾体积   | 27.55 | 63.42 | 44.30 | 0.12  | −0.91 | 10.91 | 24.63  |
| 砂粒     | 46.64 | 78.02 | 64.03 | 0.03  | −0.21 | 7.86  | 12.28  |
| 粉粒     | 21.34 | 51.19 | 34.97 | −0.06 | −0.15 | 7.41  | 21.19  |
| 黏粒     | 0.22  | 2.43  | 1.00  | 0.83  | 0.11  | 0.60  | 60.19  |
| 有机质含量  | 7.83  | 32.13 | 16.54 | 0.82  | −0.69 | 8.03  | 48.54  |

注:容重单位为 g/cm<sup>3</sup>;总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、自然含水率、根系生物量、砂粒、粉粒、黏粒单位为%;石砾体积单位为 cm<sup>3</sup>;有机质含量单位为 g/kg。

2.2 土壤饱和和导水率分布特征

由图 2 可知, $K_s$ 为 0.05~2.23 mm/min,最大值为最小值的 42.96 倍,变异系数为 72.66%,属于高度变异。 $K_s$ 平均值为 0.79 mm/min,从植被类型来看,平均  $K_s$ 大小排序为侧柏×灌木混交林(1.01 mm/min)>侧柏纯林(0.91 mm/min)>五角枫纯林(0.73 mm/min)>侧柏×五角枫混交林(0.51 mm/min)。侧柏×灌木混交林、侧

柏纯林与侧柏×五角枫混交林的  $K_s$ 存在显著差异( $p<0.05$ ),表明侧柏×灌木混交林、侧柏纯林的平均  $K_s$ 显著高于侧柏×五角枫混交林。从饱和导水率绝对误差(表 4)来看,整体上呈现表层大、沿着剖面逐渐变小的规律,这与土壤饱和和导水率值沿剖面的变化是相对应的。从相对差异来看,相对误差介于 3.39%~12.67%,但沿着剖面并没有明显规律。

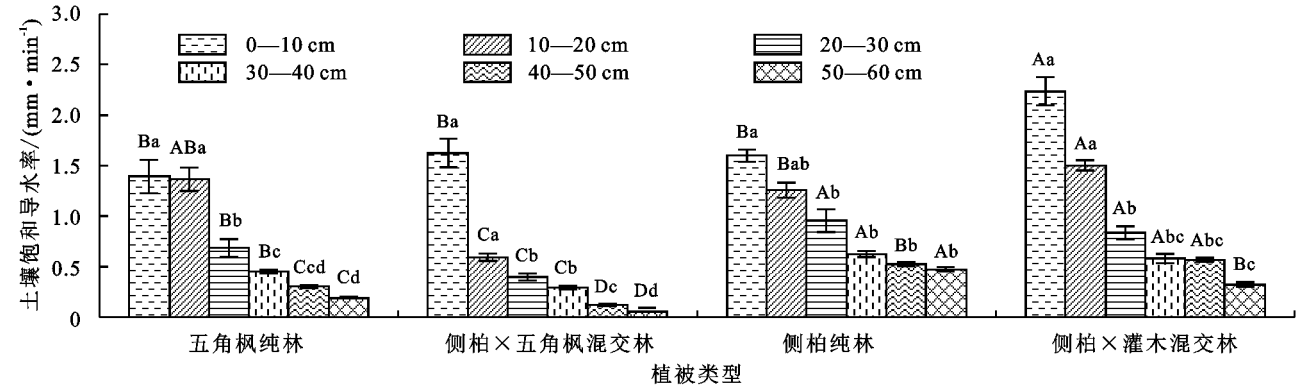


图 2 典型植被样地土壤饱和和导水率变化

表 4 土壤饱和和导水率的绝对误差和相对误差

| 土层<br>深度/cm | 五角枫纯林 |        | 侧柏×五角枫混交林 |        | 侧柏纯林 |        | 侧柏×灌木混交林 |        |
|-------------|-------|--------|-----------|--------|------|--------|----------|--------|
|             | 绝对误差  | 相对误差/% | 绝对误差      | 相对误差/% | 绝对误差 | 相对误差/% | 绝对误差     | 相对误差/% |
| 0—10        | 0.17  | 11.85  | 0.14      | 8.69   | 0.06 | 3.67   | 0.14     | 6.29   |
| 10—20       | 0.11  | 8.32   | 0.04      | 6.26   | 0.08 | 6.00   | 0.05     | 3.39   |
| 20—30       | 0.09  | 12.67  | 0.04      | 8.97   | 0.11 | 11.82  | 0.06     | 7.45   |
| 30—40       | 0.02  | 3.91   | 0.02      | 6.74   | 0.03 | 4.86   | 0.05     | 8.08   |
| 40—50       | 0.01  | 4.68   | 0.01      | 8.77   | 0.02 | 3.65   | 0.02     | 3.45   |
| 50—60       | 0.02  | 8.84   | 0.01      | 10.18  | 0.02 | 5.14   | 0.02     | 7.09   |

从土层来看,表层  $K_s$ 较大,沿土层向下逐渐减小,且大部分土层之间有显著性差异。以侧柏×五角枫混交林为例,从地表向下土层饱和和导水率依次为 1.62,0.59,0.40,0.29,0.12,0.05 mm/min,根据多重比较,0—10,10—20 cm 土层之间没有显著性差异,

同样情况也出现在 20—30,30—40 cm 土层,除此之外其他土层之间均有显著性差异( $p<0.05$ ),五角枫纯林和侧柏×灌木混交林也呈现出类似的变化规律。在 0—10,10—20,40—50 cm 土层, $K_s$ 的最高值出现在侧柏×灌木混交林,在 20—30,30—40,50—60 cm

土层,  $K_s$  的最高值出现在侧柏纯林。

将所选样地各层的饱和导水率与土层深度进行拟合, 两者符合对数函数关系, 函数形式为  $y = \pm a \ln x + b$ ,  $R^2 \geq 0.858$ , 各个样地的拟合关系式和相关性系数见表 5。

表 5 土壤饱和导水率与土层深度的拟合方程

| 植被类型      | 拟合方程                       | $R^2$ |
|-----------|----------------------------|-------|
| 五角枫纯林     | $y = -0.554 \ln x + 2.476$ | 0.858 |
| 侧柏×五角枫混交林 | $y = -0.640 \ln x + 2.528$ | 0.956 |
| 侧柏纯林      | $y = -0.501 \ln x + 2.483$ | 0.962 |
| 侧柏×灌木混交林  | $y = -0.812 \ln x + 3.565$ | 0.981 |

2.3 土壤饱和导水率与土壤理化性质、根系生物量和石砾体积的相关性分析

将  $K_s$  与土壤理化性质、根系生物量、石砾体积等参数进行 Pearson 相关分析(表 6)可知, 土壤质地与石砾体积与  $K_s$  之间的关系不显著, 即  $p > 0.05$ 。除此之外, 其他参数均与  $K_s$  之间呈现显著关系。参数相关系数及其大小排序分别为根系生物量(0.898) > 总孔隙度(0.813) > 容重(−0.759) > 有机质含量(0.624) > 毛管孔隙度(0.529) > 自然含水率(0.495) > 非毛管孔隙度(0.416), 其中非毛管孔隙度和自然含水率为显著相关( $p < 0.05$ ), 其他参数均为极显著相关( $p < 0.01$ )。Pearson 相关分析表明各自变量之间的相关

表 6 土壤饱和导水率与土壤理化性质、根系生物量和石砾体积的 Pearson 相关分析

| 项目       | $Y$ | $X_1$     | $X_2$     | $X_3$    | $X_4$     | $X_5$     | $X_6$     | $X_7$    | $X_8$     | $X_9$     | $X_{10}$  | $X_{11}$ |
|----------|-----|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|-----------|-----------|-----------|----------|
| $Y$      | 1   | −0.759 ** | 0.813 **  | 0.529 ** | 0.416 *   | 0.495 *   | 0.898 **  | −0.349   | 0.227     | −0.226    | −0.181    | 0.624 ** |
| $X_1$    |     | 1         | −0.898 ** | −0.513 * | −0.543 ** | −0.683 ** | −0.735 ** | 0.215    | 0.065     | −0.059    | −0.124    | −0.500 * |
| $X_2$    |     |           | 1         | 0.669 ** | 0.490 *   | 0.679 **  | 0.726 **  | −0.258   | −0.023    | 0.028     | −0.039    | 0.448 *  |
| $X_3$    |     |           |           | 1        | −0.320    | 0.287     | 0.485 *   | −0.391   | 0.193     | −0.166    | −0.473 *  | −0.135   |
| $X_4$    |     |           |           |          | 1         | 0.530 **  | 0.356     | 0.129    | −0.254    | 0.228     | 0.505 *   | 0.730 ** |
| $X_5$    |     |           |           |          |           | 1         | 0.433 *   | 0.111    | −0.249    | 0.245     | 0.238     | 0.547 ** |
| $X_6$    |     |           |           |          |           |           | 1         | −0.423 * | 0.187     | −0.193    | −0.070    | 0.683 ** |
| $X_7$    |     |           |           |          |           |           |           | 1        | −0.689 ** | 0.697 **  | 0.418 *   | −0.120   |
| $X_8$    |     |           |           |          |           |           |           |          | 1         | −0.999 ** | −0.767 ** | 0.038    |
| $X_9$    |     |           |           |          |           |           |           |          |           | 1         | 0.732 **  | −0.063   |
| $X_{10}$ |     |           |           |          |           |           |           |          |           |           | 1         | 0.280    |
| $X_{11}$ |     |           |           |          |           |           |           |          |           |           |           | 1        |

注:  $Y$ 、 $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_4$ 、 $X_5$ 、 $X_6$ 、 $X_7$ 、 $X_8$ 、 $X_9$ 、 $X_{10}$ 、 $X_{11}$  分别表示土壤饱和导水率、容重、总孔隙度、毛管孔隙度、非毛管孔隙度、自然含水率、根系生物量、石砾体积、砂粒、粉粒、黏粒、有机质含量。

表 7 通径分析结果

| 自变量   | 直接通径系数 | 间接通径系数      |              |       |
|-------|--------|-------------|--------------|-------|
|       |        | 总孔隙度→ $K_s$ | 根系生物量→ $K_s$ | 总计    |
| 总孔隙度  | 0.341  | —           | 0.473        | 0.473 |
| 根系生物量 | 0.738  | 0.248       | —            | 0.248 |

3 讨论

本试验的  $K_s$  大小排序为侧柏×灌木混交林 > 侧柏纯林 > 五角枫纯林 > 侧柏×五角枫混交林。侧柏×灌

木混交林、侧柏纯林与侧柏×五角枫混交林存在显著差异, 这是由于侧柏纯林、侧柏×灌木混交林所生长植被都是浅根系植物, 根系在土壤浅层穿插, 形成许多的大孔隙, 促进水分运输, 因此侧柏×灌木混交林、侧柏纯林的土壤导水性能显著高于侧柏×五角枫混交林。从土层来看, 表现出沿剖面向下  $K_s$  减小的趋势, 这与付同刚等<sup>[6]</sup>的研究结果一致, 这是由于沿着土层向下, 土壤被压实, 抑制水流向下的迁移, 同时北京山区土层非常薄, 本试验取样时在最底层时常挖出岩石或

关系, 但无法从一个变量推测另一个变量的变化情况<sup>[9]</sup>。因此, 需进行多元逐步回归分析, 定量各参数对于  $K_s$  的影响程度。选择 11 个参数进行多元逐步回归分析, 筛选出 2 个对  $K_s$  有强烈影响的自变量, 分别为总孔隙度和根系生物量。并得到自变量与因变量之间的关系式:  $Y = 3.42X_2 + 0.78X_6 - 1.333$ ,  $R^2 = 0.862$ ,  $F = 65.422$ ,  $p < 0.001$ , 方程极显著。

进一步进行通径分析并计算通径系数(表 7), 结果表明, 总孔隙度与根系生物量对  $K_s$  的直接通径系数分别为 0.341 与 0.738, 表示当自变量总孔隙度、根系生物量增加 1 个标准差单位时,  $K_s$  分别增加 0.341 和 0.738 个标准差单位, 即为总孔隙度和根系生物量分别增加 1% 和 1 g 时, 饱和导水率分别增加 3.42, 0.78 mm/min。直接通径系数代表所研究参数对于目标因变量的直接作用能力, 本试验根系生物量的直接通径系数为 0.738, 大于总孔隙度的直接通径系数, 即根系生物量对于  $K_s$  的直接正效应更强, 是影响  $K_s$  的主要因子。在间接通径系数上, 总孔隙度的间接通径系数大于其直接通径系数, 说明总孔隙度主要通过影响根系生物量对  $K_s$  产生作用。而根系生物量相反, 直接通径系数大于其间接通径系数, 即根系生物量直接影响  $K_s$ 。

木混交林、侧柏纯林与侧柏×五角枫混交林存在显著差异, 这是由于侧柏纯林、侧柏×灌木混交林所生长植被都是浅根系植物, 根系在土壤浅层穿插, 形成许多的大孔隙, 促进水分运输, 因此侧柏×灌木混交林、侧柏纯林的土壤导水性能显著高于侧柏×五角枫混交林。从土层来看, 表现出沿剖面向下  $K_s$  减小的趋势, 这与付同刚等<sup>[6]</sup>的研究结果一致, 这是由于沿着土层向下, 土壤被压实, 抑制水流向下的迁移, 同时北京山区土层非常薄, 本试验取样时在最底层时常挖出岩石或

者母质,这种情况不利于水分的运移<sup>[19]</sup>。同时发现, $K_s$ 沿土层变异剧烈,表面 2 层的  $K_s$  非常大,达到下面 4 层平均值的数倍,例如,五角枫纯林,最上面 2 层  $K_s$  平均值达到最下面 4 层的 3.39 倍。这是由于表层生命活动最强烈,枯落物腐烂、动物粪便分解后有机物质的输入、地表径流带来的营养物质改善了表层土壤的孔隙状况,使得  $K_s$  显著升高<sup>[20]</sup>。

$K_s$  与许多因素有关,已成为广泛共识。但由于土壤中的水文过程、生态过程复杂且存在一定的相互作用,同时不同的研究所采用的试验设计也不完全一致,因此不同的研究得到的结论存在差异。本试验根系生物量与  $K_s$  之间的相关性系数达到 0.898,呈极显著相关( $p < 0.01$ )。Wu 等<sup>[21]</sup> 将初始渗透率、稳定渗透率等渗透性指标与平均根通道直径、根通道面积进行 Pearson 相关分析发现,初始渗透率与平均根通道直径、根通道面积呈现显著相关关系( $p < 0.05$ ),Guo 等<sup>[22]</sup> 也得出了相似的结论。这是因为根系在土壤中穿插,其表面的饱和水膜和收缩作用能显著影响水分传导<sup>[23]</sup>。其次根系衰老腐烂后留下有机质改善土壤结构,同时在土壤中留下根孔,显著提升  $K_s$ 。从试验结果可以看出,根系生物量与有机质含量、总孔隙度也呈现极显著相关关系( $p < 0.01$ )。石砾体积与  $K_s$  呈现负相关关系( $p > 0.05$ ),即随着石砾体积的增高, $K_s$  逐渐减小,这与曲英杰等<sup>[24]</sup> 的研究结果不同。石砾对于土壤水分运动的作用,不同的研究得出的结果不同。有的研究认为石砾促进大孔隙形成,从而促进水分入渗,也有研究认为石砾通过增加入渗路径复杂程度,从而阻碍水分运移。容重与  $K_s$  呈极显著负相关关系( $p < 0.01$ ),这与 Liu 等<sup>[25]</sup> 的研究结果相同,这是因为随着土壤容重增大,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。根据试验结果, $K_s$  与砂粒呈正相关( $p > 0.05$ ),与粉粒、黏粒呈负相关( $p > 0.05$ )。这是因为黏粒是一种土壤胶结物质,能够影响土壤结构,黏粒含量增高使得相同体积下土壤表面积增大,从而土壤基质势增大,抑制土壤中水分的下渗过程,但这与陈雪等<sup>[26]</sup> 的研究结果不同。这可能是由于其研究区位于云南昆明,与本试验属于不同的地理分区,成土母质与土壤性质存在显著差别,本试验所得的砂粒含量高于粉粒含量,而陈雪等<sup>[26]</sup> 的研究相反,因此结果不同。有机质含量与  $K_s$  也呈极显著相关关系( $p < 0.01$ ),这与张耀方等<sup>[27]</sup> 的研究结果一致。这是因为有机质作为一种胶结物质,能够促进土壤团聚体的形成,从而改变土壤导水性能。但也有研究提出了不同的结果,如姚淑霞等<sup>[28]</sup> 研究得出, $K_s$  与土壤有机质之间呈现极显著负相关关系( $p < 0.01$ );彭舜磊等<sup>[29]</sup> 的研究将

$K_s$  与有机质含量进行拟合发现,两者之间的关系为开口向下的抛物线。即随着有机质含量增大, $K_s$  增大,但增大到一定程度,有机质含量出现缓慢的下降。这是由于当有机质达到一定水平,土壤有机质对土壤水分的吸持作用将大于改善土壤结构所增大的  $K_s$ 。

相关性分析中各参数之间存在相互作用,而多元回归分析得到的偏回归系数带有单位。因而,通过结合相关性分析与多元回归分析进行通径分析,可以克服相关性分析和多元回归分析的不利影响<sup>[30]</sup>。将参数与  $K_s$  进行多元逐步回归与通径分析,当  $R^2 > 0.85$  时,即已经找到主要影响因变量的自变量<sup>[31]</sup>。本试验  $R^2 = 0.862$ ,即确认  $K_s$  的主要影响因子是总孔隙度和根系生物量。根系在土壤中穿梭,腐烂后在土壤中留下孔隙,增大土壤的孔隙度。同时土壤孔隙度可以直接影响须根的氧气获得量,进而影响其吸收转运养分、水分等资源给地上部分器官的能力和效率。而植被对于环境有适应性,更倾向于向土壤孔隙状况好的地方生长,以便获得足够的养分和水分,长期的生长导致孔隙度大的地方根系生物量高。从试验结果也可以证明这一点,两者的相关系数达到 0.726,呈极显著相关。两者互相影响、互相促进,使得土壤饱和导水率显著增大,这和王玮璐等<sup>[32]</sup> 的研究结果不同,其结果表明有机质含量和毛管孔隙度是  $K_s$  的主要影响因子。这可能是因为研究区不同导致的,本试验位于北京山区,相较于王玮璐等<sup>[32]</sup> 在青海高寒区的试验区,北京山区气候更加适宜,植物根系发育旺盛,因此根系生物量成为影响  $K_s$  的主要影响因子。

## 4 结论

(1)北京山区典型植被类型  $K_s$  介于 0.05~2.23 mm/min,沿土壤剖面逐渐减小,且  $K_s$  与土层深度满足对数关系,关系式为  $y = \pm a \ln x + b$ ,  $R^2 \geq 0.858$ 。从不同植被类型来看,侧柏×五角枫混交林与侧柏×灌木混交林、侧柏纯林的  $K_s$  存在显著差异( $p < 0.05$ )。

(2)将参数与  $K_s$  进行逐步回归分析,得出影响  $K_s$  的主要因子为土壤总孔隙度与根系生物量。通过通径分析,可知总孔隙度通过根系生物量间接对  $K_s$  产生作用,而根系生物量则主要是直接作用。

(3)本试验  $K_s$  最高为侧柏×灌木混交林。因此,在今后北京山区的植树造林中,应当多考虑侧柏×灌木混交林的营建。

(4)本试验不足之处在于将根系指标定为根系生物量,没有考虑到根系不同径级对于导水性能的差异。在试验设计上选择近似相同的林龄、坡度、坡向,同一种植被类型在不同的林龄、坡度、坡向上是否存在差异,在今后需要进一步研究。

## 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wang T, Liu Y Q, Wang J Z, et al. Assessment of spatial variability of hydraulic conductivity of seasonally frozen ground in Northeast China[J]. *Engineering Geology*, 2020, 274: e105741.
- [3] Fu T G, Chen H S, Zhang W, et al. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors in a small karst catchment in Southwest China[J]. *Environmental Monitoring Assessment*, 2015, 187(3): e92.
- [4] Yang Y, Jia X X, Wendroth O, et al. Estimating saturated hydraulic conductivity along a South-North transect in the Loess Plateau of China[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2018, 82(5): 1033-1045.
- [5] 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.
- [6] 付同刚, 陈洪松, 王克林. 喀斯特小流域土壤饱和导水率垂直分布特征[J]. *土壤学报*, 2015, 52(3): 538-546.
- [7] Godoy V A, Zuquette L V, Gómez-Hernández J J. Spatial variability of hydraulic conductivity and solute transport parameters and their spatial correlations to soil properties[J]. *Geoderma*, 2019, 339: 59-69.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] Lu J R, Zhang Q, Werner A D, et al. Root-induced changes of soil hydraulic properties: A review[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 589: e125203.
- [11] 刘目兴, 吴丹, 吴四平, 等. 三峡库区森林土壤大孔隙特征及对饱和导水率的影响[J]. *生态学报*, 2016, 36(11): 3189-3196.
- [12] 刘玲, 刘永忠. 莱芜市红石公园土壤结构特征及其与饱和导水率的关系[J]. *水土保持通报*, 2016, 36(4): 188-192.
- [13] 吴四平, 刘目兴, 易军, 等. 三峡库区典型山地土壤的饱和导水率及其影响因素研究[J]. *灌溉排水学报*, 2016, 35(增刊 2): 55-58.
- [14] 薛宝宝, 李浩, 牛东红, 等. 不同月龄缢蛭新品种数量性状的相关与通径分析[J]. *水产学报*, 2018, 42(6): 941-949.
- [15] 朱自娟, 左丽君, 张增祥, 等. 1987—2015 年京津冀西北水源涵养区生态格局时空变化[J]. *草业科学*, 2020, 37(7): 1325-1336.
- [16] 祁子寒, 王云琦, 王玉杰, 等. 根系对浅表层土大孔隙分布特征及饱和渗透性的影响[J]. *水土保持学报*, 2021, 35(5): 94-100, 107.
- [17] 朱金方, 柳晓燕, 李俊生, 等. 不同入侵程度下飞机草对喀斯特地区土壤理化性质的影响[J]. *生态学报*, 2021, 41(24): 9630-9636.
- [18] 李茂娜, 孙宇, 严海军, 等. 基于土壤表观电导率的变量灌溉管理分区方法[J]. *农业工程学报*, 2020, 36(22): 172-180.
- [19] 张英虎, 牛健植, 李娇, 等. 石砾参数对土壤水流和溶质运移影响研究进展[J]. *土壤*, 2014, 46(4): 589-598.
- [20] 甘森, 贾玉华, 李同川, 等. 黄土区坡沟系统容重、饱和导水率和土壤含水量变化分析[J]. *干旱区研究*, 2018, 35(2): 315-324.
- [21] 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.
- [22] 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.
- [23] 骆紫藤, 牛健植, 孟晨, 等. 华北土石山区森林土壤中石砾分布特征对土壤大孔隙及导水性质的影响[J]. *水土保持学报*, 2016, 30(3): 305-308, 316.
- [24] 曲英杰, 毛伟兵, 孙玉霞, 等. 引黄泥沙对黏质盐土饱和导水率的影响[J]. *人民黄河*, 2021, 43(5): 158-162.
- [25] 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.
- [26] 陈雪, 宋娅丽, 王克勤, 等. 布设等高反坡阶对滇中松华坝水源区坡耕地土壤饱和导水率的影响[J]. *福建农林大学学报(自然科学版)*, 2019, 48(5): 649-655.
- [27] 张耀方, 赵世伟, 王子龙, 等. 黄土高原土壤团聚体胶结物质的分布及作用综述[J]. *中国水土保持科学*, 2015, 13(5): 145-150.
- [28] 姚淑霞, 赵传成, 张铜会. 科尔沁不同沙地土壤饱和导水率比较研究[J]. *土壤学报*, 2013, 50(3): 469-477.
- [29] 彭舜磊, 由文辉, 沈会涛. 植被群落演替对土壤饱和导水率的影响[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(11): 78-84.
- [30] 杜家菊, 陈志伟. 使用 SPSS 线性回归实现通径分析的方法[J]. *生物学通报*, 2010, 45(2): 4-6.
- [31] 李松岗. 实用生物统计[M]. 北京: 北京大学出版社, 2002.
- [32] 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.