

文章编号: 1672-3317(2023)04-0100-09

砾石对土壤水文过程影响研究进展与展望

苏智冉, 郭加伟, 张锦豪, 牛晨宇, 曾麒洁, 张志华*
(河南农业大学 林学院, 郑州 450002)

摘要: 【目的】综述砾石对土壤水文过程影响, 总结石质土壤水文过程研究存在的问题与挑战, 展望未来研究方向。【方法】本文主要介绍了砾石结构(砾石覆盖度、砾石量、粒径等)对土壤入渗、径流、壤中流、优先流和水分蒸发等土壤水文过程的影响, 并分析了目前用于模拟和定量表征砾石对土壤水文过程影响的数学模型研究进展。【结果】砾石对土壤水文过程的影响机制尚不明确, 现有研究方法不能满足对砾石与土壤水文过程之间错综复杂关系的研究, 土壤砾石结构的定量化、异质性及土壤水文参数的定量表达还未被纳入数学模型参数, 缺乏多要素、多尺度的砾石水文过程模拟, 没有准确可靠的尺度转换理论和方法, 无法实现不同尺度上砾石和水文信息的转换。【结论】如何将新技术引入到研究中, 更新研究方法、明确影响机理、丰富研究内涵、提高数据精度, 是该研究要解决的关键问题; 深层土壤中的砾石特征及其对壤中流和优先流的影响研究、不同尺度上砾石和水文信息的转换以及多尺度数学模型的建立是未来研究的重要方向。

关键词: 砾石; 入渗; 地表径流; 壤中流; 优先流; 蒸发

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

doi: 10.13522/j.cnki.ggps.2022220

OSID:



苏智冉, 郭加伟, 张锦豪, 等. 砾石对土壤水文过程影响研究进展与展望[J]. 灌溉排水学报, 2023, 42(4): 100-107, 136.
SU Zhiran, GUO Jiawei, ZHANG Jinhao, et al. Influence of Rock Fragments on Subsurface Hydrological Processes: Progresses and Perspectives[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2023, 42(4): 100-107, 136.

0 引言

土壤水文过程是指水分进出土体以及在土壤内的再分布过程^[1], 是陆地水循环过程中的重要组成部分^[2], 对科学管理水资源、保障区域水安全、实现联合国 2030 年可持续发展目标具有重要意义^[3]。土壤水文过程受多种因素影响, 如砾石、植被、地形、气候、土壤质地、土壤体积质量和孔隙度等^[4-6]。砾石是由岩石风化而来的、直径大于 2 mm 的矿物质颗粒, 广泛分布于国内外的土壤中, 与细土相互作用构成土壤的骨架结构; 其密度比细土大, 透水性能较差, 分布于土壤中, 会使土壤的理化性质和水力特性发生改变^[7], 显著影响土壤的水文过程^[8]。砾石主要通过影响地表侵蚀情况、改变地表粗糙程度和土壤的孔隙结构^[9], 使水分的流动路径和流动速率发生改变, 从而对土壤的入渗性能、径流、壤中流、优先流和土壤蒸发造成重要影响^[10], 且随着砾石大小、砾石量、砾石位置以及砾石覆盖度的改变, 其产生的影响更加复杂

多变^[11]。

砾石在土壤水文过程中发挥的重要作用已经得到了国内外众多学者的认可, 然而对于二者之间的关系研究并未得出统一结论。Jomaa 等^[12]、Poesen 等^[13]研究认为, 砾石的存在增强了土壤水分的入渗能力, 减少了坡面径流, 减弱了土壤侵蚀, 对土壤的保水持水能力有积极作用; Hlaváčiková 等^[14]、朱元骏等^[15]研究显示, 砾石可降低土壤饱和和导水率, 抑制土壤入渗, 从而促进径流的产生, 增加坡面侵蚀; 王小燕等^[16]、王慧芳等^[17]研究发现, 砾石量、粒径与土壤入渗之间的关系并非单一的正相关或负相关关系, 而是存在一个阈值。由于砾石对土壤水文过程的影响随地形、气候、土壤结构、砾石分布特征及物理化学过程等因素的改变而不断变化^[18], 导致目前仍然很难定量准确地描述二者之间的关系^[19]。

由此可知, 砾石对土壤水文过程的影响并无统一结论, 是土壤水文研究中的重要挑战。本文从砾石量、粒径、覆盖度 3 个方面评述砾石对水分入渗、地表径流、壤中流、优先流和土壤水分蒸发等水文过程的影响, 分析目前用于模拟和定量表征砾石对土壤水文过程影响的数学模型, 确定存在的问题与挑战, 并就相关研究趋势、需求和前景进行探讨, 以期为国内该领域相关研究提供借鉴。

收稿日期: 2022-04-21

基金项目: 国家自然科学基金项目(41807174); 河南省教育厅重点项目(18A220002); 河南省科技攻关项目(182102311008)

作者简介: 苏智冉(1998-), 男, 河南洛阳人。硕士研究生, 主要从事生态水文学和水土土壤学方向研究工作。E-mail: Mr.suran@outlook.com

通信作者: 张志华(1984-), 女, 宁夏吴忠人。副教授, 主要从事生态水文学和水土土壤学方向研究工作。E-mail: zhihua1221@163.com

1 研究进展

土壤水文过程包括水分入渗、地表径流、壤中流、优先流和土壤蒸发,这5个水文过程之间相互联系、相互影响,在不同环境条件下形成不同规模的水循环。砾石通过改变地表粗糙程度、土壤结构等影响土壤水文过程。覆盖于表层的砾石,改变了地表的粗糙程度,影响土壤的入渗性能,促进或抑制径流的产生,也可作为地表覆盖物,减小水分蒸发面积,抑制水分蒸发过程;分布于内部的砾石与土壤结合不紧密,从而形成孔隙,影响水分入渗性能,孔隙之间相互连通形成大孔隙,促进优先流和壤中流的产生。由于土壤水文过程之间是相互联系、相互影响的,所以砾石可通过影响某一水文过程,间接改变其他水文过程^[20]。

1.1 砾石对水分入渗的影响

水分入渗是指降水或者灌溉时,地表水沿岩土空隙渗入土壤的过程^[21]。土壤的渗透能力是土壤水分调节能力的重要指标之一^[22],决定了水分再分配,对壤中流、优先流和地表径流的形成具有重要意义。砾石量、粒径主要通过改变土壤结构影响土壤水分入渗过程;砾石覆盖度则通过影响地表粗糙程度改变土壤入渗过程。

砾石量主要通过改变土壤的孔隙结构进而影响水分下渗路径,是水分入渗的重要影响因素之一。砾石量与土壤入渗过程之间的关系通常表现为以下3种情况:第一,砾石大小一定的情况下,砾石量与入渗成反比。吕刚等^[11]研究发现,辽西低山丘陵区坡地砾石大小一定时,随着砾石量的增加,累积入渗量减小。第二,砾石量与入渗成正比。Bouwer等^[23]研究发现,“砂-砾”混合介质水分扩散率较砂土高,即砾石存在增加了土壤的入渗能力。第三,砾石量对土壤入渗能力不是一味地增加或减小,而是存在一个阈值^[24]。李燕等^[25]研究发现,紫色土的平均入渗率随碎石量的增加呈先增加后减小的趋势。王小燕等^[16]研究发现,当砾石量在20%~30%时,土壤入渗能力随砾石量的增加而增加,砾石量大于30%时,土壤的入渗能力被削弱。砾石对土壤入渗过程的影响是各种因素综合作用产生的结果。砾石量较小时,砾石的存在使土壤中的非毛管孔隙的比例和大孔隙数量增多,极易形成联通的大孔隙,显著促进水分入渗^[10],砾石量越小,土壤与砾石之间结构越紧密,土壤的入渗能力被削弱,此时的砾石量与入渗能力正相关^[17];随着砾石量的进一步增大,砾石的不透水性使水分下渗的过水断面面积减小,土壤水分下渗路径延长,不利于水分下渗,砾石量与入渗能力负相关^[16]。

砾石粒径改变了土壤大孔隙量和水分入渗路径,

与土壤入渗之间可能存在正相关,也可能存在负相关。党宏宇^[26]对喀斯特山区含土石混合介质隔层的土壤水分入渗状况进行了研究,结果显示,小砾石会形成更多水分运动通道,增加水分入渗,大砾石会阻碍水分向下运动的通道,抑制土壤入渗过程。当砾石粒径较小时,土壤中具有较好的孔隙结构,联通的孔隙对水分具有疏导作用,促进土壤入渗^[27];随着砾石粒径的增大,土壤中形成的孔道半径越大,造成不连续的大孔隙产生的可能性增加,不利于土壤水分入渗,当大径级砾石大量存在时,受砾石量、砾石空间分布、砾石间的相互作用等影响,过水断面逐渐减少并且水分入渗路径更加弯曲复杂,从而延缓土壤入渗^[26, 28]。然而,随着砾石量的增加,大孔隙及土壤水通道数量增加,促进了土壤水分的快速运移,形成优先流,增加入渗。因此,砾石粒径与土壤入渗之间的关系尚不明确。

砾石覆盖改变了土壤表面的粗糙度与表土结构稳定性,对土壤入渗过程的影响复杂多变。Poesen等^[29]通过人工降雨的方式模拟野外砾石覆盖条件下砾石覆盖对雨后水分入渗过程的影响,研究发现,表层砾石覆盖对土壤入渗过程的影响主要取决于砾石在土壤表面的存在形态。若砾石镶嵌于土壤中形成表层结皮^[30],便会封堵水分入渗通道^[31],降低表面水分入渗的比例,同时降低地表粗糙度,增加地表径流,减少水分入渗;若砾石平铺于土壤表层,可使土壤表面粗糙多孔,增加了降水入渗比例,同时又减少了雨滴滴溅,对土壤表面提供额外的保护,增加水分入渗。

1.2 砾石对地表径流的影响

在降水过程中,当降水强度大于土壤的入渗能力时,超出下渗能力的降水在地表流动,形成地表径流。地表径流的产生一般都会伴随着水土流失和溶质迁移,极易引发坡面土壤侵蚀和养分流失^[32],造成生态环境破坏。覆盖于土壤表层的砾石对水分具有分流作用,直接影响地表径流量和径流流速;土壤内部砾石则改变土壤的孔隙结构,间接影响地表径流的产生。

砾石量会改变土壤的孔隙结构,影响土壤的入渗性能,进而影响地表径流量和径流速率。Chow等^[33]在模拟降雨的条件下研究了砾石量对地表径流的影响,结果表明,当砾石量从7%增加到25%时,地表径流随砾石量的增加而减小。吴冰^[34]在砾石对坡面径流及入渗影响的研究中发现,含砾石土壤的坡面径流量和流速大于土壤不含砾石的坡面。郑腾辉等^[35]发现连续模拟降雨条件下,当砾石量从0增加到30%时,径流量增加,砾石量与地表径流量正相关;当砾石量从30%增加到70%时,径流量减小,砾石量与地表径流量负相关。砾石量较低时,土体结构较为紧密,水

分入渗能力降低,水分更多地以地表径流的方式流走;砾石量较高时,砾石和周围土壤基质的裂缝会增加,土体中连通的大孔隙结构开始逐步形成,水分能够快速向下移动,形成优先流和壤中流,导致地表径流流速大幅降低。

砾石覆盖度通过改变地表的粗糙程度和土壤孔隙结构,影响地表径流的产生和发展。若砾石嵌入土壤表面,随着砾石覆盖度的增加,砾石与土壤基质相互作用形成的结皮面积显著增加,从而导致入渗性能降低,地表径流量显著增加^[36],此时的砾石覆盖度与地表径流正相关^[37]。Poesen 等^[29]、Valentin^[38]研究发现,当砾石嵌入土壤表面时,地表径流量和径流速率显著大于平铺土壤表面。当砾石平铺于土壤表层时,随着砾石覆盖度的增加,水分会更快速、更深的入渗到土壤剖面,显著增大入渗^[39],减少地表径流的产生^[12]。Zavala 等^[40]研究表明,径流速率随砾石覆盖度的增加而降低。

表层覆盖砾石的粒径影响了地表拦截径流的能力,从而促进或抑制地表径流的形成。Guo 等^[41]通过对黄土丘陵区砾石覆盖土壤的溶质运移研究发现,砾石覆盖度和粒径对地表径流有显著影响,地表径流随覆盖砾石粒径的增加而增加。砾石粒径对地表径流的影响可以解释为较大粒径的砾石与弥散度呈显著正相关关系,更易形成地表径流;小砾石则对水动力弥散作用很小,土壤对水流的阻力较大,从而增加了土壤入渗^[42],不利于地表径流的形成。因此,在保护土壤减小地表径流方面,小砾石比大砾石更重要。

1.3 砾石对壤中流的影响

壤中流是在土壤中沿不同透水性土壤层界面流动的水流^[43],对流域径流形成、土壤养分流失和土壤侵蚀等具有重要影响^[44]。

砾石量通过改变土壤的孔隙结构,影响壤中流的产生和发展。土壤孔隙结构越松散,越易形成大量壤中流,砾石的存在使土壤内部结构变得松散多孔^[45],更有利于壤中流的形成。王蕙等^[46]研究表明,砾石量显著影响嵌套砾石红壤坡面的壤中流初始产流时间、产流速率和径流过程。汪涛等^[47]研究发现,紫色土地区砾石量较多且土壤质地疏松多孔,使得水分更加容易向更深层次土壤入渗^[48],进而在土壤相对不透水层以上形成壤中流,砾石的不透水性又使得土壤的入渗量减小,水分更多地以地表径流的方式流失^[49],水分运移至土壤深层的时间延长,不利于壤中流的形成。

砾石覆盖通过改变地表径流量和土壤的入渗性能,影响壤中流的产生。王小燕等^[50]通过对砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程的研究发现,砾石覆盖可增加

壤中流,促进壤中流的发生。随着砾石覆盖度的增加,壤中流产流时间减小,壤中流径流速率及径流系数提高。砾石覆盖可以保护表土免受雨滴滴溅,减小地表径流^[51,55]、增加入渗量^[12],致使土壤水更多地向下移动,土壤含水率增加,在相同时间内湿润锋能移动到更深土层,极大地缩短了壤中流的产生时间,提高了壤中流径流速率。但徐勤学等^[52]在紫色土坡地的研究显示,壤中流产流量与地表结皮存在一定的相关性。砾石镶嵌于土壤中形成结皮,增加地表径流、减小入渗,并使深层土壤渐趋干化^[53],从而抑制了壤中流的发生。

1.4 砾石对土壤优先流的影响

优先流是指水流及溶质沿着孔隙、裂隙等原生或次生通道等导水能力强的渗透路径,绕过土壤基质,以不同于达西定律的形式,快速到达土体深部和地下水的一种非平衡流现象^[54-56],也被称为优势流、大孔隙流。该水文过程产生的原因是由于土壤中不同的孔隙互相连通形成了大的孔隙系统和裂隙网络,水分和溶质沿着孔隙和裂缝的优势通道自上而下快速入渗^[57]。优先流是广泛存在于土壤中的水和溶质运移形式,对土壤养分运输和环境污染有很大影响^[58]。石质土壤拥有良好的土壤通透性和较高的饱和渗透系数,极易产生优先流^[59]。

土壤优先流主要发生在半径大于 1.5 mm 的大孔隙中^[60],砾石的存在破坏了土壤中小孔隙的连续性,形成了较多的大孔隙。刘中^[61]利用染色示踪法对紫色土不同砾石量下的土壤优先流特征研究发现,砾石量会影响优先流的发生和发展,当砾石量低于 10% 时,优先流染色路径比值小于 15%,而当砾石量大于 20% 时,优先流染色路径比值高于 60%。当砾石量较低时,土壤孔隙短小且结构发育不成熟,不利于优先流的产生。随着砾石量的增加,砾石与砾石之间的接触也随之增加,土壤大孔隙的平均半径和体积增大,尤其是土壤内部半径大于 1.4 mm 的大孔隙密度显著增大,土壤大孔隙结构开始逐渐成形,而小孔隙密度的变化不显著;随着砾石量的进一步增加,土壤内部形成大量连续的优先流通道,土壤水分的流动区域增加,从而形成大量的优先流现象^[62]。

覆盖于土壤表层的砾石通过截留降雨和增加表土孔隙度的方式,提高土壤导水率,增加入渗量,进而加快优先流的产生^[63]。Li 等^[64]对入渗量和优先流的关系研究发现,当入渗量超过 40 mm 时,通过大孔隙向深层输送的溶质量将增加,水分入渗可以促进优先流路径的发展。然而,张立恒等^[53]、李昌龙等^[65]研究发现,砾石与表层土壤形成的结皮会阻断水分下渗路径,减小入渗量,抑制优先流的产生

和发展。

1.5 砾石对土壤水分蒸发过程的影响

土壤蒸发是土壤孔隙中的水分由液态转变为气态返回大气的过程。土壤蒸发可以反映土壤的保水能力，是陆地水循环的重要组成部分^[66-68]。砾石会改变土壤结构，显著影响土壤水分蒸发过程。

砾石量通过改变土壤内部孔隙的大小和数量，进而影响土壤蒸发过程。朱元骏等^[69]研究发现，土壤蒸发量随土壤里的钙结石量的增加而减少；刘大有等^[70]研究发现，累积蒸发量随砾石量增大而增大。当土壤含水率较小时，随着砾石量的增加，土壤中孔隙数量和体积随之增加，水分蒸发路径增长^[17]，土壤内部有更多的空间来容纳毛细管作用上升来的水分，使得土壤蒸发面积和蒸发速率减小，抑制土壤水分蒸发。当土壤含水率较高时，土粒之间结合更加紧密，而砾石难以与土壤紧密结合，因此极易形成连通的大孔隙，促进水分连续性上升，在一定程度上有利于蒸发^[70]。

与砾石量一样，砾石粒径同样显著影响水分蒸发过程。2~5 mm 粒径砾石覆盖的土壤蒸散量显著低于 5~20 mm 和 20~60 mm 粒径砾石覆盖的土壤^[71]，土壤蒸发速率随砾石粒径增大而升高^[72]。当砾石位于土壤内部时，小粒径砾石与土壤之间形成大量的毛管孔隙，这些孔隙的存在使水分运动路径增长，显著抑制土壤水分蒸发；随着砾石粒径的增加，毛管孔隙的联通性增强，进而提高了土壤蒸发量^[72]。然而，亦有研究^[73]表明，粒径对土壤蒸发的影响与砾石量有关。砾石量低时，粒径与土壤蒸发速率正相关；当砾石量大于 20% 时，随着粒径的增大土壤蒸发量减小^[73]。这可能是由于随砾石量增大，大粒径砾石会占据较大的土壤断面比例，减少土壤中的过水断面，降低毛管联通性，阻挡土壤水分扩散，抑制土壤蒸发。此外，较大粒径砾石对土壤表面的遮挡作用也会降低土壤蒸发。

土壤表层覆盖的砾石可以阻断水分蒸发路径，从而显著抑制土壤水分蒸发^[74]。Van 等^[75]研究了干燥和湿润条件下石质土壤表层蒸发速率，结果显示砾石覆盖显著降低了给定土壤含水率下的蒸发速率。Diaz 等^[76]通过土柱模拟试验发现，砾石覆盖条件下的土壤累积蒸发量显著低于未覆盖土壤，且覆盖度越大，抑制蒸发的作用越强。砾石覆盖于土壤表层，使土壤的边界条件发生改变并与表层土壤形成结皮，阻止土壤毛细管水的上升，水分可以更多地被保存在土壤中，水分蒸发过程受到抑制^[65]。

1.6 砾石对土壤水文过程影响的数学模型

为了更好地探究砾石对土壤水文特征的影响，近年来，越来越多的学者致力于开发模拟数学模型，定量表征砾石对土壤水文特征的影响。

Novák 等^[77]利用 HYDRUS-2D 模型^[78]模拟单位水力梯度下石质土壤的稳态水流，推导了相对饱和水率与砾石量的关系。Van 等^[79]开发的土壤性质和侵蚀模型（SPEROS）主要包括水蚀和耕作侵蚀模型。在水蚀模型中土壤剥蚀量与砾石覆盖度负相关。由于耕作过程会使耕层土壤砾石覆盖度增加，改变砾石空间分布^[80]，所以在应用耕作侵蚀模型时不仅将砾石作为重要参数，还模拟了不同土壤层（发生侵蚀的表层土壤层、深层土层以及基岩层等）的砾石对土壤侵蚀的影响^[81]。Morgan 等^[82]提出的欧洲土壤侵蚀模型（EUROSEM）是一种完全动态的侵蚀模型，与其他侵蚀模型相比，EUROSEM 模型明确模拟了砾石对入渗、流速和飞溅侵蚀的影响，但是其仅能够模拟单个农田和小流域的泥沙运移、侵蚀和沉积。双重孔隙度模型（DPM）包括非平衡双重孔隙模型（NDPM）和平衡双重孔隙模型（EDPM），可以在土壤中富含大粒径砾石时模拟土壤水文过程^[83]，其中平衡双重孔隙模型（EDPM）更适合模拟细土和砾石之间的流动传递速率相对较高时的土壤水文过程。为了模拟半干旱地区的水文过程和植物生长而开发的 Pattern 模型充分考虑砾石覆盖对土壤水文过程的影响^[84]，但是 Pattern 模型并没有考虑到砾石在土壤中随土层深度的变化而变化^[85]。

2 问题与挑战

随着砾石研究的深入和土壤水文学的发展，国内外越来越多的学者对其产生了兴趣，并取得了实质性进展，但是由于开始时间较晚，目前仍存在以下几方面问题：

1) 砾石对土壤水文过程的影响机理尚不明确。虽然砾石对土壤水文过程产生有重要影响，但是许多其他复杂的过程仍不清楚。例如，砾石风化程度、空间异质性和位置等因素对土壤水文过程的影响仍不明确。就砾石量与土壤水分蒸发之间的关系而言，呈 2 种明显相反的结果：一方面随着砾石量增加，土壤中孔隙的数量和体积随之增加，土壤内部有更多的空间来容纳毛细管作用上升来的水分，使得土壤蒸发面积和蒸发速率减小，抑制土壤水分蒸发；另一方面，由于砾石表面较为光滑，难以与土壤紧密结合，极易形成连通的大孔隙，促进水分连续性上升，在一定程度上有利于蒸发。

2) 深层石质土壤水文过程研究亟待加强。砾石对土壤水文过程影响研究偏重于土壤表层，对深层的研究不足，尤其是从地下 30 cm 到地下含水层区域的地下水文过程研究仍然面临巨大的挑战。目前，实验室内射线扫描以及野外染色示踪和地球物理探测是

土壤水文过程研究的主要方法,多集中在从土壤表面到地下 30 cm 的区域内。

3) 研究方法传统,缺乏新技术的应用。一直以来,制约砾石与土壤水文过程发展的重要原因是研究的成本高、难度大、精度低,定量研究困难,传统的砾石空间结构研究方法(如挖掘法等)已经无法满足其未来的发展需求。

4) 土壤砾石结构的量化、异质性及土壤水文参数的定量表达还未被纳入模型参数,现有模拟和定量表征砾石与土壤水文过程关系的数学模型建立在点或者坡面等小尺度上,缺乏多要素、多尺度的砾石水文过程模拟,没有准确可靠的尺度转换理论和方法,无法实现不同尺度上砾石和水文信息的转换。如何将小尺度上建立的模拟关系推导和扩大到流域尺度甚至全球尺度是建模研究需要解决的主要问题。

3 研究展望

砾石对土壤水文过程的影响错综复杂,而这些影响对理解砾石与土壤水文过程、解决环境问题至关重要,但目前研究成果依旧无法满足未来发展的需求。因此,未来砾石对土壤水文过程影响的研究建议围绕以下内容开展。

1) 明确砾石对土壤水文过程的影响机理。深入研究砾石对土壤水文过程的影响机理,例如:砾石与土壤水分蒸发、入渗之间的不确定关系,砾石量、粒径、风化程度、空间异质性和位置等对水分入渗、径流、壤中流、优先流和水分蒸发等土壤水文过程的影响规律与主控因素。此外,石质土壤分布广泛,应加快石质土壤水文过程研究,与石质土壤的生产和应用相结合,以期解决可利用土地资源日益紧缺的难题。

2) 加强深层石质土壤水文过程研究。石质土壤水文过程与均质土壤不同,极易形成壤中流和优先流,而深层砾石的空间分布对入渗、壤中流和优先流等水文过程有重要影响。因此,完善深层土壤砾石对土壤水文过程影响的研究至关重要,继而推动地球关键带土壤水文研究,为解决地下水质量、地下水退化、土壤重金属污染和荒漠化等全球环境问题提供科学理论依据。

3) 引入新技术,更新研究方法。随着数字物理方法的引入和计算机技术的高速发展,这些先进的技术为该研究提供了新思路。如 CT 以及数字土壤形态测量技术可实现对土壤内部砾石的空间分布、孔隙结构的定量表征,使用电阻层析成像(ERT)、探地雷达(GPR)、时域反射仪(TDR)、大地电导率仪(EMI)等地球物理新技术可用来探究砾石对土壤水文过程影响,大大提高数据精度,丰富研究内涵。利用这些

新技术推动土壤孔隙与砾石结构数字化进程,定量表征土壤水分动态变化,便于深入了解石质土壤入渗、优先流和壤中流产生。

4) 完善应用于砾石与土壤水文过程关系的数学模型,建立多尺度的数学模型。对砾石空间结构异质性进行数字化,完善数学模型中土壤孔隙结构参数(如大孔隙度、弯曲度、分支密度连通度等)以及砾石空间结构参数(如砾石风化程度、表面积、体积密度、等效直径等)。完善数学模型参数,实现不同尺度上砾石和水文信息的转换,推动从小尺度到流域尺度的建模研究,建立多尺度的数学模型,进行流域甚至全球尺度的模拟或者量化,将输出结果与现有实验结果进行比较,获得更普遍的砾石空间结构及其对土壤水文过程影响模式。

参考文献:

- [1] 刘成功,贾小旭,邵明安. 地球物理方法在土壤水文过程研究中的应用与展望[J]. 土壤, 2022, 54(1): 24-31.
LIU Chenggong, JIA Xiaoxu, SHAO Ming'an. Application and prospect of geophysical methods in study of soil hydrological processes[J]. Soils, 2022, 54(1): 24-31.
- [2] 巩铁雄. 砾石空间分布格局及对水文过程影响的研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2021.
GONG Tiexiong. Study on spatial distribution pattern of gravel and its influence on hydrological process[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2021.
- [3] 贺缠生,田杰,张宝庆,等. 土壤水文属性及其对水文过程影响研究的进展、挑战与机遇[J]. 地球科学进展, 2021, 36(2): 113-124.
HE Chansheng, TIAN Jie, ZHANG Baoqing, et al. A review of advances in impacts of soil hydraulic properties on hydrological processes, challenges and opportunities[J]. Advances in Earth Science, 2021, 36(2): 113-124.
- [4] 朱列坤,戴全厚,李焱秋,等. 喀斯特浅层裂隙土壤入渗特征及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2021, 35(2): 47-54.
ZHU Liekun, DAI Quanhou, LI Yanqiu, et al. Infiltration characteristics and influencing factors of Karst shallow fissured soil[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2021, 35(2): 47-54.
- [5] 廖振棋,范军亮,裴青宝,等. 不同灌水量和灌水器埋深下单坑灌渗红壤水分入渗特性及其模拟[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(1): 110-118, 146.
LIAO Zhenqi, FAN Junliang, PEI Qingbao, et al. Impact of burying depth of emitters in pit irrigation on water infiltration in red soil[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2022, 41(1): 110-118, 146.
- [6] 刘焕焕,王改玲,殷海善,等. 红枣经济林不同植被覆盖土壤水分入渗特征[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(4): 52-58.
LIU Huanhuan, WANG Gailing, YIN Haishan, et al. Characteristics of soil water infiltration in different vegetation cover of jujube economic forest[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(4): 52-58.
- [7] LAI X M, ZHOU Z W, LIAO K H, et al. Responses of soil carbon and nitrogen cycles to the physical influences of rock fragment in soils[J]. Catena, 2021, 203: 105 369.
- [8] CEACERO C J, D ÍAZ-HERNÁNDEZ J L, CAMPO A D D, et al. Soil rock fragment is stronger driver of spatio-temporal soil water dynamics and efficiency of water use than cultural management in holm oak plantations[J]. Soil and Tillage Research, 2020, 197: 104 495.
- [9] GARGIULO L, MELE G, TERRIBILE F. Effect of rock fragments on

- soil porosity: A laboratory experiment with two physically degraded soils[J]. *European Journal of Soil Science*, 2016, 67(5): 597-604.
- [10] JIANG R Q, LI T X, LIU D, et al. Soil infiltration characteristics and pore distribution under freezing-thawing conditions[J]. *The Cryosphere*, 2021, 15(4): 2 133-2 146.
- [11] 吕刚, 王婷, 王韞策, 等. 辽西低山丘陵区坡地砾石含量及粒径对土壤入渗性能的影响[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(4): 86-92.
LYU Gang, WANG Ting, WANG Yunce, et al. Effect of gravel content and particle size on soil infiltration in low mountainous upland region of Western Liaoning Province[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(4): 86-92.
- [12] JOMAA S, BARRY D A, HENG B C P, et al. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48(5): W05535.
- [13] POESEN J, LAVEE H. Rock fragments in top soils: Significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2): 1-28.
- [14] HLAVÁČIKOVÁ H, NOVÁK V, ŠIMŮNEK J. The effects of rock fragment shapes and positions on modeled hydraulic conductivities of stony soils[J]. *Geoderma*, 2016, 281: 39-48.
- [15] 朱元骏, 邵明安. 含砾石土壤降雨入渗过程模拟[J]. *水科学进展*, 2010, 21(6): 779-787.
ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Simulation of rainfall infiltration in stony soil[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(6): 779-787.
- [16] 王小燕, 王天巍, 蔡崇法, 等. 含碎石紫色土坡面降雨入渗和产流产沙过程[J]. *水科学进展*, 2014, 25(2): 189-195.
WANG Xiaoyan, WANG Tianwei, CAI Chongfa, et al. Processes of rainfall infiltration, runoff and sediment yield on purple soil slope containing rock fragments[J]. *Advances in Water Science*, 2014, 25(2): 189-195.
- [17] 王慧芳, 邵明安. 含碎石土壤水分入渗试验研究[J]. *水科学进展*, 2006, 17(5): 604-609.
WANG Huifang, SHAO Ming'an. Experimental study on water infiltration of soil containing rock fragments[J]. *Advances in Water Science*, 2006, 17(5): 604-609.
- [18] 李雪垠, 李朝霞, 王天巍, 等. 紫色土中砾石夹层对土壤水分入渗的影响[J]. *水科学进展*, 2016, 27(5): 662-669.
LI Xueyin, LI Zhaoxia, WANG Tianwei, et al. Rock interbed containment effect on infiltration processes in purple soil regions[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(5): 662-669.
- [19] TETEGAN M, PASQUIER C, BESSON A, et al. Field-scale estimation of the volume percentage of rock fragments in stony soils by electrical resistivity[J]. *Catena*, 2012, 92: 67-74.
- [20] 覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉. 岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 68-75, 80.
QIN Ziyang, GAN Fengling, HE Binghui. Influence of strata tendency on the surface/underground runoff production process in typical Karst valley[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 68-75, 80.
- [21] 夏天, 田军仓. 基于土壤黏粒含量预测土壤水分入渗量和湿润锋深度[J]. *灌溉排水学报*, 2020, 39(11): 90-96.
XIA Tian, TIAN Juncang. Using clay content to predict water infiltration in sandy loam soils[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2020, 39(11): 90-96.
- [22] SHAIKH J, YAMSANI S K, BORA M J, et al. Influence of infiltration on soil erosion in green infrastructures[J]. *Acta Horticulturae et Regiotecturae*, 2021, 24(1): 1-8.
- [23] BOUWER H, RICE R C. Hydraulic properties of stony vadose zones[J]. *Groundwater*, 1984, 22(6): 696-705.
- [24] 鲁洋, 刘斯宏, 张勇敢, 等. 黏质土石混合体渗透特性试验及演化机制探讨[J]. *岩土力学*, 2021, 42(6): 1 540-1 548.
LU Yang, LIU Sihong, ZHANG Yonggan, et al. Experimental study and mechanism analysis of permeability performance of clayey soil-rock mixtures[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2021, 42(6): 1 540-1 548.
- [25] 李燕, 刘吉振, 魏朝富, 等. 砾石对土壤水分入渗(扩散)的影响研究[J]. *土壤学报*, 2011, 48(2): 435-439.
LI Yan, LIU Jizhen, WEI Chaofu, et al. Effect of rock fragment content on water infiltration (diffusion) in purple soils[J]. *Acta Pedologica Sinica*, 2011, 48(2): 435-439.
- [26] 党宏宇. 桂西北喀斯特山区碎石对土壤水分入渗过程的影响的试验研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(教育部水土保持与生态环境研究中心), 2012.
DANG Hongyu. Effects of rock fragments on soil infiltration processes in Karst mountains region of Northwest Guangxi, China[D]. Beijing: Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, 2012.
- [27] 刘建军, 王全九, 王春霞, 等. 土石混合介质水分运动规律研究[J]. *灌溉排水学报*, 2010, 29(1): 109-112.
LIU Jianjun, WANG Quanjiu, WANG Chunxia, et al. Research on water movement law of stony-soil media[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2010, 29(1): 109-112.
- [28] 党宏宇, 陈洪松, 邵明安. 喀斯特地区不同层次土石混合介质对土壤水分入渗过程的影响[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(8): 38-43.
DANG Hongyu, CHEN Hongsong, SHAO Ming'an. Effects of laminated rock fragments on soil infiltration processes in Karst regions[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 38-43.
- [29] POESEN J, INGELMO-SANCHEZ F, MUCHER H. The hydrological response of soil surfaces to rainfall as affected by cover and position of rock fragments in the top layer[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1990, 15(7): 653-671.
- [30] LIU D D, SHE D L. Can rock fragment cover maintain soil and water for saline-sodic soil slopes under coastal reclamation[J]. *Catena*, 2017, 151: 213-224.
- [31] 赵西宁, 吴发启. 土壤水分入渗的研究进展和评述[J]. *西北林学院学报*, 2004, 19(1): 42-45.
ZHAO Xining, WU Faqi. Developments and reviews of soil infiltration research[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2004, 19(1): 42-45.
- [32] 毛妍婷, 刘宏斌, 郭树芳, 等. 耕作措施对坡耕地红壤地表径流氮磷流失的影响[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(5): 26-33.
MAO Yanting, LIU Hongbin, GUO Shufang, et al. Effects of tillage measures on nitrogen and phosphorus loss from surface runoff in red soil on slope farmland[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(5): 26-33.
- [33] CHOW T L, REES H W. Effects of coarse-fragment content and size on soil erosion under simulated rainfall[J]. *Canadian Journal of Soil Science*, 1995, 75(2): 227-232.
- [34] 吴冰. 砾石对坡面径流及入渗影响的试验研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2012.
WU Bing. Experimental study on runoff and infiltration in the slope as affected by gravels[D]. Yangling: Northwest A & F University, 2012.
- [35] 郑腾辉, 周旺, 刘涛, 等. 连续模拟降雨下岩溶区含砾石堆积体坡面径流产沙特征[J]. *水土保持学报*, 2020, 34(3): 55-60.
ZHENG Tenghui, ZHOU Wang, LIU Tao, et al. Characteristics sediment yield and runoff on the slope surface of gravel accumulation in Karst area under continuous simulated rainfall[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(3): 55-60.
- [36] POESEN J, DE LUNA E, FRANCA A, et al. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. *Catena*, 1999, 36(4): 315-329.
- [37] GONG T X, ZHU Y J, SHAO M A. Effect of embedded-rock fragments on slope soil erosion during rainfall events under simulated laboratory

- conditions[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 811-817.
- [38] VALENTIN C. Surface sealing as affected by various rock fragment covers in West Africa[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2): 87-97.
- [39] ZHAO Z M, SHEN Y X, SHAN Z J, et al. Infiltration patterns and ecological function of outcrop runoff in epikarst areas of Southern China[J]. *Vadose Zone Journal*, 2018, 17(1): 1-10.
- [40] ZAVALA L M, JORDÁN A, BELLINFANTE N, et al. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(1): 95-104.
- [41] GUO T L, WANG Q J, LI D Q, et al. Effect of surface stone cover on sediment and solute transport on the slope of fallow land in the semi-arid loess region of northwestern China[J]. *Journal of Soils and Sediments*, 2010, 10(6): 1 200-1 208.
- [42] NOVÁK V, KŇAVA K. The influence of stoniness and canopy properties on soil water content distribution: Simulation of water movement in forest stony soil[J]. *European Journal of Forest Research*, 2012, 131(6): 1 727-1 735.
- [43] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004.
- [44] 肖雄, 吴华武, 李小雁. 壤中流研究进展与展望[J]. *干旱气象*, 2016, 34(3): 391-402.
- XIAO Xiong, WU Huawu, LI Xiaoyan. Research progress and prospects of subsurface flow[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2016, 34(3): 391-402.
- [45] 王升, 包小怀, 容莹, 等. 降雨强度对西南喀斯特坡地土壤水分及产流特征的影响[J]. *农业现代化研究*, 2020, 41(5): 889-898.
- WANG Sheng, BAO Xiaohuai, RONG Ying, et al. Study on soil moisture variation and runoff characteristics on typical Karst slope under different rainfall intensities[J]. *Research of Agricultural Modernization*, 2020, 41(5): 889-898.
- [46] 王蕙, 卢德宝, 徐铭泽. 嵌套砾石红壤坡面壤中流对降雨强度的响应[J]. *水土保持学报*, 2019, 33(3): 1-7.
- WANG Hui, LU Debao, XU Mingze. Response of subsurface flow to rainfall intensity in the red soil slope with embedded gravel[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2019, 33(3): 1-7.
- [47] 汪涛, 朱波, 罗专溪, 等. 紫色土坡耕地径流特征试验研究[J]. *水土保持学报*, 2008, 22(6): 30-34.
- WANG Tao, ZHU Bo, LUO Zhuanxi, et al. Runoff characteristic of slope cropland in the hilly area of purple soil[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2008, 22(6): 30-34.
- [48] 徐铭泽, 杨洁, 刘奎军, 等. 不同母质红壤坡面产流产沙特征比较[J]. *水土保持学报*, 2018, 32(2): 34-39.
- XU Mingze, YANG Jie, LIU Yaojun, et al. The characteristics of runoff and sediment yield of red soil slope with different parent materials[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2018, 32(2): 34-39.
- [49] 段剑, 刘奎军, 汤崇军, 等. 不同下垫面红壤坡地壤中流对自然降雨的响应[J]. *水利学报*, 2017, 48(8): 977-985.
- DUAN Jian, LIU Yaojun, TANG Chongjun, et al. Responses of subsurface flow characteristics to natural rainfall in red soil slopes of different surface covers[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2017, 48(8): 977-985.
- [50] 王小燕, 李朝霞, 蔡崇法. 砾石覆盖紫色土坡耕地水文过程[J]. *水科学进展*, 2012, 23(1): 38-45.
- WANG Xiaoyan, LI Zhaoxia, CAI Chongfa. Hydrological processes on sloped farmland in purple soil regions with rock fragment cover[J]. *Advances in Water Science*, 2012, 23(1): 38-45.
- [51] WANG X Y, LI Z X, CAI C F, et al. Effects of rock fragment cover on hydrological response and soil loss from Regosols in a semi-humid environment in South-West China[J]. *Geomorphology*, 2012, 151/152: 234-242.
- [52] 徐勤学, 王天巍, 李朝霞, 等. 紫色土坡地壤中流特征[J]. *水科学进*
- 展, 2010, 21(2): 229-234.
- XU Qinxue, WANG Tianwei, LI Zhaoxia, et al. Characteristics of interflow in purple soil of hillslope[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 229-234.
- [53] 张立恒, 李昌龙, 姜生秀, 等. 梭梭林下土壤结皮对土壤水分空间分布格局的影响[J]. *西北林学院学报*, 2019, 34(5): 17-22.
- ZHANG Liheng, LI Changlong, JIANG Shengxiu, et al. Effects of soil crusts on the spatial distribution pattern of soil moisture under haloxylon ammodendron plantations[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2019, 34(5): 17-22.
- [54] 李鑫, 卢玉东, 范文, 等. 黄土斜坡优先流促滑机理研究现状及展望[J]. *水土保持通报*, 2019, 39(1): 294-301, 324.
- LI Xin, LU Yudong, FAN Wen, et al. Current status and prospects of research on mechanism of preferential flow-induced sliding in loess slope[J]. *Bulletin of Soil and Water Conservation*, 2019, 39(1): 294-301, 324.
- [55] JARVIS N J. A review of non-equilibrium water flow and solute transport in soil macropores: Principles, controlling factors and consequences for water quality[J]. *European Journal of Soil Science*, 2020, 71(3): 279-302.
- [56] 孙恒飞, 朱兴华, 成玉祥, 等. 黄土优势渗流研究进展与展望[J]. *自然灾害学报*, 2021, 30(6): 1-12.
- SUN Hengfei, ZHU Xinghua, CHENG Yuxiang, et al. Research progress and prospect of preferential seepage in loess[J]. *Journal of Natural Disasters*, 2021, 30(6): 1-12.
- [57] 潘网生, 胡向红, 卢玉东, 等. 黄土孔隙、裂隙及其优先流研究进展[J]. *科学技术与工程*, 2018, 18(8): 163-169.
- PAN Wangsheng, HU Xianghong, LU Yudong, et al. Research progress of pore, fracture and preferential flow for loess[J]. *Science Technology and Engineering*, 2018, 18(8): 163-169.
- [58] HOLBAK M, ABRAHAMSEN P, HANSEN S, et al. A physically based model for preferential water flow and solute transport in drained agricultural fields[J]. *Water Resources Research*, 2021, 57(3): e2020WR027954.
- [59] 戴翠婷, 刘奎军, 王天巍, 等. 三峡库区高砾石含量紫色土优先流形态特征[J]. *水土保持学报*, 2017, 31(1): 103-108, 115.
- DAI Cuiting, LIU Yaojun, WANG Tianwei, et al. Characteristics of preferential flow under high-content rock fragment purple soil in the Three Gorges reservoir area[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2017, 31(1): 103-108, 115.
- [60] 魏虎伟. 重庆四面山两种林地土壤优先流路径特征及其影响因素[D]. 北京: 北京林业大学, 2015.
- WEI Huwei. Preferential flow characteristics and its influencing factors of two forest soil in Simian Mountain of Chongqing[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2015.
- [61] 刘中. 三峡库区紫色土中砾石对土壤性质及优先流的影响[D]. 武汉: 华中农业大学, 2014.
- LIU Zhong. Research of the impact of gravel in purple soil around the Three Gorges reservoir on the soil properties and preferential flow[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2014.
- [62] 骆紫藤. 华北土石山区典型林地根土层优先流特征及其影响因素研究[D]. 北京: 北京林业大学, 2020.
- LUO Ziteng. Features of preferential flow and its influence factors in typical forests root zone in rocky mountain area of Northern China[D]. Beijing: Beijing Forestry University, 2020.
- [63] 余海龙, 黄菊莹. 砂田砾石覆盖对土壤大孔隙特征及其土壤水文过程的影响研究进展[J]. *水土保持研究*, 2012, 19(4): 284-288.
- YU Hailong, HUANG Juying. Research progress on influence of mulching gravel and sand on soil macropore characteristics and soil hydrological process of gravel-sand mulch field[J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 2012, 19(4): 284-288.

- [64] LI M F, YAO J J, YAN R, et al. Effects of infiltration amounts on preferential flow characteristics and solute transport in the protection forest soil of Southwestern China[J]. *Water*, 2021, 13(9): 1 301.
- [65] 李昌龙, 姜生秀, 吴昊, 等. 梭梭林下土壤结皮发育对降水入渗动态的影响[J]. *西北林学院学报*, 2020, 35(5): 35-40, 103.
LI Changlong, JIANG Shengxiu, WU Hao, et al. Effects of soil crust development on precipitation infiltration dynamics under haloxylon ammodendron plantations[J]. *Journal of Northwest Forestry University*, 2020, 35(5): 35-40, 103.
- [66] XIANG W, SI B C, LI M, et al. Stable isotopes of deep soil water retain long-term evaporation loss on China's Loess Plateau[J]. *Science of the Total Environment*, 2021, 784: 147-153.
- [67] SPRENGER M, TETZLAFF D, SOULSBY C. Soil water stable isotopes reveal evaporation dynamics at the soil-plant-atmosphere interface of the critical zone[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2017, 21(7): 3 839-3 858.
- [68] 毛俊, 伍靖伟, 刘雅文, 等. 盐分对季节性冻融土壤蒸发的影响试验及数值模拟研究[J]. *灌溉排水学报*, 2021, 40(2): 62-69.
MAO Jun, WU Jingwei, LIU Yawen, et al. Effects of salt content on evaporation from seasonally frozen soil: Experimental measurement and numerical simulations[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2021, 40(2): 62-69.
- [69] 朱元骏, 邵明安. 钙结石含量对土壤水分蒸发影响的模拟试验[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(2): 77-81.
ZHU Yuanjun, SHAO Ming'an. Simulation experiments on soil moisture evaporation affected by calcic nodule contents[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(2): 77-81.
- [70] 刘大有, 费良军, 郝琨, 等. 红壤砾石混合介质水分蒸发特性研究[J]. *地下水*, 2021, 43(3): 119-121, 124.
LIU Dayou, FEI Liangjun, HAO Kun, et al. Study on water evaporation characteristics of red soil and stony medium[J]. *Ground Water*, 2021, 43(3): 119-121, 124.
- [71] 陈士辉, 谢忠奎, 王亚军, 魏兴琥. 砂田西瓜不同粒径砂砾石覆盖的水分效应研究[J]. *中国沙漠*, 2005, 25(3): 433-436.
CHEN Shihui, XIE Zhongkui, WANG Yajun, et al. Moisture storage effect of gravel mulch with different grain size on watermelon field[J]. *Journal of Desert Research*, 2005, 25(3): 433-436.
- [72] 时忠杰, 王彦辉, 于澎涛, 等. 六盘山森林土壤中的砾石对渗透性和蒸发的影响[J]. *生态学报*, 2008, 28(12): 6 090-6 098.
SHI Zhongjie, WANG Yanhui, YU Pengtao, et al. Effect of rock fragments on the percolation and evaporation of forest soil in the Liupan Mountains, China[J]. *Acta Ecologica Sinica*, 2008, 28(12): 6 090-6 098.
- [73] 陈嵩, 吕刚, 张卓, 等. 辽西低山丘陵坡地砾石量及粒径对土壤水分蒸发影响的模拟试验研究[J]. *灌溉排水学报*, 2019, 38(S1): 86-89.
CHEN Song, LYU Gang, ZHANG Zhuo, et al. Simulation test of the influence of gravel content and particle size on soil moisture evaporation in hilly region of Western Liaoning Province[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2019, 38(S1): 86-89.
- [74] PROSDOCIMI M, JORDÁN A, TAROLLI P, et al. The immediate effectiveness of barley straw mulch in reducing soil erodibility and surface runoff generation in Mediterranean vineyards[J]. *Science of the Total Environment*, 2016, 547: 323-330.
- [75] VAN WESEMAEL B, POESEN J, KOSMAS C S, et al. Evaporation from cultivated soils containing rock fragments[J]. *Journal of Hydrology*, 1996, 182(1/2/3/4): 65-82.
- [76] DIAZ F, JIMENEZ C C, TEJEDOR M. Influence of the thickness and grain size of tephra mulch on soil water evaporation[J]. *Agricultural Water Management*, 2005, 74(1): 47-55.
- [77] NOVÁK V, KŇAVA K, ŠIMŮNEK J. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils using numerical method[J]. *Geoderma*, 2011, 161(3/4): 177-181.
- [78] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. *Vadose Zone Journal*, 2008, 7(2): 587-600.
- [79] VAN OOST K, GOVERS G, QUINE T A, et al. Landscape-scale modeling of carbon cycling under the impact of soil redistribution: The role of tillage erosion[J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 2005, 19(4): GB4014.
- [80] ZHANG Y H, ZHANG M X, NIU J Z, et al. Rock fragments and soil hydrological processes: Significance and progress[J]. *Catena*, 2016, 147: 153-166.
- [81] GOVERS G, OOST K V, POESEN J. Responses of a semi-arid landscape to human disturbance: A simulation study of the interaction between rock fragment cover, soil erosion and land use change[J]. *Geoderma*, 2006, 133(1/2): 19-31.
- [82] MORGAN R P C, QUINTON J N, SMITH R E, et al. The European Soil Erosion Model (EUROSEM): A dynamic approach for predicting sediment transport from fields and small catchments[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1998, 23(6): 527-544.
- [83] BECKER M W, SHAPIRO A M. Tracer transport in fractured crystalline rock: Evidence of nondiffusive breakthrough tailing[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(7): 1 677-1 686.
- [84] VAN WESEMAEL B, MULLIGAN M, POESEN J. Spatial patterns of soil water balance on intensively cultivated hillslopes in a semi-arid environment: The impact of rock fragments and soil thickness[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14(10): 1 811-1 828.
- [85] 冯雪瑾, 张志华, 杨喜田, 等. 砾石在太行山南麓土壤中的分布特征[J]. *河南农业大学学报*, 2019, 53(4): 608-615.
FENG Xuejin, ZHANG Zhihua, YANG Xitian, et al. Distribution characteristics of rock fragments on south foot of Taihang Mountain[J]. *Journal of Henan Agricultural University*, 2019, 53(4): 608-615.

(下转第 136 页)

rights accounting and distribution scheme for agriculture at county scale. The scheme can provide guidance for smooth implementation of the comprehensive reform of agricultural water price. We first provide a brief introduction to the current situation of the comprehensive reform of agricultural water price in China and then identify the key tasks in its implementation. An accounting method for the initial water rights of county agriculture is proposed based on the existing rigid constraint system of water resources. The initial agricultural water rights at the county level are allocated according to the priority-order of irrigation areas-beneficiary village groups-townships (and water users). Taking Huangchuan County as an example, the agricultural water rights of all irrigation areas in the county are allocated to the beneficiary villages and their subordinate towns. Completion of initial agricultural water right allocation in the county area is a priority as it not only helps to understand the base and reform process of the comprehensive reform of agricultural water price, but also facilitates follow-up reform work, such as the water-saving incentive mechanism. Our results can provide reference for comprehensive reform of agricultural water price in similar counties and regions and offer experience samples for the applied research of agricultural water right systems.

Key words: agricultural initial water rights; water price; agriculture; distribution of water rights

责任编辑: 赵宇龙

(上接第 107 页)

Influence of Rock Fragments on Subsurface Hydrological Processes: Progresses and Perspectives

SU Zhiran, GUO Jiawei, ZHANG Jinhao, NIU Chenyu, ZENG Qijie, ZHANG Zhihua*

(College of Forestry, Henan Agricultural University, Zhengzhou 450002, China)

Abstract: 【Objective】 Rock fragments are ubiquitous in soil, especially in arid and semi-arid regions. They have a considerable influence on various subsurface hydrological processes. Understanding the impact of rock fragments on these processes is crucial for improving water resource management, ecosystem restoration and sustainable development. 【Method】 This paper reviews the research over the past decades on the influence of rock fragments on subsurface hydrological processes, highlighting the challenges and limitations we currently face and proposing potential research perspectives. Specifically, we analyze the effects of characteristic parameters of rock fragments, such as their coverage, content, and size, on water infiltration, surface runoff and subsurface flow, preferential flow and soil evaporation. We also review progress in mathematical models used to simulate and quantify the effects of rock fragments on subsurface hydrological processes. 【Result】 Our review reveals that the mechanisms underlying the influence of rock fragments on subsurface hydrological processes remain obscure, and current methods are unable to capture the complex causal relationship between rock fragments and soil hydrological processes. Areas such as quantification of rock fragment heterogeneity and its association with soil hydrological parameters, multi-scale modelling of soil hydrological processes are still in the infant stage and require further work. 【Conclusion】 We propose that developing innovative technologies and methodologies, and improving understanding of the underlying mechanisms are particularly important in future research. Specifically, future research should focus on characterizing rock fragments in deep soil and their influence on hydrological process and formation of preferential flow, methods to link gravel content to hydrological information at different scales. Improving research in these areas will advance our in-depth understanding of the impact of rock fragments on soil hydrological processes, helping develop sustainable water resource management in arid and semi-arid regions.

Key words: rock fragments; infiltration; runoff; subsurface flow; preferential flow; evaporation

责任编辑: 白芳芳