

DOI: 10.11766/trxb202204190188

鲁建荣, 李云良, 谭志强, 姬明飞, 杨垒, B. Larry Li. 植物根系对土壤水力参数影响的定量研究综述[J]. 土壤学报, 2023, 60(4): 939–952.

LU Jianrong, LI Yunliang, TAN Zhiqiang, JI Mingfei, YANG Lei, B. Larry Li. Review on Quantification of Root-induced Change of Soil Hydraulic Parameters[J]. Acta Pedologica Sinica, 2023, 60(4): 939–952.

植物根系对土壤水力参数影响的定量研究综述*

鲁建荣¹, 李云良^{2†}, 谭志强², 姬明飞¹, 杨垒¹, B. Larry Li^{1, 3}

(1. 南阳师范学院水资源与环境工程学院, 河南省南水北调水源区协同创新中心, 河南省南水北调中线水源区流域生态安全国际联合实验室, 河南 南阳 473061; 2. 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 南京 210008; 3. 加州大学河滨分校环境科学系, 河滨 CA92521)

摘要: 植物根系是土壤结构以及土壤水力参数变化的重要影响要素。目前不仅缺乏定量描述“根-孔隙-土壤水力参数”相互作用的研究方法, 在更大尺度上根系作用的客观表达也尚不明确, 由此导致降雨入渗、径流和蒸发等流域水文过程的精细刻画与模拟预测具有很大的不确定性。基于文献检索, 本文对国内外相关研究进行了回顾与梳理, 量化了植物根系对土壤水力参数的改变和影响, 并提出其与植被、土壤类型的响应方式, 总结了植物根系动态性生长下的土壤水力参数定量表述及其预测模型进展。同时分析了在定量研究根-土复合系统中存在的问题及未来研究的发展方向, 指出目前根系影响土壤水力参数的研究主要集中在小尺度控制实验方面, 忽略了大尺度下土壤空间异质性及外部环境因素的干扰, 强调大尺度根系作用和根系参数纳入土壤结构的重要性和实际意义, 进一步与水文模型的深度耦合逐渐成为未来研究的热点。

关键词: 土壤水动力学; 土壤孔径分布; 土壤转换函数; 根系特征; 流域水文; 耦合模型

中图分类号: X143 **文献标志码:** A

Review on Quantification of Root-induced Change of Soil Hydraulic Parameters

LU Jianrong¹, LI Yunliang^{2†}, TAN Zhiqiang², JI Mingfei¹, YANG Lei¹, B. Larry Li^{1, 3}

(1. Collaborative Innovation Center of South-to-North Water Diversion Area of Henan Province, International Joint Laboratory of Watershed Ecological Security for Water Source Region of Middle Route Project of South-North Water Diversion in Henan Province, College of Water Resource and Environment Engineering, Nanyang Normal University, Nanyang, Henan 473061, China; 2. Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210008, China; 3. Department of Environmental Sciences, University of California, Riverside, Riverside CA 92521, USA)

Abstract: Plants roots are known as an important driving force for the change of soil structure and soil hydraulic parameters (SHP). However, there is a lack of appropriate modelling approaches to root-pore-SHP interactions with quantitative descriptions, which has led to knowledge gaps in the effects of roots on SHP at larger scales. A consequence of this gap is the bias in the

* 河南省科技攻关计划(222102320222)、中国科学院青年创新促进会项目(Y9CJH01001)、国家自然科学基金项目(42071036, 42171104)共同资助。Supported by the Henan Province Key Science and Technology Program (No. 222102320222), the Youth Innovation Promotion Association of the Chinese Academy of Sciences (No. Y9CJH01001) and the National Natural Science Foundation of China (Nos. 42071036, 42171104)

† 通讯作者 Corresponding author, E-mail: yunliangli@niglas.ac.cn

作者简介: 鲁建荣(1988—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为土壤水分、溶质运移过程与模拟。E-mail: ljr806916@126.com

收稿日期: 2022-04-18; 收到修改稿日期: 2022-06-24; 网络首发日期(www.cnki.net): 2023-01-04

simulation and prediction of hydrological processes such as infiltration, runoff and evaporation in catchments. In this paper, available literature is reviewed and used to quantify the changes and effects of plant roots on SHP. In addition, its relationships with plant and soil type are proposed. The quantitative expression of SHP and their prediction models under the dynamic growth of plant roots are summarized. This paper also analyzes problems and future research directions of the quantitative research on root-permeated soils. This study points out that the current research on SHP affecting roots focused on small-scale control experiments, ignoring the interference of soil spatial heterogeneity and environmental factors at large scales. Previous studies found contrasting root effects (on SHP) depending on which processes are dominant, including root growth (or decay) and the density and diameter of roots. Meanwhile, root-induced change of SHP was species (root characteristics), soil type, and time-dependent. Also, related studies indicated that the model's accuracy and reliability would be improved when considering the temporal dynamics of roots induced by land cover/land use change and seasonal variations in SHP. Few efforts have been undertaken to incorporate root variables into soil function to predict SHP based on roots occupying the soil pore space, changing soil pore size distribution and soil pore network model. Neglecting root-induced change of SHP in hydrologic simulation may lead to high uncertainties. As the root-related dominant process at a larger scale is different to that in small-scale control experiments, there remain significant knowledge gaps that impede the development of quantitative guidance on root-induced change of SHP at a larger scale. It is highlighted that the importance of root effects and associated parameters related to soil structure, and it is becoming a part of hot topic about coupling hydrological and water quality models.

Key words: Soil hydrodynamics; Soil pore size distribution; Pedo-transfer functions; Root characteristics; Catchment hydrology; Coupling model

土壤不仅作为大气、水文过程与生物地球化学过程之间紧密联系的纽带,也是地球关键带系统的重要环节^[1-2]。特别是近地表土壤在地形地貌、植被属性和土地利用模式等共同作用下,影响当地的水量收支和平衡,并对区域和全球地表能量、水通量和区域气候产生重大影响^[3-5]。据报道,大约 60% 的陆地降水通过土壤-植物-大气连续体返回大气^[6-7],并且全球年陆地植被产量和相关的养分循环几乎全部依赖于土壤水文过程^[8-9]。土壤水动力学是陆地水文循环中的一个重要研究内容,并且基于 Richards 方程形成了土壤水分、溶质运移动力学的数学描述和模拟^[10-11]。各种尺度下的水文模型均需要依赖土壤水力参数 (Soil Hydraulic Parameters, SHP) 来实现耦合过程的准确表征和参数化^[12]。SHP 不仅是水文模型模拟精度的重要参数,其参数估算对于水文、环境、灌溉以及气候变化等多个领域的研究也有着重要的借鉴作用。

土壤水力参数 (SHP) 具有强烈的空间异质性,其参数量化往往耗时且费力,是一项极具挑战性的研究工作。因此,大尺度下水文过程的研究中基本使用固定的 SHP,也就是假定土壤的孔隙结构保持不变,并且模型输入数据基本来自土壤传递函数 (Pedo-transfer functions, PTFs)。PTFs 使用易于测

量的土壤属性 (如土壤质地、容重或有机碳含量) 来估计水力参数,这种参数化方法往往过分强调了土壤质地的重要性,忽略了土壤结构的关键影响作用,尤其是土壤生物活动引起的土壤结构动态变化^[4, 13-15]。在影响 SHP 动态性的各种因素中,植物根系对 SHP 通常具有主导作用^[16-19],但同时也在相关研究中也易遭忽视。由于流域内的植被因大规模的清除或替代来满足人类活动需求和季节性的耕作等,可能会经历明显的动态变化,根系分布的变化会显著影响地下水文和地表径流量等^[20-22]。近 10 年来,国内外学者围绕定量描述根系对 SHP 的改变已开展了大量探索性工作,但主要侧重于点位条件、小尺度或者个体植被的根系与 SHP 的关系^[23-25]。不难发现,基于本地尺度环境下的根系-SHP 作用分析研究将难以再现现实世界的复杂条件,很难在大尺度下展开应用。因此,对于现有根系影响 SHP 的系统定量总结和梳理极为重要。

尽管如此,目前还缺乏关于植被改变 (以及根系) 引起 SHP 变化的综合理解和定量刻画,该工作对客观评估本地和生态系统尺度的土壤、地下水和流域水文过程至关重要。例如, Fatichi 等^[4]在全球 20 个跨越不同气候和生物群落的地点进行了数值试验,系统评估了土壤结构效应 (将土壤结构与植被

属性联系起来) 纳入 SHP 引起的显著水文效应及其差异。针对土地利用变化影响下, 植被根系分布改变土壤容重所引起的水量平衡变化, Bormann 等^[26]评估了 SWAT、TOPLATS 和 WASIM 三种水文模型的水文响应, 发现根系对 SHP 的改变会克服空间误差, 其产生的水文效应与流域内土地利用变化引起地表蒸散发量的变幅处于一个量级, 并成为不可忽视的组分。也有研究发现, 若模型考虑到植物覆被变化或根系季节性动态导致的 SHP 时空变化, 其准确性和可靠性可得到明显改善^[27-29]。

考虑到根系-SHP 作用关系分析的重要性及对生态环境系统服务与评估的实际意义, 本文主要综述有关定量描述根系改变 SHP 的研究, 探讨量化根-土复合系统 SHP 的主要研究方法, 总结植物根系影响 SHP 的形式和程度, 归纳根系形态特征与 SHP 之间的经验和物理关系模型, 以分析当前研究的主要方向和进展、存在的差距和不足; 最后, 对根系-SHP 作用关系在大尺度下的研究方向提出了建议。虽然植物根系对 SHP 的影响被广泛认知和接受, 但目前围绕根系-SHP 作用方面的系统总结工作甚少。综述不仅可以丰富土壤水流运动的理论与模拟, 同时可为土壤水文、生态水文过程以及溶质运移模拟研究等提供理论指导, 并为涉及 SHP 问题的水文模型设计和管理措施优化提供新的途径。

1 根系影响土壤水力参数的方式与研究方法

1.1 土壤水力模型简介

描述土壤水力性质的主要参数包括土壤水分特征曲线 (Soil Water Characteristic Curve, SWCC) 和水力传导度曲线, 两者分别描述了土壤含水率 (θ) 与对应的负压 (h)、土壤非饱和导水率 (K_u) 之间的关系。在具体实践中, 由于实验方法直接测定 SWCC 和 K_u 曲线耗时较长, 并且试验成本高, 因此一般通过经验模型拟合有限的实测土壤含水量和负压数据来获得。描述 SWCC 的经验模型主要包括 Brooks-Corey 模型^[30]、Kosugi 模型^[31]和 van Genuchten 模型^[32]。其中, 应用最广泛的是 van Genuchten 模型, 其描述 SWCC 和土壤水力传导率的方程如下:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + (\theta_s - \theta_r) (1 + |\alpha|^n)^{-m} < 0 \\ \theta_s \geq 0 \end{cases} \quad (1)$$

$$K_u(S_e) = K_s S_e^l \left(1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right)^2 \quad (2)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (3)$$

式中, S_e 为有效饱和度[-]; θ_s 为土壤饱和含水量 (通常假设等于土壤孔隙率) [-]; θ_r 为残余含水量[-], α [L⁻¹] 为一个尺度参数, 与进气值的倒数有关; n 为经验参数, 与土壤孔隙尺寸分布 (PSD) 有关; $m=1-1/n$ ($n > 1$); l 为连接度参数[-]; K_s 为饱和导水率 [L·T⁻¹]。

Brooks-Corey 模型描述 SWCC 和 K_u 的方程如下:

$$S_e(h) = \begin{cases} \left(\frac{h}{h_b} \right)^{-b} & h < h_b \\ 1 & h \geq h_b \end{cases} \quad (4)$$

$$K_u(S_e) = K_s S_e^{3+2/b} \quad (5)$$

式中, h_b 为进气值 [L], b 为孔径分布经验指数[-], 其他参数意义同上。

van Genuchten 模型中的 α 、 m 和 n 均为经验参数, 而 Brooks-Corey 模型中的 h_b 则有物理基础, 并将 b 同 PSD 联系起来, 降低参数 b 的经验性。Kosugi 模型是基于孔隙尺寸对数正态分布特征解释 SWCC^[31], 因此如果已知根系如何影响 PSD, 则可以从机理上推求根系引起的 SHP 变化。Kosugi 方程的描述如下:

$$S_e(h) = 0.5 \operatorname{erfc} \left(\frac{\log\left(\frac{h}{h_m}\right)}{\sqrt{2}\sigma} \right) \quad (6)$$

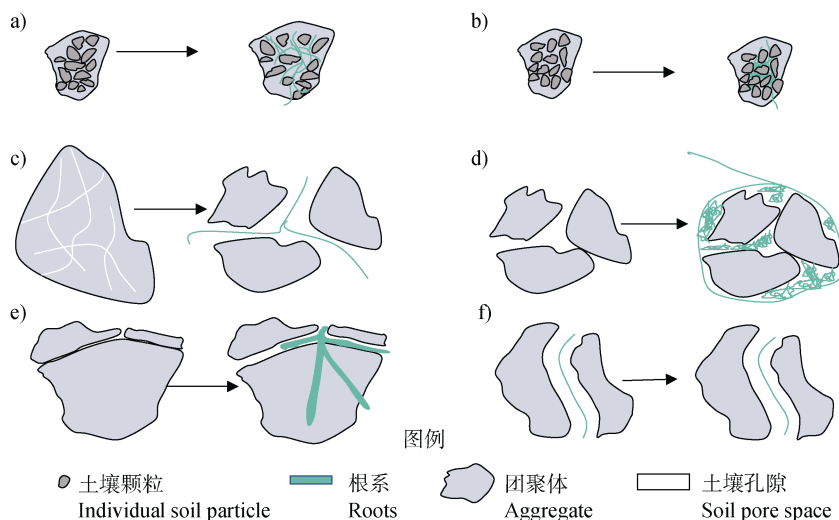
式中, erfc 为互补误差函数, h_m (cm) 为水头中位数, σ (-) 为负压对数标准差。

1.2 根系引起土壤水力参数改变的过程与途径

一般情况下, 不同植物根系对 SHP 的影响程度

和方式不同^[17, 33]。土壤结构决定着近饱和区间(-10 kPa)的土壤持水性和导水率。植物根系可以通过一系列机制影响土壤结构和功能。如图 1 所示,根系的生长,尤其是较粗的根可能具有较高的应力和转移土壤颗粒的能力,造成土壤颗粒重排,引起新孔隙的生成以及部分孔隙的压缩(图 1a)。例如,根系生长过程中大孔和中孔可快速转化为微孔,增加微孔体积和提高孔隙率, van Genuchten 参数表现出饱和 θ_s 和孔径分布参数 n 增加, α 和 K_s 减少的趋势^[17, 23]。相反,细根的生长倾向于土壤机械应力作用下发生弯曲,并沿着土壤颗粒之间的曲折路径生

长,最终导致土壤孔隙堵塞^[34-35](图 1b)。例如,低密度细根倾向于堵塞土壤孔隙引起孔径分布 PSD 异质性降低,导致 θ_s 和 K_s 呈现减少的变化趋势。从土壤团聚体的角度来看(图 1c、图 1d 所示),当根系扩张渗入到大团聚体时会导致其破裂分解,但是当团聚体最初很小时,根系的分泌物可粘结土壤团聚体,同时根系的物理缠绕等也有助于维持其稳定松散的大孔隙结构,从而增大 θ_s 和 K_s ^[36-38]。此外,根通道的形成可能在充当优先流方面发挥重要作用,并且粗根的萎缩或腐烂可能有助于大孔隙和优先流的形成^[20],从而提供更强土壤导水能力(图 1e、图 1f)。



注: (a) 土壤颗粒重排; (b) 孔隙堵塞; (c) 大的土壤团聚体产生裂隙; (d) 小的土壤团聚体的合并; (e-f) 根系的扩张、枯萎引起的大孔隙与优先流通道的建立。Note: (a) Re-orientation of the soil particles; (b) pore-clogging; (c) macro-aggregate cracking; (d) micro-aggregate amalgamation; (e-f) root expansion and shrinkage forming macro-pores and preferential flow, respectively.

图 1 不同根系影响土壤结构的主导过程示意

Fig. 1 Conceptualization of dominant processes involved in root-induced modification to soil structure

自然界根-土复合系统中,根系影响 SHP 的过程涉及从数周到数年的不同时间尺度,具有显著的动态性和复杂性特征。在诸如根际范围的小尺度下,根系可通过增加根表面积、根与土之间接触角等改变 SHP^[34, 38-39]。大部分根毛存活时间很短且根系周转率很快,30%~60%的根毛存活时间只有几周,并且也会迅速分解。而化学作用则体现在根系分泌黏液的瞬时变化和真菌菌丝的生长^[40-41]。土壤中的根系分泌物处于实时动态变化中,并随土壤条件、根系生长速率和黏液年龄变化,因而对 SHP 的改变也是动态的^[42]。在宏观尺度下,根系对 SHP 的影响主要是其根系生长、扩张、枯萎、死亡过程下对土壤

结构的物理作用,具有显著的季节性特征。长期来看,植物根系将通过物理、化学和生物过程的相互作用以及长期的有机质输入提高影响土壤团聚体及其稳定性^[39, 43],例如有研究发现,当根体积密度超过土壤孔隙空间的 5%时,会固定土壤结构而不是孔隙损失,从而进一步改善土壤持水情况^[17]。

植物根系活动会对土壤孔隙大小、分布和连通性产生重要影响。SWCC 实际上反映的是土壤孔隙状况和含水量之间的关系,所有影响土壤孔隙状况和水分特性的因素均会对 SWCC 产生影响。植物根系对土壤结构的影响不只是根系生长、扩张、枯萎过程中的物理影响,也涉及很多生物化学作用。因

此,在生物和非生物因子的共同作用下,根系对 PSD 的变化可表现出更为复杂的形式(如双峰、多峰等),进而引起 SHP 的变化形式多样,这也增加了量化根系作用的不确定性。

1.3 根系影响土壤水力参数的定量研究方法

目前量化根系改变 SHP 的研究尚处于起步阶段,相关资料和基础研究数据相对较少。总体而言,SHF 参数化方法以及量化根系改变 SHF 的实验方法基本相同,大致可分为实验方法 PTFs 和参数逆推法等三种主要类型。实验方法可以使用离心法、压力膜仪和入渗仪来量化 SHF,这些方法在低饱和度和范围内通常非常耗时,且实验方法只能量化有限区域的 SHF,因此需要大量的试验测试来识别空间变化下的 SHF。参数逆推法是将优化算法集成到具有渗流的模型中,通过瞬时剖面法试验确定与观测土壤含水量等参数的最佳拟合数值模拟的参数集^[22-23]。实施参数逆推法在安装土壤湿度探头后不会造成额外的干扰,这可能更适合识别 SHF 的长期变化。PTFs 本质上是非线性函数或人工神经网络系统,根据易于测量的土壤质地和土壤容重作为输入参数来估算 SHF^[44-45]。PTFs 的基本假设是粒度分布决定了 PSD 和 SHF。然而,自然状态下的土壤具有孔隙异质结构并存在不确定性。Niemeyer 等^[46]通过对尼加拉瓜 15 个热带河岸带植被地块分析发现,在影响 K_s 的各种因子中,叶面积指数(LAI)与 K_s 相关性最高($R^2=0.331$),且土壤质地越细两者之间的相关性越高,由此建立了 K_s 与 LAI、黏土含量等的 PTFs。有研究利用 PTFs 建立了植被特性例如 LAI、归一化植被指数(NDVI)与 SHF 之间的统计关系,以探索根系引起的水文效应^[44-45]。尽管这些研究没有将根系特征(例如最大的生根深度、根系密度或植物类型)与 SHF 建立起直接关系,但其结果为在较大的空间规模上识别根系作用提供了新的见解。

综上,实验方法和参数逆推法是定量研究根系土 SHF 的主要方法,其中,实验方法精度最高。鉴于需要同时分析植物根系的相关特征才能定量描述根-土复合系统的特征,因此只适用于植物生长到特定阶段的测定。实施参数逆推法则可以连续捕捉根系土的 SHF 动态变化特征,并可结合 Kosugi 模型等反演,便于从机理上解释植物根系引起 PSD 的变

化等^[17, 23]。未来还可结合微根窗监测技术,可以随时在未扰动情况下原位获取土壤中根系动态性特征。此外,应用 PTFs 估算 SHF 克服了实测数据不足的缺点,适于大尺度上的研究,这对大尺度的流域水文过程模拟十分重要,因此未来建议着重考虑大尺度下根系作用的识别。有关实验方法和参数逆推法的具体研究总结见下文。

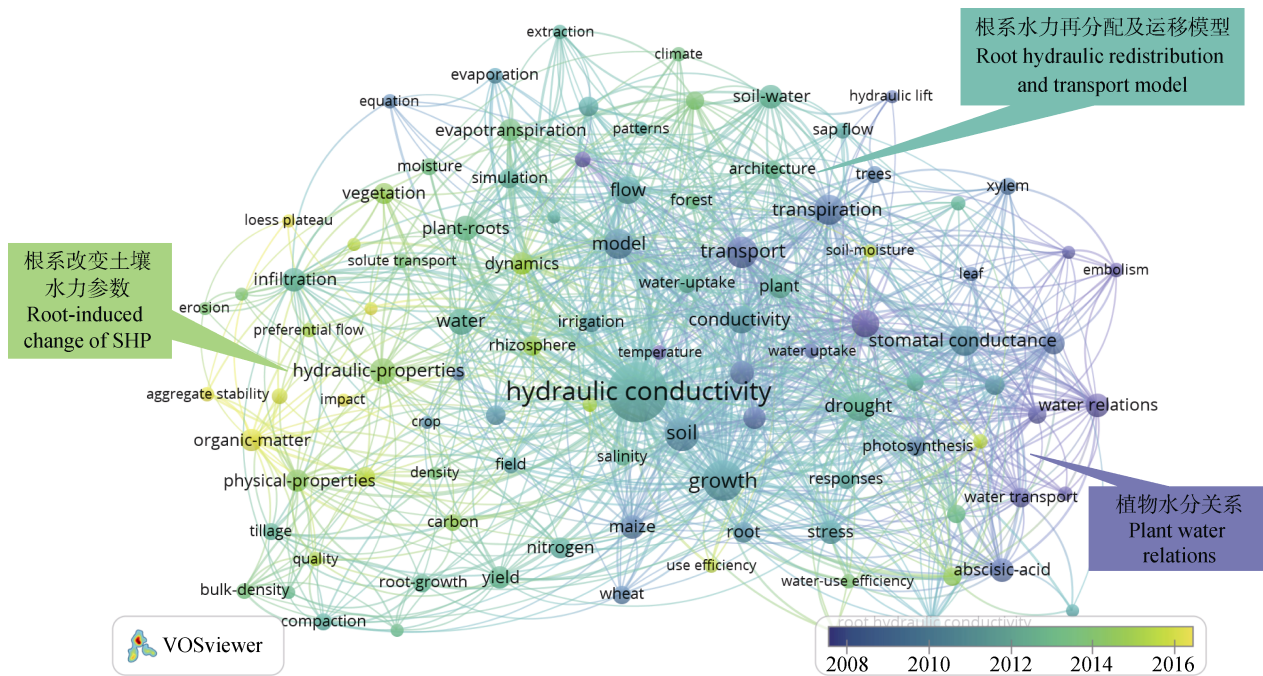
2 植物根系对土壤水力参数影响的定量分析

2.1 文献数据收集与分析

本文利用 Web of Science 的核心合集 TS=(plant roots AND (soil hydraulic properties OR soil water retention curve OR soil water characteristic curve OR soil moisture characteristic curves OR soil hydraulic conductivity))构建检索式,共检索到 1 788 条记录。选取频次大于等于 30 的主题词,通过主题聚类关系可以看出,该研究领域从 2008 年开始,大体上经历了植物水分关系、根系水力再分配及运移模型为主的研究阶段,自 2016 年以后根系改变 SHF 逐渐成为新的研究热点(图 2)。在大尺度下主要集中于农田轮作、团聚体稳定性对 SHF 的影响,尤其是对 K_s 参数的影响,但真正涉及定量评估根-土复合系统 SHF 的研究较少。本文筛选上述文献并结合重要文献引文索引、施引,将目前涉及根系改变 SHF 的文献进行梳理和总结(见表 1),同时对量化结果进行分类和汇总。

2.2 根系对土壤水力参数影响的定量分析

以表 1 所列的实验及相关 38 项实验研究为主要分析对象,将涉及的植被和土壤类型组合进行分组,并对文献中关于根系改变 SWCC 参数和 K_s 的量化数据分布情况进行了统计。由于所列文献来自不同国家,采用的土壤分类标准不尽相同,使得各地研究成果难以切实比较分析。为了得到不同质地土壤下根系与 SHF 定量关系的一般规律,本文将按照土壤质地和植被种类分类对文献数据进行大致分类,参照美国统一分类法(Unified Soil Classification System)土壤分类系统^[69],将砂土含量 $\geq 50\%$ 的土壤(如砂土和砂质壤土)归类为粗粒土,而将砂土含量 $<50\%$ 的土壤归类为细粒土。此外,根据 FAO



注：圆圈的颜色代表其所属的聚类，颜色不同，研究主题不同；圆圈大小代表连接强度的和被引量的大小，圆圈越大，连接强度和被引量越大。Note: The color of the circle represents the cluster to which it belongs. Different colors indicate different research topics; the size of the circle represents the connection strength and the citation volume. The larger the circle, the greater the connection strength and citation volume.

图 2 参考文献研究主题聚类关系图
Fig. 2 Reference research topic clustering diagram

提出的土地覆盖分类系统，将植被类型划分为农作物、草和乔木/灌丛。与 FAO 分类不同的一点是将未受到农业管理活动的饲料牧草和豆科植物归类为草地。受根系影响的 SWCC 参数主要包括 θ_s (图 3a)、 n (图 3b)、 h_b 和 α (图 3c)。可以发现，根系影响下的 θ_s 变幅为 -18%~34%，参数 α 变幅为 -60%~83%， h_b 变幅为 -50%~200%，参数 n 的变幅为 -11%~33%。该结果表明植物根系对 SWCC 参数具有显著影响，即使在同一土壤或植被类型下，各参数在根系作用下也存在相反的变化趋势。尽管对于某些植被/土壤类型，由于没有足够的数据（如数据点所示）无法得出普适性以及确切的结论，但通过图 3 可以发现，根系土壤下的 θ_s 和 h_b 相比裸土增加的可能性更大，而参数 α 减少的可能性更大。参数 n 由于数据量有限变化趋势不明，在粗粒土乔木、灌丛、草地，以及细粒土草地上呈减小趋势，这主要由根系生长引起的孔隙异质性增加引起的。相反，在粗粒土的农作物和细粒土乔木/灌丛和农作物下呈增加趋势，这种

情况可能同根系引起的孔隙堵塞，引起 PSD 的均质化有关。参数 n 的变化也同土壤孔隙率相关，孔隙异质性增强，则相应的孔隙率也增加。草根或幼年阶段的树根以高密度细根为特征，会产生更多的微孔、孔径分布的异质性增强，引起 θ_s 和 h_b 的增加。

植物根系对 K_s 的影响最为深刻，具体表征为从减少 143% 到增加 1 085% 不等 (图 4d)。大多数实验研究均显示出根系引起 K_s 的增加，这可能与根系引起大孔隙的形成或优先流有关，并在以粗根或腐根为特征的植物根系下更为明显。根系引起 K_s 的变化在含有乔木/灌丛植物根系的粗粒土下表现最为显著。然而，植物根系也可降低土壤中的 K_s ，尤其在粗粒土中更为明显，这可能与根系引起的孔隙堵塞有关。细粒土中草地和农作物根系对 K_s 的影响（平均变幅分别为 283% 和 414%）似乎强于粗粒土（平均变幅分别为 85% 和 -24%）。不同植被覆盖类型对 K_s 的影响程度不同，乔木/灌丛植物根系引起 K_s 的增幅最大，其次为草和农作物。

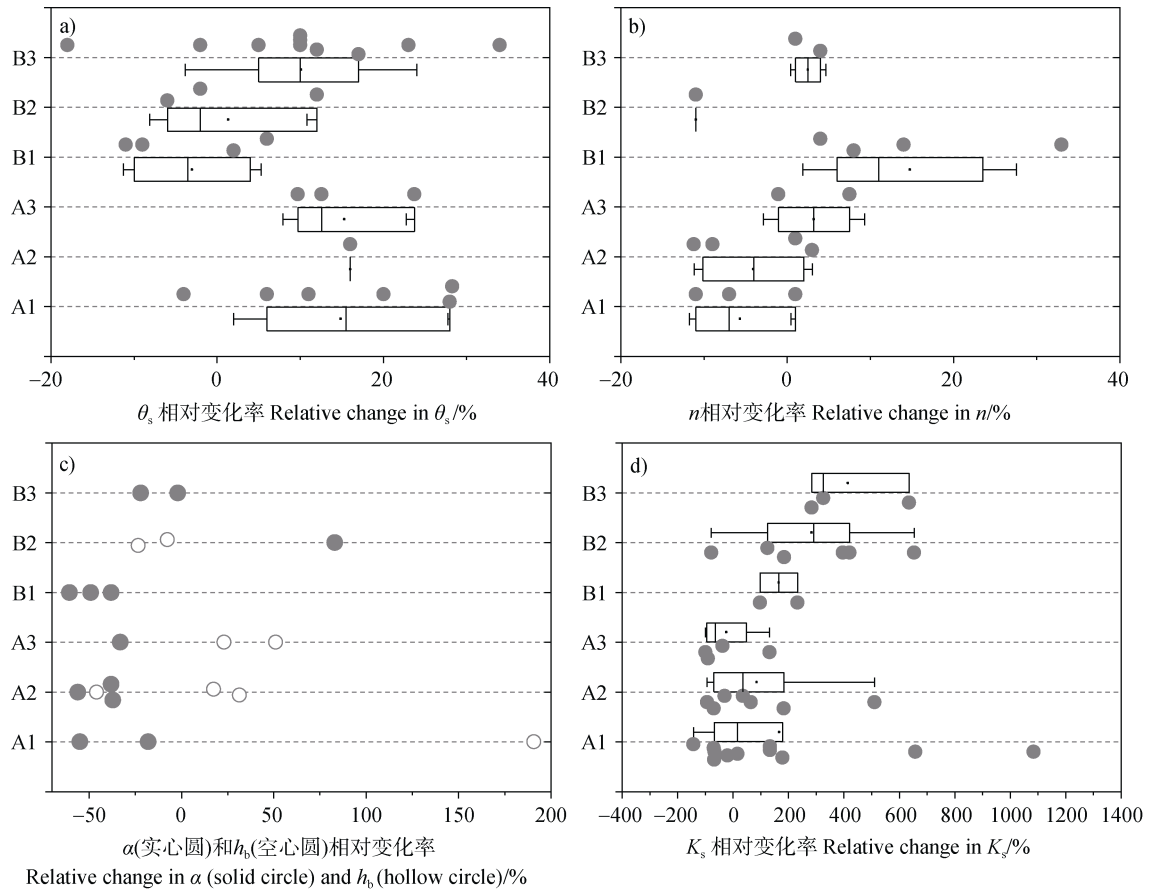
表 1 根系引起 SHP 变化的实验研究概述
 Table 1 Summary of experimental investigations of root-induced change of soil hydraulic parameters

植被类型 Plant type	生长期 Growth period /m	土壤质地 Soil texture	清除地上 Above-ground cleaning	实验设计 Experimental design	测量深度 Measured depth/cm	SHP 和测定方法 Measured SHP and measurement method	参考文献 Reference
蔷薇	4	黏土	是	I	10	h 由底部吸力盘控制; θ 由称重法计算得出	[47]
羽扇豆	0.75	砂土*	否 ⁺	I	15	h 在土柱底部设定为恒定值 (15 ~ 150 cm); θ 由称重法 (裸土) 和中子 射线照射 (根系土) 计算得出	[42]
小麦和秋葵	1.5	壤土*	是	II	10	h 由土柱顶部和底部的压力计测得; θ 由称重法计算得出	[48]
黑麦草和白三叶草	4	壤土*	是	III	25	h 由底部吸力盘 (0 ~ 40 kPa) 和压力膜仪 (200 ~ 1 500 kPa) 控制; θ 由 称重测得	[25]
香附子	未提及	粉砂土	否	I	7	h 由张力计测得 (0 ~ 200 kPa); θ 由称重法计算得出	[49]
鸭掌柴	2	粉砂土*	否 ⁺	I	28	h 由四个不同深度的张力计测得 (0 ~ 100 kPa); θ 由称重法计算得出	[24]
韭菜	0.6	壤土*	是	III	30	h 由张力计测得; θ 由称重法测得	[40]
草地和林木	4	粉砂土*	否 ⁺⁺	I	40	h 和 θ 分别由四个不同深度的配对的张力计和 TDR 测得	[50]
芥末和黑麦	3.5	粉砂壤土	是	I	60	h 和 θ 分别由六个不同深度的配对的张力计和 TDR 测得	[23]
百慕达和香根草	7	黏土*	否 ⁺⁺	III	20	h 和 θ 分别由六个不同深度的配对的张力计和 TDR 测得	[51]
西蓝花	未提及	砾质砂土*	否 ⁺⁺	I	48	h 在土柱底部设定为固定值; θ 由四个不同深度的 TDR 测得	[52]
小麦, 玉米和大麦	1.5	粉质黏壤土*	是	III	70	h 由吸力盘和压力膜仪法 (0 ~ 600 kPa) 控制; θ 由称重法计算得出	[37]
十二种作物植被	3.5	粉砂土**	是	V	20	h 由张力渗透计 (0 ~ 15 cm) 测得并且模型反演 θ	[17]
小麦	4	壤土**	是	V	50	θ 由散射电子扫描图像测得并通过模型反演	[34]
四种草坪植被	24	壤砂土	是	IV	0 ~ 15	h 和 θ 由压力室法测得	[53]
橘子树和香根草	未提及	粉砂质和 黏土质砂**	是	V	0 ~ 10	h 由压力室和压力盘法 (<100 kPa); θ 由称重法计算得出	[54]
林地	Pm	壤土**	是	IV	0 ~ 30	K_u 由 Hood 入渗仪测得; θ 由 TDR 测得	[55]

续表

植被类型 Plant type	生长期 Growth period /m	土壤质地 Soil texture	清除地上 Above-ground cleaning	实验设计 Experimental design	测量深度 Measured depth/cm	SHP 和测定方法 Measured SHP and measurement method	参考文献 Reference
蕨类和柳树	1.6	粉砂土	否	I	45	K_s 由标准降水头法测得	[56]
小麦	1.6	砂土	是	I	50	SWCC 和 K 根据多步骤出流实验计算得出	[57]
灰桉木	8	泥砾砂土和粉土	是	I	35	K_s 由微型磁盘渗透仪和标准降水头法	[58]
草和灌木	Pm	砂土	是	V	0~75	K_s 由地下水水位以上反钻孔法得出	[59]
草、林地和作物	8	壤砂土	是	V	0~5 cm	IR 由双环渗透仪得出	[60]
草类、豆类、小草本和 高大的草本植物	6	壤土和粉砂壤土	是	IV	0~5	IR 由 Hood 入渗仪	[61]
金针草、高香豌豆、紫 花苜蓿和大豆	Pm	砂质壤土	是	V	0~5	IR 由圆盘渗透试验得出	[62]
苜蓿、冰草、柠条和毛 针茅 4 种草地类型	3	粉土	是	IV	0~30	IR 由土壤渗透率自动测量系统	[63]
冬麦和草	Pm	粉砂土	是	V	0~115	K_s 由根据多步骤出流实验计算得出; K_u 由张力盘式压力计	[64]
冬凌草	Pm	砂质土	是	V	0~50	IR 由双环和圆盘渗透仪测得	[65]
苜蓿	36	砂质壤土	是	IV	0~5	IR 由双环渗透仪测得	[66]
常春藤和狗牙根	12	黏质砂土	是	V	0~10	裸土 K_s 由降水头法测得	[67]
九种人工草地	2	砂质土	是	V	0~30	IR 由土壤入渗能力自动测量系统测得	[68]
十二种作物	3.7	粉砂黏土	是	IV	0~12	IR 由张力渗透仪测得	[33]

注: 1) *重新填埋土并过 2 mm 的筛, 压至给定容量; **不受干扰的大田土壤; 2) +未清除地上植物部分, 但地表有覆盖物以避免蒸发或蒸腾; ++未清除地上植物部分且未有人工覆盖物; 3) I-在实验室控制条件及重新填埋土柱下生长; II-在户外自然条件下及重新填埋土柱下生长; III-在田间重新填埋土条件下生长, 并获得未受干扰的土柱用于实验室分析; IV-田间采样; V-现场原位测试; 4) Pm-多年生植物; IR-入渗速率。Note: 1) *Repacked soil, which was sieved to 2 mm and compacted to a given bulk density; **Undisturbed soil from the field; 2) +Without removing ground plant, but with a cover to avoid evaporation or transpiration; ++Without removing ground plant with no artificial cover; 3) I- repacked soil column grown in laboratory control conditions; II- repacked soil column grown in outdoors natural conditions; III- repacked soil grown in the field and obtain undisturbed soil columns/cores for laboratory analysis; IV- field core samples/ in-situ test by randomized block design; V- field core samples/ in-situ test by replicated plot experiment; 4) Pm = Perennial plant; IR =Infiltration Rate.



注：A1、A2、A3 分别为粗粒土下乔木/灌丛、草地、作物，B1、B2、B3 分别为细粒土下乔木/灌丛、草地、作物；原始数据（实心圆和空心圆）和箱线图均在图中显示；箱体内的横线显示中位数，箱体的长度反映四分位数范围，区间值表示与均值的 ± 1 倍的标准差。Note: A1, A2, A3 are tree/shrub, grass and crop with coarse-textured soil, respectively and B1, B2, B3 are tree/shrub, grass and crop with fine-textured soil, respectively; both raw data (solid and hollow circle) and box-and-whisker plots are shown. For the latter, the crossbar within the box shows the median, the length of the box reflects the interquartile range, and the whiskers represent the ± 1 standard deviation from the mean.

图3 根系引起 van Genuchten 模型参数 (θ_s 、 α 和 n)、Brooks-Corey 模型参数进气值 (h_b) 和 K_s 的相对 (裸土) 变化图
Fig. 3 Summary of relative change (with the addition of roots) in van Genuchten model parameters and Brooks-Corey model parameter: θ_s (a), n (b), α and h_b (c), K_s (d)

由上可知，植物根系可引起土壤松动现象，导致参数间 $\theta_s/\alpha/h_b$ 和 K_s 的协同变化，出现 θ_s 和土壤持水能力 (α 减小， h_b 增大) 同时增加，但 K_s 减少的趋势。这种现象可描述为根系在以大孔隙损失为代价的情况下，增加孔隙空间的异质性和微孔体积^[17]，可发生于成熟期的乔木/灌丛、粗、细粒土下的草地以及细粒土下的农作物。植物根系也可以占据土壤孔隙，引起土壤压实，增强土壤持水能力，降低 θ_s 和 K_s ，导致土壤孔隙比和孔隙度的降低^[23-24]。这种过程主要发生在细粒土的草地下。相反，由于根系腐烂导致的根系枯萎或粗根扩张等过程，则被认为与土壤持水能力的降低，与 θ_s 和 K_s 的增加有关。该

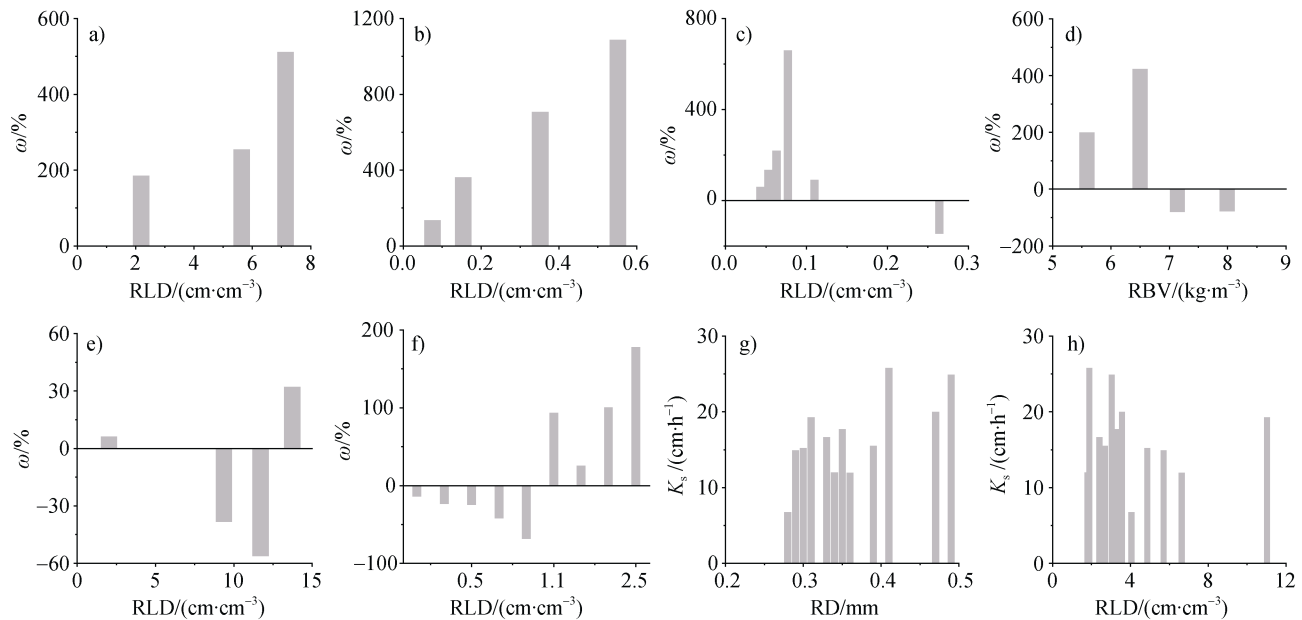
过程通常发生在植被根系较粗和地下生物量较高的情况下，例如苜蓿、豆科植物和林木的根系，并主要发生在粗粒土中。

2.3 根系影响下的饱和导水率特征

植物根系与 K_s 的关系不仅取决于植被类型，也跟不同植被年龄 (如生长期) 下的根系特征密切相关。描述根系特征的主要指标包括根长密度 (RLD)、根体积密度 (RBV) 等，是指单位土体对应的根长、根体积。Leung 等^[56]比较了不同生长期的草和柳树的 RLD 与 K_s 的关系，发现了 K_s 与 RLD 总体上呈线性相关。例如，当草地的 RLD 从 0 (裸土) 增加至 $0.82\sim 7.14\text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时， K_s 增

加了 183%~511%；柳树的 RLD 从 0 增加至 $0.075\sim 0.552\text{ cm}\cdot\text{cm}^{-3}$ 时, K_s 增加了 133%~1 085% (图 4a、图 4b)。然而, 目前的文献数据也表明, 当根系发育到一定水平时 K_s 很有可能会降低, 这可能是由于根系的特殊结构从而对土壤水流形成物理阻碍^[58, 70] (图 4c、图 4d)。另一种响应方式是 K_s 随着植物根系的生长而减少, 而 K_s 会在 RLD/

RBV 达到一个阈值时有所增加 (图 4e、图 4f)。这可能是由于幼龄期植物根系占据土壤孔隙空间, 而在植被成熟期或衰老死亡后植物根系引起大孔隙的产生。其他研究例如 Yu 等^[33] 通过对 12 种农作物进行了田间试验, 发现了 K_s 与根系直径的变化呈正比例关系 (图 4g), 但 K_s 与 RLD 之间不存在明显相关性 (图 4h)。



注: RLD、RBV、RD、 K_s 、 ω 分别代表根长密度、根体积密度、根系直径、饱和导水率、相对变化幅度。Note: RLD, RBV, RD, K_s , and ω refer to root length density, root biomass per unit volume, root diameter, saturated hydraulic conductivity and relative variation, respectively.

图 4 根长密度/根系直径与饱和导水率的关系

Fig. 4 Change of K_s in relation to root length density or root diameter

从表 1 得到的统计数据来看, 直根系作物相比须根系植物, 其 K_s 最大增幅可由 635% 增至 1 376%, 表明直根系作物为土壤贡献了更多的大孔隙, 对导水率的影响更为显著。例如, 草地 (须根系) 与灌木 (直根系) 混合相比于单独草地而言, K_s 变化范围为 -20%~35% 到 -68%~178%, 豆科植物草地 (直根系) 的入渗速率较禾本科 (须根系) 草地高 30%^[58]。在流域尺度下, 随着土壤含水率的增加, 上游子流域坡地的排水速率很大程度上取决于根孔的存在, 因此根系类型会控制土壤中的饱和流形式和产水量^[21]。同时, 径流速率在土壤含水率接近有效孔隙率, 即孔径小于 $50\ \mu\text{m}$ (等效直径) 保持相对恒定, 而当大于 $50\ \mu\text{m}$ 的孔径被水填满时, 流域的径流量会显著增加, 体现了不同根系类型决定

着毛管孔隙和大孔隙分布, 从而影响径流量。

2.4 根系影响下的土壤水力学模型预测研究

如何表述 SWCC 参数、 K_s 、有效孔隙度等参数与植物根系特征之间的关联性, 将对生态水文过程模拟至关重要。一些学者利用 Kosugi 模型 (式 (6)) 来推导根系土的 SHP, 例如, Hayashi 等^[41] 发现自然状态下的森林土壤相比受人类活动干扰的土壤, 含有更多的大孔和较少的中等孔隙, 并且 K_s 与孔径中位数 (r_m) 的平方成正比。Bodner 等^[17] 指出, 粗根型豆科植物物种具有较高的 r_m , 使 PSD 向大孔范围移动; 而拥有细根的密集根系通过 σ 的增加等, 可增强孔隙系统的异质性。这些研究通过建立起根系-PSD- K_s 之间的联系, 可以预测根系对 SHP 的改变形式。此外, 有学者假设根系在粗粒土中占据土

壤孔隙会减少土壤孔径，根据毛管定律 Young-Laplace^[57]可知， r_m 减少将导致基质吸力和进气吸力增加。Maggi 和 Porporato^[71]在推导土壤水分特征模型中借鉴了类似的理论，考虑了微生物占据土壤孔隙，引起分形维数、PSD 和进气吸力的变化，从而实现 SWCC 的动态预测。前人通过构建孔隙网络模型（例如 Pore-Core 模型），或者利用先进的 X 射线断层摄影技术获取土壤水分分布图像等，反演孔隙大小和连通性参数，从而计算出 K_s ^[25]。

上述研究在解释根系影响 SHP 的物理机制上均做了有意义的探索，但土壤和根系之间的生物化学作用则无法用准确的数学模型描述，但也有研究结合 Richards 方程对根系吸水模型做了一些改进。根系分泌的黏液在脱湿过程中可以长时间保持较高的土壤含水量，而在灌溉过程中会延迟土壤再润湿。基于此，Kroener^[72]建立了根际非平衡水动力学模型，该模型假设与非根际土壤相比，黏液的不同干燥/湿润速率导致根际土壤含水量和水势之间的不平衡关系。与根系分泌黏液引起的保水性增加相比，黏液黏度对水力传导率的影响更大，例如粗砂土壤中生长的植物根系若能分泌高浓度的黏液可增强土壤的持水能力并减小导水率，并与细砂和粉土的导水率处于同一个量级^[73]。如何充分定义土壤和根系之间的生物化学作用并进行参数化，以及应用到大尺度上准确评估其水文效应仍然是土壤水文学的一大挑战^[74]。

3 结论与展望

本文回顾了国内外现有研究，总结了根系影响 SHP 的关键过程、定量数据、经验和物理关系模型。根系引起 SHP 的变化取决于不同过程的主导地位，包括根系生长（或死亡）、根系密度和根系直径以及土壤质地。目前已有研究建立了 SHP 与根长密度、根龄、根系直径之间的线性关系。在水文模拟中忽略根系引起 SHP 改变，可能会给 SHP 率定带来更多的不确定性。总体而言，目前还缺乏关于植物改变（以及根系）引起 SHP 变化的定量描述，特别是对于研究和评估当地和生态系统尺度下的土壤、地下水和流域类型的水文学家，还存在许多重要的实际问题，例如，环境的改变以及人类活动可能掩盖了单纯根系对土壤的作用，阻碍了流域尺度上根系土

的参数化。进一步而言，由于深根植物作为水流运动的重要路径，未来研究还需考虑深根植物对深层 SHP 的影响。植物根系深度分布变化如何影响孔隙结构，从而控制水量分配、生物地球化学转化、调节流域功能等已成为重要科学问题^[13]。

未来水文研究可能遇到的挑战是：目前的实验研究大多是基于均质土和单一植被下进行的小尺度田间或土柱实验。鉴于流域湿地通常存在多种植被共同生长，土壤不仅存在强烈的空间异质性，并且存在明显的土壤分层，因此这些实验数据可能并不适用于较大的流域尺度。未来需要开展大量工作来探索流域尺度上的根系参数化，包括对具有不同植物多样性的混合植物，在较大规模上开展原位实验，并考虑土壤水、SHP 与地下水位之间的相互作用。进一步而言，还应考虑根系构型分析例如根系直径、根长密度等，因为它有助于将单个植物根系尺度上发生的过程上升到流域尺度上。同时，可利用地上生物量与地下生物量的分配关系，建立起地下生物量与 LAI、NDVI 等的关系，便可借助遥感影像提升根系作用的应用尺度。此外，如何将根系参数纳入土壤结构，进一步耦合水文模型是未来的研究热点。

植物季节性生长、人类活动或气候变化引起的植被覆被变化及相应的根系分布动态是造成流域土壤结构变化的主要原因，因此需要加深对土壤结构形成物理学的理解。随着土壤结构变化和根系生长的机制和速率等参数更容易获取，这些功能与作用可通过模型来表征以模拟动态土壤结构过程，包括土壤团聚体和结构动力学、土壤有机碳动力学、生物扰动、植物生产力和养分吸收、水流和溶质迁移等反应网络^[75]，并且可通过 PTFs 引入土壤结构和水力特性联系起来，从而整合到生态水文模型中。由于 SHP 本身高度依赖于尺度效应，而植物根系对 SHP 的改变涉及不同尺度，范围从单个根系的根际尺度，到土壤中大孔隙结构的发展，再到整个集水区的排水。因此，未来应加强不同尺度下植物根系相关过程控制下的土壤结构并构建其动力学模型的研究，同时应注意将不同模型联系起来以解决多个尺度的综合问题^[4]。目前全球同时存在绿化或褐变（地表裸露）的不同趋势，这意味着有必要在不同尺度上评估陆地植被变化对水循环、生物地球化学循环的影响，而根系作用可能在其中占据重要位置。这些均是巨大的机遇，但要在根-土复合系统的定量动

态表述及其耦合水文模型方面取得进展, 未来研究过程中需要广大学者在土壤物理学、景观工程、水文模拟、环境科学等交叉领域进行实质性的合作, 从而弥补传统学科之间的差距。

参考文献 (References)

- [1] Paustian K, Lehmann J, Ogle S, et al. Climate-smart soils[J]. *Nature*, 2016, 532 (7597): 49—57.
- [2] Amundson R, Berhe A A, Hopmans J W, et al. Soil and human security in the 21st century[J]. *Science*, 2015, 348 (6235): 1261071.
- [3] de Jong R, Verbesselt J, Schaepman M E, et al. Trend changes in global greening and browning: Contribution of short-term trends to longer-term change[J]. *Global Change Biology*, 2012, 18 (2): 642—655.
- [4] Fatichi S, Or D, Walko R, et al. Soil structure is an important omission in Earth System Models[J]. *Nature Communications*, 2020, 11: 522.
- [5] Zhang G L, Shi Z, Zhu A X, et al. Progress and perspective of studies on soils in space and time[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2020, 57 (5): 1060—1070. [张甘霖, 史舟, 朱阿兴, 等. 土壤时空变化研究的进展与未来[J]. *土壤学报*, 2020, 57 (5): 1060—1070.]
- [6] Katul G G, Oren R, Manzoni S, et al. Evapotranspiration: A process driving mass transport and energy exchange in the soil-plant-atmosphere-climate system[J]. *Reviews of Geophysics*, 2012, 50 (3): RG3002.
- [7] Oki T, Kanae S. Global hydrological cycles and world water resources[J]. *Science*, 2006, 313 (5790): 1068—1072.
- [8] Cleveland C C, Houlton B Z, Smith W K, et al. Patterns of new versus recycled primary production in the terrestrial biosphere[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2013, 110 (31): 12733—12737.
- [9] Fisher R F, Binkley D. *Ecology and Management of Forest Soils*[M]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, Ltd, 2012.
- [10] Vereecken H, Weiermüller L, Assouline S, et al. Infiltration from the pedon to global grid scales: An overview and outlook for land surface modeling[J]. *Vadose Zone Journal*, 2019, 18 (1): 1—53.
- [11] Lei Z D, Hu H P, Yang S X. A review of soil water research[J]. *Advances in Water Science*, 1999, 10 (3): 311—318. [雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. *水科学进展*, 1999, 10 (3): 311—318.]
- [12] Yang D W, Cong Z T, Shang S H, et al. Research advances from soil water dynamics to ecohydrology[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2016, 47 (3): 390—397. [杨大文, 丛振涛, 尚松浩, 等. 从土壤水动力学到生态水文学的发展与展望[J]. *水利学报*, 2016, 47 (3): 390—397.]
- [13] Sullivan P L, Billings S A, Hirmas D, et al. Embracing the dynamic nature of soil structure: A paradigm illuminating the role of life in critical zones of the Anthropocene[J]. *Earth-Science Reviews*, 2022, 225: 103873.
- [14] Chen X, Song Q F, Gao M, et al. Vegetation-soil-hydrology interaction and expression of parameter variations in ecohydrological models[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52 (3): 362—368. [陈喜, 宋琪峰, 高满, 等. 植被—土壤—水文相互作用及生态水文模型参数的动态表述[J]. *北京师范大学学报(自然科学版)*, 2016, 52(3): 362—368.]
- [15] Vereecken H, Weynants M, Javaux M, et al. Using pedotransfer functions to estimate the van genuchten-mualem soil hydraulic properties: A review[J]. *Vadose Zone Journal*, 2010, 9 (4): 795—820.
- [16] Wu H W. Atmosphere-plant-soil interactions: Theories and mechanisms[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2017, 39 (1): 1—47. [吴宏伟. 大气-植被-土体相互作用: 理论与机理[J]. *岩土工程学报*, 2017, 39 (1): 1—47.]
- [17] Bodner G, Leitner D, Kaul H P. Coarse and fine root plants affect pore size distributions differently[J]. *Plant and Soil*, 2014, 380 (1/2): 133—151.
- [18] Marcacci K M, Warren J M, Perfect E, et al. Influence of living grass roots and endophytic fungal hyphae on soil hydraulic properties[J]. *Rhizosphere*, 2022: 100510.
- [19] Shi X Q, Qin T L, Yan D H, et al. A meta-analysis on effects of root development on soil hydraulic properties[J]. *Geoderma*, 2021, 403: 115363.
- [20] Ghestem M, Sidle R C, Stokes A. The influence of plant root systems on subsurface flow: Implications for slope stability[J]. *BioScience*, 2011, 61 (11): 869—879.
- [21] Deeks L K, Bengough A G, Low D, et al. Spatial variation of effective porosity and its implications for discharge in an upland headwater catchment in Scotland[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 290 (3/4): 217—228.
- [22] Shao W, Li M J, Wu Y, et al. Identification of varied soil hydraulic properties in a seasonal tropical rainforest[J]. *Catena*, 2022, 212: 106104.
- [23] Scholl P, Leitner D, Kammerer G, et al. Root induced changes of effective 1D hydraulic properties in a soil column[J]. *Plant and Soil*, 2014, 381 (1/2): 193—213.
- [24] Leung A K, Garg A, Ng C W W. Effects of plant roots on soil-water retention and induced suction in vegetated soil[J]. *Engineering Geology*, 2015, 193: 183—197.
- [25] Holtham D A L, Matthews G P, Scholefield D S. Measurement and simulation of void structure and hydraulic changes caused by root-induced soil structuring under white clover compared to ryegrass[J]. *Geoderma*,

- 2007, 142 (1/2): 142—151.
- [26] Bormann H, Breuer L, Gräff T, et al. Analysing the effects of soil properties changes associated with land use changes on the simulated water balance: A comparison of three hydrological catchment models for scenario analysis[J]. *Ecological Modelling*, 2007, 209(1): 29—40.
- [27] Mahe G, Paturol J E, Servat E, et al. The impact of land use change on soil water holding capacity and river flow modelling in the Nakambe River, Burkina-Faso[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 300 (1/2/3/4): 33—43.
- [28] Šipek V, Jačka L, Seyedsadr S, et al. Manifestation of spatial and temporal variability of soil hydraulic properties in the uncultivated Fluvisol and performance of hydrological model[J]. *Catena*, 2019, 182: 104119.
- [29] Lu J R, Zhang Q, Li Y L, et al. Impact of typical plant roots on vertical soil water movement in Poyang Lake Wetland: A numerical study[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40 (5): 2180—2189. [鲁建荣, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地植物根系对水分垂向通量的影响[J]. *中国环境科学*, 2020, 40 (5): 2180—2189.]
- [30] Milly P C D. Estimation of Brooks-Corey Parameters from water retention data[J]. *Water Resources Research*, 1987, 23 (6): 1085—1089.
- [31] Kosugi K. Lognormal distribution model for unsaturated soil hydraulic properties[J]. *Water Resources Research*, 1996, 32 (9): 2697—2703.
- [32] van Genuchten M T. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1980, 44 (5): 892—898.
- [33] Yu Y, Loiskandl W, Kaul H P, et al. Estimation of runoff mitigation by morphologically different cover crop root systems[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 538: 667—676.
- [34] Bruand A, Cousin I, Nicoullaud B, et al. Backscattered electron scanning images of soil porosity for analyzing soil compaction around roots[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1996, 60 (3): 895—901.
- [35] Koebernick N, Naveed M, Daly K, et al. Root induced compaction alleviation by root hairs-visualization with synchrotron imaging[C]. *EGU General Assembly Conference Abstracts*, 2018: 8410.
- [36] Logsdon S D, Timlin D, Ahuja L R. Root effects on soil properties and processes: Synthesis and future research needs[J]. *Newspaper Research Journal*, 2013.
- [37] Whalley W R, Riseley B, Leeds-Harrison P B, et al. Structural differences between bulk and rhizosphere soil[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56 (3): 353—360.
- [38] Zhou Y Y, Xu K, Chen J P, et al. Mechanism of plant lateral root reinforcing soil based on CT scan and mesomechanics analysis[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(1): 1—9. [周云艳, 徐琨, 陈建平, 等. 基于 CT 扫描与细观力学的植物侧根固土机理分析[J]. *农业工程学报*, 2014, 30 (1): 1—9.]
- [39] Poirier V, Roumet C, Munson A D. The root of the matter: Linking root traits and soil organic matter stabilization processes[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2018, 120: 246—259.
- [40] Milleret R, le Bayon R C, Lamy F, et al. Impact of roots, mycorrhizas and earthworms on soil physical properties as assessed by shrinkage analysis[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 373 (3/4): 499—507.
- [41] Hayashi Y, Ken'ichirou K, Mizuyama T. Changes in pore size distribution and hydraulic properties of forest soil resulting from structural development[J]. *Journal of Hydrology*, 2006, 331 (1/2): 85—102.
- [42] Carminati A, Schneider C L, Moradi A B, et al. How the rhizosphere may favor water availability to roots[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10 (3): 988—998.
- [43] Li S, Yang Y C, Yao Y Y, et al. Effects of different land-use types on physical and chemical properties of coastal saline-alkali soils in Shandong Province[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2022, 59 (4): 1012—1024. [李珊, 杨越超, 姚媛媛, 等. 不同土地利用方式对山东滨海盐碱土理化性质的影响[J]. *土壤学报*, 2022, 59 (4): 1012—1024.]
- [44] Sharma S K, Mohanty B P, Zhu J T. Including topography and vegetation attributes for developing pedotransfer functions[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2006, 70 (5): 1430—1440.
- [45] Jana R B, Mohanty B P. Enhancing PTFs with remotely sensed data for multi-scale soil water retention estimation[J]. *Journal of Hydrology*, 2011, 399 (3/4): 201—211.
- [46] Niemeyer R J, Fremier A K, Heinse R, et al. Woody vegetation increases saturated hydraulic conductivity in dry tropical Nicaragua[J]. *Vadose Zone Journal*, 2014, 13 (1): 1—11.
- [47] Cannavo P, Michel J C. Peat particle size effects on spatial root distribution, and changes on hydraulic and aeration properties[J]. *Scientia Horticulturae*, 2013, 151: 11—21.
- [48] Chen R, Huang J W, Chen Z K, et al. Effect of root density of wheat and okra on hydraulic properties of an unsaturated compacted loam[J]. *European Journal of Soil Science*, 2019, 70 (3): 493—506.
- [49] Fraccica A, Romero E, Fourcaud T. Multi-scale effects on the hydraulic behaviour of a root-permeated and compacted soil[J]. *E3S Web of Conferences*, 2019, 92: 12014.
- [50] Ni J J, Leung A K, Ng C W W. Unsaturated hydraulic properties of vegetated soil under single and mixed

- planting conditions[J]. *Géotechnique*, 2019, 69 (6): 554—559.
- [51] Song L, Li J H, Zhou T, et al. Experimental study on unsaturated hydraulic properties of vegetated soil[J]. *Ecological Engineering*, 2017, 103: 207—216.
- [52] Yuge K, Shigematsu K, Anan M, et al. Effect of crop root on soil water retentivity and movement[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, 3 (12): 1782—1787.
- [53] Głab T, Szewczyk W. Influence of simulated traffic and roots of turfgrass species on soil pore characteristics[J]. *Geoderma*, 2014, 230/231: 221—228.
- [54] Rahardjo H, Satyanaga A, Leong E C, et al. Performance of an instrumented slope covered with shrubs and deep-rooted grass[J]. *Soils and Foundations*, 2014, 54 (3): 417—425.
- [55] Wahren A, Feger K H, Schwärzel K, et al. Land-use effects on flood generation-considering soil hydraulic measurements in modelling[J]. *Advances in Geosciences*, 2009, 21: 99—107.
- [56] Leung A K, Boldrin D, Liang T, et al. Plant age effects on soil infiltration rate during early plant establishment[J]. *Géotechnique*, 2017, 68 (7): 646—652.
- [57] Scanlan C. Processes and effects of root-induced changes to soil hydraulic properties[D]. University of Western Australia, 2009.
- [58] Vergani C, Graf F. Soil permeability, aggregate stability and root growth: A pot experiment from a soil bioengineering perspective[J]. *Ecohydrology*, 2016, 9 (5): 830—842.
- [59] Archer N A L, Quinton J N, Hess T M. Below-ground relationships of soil texture, roots and hydraulic conductivity in two-phase mosaic vegetation in South-east Spain[J]. *Journal of Arid Environments*, 2002, 52 (4): 535—553.
- [60] Bormann H, Klaassen K. Seasonal and land use dependent variability of soil hydraulic and soil hydrological properties of two Northern German soils[J]. *Geoderma*, 2008, 145 (3/4): 295—302.
- [61] Fischer C, Tischer J, Roscher C, et al. Plant species diversity affects infiltration capacity in an experimental grassland through changes in soil properties[J]. *Plant and Soil*, 2015, 397 (1/2): 1—16.
- [62] Hu W, Shao M G, Wang Q J, et al. Temporal changes of soil hydraulic properties under different land uses[J]. *Geoderma*, 2009, 149 (3/4): 355—366.
- [63] Huang Z, Tian F P, Wu G L, et al. Legume Grasslands Promote Precipitation Infiltration better than Gramineous Grasslands in arid Regions[J]. *Land Degradation & Development*, 2017, 28 (1): 309—316.
- [64] Kodešová R, Jirků V, Kodeš V, et al. Soil structure and soil hydraulic properties of Haplic Luvisol used as arable land and grassland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2011, 111 (2): 154—161.
- [65] Lichner L, Eldridge D J, Schacht K, et al. Grass cover influences hydrophysical parameters and heterogeneity of water flow in a sandy soil[J]. *Pedosphere*, 2011, 21 (6): 719—729.
- [66] Meek B D, DeTar W R, Rechel E R, et al. Infiltration rate as affected by an alfalfa and no-till cotton cropping system[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1990, 54 (2): 505—508.
- [67] Ng C W W, Ni J J, Leung A K. Effects of plant growth and spacing on soil hydrological changes: A field study[J]. *Géotechnique*, 2020, 70 (10): 867—881.
- [68] Wu G L, Yang Z, Cui Z, et al. Mixed artificial grasslands with more roots improved mine soil infiltration capacity[J]. *Journal of Hydrology*, 2016, 535: 54—60.
- [69] Soil A C D-O, Rock. Standard Practice for Classification of Soils for Engineering Purposes (Unified Soil Classification System) 1[M]. ASTM international, 2017.
- [70] Jotiskansa A, Sirirattanachat T. Effects of grass roots on soil-water retention curve and permeability function[J]. *Canadian Geotechnical Journal*, 2017, 54 (11): 1612—1622.
- [71] Maggi F, Porporato A. Coupled moisture and microbial dynamics in unsaturated soils[J]. *Water Resources Research*, 2007, 43 (7): W07444.
- [72] Kroener E, Zarebanadkouki M, Bittelli M, et al. Simulation of root water uptake under consideration of nonequilibrium dynamics in the rhizosphere[J]. *Water Resources Research*, 2016, 52 (8): 5755—5770.
- [73] Kroener E. Perspectives from the Fritz-Scheffer Awardee 2017. How mucilage affects soil hydraulic dynamics[J]. *Journal of Plant Nutrition and Soil Science*, 2021, 184 (1): 20—24.
- [74] Roque-Malo S, Woo D K, Kumar P. Modeling the role of root exudation in critical zone nutrient dynamics[J]. *Water Resources Research*, 2020, 56 (8): e2019WR026606.
- [75] Giannakis G V, Nikolaidis N P, Valstar J, et al. Integrated critical zone model (1D-ICZ): A tool for dynamic simulation of soil functions and soil structure[J]. *Advances in Agronomy*, 2017, 142: 277—314.

(责任编辑: 檀满枝)