

太行山区土壤饱和导水率及其各向异性剖面分布规律^①

陈天明^{1,2}, 张子元^{1,2,3}, 安雪景⁴, 付宇航^{1,2}, 刘金铜¹, 付同刚^{1*}

(1 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室, 石家庄 050022; 2 中国科学院大学, 北京 100049; 3 河北省水土保持工作站, 石家庄 050011; 4 河北省地质矿产勘查开发局国土资源勘查中心(河北省矿山和地质灾害应急救援中心), 石家庄 050011)

摘 要: 通过测定太行山区典型坡地 3 个坡位不同土壤层次垂直与水平方向上的土壤饱和导水率(K_s)、毛管孔隙度、总孔隙度、含水量、容重、机械组成、有机质含量等基本性质, 应用相关分析等方法, 研究了 K_s 及其他土壤性质的剖面分布特征, 深入探讨了 K_s 各向异性比的垂直分布规律及其成因。结果显示: 上坡位和下坡位 K_s 在垂直和水平方向上均随土壤深度的增加而先增大后减小; 中坡位 K_s 在垂直方向上随土壤深度的增加先增大后减小, 而水平方向上随土壤深度的增加先减小后增大。上、中、下 3 坡位 K_s 各向异性比均与 1 呈明显差异, 表现出明显的各向异性, 且上、下坡位水平方向 K_s 占主导, 而中坡位垂直方向 K_s 占主导地位。相关分析结果表明, K_s 各向异性比与土壤容重呈显著负相关($r = -0.492$, $P = 0.017$), 与总孔隙度、毛管孔隙度呈显著正相关($r = 0.546$, $P = 0.007$; $r = 0.543$, $P = 0.007$), 与其他土壤理化性质相关性不显著, 土壤孔隙结构是 K_s 各向异性比最重要的影响因素。

关键词: 土壤物理性质; 土壤剖面; 垂直分布; 影响因素; 坡位

中图分类号: S152.7 文献标志码: A

Profile Distributions of Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Its Anisotropy in Taihang Mountain Area

CHEN Tianming^{1,2}, ZHANG Ziyuan^{1,2,3}, AN Xuejing⁴, FU Yuhang^{1,2}, LIU Jintong¹, FU Tonggang^{1*}

(1 Agricultural Resources Research Center, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences/Hebei Provincial Key Laboratory of Soil Ecology/Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 3 Soil and Water Conservation Work Station of Hebei Province, Shijiazhuang 050011, China; 4 Hebei Provincial Geological and Mineral Exploration and Development Bureau Land and Resources Exploration Center (Hebei Provincial Mine and Geological Disaster Emergency Rescue Center), Shijiazhuang 050011, China)

Abstract: In this study, soil saturated hydraulic conductivity (K_s), capillary porosity, total porosity, water content, bulk density, particle composition, organic matter content and other basic physical properties were measured in different vertical and horizontal directions of three typical slopes in Taihang Mountain, and correlation analysis was used to study the profile distribution of K_s and other soil properties. At the same time, the vertical distribution of K_s anisotropy ratio and its causes were discussed. The results showed that K_s in the upper and lower slopes increased first and then decreased with the increase of soil depth in both vertical and horizontal directions. K_s in the middle slope increased first and then decreased with the increase of soil depth in the vertical direction, but decreased first and then increased with the increase of soil depth in the horizontal direction. K_s anisotropy ratio of the upper, middle and lower slopes were significantly different from that of 1, showing obvious anisotropy. K_s was dominant in the horizontal direction of the upper and lower slopes, while dominant in the vertical direction of the middle slope. Correlation analysis showed that K_s anisotropy ratio was negatively correlated with soil bulk density ($r = -0.492$, $P = 0.017$), positively correlated with soil total porosity and capillary porosity ($r = 0.546$, $P = 0.007$; $r = 0.543$, $P = 0.007$), while insignificantly correlated with other soil physiochemical properties, indicating that soil pore structure was the most important factor affecting K_s anisotropy ratio.

Key words: Soil physical properties; Soil profile; Vertical distribution; Influencing factor; Slope position

①基金项目: 国家自然科学基金项目(41930651), 河北省省级水利科技计划项目(2024-37)和中国科学院青年创新促进会项目(2020102)资助。

* 通信作者(tgfu@sjziam.ac.cn)

作者简介: 陈天明(2001—), 男, 内蒙古赤峰人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理方面研究。E-mail: chentianming23@mails.ucas.ac.cn

土壤饱和导水率(K_s)是反映土壤入渗性能的重要指标,对水分、溶质在土壤中运动有重要影响^[1]。 K_s 在空间上存在明显不确定性^[2]。张川等^[3]对喀斯特坡面表层土壤 K_s 空间变异特性研究发现, K_s 沿坡面无明显变化规律,表现为高异质性。李文郑等^[4]通过研究三峡山地不同坡位土壤,发现坡顶土壤蓄水能力最差,但下渗能力最强,其他坡位区别不大。毛娜等^[5]对黄土高原区土壤的研究发现, K_s 随土壤深度的增加而减小,而后呈增大趋势。而 Schwen 等^[6]指出 K_s 随着土壤深度的增加而增加。可见,虽然目前已存在较多关于 K_s 分布特征的研究,但研究结果存在较多差异,不利于对 K_s 进行区域性总结。

K_s 在水平和垂直两个方向上存在各向异性^[7]。垂直方向上 K_s 对降水入渗、土体储水深度有重要影响,而水平方向上 K_s 则对沟垄产流、下坡位壤中流影响较大^[8]。 K_s 的各向异性通常是由于土壤中存在层状、板状或柱状等不同的结构所产生具有明显方向性偏差的微孔或大孔,从而导致土壤在垂直与水平方向表现出不同的导水性能^[9]。Peng 和 Horn^[10]认为,由于根和蚯蚓通道的存在,特别是在结构良好的土壤中,导致垂直方向上 K_s 大于水平方向上 K_s 。Dörner 和 Horn^[11]认为在层状土壤或压实土壤中,由于存在水平方向的板状聚集体,导致水平方向上的 K_s 更大。虽然土壤的孔径大小在不同取样方向上通常保持一致,但孔隙方向和分布特征在不同方向可能存在差异。目前,对 K_s 各向异性的研究不够深入,且研究结论相互矛盾。因此,迫切需要深入研究 K_s 各向异性,并探讨其分布规律。

K_s 受容重、孔隙特征、含水量等土壤基本性质的影响,而土壤基本性质又受气候条件、土地利用方式等的影响。此外,有学者还发现地形、根系分布等对 K_s 也有显著影响^[8]。如,亚热带森林土壤中植被类型是 K_s 的主导因素^[12],华北土石山区中土壤孔隙的空间延伸性^[13]是 K_s 的关键因素,内蒙古沙地土壤中土壤容重、粗砂粒含量是 K_s 的关键因子^[14]。目前不同地区 K_s 的决定因素不尽相同,并且,对 K_s 各向异性影响因素的探讨严重不足。

太行山区为我国北方典型的土石山区,土壤条件复杂^[15],植被类型繁多。有研究表明,太行山区 K_s 在不同植被类型和不同土层深度之间存在显著差异,且随着土层深度的增加而逐渐减小^[16];空间分布上, K_s 变异较大,0~10 cm 和 10~20 cm 深度 K_s 分别表现出中等和较强的变异程度^[17]。然而,这些研究的条件、地理位置存在差异,且对于 K_s 各向异性的探

究较浅。因此,本研究选择太行山区典型坡地,通过采取不同坡位、不同深度土壤样品,测定垂直和水平方向的 K_s , 深入分析 K_s 及其各向异性比的垂直分布规律,以期为深入研究太行山区土壤水文过程提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

太行山位于 34°36' N~40°47' N, 110°42' E ~116°34' E, 山脉呈西南—东北走向,略成“S”形状,东西宽约 160 km,南北长约 800 km,总面积约 13 万 km²,地质构造复杂,东西部有明显不同的构造演化。太行山区属暖大陆性季风气候,年平均气温 12.4~14.3℃,年平均降水量 518.26 mm。区内草本植物主要有紫花地丁(*Viola philippina*)、野百合(*Lilium brownie*)等,灌木主要有山杨(*Populus davidiana*)、刺槐(*Robinia pseudoacacia*)等。本研究试验地点位于中国科学院太行山山地生态试验站,试验站位于河北省元氏县境内(图 1),地处太行山东坡中段的低山丘陵区,属于典型的山地—平原过渡区域,土壤类型主要为褐土,土层薄,角砾石含量大,易侵蚀,具有较高的渗透性能。

1.2 样品采集与分析

在上、中、下 3 个坡位分别开挖 50、80、100 cm 土壤剖面(上、中坡位已挖至基岩),每间隔 10 cm 分别采集剖面垂直方向与水平方向的原状土,每个方向采取 2 个重复样品,共采集原状土壤样品 92 个。同时,采集每个层次的扰动土。原状土用于测定土壤含水量、饱和导水率、毛管孔隙度、总孔隙度和容重。土壤含水量用烘干法测定,孔隙度用吸水法测定,饱和导水率用双环刀—定水头法测定,容重用环刀法测定。上述原状土样测定方法参照 LY/T 1215—1999《森林土壤水分—物理性质的测定》^[18]。

扰动土壤样品带回实验室自然风干,挑去碎石,磨碎后过筛,用于测定土壤机械组成和有机质含量。土壤机械组成使用激光粒度仪测定,按照美国农业部(1951)分级标准,测得不同粒径土壤颗粒体积百分含量。土壤有机质采用重铬酸钾氧化—外加热法测定。上述扰动土样测定方法参照《土壤农化分析》^[19]。

1.3 数据处理与分析

文中所用数据为重复的平均值。 K_s 各向异性比(K_a)利用公式(1)^[20]计算。土壤容重、含水量、毛管孔隙度、总孔隙度垂直与水平方向的数据取平均值进行

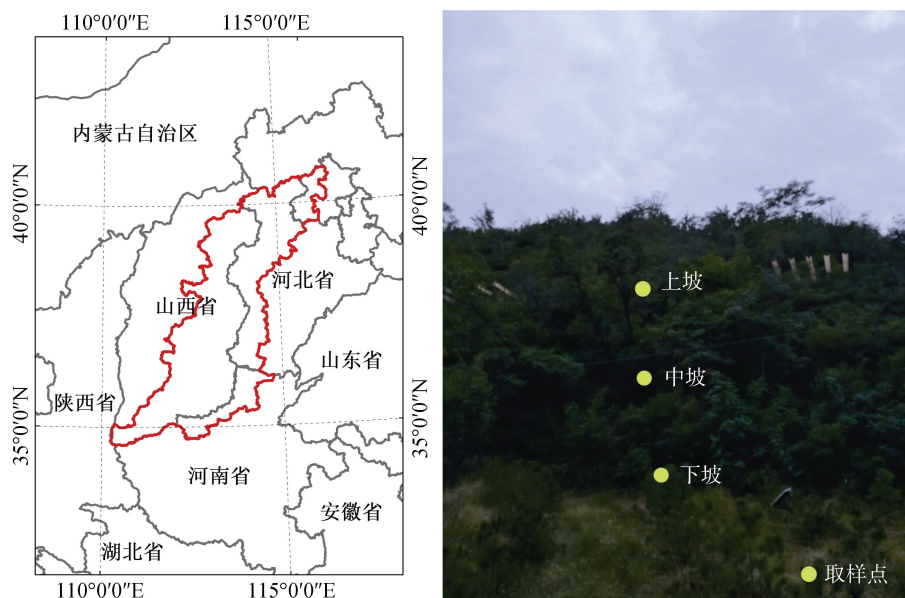


图1 试验坡地位置及样点分布
Fig. 1 Experimental slope locations and sampling sites

分析,即仅考虑 K_s 的各向异性。对土壤毛管孔隙度、容重、总孔隙度、含水量、机械组成和土壤有机质含量与 K_s 各向异性比进行双变量相关性分析,采用 SPSS 26.0 完成。采用 Origin 2022 绘图。

$$K_a = \frac{K_l}{K_v} \quad (1)$$

式中: K_l 为水平方向 K_s ; K_v 为垂直方向 K_s 。

2 结果与分析

2.1 不同坡位土壤基本物理性质及有机质含量剖面分布特征

研究区 3 个坡位土壤容重随土层深度的增加而呈增大趋势(图 2A),上、中、下 3 坡位土壤容重的平均值分别为 1.53、1.64、1.41 g/cm³。3 坡位土壤含水量总体上随土层深度增加而减小(图 2B),但中坡位土壤含水量在 10 ~ 20 cm 土层出现突增后又下降,下坡位在 50 cm 土层深度后出现明显下降幅度,不同坡位土壤含水量的平均值分别为 75.046、101.413、83.055 g/kg。毛管孔隙度、总孔隙度存在上下波动后较土壤表层(0 ~ 10 cm)总体减小(图 2C、2D)。总体而言,中坡位土壤的容重、含水量均大于上、下两坡位。

3 个坡位土壤颗粒组成均以粉粒为主(29.18% ~ 98.12%),砂粒次之(0.01% ~ 69.64%),黏粒占比最少(0.41% ~ 2.36%)。土壤黏粒含量在土壤表层较高,随后出现波动,但总体随土壤剖面深度的增加而呈减小趋势(图 2E)。上、下坡位土壤粉粒含量在土壤表层最

高,上坡位粉粒含量随土壤深度增加而呈强烈波动,下坡位粉粒含量先减小后增大,波动后均较地表含量降低(图 2F)。上、下坡位砂粒含量在土壤表层最低,后出现强烈波动;中坡位砂粒含量随土壤深度的增加而减小,在 40 ~ 60 cm 处突增;下坡位砂粒含量经过上下波动后总体较土壤表层呈增大趋势(图 2G)。上坡位土壤黏粒和粉粒含量(1.51%、77.71%)明显高于中坡位(1.07%、69.42%),下坡位土壤黏粒和砂粒含量(1.22%、42.48%)明显高于中坡位(1.07%、28.19%),说明不同坡位对土壤颗粒组成的剖面分布有明显影响。

3 个坡位土壤有机质含量均表现为 0 ~ 30 cm 土层内随深度增加而显著降低,30 cm 以下土层出现上下波动后小幅度降低(图 2H)。上、中、下坡位 0 ~ 30 cm 土层有机质平均含量(83.626、76.233、79.417 g/kg)分别是 30 cm 以下土层有机质平均含量(29.488、28.764、29.755 g/kg)的 2.83 倍、2.65 倍、2.66 倍,说明土壤深度对土壤有机质含量有明显影响。

2.2 不同坡位土壤饱和和导水率剖面分布特征

研究区上坡位 K_s 在垂直和水平方向上先随土壤深度增加而增大,后呈减小趋势(图 3A)。中坡位 K_s 在垂直方向上先随土壤深度增加而增加,后呈减小趋势;在水平方向上先随土壤深度增加而减小,而后呈增大趋势(图 3B)。下坡位 K_s 在垂直和水平方向上先随土壤深度增加而增大,而后呈减小趋势(图 3C)。垂直方向上,上、中坡位 K_s 最大值(0.330、0.374 cm/min)出现在剖面中层(20 ~ 40 cm),下坡位 K_s 最大值(0.133 cm/min)出现在剖面上层(0 ~ 20 cm);

水平方向上,上、中坡位 K_s 最大值(0.308、0.322 cm/min)也出现在剖面中层(20 ~ 40 cm),下坡位 K_s 最大值(0.543 cm/min)也出现在剖面上层(0 ~ 20 cm)。上、

中层土壤 K_s 较高的原因可能是由于植物根系作用和土壤生物活动形成了高孔隙度和低容重的土壤结构。

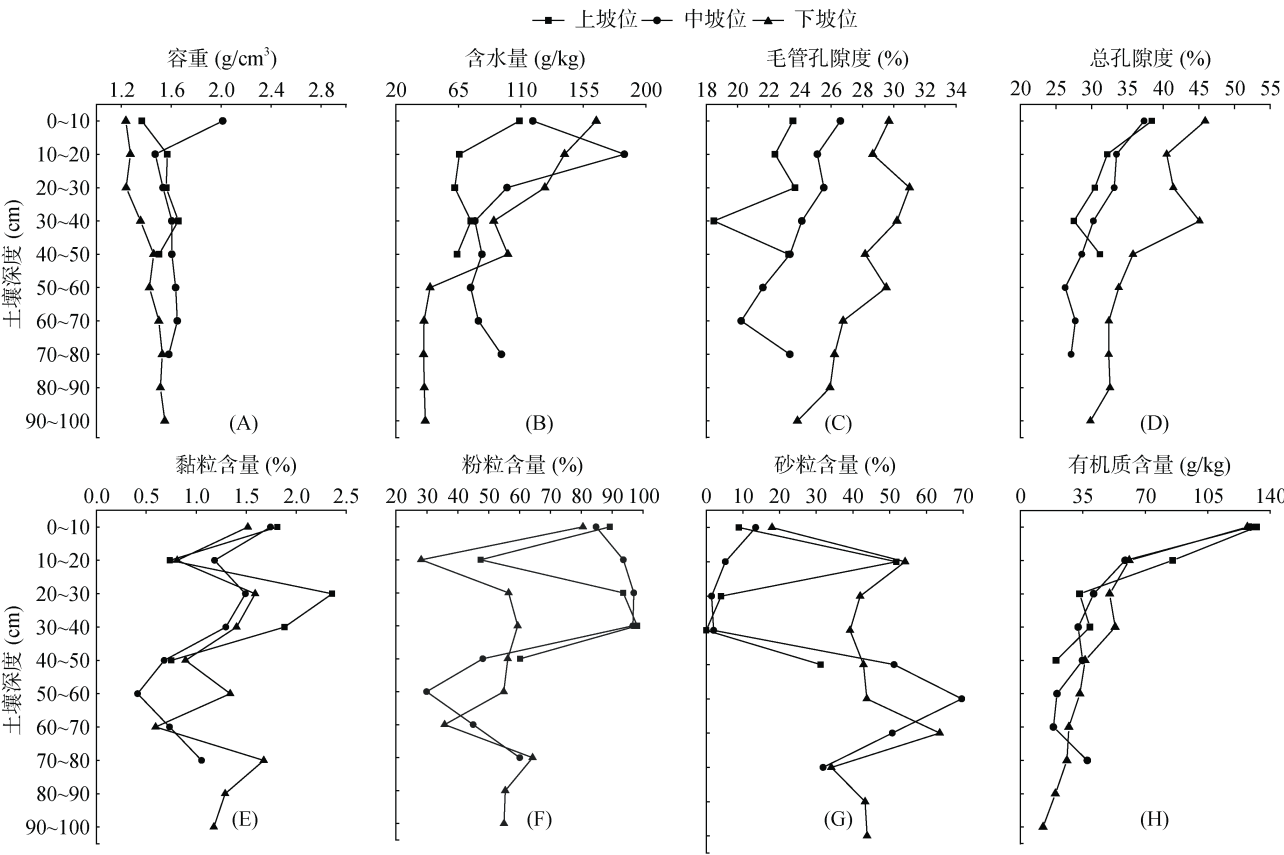
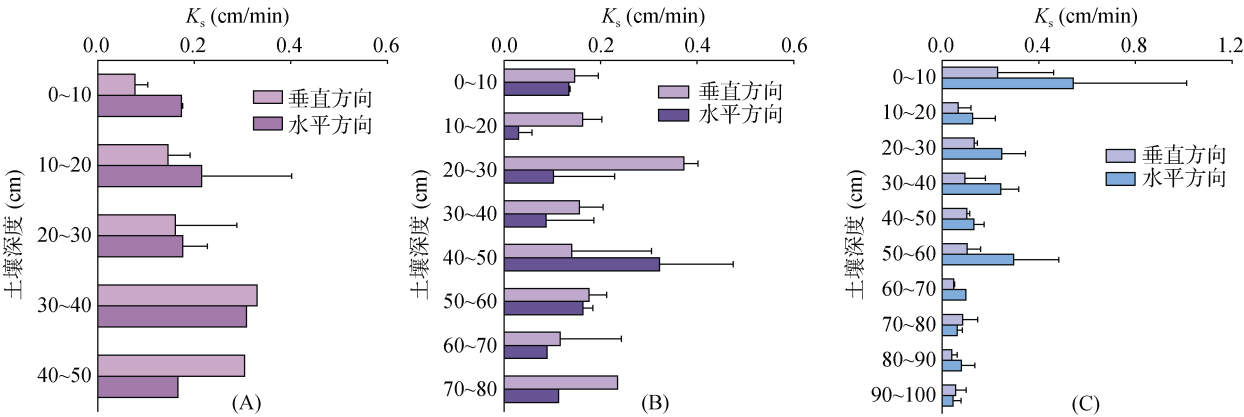


图 2 不同坡位类型土壤基本物理性质和有机质含量的剖面分布

Fig. 2 Profile distributions of soil basic physical properties and organic matter content of different slope types



(图 A、B、C 分别为上、中、下坡位; 图中误差线表示标准误差)

图 3 不同坡位土壤 K_s 剖面分布特征

Fig. 3 Vertical distribution characteristics of K_s at different slope positions

2.3 土壤饱和和导水率各向异性比剖面分布特征

3 坡位 K_s 各向异性比均与 1 差异明显,呈明显的各向异性。且上、下坡位不同层次 K_s 各向异性比的平均值均大于 1(1.216、1.849),中坡位 K_s 各向异

性比平均值小于 1(0.787),表明上、下坡位水平方向 K_s 占主导,而中坡位垂直方向 K_s 占主导地位。

上坡位 K_s 各向异性比随土壤深度的增加呈减小趋势,中坡位 K_s 各向异性比随土壤深度的增加先减

小再增大后减小，下坡位 K_s 各向异性比随土壤深度的增加经上下波动后呈减小趋势。上坡位土层水平方向 K_s 大于垂直方向，各向异性比小于 1，而随土壤深度增加逐渐大于 1。中坡位在 40 ~ 50 cm 土层 K_s 各向异性比突增，后随深度增加而减小。下坡位 K_s 各向异性比呈波动状，总体水平方向占主导地位。

表 1 不同坡位 K_s 各向异性比					
Table 1 K_s anisotropy ratios at different slope positions					
坡位	最大值	最小值	平均值	标准差	变异系数(%)
上坡	2.032	0.546	1.216	0.565	46.471
中坡	2.284	0.092	0.787	0.673	85.495
下坡	2.864	0.724	1.849	0.712	38.509

2.4 土壤饱和和导水率各向异性影响因素

K_s 各向异性比与土壤容重显著负相关($r=-0.492$, $P<0.05$), 与总孔隙度($r=0.546$, $P<0.01$)、毛管孔隙度显著正相关($r=0.543$, $P<0.01$), 与砂粒正相关($r=$

0.395 , $P>0.05$), 与粉粒负相关($r=-0.367$, $P>0.05$), 说明土壤孔隙结构对 K_s 的各向异性比有重要影响。

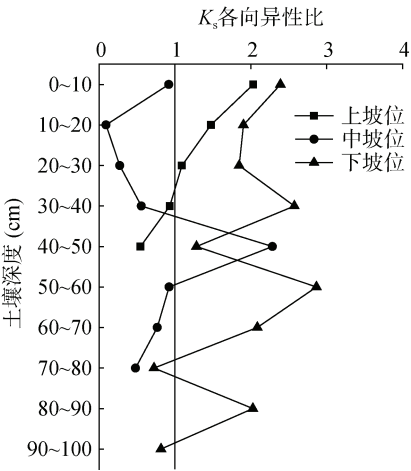


图 4 不同坡位 K_s 各向异性比的分布
Fig. 4 Anisotropy ratio distributions of K_s at different slope positions

表 2 土壤 K_s 各向异性比与土壤基本物理性质的相关性								
Table 2 Correlation between soil K_s anisotropy ratio and basic physical properties								
	容重	总孔隙度	毛管孔隙度	含水量	砂粒	粉粒	黏粒	有机质含量
r	-0.492*	0.546**	0.543**	-0.066	0.395	-0.368	-0.011	0.255
P	0.017	0.007	0.007	0.765	0.062	0.085	0.959	0.240

注：*、**分别表示在 $P<0.05$ 、 $P<0.01$ 水平显著相关。

3 讨论

3.1 土壤理化性质垂直分布

本研究表明，研究区土壤容重随土层深度的增加而呈增大趋势(图 2A)，这主要归因于上部土壤自重的压实作用，导致土壤颗粒间间隙减小，而长时间受到上部土壤自重的压实会引发固结现象，致使土壤颗粒间结合更紧密，进而增大土壤容重^[21]。另外，有机质稀释了土壤基质，改善了土壤团聚性，减小了土壤孔隙度^[22]，随土层深度的增加，土壤中的有机质和水分逐渐减少(图 2B、2H)，这种稀释作用逐渐减弱，使得土壤结构紧实度增加^[23]，从而导致土壤容重增大。

研究区土壤含水量总体随土层深度增加而减小(图 2B)，与土壤孔隙度的变化一致。孔隙度决定土壤储水能力。表层土壤由于根系发达^[24]和生物活动频繁使土壤更加疏松，孔隙度更大。深层土壤受到压实作用，土壤结构更紧密，孔隙度更小。

研究区土壤黏粒含量总体随土壤深度增加而呈减小趋势(图 2E)，粉粒含量随土壤深度增加而减小(图 2F)，砂粒含量随土壤深度增加经波动后总体较表层呈增大趋势(图 2G)。这主要归因于表层土壤常

受到风化和冲刷的影响，导致较大的颗粒被剥离^[25]；中层土壤黏粒含量开始增加是由于水分和生物活动使颗粒向下迁移，而较小的颗粒不容易被移动；深层土壤颗粒组成变得更加均匀，主要由黏性颗粒组成，是因为在这个深度下，水分和生物活动的影响变得较小。

研究区土壤有机质含量在 0 ~ 30 cm 内随土层深度增加而显著降低，30 cm 以下土层出现上下波动后小幅度降低(图 2H)，剖面上部土层有机质含量较高主要归因于表层土壤的植物残留物、微生物和土壤动物活动^[26]。

3.2 土壤饱和和导水率各向异性垂直分布

本研究中，3 个坡位土壤 K_s 均呈明显的各向异性(图 4)，主要原因可能是上坡位的土壤和水分会随着雨水等径流向下坡位流动，导致上坡位部分土壤流失^[27]，而中坡位会积累较多的细颗粒物质，形成更为紧实的土壤层^[28]，这种累积作用会导致中坡位土壤在不同方向上具有不同的密度和孔隙度，从而出现各向异性；中坡位水流的径流与渗透过程复杂，由于坡度的原因，水流在中坡位可能更倾向于沿着坡面移动，而非向下渗透，这可能导致土壤在水平方向上的导水性较垂直

方向更大。下坡位的土壤受到水流冲刷和重力作用,可能会导致土壤结构不均匀,使得土壤的导水性能在不同方向上有所差异。

本研究表明上、下坡位水平方向 K_s 占主导地位,而中坡位垂直方向 K_s 占主导地位。 K_s 在垂直方向与水平方向存在差异的原因是由于大孔隙在大孔隙网络中连接的模式不同所致。土壤的大孔隙通常与根槽和结构裂缝有关^[29]。一方面,大孔隙通常是沿着土壤的垂直方向排列,水在垂直方向上更容易流动^[30],有利于降水入渗;另一方面,水平方向上的大孔隙通常受到土壤颗粒的紧密排列和根系的影响,使得水在水平方向上的流动速度较慢。

3.3 土壤饱和和导水率各向异性影响因素

K_s 各向异性比与土壤容重、总孔隙度,毛管孔隙度显著相关,总体归因于土壤的孔隙结构。土壤孔隙结构的差异,特别是孔隙的占比、排列方式,是导致 K_s 在垂直方向与水平方向表现不同的主要原因。容重是指单位体积土壤的质量,容重较大表示土壤密度高,孔隙度小,导致 K_s 较低^[31]。在垂直方向上,土壤容重可能会受到土壤固结、压实等因素的影响,导致垂直方向上的 K_s 较水平方向上高^[32]。毛管孔隙度受土壤颗粒大小、排列方式、土壤结构等因素的影响^[33]。在垂直方向上,毛管孔隙度也可能受土壤层压实度的影响,导致毛管孔隙度较小,从而影响土壤垂直方向上的 K_s ^[34]。总孔隙度是指土壤中所有孔隙的总体积占土壤总体积的比例,它受到土壤颗粒大小、排列方式、土壤结构等因素的影响^[35]。总孔隙度较大表示土壤中有较多的孔隙,有利于水分的渗透和传输。然而,总孔隙度较大也可能会导致土壤中存在大量的大孔隙,使得水分在水平方向上传输较快,而在垂直方向上传输较慢。

砂粒含量较高的土壤通常具有较好的水平方向导水能力,因为砂粒间的孔隙较大,水分可以较容易地在水平方向上流动^[36],而在垂直方向上,由于重力和土壤颗粒的排列,导水能力可能会低于水平方向。粉粒含量较高的土壤通常具有介于砂土和黏土之间的导水能力,粉粒土壤的孔隙度较小,可能导致水平方向和垂直方向的导水能力都较低。黏粒含量较高的土壤通常具有非常低的饱和导水率,因为黏粒粒径小,土壤孔隙度低,水分流动受到极大限制^[37]。黏粒含量高的土壤各向异性比通常较高,因为垂直方向上的导水能力受到土壤颗粒排列和孔隙结构的双重限制,而水平方向上的导水能力相对较好。

4 结论

太行山区典型坡地上、下坡位 K_s 在垂直和水平方向上先随土壤深度增加而增大,后呈减小趋势。中坡位土壤 K_s 在垂直方向上先随土壤深度增加而增加,后呈减小趋势;在水平方向上随土壤深度的增加而减小,后呈增大趋势。3 个坡位土壤 K_s 各向异性比均与 1 差异明显,呈明显各向异性,其中上、下坡位水平方向 K_s 占主导,而中坡位垂直方向 K_s 占主导。土壤 K_s 各向异性比与土壤孔隙结构显著相关,其中与容重呈显著负相关,与总孔隙度、毛管孔隙度呈显著正相关。

参考文献:

- [1] 郑纪勇,邵明安,张兴昌. 黄土区坡面表层土壤容重和饱和导水率空间变异特征[J]. 水土保持学报, 2004, 18(3): 53–56.
- [2] 刘春利,胡伟,贾宏福,等. 黄土高原水蚀风蚀交错区坡地土壤剖面饱和导水率空间异质性[J]. 生态学报, 2012, 32(4): 207–215.
- [3] 张川,陈洪松,张伟,等. 喀斯特坡面表层土壤含水量、容重和饱和导水率的空间变异特征[J]. 应用生态学报, 2014, 25(6): 1585–1591.
- [4] 李文政,刘目兴,易军,等. 三峡山地不同坡位土壤的水分特征曲线及水力学性质[J]. 水土保持学报, 2021, 35(3): 135–142.
- [5] 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.
- [6] Schwen A, Zimmermann M, Bodner G. Vertical variations of soil hydraulic properties within two soil profiles and its relevance for soil water simulations[J]. Journal of Hydrology, 2014, 516: 169–181.
- [7] Polich N G, Lozano L A, Villarreal R, et al. Cover crops effects on anisotropy of unsaturated soil hydraulic properties[J]. Soil and Tillage Research, 2023, 227: 105601.
- [8] 黄怡婷,陈俊熹,高钰淇,等. 长期耕作对典型黑土水力性质的影响[J]. 土壤学报, 2024, 61(4): 998–1008.
- [9] Dörner J, Horn R. Anisotropy of pore functions in structured Stagnic Luvisols in the Weichselian moraine region in N Germany[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2006, 169(2): 213–220.
- [10] Peng X H, Horn R. Time-dependent, anisotropic pore structure and soil strength in a 10-year period after intensive tractor wheeling under conservation and conventional tillage[J]. Journal of Plant Nutrition and Soil Science, 2008, 171(6): 936–944.
- [11] Dörner J, Horn R. Direction-dependent behaviour of hydraulic and mechanical properties in structured soils under conventional and conservation tillage[J]. Soil and Tillage Research, 2009, 102(2): 225–232.

- [12] Hao M Z, Zhang J C, Meng M J, et al. Impacts of changes in vegetation on saturated hydraulic conductivity of soil in subtropical forests[J]. *Scientific Reports*, 2019, 9: 8372.
- [13] 骆紫藤. 华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- [14] Yao S X, Zhang T H, Zhao C C, et al. Saturated hydraulic conductivity of soils in the Horqin Sand Land of Inner Mongolia, northern China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2013, 185(7): 6013–6021.
- [15] 付同刚, 高玥, 刘丽丽, 等. 太行山区中段旱季土壤含水量的影响因素[J]. *中国生态农业学报(中英文)*, 2022, 30(7): 1054–1063.
- [16] 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.
- [17] Fu T G, Gao H, Liang H Z, et al. Controlling factors of soil saturated hydraulic conductivity in Taihang Mountain Region, northern China[J]. *Geoderma Regional*, 2021, 26: e00417.
- [18] 中华人民共和国国家林业局. 森林土壤水分-物理性质的测定: LY/T 1215—1999[S]. 北京: 标准出版社, 1999.
- [19] 史瑞和, 鲍士旦, 秦怀英. 土壤农化分析[M]. 北京: 农业出版社, 1981.
- [20] Pozdnyakov A I, Rusakov A V, Shalaginova S M, et al. Anisotropy of the properties of some anthropogenically transformed soils of podzolic type[J]. *Eurasian Soil Science*, 2009, 42(11): 1218–1228.
- [21] 尚海丽. 西北干旱区粘土矿物-微生物作用机理及促生效应[D]. 北京: 中国矿业大学(北京), 2018.
- [22] 赵旭, 樊军, 王茜, 等. 添加木本泥炭和膨润土对侵蚀退化黑土理化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59(4): 953–963.
- [23] 寇青青, 运剑苇, 汪明星, 等. 渝东北紫色土饱和导水率传递函数研究[J]. *土壤*, 2020, 52(3): 611–617.
- [24] 石常卿, 张海林, 韩雨蓉, 等. 近江平原区土壤水力参数及相关理化性质空间分布与影响因素[J]. *土壤*, 2024, 56(1): 182–192.
- [25] 杨玉盛. 不同利用方式下紫色土可蚀性的研究[J]. *水土保持学报*, 1992, 6(3): 52–58.
- [26] 王平, 华红莲, 丁智强, 等. 海拔梯度及典型土地利用类型对北热带山地土壤有机质和综合肥力的影响[J]. *热带地理*, 2023, 43(1): 144–154.
- [27] 赵耀. 晋西黄土区典型人工林林下植物多样性及其影响机制[D]. 北京: 北京林业大学, 2022.
- [28] 左烽林. 紫色土丘陵区新改土侵蚀特征研究[D]. 重庆: 西南大学, 2017.
- [29] Bathke G R, Cassel D K. Anisotropic variation of profile characteristics and saturated hydraulic conductivity in an ultisol landscape[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1991, 55(2): 333–339.
- [30] Petersen C T, Trautner A, Hansen S. Spatio-temporal variation of anisotropy of saturated hydraulic conductivity in a tilled sandy loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 2008, 100(1/2): 108–113.
- [31] 李卓, 吴普特, 冯浩, 等. 容重对土壤水分入渗能力影响模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2009, 25(6): 40–45.
- [32] Horn R, Mordhorst A, Fleige H, et al. Soil type and land use effects on tensorial properties of saturated hydraulic conductivity in northern Germany[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(2): 179–189.
- [33] 郭建军, 王佳欢, 胡静霞, 等. 2022 年冬奥会崇礼赛区针叶林枯落物及土壤水文效应[J]. *中国水土保持科学(中英文)*, 2021, 19(4): 44–50.
- [34] Mualem Y. A new model for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated porous media[J]. *Water Resources Research*, 1976, 12(3): 513–522.
- [35] de Lima R P, Rolim M M, Toledo M P S, et al. Texture and degree of compactness effect on the pore size distribution in weathered tropical soils[J]. *Soil and Tillage Research*, 2022, 215: 105215.
- [36] 朱珠, 虎胆·吐马尔白, 朱拥军. 盐荒地棉田长期膜下滴灌对土壤盐分和产量的影响[J]. *节水灌溉*, 2020(11): 73–77.
- [37] Turunen M, Hyväluoma J, Keskinen R, et al. Pore structure of wastewater sludge chars and their water retention impacts in different soils[J]. *Biosystems Engineering*, 2021, 206: 6–18.