

DOI: 10.11766/trxb202002200059

李荣磊, 陈留美, 邵明安, 黄来明, 裴艳武, 张应龙. 黄土高原不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征及影响因素[J]. 土壤学报, 2021, 58(5): 1190–1201.

LI Ronglei, CHEN Liumei, SHAO Ming'an, HUANG Laiming, PEI Yanwu, ZHANG Yinglong. Cl^- Transport and Its Influencing Factors in Soil as Affected by Soil Texture and Vegetation Cover in Loess Plateau [J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(5): 1190–1201.

黄土高原不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征及影响因素*

李荣磊^{1, 2}, 陈留美³, 邵明安^{1, 4†}, 黄来明^{2, 5†}, 裴艳武^{1, 2}, 张应龙⁶

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 陕西杨凌 712100; 2. 中国科学院地理科学与资源研究所生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101; 3. 遵义师范学院资源与环境学院, 贵州遵义 563006; 4. 中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室, 陕西杨凌 712100; 5. 中国科学院大学资源与环境学院, 北京 100049; 6. 陕西省神木县生态协会, 陕西神木 719399)

摘要: 为确定不同土质和植被类型下溶质运移特征及影响因素, 采用垂直土柱易混置换法, 研究了陕北六道沟和圪丑沟流域不同土质(砂土 S、壤土 L)和植被类型(乔 AR、灌 SH、草 GR)下 Cl^- 运移特征。结果表明: Cl^- 初始穿透时间(TS: 12~80 min)、完全穿透时间(TE: 75~480 min)、平均孔隙水流速(V : 0.52~1.98 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)和水动力弥散系数(D : 0.75~2.55 $\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)均随土壤质地、植被类型和土层深度而发生变化。0~20 cm 土层 Cl^- 的 TS 和 TE 最小, 随深度增加而增大, V 和 D 则相反。同一质地不同植被类型条件下 0~1 m 剖面中 Cl^- 的 V 和 D 均值表现为: S-AR > S-GR > S-SH 和 L-AR > L-SH > L-GR, TS 和 TE 则相反, 这是由于砂土和壤土中不同类型植物根系生物量剖面分布具有显著差异, 进而影响大孔隙数量、孔隙连通性密度和优先流路径。同一植被类型不同质地土壤 0~1 m 剖面中 Cl^- 的 V 和 D 均值表现为: S-AR > L-AR; S-SH > L-SH; S-GR > L-GR, TS 和 TE 则相反, 这是由于土壤机械组成影响孔隙分布状况, 砂土中大孔隙数量多且孔隙连通性密度高, 有助于形成优先流, 而壤土中细小孔隙所构成的复杂孔径及带电团聚体对离子的吸附作用会阻碍 Cl^- 运移。容重、大孔隙数、孔隙连通性密度、有机碳含量和颗粒组成均与 V , TS 和 TE 显著相关, 表明土壤性质显著影响不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征。上述结果可为黄土高原不同质地土壤人工植被合理布局与配置, 降低养分流失风险, 提升生态系统服务功能提供参考。

关键词: Cl^- ; 穿透曲线; 溶质运移; 植被类型; 土壤质地

中图分类号: S152.3, S152.5 **文献标志码:** A

Cl^- Transport and Its Influencing Factors in Soil as Affected by Soil Texture and Vegetation Cover in Loess Plateau

LI Ronglei^{1, 2}, CHEN Liumei³, SHAO Ming'an^{1, 4†}, HUANG Laiming^{2, 5†}, PEI Yanwu^{1, 2}, ZHANG Yinglong⁶

(1. College of Natural Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 2. Key Laboratory of

* 国家自然科学基金项目(41601221)、贵州省科技合作计划项目(黔科合 LH 字[2017]7068 号)和中国科学院水利部水土保持研究所黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室项目(A314021402-2010)资助 Supported by the National Natural Science Foundation of China (No.41601221), Science and technology cooperation project of Guizhou Province (No.Qian Ke He LH[2017]7068) and Scientific Research Program from State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, CAS & MWR (No.A314021402-2010).

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: shaoma@igsnr.ac.cn; huanglm@igsnr.ac.cn

作者简介: 李荣磊(1995—), 男, 山西大同人, 硕士研究生, 主要从事土壤物理研究。 E-mail: rongleil@163.com

收稿日期: 2020-02-20; 收到修改稿日期: 2020-05-05; 网络首发日期(www.cnki.net): 2020-08-03

Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. College of Resources and Environment, Zunyi Normal University, Zunyi, Guizhou 563006, China; 4. State Key Laboratory of Soil Erosion and Dryland Farming on the Loess Plateau, Institute of Soil and Water Conservation, Chinese Academy of Sciences, Yangling, Shaanxi 712100, China; 5. College of Resources and Environment, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China; 6. Shenmu Ecological Association, Shenmu, Shaanxi 719399, China)

Abstract: 【Objective】 To evaluate nutrient cycling and pollutant migration in the Earth's Critical Zone, it is essential to understand solute transport in soils. Despite extensive studies on processes and mechanisms of solute transport, little is known about how to characterize and regulate solute transport in soils different in soil texture and vegetation cover. This study is oriented to investigate Cl^- transport parameters and their influencing factors in typical sandy and loamy soils different in vegetation cover in the Liudaogou and Gechougou watersheds in the northern part of the Loess Plateau. 【Method】 Six undisturbed soil columns (7 cm in diameter and 25 cm in height) different in texture (sandy and loamy, abbreviated as S and L, respectively) and in vegetation cover (arbor, shrub and grass, abbreviated as AR, SH and GR, respectively) were collected by hand to keep it as intact as possible in the Liudaogou and Gechougou watersheds located in Shenmu City, Shaanxi Province. With these columns, an indoor experiment was carried out to determine Cl^- penetration curve in each soil column and experiment data were simulated with the convection-dispersion equation. Cl^- transport parameters, including time the penetration begins (TS), time the penetration ends (TE), average pore-water velocity (V) and hydrodynamic dispersion coefficient (D), were obtained with the aid of the CXFIT software. Relationships between soil properties and Cl^- transport parameters were analyzed with Pearson's test. 【Result】 Results show that TS, TE, V and D of Cl^- all varied with soil texture, vegetation type and soil depth in the range of 12–80 min, 75–480 min, 0.52–1.98 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$ and 0.75–2.55 $\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$, respectively. TS and TE was the lowest in the 0–20 cm soil layer and increased with increasing soil depth, while V and D both exhibited a reverse pattern. Mean V and D in 0–1 m soil profiles the same in texture varied with vegetation cover, showing a decreasing order of S-AR > S-GR > S-SH and L-AR > L-SH > L-GR, while mean TS and TE did too, but showing opposite trends, which could be attributed to the differences caused by different vegetation covers in root biomass distribution in 0–1 m soil profiles either sandy or loamy in texture, which in turn affected the number of macro-pores, connectivity density and preferential flow pathway. On the other hand, mean V and D in 0–1 m soil profiles the same in vegetation cover varied with soil texture, showing orders of S-AR > L-AR; S-SH > L-SH and S-GR > L-GR, while mean TS and TE did too, but showing reverse patterns, which could be ascribed to the difference in soil mechanical composition that significantly affected the size and distribution of soil pores. Sandy soil was higher in number of macro-pores and more homogeneous in pore distribution, which was conducive to formation of preferential flow in soil profiles. In contrast, loamy soil was more complex in porosity formed of micro-pores and higher in adsorption force and capacity that inhibited Cl^- transport. Soil bulk density, number of macro-pores, connectivity density, and contents of organic carbon, sand, silt and clay were all significantly related to V , TS and TE, indicating that soil properties were major factors affecting Cl^- transport in soils, even though different in soil texture and in vegetation cover. 【Conclusion】 All the findings in this study may serve as references for rational vegetation distribution in soils different in texture in the Loess Plateau region to reduce soil nutrient loss and improve service functions of the ecosystem.

Key words: Cl^- ; Penetration curve; Solute transport; Vegetation type; Soil texture

溶质在多孔介质中的运移既受物理化学过程的影响, 又受生物活动和人为管理措施的影响^[1]。研究溶质在土壤中的运移过程、规律和机理对于理解地球关键带养分循环和污染物迁移具有重要意义^[2]。国内外学者对土壤中溶质运移进行了大量研究, 建立了不同空间尺度下土壤溶质运移模型^[3], 揭示了溶质

在均质和非均质土壤中运移过程的差异及其影响因素^[4], 阐明了不同流速和孔隙状况下溶质运移变化机理与调控策略^[5]。此外, 李保国等^[1]系统综述了溶质运移模型在盐碱土改良、土壤养分管理、非点源污染评价等方面的应用。土壤中溶质迁移受土壤物理性质(容重、质地、结构、水分含量)、溶质类型、

降水特征、生物活动、地形以及土地利用等诸多因素的影响。准确估算溶质运移参数是研究可溶性物质在多孔介质中迁移转化规律的前提,是评价和预测养分与污染物时空分布的基础。近年来穿透曲线法、边界层法和截距法被广泛用于求解对流—弥散方程(CDE)参数,为定量研究农用化学物、养分离子或污染物在土壤中的迁移和转化提供了重要手段。

黄土高原北部晋、陕、蒙接壤区是典型的水蚀风蚀交错带和生态脆弱区。自1999年退耕还林(草)工程实施以来,该区植被盖度显著增加,土壤侵蚀和荒漠化得到有效控制。研究表明,植被恢复与生态重建过程对土壤性质演化、水循环以及溶质运移都具有重要影响,并且这些不同过程之间存在交互作用。例如,李志明等^[6]发现土壤容重变化影响土壤孔隙状况,从而改变土壤水分入渗规律和溶质运移特征。沈紫燕等^[7]研究指出随着前期土壤含水量的增加,初始产流时间提早,径流中溴离子和磷流失量也随之增大。以往对土壤溶质运移的研究主要集中在以下三个方面:(1)土壤性质变化对土壤溶质运移的影响;(2)溶质运移模型的应用与模型参数估算方法;(3)养分和污染物在土壤中的富集与流失规律及其影响因素。然而,关于区域不同土质和植被类型下土壤性质差异如何影响溶质运移参数与运移特征目前尚不清楚,这将限制区域养分循环模型和污染物迁移模型的精度和发展。本文利用通量浓度穿透曲线(PTC)估算土壤溶质运移参数的方法,对陕北神木六道沟小流域与圪丑沟小流域不同土质(砂土和壤土)和植被类型下(乔、灌、草)土壤溶质运移进行了研究,探讨了影响土壤溶质运移的主要因素,以期为该区域不同质地土壤人工植被合理布局提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区域概况

研究区位于陕西省神木市六道沟小流域(38°46′–38°51′N, 110°21′–110°23′E)和圪丑沟小流域(38°53′–38°57′N, 109°22′–109°27′E),地处黄土高原与毛乌素沙地过渡地带,属水蚀风蚀交错带和典型生态脆弱区。该区气候为温带半干旱大陆性季风气候,多年平均降雨量小于450 mm。六道沟小流域位于陕西省神木市以西约14 km处,平均海拔高

度为1178 m。年均气温8.4℃,年降雨量442 mm,主要分布在7—9月份,约占全年降雨量的70%~80%。流域地貌类型为片沙覆盖的黄土丘陵,土壤类型主要划分为钙积正常干旱土和筒育正常干旱土。自大规模退耕还林(草)工程实施以来,流域内植被以人工林草植被为主,主要植被类型包括杏树(*Prunus armeniaca* L)、长茅草(*Imperata cylindrica*)、柠条(*Caragana Korshinskii* Kom)、苜蓿(*Tribulus terrestris* L)等^[8]。

圪丑沟小流域位于神木市锦界镇西南约23 km处,平均海拔高度为1265 m。年均气温9.1℃,年降水量420 mm,主要集中在7—9月,约占全年降雨量的60%~75%。该区域地形起伏较小,沙丘呈带状分布,多以低矮沙丘为主。土壤类型主要为干旱砂质新成土。区域内植被主要以次生人工林草为主,包括沙柳(*Salix psammophila*)、紫穗槐(*Amorpha fruticosa* Linn)、长柄扁桃(*Amygdalus pedunculata* Pall)、沙蒿(*Artemisia dosterorum* Spreng)、狗尾草(*Setaria viridis*)和芒草(*Stipa bungeana*)等^[9]。

1.2 样品采集与分析

选取六道沟和圪丑沟流域内典型的乔木林地、灌木林地和草地,分别挖掘1.2 m深土壤剖面。六道沟小流域壤土样地不同植被分别为杏树、柠条和长茅草,样地编号分别记为L-AR、L-SH和L-GR。圪丑沟小流域砂土样地不同植被分别为樟子松、沙柳和沙蒿,样地编号分别记为S-AR、S-GR和S-SH。在野外对土壤剖面进行分层描述后,用有机玻璃柱(H=25 cm, D=7 cm)采集原状土柱,采样间隔为20 cm,采样时每个有机玻璃柱上端空出5 cm。由于六道沟小流域1 m以下土壤出现大量碳酸钙结核,无法采集原状土柱,因此,所有剖面原状土柱的采集深度均统一为1 m深,每个剖面采集5个原状土柱,用于CT扫描和溶质运移试验。此外,用环刀和布袋分别采集原状土和扰动土,1 m以内采样间隔为10 cm,1 m以下采样间隔为20 cm,用于基本理化性质分析。在乔木、灌木、草地样地中分别选取10 m×10 m、5 m×5 m、2 m×2 m的样方,同时每个样地随机设置3个重复样方,对样方内植物地上部生长状况进行调查。植物根系采用根钻(D=9 cm, H=10 cm)法进行采集,采用同心圆法对距离基茎5 cm、50 cm和100 cm处的植物根系分布进行采样调查。每个样地选择3棵长势一致的植

物, 每棵植物选择 3 个不同方向进行根系采集, 采样深度间隔 10 cm, 直到多次取样 (>3 次) 土壤中没有发现根系为止。将环刀放置于烘箱中, 105 °C 下烘至恒重, 测定土壤容重 (BD) 和质量含水量 (SWC)。扰动土壤样品带回实验室自然风干, 挑去枯枝落叶、根系和砾石, 磨碎后分别过 2 mm、1 mm 和 0.25 mm 筛备用。土壤有机碳 (SOC) 用重铬酸钾氧化法, 全磷 (TP) 用 NaOH 熔融—钼锑抗比色法, 土壤颗粒组成采用 MS2000 激光粒度仪测定, 并根据国际质地分类划分黏粒 (<0.002 mm)、粉粒 (0.02~0.002 mm) 和砂粒 (2~0.02 mm)。采用飞利浦 MX16 型 CT 扫描仪对原状土柱进行扫描, 仪器参数设置为 140 kV、200 mAs 和 21.4 s, 以获得 1 mm 的详细低噪声投影, X 射线束宽度或切片厚度为 1 mm。原状土柱的孔隙参数提取过程在 Image J (1.48 版本) 软件中进行。以圆形选择工具用来选取图片的目标区域, 然后删除目标区域外的部分以消除有机玻璃柱壁对周围土体的影响并减小硬化射束的干扰。有机玻璃柱内不同密度的物质在图片中呈现出不同的灰度值。本研究设定灰度阈值对土壤中不同密度的物质进行分离。灰度值小于 40 的部位被视为土壤孔隙, 大于 40 的属于非孔隙部分, 如土壤基质, 石粒, 活根等, 需要根据具体的扫描图像的灰度进行判断。由于 CT 分辨率的限制, ImageJ 分析的孔隙均被划分为大孔隙。采用 SPSS 18.0 统计软件进行数据分析, 采用 Origin 9 制图软件绘图。

1.3 CDE 模型理论基础

出流液的相对浓度随孔隙体积的变化曲线称为穿透曲线 (PTC), PTC 的形状可以反映溶质与土壤间的相互作用, 也能直观表示溶质在运移过程中的浓度变化。采用 CDE 模型对不同土质和植被类型下 PTC 进行拟合, 运用 CXTFIT 程序求解溶质运移参数。溶质运移分析基于简化的对流弥散方程 (CDE):

$$R \frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} - V \frac{\partial C}{\partial x} \quad (1)$$

PTC 可以定量描绘出流液溶质相对浓度 (C/C_0) 与相对时间的关系, 其中 C_0 为入流液溶质的浓度, C 为出流液溶质浓度, L 为土柱长度, R 为阻滞因子, t 为流动时间, V 为平均孔隙水流速, x 为流动距离,

D 为水动力弥散系数。弥散性 (λ) 和沛克莱数 (Pe) 通过 D 、 V 和 L 计算获得:

$$\lambda = \frac{D}{V} \quad (2)$$

$$Pe = \frac{LV}{D} = \frac{1}{\lambda} \quad (3)$$

CXTFIT 是美国盐土实验室研制的用于研究一维土壤溶质运移的计算机软件。CXTFIT 基于 Levenberg-Marquardt 算法, 采用非线性最小二乘法的函数优化方法, 对溶质混合置换试验所得到的 PTC 进行拟合, 求解模型参数, 预测土壤中溶质随时间和空间的浓度分布规律。由于氯离子化学性质不活泼且为负价, 所以本试验以 CaCl_2 为供试液, 通过垂直土柱易混置换法对不同土质 (砂土和壤土) 和植被类型下 (乔、灌、草) 原状土柱进行试验。

1.4 溶质运移试验方法

在室内利用的有机玻璃柱 ($H=25$ cm, $D=7$ cm) 进行溶质运移试验。土柱上部为供水口, 下部为多孔玻璃构成的溶液淋出口。试验时于注水口处放置滤纸以防注水破坏上部土体结构, 同时在下部多孔玻璃上方添加薄纱布防止土粒漏出。采用马氏瓶供水维持水头恒定 (水头控制在 3 cm), 使用蒸馏水使土柱完全饱和且出流液流速稳定后输入 $0.5 \text{ mol}\cdot\text{L}^{-1}$ 的 CaCl_2 供试液。实验开始计时以 25 mL 容量瓶收集出流液, 记录出流液体积, 采用硝酸银滴定法测定出流液中 Cl^- 浓度, 并根据试验数据进行方程拟合和计算溶质运移参数。 Cl^- 的初始穿透时间和完全穿透时间分别记为 TS 和 TE。

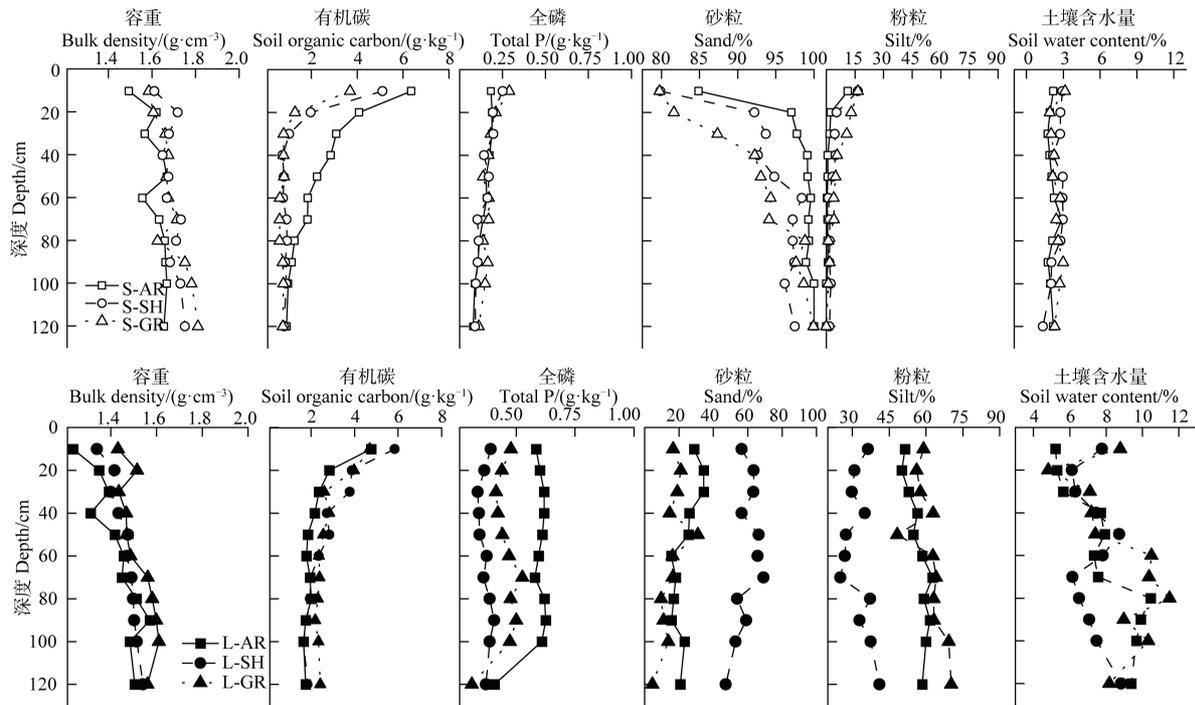
2 结 果

2.1 土壤基本理化性质

图 1 表示研究区不同土质和植被类型样地 BD、SWC、SOC、TP 和颗粒含量随深度的变化特征。不同样地 BD 均随深度增加呈增加趋势 (图 1), BD 剖面变异系数 (2.5%~6.9%) 均小于 10%, 属于弱变异。不同样地表层 BD 较低主要是由于表层植物根系和动物活动较下层更加频繁, 从而增加表层土壤孔隙度^[10]。深层土壤中砂粒含量增加, 砂粒 BD

大于一般土壤细颗粒,同时由于土壤的重力压实作用也会增加下层 BD^[11]。砂土不同植被类型样地 (S-AR、S-SH 和 S-GR) SWC 变化范围分别为 1.34%~3.13% (图 1),与毛乌素沙地东南边缘沙地 SWC (0.50%~3.50%)^[12]接近。壤土不同植被类型样地 (L-AR、L-SH 和 L-GR) SWC 显著高于砂土样地,变化范围分别为 4.84%~11.49% (图 1),与刘志鹏和邵明安^[13]在黄土高原六道沟小流域测定的 SWC (6.64%~10.92%)接近。不同样地 SOC 含量在 0~40 cm 土层内均随深度增加而显著降低,40 cm 土层以下基本趋于稳定 (图 1)。表层 SOC 含量较高主要归因于地表枯落物、根系分泌物和微生物生物量

的输入^[14]。研究区不同土质和植被类型下 SOC 含量 (0.61~6.35 g·kg⁻¹)与纸坊沟小流域 SOC 含量 (1.9~6.7 g·kg⁻¹)^[15]接近,但显著低于黄土高原东南部半湿润地区 SOC 含量 (4.82~11.9 g·kg⁻¹)^[16]。不同样地 TP 平均含量范围为 0.14~0.59 g·kg⁻¹,与黄土高原区域不同土地利用类型下 (林地、草地、农地) TP 含量 (0.53~0.61 g·kg⁻¹)^[17]接近。砂土不同植被类型样地 (S-AR、S-SH 和 S-GR) 颗粒组成以砂粒为主,占 93.1%~97.9%。壤土不同植被类型样地 (L-AR、L-SH 和 L-GR) 颗粒组成以粉粒和砂粒为主,占 77.32%~92.17%。不同样地粉粒和砂粒含量剖面变异均较小,剖面变异系数变化范围为 4%~16%。



注:图中 S 和 L 分别代表砂土和壤土;AR、SH 和 GR 分别代表乔木、灌木和草本。下同。Note: S and L in the figure stands for sandy and loamy soil; and AR, SH and GR for arbor, shrub and grass, respectively. The same as below.

图 1 不同土质和植被类型样地土壤容重、有机碳、全磷、砂粒和粉粒含量随土壤深度变化特征

Fig. 1 Variation of soil bulk density, organic carbon, total phosphorus, sand and silt contents in soils with soil depth relative to soil texture and vegetation cover

表 1 为不同土质和植被类型样地土壤大孔隙数、大孔隙面积比和连通性密度剖面分布特征。不同样地土壤大孔隙数及大孔隙面积比均随深度增加呈降低趋势 (表 1)。土壤表层是植物根系和生物活动密集区,根系穿插挤压和生物挖掘作用会形成较大孔隙^[18]。砂土不同植被类型样地 (S-AR、S-SH 和 S-GR) 土壤大孔隙数均值分别为 18、13 和 14 个,

略高于壤土不同植被类型样地 (L-AR、L-SH 和 L-GR) 土壤大孔隙数均值 (15、12 和 6 个)。土壤大孔隙面积比表现出与大孔隙数一致的变化趋势。较粗的土壤质地代表较为良好的土壤孔隙状况。砂土样地 0~40 cm 土壤大孔隙数及大孔隙面积比表现为 S-AR > S-GR > S-SH, 40 cm 以下表现为 S-AR > S-SH > S-GR, 而壤土样地不同深度土壤大孔隙数

表 1 不同土质和植被类型样地土壤大孔隙数、大孔隙面积比及连通性密度的变化特征

Table 1 Number, ratio in area and connectivity density of macro-pores in soil relative to texture and vegetation cover

孔隙指标 Pore parameter	土柱深度 Depth/cm	S-AR	S-SH	S-GR	L-AR	L-SH	L-GR
大孔隙数/个 Number of macropore/Pc	0~20	28	19	24	22	18	12
	20~40	22	13	19	17	12	7
	40~60	16	15	11	12	10	4
	60~80	10	7	9	15	14	5
	80~100	14	11	8	8	5	2
大孔隙面积比 Ratio in area of macroporos	0~20	5.7	3.9	4.9	4.5	3.7	2.4
	20~40	4.5	2.6	3.9	3.5	2.4	1.4
	40~60	3.3	3.1	2.2	2.4	2.0	0.8
	60~80	2.4	1.4	1.8	3.1	2.9	1.0
	80~100	2.9	2.2	1.6	1.6	1.0	0.4
连通性密度 Connectivity density/cm ⁻³	0~20	5.01	3.06	3.57	2.58	1.68	0.37
	20~40	4.32	1.73	2.12	1.39	0.88	0.12
	40~60	2.18	1.62	0.88	1.00	0.21	0.09
	60~80	1.04	0.77	0.27	0.71	0.27	0.13
	80~100	1.39	0.93	0.37	0.32	0.09	0.06

及大孔隙面积比均表现为 $L-AR > L-SH > L-GR$ 。李宗超和胡霞^[19]研究表明,由于植被根系分布的差异,灌丛下土壤孔隙度远高于草地。本研究中砂土样地 S-GR 0~40 cm 土壤大孔隙数却高于 S-SH (表 1),这可能与表层 SWC 含量较低(图 1),限制了灌木根系发育有关。土壤大孔隙数及大孔隙面积比属于土壤孔隙二维指标,仅反映了土壤中孔隙的数量及大小,因此采用土壤孔隙三维指标连通性密度更能准确地体现土壤孔隙状况。不同样地(S-AR、S-SH、S-GR、L-AR、L-SH 和 L-GR)孔隙连通性密度随深度的变化趋势与大孔隙数一致,且砂土不同植被类型样地(S-AR、S-SH 和 S-GR)孔隙连通性密度高于壤土样地(L-AR、L-SH 和 L-GR)。砂土样地土壤孔隙连通性密度表现为 $S-AR > S-GR > S-SH$,壤土样地孔隙连通性密度表现为 $L-AR > L-SH > L-GR$ 。土壤孔隙状况很大程度受植被种类的影响,植物根系及土壤生物对土壤结构的改善具有促进作用,良好的孔隙连通性能够提高土壤水分入渗能力减少地表径流^[20]。

2.2 不同土质和植被类型样地 Cl^- 穿透曲线

图 2 为不同土质和植被类型样地 0~20、20~

40、40~60、60~80 和 80~100 cm 原状土柱 Cl^- 的 PTC、TS 和 TE 变化情况。不同样地表层土壤中(0~20 cm) Cl^- 的 TS 和 TE 最小,随深度增加呈现增大趋势(图 2),表明溶质在表层土壤中迁移过程受到的阻力较小,这主要取决于表层良好的孔隙状况(表 1)。同一植被类型下壤土样地不同深度土层 Cl^- 的 TS 和 TE 均高于砂土样地($L-AR > S-AR$; $L-SH > S-SH$; $L-GR > S-GR$),这是由于土壤机械组成决定了其孔隙分布状况。砂土样地质地均匀,以粗颗粒砂粒为主(图 1),大孔隙多且孔隙连通性密度好(表 1),有助于形成优先流,溶质在运移过程中受到更小的阻滞效应,TS 和 TE 较短^[21]。壤土样地的粉粒和黏粒含量均高于砂土样地(图 1),带电团聚体对离子的吸附作用及土壤内部结构的细小孔隙所构成的复杂孔径会阻碍溶质运移,因此 TS 和 TE 较高。从图 2 可以看出,同一质地不同植被类型下 Cl^- 的 PTC 的形状、TS 和 TE 均不同。砂土样地 0~40 cm 土层 Cl^- 的 TS 和 TE 表现为样地 $S-AR < S-GR < S-SH$,40 cm 以下表现为样地 $S-AR < S-SH < S-GR$,而壤土样地 Cl^- 的 TS 和 TE 在不同深度土层均表现为样地 $L-AR < L-SH < L-GR$,这主要与不同类型植

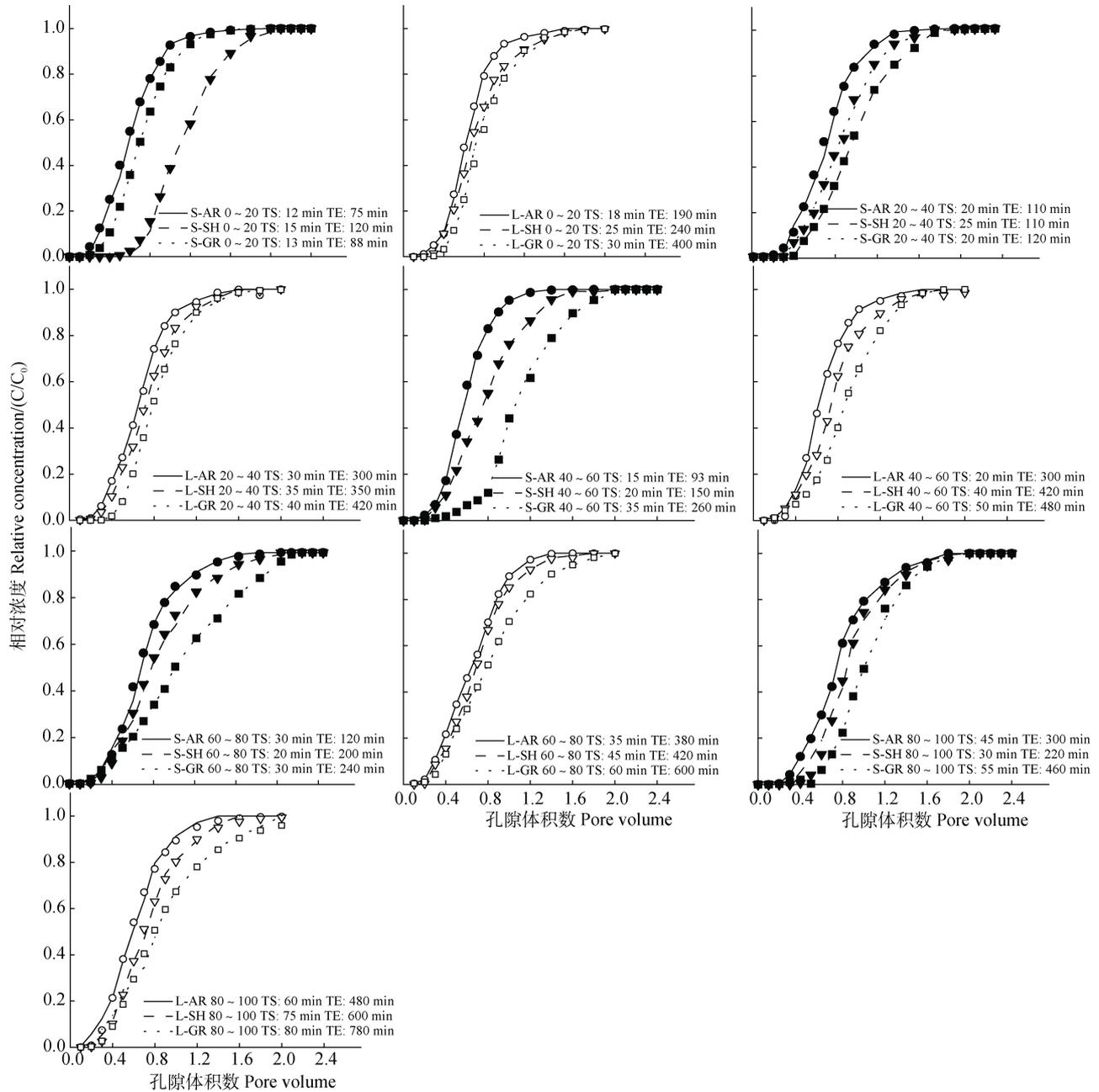


图2 不同土质和植被类型样地 Cl^- 的穿透曲线 (PTC)、初始穿透时间 (TS) 和完全穿透时间 (TE)

Fig. 2 Cl^- penetration curve (PTC), initial penetration time (TS) and entirely penetration time (TE) in soil relative to texture and vegetation cover

被的根系分布特征有关。由根钻法获得的砂土样地 0~40 cm 土层根系生物量表现为 S-AR ($277.4 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-GR ($131.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-SH ($112.6 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$), 而 40 cm 以下土层根系生物量表现为 S-AR ($84.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-SH ($77.2 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-GR ($40.1 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$)。壤土样地不同深度土层植物根系生物量均表现为样地 L-AR > L-SH > L-GR, 0~100 cm 剖面 (L-AR、L-SH 和 L-GR) 根系总生物量分别

为 422.5 , 370.2 和 $196.5 \text{ g}\cdot\text{m}^{-2}$ 。根系的机械穿透作用对于土壤孔隙数量和孔隙连通性密度具有显著影响。不同质地土壤乔木根系粗壮, 分布范围广, 根系穿透与挤压作用产生的大孔隙数量多且孔隙连通性良好 (表 1), 因此 Cl^- 的 TS 和 TE 相对较短, PTC 的峰值向左偏移 (图 2)。砂土样地 0~40 cm 土层草地根系生物量却高于灌木林地, 这可能是由于砂土表层 SWC 较低, 限制了高生物量的灌木根系

的发育。不同土质和植被类型样地的 PTC 均呈现出逐渐平缓的趋势,表明溶质在土柱中的迁移扩散程度不断降低^[22]。

2.3 不同土质和植被类型样地 Cl^- 运移参数

利用 CXTFIT 软件对 Cl^- 的 PTC 进行拟合,所得到的溶质运移参数能够量化和反映溶质运移过程及其变化特征。表 2 为不同土质和植被类型样地 (S-AR、S-SH、S-GR、L-AR、L-SH 和 L-GR) Cl^- 运移参数 (拟合曲线所得到的 SSQ (残差平方和) 值介于 0.0002~0.0063, R^2 (决定系数) 介于 0.93~0.99 之间)。从表 2 可以看出,不同植被类型下土壤溶质 V 不同,这与陈晓冰等^[23]在紫色砂岩区的研究结果一致。陈晓冰等^[23]指出不同类型植物根系分布不同,从而导致土壤结构和孔隙状况具有差异,因此不同类型植被下土壤优先路径数量和发育程度均不同 (表现为针阔混交林 > 竹林 > 草地)。然而,不同类型植物根系的生长发育受土壤质地、养分状况和 SWC 的综合影响,因此,本研究中砂土和壤土不同植被类型样地 V 变化规律并不完全一致 (表 2)。

同一植被类型下砂土样地中 Cl^- 运移的 V 均高于壤土样地 (S-AR > L-AR; S-SH > L-SH; S-GR > L-GR),这是由于砂土质地较壤土粗 (图 1),大孔隙数量及孔隙连通性密度高于壤土 (表 1),因而溶质运移受到的阻力较小。刘庆玲和徐绍辉^[24]通过研究不同质地土壤中溶质运移过程,同样发现砂土中溶质 V 高于壤土。 D 是综合表征溶质和土壤特性的参数,它既与多孔介质和溶质的性质有关,又受 V 的影响。同一质地土壤不同植被类型间或同一植被类型不同质地土壤间 D 的变化规律与 V 的变化规律相同。有学者研究表明^[25], D 与 V 的平方成正比^[26],这与本研所得到的结果一致。不同土质和植被类型样地 (S-AR、S-SH、S-GR、L-AR、L-SH 和 L-GR) Pe 的变化范围分别为 20.97~25.27、13.70~22.98、19.24~20.85、13.96~22.49、5.81~25.38 和 9.70~21.02。 Pe 代表了对流传质贡献与扩散传质贡献的比值,当 Pe 大于 1 时,对流效应在确定总质量通量方面的贡献超过扩散效应,表明溶质运移的主要方式是对流^[27]。

表 2 不同土质和植被类型样地土壤剖面 Cl^- 运移参数

Table 2 Cl^- transport parameters in soil relative to texture and vegetation cover

样地 Sample	平均孔隙水流速 V / ($\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)				水力弥散系数 D / ($\text{cm}^2\cdot\text{h}^{-1}$)				佩克莱数 Pe			
	最小值	最大值	平均值±标准差	变异系数	最小值	最大值	平均值±标准差	变异系数	最小值	最大值	平均值±标准差	变异系数
	Min	Max	Mean±SD	CV	Min	Max	Mean±SD	CV	Min	Max	Mean±SD	CV
S-AR	1.34	1.98	1.67±0.24	0.15	1.18	1.84	1.51±0.24	0.17	20.97	25.27	22.88±1.75	0.08
S-SH	0.97	1.62	1.23±0.26	0.21	1.03	1.72	1.32±0.27	0.21	13.70	22.98	18.79±3.33	0.18
S-GR	1.22	1.75	1.51±0.20	0.13	1.17	1.72	1.47±0.22	0.14	19.24	20.85	20.60±1.17	0.06
L-AR	0.52	1.54	1.04±0.36	0.35	0.75	2.06	1.68±0.53	0.40	13.96	22.49	16.38±3.52	0.22
L-SH	0.74	1.28	1.03±0.22	0.21	0.93	2.55	1.31±0.70	0.41	5.81	25.38	14.59±7.44	0.51
L-GR	0.44	1.09	0.76±0.24	0.32	0.82	1.47	1.04±0.28	0.57	9.70	21.02	14.95±4.51	0.30

2.4 土壤溶质运移参数的影响因素

表 3 为不同土质和植被类型样地溶质运移参数和土壤基本理化性质相关性分析结果。从表 3 可以看出, BD 与 V 、 D 呈极显著负相关,与 TE、TS 呈极显著正相关,而大孔隙数和连通性密度与 V 、 D 呈极显著正相关,与 TE、TS 呈极显著负相关。容重与土壤结构和孔隙状况密切相关,容重越小,孔隙数量及孔隙连通性越好,溶质在土壤中的迁移速度越快^[28]。SWC 与 TE 和 TS 呈极显著正相关,王

岩等^[29]研究表明,含水量越低,湿润锋不稳定的土壤中溶质易出现较早的初始穿透。SOC 与 V 、 D 呈极显著正相关,与 TE、TS 呈极显著负相关。SOC 为植物根系生长提供重要的营养物质,促进根系发育,有利于大孔隙的形成。同时, SOC 含量高,土壤质地疏松且孔隙结构良好,溶质运移过程中受到的阻力较小,运移速度较快且弥散作用强,因此完成运移的时间也较短^[30]。砂粒含量与 V 、 Pe 呈极显著正相关,与 TE、TS 呈极显著负相关,而粉粒和

表 3 土壤性质和 Cl^- 运移参数的相关性Table 3 Relationships between soil properties and Cl^- transport parameters

	容重 Bulk density	土壤含水量 Soil water content	有机碳 Organic carbon	全磷 Total P	砂粒 Sand	粉粒 Silt	黏粒 Clay	大孔隙数 Macropore number	连通性密度 Connectivity density
完全穿透时间 TE	0.787**	0.221*	-0.628**	0.559	-0.659**	0.656**	0.567**	-0.754**	-0.741**
初始穿透时间 TS	0.870**	0.366*	-0.669**	0.349	-0.432*	0.429*	0.385*	-0.767**	-0.732**
孔隙水流速 V	-0.956**	-0.270	0.611**	-0.576	0.649**	-0.644**	-0.761**	0.773**	0.874**
水力弥散系数 D	-0.717*	-0.077	0.457*	-0.104	0.240	-0.217	0.225	0.370*	0.474*
佩克莱数 Pe	0.510	-0.213	0.111	-0.546	0.509**	-0.518**	0.536**	0.396*	0.186

在 0.01 的水平上相关性显著。*在 0.05 的水平上相关性显著。means significant correlation at the level of 0.01. *means significant correlation at the level of 0.05.

黏粒含量则与其结果相反。土壤颗粒组成反映了土壤质地状况，砂粒含量越高，土壤中孔隙数量越多，从而有利于形成优先路径，溶质运移速度越快。相反，土壤中粉粒和黏粒则会产生较多的细小孔径，弥散强度增大，阻碍溶质在土体中的运移^[31]。

3 讨论

黄土高原北部是典型的水蚀风蚀交错带和生态脆弱区，研究该区域不同土质和植被类型下土壤溶质运移过程对深入理解地球关键带养分循环和污染物迁移具有重要意义。本文对陕北神木六道沟小流域与圪丑沟小流域不同土质（砂土和壤土）和植被类型下（乔、灌、草）土壤溶质运移过程及其主要影响因素进行研究，以期为研究区植被合理配置和养管理提供依据。试验结果表明，同一质地土壤不同植被类型样地 Cl^- 的运移规律不同。砂土不同植被类型样地 0~40 cm 土层 Cl^- 的 TS 和 TE 表现为 S-AR < S-GR < S-SH，40 cm 以下表现为 S-AR < S-SH < S-GR，而壤土不同植被类型样地剖面不同深度 Cl^- 的 TS 和 TE 均表现为 L-AR < L-SH < L-GR。砂土样地 Cl^- 运移的 V 剖面平均值表现为 S-AR (1.67 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) > S-GR (1.51 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) > S-SH (1.23 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)，而壤土样地则相反， V 剖面平均值表现为 L-AR (1.04 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) > L-SH (1.03 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$) > L-GR (0.76 $\text{cm}\cdot\text{h}^{-1}$)。陈晓冰等^[23]指出不同类型植物根系分布不同，从而导致土壤结构和孔隙状况具有差异。韩路等^[32]研究表明，不同植被类型土壤孔隙度表现为乔木林地 > 灌木林地 > 草地，并指出乔木林地

下土壤优先路径数量和发育程度均最高，因此 Cl^- 运移的 V 最大，TS 和 TE 最短，PTC 的峰值向左偏移，这与本实验结果相一致。此外，不同植被类型下土壤入渗能力存在差异^[33]，乔木林地较高的入渗速率进一步促进了溶质运移。然而，根系发育状况是土壤质地，养分和水分综合作用的结果。本研究中砂土样地 0~40 cm 土层根系生物量表现为 S-AR (277.4 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-GR (131.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-SH (112.6 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)，而 40 cm 以下土层根系生物量表现为 S-AR (84.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-SH (77.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > S-GR (40.1 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。壤土样地不同深度土层植物根系生物量均表现为 L-AR > L-SH > L-GR，0~100 cm 剖面根系总生物量表现为 L-AR (422.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > L-SH (370.2 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$) > L-GR (196.5 $\text{g}\cdot\text{m}^{-2}$)。由于乔、灌、草根系在不同质地土壤中剖面分布不同，导致土壤孔隙数量和孔隙连通性密度具有显著差异，因此，砂土和壤土不同植被类型样地 Cl^- 运移规律并不完全一致。上述结果表明，不同植被类型样地养管理应依据土壤中养分离子和溶质运移规律采取不同的策略。赵护兵等^[34]指出植被通过影响土壤孔隙分布和优先流路径进而影响养分的流失，不同植被类型对养分离子的影响不同，且养分离子的类型、形态和途径也不相同，应合理配置植被从而降低养分离子流失风险。

除了植被类型对溶质在土壤中的迁移产生影响，土壤质地对溶质运移规律也具有重要影响。同一植被类型下壤土样地不同深度土层 Cl^- 的 TS 和 TE 均高于砂土样地 (L-AR > S-AR; L-SH > S-SH; L-GR > S-GR)，而砂土样地中 Cl^- 运移的 V 均高于

壤土样地 (S-AR > L-AR; S-SH > L-SH; S-GR > L-GR)。这是由于土壤的机械组成决定了其孔隙分布状况。砂土质地均匀,以粗颗粒砂粒为主,大孔隙多且孔隙分布连续性好,有助于形成优先流,溶质在运移过程中受到更小的阻滞效应,初始穿透时间和完成置换时间较短。相反,壤土中带电团聚体对离子的吸附作用及土壤内部结构的细小孔隙所构成的复杂孔径会阻碍溶质运移,因此壤土样地 Cl^- 运移的 V 较低,而 TS 和 TE 较高。温以华^[31]研究发现, Cl^- 在黏粒含量较高的黄绵土中运移速率远低于砂粒含量较高的风沙土。刘庆玲和徐绍辉^[24]通过研究不同质地土壤中溶质运移过程,同样发现砂土中溶质运移速率高于壤土。由于砂土中溶质运移速率较壤土高,这在一定程度上反映了砂土中养分流失风险较大。章明奎和方利平^[35]通过田间观测和模拟淋洗试验表明,砂土中养分极易随水迁移,很容易在短时间内沿剖面迁移至地下水或随地表径流迁移至周围水体,并且高浓度的养分流失常发生在施肥后的降雨过程中。因此,在砂质土壤上应避免大量施肥,肥料宜少量多次施用,不宜在雨前施用肥料。对不同土质和植被类型样地 (S-AR、S-SH、S-GR、L-AR、L-SH 和 L-GR) 溶质运移参数和土壤基本理化性质进行相关性分析,结果表明:土壤物理性质 (BD, 大孔隙数, 连通性密度, SWC, SOC, 颗粒组成) 与 Cl^- 运移参数 (V 、 D 、TE 和 TS) 显著相关。李卓等^[28]、李雪转和樊贵盛^[36]对不同容重和有机质含量的土壤入渗能力进行分析,结果表明,入渗速度与有机质含量呈正相关关系,与容重呈负相关关系。张丛志等^[37]研究表明质地越黏重,其土壤孔隙平均水流速则越慢。王岩等^[29]研究了不同初始含水量的土壤溶质运移过程,结果表明,较低的土壤含水量会导致较早的初始穿透现象。

综上所述,同一质地土壤不同植被类型样地植物根系分布与土壤性质的交互作用影响溶质运移过程;同一类型植被不同质地土壤样地溶质运移状况主要取决于土壤本身的结构和性质。明确黄土高原水蚀风蚀交错区不同土质和植被类型下土壤溶质运移过程及其影响因素可为该区植被合理配置提供依据,同时对于深入理解黄土关键带养分循环和污染物迁移的具有重要作用。

4 结 论

同一质地不同植被类型条件下 Cl^- 运移速率与穿透时间不同,这是由于砂土和壤土中不同类型植物根系剖面分布与生物量均具有显著差异,进而影响土壤中大孔隙数量与优先流路径。同一植被类型不同质地土壤中 Cl^- 运移特征也具有显著差异,这是由于土壤机械组成影响孔隙分布状况,砂土中大孔隙多且孔隙分布连续性好,有助于形成优先流,而壤土中细颗粒带电团聚体对离子具有吸附作用以及细小孔隙所构成的复杂孔径会阻碍 Cl^- 运移。此外, BD、大孔隙数、连通性密度、SOC 和颗粒组成 (砂粒、粉粒和黏粒含量) 均与 Cl^- 运移参数 (V 、TS 和 TE) 显著相关,表明土壤物理性质显著影响不同土质和植被类型下 Cl^- 运移特征。因此,在黄土高原地区进行植被恢复与生态建设时应充分考虑不同质地土壤下植被合理布局与配置,从而降低养分流失风险,提升生态系统服务功能。

参考文献 (References)

- [1] Li B G, Hu K L, Huang Y F, et al. Advances in modeling and applications of soil solute transport[J]. *Soils*, 2005, 37 (4): 345—352. [李保国, 胡克林, 黄元仿, 等. 土壤溶质运移模型的研究及应用[J]. *土壤*, 2005, 37 (4): 345—352.]
- [2] Kuntz B W, Rubin S, Berkowitz B, et al. Quantifying solute transport at the shale hills critical zone observatory[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10 (3): 843—857.
- [3] Van Genuchten M T, Wagenet R J. Two-site/two-region models for pesticide transport and degradation: Theoretical development and analytical solutions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1989, 53 (5): 1303—1310.
- [4] Porro I, Wierenga P J, Hills R G. Solute transport through large uniform and layered soil columns[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29 (4): 1321—1330.
- [5] Shao M A, Wang Q J, Huang M B. *Soil physics*[M]. Beijing: Higher Education Press, 2006. [邵明安, 王全九, 黄明斌. *土壤物理学*[M]. 北京: 高等教育出版社, 2006.]
- [6] Li Z M, Zhou Q, Wang H, et al. Influence of bulk density on the characteristic of water solute transport in red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (5): 101—103. [李志明, 周清, 王辉, 等. 土壤容重对红壤水分溶质运移特征影响的试验研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (5): 101—103.]

- [7] Shen Z Y, Wang H, Ping L N, et al. Effect of antecedent soil moisture on characteristics of runoff, sediment loss and solute transport on red soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2014, 28 (1): 58—62. [沈紫燕, 王辉, 平李娜, 等. 前期土壤含水量对粘性红壤产流产沙及溶质运移的影响[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(1): 58—62.]
- [8] Mao N, Huang L M, Shao M A. Vertical distribution of soil organic and inorganic carbon under different vegetation covers in two toposequences of the Liudaogou watershed on the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 73 (4): 479—491.
- [9] Pei Y W, Huang L M, Jia X X, et al. Soil water availability and its influencing factors in soils under two types of shrubberies typical of the Loess Plateau[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2019, 56 (3): 627—637. [裴艳武, 黄来明, 贾小旭, 等. 黄土高原 2 种典型灌木地土壤水分有效性及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2019, 56 (3): 627—637.]
- [10] Yang X, Shao M, Li T C, et al. Structure characteristics of *Camponotus japonicus* nests in northern part of Loess Plateau and influencing factors[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2018, 55 (4): 868—878. [杨析, 邵明安, 李同川, 等. 黄土高原北部日本弓背蚁巢穴结构特征及其影响因素[J]. *土壤学报*, 2018, 55 (4): 868—878.]
- [11] Lü D Q, Shao M A, Pan Y. Dependent relationship between bulk density changes and soil water characteristics[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2009, 23 (3): 209—212, 216. [吕殿青, 邵明安, 潘云. 容重变化与土壤水分特征的依赖关系研究[J]. *水土保持学报*, 2009, 23 (3): 209—212, 216.]
- [12] Yang M H, Cao M M, Zhu Z M, et al. Soil physical and chemical properties in the process of desertification on the southeastern edge of Mu Us sandy land[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2010, 30 (2): 169—172, 176. [杨梅焕, 曹明明, 朱志梅, 等. 毛乌素沙地东南缘沙漠化过程中土壤理化性质分析[J]. *水土保持通报*, 2010, 30 (2): 169—172, 176.]
- [13] Liu Z P, Shao M A. Vertical variations of soil moisture and total nitrogen in small catchment on Loess Plateau[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26 (5): 71—77. [刘志鹏, 邵明安. 黄土高原小流域土壤水分及全氮的垂直变异[J]. *农业工程学报*, 2010, 26 (5): 71—77.]
- [14] Mao N, Shao M A, Huang L M. Distribution characteristics and influencing factors of soil carbon profile along toposequences in Liudaogou watershed[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31 (5): 222—230, 239. [毛娜, 邵明安, 黄来明. 六道沟小流域地形序列土壤碳剖面分布特征及影响因素[J]. *水土保持学报*, 2017, 31 (5): 222—230, 239.]
- [15] Zhao S W, Zhao Y G, Wu J S. Quantitative analysis of soil pores under natural vegetation successions on the Loess Plateau[J]. *Science China (Earth Sciences)*, 2010, 53 (4): 617—625.
- [16] Lu S, Meng P, Zhang J S, et al. Changes in soil organic carbon and total nitrogen in croplands converted to walnut-based agroforestry systems and orchards in southeastern Loess Plateau of China[J]. *Environmental Monitoring and Assessment*, 2015, 187 (11): 6881—6889.
- [17] Wang K B, Shi W Y, Shangguan Z P. Effects of natural and artificial vegetation types on soil properties in Loess Hilly region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28 (15): 80—86. [王凯博, 时伟宇, 上官周平. 黄土丘陵区天然和人工植被类型对土壤理化性质的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28 (15): 80—86.]
- [18] Jiao F, Wen Z M, An S S. Changes in soil properties across a chronosequence of vegetation restoration on the Loess Plateau of China[J]. *Catena*, 2011, 86 (2): 110—116.
- [19] Li Z C, Hu X. Effects of shrub (*Caragana microphylla* lam) encroachment on soil porosity of degraded sandy grassland[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2015, 52 (1): 242—248. [李宗超, 胡霞. 小叶锦鸡儿灌丛化对退化沙质草地土壤孔隙特征的影响[J]. *土壤学报*, 2015, 52 (1): 242—248.]
- [20] Gryze S D, Jassogne L, Six J, et al. Pore structure changes during decomposition of fresh residue: X-ray tomography analyses[J]. *Geoderma*, 2006, 134 (1/2): 82—96.
- [21] Wang Q J, Shao M A, Zheng J Y. Water movement and solute migration in soil[M]. Beijing: China Water Power Press, 2007. [王全九, 邵明安, 郑纪勇. 土壤中水分运动与溶质迁移[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2007.]
- [22] Zhu H X, Ma L W, Selim H. Transport of nonreactive solute in soil and the determination of model parameters[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 1998, 35 (4): 517—525. [朱红霞, 马立望, Selim H. 非反应性物质在土壤中的迁移及其参数确定[J]. *土壤学报*, 1998, 35 (4): 517—525.]
- [23] Chen X B, Zhang H J, Li S Y, et al. Characteristics and influencing factors of preferential flow in different vegetation types of purple sandstone regions[J]. *Science of Soil and Water Conservation*, 2014, 12 (6): 42—49. [陈晓冰, 张洪江, 李世友, 等. 紫色砂岩区不同植被类型土壤优先流特征及其影响因素[J]. *中国水土保持科学*, 2014, 12 (6): 42—49.]
- [24] Liu Q L, Xu S H. Retarding factors of copper movement in soils different in texture[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2005, 42 (6): 930—935. [刘庆玲, 徐绍辉. 不同质地土壤中铜离子运移阻滞因子研究[J]. *土壤学报*, 2005, 42 (6): 930—935.]
- [25] Wang J, Shao M A. Solute transport characteristics of a deep soil profile in the Loess Plateau, China[J]. *Journal of Arid Land*, 2018, 10 (4): 628—637.
- [26] Singh P, Kanwar R S. Preferential solute transport through macropores in large undisturbed saturated soil

- columns[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1991, 20 (1): 295—300.
- [27] Raats P A C. Dynamics of fluids in porous media[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1973, 37 (4): 174—175.
- [28] Li Z, Wu P T, Feng H, et al. Simulated experiment on effect of soil bulk density on soil infiltration capacity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25 (6): 40—45. [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.]
- [29] Wang Y, Chen Y Y, Peng C S, et al. Effects of initial water content on solute preferential transport in inter-tidal zone of Yellow River Estuary[J]. *Marine Environmental Science*, 2011, 30 (3): 310—315. [王岩, 陈友媛, 彭昌盛, 等. 初始含水量对黄河河口潮滩溶质优先运移的影响研究[J]. *海洋环境科学*, 2011, 30 (3): 310—315.]
- [30] Zeng Q, Xu Z M, Guan Q, et al. Characteristics of macropores in soil of slope under different vegetation measures[J]. *Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering*, 2016, 35 (S1): 3343—3352. [曾强, 徐则民, 官琦, 等. 不同植被条件下斜坡土体大孔隙特征分析[J]. *岩石力学与工程学报*, 2016, 35 (S1): 3343—3352.]
- [31] Wen Y H. Influence of texture and bulk density on the transport's law of Cl^- in soils[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2002, 9 (1): 73—75. [温以华. 不同质地和容重对 Cl^- 在土壤中运移规律的影响[J]. *水土保持研究*, 2002, 9 (1): 73—75.]
- [32] Han L, Wang H Z, Yu J. Soil hydrological characteristics of different vegetation types in the upper reaches of Tarim River[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2013, 27 (6): 124—129. [韩路, 王海珍, 于军. 塔里木河上游不同植被类型土壤水文特性研究[J]. *水土保持学报*, 2013, 27 (6): 124—129.]
- [33] Lü G, Gu Y S, Wei Z P, et al. Study on soil infiltration characteristics under several typical vegetation in Baishilazi Nature Reserve[J]. *Ecology and Environmental Sciences*, 2013, 22 (5): 780—786. [吕刚, 顾宇书, 魏忠平, 等. 白石砬子自然保护区几种主要植被类型土壤入渗特性研究[J]. *生态环境学报*, 2013, 22 (5): 780—786.]
- [34] Zhao H B, Liu G B, Xu M X. Review on vegetation restoration on nutrient changes in watershed of loess hilly region[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2004, 24 (2): 72—75. [赵护兵, 刘国彬, 许明祥. 黄土丘陵区植被恢复与流域养分环境演变研究进展[J]. *水土保持通报*, 2004, 24 (2): 72—75.]
- [35] Zhang M K, Fang L P. Accumulation and transport of nutrients in agricultural sandy soils[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2006, 20 (2): 46—49. [章明奎, 方利平. 砂质农业土壤养分积累和迁移特点的研究[J]. *水土保持学报*, 2006, 20 (2): 46—49.]
- [36] Li X Z, Fan G S. Influence of organic matter content on infiltration capacity and parameter in field soils[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2006, 22 (3): 188—190. [李雪转, 樊贵盛. 土壤有机质含量对土壤入渗能力及参数影响的试验研究[J]. *农业工程学报*, 2006, 22 (3): 188—190.]
- [37] Zhang C Z, Zhang J B, Xu S H, et al. Numerical simulation of reactive solute transport in saturated column of different soils[J]. *Advances in Water Science*, 2008, 19 (4): 552—558. [张丛志, 张佳宝, 徐绍辉, 等. 反应性溶质在不同质地饱和土柱中运移的数值模拟[J]. *水科学进展*, 2008, 19 (4): 552—558.]

(责任编辑: 檀满枝)