

石砾参数对土壤水流和溶质运移影响研究进展^①

张英虎^{1,2}, 牛健植^{1*}, 李 娇¹, 韩旖旎¹, 杜晓晴¹, 陈上杰¹

(1 北京林业大学水土保持学院, 水土保持与荒漠化防治教育部重点实验室, 北京 100083;

2 江西省水土保持科学研究院, 江西省土壤侵蚀与防治重点实验室, 南昌 330029)

摘 要: 土壤水流和溶质运移一直是土壤学研究的热点, 溶质运移理论主要应用于地下水污染、污染物运移、土壤重金属污染研究等方面。溶质主要通过优先流和基质流进行运移, 影响溶质运移因素很多, 主要包括土壤结构、质地、水力传导率、体积质量、初始含水量、根系、石砾等。石砾作为土壤质地中的一个分级单位, 与溶质运移关系较为复杂。本文综合介绍了石砾基本内涵以及石砾对土壤水流和溶质运移影响研究进展; 系统阐述了石砾内部参数(石砾覆盖度、含量、粒径、空间异质性等)和外部参数(根结构、干湿冻融、耕作等), 指出目前研究主要量化土壤表面及土壤表层石砾参数对水文效应、土壤侵蚀、入渗以及径流的影响, 然而石砾参数对溶质运移影响研究不够系统, 石砾参数与溶质运移关系研究尚处于初步阶段, 对土壤深层石砾研究缺乏; 归纳了石砾参数研究技术手段及模型; 探讨了目前石砾参数对土壤水流和溶质运移影响研究存在的问题以及今后研究趋势。

关键词: 土壤溶质运移; 石砾参数; 模型

中图分类号: S157

长期以来, 溶质随土壤水向下运移始终是土壤学研究关注的焦点^[1]。溶质包括细小颗粒物、金属、盐分化合物及没有被植物及土壤吸收的养分等物质。携带溶质运移的土壤水流包括优先流和基质流 2 种形式^[2]。溶质运移影响因素较多, 比如土壤结构和质地^[3]、土壤体积质量(容重)^[4]、初始含水量^[5]、根系^[6]、石砾^[7]等, 其中石砾(rock fragments)是指颗粒径级 ≥ 2 mm 的碎石或者相对稳定的土壤矿物质颗粒^[8]。

有关石砾参数的研究, 主要集中在石砾表面覆盖度、石砾粒径、石砾含量、石砾形状以及石砾异质性等因子, 证明裸露土壤表面石砾、部分侵入土壤表层石砾和完全侵入土壤表层石砾与水文效应、土壤侵蚀、径流产生等之间的关系。如 Zavala 等^[9]研究了石砾(覆盖度 0 ~ 60% 和覆盖度 >60%)与径流产生和土壤侵蚀之间的关系, 证明覆盖度 > 60% 时, 径流和土壤侵蚀均会增加, 而覆盖度 0 ~ 60% 时, 径流和土壤侵蚀会减少; Zhou 等^[10]证明石砾含量 < 40% 时, 入渗率和导水率随石砾含量的增加会降低, 石砾含量 > 40% 时, 入渗率和导水率随石砾含量的增加而增加; Novák 等^[11]利用模型模拟的方法, 分析了不同深度石砾含量对土壤含水量和水分运移的影响, 表明石砾含量与水流运动的复杂性。

相比土壤颗粒, 石砾粒径较大, 石砾分布在土壤剖面, 易形成大孔隙以及溶质优先运移的路径。石砾影响污染物运移, 进而对地表和地下水水质造成影响, 破坏区域的生态环境建设。石砾参数与土壤水流和溶质运移关系复杂, 但相关研究报道却较少。鉴于此, 本文系统总结了目前国内外与石砾参数有关的研究进展, 分析了影响溶质运移的石砾参数及目前石砾参数与溶质运移研究存在的问题, 并提出了开展石砾与溶质运移研究的未来发展趋势。

1 石砾研究概述

石砾是土壤中最常见的固相物质, 虽然与土壤矿物质颗粒相比, 石砾不会直接从土壤中汲取营养物质, 为植物生长提供必需元素, 但是石砾却可以改变土壤的理化性质, 如土壤体积质量、总孔隙度、非毛管孔隙度、土壤水分特征曲线等。之前, 大量研究主要说明细小砂粒与水文效应及土壤侵蚀之间的关系, 很少涉及石砾, 石砾研究并没有得到足够的重视。随着对矿物质颗粒的重新认识, 人们才逐渐意识到石砾在改善土壤理化性质方面的重要性。相关报道主要量化水文效应、土壤侵蚀、径流产沙、入渗、溶质运移以及优先流等与石砾的关系^[9, 12-18], 表 1 总结了石砾对土壤生态水文过程影响研究进展。

基金项目: 国家自然科学基金项目(41271044)资助。

* 通讯作者(nexk@bjfu.edu.cn)

作者简介: 张英虎(1987—), 男, 山东聊城人, 硕士研究生, 主要从事森林水文和林业生态工程研究。E-mail: zhangfan2012oo@163.com

表 1 石砾对土壤生态水文过程影响研究进展
Table 1 Advances in effects of rock fragments on soil ecological and hydrological process

文献来源	石砾在土壤内分布位置				研究方法	研究对象
	1	2	3	4		
Cerdà(2001) ^[14]	•				野外试验与降雨模拟	入渗、径流产生与土壤侵蚀
Guo 等 (2010) ^[19]	•				野外试验与降雨模拟	泥沙与溶质运移
Jomaa 等 (2012) ^[18]	•				室内试验	溅蚀
Jean 等 (2000) ^[20]	•				室内试验与降雨模拟	入渗与径流产生
Zavala 等 (2010) ^[9]	•				野外试验与降雨模拟	水文效应
de Figueiredo 等 (1998) ^[21]	•	•			室内试验	径流产生与土壤侵蚀
Loosvelt (2007) ^[22]	•	•			野外试验与降雨模拟	入渗、径流产生与泥沙
Mayor 等 (2009) ^[23]	•	•			野外试验与降雨模拟	入渗、径流产生与土壤侵蚀
Valentin 和 Casenave (1992) ^[24]	•	•			野外试验与降雨模拟	入渗
Cousin 等 (2003) ^[15]	•	•	•		野外试验与天然降雨	入渗
Herrick 等 (2010) ^[25]	•	•	•		野外试验与降雨模拟	水文效应与土壤侵蚀
Mandal 等 (2005) ^[26]	•	•	•		野外试验与降雨模拟	入渗、径流产生与泥沙
Poesen 等 (1999) ^[27]	•	•	•		室内试验	径流产生于土壤侵蚀
Zapp 等 (2007) ^[28]	•	•	•		室内试验	水文效应与土壤侵蚀
Urbánek 等 (2009) ^[29]	•	•	•		室内试验	水分运移
Smets 等 (2011) ^[30]	•	•	•		室内试验与降雨模拟	径流产生与土壤侵蚀
Zhou 等 (2011) ^[31]	•	•	•	•	室内试验	溶质运移
Kuntz 等 (2011) ^[32]	•	•	•	•	野外试验与室内试验	溶质运移
Shi 等 (2012) ^[33]	•	•	•	•	野外试验与室内试验	大孔隙流与水分运移
Novák 和 Křápa (2012) ^[11]	•	•	•	•	模型模拟	土壤含水量和水分运移

注：1 表示分布于土壤表面石砾；2 表示较好侵入土壤表层内部石砾；3 表示完全侵入土壤表层内部石砾；4 表示深层土壤石砾。

由表 1 可知,量化石砾参数与生态水文过程间关系研究技术手段主要包括野外试验、室内试验、天然降雨和人工模拟降雨等,两者存在何种量化关系,至今存在争议。一些研究人员认为两者呈正相关关系,即随着石砾含量的增加,土壤水下渗速率增加,径流量减少,对防止水土流失和土壤侵蚀起着不可替代的作用^[19-22];另外一些研究学者认为两者存在一种负相关关系,即随着石砾含量的增加,增加水土流失,造成生态环境的破坏^[34-35]。还有一些研究人员认为,两者关系并不是绝对的,生态水文过程部分受制于石砾,并指出这一过程的复杂性^[9,31,36]。

另外从表 1 我们也可以看出,大量研究主要说明石砾参数与水文效应、土壤侵蚀、水土流失、入渗、径流等之间关系,然而石砾参数对溶质优先运移影响研究却很少,另外土壤表面和土壤表层石砾的研究占很大一部分,深层石砾的研究同样没有得到足够的重视。

2 石砾参数对水和溶质运移影响分析

以上研究表明:针对土壤剖面尺度,石砾对土壤水和溶质运移影响较为复杂。Kim 等^[37]研究表明,

如果土壤表面存在石砾或者原状土柱内布满较大颗粒时,溶质仅通过优先路径进行运移,即只有优先流起作用。但是在土壤空间尺度上,石砾并不是独立存在的,而是与其他因子紧密结合,形成复杂综合体,石砾参数促进或延迟溶质运移速率的初始条件随着空间格局的变化而发生改变,石砾参数较多,主要包括内部参数和外部参数。

2.1 内部参数

石砾参数主要包括石砾覆盖度^[38-40]、石砾体积^[11, 41]、石砾异质性^[42]、石砾含量^[29, 43]、石砾空间分布^[44-45]、石砾径级^[17]、石砾形状^[38, 43]等。

2.1.1 石砾覆盖度 石砾覆盖度是指单位面积上石砾所占的垂直投影面积,通常用 % 表示。干旱和半干旱地区,植被覆盖度低,土壤表面石砾分布较多,因此石砾极大地影响着当地水文过程。石砾覆盖度与水文过程之间存在何种量化关系呢?Poesen 等^[46]将裸地和表层石砾地两种不同条件下的渗透速率和径流作一比较,结果表明表层石砾地会加快水和溶质的入渗,延长径流产生的时间;Wesemael 等^[47]说明石砾覆盖度在防止土地退化方面具有重大意义。已有研究表明,裸地上布设某种覆盖物之后,会减少径流产

生^[48]。截至目前,对石砾覆盖度的研究同样存在不确定性,但许多研究表明石砾覆盖度与水文效应等之间的关系并不绝对,只在一定条件下成立,例如 Wang 等^[36]研究了不同石砾覆盖度(0~40%)对土壤侵蚀等的影响,结果表明与裸地相比,表层覆盖石砾的土壤可以降低水土流失速率,水土流失程度用泥沙产量、径流量等表示;Zavala 等^[9]研究表明当石砾覆盖度<60%时,随着石砾覆盖度的增加,土壤侵蚀量和径流量会相应地减少,但是当覆盖度>60%时,土壤侵蚀量和径流量会增加,即土壤侵蚀和水土流失会更加严重。

2.1.2 石砾含量 石砾含量通常指的是石砾体积含量,表示石砾在单位土体中所占的体积,用%表示,与石砾覆盖度一样,是石砾的一项重要参考指标。石砾含量大小会影响土壤体积质量和土壤大孔隙。Shi 等^[33]分析了石砾含量对稳定出流率的影响,表明它们之间关系复杂,难以用较简单的数学公式进行描述,同时说明了石砾与大孔隙流和水流之间的相关关系;Zhou 等^[10]指出石砾含量对入渗速率和导水率有重要影响,在石砾含量<40%时,入渗速率降低,然而石砾含量>40%时,入渗速率会相应增加。溶质在随土壤水流运移过程中,会经过石砾的切割阻挡,导致溶质偏离平均流动方向,使流体的实际运动弯曲度加大,方向发生改变,造成溶质运移“分支-合并”现象,也就是所谓的延迟效应^[49]。石砾含量会涉及“石砾-石砾”效应,即当石砾含量较低时,石砾与石砾之间的距离被拉大,有效连通性降低,影响水和溶质的运移。耕作或者是农田管理条件下,尤其是在土地利用发生变化时,石砾含量也会发生相应的变化,Govers 等^[50]认为土地利用变化可以改善土壤的理化性质,可以丰富土壤内石砾的含量;同时 Poesen 和 Lavee^[51]也证明了土地利用变化条件下石砾对水文功能的影响,表明石砾含量的重要作用。然而对于斥水性土壤或水流难以有效渗透至深层土壤这些区域来讲,假如石砾含量<45%,就不会产生有效入渗,优先运移通道连通性受阻,同样也会影响大孔隙的数量、体积和密度。此外,如果土壤内石砾含量较低,即使石砾粒径较大,渗透效果也不明显。

2.1.3 石砾粒径 石砾粒径指的是理想条件下石砾直径的大小,单位为 mm 或 cm,石砾粒径范围主要分布在 2~30 mm。不同粒径的石砾其形状也存在较大差异,一般较小的石砾,多呈圆粒状或者多面体状,而较大的石砾,则呈长条状、板状或者多面体状。石砾粒径分布在 2~30 mm 范围内占很大一部分,其中 2~20 mm 含量最多。对石砾粒径进行分级,一般

通过筛选法和沉降法得到,筛选法可以将直径>0.25 mm 的土壤颗粒筛选出来,直径<0.25 mm 的土壤颗粒则一般通过沉降法得到,沉降法可以筛选径级较小的颗粒^[52]。Poesen^[38]认为石砾粒径与林地土壤表面石砾沿坡的运移距离有密切的联系。Thurley 和 Ng^[53]认为筛选法是一种常见的石砾粒径分析法,研究中他们利用三维不规则数据法分析石砾的粒径。Siddiqui 等^[54]认为虽然筛选法直接且精确,但是耗时耗力,他们利用映像分析法来观测石砾粒径的分布。根据美国制颗粒粒径划分,将颗粒划分为黏粒($d<0.002$ mm),粉粒($0.002<d<0.05$ mm),极细砂($0.05<d<0.1$ mm),细砂($0.1<d<0.25$ mm),中砂($0.25<d<0.5$ mm),粗砂($0.5<d<1.0$ mm),极粗砂($1.0<d<2.0$ mm),细小石砾($2.0<d<10.0$ mm),粗大石砾($2.0<d<70.0$ mm),石块($d>70.0$ mm)。目前石砾粒径与溶质运移的关系研究相对较少,Guo 等^[19]指出在同一石砾覆盖度下,较大石砾粒径条件下的溶质相对浓度比较小粒径条件下高很多;Zhou 等^[31]证明了不同石砾粒径对溶质运移的影响。

2.1.4 石砾异质性 异质性是生态学过程和格局在空间分布上的复杂性和不均匀性。石砾在土壤剖面空间分布上同样存在异质性,主要是由排列和分布方式多样性决定的,石砾一般呈聚积状态或零散状态,形态多种多样,空间尺度上很难观测。在空间异质性高分辨率条件下,传统的方法和设备存在制约性。随着对石砾空间异质性研究的不断深入,现代技术的发展和运用一定程度上解决了传统技术所不能攻破的难题,比如 CT 扫描技术、扫描显微法以及空间电阻率的应用,特别是空间电阻率,目前已经应用到实际探测中来,有助于观察石砾空间分布和排列方式^[41]。人类活动对石砾空间异质性有重要的影响,Follain 等^[42]研究了耕作模式对石砾空间异质性的影响,同时 Oostwoud Wijdenes 和 Poesen^[55]认为合理的耕作模式可以使面临退化的土地石砾含量越来越高,使石砾空间异质性增强。Chen 等^[45]认为土壤表层石砾空间异质性的强弱某种程度上可以用表层植被覆盖度、地质地貌特征以及斜坡坡度来解释。同时石砾空间异质性与上述石砾粒径和石砾含量有着密不可分的联系。

2.1.5 石砾空间分布 石砾空间分布是指石砾在土壤剖面内的分布格局,主要受分布位置的影响,包括土壤表面石砾、部分侵入土壤表层内部石砾、完全侵入土壤表层内部石砾和土壤深层石砾,即土壤表层石砾和深层石砾。表 1 说明许多研究主要量化土壤表面和表层石砾与生态水文过程之间关系,对土壤深层石砾的研究还很缺乏。例如,在法国北部,土壤侵蚀

主要分布在春季和冬季,春季时土壤侵蚀发生率没有规律性,冬季时却频繁发生,Auzet 等^[56]认为导致两季节土壤侵蚀有无规律性,土壤内部石砾空间分布位置发挥了重要的作用,石砾空间分布位置或许不会对水文效应等产生直接作用,但是却可以直接影响石砾空间异质性和石砾含量来对土壤侵蚀产生影响。

2.2 外部参数

2.2.1 根石结构 根石结构是指根系和石砾复杂综合体,它是在试验分析的基础上形成的综合体系,该结构共存于土壤内部,而不是孤立存在。“根石结构孔隙理论”以根石结构形成的孔隙为依托,是一种新型研究水文效应理论,以促进水分运移为目的的理论。一直以来,植物根系都是土壤水和溶质运移过程不可忽略的影响因子。土壤剖面上,根系组成了巨大的连通网络,影响溶质运移过程,同时根系分布格局直接影响对水分和营养物质的吸收。根系网络影响优先运移路径,土壤水和溶质会通过优先路径绕过土壤基质运移,然而根系生长是一个动态的变化过程^[57],需要足够的土壤空间^[58],不同的土壤质地和立地条件,根系生长分布格局多种多样,同时植物生长过程中,根系生长模式不同。由于土壤内水分和营养成分的不同,根系空间分布存在水平和垂直差异性。活根系和死根系形成的根通道都可以促进溶质优先运移和水流的非平衡运动^[59],且死根系效果更加明显^[60],活根系也可以促进死根系的降解过程^[61]。

根系空间分布格局范围内存有大量的石砾和石块,有的根系镶嵌于石砾与石砾之间,而有的则围绕石块表面生长,根系的这种空间分布模式加固了土壤的压实程度及稳定性。在石砾含量较高的石质林地或耕地上,石砾与根系之间形成一种复杂的综合体,相互制约相互影响。然而大部分研究仅仅分析根系形成的根孔隙对溶质运移影响或者石砾与溶质运移之间的关系,土壤-植物-大气之间是不可分割的连续体,根石结构同样可以作为新型混合结构纳入到更高层次研究上来。截止目前,有关根石结构对水流和溶质运移的研究甚少,相关理论极其缺乏,作用机制不明确,研究方法不系统,缺乏统一的判定标准。

2.2.2 耕作模式 在耕地及农田管理方面,人类活动对石砾的存在方式有重要影响,这一点在石砾空间异质性方面已经提到,比如 Oostwoud Wijdenes 和 Poesen^[55]以及 Follain 等^[42]的研究都涉及耕作模式对石砾的重要作用。耕作这种农业管理模式主要是改善了土壤的理化性质。耕作可以分为少耕法和免耕法,通过这一模式可以有效地调节土壤中固、液、气三相的比例关系,调节营养物质的垂直和水平分布,进而

形成均匀稳定的环境。更重要的是,耕作模式改变了土壤的结构和孔隙度,影响土壤内大孔隙的数量和密度,进而对大孔隙流产生一定影响。

2.2.3 干湿及冻融条件 在干湿及冻融交替条件下,土壤水分随着季节的变化也会相应增加或减少。土壤水分增加时,土壤会发生膨胀,进而会降低土壤内裂隙的数量和密度;同时土壤含水量降低时,土壤会发生相应收缩现象,产生宽而深的裂隙。无论是土壤膨胀还是土壤收缩,都会对石砾效应产生不同程度的影响。土壤发生收缩时,随着裂隙的产生,石砾与土壤之间的粘合度降低,石砾周围表面产生较大的孔隙,更易于溶质的优先运移,土壤膨胀时效果则相反。冻融不仅仅对土壤有影响,对石砾也有直接影响,一冻一融会加大石砾内部裂隙,进而对溶质运移造成影响。

3 石砾参数对溶质运移影响的研究技术手段及模型

3.1 研究技术手段

3.1.1 野外示踪技术 示踪技术已在野外试验中得到广泛的应用和推广,与映像分析方法相结合,其更直观地反映溶质在土壤层面的运移效果。常用的示踪剂主要包括亮蓝、氯化物、³⁶Cl 等。在石砾与溶质运移关系研究中,示踪技术同样也是较为普遍的方法,比如, Buchli 等^[62]用示踪方法研究西欧国家(瑞士)岩石冰川石砾含量较高地区复杂的水流运动过程;Guo 等^[19]用溴化物和硝酸盐作为示踪剂,分别比较了 4 种不同石砾参数条件下(土层表面石砾含量为 5.1% 粒径较小石砾条件、石砾含量为 5.1% 粒径较大石砾条件、石砾含量为 20.8% 条件以及空白对照)溶质运移效果;Zhou 等^[10]通过示踪的方法来研究不同石砾含量对溶质运移穿透效果的影响;Zhou 等^[31]同样用氯化钙作为示踪剂来研究不同石砾含量和石砾粒径对扰动土柱溶质运移的影响。

3.1.2 室内溶质运移穿透曲线 穿透曲线(breakthrough curve, 简称 BTC)通常用出流液相对浓度(C/C_0)、孔隙体积数(V/V_0)来表示,出流液相对浓度随孔隙体积数的变化情况某种程度上反映了溶质运移特征。出流液相对浓度(C/C_0)是出流液浓度值(C)与入渗液浓度值(C_0)之比;孔隙体积数是出流液体积(V)与土柱内多孔体体积(V_0)之比。Shi 等^[33]利用穿透曲线这一方法验证石砾含量与出流液出流速率之间的关系,证明石砾含量对水流运动和大孔隙流的影响;Zhou 等^[63]证明煤矸石含量对溶质运移和水分运

动会产生影响,同时指出即使在异质性较高的矿石区同样会得到匀称的穿透曲线图;Su 等^[64]通过溶质穿透曲线图,指出岩石之间所形成的裂隙会形成优先通道,促使溶质进行运移。Zhou 等^[31]发现,穿透试验过程中,溶质相对浓度穿透曲线随孔隙体积数增加逐渐上升,不同的石砾含量条件下穿透曲线效果不同,石砾含量 >30% 时,优先路径起主要作用,促进溶质运移,同一相对浓度,石砾含量较高时所需孔隙体积数更小,指出溶液稳定出流速率先降低后增加,在石砾含量 40% 时达到最小值。

3.1.3 天然降雨试验 至今,利用天然降雨试验来研究石砾与溶质运移之间关系的还很少,主要考虑到试验过程中的诸多不可调整和不确定因素,例如降雨强度、降雨历时等。Katra 等^[17]利用天然降雨试验证明湿润和半湿润地区石砾对土壤表层水分运动的影响,指出含有石砾土壤表层水分含量较高,同时对湿润和半湿润地区的水分运动也做了说明;de Figueiredo 和 Poesen^[65]通过与天然降雨(240 mm 降雨强度)相结合,证明石砾特征(粒径、形状、分布位置和覆盖度等)对水分流动和土壤侵蚀的影响。

3.1.4 人工降雨模拟试验 和天然降雨试验相比,人工降雨模拟试验最为普遍,人工降雨模拟在室内条件下实施,其效率更高,降雨强度和降雨历时容易控制,降雨模拟过程中实验方案更易调整与优化,但是实验方案实施时要尽量保持恒定的降雨强度,减少人为因素干扰。根据实验方案设计的不同,人工降雨模拟实验分为室外降雨模拟和降雨大厅模拟,人工降雨模拟有时会受到外界风的影响,可以通过恒定水头的方法进行^[19]。Cerdà^[14]指出很少有研究人员利用天然降雨试验模拟石砾与水分运动之间的关系,相对天然降雨,人工降雨模拟试验更易控制与调整;Smets 等^[30]利用人工降雨证明石砾对径流产生的影响;Luce^[66]测定了较高和较低石砾含量条件下森林道路土壤贮藏水分的能力,研究表明石砾含量较高时土壤会形成较大的缝隙,促使水分的运移;Guo 等^[19]利用恒定水头,即保持溶质恒定施加速率的方法,证明石砾覆盖度与溶质运移之间的关系。

3.2 量化模型

3.2.1 对流-弥散模型(Convection-Dispersion Equation, CDE) 对流弥散模型是一种最常见的研究多孔介质条件下溶质运移的数学模型,该模型描述了溶质在土壤内的运移规律。对流弥散模型仅仅考虑了溶质在土壤内的对流和弥散作用,但是却忽略了溶质与水体之间的相互作用,该模型也未能解释溶质穿透过程中出现的提前穿透和拖尾特征。Lapidus 和 Amundson^[67]

把对流弥散模型解释为:

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

式中: R 是阻滞系数; C 是溶质浓度; t 是溶质运移时间; D 是弥散系数; v 是孔隙水流速度; x 是溶质运移距离。

利用 CDE 模型量化石砾与溶质运移关系研究如下: Russo^[12]应用 CDE 模型模拟溶质运移过程,且拟合效果较好,但是他发现,当土壤内存有较多石砾时,这一模型拟合效果较差,不再适合模拟溶质运移过程; Bouwe 和 Rice^[68]研究表明弥散系数与平均水流速度之间存在一种较强的线性关系,认为即使土柱内布满了石砾,这一线性关系也不会发生改变; Schulin 等^[69]认为土柱内石砾含量 <55% 时,便得不到光滑的穿透曲线,进而对溶质运移过程进行模拟; Buchter 等^[70]观察了非饱和条件下石质林地溶质穿透效果,并借助示踪剂 Cl^- 分析含有较多石砾条件下溶质运移特征; Buchter 等^[71]测定了 Cl^- 和 Br^- 的运移情况,结果揭示了土壤水分在较多石砾和石块土壤内的运移过程; Zhou 等^[10,31,63]利用 CDE 模型模拟穿透曲线,证明石砾含量和粒径对土壤水流运动和溶质运移的影响。

3.2.2 可动区-不可动区模型(Mobile-Immobile Model, MIM) 可动区-不可动区模型又称为两区模型(Two-Region Model, TRM),该模型将土壤孔隙分成两个区域,即可动区和不可动区,液体能够进行流动的区域称为可动区,相反称为不可动区。对于可动区而言,溶质主要通过对流和弥散作用进行运移,而在不可动区,溶质则通过扩散作用从可动区扩散至不可动区,溶质扩散能力的大小主要取决于两区之间的浓度差。与 CDE 模型相比,可动区-不可动区模型不仅仅考虑了可动区内的对流弥散作用,同时也考虑了溶质的扩散作用。已有研究表明仅有 0.1% 的溶质和 1% 的水会通过可动区到达不可动区。但是可动区-不可动区模型也存在缺陷,当化学和物理的非平衡性对溶质运移的影响很明显时,该模型便不会精确地描述溶质穿透曲线。van Genuchten 和 Wagenet^[72]把可动区-不可动区模型解释为:

$$\theta_m \frac{\partial C_m}{\partial t} + \theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \theta_m D \frac{\partial^2 C_m}{\partial x^2} - v_m \theta_m \frac{\partial C_m}{\partial x} \quad (2)$$

$$\theta_{im} \frac{\partial C_{im}}{\partial t} = \alpha (C_m - C_{im}) \quad (3)$$

$$\theta = \theta_m + \theta_{im} \quad (4)$$

式(2)、(3)、(4)中: θ_m 表示可动区体积含水量; θ_{im} 表示不可动区体积含水量; C_m 表示可动区溶质浓度; C_{im} 表示不可动区溶质浓度; v_m 表示可动区孔隙内水

流速度； α 表示溶质扩散系数； t 表示溶质运移时间； x 表示溶质运移距离。

Zhou 等^[10,31]研究了土石混合条件下溶质穿透效果，利用 CDE 模型和 MIM 模型进行曲线拟合，结果发现 MIM 模型拟合效果更好，模拟曲线与实际穿透曲线更吻合；van Genuchten 和 Dalton^[73]认为溶质（盐分）会通过对流弥散作用在孔隙或裂隙中运移，表明 MIM 模型可以量化溶质在可动区和不可动区之间的扩散程度。

3.2.3 连续时间随机游走模型(Continuous Time Random Walk, CTRW) 连续时间随机游走理论起先是研究物理学中电子不规则运动的理论^[74]，基于这一理论，Berkowitz 等^[75]研究了孔隙介质中的溶质运移现象，相比对流弥散模型和两区模型而言，连续时间随机游走模型适用范围较广。从概念意义上讲，CTRW 理论是对踪颗粒运移过程的一种描述，并且对颗粒物的运移时间分布情况进行特征化。该理论主要包括溶质运移过程、异质性条件下多孔介质复杂结构等，这一机制对溶质运移时间的分布和相关参数的测定有着重要的影响，同时，在土柱实验中 CTRW 理论可以得到光滑的穿透曲线。尽管 CTRW 理论在孔隙和裂隙溶质运移过程中已广泛应用，但是研究尺度范围较小，介质在空间和时间尺度上的异质性使得参数的确定很难。Berkowitz 等^[75]把这一理论解释如下：

$$u\tilde{c}(s,u) - c_0(s) = -\tilde{M}(u) [V_\psi \cdot \nabla \tilde{c}(s,u) - D_\psi : \nabla \nabla \tilde{c}(s,u)] \quad (5)$$

式中， $V_\psi = (1/t_1) \int p(s) s ds$ 表示踪颗粒平均运移速率， V_ψ 由于溶质运移距离的不同，相应的速率值也不同。假设 $0 < \beta < 1$ 条件下， V_ψ 表达式可以缩写为 $t^{\beta-1}$ ， β 表示溶质不规则运移常数； $D_\psi = (1/2t_1) \int p(s) s^2 ds$ 表示扩散张量； $p(s)$ 表示溶质质点在时空位置上概率密度分布函数。

$$\tilde{M}(u) = t_1 u \frac{\tilde{\psi}(u)}{1 - \tilde{\psi}(u)} \quad (6)$$

式中： $\tilde{M}(u)$ 表示存储函数， t_1 表示溶质运移时间。

3.2.4 双孔隙度模型(Dual Porosity Model, DPM) 双孔隙度模型认知之前，人们主要用双渗透模型模拟石砾孔隙对溶质运移过程的影响。双渗透模型以 Richard 方程为前提，进而对石质林地水文特征进行描述。但是如果土壤内部石砾含量较少或几乎没有石砾存在时，就没必要考虑在石砾之间的水分运动和溶质运移过程。Ross 和 Smettem^[76]、Šimůnek 等^[77]应用双孔隙度模型，将水分运动过程中可动区和不可动区之一假设为水源区，即石砾之间的水分垂直运动可

以忽略，这样两区之间溶质交换速率被认为是成比例的。双孔隙度模型又分为非平衡双孔隙度模型(Non-equilibrium Dual Porosity Model, NDPM)和平衡双孔隙度模型(Equilibrium Dual Porosity Model, EDPM)两种。Šimůnek 等^[77]在石砾存在条件下，利用非平衡双孔隙度模型模拟土壤内部水分和溶质运移过程，方程如下：

$$\frac{\partial \theta_{fe}}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[K_{fe} \left(\frac{\partial h_{fe}}{\partial z} + 1 \right) \right] - \frac{\Gamma_w}{1 - R_v} \quad (7)$$

$$\frac{\partial \theta_{rf}}{\partial t} = \frac{\Gamma_w}{R_v} = \frac{w}{R_v} (S_e^{fe} - S_e^{rf}) \quad (8)$$

式(7)、(8)中： z 表示垂直坐标； t 表示运移时间； θ 、 h 和 K 分别表示体积含水量、压力水头和导水率； fe 表示细土颗粒； rf 表示石砾； R_v 表示石砾体积含量； Γ_w 表示水分和溶质从细土颗粒到石砾运移速率； S_e^{fe} 表示细土颗粒水分饱和度； S_e^{rf} 表示石砾水分饱和度。上述式中， w 表达式为 $w = (\beta D_w \gamma_w) / d^2$ ， β 表示无量纲的几何系数； d 表示土壤基质结构有效长度； γ_w 表示无量纲测量系数； D_w 表示细土颗粒和石砾有效弥散度；同时， S_e^{fe} 、 S_e^{rf} 以及 K 主要表达式可以表示为：

$$S_e(h) = \frac{\theta(h) - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} = \left[\frac{1}{1 + (\alpha h)^n} \right]^m \quad (9)$$

$$K(S_e) = K_s S_e^l \left[1 - (1 - S_e^{1/m})^m \right]^2 \quad (10)$$

式(9)、(10)中： S_e 表示有效饱和度； θ 、 θ_r 和 θ_s 分别表示实际体积含水量、剩余体积含水量和饱和体积含水量； h 为吸力； α 表示经验参数； n 和 m 表示经验形态参数； K 和 K_s 表示实际和饱和导水率； l 表示与孔隙曲折性相关的经验参数。

与非平衡双孔隙度模型相对的是平衡双孔隙度模型，该模型如下：

$$\frac{\partial [(1 - R_v) \theta_{fe} + R_v \theta_{rf}]}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[(1 - R_v) K_{fe} \left(\frac{\partial h_{fe}}{\partial z} + 1 \right) \right] \quad (11)$$

以 Richard 方程为前提构建的平衡双孔隙度模型各个参数与非平衡双孔隙度模型参数一致，这种条件下， $K_{rf} = (1 - R_v) K_{fe} + R_v K_{rf}$ ， $K_T = (1 - R_v) K_{fe}$ ，当 K_{rf} 趋近于 0，同时保持平衡条件 $h_T = h_{rf} = h_{fe}$ ，才使得上述平衡性模型式(11)成立。

4 石砾参数对溶质运移影响研究中存在的主要问题

虽然石砾参数研究已有几十年的发展，但对其认识仍然是初步的，目前有关石砾参数研究主要体现在以下几方面：主要量化石砾参数对水文功能、土壤

侵蚀、径流产生、入渗等的影响,确定两者之间的相关关系;分析分布在土壤表面石砾、较好侵入土壤表层石砾以及完全侵入土壤表层内部石砾;石砾参数主要为石砾覆盖度、石砾含量和石砾粒径;研究试验方法主要包括:人工降雨模拟、天然降雨、室内试验以及野外试验;通常用对流弥散方程以及流动区-不流动区模型对试验结果进行拟合。

以上5方面是石砾参数研究中常涉及的内容,但也存在如下问题:对石砾参数与溶质运移关系验证很少,特别是优先流方面,存在何种量化关系至今没有有效解决;只考虑了土壤表层石砾参数与水文效应等的关系,对深层石砾认识较少;石砾参数与溶质运移关系较为复杂,深层石砾与大孔隙流之间关系验证缺乏,其机理研究还不系统;试验方法没有创新,针对石砾空间异质性的方法和设备不足,不能有效解决石砾参数研究中的难题;促进或延迟溶质优先运移石砾初始条件还没有解决,同时石砾覆盖度、石砾含量、石砾空间分布、石砾粒径、石砾形状以及石砾异质性,哪一因素是最重要的石砾参数还有待考证。

因此,深层石砾参数与溶质运移关系的验证是极其重要的,Guo等^[19]探讨了石砾覆盖度与溶质运移之间的关系,但是这些石砾仅分布在土壤表面,却没有证明土壤表层及深层石砾对溶质运移的影响;Kuntz等^[32]利用野外示踪试验与穿透试验相结合的方法,量化了存有石砾的土壤与溶质运移之间的关系;Zhao等^[31]分析了不同石砾含量和石砾粒径对溶质运移的影响;Shi等^[33]说明了石砾对大孔隙流以及稳定出流率的影响,认为它们之间关系较为复杂,土壤表层大孔隙流受植物根系改良土壤理化性能的作用明显,而深层土壤大孔隙则主要受石砾影响。这些证明石砾参数与溶质运移关系的研究仅仅是初步的,大量的研究亟待加强。但是至今,有关石砾研究量不足,验证还不充分,缺乏有效的试验数据和理论指导,同时由于石砾在土壤内空间分布的复杂性,其作用机理不明确,某些研究方法不够系统,缺乏统一的研究标准,需进一步加强相关方面的研究^[17,46]。同时研究区域不应该仅仅局限在农田耕地、石质林地等尺度,对于那些土壤表层植被覆盖度较小的牧场、退化土地、林火干扰区域以及高地^[29]也需进行解释^[14,78]。石砾在改善土壤理化性质的同时,促进了土壤压实^[18],对土壤有机碳含量变化有重要的影响^[51]。总之,对石砾与溶质运移复杂关系的认识仍然是初步的,全方位的理解还不成熟,石砾改变水分的重新分布和促进地下水形成的机制还没有形成系统的理论^[15]。

5 石砾参数研究发展趋势

在充分认识石砾的前提下,有关石砾参数的研究已不单单局限在其对水文功能、水土流失、径流等方面,应该更好地与解决我国生态环境、土地荒漠化、地下水污染和水质恶化实际问题结合起来,最重要的是要深刻理解和量化石砾参数与溶质运移之间的关系,特别是优先流,为解决上述问题提供理论支撑。今后的研究应该扩大研究领域,不仅仅以耕地或者石质林地作为研究区,应该拓展至牧场、林火干扰区、土地退化较严重区以及河边地区,特别是对于河边地区,因为河边存在大量的石砾,某种程度上大孔隙流发生频率较高,测定河边石砾对优先流的影响机制很困难,特别是在解冻的条件下。还要综合考虑时空尺度效应,同时石砾参数研究要上升至景观生态学领域上来,例如区域尺度、景观尺度,乃至全球尺度。正确认识石砾空间异质性,利用现代设备解决空间格局问题。

制定系统的量化石砾与溶质运移关系的研究标准,深入了解石砾综合特性,把石砾参数优化至溶质运移模型上来。开发综合生态水文模型,能够充分考虑根系与石砾相关参数,不断优化初始条件,完善相应参数。同时将石砾参数研究与GIS有效结合起来,应用在石砾与土壤、石砾与根系、石砾与石砾之间孔隙造成的水分和溶质优先运移现象等方面的研究,定量观测时空尺度上溶质运移程度,测定溶质运移过程中溶质浓度的变化情况,进而将石砾对水分和溶质运移的影响做出合理的解释和描述。

参考文献:

- [1] Bundt M, Widmer F, Pesaro M, Zeyer J, Blaser P. Preferential flow paths: biological 'hotspots' in soils[J]. *Soil Biology and Biochemistry*, 2001, 33(6): 729-738
- [2] 牛健植, 余新晓, 张志强. 贡嘎山暗针叶林森林生态系统土壤水分运移特征分析[J]. *北京林业大学学报*, 2008, 30: 240-245
- [3] Vocanson A, Roger-Estrade J, Boizard H, Jeuffroy MH. Effects of soil structure on pea (*Pisum sativum* L.) root development according to sowing date and cultivar[J]. *Plant and Soil*, 2006, 281: 121-135
- [4] Reading LP, Baumgartl T, Bristow KL, Lockington DA. Hydraulic conductivity increases in a sodic clay soil in response to gypsum applications: Impacts of bulk density and cation exchange[J]. *Soil Science*, 2012, 177(3): 165-171
- [5] Sanders EC, Abou Najm MR, Mohtar RH, Kladvik E, Schuize D. Field method for separating the contribution of surface-connected preferential flow pathways from flow through the soil matrix[J]. *Water Resource Research*, 2012, 48: 4 534-4 542

- [6] Dastidar MG, Jouannet V, Maizel A. Root branching: Mechanisms, robustness, and plasticity[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 2012, 1(3): 329–343
- [7] Jomaa S, Barry DA, Brovelli A, Heng BCP, Sander GC, Parlange JY, Rose CW. Rain splash soil erosion estimation in the presence of rock fragments[J]. *Catena*, 2011, 92: 38–48
- [8] Miller FT, Guthrie RL. Classification and distribution of soils containing rock fragments in the United States[J]. *Soil Science Society of America*, 1984, 13: 1–6
- [9] Zavala LM, Jordán A, Bellinfante N, Gil J. Relationships between rock fragment cover and soil hydrological response in a Mediterranean environment[J]. *Soil Science and Plant Nutrition*, 2010, 56(1): 95–104
- [10] Zhou BB, Shao MA, Shao HB. Effects of rock fragments on water movement and solute transport in a Loess Plateau soil[J]. *Comptes Rendus Geoscience*, 2009, 341(6): 462–472
- [11] 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
- [12] Russo DL. Leaching characteristics of a stony desert soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1983, 47(3): 431–438
- [13] Poesen JW, Tom D, Bunte K. Effects of rock fragments on soil erosion by water at different spatial scales: a review[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2): 141–166
- [14] Cerdà A. Effects of rock fragment cover on soil infiltration, interrill runoff and erosion[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52(1): 59–68
- [15] Cousin I, Nicoullaud B, Coutadeur C. Influence of rock fragments on the water retention and water percolation in a calcareous soil[J]. *Catena*, 2003, 53: 97–114
- [16] Amin S, Ahmadi SH. Incorporating rock fragments in soil erosion models: a case study, the ANSWERS model[J]. *Iranian Journal of Science and Technology, Transaction B, Engineering*, 2006, 30(B4): 527–539
- [17] Katra I, Lavee H, Sarah P. The effect of rock fragment size and position on topsoil moisture on arid and semi-arid hillslopes[J]. *Catena*, 2008, 72(1): 49–55
- [18] Jomaa S, Barry DA, Heng BCP, Brovelli A, Sander GC, Parlange JY. Influence of rock fragment coverage on soil erosion and hydrological response: Laboratory flume experiments and modeling[J]. *Water Resources Research*, 2012, 48: 5 535–5 556
- [19] Guo T, Wang Q, Li D, Zhuang J. 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: 1 200–1 208
- [20] Jean JS, Ai KF, Shih K, Hung CC. Stone cover and slope factors influencing hillside surface runoff and infiltration: laboratory investigation[J]. *Hydrological Processes*, 2000, 14: 1 829–1 849
- [21] De Figueiredo T, Poesen J. Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46: 81–95
- [22] Loosvelt L. Scale Dependent Influence of Rock Fragment Cover on Soil Infiltration, Runoff and Sediment Yield in Arid Zones of Chile[D]. Belgium: Ghent University, 2007
- [23] Mayor AG, Bautista S, Bellot J. Factors and interactions controlling infiltration, runoff, and soil loss at the microscale in a patchy Mediterranean semiarid landscape[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2009, 34 1 702–1 711
- [24] Valentin C, Casenave A. Infiltration into sealed soils as influenced by gravel cover[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1992, 56: 1 667–1 673
- [25] Herrick JE, Van Zee JW, Belnap J, Johansen JR, Remmenga M. Fine gravel controls hydrologic and erodibility responses to trampling disturbance for coarse-textured soils with weak cyanobacterial crusts[J]. *Catena*, 2010, 83: 119–126
- [26] Mandal UK, Rao KV, Mishra PK, Vittal KPR, Sharma KL, Narsimlu B, Venkanna K. Soil infiltration, runoff and sediment yield from a shallow soil with varied stone cover and intensity of rain[J]. *European Journal of Soil Science*, 2005, 56: 435–443
- [27] Poesen J, De Luna E, Franca A, Nachtergaele J, Govers G. Concentrated flow erosion rates as affected by rock fragment cover and initial soil moisture content[J]. *Catena*, 1999, 36: 315–329
- [28] Zapp DR, Poesen J, Nearing MA. Effects of rock fragments incorporated in the soil matrix on concentrated flow hydraulics and erosion[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2007, 32: 1 063–1 076
- [29] Urbanek E, Shakesby R. Impact of stone content on water movement in water-repellent sand[J]. *European Journal of Soil Science*, 2009, 60: 412–419
- [30] Smets T, López-Vicente M, Poesen J. Impact of subsurface rock fragments on runoff and interrill soil loss from cultivated soils[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 2011, 36(14): 1 929–1 937
- [31] Zhou BB, Shao MA, Wang QJ, Yang T. Effects of Different Rock Fragment Contents and Sizes on Solute Transport in Soil Columns[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1): 386–393
- [32] Kuntz BW, Rubin S, Berkowitz B, Singha K. Quantifying Solute Transport at the Shale Hills Critical Zone Observatory[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(3): 843–857
- [33] Shi ZJ, Xu LH, Wang YH, Yang XH, Jia ZQ, Guo H, Xiong W, Yu PT. Effect of rock fragments on macropores and water effluent in a forest soil in the stony mountains of the Loess Plateau, China[J]. *African Journal of Biotechnology*, 2012, 11(39): 9 350–9 361
- [34] Wilcox BP, Wood MK, Tromble JM. Factors influencing infiltrability of semiarid mountain slopes[J]. *Journal of Range Management*, 1988, 41(3): 197–205
- [35] Abrahams AD, Parsons AJ. Relation between infiltration and stone cover on a semiarid hillslope, southern Arizona[J]. *Journal of Hydrology*, 1991, 122: 49–59

- [36] Wang XY, Li ZX, Cai CF, Shi ZH, Xu QX, Fu ZY, Guo ZL. 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
- [37] Kim YJ, Darnault CJG, Bailey NO, Parlange JY, Steenhuis TS. Equation for describing solute transport in fields soils with preferential flow paths[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 2005, 69(2): 291–300
- [38] Poesen J. Transport of rock fragments by rill flow—A field study[J]. *Catena Supplement*, 1987, 8: 35–54
- [39] Bunte K, Poesen JWA. Effects of rock fragment covers on erosion and transport of non-cohesive sediment by shallow overland flow[J]. *Water Resources Research*, 1993, 29: 1 415–1 424
- [40] Zavala LM, Jordán A. Effect of rock fragment cover on interrill soil erosion from bare soils in Western Andalusia, Spain[J]. *Soil Use and Management*, 2008, 24(1): 108–117
- [41] Tetegan M, Pasquier C, Besson A, Nicoulaud B, Bouthier A, Bourennane H, Desbourdes C, King D, Cousin I. Field-scale estimation of the volume percentage of rock fragments in stony soils by electrical resistivity[J]. *Catena*, 2012, 92: 67–74
- [42] Follain S, Ciampalini R, Crabit A, Coulouna G, Garnier F. Effects of redistribution processes on rock fragment variability within a vineyard topsoil in Mediterranean France[J]. *Geomorphology*, 2012, 175/176: 45–53
- [43] Novák V, Kňava K. Determining the influence of stones on hydraulic conductivity of saturated soils, using numerical method[J]. *Geoderma*, 2011, 161: 177–181
- [44] Nyssen J, Poesen J, Moeyersons J, Lavrysen E, Haile M, Deckers J. Spatial distribution of rock fragments in cultivated soils in northern Ethiopia as affected by lateral and vertical displacement processes[J]. *Geomorphology*, 2002, 43(1/2): 1–16
- [45] Chen HS, Liu JW, Wang KL, Zhang W. Spatial distribution of rock fragments on steep hillslopes in karst region of northwest Guangxi, China[J]. *Catena*, 2011, 84(1/2): 21–28
- [46] 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
- [47] Wesemael BV, Poesen J, de Figueiredo T. Effects of rock fragments on physical degradation of cultivated soils by rainfall[J]. *Soil and Tillage Research*, 1995, 33(3/4): 229–260
- [48] Box JE. The effects of surface slaty fragments on soil erosion by water[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1981, 45: 111–116
- [49] Allaire SE, Gupta SC, Nieber J, Moncrief JF. Role of macropore continuity and tortuosity on solute transport in soils: 1. Effects of initial and boundary conditions[J]. *Journal of Contaminant Hydrology*, 2002, 58(3/4): 299–321
- [50] Govers G, Van Oost K, 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
- [51] Poesen J, Lavee H. Rock fragments in top soils: significance and processes[J]. *Catena*, 1994, 23(1/2): 1–28
- [52] Hutka J, Ashton UC. Sedigraph particle size analysis of soil samples from the Griggward study area of the Wagga Wagga project[R]. CSIRO-Division of Soils, 1995, 3: 327
- [53] Thurley MJ, Ng KC. Identification and sizing of the entirely visible rocks from a 3D surface data segmentation of laboratory rock piles[J]. *Computer Vision and Image Understanding*, 2008, 111(2): 170–178
- [54] Siddiqui FI, Ali Shah SM, Behan MY. Measurement of size distribution of blasted rock using digital image processing[J]. *JKAU: Eng. Sci.*, 2009, 20(2): 81–93
- [55] Oostwoud Wijdenes DJ, Poesen J. The effect of soil moisture on the vertical movement of rock fragments by tillage[J]. *Soil and Tillage Research*, 1999, 49(4): 301–312
- [56] Auzet AV, Boiffin J, Ludwig B. Concentrated flow erosion in cultivated catchments: influence of soil surface state[J]. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1995, 20: 5–14
- [57] Dastidar MG, Jouannet V, Maizel A. Root branching: mechanisms, robustness, and plasticity[J]. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Developmental Biology*, 2012, 1(3): 329–343
- [58] Tracy SR, Black CR, Roberts JA, Monney SJ. Soil compaction: A review of past and present techniques for investigating effects on root growth[J]. *Journal of the Science of Food and Agriculture*, 2011, 91(9): 1 528–1 537
- [59] Angers DA, Caron J. Plant-induced changes in soil structure: processes and feedbacks[J]. *Biogeochemistry*, 1998, 42: 55–72
- [60] Mitchell AR, Ellsworth TR, Meek BD. Effect of root systems on preferential flow in swelling soil[J]. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, 1995, 26 (15/16): 2 655—2 666
- [61] Van Der Krift TAJ, Kuikman PJ, Berendse F. The effect of living plants on root decomposition of four grass species[J]. *Oikos*, 2002, 96(1): 36–45
- [62] Buchli T, Merz K, Zhou XH, Kinzelbach W, Springman SM. Characterization and Monitoring of the Furggwanghorn Rock Glacier, Turtmann Valley, Switzerland: Results from 2010 to 2012[J]. *Vadose Zone Journal*, 2013, 12(1): 1–15
- [63] Zhou BB, Shao MA, Wen MX, Wang QJ, Horton R. Effects of coal gangue content on water movement and solute transport in a China Loess Plateau soil[J]. *Clean-Soil, Air, Water*, 2010, 38(11): 1 031–1 038
- [64] Su GW, Geller JT, Pruess K, Hunt JR. Solute transport along preferential flow paths in unsaturated fractures[J]. *Water Resource Research*, 2001, 37(10): 2 481–2 491
- [65] de Figueiredo T, Poesen J. Effects of surface rock fragment characteristics on interrill runoff and erosion of a silty loam soil[J]. *Soil and Tillage Research*, 1998, 46(1/2): 81–95
- [66] Luce CH. Effectiveness of road ripping in restoring infiltration capacity of forest roads[J]. *Restoration Ecology*, 1997, 5(3): 265–270

- [67] Lapidus L, Amundson NR. Mathematics of adsorption in Beds. VI. The effect of longitudinal diffusion in ion exchange and chromatographic columns[J]. *J. Phys. Chem.*, 1952, 56(8): 984–988
- [68] Bouwer H, Rice RC. Hydraulic properties of stony vadose zones[J]. *Ground Water*, 1984, 22: 696–705
- [69] Schulin R, Wierenga P J, Flühler H, Leuenberger J. Solute transport through a stony soil[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1987, 51(1): 36–42
- [70] Buchter B, Hinz C, Flury M, Flühler H. Heterogeneous flow and solute transport in an unsaturated stony soil monolith[J]. *Soil Science Society of American Journal*, 1995, 59(1): 14–21
- [71] Buchter B, Hinz C, Leuenberger J. Tracer transport in a stony hillslope soil under forest[J]. *Journal of Hydrology*, 1997, 192(1/4): 314–320
- [72] van Genuchten MT, Wagenet RJ. 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): 1 303–1 310
- [73] van Genuchten MT, Dalton EN. Models for simulating salt movement in aggregated field soils[J]. *Geoderma*, 1986, 38(1/4): 165–183
- [74] Scher H, Montroll EW. Anomalous transit-time dispersion in amorphous solids[J]. *Physical Review B*, 1975, 12(6): 2 455–2 477
- [75] Berkowitz B, Scher H, Silliman SE. Anomalous transport in laboratory scale, heterogeneous porous media[J]. *Water Resources Research*, 2000, 36(1): 149–158
- [76] Ross PJ, Smettem KRJ. A simple treatment of physical non-equilibrium water flow in soils[J]. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 2000, 64: 1 926–1 930
- [77] Šimůnek J, Wendroth O, Wypler N, Vangenuchten MT. Non-equilibrium water flow characterized by means of upward infiltration experiments[J]. *European Journal of Soil Science*, 2001, 52: 13–24
- [78] Simanton JR, Rawitz E, Shirley ED. Effects of Rock Fragments on Erosion of Semiarid Rangeland Soils[J]. *Soil Science Society of America*, 1984, 13: 65–72

Advances in Effects of Rock Fragments Parameters on Soil Water and Solute Transport: A review

ZHANG Ying-hu^{1,2}, NIU Jian-zhi^{1*}, LI Jiao¹, HAN Yi-ni¹, DU Xiao-qing¹, CHEN Shang-jie¹

(1 College of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Key Laboratory of Soil and Water Conservation and Desertification Combating, Ministry of Education, Beijing 100083, China; 2 Jiangxi Provincial Institute of Soil and Water Conservation, Jiangxi Provincial Key Laboratory for the Control of Soil Erosion, Nanchang 330029, China)

Abstract: In view of pedological perspectives, soil water and solute transport are pivotal environmental problems which have been regarded as international focus to date. In general, it is widely considered that theories upon water and solute transport are also applied to groundwater security, contaminant movement and heavy metal pollutions in soils and so on. It is well known that soil water and solute can transport from soil surface to subsoil even groundwater levels through preferential flow paths bypassing soil matrix although preferential flow and soil matrix flow. There is a wide range controlling factors which can influence soil water and solute transport, including soil structure, texture, hydraulic conductivity, bulk density, antecedent soil moisture, plant roots, rock fragments and so on. Rock fragments are significant units in soil layers which have complex effects on soil water and solute transport. This paper stated the definition and research progress of rock fragments, especially the relation between rock fragments parameters and soil water and solute transport. Internal elements including rock fragments cover, size, content, spatial heterogeneity etc. and external elements including rock-root structure, freezing/thawing, cultivation etc. were illustrated in detail. More studies were conducted on rock fragment parameters on soil surface and top soil, mainly concentrated on their effects on hydrological responses, soil erosion, infiltration, runoff generation instead of water and solute transport, but the effects of rock fragments located in the subsoil was not well understood due to the insufficiency of systematical theories. Standard techniques and models which confirm the relationship between rock fragments parameters and solute transport are listed and the current problems and future directions are discussed in this paper.

Key words: Soil solute transport, Rock fragment parameters, Model