

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], DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0391

## 壤中流研究进展与展望

肖雄<sup>1</sup>, 吴华武<sup>1</sup>, 李小雁<sup>1,2</sup>

(1. 北京师范大学资源学院, 北京 100875; 2. 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

**摘要:** 壤中流是径流的重要组成部分, 对流域径流调节、水源涵养、泥沙迁移、养分流失等都具有非常重要的作用, 是水文学研究的难点和前沿科学问题。论文介绍了壤中流的概念、研究背景和重要性, 对壤中流研究的国内外发展态势和热点研究内容进行了总结, 同时分析了壤中流形成的影响因素, 总结并讨论了径流小区实验法、地球物理法、模型模拟法、示踪剂方法的研究现状和优缺点, 提出了目前壤中流研究中存在的问题, 并对未来壤中流研究进行了展望。

**关键词:** 壤中流; 优势流; 地表径流; 降雨入渗

**文章编号:** 1006-7639(2016)-03-0391-12 DOI:10.11755/j.issn.1006-7639(2016)-03-0391

**中图分类号:** P338

**文献标识码:** A

### 引言

壤中流是在土壤中沿不同透水性土壤层界面流动的水流<sup>[1]</sup>, 它是径流的重要组成部分, 对流域径流调节、水源涵养、泥沙迁移、养分流失以及流域水文循环计算都具有非常重要的作用<sup>[2-4]</sup>。壤中流与地表径流和地下径流共同组成径流, 是重要的水文循环要素, 而壤中流与地下径流不同, 它具有较高的汇流速度; 壤中流与地面径流也不同, 因为它在多孔介质中流动, 汇流速度要低于地表径流。壤中流产生的物理条件是包气带中存在相对不透水层及上层土壤含水量至少达到田间持水量<sup>[5]</sup>。

根据壤中流的运移形式, 可将壤中流分为遵循达西定律的基质流和不遵循达西定律的优势流。水分在孔隙度较小、性质较为均一的土壤中运移时流速均匀, 但将达西定律应用于含有大孔隙的土壤时, 结果往往与达西定律所描述的有较大差异, 因为土壤大孔隙可成为水分快速运移的通道, 故而达西定律并不能很好地描述水分在大孔隙中的运动, 这部分经过大孔隙通道传输的水流称为“优势流”<sup>[6]</sup>。根据优势流的形成方式将土壤非饱和带中的优势流分为不同类型, 如大孔隙流、指流、漏斗流、绕流、沟

槽流、短路流和管流等<sup>[7-8]</sup>。由于优势流非线性的特征, 描述优势流的非均匀性则非常重要, 目前有基于染色实验的方法描述优势流在土壤中运移路径的分布特征<sup>[9-10]</sup>, 也有通过概率统计和分布模型的方法来对优势流的非均质特征进行表征<sup>[11-13]</sup>, 壤中流的研究由均质走向非均质体现在对优势流的研究。

壤中流是地下径流、河流、湖水的重要补给来源, 是流域径流过程中一个重要的组成部分, 对于整个流域的水资源形成和径流产生都非常重要, 而影响壤中流的因素较多且相互作用的情况较为复杂, 土壤性质、植被覆盖、降雨特征、土壤表层结皮、土壤初始含水量和坡度等因素都可影响壤中流的形成和运移。同时由于壤中流的形成和运移条件较为复杂, 壤中流的实验观测难度很大, 目前壤中流研究已成为水文学和土壤学交叉研究的热点和难点领域。本文概述壤中流领域研究的总体发展态势、壤中流的影响因素、研究方法、未来壤中流领域研究发展方向及其存在的主要问题。

### 1 壤中流研究的国内外总体发展态势及主要研究论题

壤中流研究在现阶段地球科学发展中处于极为

收稿日期: 2015-11-17; 改回日期: 2015-12-01

基金项目: 国家自然科学基金(41130640, 41390462)、教育部“创新团队发展计划”滚动项目“土壤水文与土壤侵蚀”(IRT15R06)共同资助

作者简介: 肖雄(1990-), 男, 湖南人, 硕士研究生, 研究方向为生态水文。E-mail: xiongshuai@mail.bnu.edu.cn

通讯作者: 李小雁(1970-), 男, 甘肃人, 教授, 研究方向为生态水文学与土壤水文学。E-mail: xyl@bnu.edu.cn

重要的地位,同时还是当前水文学和土壤学领域研究的热点问题之一。通过文献计量方法,利用关键词“subsurface flow”或“interflow”在 Web of Science 中统计自 1990 年以来不同年份和不同国家壤中流研究论文发表数量和被引频次。结果表明全球壤中

流研究呈现迅速增长态势,有关壤中流研究的 SCI 论文发表数量从 1990 年的 6 篇增加到 2014 年的 309 篇,论文被引频次增加显著(图 1),可以看出研究人员及相关研究机构逐渐认识到壤中流研究在地球科学研究中的重要性。

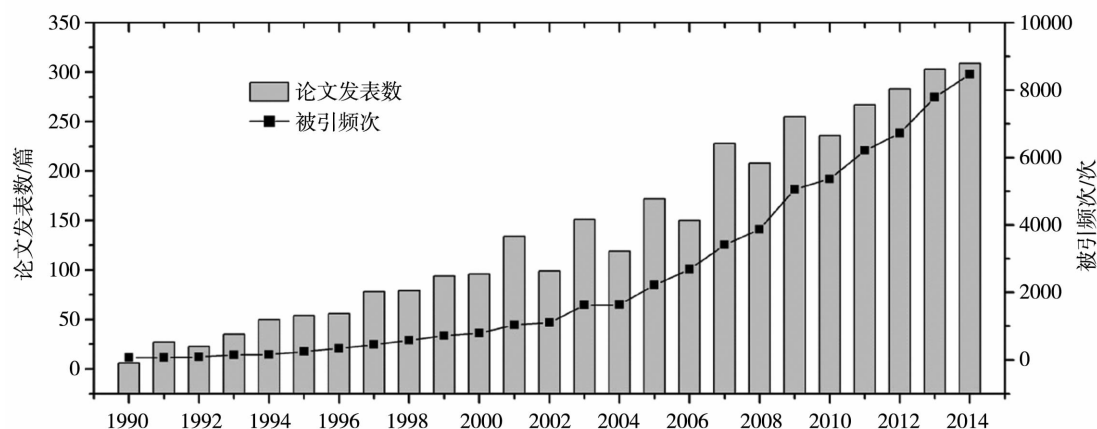


图 1 1990—2014 年壤中流研究论文发表数量及被引频次变化

Fig. 1 Annual variation of the number of published papers and their citation frequency about subsurface flow research from 1990 to 2014

利用壤中流研究中的关键词“subsurface flow”和“interflow”共搜索出 3 717 篇论文,研究涉及到生态学、水文和水资源学、地质学、农学、地理学、植物学、林学等领域。从图 2 可以看出,1990 年以来美国关于壤中流研究发表的论文数比例最高,达 31.18%;其次为中国,占 18.21%;第三为德国达 7.48%,这说明壤中流相关研究的热度和关注度在不同国家及地区间有明显的差异性。图 3 显示:美国、中国、德国和加拿大自 1990 年以来论文发表数量及被引次数均呈增加趋势,美国在壤中流研究领域所发表的论文数一直居高不下,中国该领域研究起步较晚,从 1990 年代末期才开始大量投入相关研究,但论文发表数量迅速增加且明显快于其他国家(美国、德国及加拿大),2010 年后相关论文发表数超过美国,德国和加拿大在壤中流研究领域论文发表数增加趋势缓慢(图 3a)。然而,中国与美国依然差距很大,特别是论文被引频次方面。1990—2014 年美国在壤中流领域发表的 SCI 论文数量为 1 097 篇,是中国的近 2 倍,文章被引频次 25 149,是中国的 6 倍多,而且中国在壤中流领域论文的被引频次明显低于世界平均水平(图 3b)。在高被引论文数量方面,美国有 7 篇,被引频次达 1 525 次,而中国只有 1 篇,被引频次仅有 19 次,加拿大和德国高被引论文数及被引频次与中国状况相当。总体来看,中

国在国际学术影响力的提升方面要滞后于 SCI 论文数量的增长,说明中国在该领域研究成果的学术影响力有待加强,提高研究质量成为未来阶段的重点。

从 1990—2014 年壤中流领域研究 TOP30 高被引论文(SCI 被引次数最高的 30 篇论文)分析来看, TOP30 高被引论文所涉及研究内容主要集中在壤中流的产流特征,壤中流对溶质(养分)运移、物质循环的作用以及壤中流对工程建设的影响等几个方面。

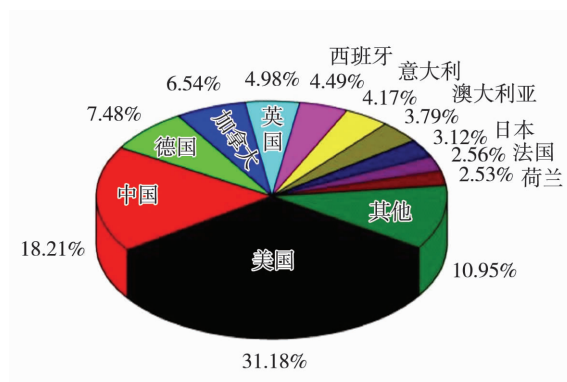


图 2 世界不同国家有关壤中流研究论文发表数量统计

Fig. 2 The percentage of the published papers concerning subsurface flow research in different countries

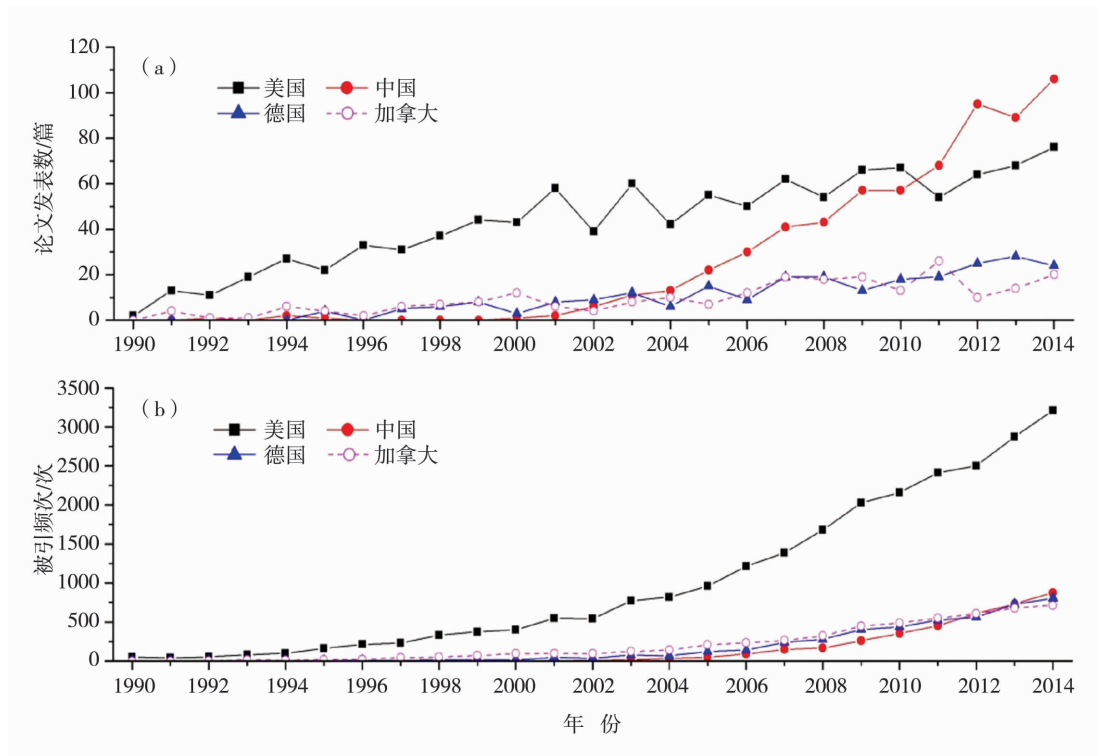


图3 1990—2014年间美国、中国、德国及加拿大发表壤中流领域研究论文数量(a)及引文次数(b)变化

Fig. 3 The number of the published papers (a) and the citation (b) about subsurface flow research in four countries from 1990 to 2014

### 1.1 壤中流的产流特征

由于流域的气候特点、空间尺度、土壤前期含水量、汇水面积、山坡坡度、土壤厚度、土壤孔隙度、土壤饱和/非饱和导水率等不同,壤中流的产流特征及对流域径流的贡献率都会发生变化<sup>[14]</sup>。Boulet等<sup>[15]</sup>对西班牙北部桉树林区的地表径流以及壤中流的研究发现,地表径流并不是区域内最主要的产流形式,即使在降水较多的湿润时期,地表径流的产流量在区域内也存在一定的空间异质性,产流率仅仅在0.6%~6%之间,而壤中流则为该区域的主要产流形式,其中,在岩土界面产生的管流和基质流是壤中流的主要产流形式。谢颂华等<sup>[16]</sup>研究表明红壤在不同地表处理条件下,壤中流可占到总产流量的68.4%~90%。Hopp等<sup>[17]</sup>对阿拉斯加东南部气候暖湿、矽石上覆土壤区域的降雨径流研究发现侧向壤中流可占总降雨量的68%。在同一地区内,降雨过程、雨量和雨前土壤含水量的不同也是导致壤中流产流量差异的重要因素。Van等<sup>[18]</sup>对西班牙西南部一次半干旱区坡地水文过程的研究发现:在强降雨事件中,坡地产流模式为超渗产流,产流方式主要为地表径流,壤中流产流量占总径流量的13%;在弱降雨事件中,土壤中孔隙逐渐湿润,大孔

隙流成为壤中流的主要形式,壤中流产流量可占总径流产流量的80%。同时在一次降雨径流过程中,壤中流对流域径流的贡献比例也随降雨过程而变化,Burns等<sup>[19]</sup>使用端元分析模型量化佐治亚州Panola山脉坡地河流径流几个主要水分来源贡献比例,发现坡地产流主要以壤中流的形式产生,壤中流对河流的贡献率与降雨雨强的对应关系较为明显,壤中流对总径流的贡献率在15%~20%之间。

### 1.2 壤中流对溶质(养分)运移及物质循环的作用

溶质(养分)在土壤中的运移特征在不同的气候、地形等条件下,其时空异质性较大,运移的路径也千差万别,通过系统观测能较全面地探讨壤中流对土壤养分空间分布的影响机制。Shen等<sup>[20]</sup>系统地探讨了壤中流对于沼泽地区养分分布的影响,并指出虽然地形、土壤性质、地层分布、蒸散发等因素对于区域内养分的分布有重要影响,但壤中流的作用同样不可忽视,例如盐分梯度所产生的优势流可有效地增加地表水与地下水、溪边与沼泽内部水分的联通与交换。而对于一些地形较为平缓、植被覆盖较好、地下水水位较高、气候湿润的流域,不饱和土壤中的壤中流可以携带大量养分<sup>[21-22]</sup>。壤中流中养分的迁移发生于土壤中的淋溶过程以及优势流

中,最开始向下迁移的是氮、磷等。在超量供水条件下,农田土壤氮的主要损失途径是通过淋溶的方式进行,同时是氮进入壤中流的重要方式,在某些特定的情况下,壤中流中氮浓度可以达到地表径流中氮浓度的 5~22 倍<sup>[23]</sup>。Wang 等<sup>[4]</sup>经过长时间的观测发现,紫色土中氮的主要流失形式为壤中流,占流失总量的 22%,而通过地表径流流失的比例仅为 0.6%。通常认为磷对于土壤有较强的亲和力,在没有淋溶及大规模磷的向下迁移发生的情况下,磷的流失主要通过地表径流引起<sup>[24]</sup>,但有实验表明,壤中流也是磷流失的一个重要途径<sup>[25]</sup>,如在沙质土壤的积水区内,壤中流是溶解态和悬浮颗粒态磷向河道运移的主要方式<sup>[26]</sup>。陈玲等<sup>[27]</sup>的研究表明,壤中流中总磷和颗粒态磷可在产流初期产生峰值,而在地表径流和壤中流中,溶解态无机磷占溶解态总磷的比例较高。对于人工湿地养分、污染物、细菌菌落分布和水力效应影响的研究在近几年也成为壤中流研究中的热点问题<sup>[27-32]</sup>,如 Yu 等<sup>[31]</sup>探讨了水平和垂直壤中流对模拟人工湿地系统固磷能力的空间异质性影响,结果表明:虽然无机磷在模拟人工湿地系统中的小范围分布存在明显的根区以及入流/出流效应,但无机磷的分布与水平方向的壤中流存在显著正相关关系。以上研究结果表明壤中流在溶质(养分)运移中扮演重要作用,对壤中流的研究可以为减少土壤养分流失、提高农业养分利用效率提供切实有效的科学依据。

### 1.3 壤中流对工程建设的影响

壤中流也是工程建设和山地灾害预防中必须考虑的重要因素之一。有研究表明,在风化程度较强的花岗岩地区,长时间、大雨强的降雨从岩石缝隙入渗成为壤中流的水分来源,即使降雨已经停止,壤中流仍旧会逐渐向上渗漏到上覆土层中,当水位提升到临界值时就会诱导山体滑坡的产生<sup>[33]</sup>。壤中流的影响在公路建设过程中同样需要考虑,例如在修建公路的排水沟和截水沟时如果仅仅考虑地表径流的影响而没有考虑壤中流,壤中流在降水后不断地从土壤水渗漏出来,因为不能顺利地流到坡脚而积蓄在坡面中间,造成大面积的坍塌,特别是工程施工期间会在山体边缘造成山体断裂,故而必须设计能够引导壤中流的排水沟<sup>[34]</sup>。

## 2 壤中流形成的影响因素

壤中流形成的先决条件和影响因子极为复杂。由于包气带土层物理性质及结构的复杂性,造成土壤自地表到相对不透水层往往形成多个层次,且不

同层次之间土壤性质差异明显,同时由于剧烈的非线性特征和滞后现象使得有些地区壤中流汇流速度很慢,壤中流峰值往往滞后于降雨径流主峰 2~4 d<sup>[35-37]</sup>,即使在均一、非湿胀的土壤中,壤中流过程也非常复杂。不同地区壤中流产流特征差别较大,而在一个小流域或坡面上,壤中流的形成和运移特征往往也会因为区域内植被、地形和土壤存在异质性而不同。影响壤中流的因素主要有降雨因素(包括雨量、雨强和降雨过程)、土壤因素(包括土壤的结构与质地、土壤中的植物根系、土壤表层结皮、土壤雨前含水量)、植被因素(如植被种类以及植被覆盖率等)和地形因素(如坡度)等。

### 2.1 降雨因素

壤中流的产流量与降雨量有较显著的正相关关系。Fu 等<sup>[38]</sup>对中国南方花岗岩小集水区内降雨径流特征研究发现,占总径流比例相对较大的壤中流只有在降雨量或者雨强较大时才会产生。降雨量对于壤中流的影响取决于能否形成水分的侧向流动,降雨特征对壤中流的影响主要表现在降雨强度和降雨历时 2 个方面<sup>[39]</sup>,例如在土壤土质较为疏松多孔的地区,优势流发育较为充分,遇到较大强度降雨时,水分会以较快的速度入渗,进而形成壤中流,而基质流在土壤中的入渗速度较慢,雨水入渗的过程较为均一,故整个降雨过程中降雨的总量对基质流的影响最为显著<sup>[40]</sup>,如上文所述,基质流和优势流的区别就在于是否遵循达西定律、能否快速形成产流。在人工降雨试验的条件下,对于紫色土而言,小雨强、长历时的降雨更容易形成壤中流,而相反,雨强增加时地表容易形成土壤结皮进而造成壤中流产流量较低,雨水多转化为地表径流<sup>[41]</sup>。

### 2.2 土壤因素

土壤结构和质地充分影响壤中流的形成,一般来说,包气带以下的一个相对不透水层是壤中流形成不可缺少的因素。汪涛等<sup>[36]</sup>对紫色土地区壤中流产流特征的研究发现:紫色土由紫色页岩风化形成,紫色页岩易于崩解和风化,土壤质地疏松多孔且砾石含量较多,使得水分更加容易向更深层次土壤入渗,进而在土壤相对不透水层以上形成壤中流。土壤结构有时会成为壤中流形成的重要因素,如华北石质山区的土壤层浅薄,持水能力低,容易达到饱和,壤中流产流特点为陡涨或陡落,且产流量较少,远低于地表径流和风化带出流的产流量<sup>[42]</sup>;太行山片麻岩区坡地具备典型的“岩土二元结构体”,在岩石和土壤的交界面处或岩石裂隙易形成壤中流<sup>[43]</sup>。土壤容重也是影响壤中流形成和运移的一个重要因

素,容重大的土壤中基流较为发育,大孔隙流则较少产生,进而影响壤中流对于土壤的冲刷作用,同时在不同介质中运移的壤中流所携带的溶质成分和含量也会有所不同<sup>[44]</sup>。对于森林流域内的坡地,表层土壤质地疏松多孔,有利于雨水向土壤更深层次入渗,坡地地形所产生的重力作用也利于土壤水以壤中流的形式向坡下方运移,同时森林坡地由于存在植物根系消耗土壤水分的作用,使得土壤中的水分分布不均匀,而根区更多的大孔隙也导致水分在土壤中以更快的速度运移,加快了水分在土壤中的传导,以上因素使得森林流域内的坡地极易形成壤中流<sup>[45]</sup>。

土壤表层结皮对壤中流有重要影响,降雨落到地表后,由于土壤表层结皮具备阻塞水分向下入渗的能力,进而阻碍壤中流的发生,入渗的雨水越少则越有利于地表径流的形成<sup>[46]</sup>。徐勤学等<sup>[41]</sup>对不同植被覆盖下紫色土坡地壤中流的研究表明:壤中流的产流量与地表结皮存在一定关系,裸地由于在雨水的击溅下形成了地表结皮,地表结皮减少了水分的下渗,降雨更多地转化为了地表径流,从而使得壤中流产流量减少。

雨前土壤含水量对壤中流的影响一方面表现在对水分入渗速率的影响上,有研究表明,水分的入渗速率与土壤含水量成反比<sup>[47]</sup>,同时雨前土壤含水量越大则坡地壤中流产流开始的时间明显提前<sup>[48]</sup>。而雨前土壤含水量对壤中流另一方面的影响表现在对于壤中流的补给上,对于相同的降雨而言,雨前土壤含水量越大则壤中流产流量越大,相对较高的雨前土壤含水量是壤中流产生的重要条件之一<sup>[49]</sup>。有研究表明,紫色土壤中流形成的前提是土壤水分饱和或者得到充分的水分补给,水分补给的方式如大雨和暴雨等,壤中流的产流过程相对于降雨过程有一定的滞后,但壤中流在雨后的产流与降雨强度无关<sup>[50]</sup>。

对于西北干旱区而言,一些非降水性陆面水分分量,比如空气中的雾水、空气中水分在土壤表面凝结的露水或霜、来自下层土壤的水分(土壤毛管抽吸水和土壤蒸馏水)等,是土壤水分相当重要的补给来源,在某些降水量极低的地区对于土壤水分的补充作用甚至超过了降水<sup>[51]</sup>,所以在西北干旱区壤中流的研究中,一些陆面过程参数、植被生理生态指标的获取是必不可少的。土壤对于太阳辐射的反照率、表层土壤向深层土壤传递热量的能力、土壤水分的蒸发以及植物蒸腾作用的强弱都深刻影响着西北干旱区非降水性陆面水分分量和土壤水分的变化,张强等<sup>[52]</sup>对西北干旱区戈壁土壤反照率和热传导

率等土壤参数进行了实验室测量和野外实测的对比,从而为西北干旱区土壤水分和壤中流的研究提供了基础。

## 2.3 植被因素

植被覆盖也是影响壤中流的一个重要因素。即使对于同一区域,不同植被覆盖下地表径流与壤中流的产流量也会有极大不同,吕锡芝等<sup>[53]</sup>对黄土高原坡地不同植被覆盖下壤中流和地表径流在降雨径流过程中所占比例的研究中发现:不同植被覆盖下壤中流和地表径流的产流率差异较大,其中混交径流小区的壤中流产流量可占总径流的 90.86%。Zhao 等<sup>[54]</sup>基于人工降雨实验来分析植被覆盖率对于壤中流的影响,结果表明降雨量相同时植被覆盖率大的径流小区内壤中流产流率更高,原因是植被覆盖较多的地表可以有效减缓地表径流的流速,使得更多水分下渗,从而增加壤中流的产流量,但雨强对于壤中流产流影响不明显,与当地土壤质地有关。王峰等<sup>[55]</sup>对湖南红壤丘陵区自然降雨条件下壤中流产流过程进行了研究,用油茶林和恢复区 2 种植被覆盖进行对比,结果表明:油茶林和恢复区的壤中流产流特征不同,油茶林壤中流产流量大于同层恢复区,产流历时也较长,同一土地利用方式下,深层土壤壤中流产流量更大且迅速。刘泉等<sup>[56]</sup>对土石山区降雨径流过程的研究发现:植被覆盖对壤中流有着直接影响,植被覆盖越大则壤中流的产流量越高,反之地表径流的产流量会相应地增加。

## 2.4 地形因素

坡度对壤中流的影响也很大,前人对土壤水分与坡度的关系做了许多研究。对于坡地径流过程而言,雨水落到坡地后会受到重力的作用,坡度越大则落到地表的雨水更容易形成地表径流,进而导致壤中流产流量减少。同时,坡地壤中流产流历时与坡度具有良好的指数相关性,而土壤稳定入渗速率与坡度表现出良好的幂函数相关关系<sup>[48]</sup>。坡度较小的地区地表径流和壤中流产流量都较低,进而可以起到良好的保氮和固磷作用<sup>[57]</sup>。

综上所述,众多影响因素都对壤中流的产生起重要作用,每个因素的改变都会对壤中流的运移路径、产流量、运移方式(基质流或优势流等)以及壤中流中所携带的溶质数量造成影响。其中有些因素是壤中流形成中不可缺少的,首先,充足的水分来源是形成壤中流所必须的,例如要有足量的降水补充和雨前土壤含水量才能形成壤中流,若是降雨量太小或是雨前含水量太低,则雨水落到地面后多用来补充土壤的水分亏缺,而不会发生雨水将雨前储存

在土壤中的水分驱替而出的过程,进而也就不会形成壤中流。同时,降水量或者土壤含水量越高,则壤中流产流量越高。但壤中流的形成并不要求土壤含水量必须达到饱和,例如在包气带达到水分饱和状态前,在局部相对不透水层的作用下,由于水分下渗速率小于水分侧向流动速率,壤中流也可以小范围产生,所以相对不透水层也是侧向壤中流形成的另一个重要条件。而土壤质地、土壤表层结皮、植被覆盖和坡度等因素都可以不同程度地对壤中流产生影响,但这些因素并不是壤中流能否形成的关键性因素。目前国内外对于壤中流影响因素的研究还局限在 1 种或 2 种因素的改变上,且各因素对于壤中流的影响还多为定性的研究,缺乏多影响因子协同作用、定量化的研究,这在后续的研究中还需要加强和深入。

### 3 壤中流的研究方法

#### 3.1 径流小区实验法

径流小区实验法是世界上研究坡面径流的代表性方法之一,也是目前研究坡面径流最直观、最准确的方法。其他方法都需要借助径流小区来进行验证或控制产流条件,根据不同的地形、植被覆盖、土壤性质、区域产汇流特点进行选择 and 布置,同时根据实验目的来布置径流小区。径流小区按照大小可分为微型小区、一般小区和大型小区 3 类<sup>[58]</sup>,在坡面上或流域内进行壤中流研究则需要根据实验目标和研究区特点来布置径流小区。

但布置径流小区时往往也存在尺度和异质性问题。一般来说,降雨后雨水一部分被植被冠层截留,一部分从地表入渗到土壤中,还有一部分在地表形成径流。地表径流在经过一段距离的运移后也有可能入渗到土壤中与土壤中的壤中流汇合<sup>[39]</sup>,所以壤中流的产汇流过程较为复杂。同时壤中流的产汇流过程往往发生在一个坡面甚至更大的尺度上,形成壤中流需要相对不平坦的地形、一个较大的汇水坡面和较多的降水,但在大流域内由于土壤性质、地形的空间异质性较高,甚至对于一个坡面而言,不同坡位的土壤性质和植被覆盖都会有明显的差异,人为影响如耕作方式的不同也对壤中流的产汇流有重要影响。然而以往的观测研究多集中在标准径流小区尺度(5 m × 20 m)和坡面尺度开展,或者在点尺度上对土壤或人工湿地系统利用染色法或元素示踪法进行水分和溶质运移的研究,无法完整系统地观测壤中流的形成、运动、汇流至河道或湖泊等过程,所以需要借助卫星遥感手段来划分壤中流的产汇流区

域,同时在坡面尺度甚至在流域尺度上建立壤中流的观测系统。

#### 3.2 地球物理方法

以往的研究在建设径流小区时对土壤扰动较大,壤中流的形成和运移已经受到了干扰,从而改变了壤中流观测断面原有的水力学边界条件,在此情形下获得的壤中流观测结果不能很好地代表包气带中壤中流的真实情况,所以需要建立在不破坏、不扰动原状土壤前提下可精确研究壤中流产汇流的观测系统,例如使用 CT 扫描、磁共振成像、电阻层析成像(ERT)、时域反射仪法(TDR)、探地雷达(GPR)、大地电导率仪(EMI)等地球物理新技术来研究壤中流的形成和运移过程。

CT 扫描技术是一种非入侵性的三维成像技术,可在不破坏、不扰动土壤的前提下对土壤孔隙结构的几何介质和拓扑特征进行表征,通过计算机图像处理技术来进行可视化,从而获得土壤孔隙的三维结构<sup>[59]</sup>。CT 扫描技术最初应用在对土壤密度和土壤含水量的测量上<sup>[60]</sup>,经过几十年发展成为可测量土壤孔隙数目、位置、形状和大小的技术手段<sup>[61]</sup>。CT 扫描技术还可以利用软件对扫描得到的图像进行分析,如提取出根系直径和长度等形态信息以及植物根系在土壤中位置和密度等分布信息<sup>[62-63]</sup>。同时,土壤质地是影响壤中流产生的一个重要因素,利用 CT 扫描技术可以对土壤中的团聚体结构、粒径组成等进行探究<sup>[64-65]</sup>,进而在分析土壤孔隙分布、根系分布、土壤质地等影响土壤连通性因素的同时,对水分在土壤中下渗和侧向流动的可能运移路径和运移方式进行探讨,例如可判定水分是以基质流还是以优势流的方式运移。

核磁共振技术与 CT 扫描技术同属于在不破坏、不扰动原状土壤的前提下对土壤孔隙结构进行多维、定量描述的技术手段,而核磁共振的频率更高<sup>[66]</sup>。Metzner 等<sup>[67]</sup>将核磁共振技术和 CT 扫描技术对于植物根系的三维成像效果进行了比较,结果显示 2 种方法对小根系的成像效果相当,由于 CT 扫描技术分辨率较高,对根系细节的表现上更好,核磁共振成像技术则由于具有较高的频率而对根系分形维数的计算有更好的结果。核磁共振与 CT 扫描技术的应用都为定量分析土壤中孔隙和根系的大小和分布提供了新的手段,同时也是分析水分在土壤中的运移速率和运移方式的新方法。但由于核磁共振技术的成本要高于 CT 扫描技术,核磁共振技术的应用还不是很广泛<sup>[68]</sup>。

除了利用计算机断层扫描技术(CT 扫描、核磁

共振成像)之外,还有利用电阻层析成像仪法、时域反射仪法、探地雷达法、大地电导率仪法等介电特性法对壤中流进行研究。介电特性法主要通过获取媒质的介电系数,同时建立起介电系数与媒介含量的转换关系,从而推导出对媒质导电能力有影响的媒介含量。应用在对于土壤水的监测中则土壤为媒介,水分(媒质)在土壤中的多少可以显著改变土壤导电率,可以通过介电系数反演出土壤含水量。电阻层析成像技术主要通过测量电极上的电位变化来获得土壤电阻率值,进而推导出土壤中水分的含量<sup>[69]</sup>。时域反射仪法基于电磁波在介电特性不同的土壤中传播速度不同的原理,通过探针发射并接收反射回来的电磁波来推导土壤含水量<sup>[70]</sup>。这2种方法可以对固定位置的土壤进行含水量的连续观测,在获得土壤水分的动态变化的同时来探究壤中流的形成和运移特征。

探地雷达法主要通过发射与接收大地波或回波并分析波的传播速度与振幅来推导土壤含水量,雷达波的传播速度、振幅与土壤含水量存在较强的正相关关系<sup>[71]</sup>。Guo 等<sup>[72]</sup>针对目前对于壤中流的形成、持续性产流和运移方式等方面的理解尚不清晰的现状,使用延时性探地雷达解释壤中流在坡地上的运移方式和路径等方面的问题,结果表明:在一场降雨径流过程中,区域内水分下渗速率和土壤含水量因土壤性质存在空间异质性而不同,雷达信号也会由此而不同,建立较好的雷达信号与土壤含水量的关系,可以从探地雷达波的传播速度和振幅等数据中挖掘壤中流产生及运移的信息。大地电导率仪法主要通过发射磁场对土壤介电特性进行探测,可在点尺度和空间尺度上测量土壤表光电导率(ECa),根据不同土壤性质下的光电导率与土壤含水量的经验公式,计算得到土壤水空间分布信息,有实验表明土壤含水量和表光电导率的相关性系数较高<sup>[73]</sup>。这2种方法都可快速、准确地获得土壤水分空间分布的综合信息,对于面积较大和水文条件复杂区域内土壤含水量的监测有较大潜力。

但地球物理新技术的应用仍旧存在较大局限性。首先,实验的开展需要较多的资金,例如在坡面尺度上开展壤中流的研究时,需要沿着坡面安装若干套 ERT 土壤水分探头或 TDR 探针,才有可能捕捉到一次降雨径流过程中较为完整的土壤水分动态变化信息,而布置相关的实验设备花费较高。CT 扫描和核磁共振成像技术目前仅应用在微观或者小尺度的土体上,并且需要从野外将原状土壤采集回实验室扫描,采集回实验室的原状土壤往往受到不同

程度的扰动,而如何将计算机断层扫描技术应用到田间实验是亟待解决的问题。探地雷达法和大地电导率仪法所获取的土壤含水量数据通常是某一固定时刻的数值,无法反映土壤水分的动态变化,而壤中流的发生和运移却是动态、连续的过程,故而这2种方法并不能满足壤中流研究的需要。这些局限性使得地球物理方法难以应用到大尺度的壤中流研究中,一些新技术还处在理论研究和应用的拓展上,这些实际问题的解决还亟待实验仪器在应用方面有突破性进展。

### 3.3 模型模拟

水文模型运用数学方法定量刻画壤中流的发生和运动、植被与水文过程的相互作用及评估环境变化与生态水文效应,同时可以模拟全球变化对壤中流的影响<sup>[74]</sup>。描述壤中流的发生和运移所用到的数学及物理方法主要根据 Buckingham 提出的毛管势理论、Richards 提出的非饱和流方程。国内外对壤中流模型已开展了一定深度的研究,并取得了一些阶段性成果,使本来较为复杂的壤中流的发生和运移有了可以定量描述的工具,同时近 20 a 来计算机技术的高速发展为壤中流的模型模拟提供了有力的工具,对于土壤中水分运移的研究也完成了从静态分析到动态分析的迈进,对于壤中流的研究也逐渐成熟化、系统化<sup>[75]</sup>。

根据不同的标准,壤中流模型有不同分类,以下按照模型中对土壤与水文过程相互作用的描述,将现有模型归为 3 大类,即贮水—泄流模型、动力波模型和 Richards 模型。前人对这 3 大模型的原理、应用和优缺点已经进行了系统且详细的分析<sup>[76-77]</sup>: Richards 模型对于土壤水分的求解较为精确,但由于其计算过程以及结果比较复杂,不便于在较大流域中应用,同时也不能较好地应用在暴雨径流的预测上;贮水—泄流模型由于其计算方法和结果较为简单,可以很好地应用于暴雨径流的预测上;动力波模型的应用对于壤中流强度的下限有所限定( $K_s > 140 \text{ mm} \cdot \text{h}^{-1}$ ),这使得动力波模型具有一定的局限性。

在以上 3 种模型基础上,壤中流模型也不断得到改进。有学者构建了更为精简的坡地壤中流模型,即为贮水—泄流模型的改进版,并在阔叶红松林流域坡面土壤对其进行了验证,同时与原模型进行对比分析,结果表明改进后的模型要比原贮水—泄流模型的精度更高<sup>[78]</sup>。另有学者针对现有壤中流模型简化地表径流与壤中流相互影响的不足,采用饱和和入渗理论、Saint-Venant 方程和 Richards 方程

构建了地表径流—壤中流耦合模型,并应用于实验室模拟,较好地描述了坡面地表径流和壤中流的耦合产流机制<sup>[79]</sup>,但该耦合模型仅应用于室内模拟实验,未考虑到冠层截留、蒸散发和地下水交换等水文过程对壤中流的影响,同时模型假设土壤均一旦忽略了枯枝落叶对产流的影响,故有待于进一步的研究和改进。

现有模型在以下几个方面等尚存在问题:(1)现今所有壤中流模型中对降雨条件的设定过于均一,但野外真实情况是雨强随时间而改变,同时壤中流产流过程随雨强而改变;(2)大多数壤中流模型将所应用的条件设定为理想坡面,对于自然坡面条件下壤中流持续产流的研究较少;(3)壤中流的模拟研究多为室内实验,许多野外条件下可能影响壤中流发生和运移的因素并未考虑到,然而在野外的坡面、小流域以至于大流域中,土壤、植被、地形等因素异质性较大,导致模型在实际应用时存在误差和不能反映野外真实情况等,故而现有模型仍旧需要调整以提高模拟的有效性。以上问题是未来壤中流模型研究的重点,需要开展深入的研究。

#### 3.4 示踪剂方法

采用示踪剂可以较好地示踪水分在土壤中的运移路径,在国内外的研究中应用较多,示踪剂方法可应用在野外大尺度中,对壤中流的运移路径和运移速度进行示踪研究,同时该方法可以在不扰动土壤的前提下对水分的运移进行示踪,示踪剂包括染色剂和水化学示踪剂。

染色剂示踪法最早应用在描述土壤中动物活动所形成的孔洞方面<sup>[80]</sup>,目前在点尺度上对水分的运移路径和方式进行的研究较多,易溶于水的染色剂可以较好地对水分进行示踪。染色剂法在点尺度上对优势流的研究有较好的效果,但需要进行配置溶液、场地准备、溶液入渗、挖开土壤、拍照和后期图像处理分析等步骤,实验流程较为繁琐<sup>[81]</sup>。该方法也有较大的局限性,例如将染色剂示踪法应用在较大尺度上水分运移研究时,染色剂溶液在被水分长距离搬运后往往难以在土壤中观测到清晰的染色痕迹,所以需要找到更好的染色剂来对壤中流进行示踪研究。

水化学示踪剂主要应用钙、镁离子和土壤水溶液电导率以及 PH 值等参数来进行研究,但应用这些参数时通常会遇到一些问题,例如参数易受到影响,因为水在流域内循环过程中易与流经的土壤和岩层发生化学元素的交换,也有可能发生化学反应,进而改变水体的水化学特征。有时在流域内不

同位置采集到的水样的水化学参数相差很大,因此在解释这些水化学参数的差异时存在很大的不确定性<sup>[82]</sup>,所以水化学示踪剂法应用于壤中流的研究时显得不那么可靠,使用更为可靠的示踪剂来研究坡地壤中流的发生以及运移就显得非常重要。

目前划分径流中各成分最常见的方法是氢氧同位素方法,氢氧同位素技术的应用为水循环研究提供了新的手段。氢氧同位素(D 和<sup>18</sup>O)以不同的比率存在于自然水体中,其组成大小是区别不同水体的理想指标。在水循环中,水通过蒸发、凝聚、降落、渗透和径流形成水循环,水体中氢氧同位素组成在径流的形成、运移、混合等过程能敏感地响应环境条件变化且会发生不同程度相态变化,从而引起各个阶段同位素分馏作用,继而能够反映自然水体在相态变化以及径流与地表物质接触过程中的氢氧同位素分馏<sup>[83]</sup>,通过氢氧同位素可以将径流分割为坡面径流、壤中流、地下径流、栖息饱和径流等类型<sup>[84]</sup>。目前环境同位素方法可以准确估算径流贡献来源和比例,具体方法是在研究区域内的一次降雨事件前后,以固定的时间间隔在一个坡地的不同坡位或是在流域内的不同位置采集土壤水、壤中流、地表径流和大气降水,通过比较分析不同水体间的氢氧同位素特征,探讨壤中流在坡地或者流域内的运移方式和路径<sup>[85-87]</sup>。所以,氢氧同位素在壤中流的研究中可作为一种良好的天然示踪剂。

利用氢氧同位素方法对壤中流的研究取得了许多进展。其中对壤中流的产流来源进行研究时发现,来源可分为新水和旧水,新水即一次降雨径流事件中补充的水分,而旧水则为降雨前储存在土壤中或者地表的水分。新水和旧水对于径流的补充方式各有不同,例如降雨落到地表后,径流接收到降雨补充的水分开始形成,而当雨水入渗到土壤中以后,降雨前储存在土壤中的水分(即旧水)会被驱替出来,融入到本次降雨径流过程中所产生的壤中流中,形成壤中流,进而产生新旧水混合的结果<sup>[88]</sup>。谢小立等<sup>[89]</sup>运用氢氧同位素方法对红壤坡地的壤中流发生机制进行了研究,结果表明浅层和深层土壤壤中流来源不同,且水分来源主要为原有的土壤水分。有研究基于氢氧同位素分割径流确定新水和旧水对壤中流的贡献,特别是利用模型确定新水和旧水对壤中流的具体贡献比例<sup>[90-92]</sup>。同时,在一场降雨径流过程中新水和旧水对径流各有一定的贡献,通常随着径流过程的不同,新旧水对于径流的贡献也是一个动态的过程<sup>[93]</sup>。

氢氧同位素方法在壤中流及径流组分分割研究

中也存在许多产生误差的因素,主要来源于:(1)同位素测量技术本身存在的误差;(2)雨水在降落过程中受到二次蒸发以及当地气候等因素的影响,造成降水中氢氧同位素值发生变化;(3) $^{18}\text{O}$ 同位素比率的高程效应;(4)壤中流运移过程中,矿物质可能会溶解于壤中流;(5)氢氧同位素随着时间和空间的变化会发生一定的改变,进而产生误差<sup>[94]</sup>。另外,氢氧同位素法很难确定各个壤中流来源贡献的具体起止时间,同时无法精确计算产流量的大小,这些都是氢氧同位素方法研究中有待于解决的问题。已经有结合水化学示踪剂法和氢氧同位素法的研究,对所获得的信息进行多角度分析,将壤中流的运移路径和水分来源进行识别和分割,进而达到更准确地认识壤中流的形成、滞留时间和运移路径的目的<sup>[95-96]</sup>。

#### 4 存在的问题及展望

壤中流与人类生存有着密切的关系,国内外针对壤中流开展了较多研究,目前对壤中流产汇流机理的研究方法已取得了许多重要的研究成果,表现在壤中流的概念及其特征、产机理、实践应用等诸多方面,加深理解地球关键带(Critical Zone)中水文过程、土壤侵蚀过程及溶质运移过程的相互作用,更好地解释了地球关键带的溶质运移过程及路径,也推动了分布式水文模型及水资源管理等方面的发展。

但壤中流研究在以下几方面还有所欠缺并亟待加强:(1)径流组成成分的研究仍显笼统,径流成分组划分研究有待于深入,坡面尺度一流域尺度上降水—产流的物理机制尚不明确;(2)地球关键带中包含着错综复杂的地理关键要素(植被、土壤、大气)且具有高度变异性,而当前的水文循环研究偏重地表和土体浅层,对地表—土体—地下水等多元要素交互作用以及植被对水文循环的影响方面仍需开展深入研究;(3)目前水文循环的研究主要依赖于现有的水文模型,忽略了基于水文实验的水分过程机理在模型中的应用。

同时,关键带研究涉及地表、土体(饱和带和非饱和带)、基岩等多个层次,且不同层次间的水土、溶质运移过程错综复杂,目前对关键带多元过程的全要素(如坡面地表和地下水流的速度、波速、物种运移时间等)在时空层面的有效监测和检测手段亟待加强<sup>[97]</sup>。由于非饱和带土层物理性质及其构造的复杂性、人类生产活动和自然因素的综合作用,目前对壤中流的运移路径、水分滞留时间(Transit

Time, TT)和运移方式的认知尚显不足。McGuire等<sup>[96]</sup>研究表明非饱和带水分运移时间反映了水流路径的空间变异性以及流域汇流过程的非线性特征,精确地计算水分运移时间并探索与流域下垫面特征的关系,是深入认识非饱和带汇流机理、物种能量运移转化的关键,其中水分滞留时间分布函数(Transit Time Distribution, TTD)和平均滞留时间(Mean Transit Time, MTT)能很好地反映流域如何存储并释放水分的过程和流域生物地球化学过程及流域对人类活动和下垫面变化的敏感程度,因此,开展对MTT以及TTD的精确定量分析和计算具有重要意义。

#### 参考文献

- [1] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京:中国水利出版社,2004. 145-147.
- [2] Anderson M G, Medonnell J J. Encyclopedia of hydrological sciences[M]. Chichester: John Wiley and Sons, 2005. 1719-1732.
- [3] Wilson G V, Cullum R F, Römkens M J M. Ephemeral gully erosion by preferential flow through a discontinuous soil-pipe[J]. Catena, 2008, 73(1): 98-106.
- [4] Wang T, Zhu B. Nitrate loss via overland flow and interflow from a sloped farmland in the hilly area of purple soil, China[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2011, 90(3): 309-319.
- [5] 刘廷玺. 壤中流形成机理的数学描述[J]. 内蒙古农牧学院学报, 1994, 15(3): 83-90.
- [6] Allaire S E, Roulier S, Cessna A J. Quantifying preferential flow in soils: A review of different techniques[J]. Journal of Hydrology, 2009, 378(1): 179-204.
- [7] Xu Z H, Xu Z M, Cao J W, et al. Present and Future Research of Preferential Flow in Soil[J]. Soils, 2012, 44(6): 905-916.
- [8] Beven K, Germann P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071-3092.
- [9] Zhu L, Liu D, Zhu C. Multifractal Analysis of the Heterogeneous Soil Water Flow in Root Zone[J]. Journal of Convergence Information Technology, 2013, 8(3): 1-10.
- [10] Gerke K M, Sidle R C, Mallants D. Preferential flow mechanisms identified from staining experiments in forested hillslopes[J]. Hydrological Processes, 2015, 29(21): 4562-4578.
- [11] Sheng F, Liu H, Zhang R, et al. Determining the active region model parameter from dye staining experiments for characterizing the preferential flow heterogeneity in unsaturated soils[J]. Environmental Earth Sciences, 2012, 65(7): 1977-1985.
- [12] Anaya A A, Padilla I, Macchiavelli R, et al. Estimating preferential flow in karstic aquifers using statistical mixed models[J]. Ground Water, 2014, 52(4): 584-596.
- [13] 盛丰, 王康, 张仁铎, 等. 土壤非均匀水流运动与溶质运移的两区-两阶段模型[J]. 水利学报, 2015, 46(4): 433-451.
- [14] Uchida T, Tromp-van M I, McDonnell J J. The role of lateral pipe flow in hillslope runoff response: an intercomparison of non-linear hillslope response[J]. Journal of Hydrology, 2005, 311(1):

- 117–133.
- [15] Boulet A K, Prats S A, Malvar M C, et al. Surface and subsurface flow in eucalyptus plantations in north – central Portugal[J]. *Journal of Hydrology & Hydromechanics*, 2015, 63(3):197–204.
- [16] 谢颂华, 莫明浩, 涂安国, 等. 自然降雨条件下红壤坡面径流垂向分层输出特征[J]. *农业工程学报*, 2014, 19(19):132–138.
- [17] Hopp L, Mc Donnell J J, Condon P. Lateral subsurface flow in a soil cover over waste Rock in a humid temperate environment[J]. *Vadose Zone Journal*, 2011, 10(1):332–344.
- [18] Van S N, Schnabel S, Jetten V G. The influence of preferential flow on hillslope hydrology in a semi – arid watershed (in the Spanish Dehesas)[J]. *Hydrological Processes*, 2008, 22(18):3844–3855.
- [19] Burns D A, McDonnell J J, Hooper R P, et al. Quantifying contributions to storm runoff through end – member mixing analysis and hydrologic measurements at the Panola Mountain Research Watershed (Georgia, USA) [J]. *Hydrological Processes*, 2001, 15(10):1903–1924.
- [20] Shen C, Jin G, Xin P, et al. Effects of salinity variations on subsurface flow in salt marshes[J]. *Egu General Assembly*, 2013, 15(1):6751.
- [21] Hubbard R K, Sheridan J M. Water and nitrate – nitrogen losses from a small, upland, coastal plain watershed[J]. *Journal of Environmental Quality*, 1983, 12(2):291–295.
- [22] Jia H, Lei A, Lei J, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil [J]. *Agricultural Water Management*, 2007, 89(1–2):89–97.
- [23] 郑海金, 胡建民, 黄鹏飞, 等. 红壤坡耕地地表径流与壤中流氮磷流失比较[J]. *水土保持学报*, 2014, 28(6):41–45.
- [24] Simard R R, Beauchemin S, Haygarth P M. Potential for preferential pathways of phosphorus transport[J]. *Journal of Environmental Quality*, 2000, 29(1):97–105.
- [25] Heathwaite A L, Dils R M. Characterising phosphorus loss in surface and subsurface hydrological pathways[J]. *Science of the Total Environment*, 2000, 251–252(1):523–538.
- [26] David W, Robert S. Fit – for – purpose phosphorus management; do riparian buffers qualify in catchments with sandy soils[J]. *Environmental Monitoring & Assessment*, 2014, 186(5):2867–2884.
- [27] 陈玲, 宋林旭, 崔玉洁, 等. 模拟降雨条件下黄棕壤坡耕地磷素流失规律研究[J]. *农业环境科学学报*, 2013, 32(1):49–55.
- [28] Holland J F, Martin J F, Granata T, et al. Effects of wetland depth and flow rate on residence time distribution characteristics [J]. *Ecological Engineering*, 2004, 23(3):189–203.
- [29] Al – Baldawi I A W, Abdullah S R S, Hasan H A, et al. Optimized conditions for phytoremediation of diesel by *Scirpus grossus* in horizontal subsurface flow constructed wetlands (HSFCWs) using response surface methodology [J]. *Journal of Environmental Management*, 2014, 140(1):152–159.
- [30] Foladori P, Bruni L, Tamburini S. Bacteria viability and decay in water and soil of vertical subsurface flow constructed wetlands[J]. *Ecological Engineering*, 2015, 82(1):49–56.
- [31] Yu G, Tan M, Chong Y, et al. Spatial Variation of Phosphorous Retention Capacity in Subsurface Flow Constructed Wetlands; Effect of Wetland Type and Inflow Loading[J]. *Plos One*, 2015, 10(7):1–15.
- [32] Zidan A R A, El – Gamal M M, Rashed A A, et al. Wastewater treatment in horizontal subsurface flow constructed wetlands using different media (setup stage)[J]. *Water Science*, 2015, 50(1):26–35.
- [33] Li W C, Dai F C, Wei Y Q, et al. Implication of subsurface flow on rainfall – induced landslide: a case study [J]. *Landslides*, 2015, 15(1):1–15.
- [34] 尉继廷. 浅谈壤中流截水沟的设计[J]. *山西水利*, 2000, 4(1):33.
- [35] 徐佩, 王玉宽, 傅斌, 等. 紫色土坡耕地壤中产流特征及分析[J]. *水土保持通报*, 2006, 26(6):14–18.
- [36] 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.
- [37] 谢颂华, 涂安国, 莫明浩, 等. 自然降雨事件下红壤坡地壤中流产流过程特征分析[J]. *水科学进展*, 2015, 26(4):526–534.
- [38] Fu C, Chen J, Zeng S. Observation and Analysis of Rainfall – Runoff Characteristics in a Coastal Granite Catchment in Southern China[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2015, 17(1):138–149.
- [39] 姜海燕, 赵雨森, 陈祥伟, 等. 森林植被对水文过程的影响研究综述[A]. 提高全民科学素质、建设创新型国家[C]. 中国科协年会论文集, 2006. 66–70.
- [40] Peterson E W, Davis R K, Brahana J V, et al. Movement of nitrate through regolith covered karst terrane, northwest Arkansas [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 256(1):35–47.
- [41] 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.
- [42] 杨聪, 于静洁, 刘昌明, 等. 华北山区坡地产流规律试验研究[J]. *地理学报*, 2005, 60(6):1021–1028.
- [43] 曹建生, 刘昌明, 张万军, 等. 太行山区坡地水文地质特性与渗流集蓄技术研究[J]. *水科学进展*, 2005, 16(2):216–221.
- [44] 卢修元, 魏新平, 王君勤. 土壤容重对溶质迁移过程的影响[J]. *水土保持通报*, 2013, 33(2):26–29.
- [45] 张英虎, 牛健植, 朱蔚利, 等. 森林生态系统林木根系对优先流的影响[J]. *生态学报*, 2015(6):147–156.
- [46] 耿洁. 双坡度条件下不同母质土壤壤中流发育及氮素淋失特征[D]. 武汉:华中农业大学, 2013.
- [47] Zeng C, Wang Q, Fan J. Effect of initial water content on vertical line – source infiltration characteristics of soil [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(1):24–30.
- [48] 吴发启, 赵西宁, 余雕. 坡耕地土壤水分入渗影响因素分析[J]. *水土保持通报*, 2003, 23(1):16–18.
- [49] Clothier B E, Green S R, Deurer M. Preferential Flow And Transport In Soil: Progress And Prognosis[J]. *European Journal of Soil Science*, 2008, 59(1):2–13.
- [50] 刘刚才, 林三益, 刘淑珍. 四川丘陵区常规耕作制下紫色土径流发生特征及其表面流数值模拟[J]. *水利学报*, 2002, 12(19):101–108.

- [51] 张强,王胜,曾剑. 论干旱区非降水性陆面液态水分量及其与土壤水分的关系[J]. 干旱区研究,2010,27(3):392-400.
- [52] 张强,卫国安,侯旭红. 西北干旱区戈壁土壤参数的实验室测量及与野外观测的对比[J]. 干旱区研究,2002,20(1):44-52.
- [53] 吕锡芝,康玲玲,左仲国,等. 黄土高原吕二沟流域不同植被下的坡面径流特征[J]. 生态环境学报,2015,24(7):1113-1117.
- [54] Zhao N, Yu F, Li C, et al. Investigation of Rainfall - Runoff Processes and Soil Moisture Dynamics in Grassland Plots under Simulated Rainfall Conditions[J]. Water, 2014,6(9):2671-2689.
- [55] 王峰,沈阿林,陈洪松,等. 红壤丘陵区坡地降雨壤中流产流过程试验研究[J]. 水土保持学报,2007,21(5):15-17.
- [56] 刘泉,李占斌,李鹏,等. 汉江水源区自然降雨过程下坡地壤中流对硝态氮流失的影响[J]. 水土保持学报,2012,26(5):1-5.
- [57] 王玉霞,龙天渝,卢齐齐. 二次降雨条件下紫色土壤中流的氮磷流失特征研究[J]. 中国水土保持,2011,5(6):33-35.
- [58] 王云琦,王玉杰,朱金兆,等. 森林与坡面产流研究[J]. 水土保持学报,2005,18(5):59-63.
- [59] 程亚南,刘建立,吕菲,等. 基于CT图像的土壤孔隙结构三维重建及水力学性质预测[J]. 农业工程学报,2012,22(22):115-122.
- [60] Petrovic M A, Siebert J E, Rieke P E, et al. Soil Bulk Density in Three Dimensions by Computed Tomographic Scanning[J]. Soil Science Society of America Journal, 1982,46(3):445-450.
- [61] Passoni S, Borges F D S, Pires L F, et al. Software Image J to study soil pore distribution[J]. Ciência E Agrotecnologia, 2014,38(2):122-128.
- [62] 罗锡文,周学成,严小龙,等. 基于XCT技术的植物根系原位形态可视化研究[J]. 农业机械学报,2004,35(2):104-106.
- [63] Zhou X, Cao X, Zhang C, et al. A method of 3D nondestructive detection for plant root in situ based on CBCT imaging[A]. Bio-medical Engineering and Informatics (BMEI)[C]. The 7th International Conference on IEEE, 2014.110-115.
- [64] Gibson J R, Lin H, Bruns M A. A comparison of fractal analytical methods on 2- and 3-dimensional computed tomographic scans of soil aggregates[J]. Geoderma, 2006,134(3):335-348.
- [65] Jiang J, Xiang W, Rohn J, et al. Research on mechanical parameters of coarse-grained sliding soil based on CT scanning and numerical tests[J]. Landslides, 2015,8(1):1-12.
- [66] Simpson M J, Simpson A J, Gross D, et al. H-1 and F-19 nuclear magnetic resonance microimaging of water and chemical distribution in soil columns[J]. Environmental Toxicology & Chemistry, 2007,26(7):1340-1348.
- [67] Metzner R, Eggert A, Dusschoten D V, et al. Direct comparison of MRI and X-ray CT technologies for 3D imaging of root systems in soil: potential and challenges for root trait quantification[J]. Plant Methods, 2015,11(1):17.
- [68] 程亚南,刘建立,张佳宝. 土壤孔隙结构定量化研究进展[J]. 土壤通报,2012,43(4):988-994.
- [69] 董峰,崔晓会. 电阻层析成像技术的发展[J]. 仪器仪表学报,2003,24(4):703-705.
- [70] 李旺霞,陈彦云. 土壤水分及其测量方法的研究进展[J]. 江苏农业科学,2014,42(10):335-339.
- [71] 李蕙君,钟若飞. 探地雷达波振幅与土壤含水量关系的数值模拟[J]. 应用科学学报,2015,33(1):41-49.
- [72] Guo L, Chen J, Lin H. Subsurface lateral preferential flow network revealed by time-lapse ground-penetrating radar in a hillslope[J]. Water Resources Research, 2014,50(12):9127-9147.
- [73] Shanahan P W, Binley A, Whalley W R, et al. The Use of Electromagnetic Induction to Monitor Changes in Soil Moisture Profiles beneath Different Wheat Genotypes[J]. Soil Science Society of America Journal, 2015,79(2):459-466.
- [74] 吴伟,王雄宾,武会,等. 坡面产流机制研究刍议[J]. 水土保持研究,2006,13(4):84-86.
- [75] 裴铁璠,李金中. 壤中流模型研究的现状及存在问题[J]. 应用生态学报,1998,9(5):543-548.
- [76] Sloan P G, Moore I D. Modeling subsurface stormflow on steeply sloping forested watersheds[J]. Water Resources Research, 1984,20(12):1815-1822.
- [77] 李金中,裴铁. 森林流域坡地壤中流模型与模拟研究[J]. 林业科学,1999,35(4):2-8.
- [78] 郑侃,金昌杰,王安志,等. 森林流域坡面流与壤中流耦合模型的构建与应用[J]. 应用生态学报,2008,19(5):936-941.
- [79] Ehlers W D. Observations on Earthworm Channels and Infiltration on Tilled and Untilled Loess Soil[J]. Soil Science, 1975,119(3):242-249.
- [80] 李柳,郑肖然,李小雁,等. 小叶锦鸡儿灌丛对土壤水分下渗及优势流的影响[J]. 水土保持学报,2015,29(2):55-59.
- [81] Kaushal S S, Groffman P M, Likens G E, et al. Increased salinization of fresh water in the northeastern United States[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 2005,102(38):13517-13520.
- [82] Craig H. Isotopic Variations in Meteoric Waters[J]. Science, 1961,133(3465):1702-1703.
- [83] Lee E S, Krothe N C. A four-component mixing model for water in a karst terrain in south-central Indiana, USA. Using solute concentration and stable isotopes as tracers[J]. Chemical Geology, 2001,179(1):129-143.
- [84] Boucher J L, Carey S K. Exploring runoff processes using chemical, isotopic and hydrometric data in a discontinuous permafrost catchment[J]. Hydrology Research, 2010,41(6):508-519.
- [85] Carey S K, Boucher J L, Duarte C M. Inferring groundwater contributions and pathways to streamflow during snowmelt over multiple years in a discontinuous permafrost subarctic environment (Yukon, Canada)[J]. Hydrogeology Journal, 2013,21(1):67-77.
- [86] Turner K W, Edwards T W D, Wolfe B B. Characterising Runoff Generation Processes in a Lake-Rich Thermokarst Landscape (Old Crow Flats, Yukon, Canada) using  $\delta^{18}\text{O}$ ,  $\delta^2\text{H}$  and d-excess Measurements[J]. Permafrost & Periglacial Processes, 2014,25(1):53-59.
- [87] Penna D, Engel M, Mao L, et al. Integrated use of stable isotopes and electrical conductivity for the analysis of the water sources to runoff in a glacierized alpine catchment[A]. EGU General Assem-

- bly Conference Abstracts[C]. 2014. 16. 10605.
- [88] 顾慰祖, 尚漫廷, 翟劭斌, 等. 天然实验流域降雨径流现象发生的悖论[J]. 水科学进展, 2010, 21(4): 471–477.
- [89] 谢小立, 尹春梅, 陈洪松, 等. 基于环境同位素的红壤坡地水分运移研究[J]. 水土保持通报, 2012, 32(3): 1–6.
- [90] Liu Y, Liu F, Xu Z, et al. Variations of soil water isotopes and effective contribution times of precipitation and throughfall to alpine soil water, in Wolong Nature Reserve, China[J]. Catena, 2015, 126(1): 201–208.
- [91] Scholl M A, Shanley J B, Murphy S F, et al. Stable – isotope and solute – chemistry approaches to flow characterization in a forested tropical watershed, Luquillo Mountains, Puerto Rico[J]. Applied Geochemistry, 2015, 3(8): 1–14.
- [92] 顾慰祖. 集水区降雨径流响应的环境同位素实验研究[J]. 水科学进展, 1992, 3(4): 246–254.
- [93] Uhlenbrook S, Hoeg S. Quantifying uncertainties in tracer – based hydrograph separations: a case study for two – , three – and five – component hydrograph separations in a mountainous catchment [J]. Hydrological Processes, 2003, 17(2): 431–453.
- [94] Pellerin B A, Wollheim W M, Feng X, et al. The application of electrical conductivity as a tracer for hydrograph separation in urban catchments[J]. Hydrological Processes, 2008, 22(12): 1810–1818.
- [95] Yang Y G, Xiao H L, Zhao L J, et al. Hydrological processes in different landscapes on Mafengou River basin [J]. Advances in Water Science, 2011, 22(5): 624–630.
- [96] McGuire K J, Mc Donnell J J. A review and evaluation of catchment transit time modeling[J]. Journal of Hydrology, 2006, 330(3): 543–563.
- [97] 丁文峰, 李勉. 不同坡面植被空间布局对坡沟系统产流产沙影响的实验[J]. 地理研究, 2010, 29(10): 1870–1878.

## Research Progress and Prospects of Subsurface Flow

XIAO Xiong<sup>1</sup>, WU Huawu<sup>1</sup>, LI Xiaoyan<sup>1,2</sup>

(1. College of Resources Science and Technology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China;  
2. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

**Abstract:** Subsurface flow is an important component of runoff, it plays a very important role in drainage basin runoff regulation, water conservation, sediment migration, and the loss of nutrient, it has been the difficulty and frontier issues in the field of hydrogeology. This review paper introduced the concept, research background and significance of subsurface flow and summarized the domestic and foreign research development trend and the hot points of the subsurface flow research. What's more, the influence factors of subsurface flow were analyzed. By discussing research status and summarizing the advantages as well as disadvantages of runoff plot experiment method, geophysics method, model simulation method and the tracer material method, it proposed the problems in the research of subsurface flow at present, and made a prospect for the future subsurface flow research.

**Key words:** subsurface flow; preferential flow; surface runoff; rainfall infiltration