

## 喀斯特峰丛洼地小流域不同景观位置土壤 饱和导水率特征及其影响因素

余欣芮<sup>1</sup>, 李学章<sup>2,3</sup>, 张帅普<sup>1</sup>, 侯森政<sup>1</sup>, 徐宪立<sup>2,3</sup>, 王克林<sup>2,3</sup>

(1. 桂林理工大学广西环境污染控制理论与技术重点实验室, 广西 桂林 541004;

2. 中国科学院亚热带农业生态研究所亚热带农业生态过程重点实验室, 长沙 410125;

3. 中国科学院环江喀斯特生态系统观测研究站, 广西 环江 547100)

**摘要:** [目的] 峰丛洼地是重要的喀斯特地貌类型之一, 探明不同景观位置对  $K_s$  的影响规律可为深入理解该区水文过程提供参考。[方法] 通过测定 2 种景观位置不同土层  $K_s$  和土壤理化性质, 采用方差分析、回归分析和通径分析等方法研究不同景观位置  $K_s$  的分布特征及其影响因素。[结果] 景观位置和土层对  $K_s$  分布有显著的影响 ( $p < 0.05$ ), 景观位置的影响主要体现在 0~10、20~30 cm 土层, 土层的影响主要发生在坡地, 而土地利用的影响不显著 ( $p > 0.05$ )。景观位置对土壤颗粒组成和全磷影响不明显 ( $p > 0.05$ ), 而有机碳、全氮和体积质量随景观位置不同发生明显变化 ( $p < 0.05$ )。坡地  $K_s$  与粉粒、砂粒、有机碳和全磷呈显著正相关 ( $p < 0.05$ ), 与黏粒和体积质量呈显著负相关 ( $p < 0.05$ ); 洼地  $K_s$  与体积质量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )。通径分析表明, 体积质量和有机碳是影响坡地和洼地  $K_s$  的主要因素。利用多元逐步回归建立坡地和洼地  $K_s$  的回归方程, 其影响因素方差解释率分别为 76.2% 和 32.6%。[结论] 地貌特征分异对土壤水文参数分布有重要影响, 可为喀斯特峰丛洼地小流域水土过程研究提供科学依据。

**关键词:** 饱和导水率; 景观位置; 峰丛洼地; 影响因素; 通径分析

中图分类号: S152.5

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242-(2025)01-0030-08

## Characteristics of Soil Saturated Hydraulic Conductivity and Its Influencing Factors at Different Landscape Positions in a Small Peak-Cluster Depression Watershed of the Karst Region

YU Xinrui<sup>1</sup>, LI Xuezhang<sup>2,3</sup>, ZHANG Shuaipu<sup>1</sup>, HOU Senzheng<sup>1</sup>, XU Xianli<sup>2,3</sup>, WANG Kelin<sup>2,3</sup>

(1. Key Laboratory for Theory and Technology of Environmental Pollution Control in Guangxi, Guilin University of

Technology, Guilin, Guangxi 541004, China; 2. Key Laboratory of Agro-ecological Processes in Subtropical

Region, Institute of Subtropical Agriculture, Chinese Academy of Sciences, Changsha 410125, China; 3. Huanjiang  
Observation and Research Station of Karst Ecosystem, Chinese Academy of Sciences, Huanjiang, Guangxi 547100, China)

**Abstract:** [Objective] Peak-cluster depression is one of the important karst landform types. Exploring the influence of different landscape positions on soil saturated hydraulic conductivity ( $K_s$ ) can provide a reference for further understanding of the hydrological processes in this area. [Methods] Saturated hydraulic conductivity and the corresponding soil physical and chemical properties of different soil depths on the slope and in the depression were measured. By measuring  $K_s$  and soil physical and chemical properties at different soil depths on the slope and in the depression, the distribution characteristics of  $K_s$  and the corresponding influencing factors were studied according to variance analysis, regression analysis and path analysis. [Results] Landscape position and soil depth had a significant influence on  $K_s$  distribution ( $p < 0.05$ ). The influence of landscape position was mainly identified at 0—10 and 20—30 cm soil depths, and the influence of

收稿日期: 2024-07-17

修回日期: 2024-09-12

录用日期: 2024-10-05

网络首发日期 (www.cnki.net): 2024-12-03

资助项目: 国家重点研发计划项目 (2022YFF1300700); 国家自然科学基金项目 (41977014); 广西自然科学基金项目 (2023GXNSFAA026400)

第一作者: 余欣芮 (1997—), 男, 硕士研究生, 主要从事土壤水文过程研究。E-mail: 609564704@qq.com

通信作者: 李学章 (1984—), 男, 副研究员, 博士, 硕士研究生导师, 主要从事土壤物理和生态水文研究。E-mail: lixuezhang839@isa.ac.cn

http://stbxb.alljournal.com.cn

soil depth was primarily occurred found on the slope. The effect of land use on  $K_s$  was not significant ( $p > 0.05$ ). The influence of landscape position on soil particle composition and total phosphorus was not obvious ( $p > 0.05$ ), but organic carbon, total nitrogen and bulk density changed significantly with landscape position ( $p < 0.05$ ). For the slope,  $K_s$  was significantly positively correlated with silt, sand, organic carbon and total phosphorus ( $p < 0.05$ ), and significantly negatively correlated with clay and bulk density ( $p < 0.05$ ). For the depression, there was a significant positive correlation between  $K_s$  and bulk density ( $p < 0.05$ ). Path analysis indicated that bulk density and organic carbon were the primary factors affecting  $K_s$  for both the slope and depression. The regression equations of  $K_s$  for the slope and depression were established based on multiple stepwise regression, and the variance explanation rates of the influencing factors were 76.2% and 32.6%, respectively. [Conclusion] The results showed that the difference in geomorphic features had a major impact on the distribution of soil hydrological parameters, and can provide a scientific basis for the study of soil and water processes in small peak-cluster depression watershed of the karst region.

**Keywords:** saturated hydraulic conductivity; landscape position; peak-cluster depression; influencing factor; path analysis

Received: 2024-07-17

Revised: 2024-09-12

Accepted: 2024-10-05

Online(www.cnki.net): 2024-12-03

土壤饱和和导水率( $K_s$ )指土壤处于饱和状态时,单位水势梯度作用下通过垂直于水流方向的单位面积土壤的水流量或渗流速度<sup>[1]</sup>,是反映土壤入渗性能的重要物理指标。作为土壤中水分和溶质运移模型中的关键参数, $K_s$ 对土壤中水分循环和物质运移过程具有重要作用<sup>[2]</sup>。 $K_s$ 主要受土壤体积质量、质地、孔隙度、团聚体质量分数及有机碳等土壤本身理化性质影响<sup>[3]</sup>,而土壤性质分布差异又由地形、土地利用、植被类型、土层深度等环境因子共同决定<sup>[4]</sup>。张益等<sup>[5]</sup>研究发现,北京山区不同植被类型  $K_s$  与土层深度呈对数函数关系,其主要影响因素为总孔隙度和根系生物量;毛娜等<sup>[6]</sup>研究指出,在黄土高原小流域土壤  $K_s$  随着土层深度增加呈先减小后增大趋势,主要由该区空间异质性较大的土壤质地、植被分布、地形等因素所共同决定;杨震等<sup>[7]</sup>研究表明,土地利用、土壤性质、地形因子均是影响晋西北黄土丘陵区土壤  $K_s$  空间分布的主要因素。不同研究区域  $K_s$  分布特征和主导因素不尽相同,与其环境条件密切相关。

喀斯特地区生态环境脆弱,其岩溶作用过程缓慢,导致土壤形成速率较低,土层浅薄且不连续,土壤性质异质性高<sup>[8]</sup>。由于浅薄土壤下表层岩溶带高度发育,管道、裂隙普遍存在,使得该区土壤-表层岩溶带水文过程迅速,土壤对水资源的调蓄能力不足,旱涝灾害频发<sup>[9]</sup>。基于喀斯特区水文过程与其他研究区有明显差异,该区已开展部分  $K_s$  分布特征的相关研究。蔡路路等<sup>[10]</sup>研究喀斯特区不同土地利用类型对土壤  $K_s$  的影响发现,凋落物覆盖和动物活动等因素的综合作用,削

弱植被对表层  $K_s$  的影响;付同刚等<sup>[9]</sup>研究发现,坡位是影响喀斯特小流域尺度  $K_s$  垂直分布最重要的环境因素,碎石质量分数则是影响  $K_s$  的关键土壤性质;孟凡德等<sup>[11]</sup>通过对比石灰岩和白云岩 2 种岩性下垫面对  $K_s$  的影响发现,石灰岩坡地  $K_s$  具有更高的空间变异性。峰丛洼地是重要的喀斯特地貌类型之一,根据其景观位置不同可划分为陡峭的坡地和平缓的洼地,坡地和洼地水土过程存在显著差异<sup>[12]</sup>。当前有关喀斯特峰丛洼地  $K_s$  的研究主要集中在其表层分布的空间异质性、剖面变化特征及测量方法研究等方面,缺少对坡地和洼地 2 种不同景观位置  $K_s$  分布特征的对比研究。因此,在典型喀斯特峰丛洼地小流域分别选择坡地和洼地作为样地,开展  $K_s$  研究,利用方差分析、相关分析和通径分析等方法,探究不同景观位置下  $K_s$  分布特征,量化不同因素对  $K_s$  的影响,建立不同景观位置  $K_s$  的预测模型,旨在为喀斯特峰丛洼地小流域植被建设和水文模型构建提供科学依据。

## 1 材料与方法

### 1.1 研究区概况

研究区位于广西环江毛南族自治县中国科学院环江喀斯特农业生态系统研究观测站(24°43'~24°44' N, 108°18'~108°19' E)。研究区为完整的喀斯特峰丛洼地小流域(图 1),地貌特征差异明显,周围为陡峭的山坡,中间为平缓的洼地,地形起伏变化大,海拔为 272~647 m,最大相对高差为 375 m,研究区内 62% 的坡面坡度  $\geq 25^\circ$ 。土壤类型为石灰土,坡地和洼地的平均基岩裸露率分别为 30% 和 15%,相应的土层

深度分别为 10~50、20~160 cm。该地区属于亚热带季风气候区,多年平均气温为 19.9 °C,7 月平均气温为 27.9 °C,1 月平均气温为 10.1 °C。多年平均降水量为 1 389 mm,雨季为 4—8 月,占全年降水的 74%,而旱季为 9 月至翌年 3 月。坡地土地利用类型主要为灌丛地、林地和牧草地,洼地土地利用类型主要有农地、牧草地和坚果林地。

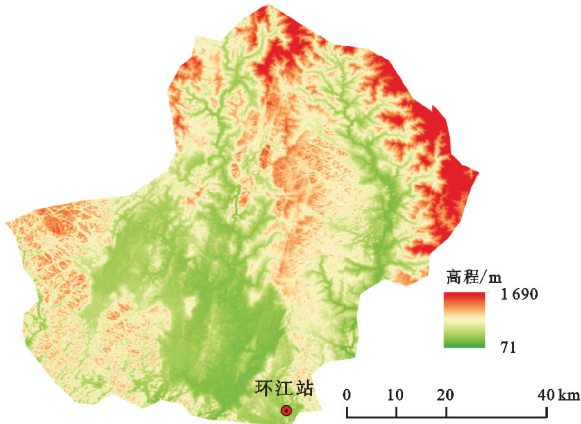


图 1 研究区位置

Fig.1 Location of the study area

## 1.2 样地选择与样品采集

2023 年 6 月以环江喀斯特农业生态系统研究观测站试验场为研究区,选择坡地和洼地 2 种典型的景观位置,每种景观位置分别选择牧草地和林地建立样地,共建立 4 个样地,分别在每个样地分别随机挖取 5 个土壤剖面,在每个土壤剖面 0~10、10~20、20~30 cm 土层,利用环刀分别采集原状土,用于土壤饱和导水率的测定。同时,采集扰动土样品,用于土壤理化性质的测定。共计获取 60 个土壤原状和扰动土样。

## 1.3 试验方法

1.3.1 土壤饱和导水率测定 土壤饱和导水率利用定水头法进行测定。首先,将采集的原状土放置于盛水托盘中浸泡至饱和;然后,固定水头利用马氏瓶进行供水,待出水稳定后开始测定单位时间内水流量,同时,记录此时的供水温度,根据公式计算出该温度下的土壤饱和导水率,计算公式为:

$$K_s = \frac{10QL}{AHT} \quad (1)$$

式中: $K_s$  为土壤饱和导水率,mm/min; $Q$  为  $t$  时间内稳定出水流量,mL; $L$  为土柱长度,cm; $A$  为土柱横截面积,cm<sup>2</sup>; $H$  为渗流路径始末断面的水头差,cm; $T$  为出流时间,min。

土壤水分运动过程受温度的影响,为进行数据对比,需要根据哈赞公式将不同供水温度下测量的土壤饱和导水率转换为标准温度 10 °C 时的数值<sup>[13]</sup>,换算公式为:

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

式中: $K_{10}$  和  $K_t$  分别为 10 和  $t$  °C 时的土壤饱和导水率,mm/min; $t$  为测量时的水温,°C。

1.3.2 土壤理化性质测定 将土壤样品自然风干并去除石砾和植物残根,研磨过 2、0.25 mm 筛用于土壤理化性质测定。土壤机械组成用马尔文激光粒度仪测定,并按照国际制分为黏粒(<0.002 mm)、粉粒(0.002~0.02 mm)和砂粒(0.02~2 mm);土壤有机碳采用重铬酸钾氧化-外加热法<sup>[13]</sup>来测定,土壤全氮利用半微量开氏法测定,土壤全磷利用钼锑抗比色法测定;土壤体积质量采用环刀法测定。

## 1.4 数据分析方法

利用 Microsoft Excel 2021 软件计算数据平均值和标准差。利用 IBM SPSS 26.0 软件对数据进行统计分析,对  $K_s$  和土壤理化性质进行正态性检验,其中, $K_s$  为非正态分布,经过对数转换后符合正态分布,用于后续分析;通过多因素方差分析对不同处理的  $K_s$  和土壤理化性质进行差异性检验,差异显著后利用最小显著差异法 (least significant difference method, LSD) 法进行多重比较; $K_s$  和土壤理化性质分别进行 Pearson 相关分析和多元逐步回归分析;对影响  $K_s$  的因素进行通径分析,分别计算出直接和间接通径系数。利用 Matlab 2020 软件中的广义线性模型代码计算不同影响因素对  $K_s$  预测的方差贡献率。采用 Origin 2022 软件制作图片。

依据变异系数对变异强度进行划分,当  $CV < 10\%$  为弱变异,  $10\% \leq CV \leq 100\%$  为中等变异,  $CV > 100\%$  为强变异<sup>[14]</sup>。

$$CV = \frac{\delta}{\bar{y}} \quad (3)$$

式中: $\delta$  和  $\bar{y}$  分别为  $K_s$  的标准差和平均值,mm/min。

不同影响因素对  $K_s$  的综合作用由决策系数确定<sup>[15]</sup>。决策系数计算公式为:

$$R_{(j)} = R_j^2 + \sum R_{jk} \quad (k \neq j) \quad (4)$$

式中: $R_{(j)}$  为第  $j$  ( $=1, 2, \dots, m$ ) 个自变量对因变量  $y$  的决策系数,决策系数由直接决定系数和共同决定系数之和组成,直接决定系数和共同决定系数的计算公式分别为:

$$R_j^2 = p_j^2 \quad (5)$$

$$R_{jk} = 2p_j r_{jk} p_k \quad (6)$$

式中: $p_j$ 、 $r_{jk}$ 、 $p_k$  分布为第  $j$ 、 $k$  个自变量对因变量  $y$  的直接通径系数及其间的皮尔逊相关系数。

$K_s$  的拟合精度由决定系数( $R^2$ )确定:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum (y - \hat{y})^2}{\sum (y - \bar{y})^2} \quad (7)$$

式中: $y$ 、 $\bar{y}$ 、 $\hat{y}$  分别为  $K_s$  测量值、拟合值和平均值, mm/min。

## 2 结果与分析

### 2.1 方差分析

利用三因素方差分析研究景观位置、土层及土地利用对  $K_s$  的影响(表 1)。景观位置( $F=10.841$ 、 $p=0.003$ )和土层( $F=39.623$ 、 $p<0.001$ )对  $K_s$  分布有显著影响,而土地利用的影响不显著( $F=0.049$ 、 $p=0.826$ ),可能与林地和草地均具有较发达的根系有关。3 种因素对  $K_s$  也存在着交互作用,景观位置与土层、土地利用与土层及景观位置、土地利用和土层对  $K_s$  的变化具有显著影响( $p<0.05$ )。基于以上结果,本研究重点讨论景观位置和土层对  $K_s$  分布的影响。

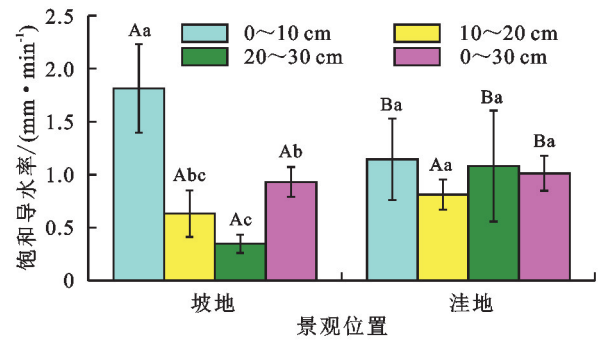
表 1 不同因素对喀斯特小流域土壤饱和和导水率影响的方差分析

Table 1 Variance analysis of the influence of different factors on soil saturated hydraulic conductivity in karst small watershed

来源	平方和	自由度	均方	F	显著性
校正模型	2.119	11	0.193	15.498	0
截距	0.264	1	0.264	21.273	0
景观位置	0.135	1	0.135	10.841	0.003
土地利用	0.001	1	0.001	0.049	0.826
土层	0.985	2	0.492	39.623	0
景观位置×土地利用	0.001	1	0.001	0.104	0.750
景观位置×土层	0.661	2	0.331	26.608	0
土地利用×土层	0.119	2	0.060	4.806	0.018
景观位置×土地利用×土层	0.216	2	0.108	8.703	0.001

### 2.2 土壤饱和和导水率分布特征

喀斯特峰丛洼地小流域不同景观位置和土层  $K_s$  分布特征见图 2。土层对  $K_s$  的影响主要体现在坡地。坡地  $K_s$  随土层深度增加逐渐减小,其  $K_s$  沿着土壤剖面分别为(1.81±0.42)、(0.63±0.22)、(0.35±0.09) mm/min,0~10 cm 土层  $K_s$  显著高于 10~20、20~30 cm 土层( $p<0.05$ )。洼地  $K_s$  随土层变化不明显( $p>0.05$ ),其  $K_s$  值为(0.81±0.14)~(1.14±0.38) mm/min。景观位置对  $K_s$  的影响主要体现在 0~10、20~30 cm 土层。坡地 0~10 cm 土层  $K_s$  显著高于洼地 0~10 cm 土层  $K_s$ ,而坡地 20~30 cm 土层  $K_s$  显著低于洼地 20~30 cm 土层  $K_s$ ( $p<0.05$ )。坡地和洼地 10~20 cm 土层  $K_s$  差异不显著( $p>0.05$ )。整体而言,坡地 0~30 cm 土壤剖面  $K_s$  平均值为(0.93±0.14) mm/min,显著低于洼地 0~30 cm 土层  $K_s$  平均值。喀斯特峰丛洼地小流域坡地和洼地  $K_s$  变异系数分别为 23.1%~34.5% 和 17.5%~48.5%,表现出中等程度变异性。



注:图柱上方不同小写字母表示相同景观位置不同土层间差异显著( $p<0.05$ );不同大写字母表示不同景观位置相同土层间差异显著( $p<0.05$ )。

图 2 不同景观位置和土层土壤饱和和导水率变化特征

Fig.2 Variation characteristics of soil saturated hydraulic conductivity at different landscape positions and soil depths

### 2.3 土壤理化性质

对坡地而言,0~10 cm 土层土壤理化性质与 10~20、20~30 cm 土层存在明显差异(表 2)( $p<0.05$ )。0~10 cm 土层土壤黏粒质量分数为(59.68±11.99)%,显著低于 10~30 cm 土层;0~10 cm 土层土壤粉粒和砂粒质量分数分别为(28.18±8.64)%、(12.14±3.63)%,显著高于 10~30 cm 土层。0~10 cm 土层土壤有机碳、全氮和全磷质量分数分别为(52.68±6.37)、(3.95±1.63)、(1.09±0.25) g/kg,显著高于 10~30 cm 土层,而其体积质量则为(1.03±0.09) g/cm<sup>3</sup>,显著低于 20~30 cm 土层。对洼地而言,土壤颗粒组成和体积质量等物理参数随土层变化不明显( $p>0.05$ ),土壤养分质量分数随着土层逐渐减小,0~10 cm 土层养分显著高于 10~30 cm 土层(表 2)( $p<0.05$ )。

不同景观位置土壤颗粒组成和全磷差异不明显( $p>0.05$ ),景观位置的显著影响主要体现在有机碳、全氮和体积质量 3 个参数(表 2)。坡地 0~10 cm 土层有机碳和 10~20 cm 土层全氮分别为(52.68±6.37)、(3.14±0.72) g/kg,显著高于洼地相同土层有机碳和全氮质量分数;而坡地 0~10 cm 土层体积质量则显著低于洼地 0~10 cm 土层。

### 2.4 土壤饱和和导水率影响因素

本研究对  $K_s$  及其相关的 7 个变量对进行相关性分析(图 3)。对于整个坡-洼地系统而言, $K_s$  与黏粒质量分数呈显著负相关( $p<0.05$ ),与粉粒、砂粒、有机碳及全磷呈显著正相关( $p<0.05$ ),与全氮和体积质量关系不明显( $p>0.05$ )。由于景观位置对  $K_s$  分布具有重要影响,进一步分析不同景观位置  $K_s$  及其影响因素的相关性(图 3)。对坡地而言, $K_s$  与黏粒质量分数和土壤体积质量呈显著负相关( $p<0.05$ ),相关系数分别为-0.64 和-0.72; $K_s$  与粉粒、砂粒、有机碳和全磷质量分数呈显著正相关( $p<0.05$ ),其相

关系数分别为 0.64、0.60、0.68、0.61； $K_s$  与全氮关系不明显 ( $p > 0.05$ )。对洼地而言， $K_s$  与体积质量呈显著正相关 ( $p < 0.05$ )，其相关系数为 0.57； $K_s$  与其他

影响因素相关关系不显著 ( $p > 0.05$ )。不同景观位置  $K_s$  与其影响因素的相关关系有明显差异，表明景观位置对其分布具有重要影响。

表 2 喀斯特小流域不同景观位置不同土层土壤理化性质

Table 2 Soil physicochemical properties of different soil depths at different landscape positions in karst watershed

景观位置	土层深度/cm	黏粒/%	粉粒/%	砂粒/%	有机碳/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全氮/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	全磷/ ( $g \cdot kg^{-1}$ )	体积质量/ ( $g \cdot cm^{-2}$ )
坡地	0~10	59.68±11.99bA	28.18±8.64aA	12.14±3.63aA	52.68±6.37aA	3.95±1.63aA	1.09±0.25aA	1.03±0.09bB
	10~20	83.10±9.69aA	13.60±7.60bA	3.29±2.46bA	31.97±13.28bA	3.14±0.72abA	0.87±0.16abA	1.15±0.19abA
	20~30	79.98±13.29aA	14.41±8.36bA	5.61±5.84bA	23.60±12.68bA	2.39±0.87bA	0.75±0.11bA	1.23±0.10aA
洼地	0~10	69.72±6.55aA	23.24±6.19aA	7.04±4.25aA	26.16±4.99aB	2.50±0.59aA	0.92±0.04aA	1.26±0.20aA
	10~20	75.52±15.37aA	19.74±11.91aA	4.74±3.75aA	20.24±2.98bA	2.03±0.21abB	0.83±0.05bA	1.20±0.06aA
	20~30	78.24±7.29aA	16.39±6.53aA	5.37±6.00aA	17.54±4.82bA	1.75±0.36bA	0.82±0.08bA	1.35±0.12aA

注：表中数据为平均值±标准差；同列不同小写字母表示相同景观位置不同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )；同列不同大写字母表示不同景观位置相同土层间差异显著 ( $p < 0.05$ )。

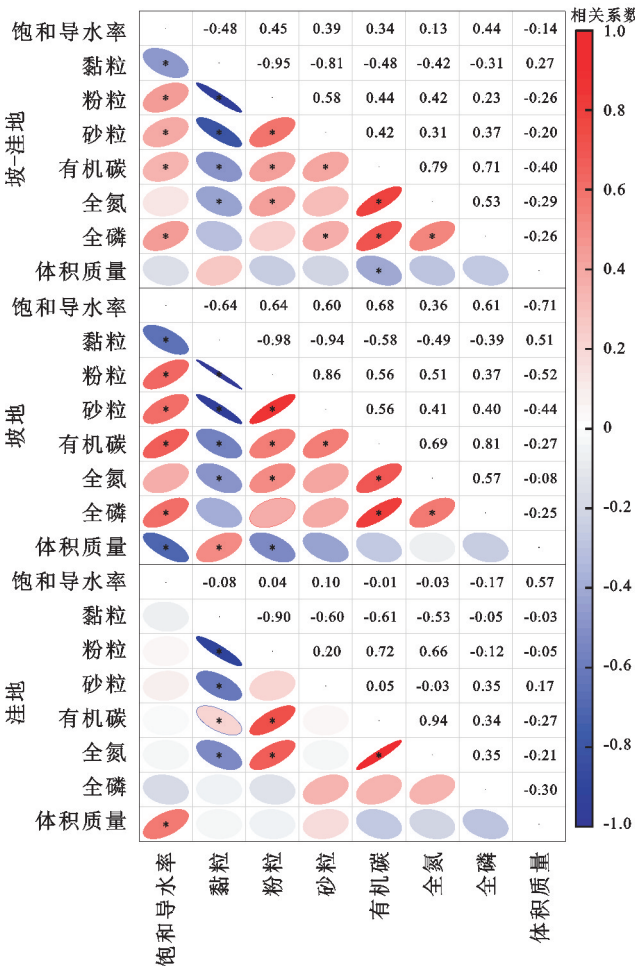


图 3 不同景观位置土壤饱和导水率和影响因素的相关系数  
Fig.3 Correlation coefficients between soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors at different landscape positions

本研究基于通径分析深入分析影响因素对  $K_s$  的直接和间接影响。对坡地而言，体积质量和有机碳的直接通径系数分别为 -0.491、0.406，其直接影响高于其他影响因素(表 3)。由总间接通径系数可知，各影响因素对  $K_s$  均有重要的间接影响(表 3)，各影响因素

对  $K_s$  的正向影响，按照总间接通径系数从大到小依次为砂粒(0.566) > 粉粒(0.506) > 全氮(0.496) > 全磷(0.434) > 有机碳(0.269)；此外，体积质量对  $K_s$  具有负向影响，其总间接通径系数为 -0.223。与体积质量和有机碳不同，砂粒、粉粒、全氮和全磷对  $K_s$  的间接影响大于其直接影响(表 3)。粉粒主要是通过影响有机碳和体积质量来间接影响  $K_s$ ，其间接通径系数分别为 0.226、0.255。对洼地而言，有机碳和体积质量的直接通径系数分别为 0.685、0.620，其对  $K_s$  的直接影响亦高于其他影响因素(表 4)。对  $K_s$  有重要间接影响的因素主要是有机碳、黏粒和全氮，其总间接通径系数分别为 -0.698、-0.340、0.321。需要指出的是，虽然有机碳具有最高的直接和间接通径系数，但其对  $K_s$  的作用是相反的，因此，洼地  $K_s$  和有机碳呈极低的相关系数 (-0.013)。决策系数用来衡量影响因素对解释变量的综合作用。由决定系数可知，体积质量和有机碳是坡地和洼地  $K_s$  的主要影响因素。

### 2.5 土壤饱和导水率回归方程

利用多元逐步回归模型，排除显著影响因素间的共线性，建立不同景观位置  $K_s$  的回归方程，所得回归方程预测效果较好(图 4) ( $p < 0.05$ )。对坡-洼地整体而言，黏粒和全磷可较好地拟合  $K_s$  ( $p = 0.002$ )，其  $R^2$  为 0.321。对坡地而言， $K_s$  可用体积质量和有机碳较好地拟合 ( $p < 0.001$ )，其  $R^2$  为 0.762；洼地  $K_s$  可用体积质量较好地拟合 ( $p = 0.013$ )，其  $R^2$  为 0.326。通过广义线性模型进一步计算不同影响因素对  $K_s$  预测的方差贡献率(表 5)。分析表明，坡地  $K_s$  变异性主要由体积质量和有机碳解释，其中，体积质量和有机碳的方差贡献率分别为 51.12% 和 25.08%。洼地  $K_s$  变异性主要由体积质量贡献，其方差贡献率为 32.61%。

表 3 坡地土壤饱和和导水率影响因素通径分析

**Table 3 Path analysis of the influencing factors for soil saturated hydraulic conductivity on the slope**

因子	直接 通径系数	相关 系数	总间接 通径	间接通径系数						决策 系数	排序
				X1	X2	X3	X4	X5	X6		
X1	0.129	0.635**	0.506	/	0.030	0.226	-0.068	0.063	0.255	0.147	4
X2	0.035	0.601**	0.566	0.111	/	0.226	-0.055	0.068	0.216	0.041	6
X3	0.406	0.675**	0.269	0.072	0.019	/	-0.094	0.139	0.133	0.383	2
X4	-0.135	0.362	0.496	0.065	0.014	0.281	/	0.098	0.038	-0.116	5
X5	0.172	0.606**	0.434	0.047	0.014	0.329	-0.077	/	0.121	0.179	3
X6	-0.491	-0.715**	-0.223	-0.067	-0.015	-0.110	0.011	-0.042	/	0.460	1

注: X1~X6 分别为粉粒、砂粒、有机碳、全氮、全磷和体积质量; \*、\*\* 分别表示  $p < 0.05$ 、 $p < 0.01$ 。下同。

表 4 洼地土壤饱和和导水率影响因素通径分析

**Table 4 Path analysis of the influencing factors for soil saturated hydraulic conductivity in the depression**

因子	直接 通径系数	相关 系数	总间接 通径	间接通径系数						决策 系数	排序
				X1	X2	X3	X4	X5	X6		
X7	0.262	-0.078	-0.340	/	-0.093	-0.418	0.184	0.007	-0.020	-0.110	3
X2	0.155	0.099	-0.055	-0.158	/	0.034	0.012	-0.050	0.107	0.007	6
X3	0.685	-0.013	-0.698	-0.160	0.008	/	-0.330	-0.049	-0.167	-0.487	1
X4	-0.350	-0.029	0.321	-0.138	-0.005	0.646	/	-0.050	-0.132	-0.102	4
X5	-0.144	-0.174	-0.029	-0.013	0.054	0.234	-0.121	/	-0.183	0.029	5
X6	0.620	0.571*	-0.049	-0.009	0.027	-0.184	0.075	0.042	/	0.324	2

注: X7 为黏粒。

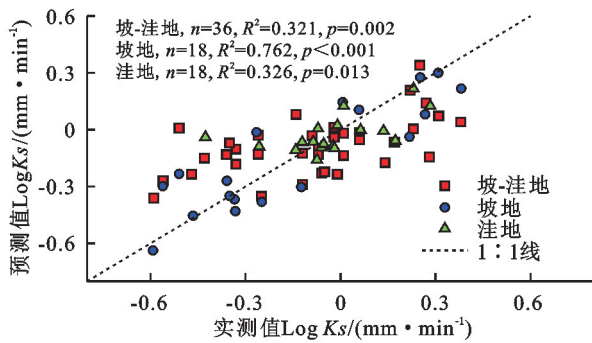


图 4 不同景观位置土壤饱和和导水率回归方程拟合曲线

Fig.4 Fitting curve of the regression equations of soil saturated hydraulic conductivity at different landscape positions

表 5 不同影响因素对不同景观位置土壤饱和和导水率变化的方差贡献率

Table 5 Variance contribution rates of different influencing factors for soil saturated hydraulic conductivity at different landscape positions

景观位置	变异来源	方差贡献率/%	显著性
坡-洼地	总变异	32.10	
	黏粒/%	22.63	0.019
	全磷/(g·kg <sup>-1</sup> )	9.47	0.039
坡地	总变异	76.20	
	体积质量/(g·cm <sup>-2</sup> )	51.12	0.001
	有机碳/(g·kg <sup>-1</sup> )	25.08	0.001
洼地	总变异	32.61	
	体积质量/(g·cm <sup>-2</sup> )	32.61	0.013

### 3 讨论

在喀斯特峰丛洼地小流域,土层对  $K_s$  分布特征具有重要影响。本研究洼地  $K_s$  随土层变化不明显 ( $p >$

0.05),而坡地表层  $K_s$  显著高于 10~30 cm 土层,主要是由其土壤性质剖面分布差异造成的(表 2),洼地土壤质地剖面分布差异不明显,而坡地 0~10、20~30 cm 土层土壤砂粒和有机碳质量分数降幅分别为 116.40% 和 123.22%,相对应增加黏粒和粉粒质量分数。在重力和水力作用下,土壤中细小颗粒沿着土壤中大孔隙向深层迁移<sup>[16]</sup>,表层土壤较高的砂粒和有机碳质量分数有利于土壤水分入渗。此外,付同刚等<sup>[9]</sup>研究发现,桂西北喀斯特坡地表层土壤较多的碎石,增加土壤水分运动通道、过水断面及增加大孔隙的综合作用从而有利于表层土壤水分入渗。喀斯特坡地表层较高的  $K_s$  对土壤-表层岩溶带降雨分配有重要影响。FU 等<sup>[17]</sup>通过人工模拟降雨试验发现,即使在较高(110 mm/h)的雨强条件下,坡地地表径流也不超过 15%,其他降雨通过快速入渗进入浅层土壤,进而由表层岩溶带重新分配为其他形式的地下水流。

景观位置对喀斯特峰丛洼地小流域  $K_s$  分布特征的显著影响反映地形因素对  $K_s$  分布的重要作用<sup>[18]</sup>。地形因素不但可影响流域水热资源重新分配,而且也对土壤物质循环过程和强度具有重要影响<sup>[19]</sup>。坡地和洼地  $K_s$  间的差异主要由有机碳和体积质量差异导致(表 2)。与坡地不同,洼地由于受农业生产等人类活动影响,导致其土壤层板结黏重,有机碳质量分数降低,进而影响土壤入渗功能。景观位置不同引起的土壤性质差异,同样影响其他土壤水文参数的分布。LI 等<sup>[12]</sup>研究发现,与洼地相比,由于较浅的土壤厚度和丰富的未硬化石灰岩存在,坡地土壤水分体积分数剖面变化较大,其土壤

水分体积分数可从 20~30 cm 土层的  $0.28 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$  迅速降低到 40~50 cm 土层的  $0.12 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。因此,在喀斯特峰丛洼地小流域进行水土过程研究和水文模型构建时,必须考虑到景观位置的影响。本研究不同景观位置  $K_s$  变异系数为 17.5%~48.5%,表现出中等程度的变异性,明显低于其他喀斯特地区研究结果<sup>[9,20]</sup>,可能由采样尺度决定,本研究采样仅限于田块尺度 0~30 cm 土层,而其他研究采样尺度为小流域或 0~100 cm 土层。

对坡地而言, $K_s$  与黏粒和体积质量呈显著负相关( $p < 0.05$ ),与粉粒、砂粒、有机碳和全磷呈显著正相关( $p < 0.05$ )。与李焱秋等<sup>[20]</sup>研究结果一致,较高的黏粒质量分数可能促进毛管孔隙的形成,而毛管孔隙吸持的水分主要供给植物根系耗水过程,因此,土壤中毛管孔隙增多,抑制土壤渗透功能<sup>[21]</sup>。由于植物根系分泌物和枯落物分解,导致土壤表层土壤有机碳质量分数较高,进而对  $K_s$  具有显著的促进作用<sup>[9,22]</sup>。对洼地而言, $K_s$  仅与体积质量呈显著正相关( $p < 0.05$ ),表明景观位置对土壤性质分布的影响。值得注意的是,坡地和洼地  $K_s$  与体积质量呈负相关<sup>[7,23]</sup>;而 ZHAO 等<sup>[24]</sup>通过对陕北淤地坝的研究则发现, $K_s$  随着体积质量的增加而增大。坝地与本研究中洼地具有类似的地貌特征,进一步表明, $K_s$  分布特征是土壤性质和地形因素共同作用的结果。景观位置的不同导致土壤性质剖面分布规律的差异。对于坡地,由于表层具有较高的砂粒和有机碳质量分数,导致其  $K_s$  较大,而土壤细小颗粒迁移至 20~30 cm 土层形成较黏重的黏土层,不利于水分入渗,有效降低  $K_s$  值。对于洼地,其非毛管孔隙可能在一定范围内随着体积质量增加而较多,使得土壤导水能力增强,因此, $K_s$  值较大。此外,洼地  $K_s$  与有机碳间较低的相关系数主要是因为有机碳对  $K_s$  的直接通径系数与其通过其他因素对  $K_s$  影响的总间接通径系数相反所致(表 4)。喀斯特坡地和洼地  $K_s$  及其影响因素表现出不同的分布特征,决定其水文过程的不同。考虑到景观位置对  $K_s$  及其影响因素相关关系的影响,利用多元逐步回归模型,分别建立不同景观位置  $K_s$  的回归方程。坡地和洼地主要影响因素对  $K_s$  预测的方差贡献率分别为 76.20%和 32.61%,预测效果优于同时考虑整个坡-洼系统。

## 4 结论

1)喀斯特峰丛洼地小流域  $K_s$  呈中等程度变异,景观位置和土层对  $K_s$  分布有显著的影响( $p < 0.05$ ),景观位置的影响主要体现在 0~10、20~30 cm 土层,土层的影响主要发生在坡地,而土地利用的影响不显著( $p > 0.05$ )。

2)景观位置对土壤颗粒组成和全磷影响不明显( $p > 0.05$ ),而有机碳、全氮和体积质量则随景观位置

不同发生显著变化( $p < 0.05$ )。

3)坡地  $K_s$  与粉粒、砂粒、有机碳和全磷呈显著正相关( $p < 0.05$ ),与黏粒和体积质量呈显著负相关( $p < 0.05$ );洼地  $K_s$  则仅与体积质量存在显著正相关( $p < 0.05$ )。体积质量和有机碳是影响坡地和洼地  $K_s$  的主要因素。

4)利用多元逐步线性回归模型分别建立坡地和洼地  $K_s$  的回归方程,回归方程都具有较好地预测效果,其预测因子的方差解释率分别为 76.2%和 32.6%。

### 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 Y Q, SHAO M A, LIU Z P, et al. Regional-scale variation and distribution patterns of soil saturated hydraulic conductivities in surface and subsurface layers in the loessial soils of China[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 487: 13-23.
- [3] JARVIS N, KOESTEL J, MESSING I, et al. Influence of soil, land use and climatic factors on the hydraulic conductivity of soil[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2013, 17(12): 5185-5195.
- [4] 许振欣,邓羽松,林立文,等.南亚热带典型人工林土壤饱和导水率特征及其影响因素研究[J]. *北京林业大学学报*, 2021, 43(4): 100-107.  
XU Z X, DENG Y S, LIN L W, et al. Characteristics of soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical plantations in South Subtropical Zone[J]. *Journal of Beijing Forestry University*, 2021, 43(4): 100-107.
- [5] 张益,林毅雁,贾国栋,等.北京山区典型植被类型土壤饱和导水率及其影响因素[J]. *水土保持学报*, 2022, 36(6): 171-178.  
ZHANG Y, LIN Y Y, JIA G D, et al. Soil saturated hydraulic conductivity and its influencing factors of typical vegetation types in Beijing mountainous area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2022, 36(6): 171-178.
- [6] 毛娜,黄来明,邵明安.黄土区坡面尺度不同植被类型土壤饱和导水率剖面分布及影响因素[J]. *土壤*, 2019, 51(2): 381-389.  
MAO N, HUANG L M, SHAO M A. Profile distribution of soil saturated hydraulic conductivity and controlling factors under different vegetations on slope in loess region[J]. *Soils*, 2019, 51(2): 381-389.
- [7] 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.  
YANG Z, HUANG X, SHE D L. Spatial distribution characteristics and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity in the Loess Hilly Region of Northwestern Shanxi [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(6): 178-184.

- [8] CHEN H S, LIU J W, WANG K L, et al. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J].*Catena*,2011,84(1/2):21-28.
- [9] 付同刚,陈洪松,王克林.喀斯特小流域土壤饱和和导水率垂直分布特征[J].*土壤学报*,2015,52(3):538-546.  
FU T G, CHEN H S, WANG K L. Vertical distribution of soil saturated hydraulic conductivity in a small karst catchment[J].*Acta Pedologica Sinica*,2015,52(3):538-546.
- [10] 蔡路路,刘子琦,李渊,等.喀斯特地区不同土地利用方式对土壤饱和和导水率的影响[J].*水土保持研究*,2020,27(1):119-125.  
CAI L L, LIU Z Q, LI Y, et al. Effect of different land use types on soil saturated hydraulic conductivity in karst areas[J].*Research of Soil and Water Conservation*, 2020,27(1):119-125.
- [11] 孟凡德,彭韬,王世杰,等.石灰岩与白云岩坡地土壤饱和和导水率对比研究[J].*水土保持通报*,2015,35(1):85-89.  
MENG F D, PENG T, WANG S J, et al. Comparative study on saturated hydraulic conductivity of limestone and dolomite slope [J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*,2015,35(1):85-89.
- [12] LI X Z, XU X L, WANG K L, et al. Estimation of root zone soil moisture at point scale based on soil water measurements from cosmic-ray neutron sensing in a karst catchment [J]. *Agricultural Water Management*, 2023,289:e108511.
- [13] 张一璇,史常青,杨浩,等.永定河流域官厅水库南岸典型林分土壤饱和和导水率研究[J].*生态学报*,2019,39(18):6681-6689.  
ZHANG Y X, SHI C Q, YANG H, et al. Saturated hydraulic conductivity of soils of typical forests of the south coast of Guanting Reservoir in Yongding River Watershed[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2019, 39 (18): 6681-6689.
- [14] 赵文举,李晓萍,范严伟,等.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*,2015,31(17):144-151.  
ZHAO W J, LI X P, FAN Y W, et al. 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*,2015,31(17):144-151.
- [15] 王维维,柴晓虹,帕力夏提·格明,等.宁夏云雾山封育草地的土壤斥水性及影响因素研究[J].*草地学报*,2023,31(7):2068-2076.  
WANG W W, CHAI X H, PALIXIATI G M, et al. Soil water repellency and its influencing factors in the enclosed grasslands in Yunwu Mountain in Ningxia[J]. *Acta Agrestia Sinica*,2023,31(7):2068-2076.
- [16] YAN Y J, DAI Q H, JIN L, et al. Geometric morphology and soil properties of shallow karst fissures in an area of Karst rocky desertification in SW China [J]. *Catena*, 2019,174:48-58.
- [17] FU Z Y, CHEN H S, XU Q X, et al. Role of epikarst in near-surface hydrological processes in a soil mantled subtropical dolomite karst slope: Implications of field rainfall simulation experiments[J].*Hydrological Processes*,2016,30(5):795-811.
- [18] 赵亚丽,王云强,张兴昌.黄土高原生态工程区土壤体积质量及饱和和导水率的分布特征[J].*农业工程学报*,2020,36(10):83-89.  
ZHAO Y L, WANG Y Q, ZHANG X C. Distribution characteristics of bulk density and saturated hydraulic conductivity in intensive land restoration project areas on the Loess Plateau[J].*Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*,2020,36(19):83-89.
- [19] 丁贵惠,任忠政,胡伟,等.侵蚀性降雨对黑土坡耕地土壤侵蚀特征的影响[J].*水土保持学报*,2024,38(2):47-56.  
DING G H, REN Z Z, HU W, et al. Effects of erosive rainfall on soil erosion characteristics of black sloping farmland[J].*Journal of Soil and Water Conservation*, 2024,38(2):47-56.
- [20] 李焱秋,戴全厚,任青青,等.喀斯特浅层裂隙土壤垂向渗透性及影响因素[J].*水土保持学报*,2020,34(3):150-155.  
LI Y Q, DAI Q H, REN Q Q, et al. Vertical permeability of karst shallow fissure and its influencing factors [J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34 (3):150-155.
- [21] 文晶,王一博,高泽永,等.北麓河流域多年冻土区退化草甸的土壤水文特征分析[J].*冰川冻土*,2013,35(4):929-937.  
WEN J, WANG Y B, GAO Z Y, et al. Soil hydrological characteristics of the degrading meadow in permafrost regions in the beiluhe river basin [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*,2013,35(4):929-937.
- [22] LADO M, PAZ A, BEN-HUR M. Organic matter and aggregate-size interactions in saturated hydraulic conductivity [J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2004,68(1):234-242.
- [23] 王紫薇,邵明安,黄来明,等.青海省东部不同土地利用方式下土壤饱和和导水率分布及其影响因素[J].*水土保持学报*,2021,35(3):150-155.  
WANG Z W, SHAO M A, HUANG L M, et al. Distribution and influencing factors of soil saturated hydraulic conductivity under different land use patterns in Eastern Qinghai Province[J].*Journal of Soil and Water Conservation*,2021,35(3):150-155.
- [24] ZHAO P P, SHAO M A, WANG T J. Spatial distributions of soil surface-layer saturated hydraulic conductivity and controlling factors of dam farmlands [J]. *Water Resources Management*,2010,24(10):2247-2260.