中国生态农业学报(中英文)
Chinese Journal of Eco-Agriculture

壤中流形成机制及其生态水文效应研究进展

赵宇寒，曹建生，朱春雨，阳　辉

Research progress on the formation mechanism of subsurface flow and its eco-hydrological effects

ZHAO Yuhan, CAO Jiansheng, ZHU Chunyu, and YANG Hui

在线阅读 View online: https://doi.org/10.12357/cjea.20210277

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

微地形变化对地表水文过程影响的研究进展

Advances in research on the effects of micro-topography changes on surface hydrological processes

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(10): 1587-1595

中国北方土石山区植被恢复及其生态效应研究进展

Research advances in vegetation restoration and its ecological effects in earth-rock mountain areas of North China

中国生态农业学报(中英文). 2019, 27(9): 1319-1331

施肥对紫色土农田土壤有机碳损失过程的影响

Effect of fertilizer application on soil carbon loss in purple soil

中国生态农业学报(中英文). 2021, 29(9): 1571-1581

土壤氮气排放研究进展

Advance in soil dinitrogen emission

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 182-189

旱地土壤硝态氮的产生、淋洗迁移及调控措施

Review of soil nitrate formation, leaching transport and their control measures in upland farming systems

中国生态农业学报(中英文). 2017, 25(12): 1731-1741

土壤亚硝酸气体(HONO)排放过程及其驱动机制

The mechanisms of HONO emissions from soil: A review

中国生态农业学报(中英文). 2018, 26(2): 190-194

关注微信公众号，获得更多资讯信息

中国生态农业学报(中英文) 2022 年 1 月 第 30 卷 第 1 期
Chinese Journal of Eco-Agriculture, Jan. 2022, 30(1): 38−46

DOI: 10.12357/cjea.20210277

赵宇寒, 曹建生, 朱春雨, 阳辉. 壤中流形成机制及其生态水文效应研究进展[J]. 中国生态农业学报 (中英文), 2022, 30(1): 38−46

ZHAO Y H, CAO J S, ZHU C Y, YANG H. Research progress on the formation mechanism of subsurface flow and its eco-hydrological effects[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2022, 30(1): 38−46

壤中流形成机制及其生态水文效应研究进展*

赵宇寒[1,2], 曹建生[1**], 朱春雨[1], 阳 辉[1]

(1. 中国科学院遗传与发育生物学研究所农业资源研究中心/河北省土壤生态学重点实验室/中国科学院农业水资源重点实验室 石家庄 050022; 2. 中国科学院大学 北京 100049)

摘 要: 水是人类生存和经济社会发展的重要基础资源, 在气候变化和人类活动的双重影响下, 陆地水循环发生了深刻变化。壤中流是水循环的重要环节, 径流过程的重要组成部分, 河湖水的重要补给来源, 对流域径流形成、水源涵养、养分运移等过程产生重要影响, 是水文学和土壤学及生态水文学的研究热点、难点与重要科学问题。文章分析发现 1990—2020 年中国壤中流的发文数量和被引频次均逐渐增多, 研究方向主要集中在环境、工程、水资源以及农业等方面, 主题分布在紫色土、湿地、氮素等方面。壤中流形成的主要影响因素包括土壤、地形、植被、降雨等。壤中流的几种生态水文效应包括土壤养分运移效应、水土保持、径流调节、水文预报效应等。最后文章提出了目前壤中流研究中的一些局限性, 并对未来的研究重点进行了展望, 为重要生态系统修复与水源涵养功能提升提供参考。

关键词: 壤中流; 土壤; 降雨入渗; 生态水文效应

中图分类号: S157.2 **开放科学码(资源服务)标识码(OSID):**

Research progress on the formation mechanism of subsurface flow and its eco-hydrological effects*

ZHAO Yuhan[1,2], CAO Jiansheng[1**], ZHU Chunyu[1], YANG Hui[1]

(1. Center for Agricultural Resources Research, Institute of Genetics and Developmental Biology, Chinese Academy of Sciences / Hebei Key Laboratory of Soil Ecology / Key Laboratory of Agricultural Water Resources, Chinese Academy of Sciences, Shijiazhuang 050022, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Water is an important basic resource for human survival and economic and social development. However, the water cycle has undergone profound changes under the dual influence of climate change and human activities. Subsurface flow, a key part of the runoff process and a major replenishment source for rivers and lakes, has a critical impact on runoff formation, water conservation, and nutrient transport. The understanding of subsurface flow processes is an important and popular topic in the fields of hydrology, soil science, and ecohydrology, however, it is a complex scientific problem that is difficult to disentangle. In this article, it was found that from 1990 to 2020, the number citation frequency of published articles related to subsurface flow in China have gradually increased. The researches mainly focused on the environment, engineering, water resources, and agriculture, focusing on topics such as purplish soil, wetlands, and nitrogen. In addition, we analyzed the main factors affecting subsurface flow formation, including soil, to-

* 河北省重点研发计划项目 (20324203D)、河北省创新能力提升计划项目 (20536001D) 和国家自然科学基金项目 (4187072165) 资助

** 通信作者: 曹建生, 主要从事山地生态水文过程与降水资源调控机制研究。E-mail: caojs@sjziam.ac.cn

赵宇寒, 主要研究方向为生态水文学。E-mail: 1219886686@qq.com

收稿日期: 2021-05-08 接受日期: 2021-09-26

* This study was supported by the Key R & D Project of Hebei Province (20324203D), Hebei Province Innovation Ability Promotion Project (20536001D) and the National Natural Science Foundation of China (4187072165).

** Corresponding author, E-mail: caojs@sjziam.ac.cn

Received May 8, 2021; accepted Sep. 26, 2021

pography, vegetation, rainfall, etc. Furthermore, we summarized several ecological and hydrological effects of interflow, including the soil nutrient transport effect, soil and water conservation, runoff regulation, and hydrological forecasting effect. Finally, we highlighted some limitations in current research on interflow and discussed future research priorities, ultimately providing an important scientific basis for crucial ecosystem restoration and water conservation improvements.

Keywords: Subsurface flow; Soil; Rainfall infiltration; Eco-hydrological effect

水是生命之源、生产之要、生态之基, 事关人类生存、经济发展和社会进步[1]。受气候变化、人口增长等因素的影响, 全球水资源短缺、水环境污染、水生态损害等问题日趋严峻, 本质是流域水循环在自然与人类双重驱动下演变失衡。水循环指的各种形式的水体在陆地、海洋和大气间不断运动、转化的过程, 使水资源不断更新, 维持着全球水的动态平衡。壤中流是径流的重要组分, 同时也是河湖水的重要补给来源, 在水源涵养、养分运移等方面发挥着重要作用。

壤中流是在土壤中沿不同透水性土壤层界面流动的水流[2]。壤中流产生条件为: 1) 包气带中存在相对不透水层; 2) 上层土壤含水量达到田间持水量[3]。受土壤质地影响, 壤中流的运移形式主要有两种: 一是在介质较为均一的土壤中, 遵循达西定律的基质流; 二是在含有大孔隙的土壤中, 不遵循达西定律的优先流[4], 根据形成方式优势流分为大孔隙流、漏斗流、指流、管流等不同类型[5-6]。

作为径流的重要组成部分, 也是变化环境下关系水循环和生态环境演变的重要环节, 壤中流目前是水文学与土壤学研究领域的热点和难点。壤中流的产流过程受到大气降水、土壤性质、地形条件、植被等多种因素的交互影响, 较为复杂。同时壤中流参与溶质的运移过程, 对土壤环境变化、植被生长恢复起到重要作用, 影响土壤生产力与环境可持续发展。另外壤中流对水体环境产生影响, 水体环境又与人体健康存在密切联系, 应该受到更多关注。本文概述了 1990 年以来中国壤中流领域研究的发展态势、影响壤中流形成的因素、壤中流的生态水文效益、存在的主要问题, 并探讨了对未来壤中流研究的方向。

1　国内壤中流研究发展态势

20 世纪 60 年代后国内学者对壤中流的研究陆续增多, 90 年代后迅速发展, 逐渐成为水文学和土壤学领域研究的热点问题之一[2]。在 Web of Science (WOS) 中通过关键词“subsurface flow”或“interflow”以及限制地区“China”或“PRC”, 在中国知网 (CNKI) 通过关键词“壤中流”, 统计搜索 1990 年以来中国关于壤中流研究发表的论文数量以及被引频次。结果表明在 WOS 中自 1990 年中国对于壤中流的研究迅速增加, 论文发表数从 1991 年的 2 篇增加到 2020 年的 368 篇, 论文被引频次也呈现指数型增长 (图 1a)。

在 CNKI 全部数据库中通过“主题=壤中流”或“题名=壤中流”检索 1990—2020 年发表的壤中流研究相关中文论文。结果表明 1990—2004 年年发文量均在 20 篇以内, 2005 年起国内关于壤中流的研究进入快速发展阶段, 2013 年发文量达到峰值 63 篇, 近 5 年进入稳定发展时期 (图 1b)。

从检索 1990—2020 年壤中流领域得到的论文分析来看, 主要主题分布在紫色土、湿地、氮素、坡耕地、洪水预报、水文模型等方面 (图 2), 研究领域涉及农业资源与环境、水利工程、环境、林学、生态等, 研究内容主要集中在壤中流产流、壤中流与养分流失、壤中流影响因素等方面。

2　壤中流形成的主要影响因素

以往研究表明影响壤中流形成的因素极为复杂, 包括土壤因素 (土壤初始含水量、土壤质地结构、土壤类型等)、水流补给条件 (坡度、覆盖条件、径流等)、降雨因素 (包括雨强、历时等)。

2.1　土壤因素

土壤是一个极其复杂的体系, 土壤的质地结构状况、水分、母质等直接影响土壤的通气状况, 从而影响土壤水分运行规律[7]。

土壤初始含水量影响土壤入渗能力。杨聪等[8]在华北石质山地通过人工模拟降雨试验监测并分析了土壤含水量与壤中流的关系, 结果表明前期土壤含水量小则更容易产生壤中流, 这可能是由于风化带有较多裂隙, 降雨开始后土壤的入渗速率比较大, 雨水可在土壤层和风化带中迅速渗出, 形成壤中流和风化带出流。曾辰等[9]对此持有相同的观点, 认为水分的入渗速率与土壤含水量呈反比。吴发启等[10]也表示初始含水率越大, 在相同时间内, 非稳定入渗阶段的入渗速率迅速降低; 随着土壤初始含水量增加, 坡地壤中流产流开始的时间明显提前, 稳定入渗

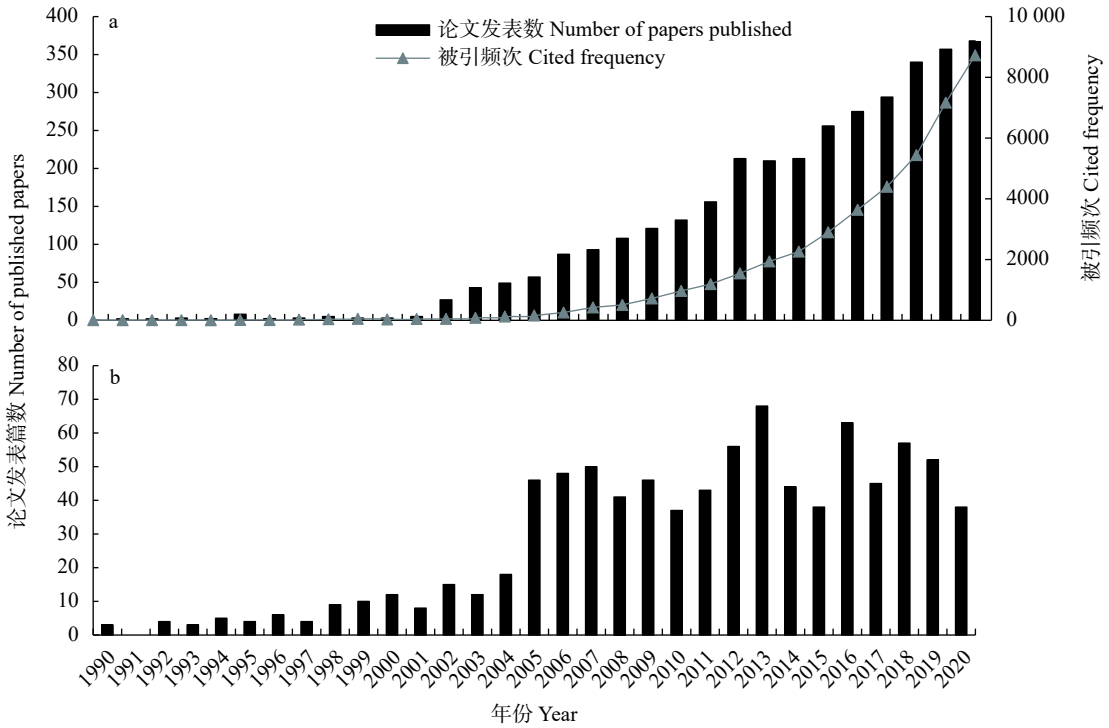

图 1 1990—2020 年 Web of Science (a) 和中国知网 (b) 检索的中国壤中流论文发表数量及被引频次变化趋势

Fig. 1 Trends in the number and citation of the published papers about researches of subsurface flow of China in Web of Science (a) and CNKI (b) from 1990 to 2020

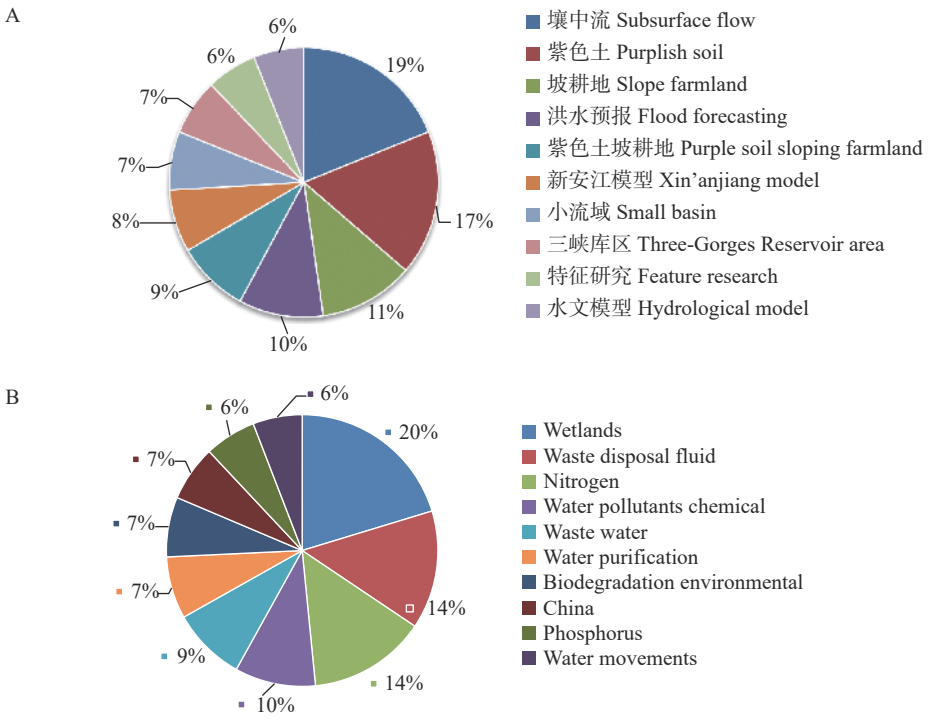

图 2 1990—2020 年中国知网 (A) 和 Web of Science (B) 壤中流研究的主要主题分布

Fig. 2 Distribution of main themes of published papers on subsurface flow researches in CNKI (A) and Web of Science (B) from 1990 to 2020

率迅速降低。土壤前期含水量越小, 壤中流移动更明显。

土壤质地结构也是壤中流形成的重要因素。紫色土疏松易崩解, 存在一定土壤孔隙, 壤中流在紫色土地区普遍存在且占总径流量一定比例[11]。一般情况下, 排除容重等因素的影响, 黏粒含量越高、质地越细的土壤饱和导水率越小[12]。饱和导水率越小, 水

分下渗越慢, 越容易在土层滞留形成侧向壤中流[13]。黄土高原土层深厚、质地均匀, 一般难以形成壤中流, 但在沟谷边坡或沟道地区, 土体存在垂直切面和明显的分层结构, 再加上下层不透水层的作用, 较容易形成壤中流[14-15]。在太行山片麻岩坡地“上覆土壤, 下伏岩石”的岩土二元结构下, 在土壤-风化岩石的交界面处或风化岩体的裂隙容易形成壤中流[16]。赵思远等[17] 通过染色示踪技术研究华北土石山区坡面优先流影响因素, 发现土壤质地是引起优先流分布差异的主要原因。而在喀斯特地区上层土壤疏松, 入渗能力强, 表层岩溶带为相对隔水层, 壤中流是坡面径流的重要组分[18-19]。在裂隙和溶沟发育、岩体破碎裸露出地表且交错分布埋藏的区域, 坡地径流与壤中流存在复杂的交互过程[18]。

不同母质发育下的土壤壤中流产流特征也存在差异。徐铭泽等[13] 研究了花岗岩、第四纪红黏土、红砂岩 3 种母质发育的红壤坡面产流特征, 发现花岗岩红壤的壤中流量最小, 第四纪红壤的流量最大, 花岗岩红壤的壤中流量仅为第四纪红壤的 53%~67%, 峰值为后者的 42%~52%, 且停雨后的壤中流消退过程可以用指数函数方程进行预测, 决定系数在 0.82 以上, 具有较好的预测性。

土壤中动物活动以及人类活动影响土壤孔隙从而影响壤中流。动植物的洞穴使土壤形成较大孔隙, 显著影响水分运移过程, 可促成壤中流的发展[20]。蜥蜴洞穴处的土壤稳定性和入渗率较高[21]; 蚯蚓通过挖掘垂直或连续的洞穴, 加速了土壤中水分的转移[22]。相互连通的蚂蚁洞穴也是土壤重要大孔隙类型, 可以显著增加土壤入渗, 促进土壤水分运移[23]。人类活动中的土壤耕作会破坏土壤团聚体稳定性, 使土壤生物大孔隙 (动植物洞穴孔隙) 的连通性受到破坏, 从而影响水分运移至深层土壤[24]。

2.2　地形因素

多数研究表明坡度越大坡面径流形成越快, 但壤中流产流越少。降水在坡面停留的时间短, 不利于降水入渗到坡面中。例如, Rubin[25] 研究发现在入渗率较大的坡面上, 入渗速率随着坡度的增加而减小, 不利于壤中流的形成。同时, 也有研究认为存在一个临界坡度使得壤中流产流量随坡度增大先增加后减少, 而产流时间、产流滞后时间随坡度的增加先减小后增大。例如, 常宝[26] 发现在一定条件下, 浅层壤中流整体呈现先随坡度的增加逐渐产生, 到临界坡度后, 随坡度的增加逐渐无壤中流产生。陈晓安等[27] 设置 4 个坡度研究了红壤坡耕地壤中流的产流特征, 得到随着坡度增大 (从 5°到 20°) 壤中流产流时间先减小后增大, 临界坡度为 10°。越来越多学者通过试验证实坡度影响壤中流产流存在一个临界坡度。

2.3　植被条件

植被通过改变土壤的孔隙性, 引起汇流界面的变化[28]。徐佩等[29] 在紫色坡耕地试验中发现, 农地和顺坡垄作的壤中流产生机率远高于平直裸地, 作物提高了地表植被覆盖度, 延长了降水在地表的停留时间, 增大入渗率, 使得壤中流发生机率增大[30]。吴泽等[31] 通过试验发现在一定降水条件下, 岩溶槽谷坡地壤中流表现为竹林地>果园地>耕地>林地, 这可能是由于竹林根系较浅, 可以有效地增加土壤入渗, 从而使得竹林地壤中流产流量大于果园、林地和耕地。Duan 等[32] 发现与裸地相比, 草地覆盖和凋落物覆盖产生较低的地表径流和较高的壤中流, 地表径流量占降水量的比例很小, 这与 Li 等[33]、Fullen[34] 研究结果一致。良好的植被可以起到减少地表径流、增加壤中流和地下径流、防止水土流失、涵养水源、改善河流水文状况及减轻洪涝灾害的作用[35]。壤中流的大小差异主要与土壤层厚度、植被覆盖率的差异等有关[36]。

2.4　降雨因素

降雨是影响壤中流的重要因素之一。有研究认为在降雨较多的南方地区, 壤中流占径流量的比例很大, 而在较为干旱的地区, 如黄土高原, 则不容易产生壤中流。但降雨因素是一个较复杂的因素, 它包括雨强、历时、降雨模式等。在降雨强度方面, 多数学者认为壤中流流量随雨强的增大而减小[11,37], 还有部分学者认为壤中流与降雨强度无显著关系[38]。对于壤中流的产流时间与雨强的关系, Deng 等[39] 在研究中国东南部侵蚀裸露风化花岗岩边坡径流时发现, 壤中流的出现时间与降雨强度呈负相关关系, 雨强越大, 壤中流出现时间反而后延。不同的雨型或降雨模式对壤中流的产生影响不同。当降雨量相同时, 短历时高强度的降雨模式不如长历时低强度的降雨模式对壤中流的影响明显[40-41]。Duan 等[32] 设计了 4 种降雨模式并通过试验得到在草地上低强度和长持续时间的降雨模式下会产生更多壤中流。降雨特性影响着壤中流的发生。

综上所述, 壤中流的产流是多种因素相互作用的结果, 任一因素的改变都会对壤中流的各方面造成影响, 目前国内外的学者对于影响壤中流的因素的研究还局限在单因素或两个因素交互作用上, 对于多因素协同作用的研究还比较少。

3 壤中流生态水文效应

建设生态文明, 是关系人民福祉、关乎民族未来的长远大计。良好的生态环境是人类社会可持续发展的基础。生态建设与水文水资源有着非常密切的关系, 生态水文学是一个新兴的学科, 是一门研究地球表面水的物理变化过程、运动规律及水域环境和人类社会之间相互关系的学科[42]。壤中流作为水分在土壤中参与水循环的一个内部环节, 对径流产生、水文预报等具有重要作用, 不仅影响着降雨-入渗-径流的关系, 还对植被恢复、生长产生重要影响。同时径流是土壤养分流失的主要载体, 壤中流作为径流的重要组成部分, 对养分在坡地上的运移也产生重要影响。

3.1 土壤养分运移

壤中流、地表径流以及泥沙侵蚀流失的养分是坡地土壤养分流失的三大主要途径, 随着国内外学者对壤中流研究的不断深入, 关于壤中流影响养分流失的研究也逐渐成为水文学和土壤学的研究热点[43-44]。在磷素方面, 壤中流是磷流失的主要途径。朱浩宇等[45] 通过试验发现, 不同施肥处理下, 全磷在壤中流的流失通量占总流失通量的 7.52%~12.91%。常龙飞等[46] 认为壤中流中磷的迁移传输量的变化主要取决于壤中流在迁移传输过程中与土壤间相互作用的时间、新旧壤中流中化学平衡程度以及壤中流与土壤胶体间的平衡程度。还有学者发现添加生物炭[47] 或土壤中存在大孔隙[48] 都会增加土壤中磷的流失。而在氮素方面, 壤中流中总氮的流失远大于总磷[49], 且氮流失的形态以硝态氮为主。杜祥运等[50] 通过研究发现在草本或草本与灌木组合的植被条件下, 氮流失主要以壤中流流失为主。郑海金等[51] 通过试验发现, 不同形态氮径流输出以 105 cm 壤中流为主, 占径流输出总通量的 71% 以上。Deng 等[52] 也持有相同的观点, 认为壤中流的氮素损失主要以硝态氮的形式出现, 大部分流失是由壤中流引起的, 壤中流是径流养分流失的优先途径。Jia 等[53] 研究了紫色土地区不同水文机制下的氮损失问题, 发现壤中流中硝态氮浓度是地表径流的 20 多倍。目前, 壤中流驱动下氮素和磷素的迁移研究已趋于成熟, 而对壤中流驱动下有机碳等其他营养元素的迁移研究尚处在探索阶段, 还需要引起更多关注。

3.2 水土保持

土壤中水分过多时会影响土壤的通气性以及土壤温度。壤中流可以改变土壤内的水分含量、水质, 从而影响着土壤环境。壤中流一方面将土体中的细颗粒物带走; 另一方面下渗的水可以软化母岩, 加快成土速度, 增加黏粒, 促进土壤团聚体发育, 提高土壤抗冲和抗崩解性能[54], 对从源头维持土壤质量具有一定意义[55]。养分是土壤肥力的物质基础, 部分营养物质如氮、磷等在土壤中随壤中流运动再分布[7], 会对土壤肥力产生影响[7]。同时壤中流通过影响植被恢复也影响着土壤质量。毛管水是植物所需水分的主要来源, 壤中流的产生表示土壤拥有充足的毛管水。在干旱半干旱地区蒸发、蒸腾作用强烈, 植物对水分的需求更大, 对壤中流的损耗也越大[56]。壤中流对植被的恢复产生重要影响, 而植被重建与恢复是改善生态环境保持水土的重要措施, 植被恢复是保护水土的有效办法[57]。Yuan 等[58] 研究表明, 土壤有效持水量、综合土壤肥力指数随着恢复年限的增加而增加, 恢复年限对恢复林地的水源涵养功能和土壤肥力质量有着积极影响。

3.3 径流调节

径流由地表径流、壤中流和地下径流组成。陆地水文调节和平衡受到地表水与地下水相互作用的影响, 壤中流可以通过影响地表径流对降雨事件的响应, 进而影响区域地表水与地下水的管理[59-60]。在降雨形成径流的过程中, 壤中流的集流过程缓慢, 有时可持续数天、几周甚至更长时间。无论从径流的组成或是从壤中流的形成机制来看, 壤中流通过对水分的运移, 对降雨进行再分配从而起到调节径流的作用。在紫色土地区监测发现, 壤中流发育活跃, 年均累积量是地表径流的 4.9 倍[61]。在红壤坡地, 径流也是以壤中流为主[62]。但有的学者则通过试验得到, 在红壤坡地降雨过后, 地表径流占总流量的 95.86%, 不过仍然存在壤中流[55], 这可能是由于降雨特性造成的。在干旱半干旱地区, 壤中流有时可以起到与水库相似的作用, 一场降水过后, 部分地表径流转化为壤中流, 不仅可以减少水土流失, 还可以存蓄水分, 缓解区域水资源短缺问题。

3.4 水文预报

壤中流通过改变土壤内水分含量, 影响地表径流和地下径流的形成与变化, 并对流域径流产生预测及流域水文循环计算、洪水预报具有相当重要作用[20]。超渗产流特征是水文预报的难点, 而其中壤中流的计算又是关键, 直接关系到预报精度[63]。国内学者为了提高壤中流计算的准确性进行了大量研究, 提出一系列水文计算模型[64-66]。近年随着计算机技术、遥感卫星技术、数学分支等科学技术发展, 模糊数学法、分布式水文模型、人工神经网络、灰色

系统理论等水文预报方法为水文预报拓展了新的研究途径[67-69]。

但是在实际应用中, 无论是哪一类水文模型都只是对水文过程的近似描述, 理论上都无法还原“真实的”自然水文过程。在实时洪水预报中不可避免地存在模型输入、模型结构及参数的不确定性[70]。国内学者在预报不确定性分析方面已经取得一些成果[71-73], 不过仍然需要进一步研究以降低不确定性, 提高预报精度。

4　总结与展望

专家学者对壤中流进行了广泛的研究。首先, 在壤中流的影响因子方面, 学者们通过研究发现影响壤中流的因素较为复杂, 包括地形因素、土壤因素、降雨因素、下垫面因素等, 但国内外学者对其研究主要局限在一个因素或两个因素, 各因子之间的耦合、交互、协同作用研究很少, 并且研究多集中在红壤和紫色土地区, 而西南喀斯特地区、黄土高原地区以及北方土石山区相对较少, 尤其是在华北土石山区, 降雨过后山坡风化岩体层也会产生出流, 因此加大对这些地区壤中流的研究, 探索壤中流在岩土二元介质、风化岩体层的产流特征, 对全面认识壤中流形成机理及生态水文效应具有重要意义。其次, 壤中流在运输土壤养分、促进植被生长恢复、维持增强土壤质量以及水文预报方面均发挥着重要作用。对于土壤养分在壤中流中的运移机理, 大量试验已经证明壤中流是引起养分流失的主要因素之一。但试验研究大多是基于人工模拟降雨, 自然降雨条件下的研究较少; 而且试验多为室内的土柱试验, 缺少野外长期原位观测试验。再次, 壤中流计算关系着水文预报的准确性, 但现在壤中流模型模拟多应用于室内模拟条件, 对野外条件下模拟的有效性还需要验证, 所以需要推进壤中流模型的发展。同时, 壤中流研究在以下几方面仍需加强: 1) 加强对除紫色土区、红壤区外其他地区壤中流的研究, 同时对于气温升高较明显的流域, 需要关注气候变暖下的壤中流效应, 改进水文模型中对气候变暖的水文效应的描写。2) 扩大壤中流模型在干旱半干旱地区的山区或大流域地区的适用性, 增长基准期, 减少由基准期太短带来的降水径流关系误差, 推进模型验证土石地区壤中流。3) 推动室内试验向野外试验扩展, 加强长期野外定位试验监测与研究, 实现长期、连续的动态监测, 进一步增加多因素协同作用的研究。4) 应用数据同化技术、GIS 技术、多模型耦合技术、扫描技术等先进技术, 增加对壤中流的全面认识。

参考文献　References

[1] 王浩, 王建华. 中国水资源与可持续发展[J]. 中国科学院院刊, 2012, 27(3): 352−358
WANG H, WANG J H. Sustainable utilization of China’s water resources[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2012, 27(3): 352−358

[2] 芮孝芳. 水文学原理[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 2004
RUI X F. Principles of Hydrology[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 2004

[3] 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): 352−358
LIU T X. Mathematical description of soil water flow mechanism[J]. Journal of Inner Mongolia Institute of Agriculture and Animal Husbandry, 1994, 15(3): 352−358

[4] 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 X, WU H W, LI X Y. Research progress and prospects of subsurface flow[J]. Journal of Arid Meteorology, 2016, 34(3): 391−402

[5] 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等. 土壤优先流研究现状与发展趋势[J]. 土壤, 2012, 44(6): 905−916
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

[6] BEVEN K, GERMANN P. Macropores and water flow in soils revisited[J]. Water Resources Research, 2013, 49(6): 3071−3092

[7] 李勇, 王超, 汤红亮. 小流域坡地表土层营养物质输运规律研究进展[J]. 河海大学学报: 自然科学版, 2004, 32(6): 627−631
LI Y, WANG C, TANG H L. Advances in research of nutrient transfer in surface and subsurface soil on sloping land in small watersheds[J]. Journal of Hehai University: Natural Sciences, 2004, 32(6): 627−631

[8] 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
YANG C, YU J J, LIU C M, et al. Experimental study on slope runoff generation process in North China mountainous area[J]. Acta Geographica Sinica, 2005, 60(6): 1021−1028

[9] 曾辰, 王全九, 樊军. 初始含水率对土壤垂直线源入渗特征的影响[J]. 农业工程学报, 2010, 26(1): 24−30
ZENG C, WANG Q J, 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

[10] 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, 78
WU F Q, ZHAO X N, SHE D. Analysis on affecting factors of soil infiltration in slope farmland[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2003, 23(1): 16−18, 78

[11] 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 Q X, WANG T W, LI Z X, et al. Characteristics of interflow

in purple soil of hillslope[J]. Advances in Water Science, 2010, 21(2): 229−234

[12] 方堃, 陈效民, 张佳宝, 等. 红壤地区典型农田土壤饱和导水率及其影响因素研究[J]. 灌溉排水学报, 2008, 27(4): 67−69
FANG K, CHEN X M, ZHANG J B, et al. Saturated hydraulic conductivity and its influential factors of typical farmland in red soil region[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2008, 27(4): 67−69

[13] 徐铭泽, 杨洁, 刘窑军, 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 M Z, YANG J, LIU Y J, 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

[14] 卢全中, 彭建兵, 陈志新, 等. 黄土高原地区黄土裂隙发育特征及其规律研究[J]. 水土保持学报, 2005, 19(5): 193−196
LU Q Z, PENG J B, CHEN Z X, et al. Research on characteristics and regularity of loess fissure development in the loess plateau area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2005, 19(5): 193−196

[15] DENG L Z, ZHANG L P, FAN X J, et al. Effects of rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield from hillslopes with weathered granite[J]. Environmental Science and Pollution Research, 2019, 26(31): 32559−32573

[16] 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
CAO J S, LIU C M, ZHANG W J, et al. Slope hydrogeology and collecting seepage water techniquesin gneiss area in the Taihang mountains[J]. Advances in Water Science, 2005, 16(2): 216−221

[17] 赵思远, 苏辉东, 贾仰文, 等. 北方土石山区典型坡面优先流特征研究[J]. 水土保持学报, 2018, 32(6): 9−15
ZHAO S Y, SU H D, JIA Y W, et al. Characteristics of preferential flow on typical slope in northern rocky mountain area[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2018, 32(6): 9−15

[18] 杨振华, 宋小庆, 苏维词. 西南喀斯特地区坡地产流过程及其利用技术[J]. 地球科学, 2019, 44(9): 2931−2943
YANG Z H, SONG X Q, SU W C. Slope runoff process and its utilization technology in southwest Karst area[J]. Earth Science, 2019, 44(9): 2931−2943

[19] FU Z Y, CHEN H S, ZHANG W, et al. Subsurface flow in a soil-mantled subtropical dolomite Karst slope: a field rainfall simulation study[J]. Geomorphology, 2015, 250: 1−14

[20] 王峰. 红壤丘陵区坡地降雨产流规律试验研究[D]. 武汉: 华中农业大学, 2007
WANG F. Experimental investigation on rules of rainfall runoff on sloping land in red soil hilly region[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2007

[21] RIDLEY J C H, SCHLESINGER C A, BULL C M. Location of long-term communal burrows of a threatened arid-zone lizard in relation to soil and vegetation[J]. Austral Ecology, 2020, 45(4): 444−453

[22] LE MER G, JOUQUET P, CAPOWIEZ Y, et al. Age matters: Dynamics of earthworm casts and burrows produced by the anecic *Amynthas khami* and their effects on soil water infiltration[J]. Geoderma, 2021, 382: 114709

[23] 闫加亮, 赵文智, 张勇勇. 绿洲农田土壤优先流特征及其对灌溉量的响应[J]. 应用生态学报, 2015, 26(5): 1454−1460
YAN J L, ZHAO W Z, ZHANG Y Y. Characteristics of the preferential flow and its response to irrigation amount in oasis cropland[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2015, 26(5): 1454−1460

[24] 李文凤, 张晓平, 梁爱珍, 等. 不同耕作方式下黑土的渗透特性和优先流特征[J]. 应用生态学报, 2008, 19(7): 1506−1510
LI W F, ZHANG X P, LIANG A Z, et al. Characters of infiltration and preferential flow of black soil in Northeast China under different tillage patterns[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2008, 19(7): 1506−1510

[25] RUBIN J. Theory of rainfall uptake by soils initially drier than their field capacity and its applications[J]. Water Resources Research, 1966, 2(4): 739−749

[26] 常宝. 降雨强度、坡度和植被覆盖度对紫色土坡面水文过程的影响[D]. 重庆: 西南大学, 2016
CHANG B. Effect of slope gradients & rainfall intensity & vegetation coverage on hydrological process on land-slope for purple soil[D]. Chongqing: Southwest University, 2016

[27] 陈晓安, 杨洁, 汤崇军, 等. 雨强和坡度对红壤坡耕地地表径流及壤中流的影响[J]. 农业工程学报, 2017, 33(9): 141−146
CHEN X A, YANG J, TANG C J, et al. Effects of rainfall intensity and slope on surface and subsurface runoff in red soil slope farmland[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2017, 33(9): 141−146

[28] 苏辉东, 贾仰文, 龚家国, 等. 土石山区山坡壤中流汇流界面研究——以太行山崇陵流域为研究区[J]. 水利水电技术, 2018, 49(12): 52−58
SU H D, JIA Y W, GONG J G, et al. Study on confluence interface of subsurface flow of hillslope in rocky mountainous area — a study case of Chongling Watershed in Taihang Mountains[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2018, 49(12): 52−58

[29] 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
XU P, WANG Y K, FU B, et al. Interflow occurrence characters and their analysis on slope cropland with purple soil[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2006, 26(6): 14−18

[30] 尹忠东, 左长清, 高国雄, 等. 江西红壤缓坡地壤中流影响因素分析[J]. 西北林学院学报, 2006, 21(5): 1−6, 64
YIN Z D, ZUO C Q, GAO G X, et al. Factors affecting interflow of gentle hill in Jiangxi Province[J]. Journal of Northwest Forestry University, 2006, 21(5): 1−6, 64

[31] 吴泽, 蒋勇军, 姜光辉, 等. 中梁山岩溶槽谷区不同土地利用方式坡地产流规律[J]. 生态学报, 2019, 39(16): 6072−6082
WU Z, JIANG Y J, JIANG G H, et al. Characteristics of different land-use types of slope runoff in a Karst trough valley located in Zhongliang Mountain, Chongqing[J]. Acta Ecologica Sinica, 2019, 39(16): 6072−6082

[32] DUAN J, YANG J, TANG C J, et al. Effects of rainfall patterns and land cover on the subsurface flow generation of sloping Ferralsols in Southern China[J]. PLoS One, 2017, 12(8): e0182706

[33] LI X H, ZHANG Z Y, YANG J, et al. Effects of bahia grass cover and mulch on runoff and sediment yield of sloping red soil in Southern China[J]. Pedosphere, 2011, 21(2): 238−243

[34] FULLEN M A. Effects of grass ley set-aside on runoff, erosion and organic matter levels in sandy soils in East Shropshire, UK[J]. Soil and Tillage Research, 1998, 46(1/2): 41−49

[35] 刘士余, 左长清. 植被对径流影响的研究综述[J]. 国土与自然资源研究, 2005(1): 42–44
LIU S Y, ZUO C Q. A review of vegetation impacts on runoff[J]. Territory & Natural Resources Stuty, 2005(1): 42–44

[36] ZHAO N N, YU F L, LI C Z, 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

[37] 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 S, BAO X H, RONG Y, 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

[38] 段剑, 刘窑军, 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 J, LIU Y J, TANG C J, 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

[39] DENG L Z, SUN T, FEI K, et al. Effects of erosion degree, rainfall intensity and slope gradient on runoff and sediment yield for the bare soils from the weathered granite slopes of SE China[J]. Geomorphology, 2020, 352: 106997

[40] ALAOUI A, GERMANN P, JARVIS N, et al. Dual-porosity and kinematic wave approaches to assess the degree of preferential flow in an unsaturated soil[J]. Hydrological Sciences Journal, 2003, 48(3): 455−472

[41] STONE W W, WILSON J T. Preferential flow estimates to an agricultural tile drain with implications for glyphosate transport[J]. Journal of Environmental Quality, 2006, 35(5): 1825−1835

[42] 夏军, 李天生. 生态水文学的进展与展望[J]. 中国防汛抗旱, 2018, 28(6): 1−5, 21
XIA J, LI T S. Advances and prospects of eco-hydrology research[J]. China Flood & Drought Management, 2018, 28(6): 1−5, 21

[43] WANG T, ZHU B, XIA L Z. Effects of contour hedgerow intercropping on nutrient losses from the sloping farmland in the Three Gorges Area, China[J]. Journal of Mountain Science, 2012, 9(1): 105−114

[44] GIRMAY G, SINGH B R, NYSSEN J, et al. Runoff and sediment-associated nutrient losses under different land uses in Tigray, Northern Ethiopia[J]. Journal of Hydrology, 2009, 376(1/2): 70−80

[45] 朱浩宇, 贾安都, 王子芳, 等. 化肥减量对紫色土坡耕地磷素流失的影响[J]. 中国环境科学, 2021, 41(1): 342−352
ZHU H Y, JIA A D, WANG Z F, et al. Effects of chemical fertilizer reduction on phosphorus loss in slope purple soil farmland[J]. China Environmental Science, 2021, 41(1): 342−352

[46] 常龙飞, 王晓龙, 李恒鹏, 等. 巢湖典型低山丘陵区不同土地利用类型壤中流养分流失特征[J]. 生态与农村环境学报, 2012, 28(5): 511−517
CHANG L F, WANG X L, LI H P, et al. Characteristics of soil nutrient loss with interflow from uplands as affected by land uses in low hill region of Chaohu basin[J]. Journal of Ecology and Rural Environment, 2012, 28(5): 511−517

[47] HUANG R, GAO X S, WANG F H, et al. Effects of biochar incorporation and fertilizations on nitrogen and phosphorus losses through surface and subsurface flows in a sloping farmland of Entisol[J]. Agriculture, Ecosystems & Environment, 2020, 300: 106988

[48] 张小娜, 冯杰, 刘方贵, 等. 土壤大孔隙对坡地产汇流和溶质运移影响研究[J]. 水电能源科学, 2009, 27(1): 32−36
ZHANG X N, FENG J, LIU F G, et al. Analysis of effect of soil macropore on slope runoff yield and concentration and solute transport[J]. Water Resources and Power, 2009, 27(1): 32−36

[49] 张丽萍, 杨洁, 范晓娟, 等. 侵蚀性风化花岗岩坡地壤中流携氮磷流失动态模拟[J]. 水土保持通报, 2018, 38(6): 156−161
ZHANG L P, YANG J, FAN X J, et al. Dynamic simulation of nitrogen and phosphorus losses in erosive weathered granite slope[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2018, 38(6): 156−161

[50] 杜祥运, 梁永哲, 夏振尧, 等. 碎石土坡地不同植被配置下的养分流失途径[J]. 水土保持学报, 2017, 31(1): 61−67
DU X Y, LIANG Y Z, XIA Z Y, et al. Soil nutrient loss characteristic of gravel soil slope on different vegetation patterns[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 2017, 31(1): 61−67

[51] 郑海金, 左继超, 奚同行, 等. 红壤坡地氮的径流输出通量及形态组成[J]. 土壤学报, 2018, 55(5): 1168−1178
ZHENG H J, ZUO J C, XI T H, et al. Nitrogen output through runoff on red soil slope and its composition[J]. Acta Pedologica Sinica, 2018, 55(5): 1168−1178

[52] DENG L Z, FEI K, SUN T Y, et al. Characteristics of runoff processes and nitrogen loss via surface flow and interflow from weathered granite slopes of Southeast China[J]. Journal of Mountain Science, 2019, 16(5): 1048−1064

[53] JIA H Y, LEI A, LEI J S, et al. Effects of hydrological processes on nitrogen loss in purple soil[J]. Agricultural Water Management, 2007, 89(1/2): 89−97

[54] 张平仓, 程冬兵. 南方坡耕地水土流失过程与调控研究[J]. 长江科学院院报, 2017, 34(3): 35−39, 49
ZHANG P C, CHENG D B. Process and regulation of soil and water loss of slope farmland in South China[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute, 2017, 34(3): 35−39, 49

[55] 余小芳, 肖胜生, 徐铭泽, 等. 红壤坡耕地地表径流和壤中流中可溶性有机碳的迁移特征[J]. 水土保持研究, 2020, 27(4): 16−22
YU X F, XIAO S S, XU M Z, et al. Characteristics of migration of dissolved organic carbon in overland flow and interflow in red soil sloping field[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2020, 27(4): 16−22

[56] 张军红, 吴波. 干旱、半干旱地区土壤水分研究进展[J]. 中国水土保持, 2012(2): 40–43, 68
ZHANG J H, WU B. Research progress of soil moisture of arid and semi-arid regions[J]. Soil and Water Conservation in China, 2012(2): 40–43, 68

[57] MA H, ZHU Q K, ZHAO X N, et al. Assessing ecological conditions of microtopography for vegetation restoration on the Chinese Loess Plateau[J]. Nature Environment & Pollution Technology, 2020, 19(1): 71−82

[58] YUAN Y, LI X Y, XIONG D H, et al. Effects of restoration age on water conservation function and soil fertility quality of restored woodlands in phosphate mined-out areas[J]. Environmental Earth Sciences, 2019, 78(23): 1−14

[59] JARVIS N, KOESTEL J, LARSBO M. Understanding preferential flow in the vadose zone: recent advances and future prospects[J]. Vadose Zone Journal, 2016, 15(12): vzj2016.09.0075

[60] PAHAR G, DHAR A. A dry zone-wet zone based modeling of surface water and groundwater interaction for generalized ground profile[J]. Journal of Hydrology, 2014, 519: 2215−2223

[61] HUA K K, ZHU B, WANG X G. Dissolved organic carbon loss fluxes through runoff and sediment on sloping upland of purple soil in the Sichuan Basin[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2014, 98(2): 125−135

[62] 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
XIE S H, TU A G, MO M H, et al. Analysis on the characteristic of interflow production processes on red soil slopes in the case of natural rainfall events[J]. Advances in Water Science, 2015, 26(4): 526−534

[63] 李力, 延耀兴, 张海瑞. 水文模拟中壤中流计算方法的研究[J]. 水土保持通报, 2008, 28(1): 65−68
LI L, YAN Y X, ZHANG H R. Study of the computational method of subsurface flow in hydrology simulation[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2008, 28(1): 65−68

[64] 赵人俊. 流域水文模拟: 新安江模型与陕北模型[M]. 北京: 中国水利水电出版社, 1984
ZHAO R J. Watershed Hydrological Simulation: Xin'anjiang Model and Northern Shaanxi Model[M]. Beijing: China Water Conservancy Press, 1984

[65] 庄一鸽, 林三益. 水文预报[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986
ZHUANG Y G, LIN S Y. Hydrological Forecasting[M]. Beijing: Water Conservancy and Electric Power Press, 1986

[66] 雒文生, 胡春歧, 韩家田. 超渗和蓄满同时作用的产流模型研究[J]. 水土保持学报, 1992, 6(4): 6−13
LUO W S, HU C Q, HAN J T. Research on a model of runoff yield reflecting excess infiltration and excess storage simultaneously[J]. Journal of Soil and Water Conservation, 1992, 6(4): 6−13

[67] 于澎涛, 徐德应, 王彦辉. 应用官司河分布式水文模型模拟流域降雨—径流过程[J]. 林业科学, 2003, 39(1): 1−9
YU P T, XU D Y, WANG Y H. Simulating rainfall-runoff processes by GSH model, a physically-based distributed hydrological model[J]. Scientia Silvae Sinicae, 2003, 39(1): 1−9

[68] 梁钟元, 贾仰文, 李开杰, 等. 分布式水文模型在洪水预报中的应用研究综述[J]. 人民黄河, 2007, 29(2): 29−32
LIANG Z Y, JIA Y W, LI K J, et al. Summary of research on the application of distributed hydrological models in flood forecasting[J]. Yellow River, 2007, 29(2): 29−32

[69] 陈洋波, 任启伟, 徐会军, 等. 流溪河模型Ⅰ: 原理与方法[J]. 中山大学学报: 自然科学版, 2010, 49(1): 107−112
CHEN Y B, REN Q W, XU H J, et al. Liuxihe model Ⅰ: theory and methods[J]. Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Sunyatseni, 2010, 49(1): 107−112

[70] 贺玉彬, 朱畅畅, 陈在妮, 等. 大渡河流域径流预报不确定性溯源及降低控制方法[J]. 武汉大学学报: 工学版, 2021, 54(1): 65−71
HE Y B, ZHU C C, CHEN Z N, et al. Runoff forecasting uncertainty traceability analysis and control method research of Dadu River Basin[J]. Engineering Journal of Wuhan University, 2021, 54(1): 65−71

[71] KAVETSKI D, KUCZERA G, FRANKS S W. Bayesian analysis of input uncertainty in hydrological modeling: 1. Theory[J]. Water Resources Research, 2006, 42(3), DOI: 10.1029/2005wr004368

[72] AJAMI N K, DUAN Q Y, SOROOSHIAN S. Reply to comment by B. Renard et al. on "An integrated hydrologic Bayesian multimodel combination framework: Confronting input, parameter, and model structural uncertainty in hydrologic prediction"[J]. Water Resources Research, 2009, 45(3), DOI: 10.1029/2008wr007215

[73] 钱名开, 王凯, 梁忠民, 等. 智慧洪水概率预报平台[J]. 水利信息化, 2018(6): 6–10, 43
QIAN M K, WANG K, LIANG Z M, et al. Technology and application of Smart Flood probability forecasting[J]. Water Resources Informatization, 2018(6): 6–10, 43