

基于文献计量与可视化方法的降雨产流研究进展分析

易琦¹, 王瑞芳¹, 窦小东^{2,3}, 高宇亭¹, 王昌昊¹, 杨露¹

(1. 云南大学 地球科学学院, 云南 昆明 650500; 2. 云南省气象服务中心,

云南 昆明 650034; 3. 中国气象局横断山区(低纬高原)灾害性天气研究中心, 云南 昆明 650034)

摘要: [目的] 分析国内外降雨产流研究方法、模拟技术、关键影响因素、研究重点及热点、发展趋势, 充实陆面水文过程、土壤侵蚀机理研究的理论基础, 为区域水资源管理实践提供决策依据。[方法] 以国内外近 50 a 的 828 篇有关降雨产流的期刊论文为基础, 借助 CiteSpace 可视化软件对国内外降雨产流研究的知识图谱结构进行梳理和分析。[结果] ①降雨产流研究始终聚焦于降雨—入渗—产流—侵蚀关系的研究及坡面产流的模拟, 研究方法包含降雨模拟、数理统计、示踪技术等。坡面产流的模拟已开发出大量适用于不同环境条件的产汇流模型, 研究方法与模拟技术日趋先进与精准, 但在完善模拟试验的技术手段, 以及借助人工智能(AI)、3S 技术来构建适用的区域产汇流耦合模型等方面仍需开展大量的后续研究工作。②对降雨产流关键影响因素即地表形态、降雨特征和土壤性质的研究持续深化, 但对微地形特征、区域次降雨过程时空变化等对降雨产流的影响研究, 和不同土壤类型间及同种土壤类型在不同自然环境下的地表产流对比研究等还有待全面推进。③国内研究重点多为借助人工降雨试验平台开展土壤/植被分布单一的局域性产汇流影响因素研究, 国外则多为结合水文模型与 3S 技术进行流域尺度的产流过程及其时空变异和地表微地形影响的研究, 研究尺度趋向于宏观和微观的全面与纵深发展。近期降雨产流研究的热点集中于喀斯特、径流小区、枯落物、降雨特征、地下水补给、水文连通性、坡度、土壤理化性质、水管理等方面。[结论] 未来应在加强喀斯特地区、干旱与半干旱地区等生态脆弱区的降雨产流和水土保持/水文/水管理专题研究的基础上, 进一步突出学科交叉与技术集成水平优势, 从而促进区域水土资源的可持续利用与人地协调发展。

关键词: 降雨产流; 文献计量分析; CiteSpace 可视化软件; 地形; 人工降雨

文献标识码: C

文章编号: 1000-288X(2022)03-0284-12

中图分类号: P333

文献参数: 易琦, 王瑞芳, 窦小东, 等. 基于文献计量与可视化方法的降雨产流研究进展分析[J]. 水土保持通报, 2022, 42(3): 284-295. DOI: 10.13961/j.cnki.stbctb.2022.03.036; Yi Qi, Wang Ruifang, Dou Xiaodong, et al. Research progress analysis regarding rainfall-runoff relationships based on bibliometrics and visual methods [J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2022, 42(3): 284-295.

Research Progress Analysis Regarding Rainfall-Runoff Relationships Based on Bibliometrics and Visual Methods

Yi Qi¹, Wang Ruifang¹, Dou Xiaodong^{2,3}, Gao Yuting¹, Wang Changhao¹, Yang Lu¹

(1. School of Earth Sciences, Yunnan University, Kunming, Yunnan 650500, China;

2. Yunnan Meteorological Service Center, Kunming, Yunnan 650034, China; 3. Research Center for

Disastrous Weather over Hengduan Mountains & Low-Latitude Plateau, CMA, Kunming, Yunnan 650034, China)

Abstract: [Objective] The research methods and simulation technology, crucial influencing factors, research focuses, hotspots, and future research directions for rainfall-runoff relationships in China and overseas were analyzed in order to enrich the theoretical basis for the study of land surface hydrological processes and soil erosion mechanisms, and also provide the basis for decision-making regarding regional water resource

收稿日期: 2021-10-27

修回日期: 2022-01-16

资助项目: 国家自然科学基金项目“滇池流域不同下垫面降雨产流特征及产水量模拟研究”(41761109); 云南省气象局科研项目“基于分布式水文模型的流域水电气象服务产品研究”(YZ202105)

第一作者: 易琦(1966—), 男(汉族), 云南省开远市人, 硕士, 副教授, 主要从事降雨产流过程、水资源利用与保护、城市环境问题方面的研究。Email: yiqi@ynu.edu.cn。

通信作者: 窦小东(1979—), 男(汉族), 黑龙江省依兰县人, 硕士, 高级工程师, 主要从事 LUCC 和气候变化的径流响应研究。Email: 154233007@qq.com。

management practices. [Methods] Based on 828 core journal papers regarding rainfall and runoff in China and abroad during the past 50 years, the CiteSpace visualization software was used for sorting and analyzing the knowledge domain map structure of rainfall-runoff research studies. [Results] ① The study of rainfall-runoff relationships has always focused on the relationship between rainfall, infiltration, surface runoff, and erosion, as well as on the simulation of slope runoff. Research methods have included rainfall simulation, mathematical statistical methods, tracer techniques, etc. In terms of slope runoff simulation, a large number of runoff and confluence models suitable for different environmental conditions have been developed. Although the research methods and simulation techniques have become increasingly advanced, and accurate, follow-up research still needs to be optimized regarding the technical means of simulation testing and the method of applying artificial intelligence (AI) and 3S technology to build a practical regional runoff and confluence coupling model. ② Research studies on the key factors influencing rainfall-runoff relationships, namely surface morphology, rainfall characteristics, and soil properties, have continuously become more in-depth. However, research studies regarding the influence of micro-topographic features and temporal and spatial variations of regional individual rainfall processes on rainfall-runoff relationships, and the comparative studies of surface runoff between different soil types and the same soil types in different natural environments still need to be comprehensively advanced. ③ Most of the domestic research studies have focused on the factors influencing local runoff and confluence under a single soil/vegetation condition through the use of an artificial rainfall simulator. In foreign countries, hydrological models and 3S technology have mostly been combined to study basin scale surface runoff processes, their spatial-temporal variation, and the impact of surface micro-topography. The research scale tends to be comprehensive and in-depth regarding development at both macro-scale and micro-scale. Recently, the research hotspots of rainfall-runoff relationships have focused on karst, runoff plots, forest litter, rainfall characteristics, groundwater recharge, hydrological connectivity, slope, soil physical and chemical properties, water management, etc. [Conclusion] In the future, the advantages of interdisciplinary and technological integration should be further highlighted by strengthening thematic research studies on rainfall-runoff relationships with soil and water conservation, hydrology, and water management in ecologically fragile areas such as karst, arid, and semi-arid areas in order to promote the sustainable utilization of regional water and soil resources and the coordinated development between man and land.

Keywords: rainfall-runoff relationships; bibliometric analysis; CiteSpace visualization software; surface morphology; artificial rainfall

R.E.霍顿在1933年提出产流概念,降雨产流过程指的是由降水到达地表时起,到水流流经流域出口断面的整个过程,即降雨经过植物截留、下渗、填洼及蒸发等损失后,在流域内形成地表径流、壤中流和地下径流,再经过河槽汇聚,流经出口断面的过程。产流过程随降雨特征而发生变化,其间,还受到区域下垫面及人类活动等因素的影响。

降雨产流环节在区域水分循环中对人类社会经济发展和地表自然环境变化的影响至关重要。一方面,降雨产流过程决定了区域淡水资源补给的能力及生态系统中物质与能量迁移、转化的特征,维系着区域生态服务功能的正常与持续运作;另一方面,随着人类活动对下垫面改造力度的持续增强,极端降雨天气下,与之相关的崩塌、滑坡、山洪、泥石流、城乡内涝等自然灾害频繁发生,全球各地灾情的严重程度与灾害损失逐年攀升,极大影响了区域的生态安全与可持

续发展。无疑,继续深化人—地关系系统中降雨产流的研究对于促进科学技术进步、资源合理利用、社会和谐发展具有极强的科学价值与现实意义。因此,国内外对于区域降雨产流过程与特征的研究工作愈发重视,研究的广度、深度与精细程度都在不断扩张与提升。目前,国内外学者的研究主要集中于产流机制、产流过程和特征、产流影响因素等方面;整体上,该主题研究的基础理论框架已相对成熟,试验技术、研究方法和手段不断发展与改进,学科、专业间的联系与交叉融合也在拓展。为了助推降雨产流研究工作的进一步深化,亟需回顾、评析相关专题研究的成果资料,明晰过往研究的水平与深度,认清当下研究的焦点与趋向,进而去发掘创新性的研究课题。

文献综述(或文献回顾、文献分析)作为一种元研究,目前基本都是按照劳伦斯·马奇和布伦达·麦克伊沃的6步模型来进行。传统的撰写方式偏重定性

的分析和评述,科学认识的局限性在所难免,尤其体现在对研究热点和发展趋向的把握方面。本文通过广泛查询、阅评国内外降雨产流研究近 50 a 的相关文献,定性归纳与定量分析相结合,重点借助 CiteSpace 软件的可视化功能,产出计量分析图谱,试图改进传统文献综述的不足,相对客观地归纳、分析国内外降雨产流研究理论、方法与技术的发展历程、现状、趋势和热点。以期更清晰地解释降雨产流研究进展中的现象、更准确地把握研究趋向及热点,为后续相关研究的深入开展和创新研究思路提供科学依据和参考。

1 数据来源和研究方法

1.1 数据来源

中文文献数据来源于中国知网(CNKI),采用高级检索类型,以“主题”为检索项,“期刊”为文献类型,以“或含”组配检索式“降雨产流”和“降雨径流”,期刊来源类别为“SCI, EI, 核心期刊, CSSCI, CSCD”,检索时间截止到 2020 年 12 月 31 日,共检索到 1992—2020 年 2119 篇文献,先初步筛选出题目与检索式相关的 468 篇,再从中剔除相关性较小的文章,最终剩余 278 篇。

外文文献数据来源于 Web of Science 电子期刊数据库平台,以“Web of Science 核心合集”为文献检索数据库,“Article 和 Review”为文献类型,“主题”为检索项,语种限定为“英语”,采用高级检索类型,分别以 OR 组配检索式“rainfall and surface runoff”“rainfall NEAR/5 surface runoff”“rainfall and surface flow”“rainfall NEAR/5 surface flow”“rainfall and overland flow”“rainfall NEAR/5 overland flow”进行检索,检索时间范围截止到 2020 年 12 月 31 日。在统计国外发文量时,将检索到的文献按照与检索式“相关性”从高到低排序,初步筛选出题目中有检索式里任一关键词的约 1 500 篇文献,再通过研读论文摘要,从中剔除与降雨产流研究主题无关联的文献,最终获得外文文献 550 篇,其中还包括近年来由中国学者在国外刊发的 130 篇论文,本文将其归属到“国内作者论文”。于此,共获取了以作者国籍(国内/国外)作为区分依据,且时间年限为 1975—2020 年国内外文献 828 篇,基本能较为全面地反映该领域的研究进展与动态变化趋势。

CNKI 数据库筛选的文献通过文献管理中心导出格式为 Refworks 的文件,并命名为 download_CNKI.txt, Web of Science 核心合集数据库筛选出的文献导出时命名为 download_WOS.txt, 2 个文件均

为包含了全纪录内容的纯文本格式文件,以便后续导入 CiteSpace 软件处理。

1.2 研究方法

采用定性与定量相结合的方法,在梳理文献内容及时间脉络的基础上,以 CNKI 和 Web of Science 核心合集数据库中关于降雨产流研究的文献为基础数据,借助 CiteSpace 5.7.R2 进行可视化辅助分析, CiteSpace 是在科学计量学和数据可视化背景下,由陈美超教授支持开发的一款应用于科学文献中识别并显示发展新趋势和新动态的文献可视化分析软件^[1]。利用 CiteSpace 5.7.R2 软件的关键词共现功能模块和 Excel 统计分析功能对国内外降雨产流研究的相关文献进行分析。其中 CNKI 和 Web of Science 核心合集数据库中导出的文献在 CiteSpace 软件中进行可视化共现分析之前,分别进行了转换和除重处理。对国内外文献进行共现分析时,参数选取默认 Top 50 per slice, 中文文献时间跨度为 29 a (1992—2020 年), 外文文献时间跨度为 46 a (1975—2020 年), 时间切面(slice length)均设置为 1, 使用剪切(purning)联系中的 purning sliced networks 算法生成共现图谱。借助 Excel 对来源期刊类型、研究案例地分布进行统计分析。

2 文献筛查结果及分析

2.1 来源期刊类型

刊载降雨产流相关研究成果的期刊种类众多,但又相对集中,总体上,国内研究的文献主要发表于水土保持类,以及农林、水利、土壤等类别的期刊;国外文献则集中于水文水资源类及地貌、土壤等领域的期刊(图 1)。本文搜集的国内外研究论文共涉及 282 种中英文期刊,国内 143 种,国外 139 种。按照 2020 年中国科协发布的《我国高质量科技期刊分级目录》,降雨产流相关研究涉及地学、农林、水利 3 大领域,每个学科领域的期刊分为 T_1 级、 T_2 级和 T_3 级共 3 个级别: T_1 类表示已经接近或具备国际一流期刊, T_2 类是指国际知名期刊, T_3 类指业内认可的较高水平期刊。本次研究的国内来源期刊以 T_1 类为主,比例为 52.16%, 国外期刊则以 T_2 类、 T_3 类居多,比例为 65.73%。

2.2 研究案例地分布

国内外作者研究案例地分布广泛,涉及热带至温带的各种气候及地貌类型区,相对集中于亚热带及温带的中低山丘陵与平原地区。统计结果(表 1)显示,全球研究案例地遍布除南极洲外六大洲的 72 个国家,且主要位于各个大洲的湿润、半干旱和干旱地区,其中亚洲 315 篇(53.66%)、欧洲 121 篇(20.61%)、北

美洲 84 篇(14.31%)、大洋洲 31 篇(5.28%)、非洲 22 篇(3.75%)、南美洲 14 篇(2.39%)。国内作者研究案例地涵盖了除天津、宁夏、香港和澳门外的 30 个省级行政区(图 2), 主要集中于深居内陆、降水稀少、气候干旱、沙漠广布的西北地区(97 篇, 占比 39.43%,

主要位于黄土高原); 大江大河众多, 地势起伏剧烈、地貌类型多样, 立体气候显著的西南地区(43 篇, 占比 17.48%); 降水集中、变率大, 广泛分布黄土的半干旱气候的华北平原地区(35 篇, 占比 14.23%)以及河湖密布、水资源丰富的华东地区(32 篇, 占比 13.01%)。

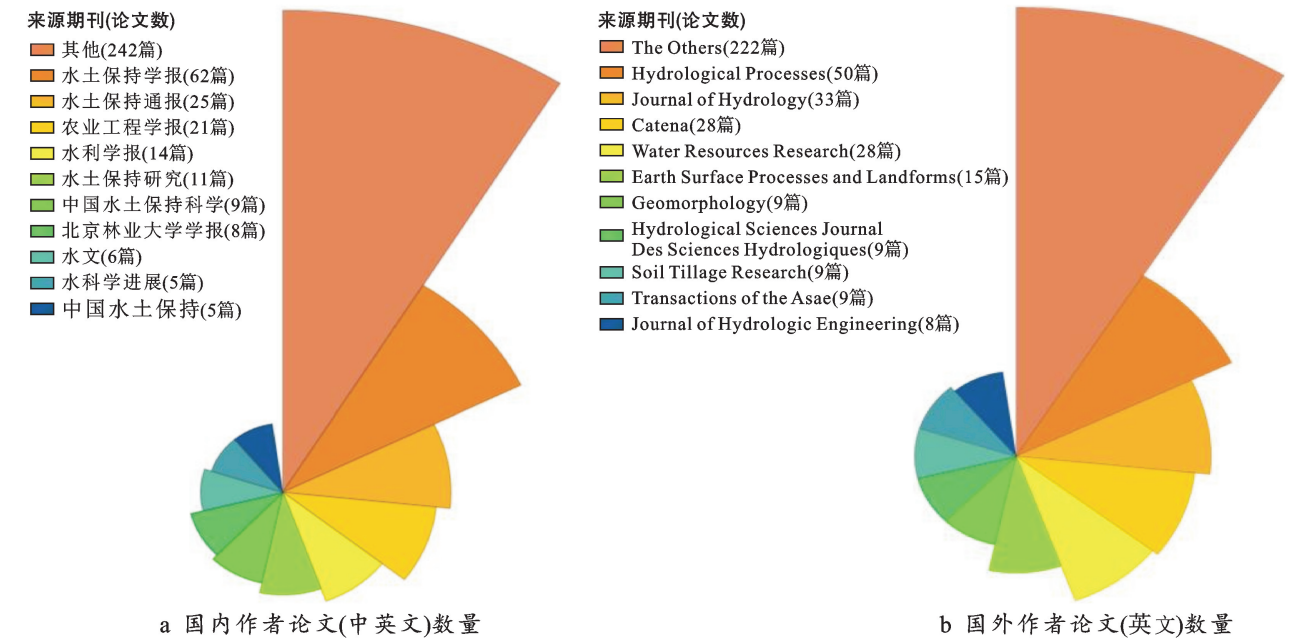
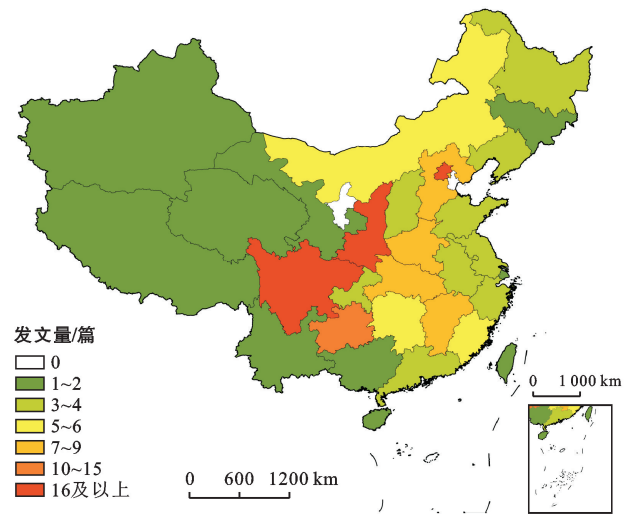


图 1 国内外作者降雨产流研究来源期刊种类及统计文献数量

表 1 全球降雨产流研究案例地分布

发文量/篇	降雨产流研究案例地
≥20	中国、美国、澳大利亚、西班牙、德国、印度、法国、以色列、比利时
10~20	加拿大、意大利、荷兰、英国、巴西、日本、伊朗
5~10	韩国、新西兰、南非、土耳其、奥地利、捷克、埃塞俄比亚、墨西哥、葡萄牙
1~5	阿根廷、尼日利亚、斯洛伐克、瑞典、布基纳法索、智利、丹麦、马来西亚、尼泊尔、塞内加尔、阿尔及利亚、厄瓜多尔、希腊、印度尼西亚、约旦、肯尼亚、巴勒斯坦、波兰、罗马尼亚、沙特阿拉伯、苏格兰、瑞士、坦桑尼亚、津巴布韦、孟加拉国、贝宁、玻利维亚、哥斯达黎加、刚果、埃及、伊拉克、利比亚、立陶宛、挪威、巴基斯坦、秘鲁、俄罗斯、卢旺达、新加坡、斯洛文尼亚、斯里兰卡、泰国、阿拉伯联合酋长国、突尼斯、乌干达、乌拉圭、威尔士



注: 地图的底图数据来源于地理空间数据云平台([http:// www. gscloud. cn](http://www.gscloud.cn)); 审图号为 GS(2022)1873 号。

图 2 国内作者降雨产流研究案例地分布

3 国内外研究历程

3.1 研究方法与技术进步的

回顾降雨产流的研究历程, 国内外学者始终聚焦于降雨—入渗—产流—侵蚀关系研究以及坡面径流量的模拟两个方面。降雨—入渗—产流—侵蚀关系方面, 通过建置野外径流小区实地观测, 乃至室内人工降雨平台模拟不同情景的降雨产流试验工作已普遍受到重视; 径流模拟方面, 则因自然系统的复杂性、研究区域的异质性、水文过程的随机性等, 针对不同的时空尺度、集成水平、分析精度的数量和类型众多的流域产汇流模型已被开发和应用。总体上, 随着降雨产流研究深度的日益扩展, 降雨产流的研究方法与技术手段日益丰富, 水文模型构建的理论模拟技术日趋完善。降雨产流的研究方法与技术手段方面, 随

着数据类型的多样化,数据采集与分析技术手段的多元性与先进性日益彰显。国内外学者先后引入了数理统计、示踪技术、3S 技术、星载激光雷达/三维激光扫描技术、传感技术以及机器学习等,在满足数据采集、分析、挖掘的同时,也丰富了降雨产流研究的技术手段,有助于更科学、系统地认知降雨产流(表 2)。数理统计方法借助统计数据、调查研究来分析降雨产流相关规律,综合运用概率和统计学的方法,建立相关数学模型进行分析研究。示踪技术通过投放示踪剂,实时追踪产流/产沙动态,研究坡面入渗、产流、产沙过程,乃至地下径流运移的时空分异特征^[2-4]。3S 技术以实地调研数据、统计数据、卫星遥感影像等为数据基础,基于已有的地理信息科学平台提取流域尺度的下垫面空间信息,进行空间特征值计算和可视化

分析^[5-7]。星载激光雷达/三维激光扫描技术通过提供径流小区地表的三维点云数据来构建高精度高分辨率的数字地形模型,常用于研究坡面微地形变化特征及其与产流、产沙的响应关系^[8-9]。传感技术通过传感器实时监测、记录、传输和保存地表径流/壤中流产生数据,提高了降雨产流试验过程中数据获取的精度和便捷性^[10]。机器学习则经由 Python, MATLAB 等平台对相关统计数据和遥感影像等数据作特征选择和数据降维,更便捷地进行数据分析,实现不同时空尺度产汇流建模^[5-6]。日趋先进的现代技术手段丰富了降雨产流研究技术方法的内涵,在研究流域宏观尺度降雨产流时,如能结合局部微观层面的精细化技术分析,将有助于更科学、系统并准确地认知区域产汇流过程和特征。

表 2 全球降雨产流研究方法

类 别	主要研究内容	主要分析工具
数理统计	产流/产沙过程和特征、影响因素、建立坡面产汇流模型等	Excel, SPSS, Past, C2, Origin, DPS, SAS, OSL, Canoco5, minitab, Sigma Plot 等统计软件
示踪技术	产流机制、过程、特征等	磁性示踪剂、化学示踪剂、地球化学示踪剂、环境放射性核素等
3S 技术	GPS 定位、RS 解译、GIS 制图辅助建立流域产汇流模型等	ArcGIS, ENVI, Google Earth 等分析软件
星载激光雷达/ 三维激光扫描技术	识别下垫面特性等	Trimble Realwork, TLS 地面三维激光扫描仪等
传感技术	测定壤中流及地表径流等	地下饱和度传感器、地表径流传感器
机器学习	遥感解译、数据统计、不同尺度产汇流建模等	C 语言, Python, Java, R, MATLAB 等计算机语言

水文模型构建方面,在降雨产流研究的初期国内外学者便将土壤水分动力学、运动波理论及系统分析方法广泛运用于坡面径流的时空变化规律方面的研究。随着科技进步,基于水文模型与 3S 技术集成建立空间分布模型日益成为研究的热点。90 年代末,Julien 等^[11]、Sharma 等^[12]开始引入 GIS 技术,与相关经验水文模型集成建模,同时,运用更高时空分辨率的激光雷达进行降雨和径流估算也已开展^[13]。进入 21 世纪,3S 技术已广泛运用于降雨产流研究,更好适应了多尺度时空径流模拟、预测的需求,特别是宏观区域的产汇流分析。

近 10 a 来,认识到即便不断修正、改进模型算法及试验手段,单一的模型或方法仍难以准确反映复杂因素影响下的降雨—入渗—产流过程。国内外学者开始借助人工智能(AI)与水文模型相结合的方法建立产汇流模型^[14],试图将不同的水文模型整合到同一个水文框架中,以更全面、精确地反映流域产汇流

过程。耦合模型(水文—水动力学耦合、多模型耦合等)的构建日益成为水文模型研究和发展的趋向。本质上,产汇流模型的研究主要通过量化分析下垫面影响因素及模拟降雨试验,基于降雨—入渗—产流机制来构建自然状态下物理过程数学模型^[15-17]。但目前的水文模型着重于估算河流总流量,而较少强调对不同土地利用变化情景的影响进行建模,并且大多数降雨产流模型均假设多余的水均匀地分布在土壤表面而忽略了地块内的变化,尚难精准把握流域范围内有效的水力传导率或有效的渗透率随微地貌的变化^[18-20]。而与此同时,现有的研究主要借助人工降雨模拟试验结合控制变量、数理统计、有限元分析、灰色关联分析等方法探究降雨产流的水文机理工作不断深化。但是,人工模拟降雨过程与自然降雨特征的差异客观存在,且难以把握长坡条件下入渗—产流过程随土壤构成及微地形变化的影响,试验技术手段仍需不断完善^[21]。

3.2 关键影响因素研究

地表产流以降雨产流为主,95%以上集中在雨季;产流过程分为初始入渗、初始产流、稳定产流和结束产流4个阶段^[22-23]。国内外学者对降雨产流的研究主要集中于产流过程和特征、产流影响因素等方面,尤其是影响降雨产流过程的关键因素,即地表形态、降雨特征和土壤性质的研究备受关注,引导着当前的研究主流与方向,在降雨—入渗—产流—侵蚀方面的研究进展迅速,成果丰硕。

(1) 考察地表形态影响因子的研究,其深度与广度在不断拓展。1976年,Yair等^[24]研究发现坡度与岩石覆盖率与产流量成正比,开启了地表形态对降雨产流影响研究的先河。产流过程中的坡度及地表覆被类型因子随之受到普遍重视。植被特征、森林枯落物、坡面覆沙对产流与产沙过程的影响也逐渐进入国内外研究者的视野^[25-26]。随着研究工作的开展,在加大坡度、坡长以及地表岩土与植被类型变化特征研究的同时,微地形、土壤结皮、喀斯特,乃至岩层倾向等对降雨产流机理的影响研究也引起了广泛关注,对地表形态影响因子的认识渐趋深刻,研究内容也愈发丰富。近年来颇具标志性的成果诸如:有研究显示坡面起始产流时间随坡度的增加而缩短,但并不明显^[27-28]。光滑地表最易产生径流,凸起地表土壤流失最严重,凹凸相连地表蓄水保土效益最好^[29]。土壤结皮会降低产流过程中地表水的渗透率,增加地表径流,粗糙土壤结皮渗透率高于细结构土壤,生物土壤结皮渗透率高于物理土壤结皮等^[30-32];深入的研究进而发现深色生物土壤结皮最有利于减流和减沙^[33];生物结皮坡面的减流减沙作用随着降雨历时、雨强的增加而降低^[34-35]。喀斯特坡地产流受降雨强度的影响较大,主要受控于土壤—表层岩溶带界面稳定入渗率^[36]。2020年关于岩层倾向对地表产流影响的研究得出30°顺层坡地表产流量最高,90°最低;90°逆层坡地表产流量最高,60°最低的结论等^[37]。总体上,目前对地表形态的影响研究集中于自然及人为干扰下地表覆被及坡度变化等方面,并逐步将水土保持学、水文学、山坡水文学等地学相关学科纳入了地表水文过程的研究,产流研究的视角日益多样化。但与此同时,应当强调的是坡长及坡地微地形特征、植被、砂石覆盖对地貌形态的改变、植物截留水平、林下枯落物持水性等影响因子的研究还应继续强化与加深,并有机推进相关学科的交叉研究。

(2) 梳理降雨特征的相关研究,其关注重点聚焦于雨量与雨强,研究的精细化水平逐渐提升。1977年,Rennes等^[38]发现降雨强度和降雨历时是产流的

主要影响因素,降雨特征对产流的影响开始被重视。此后国内外的同类研究也得出了一致的结论^[39-40]。大量的研究都突出了降雨量和降雨强度在区域产流、产沙过程中的影响程度,近年来对降雨时空分布特点的影响也有了初步的探讨。此间,具有代表性的研究主要体现在:基于试验分析后发现降雨量和降雨强度是产流量和产沙量最主要的影响因子^[41-42]。研究地表产流相关因素的影响程度,排序为:降雨量和土壤初始含水量>降雨强度>坡度>草地覆盖度^[43-44]。均匀分布型降雨的产流可能性最大,降雨强度的增加会减少初始径流时间并增加径流率,但对径流总量的影响很小^[45-47]。坡面产流、产沙特征与降雨的年内分配密切相关,雨季坡面产沙、产流量在全年的占比可达90%以上^[48];而且,坡面平均产流和产沙率随降雨强度而增大,随枯落物生物量增加而减小^[49-50]。模拟降雨过程中,降雨持续时间会显著影响产流—侵蚀过程特征等^[51]。可见,降雨产流过程主要受制于降雨特征,但目前对降雨过程的产流影响研究大多还是基于人工降雨平台的模拟或径流小区的观测试验,尤其重视雨强变化的研究,边界条件及情景设置渐趋多样,信息采集及数值拟合精度越来越高。但仍鲜见结合区域次降雨过程时空变化特征的研究案例,流域尺度的降雨分布与下垫面变化的协同影响研究还待更全面地开展。

(3) 土壤性质对降雨产流过程的影响研究起步相对较晚,但发展较快,国内外研究在共同进步的同时,也各具特色。1993年,Prasuhn^[52]发现土壤剖面含水量显著影响初始产流时间,率先开展了土壤性质对降雨产流影响的研究。此后,对入渗过程、土壤前期含水量、土壤憎水性、壤中流,乃至尺度效应的探讨日益活跃,较有彰显度的研究案例。如揭示实际入渗率从降雨强度控制阶段跃升到入渗性能控制阶段,并最终趋于稳定入渗的全过程的研究^[53]。雨前土壤含水量对地表产流过程的影响主要体现在降雨初期,初始含水率越高,产流越快,达到稳定入渗率的时间也越短^[54-55];季节变化显著影响入渗率,从而影响产流^[56-58]。发现土壤憎水性有助于雨水快速蓄积产流,土壤水分或空气相对湿度增加,土壤憎水性增加的研究^[59-60]。显示不同气候条件的产流机制不同,壤中流占总径流量的比重大于坡面流,坡面流比重随雨强的增加而增大的研究案例^[61-62]。国外许多基于中、小尺度的对比试验及研究,发现小尺度样地模拟降雨试验的最佳面积至少为40 m²^[63];而土壤/植被分布单一的小尺度径流小区产流和产沙量均高于土壤/植被存在高空间变异性的中尺度样区,同时降雨强度的变化

会加剧这种尺度效应^[64-66]；径流的尺度效应与土壤的空间异质性有关的试验等^[67]。综上所述,在同期的研究中,中国学者对不同土壤类型的降雨产流研究成果颇丰,约占本次筛选国内文献量的 20%,共涉及 10 个土类,另有超过 13% 的基于黄土的研究文献;迄今的研究主要以热带—温带湿润气候下的土壤类型为主,尤以红壤和紫色土居多,还未见寒带土壤及荒漠土、高山草甸、高山漠土的研究。相应地,国外研究对土壤分类作了概化,主要分为黏土、壤土、砂土来研讨;但与此同时,国外学者针对尺度效应与降雨产流影响的研究在不断延伸及深化。总体而言,土壤性质及其变化对地表产流过程的影响研究内涵在逐步扩充,国内外的研究各有所长;但不同土壤类型及不同自然环境下同种土壤类型的地表产流对比研究尚待加强,尤其应拓展土壤—植被—地形的耦合影响研究;而尺度效应的相关研究无疑也应引起国内学者的重视。

在持续推进地表形态、降雨特征和土壤性质相关研究,不断填补研究空白,拓展研究内涵的同时,应更重视随着人类活动力度的增强,下垫面性质与特征的变化对区域水分循环过程的影响研究,地质构造影响地表、地下产流的机理与特点研究,以及尺度效应和水文过程随机性对区域降雨产流变化的影响研究。

4 研究热点及发展趋势

不同时期高频出现的论文关键词代表了当时

的研究热点与学术前沿,同时也能反映研究内容与方法的动态演进过程。基于已选文献数据库,借助 CiteSpace 5.7.R2 的关键词分析功能,绘制国内外降雨产流文献关键词共现网络图谱和关键词突现图谱,以更客观地反映降雨产流研究领域的主要研究热点和发展趋势,可视化显示文献关键词的频次与关系,来对比分析国内外研究重点。对关键词进行共现网络分析之前先将国内外近义关键词和同义关键词进行归并处理,研究时间跨度为 46 a(1975—2020 年),1990 年之前,由于期刊格式要求不统一,大约 90% 的论文未列关键词,作者在统计此部分内容时通过逐篇查找的方式,一一列出文章关键词进行分析,但是在绘制关键词突现图谱时,CiteSpace 5.7.R2 软件默认关键词最早出现时间从 1990 年开始。

4.1 国内外研究重点

图中节点圆圈大小代表文献关键词出现的频次,频次越大圆圈和字号就越大,连线代表不同文章间关键词的共词关系,连线越粗表示不同关键词间的共现关系越强(图 3—4)。对该领域研究重点及其主要方向进行梳理(表 3),从关键词出现频率上来看,国内研究出现频率最高的关键词(>4%)依次为“产流产沙”“径流”“模拟降雨”“入渗”“侵蚀”和“数值模拟”;相应地,国外研究主要是“runoff and sediment production”“runoff”“erosion”。可见国内外研究的主流方向趋同,同时,国内研究更加注重人工降雨手段的应用及拟合模型的构建。

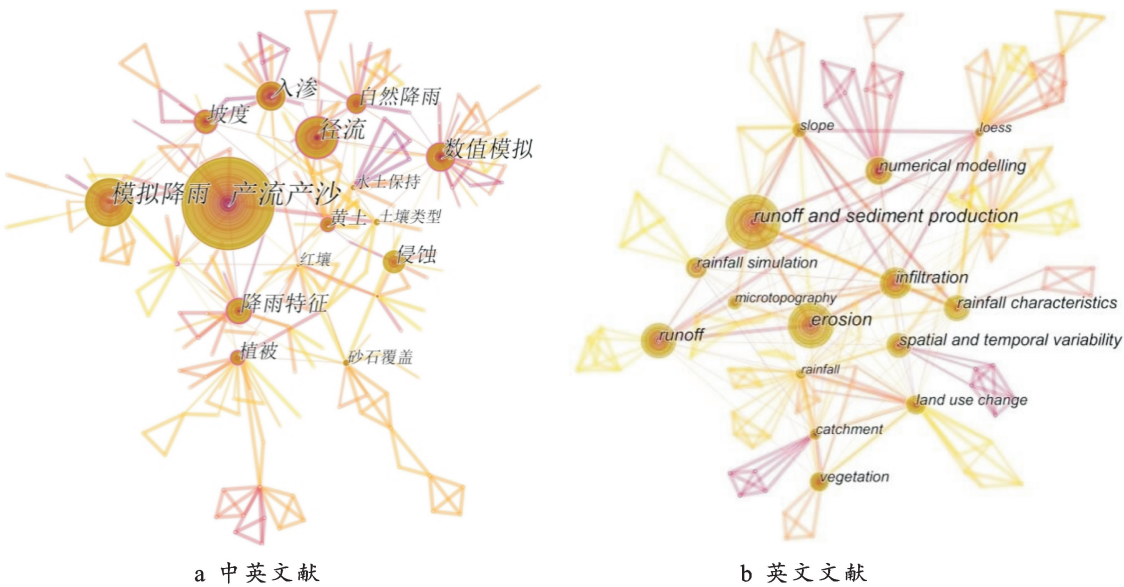


图 3 国内作者关于降雨产流研究的关键词共现网络图谱

总体而言,国内学者持续聚焦于借助人工降雨试验平台开展土壤/植被分布单一的局域性产汇流影响

因素研究,同时结合地域分异特征,开展了基于红壤、紫色土、黄壤、棕壤、褐土、黑土等 10 种土壤的降雨产

流研究;国外研究相对多元化,普遍结合水文模型及 3S 技术进行流域尺度的径流、侵蚀过程及其时空变异和地表微地形影响的研究。与此同时,国内外研究都非常关注生态脆弱区。国内学者基于水土保

持与生态恢复的实用价值,广泛开展了喀斯特地区的降雨产流产沙研究;而国外学者则主要偏重水文过程机理的探究,在半干旱地区进行了大量的降雨产流研究。

表 3 国内外作者降雨产流研究前 20 位关键词统计

国内							国外						
序号	频率/ %	最早出现 年份	关键词	频率/ %	最早出现 年份	关键词	序号	频率/ %	最早出现 年份	关键词	频率/ %	最早出现 年份	关键词
1	9.79	1992	产流产沙	6.05	1983	runoff and sediment production	11	2.05	1995	黄土	1.85	2000	rainfall characteristics
2	5.68	1992	径流	5.84	1976	runoff	12	1.73	2007	时空变异性	1.70	1992	soil type
3	5.16	1994	模拟降雨	4.58	1980	erosion	13	1.25	2007	土地利用变化	1.64	1991	land use change
4	4.47	1993	入渗	3.90	1989	infiltration	14	0.97	2003	土壤水分	1.32	1976	slope
5	4.47	1995	侵蚀	3.82	1991	numerical modelling	15	0.93	1992	水土保持	1.20	1991	microtopography
6	4.39	1992	数值模拟	2.82	1991	spatial and temporal variability	16	0.93	1999	土壤类型	1.20	1992	soil moisture
7	3.83	1992	降雨特征	2.58	1976	rainfall simulation	17	0.85	2006	砂石覆盖	1.06	1995	hydrology
8	3.02	1993	坡度	2.23	1992	vegetation	18	0.85	1998	红壤	1.00	1991	tillage
9	2.78	1998	植被	2.17	1991	catchment	19	0.77	1996	壤中流	0.79	1996	climate gradient
10	2.54	1994	自然降雨	2.08	1983	rainfall	20	0.68	2010	喀斯特	0.70	1991	soil water repellency

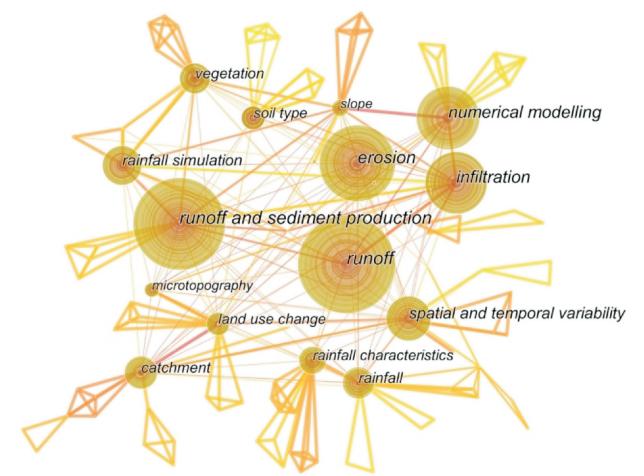


图 4 国外作者关于降雨产流研究的关键词共现网络图谱

4.2 国内外研究热点与前沿

回顾降雨产流研究历程,借助关键词突现图谱展示研究前沿的变化情况,显见伴随着研究进程,研究前沿也在发生变化(表 4—6)。该领域研究前沿总体由偏重理论研究逐渐转向理论与应用研究并重,对降雨—产流—产沙影响或控制因子的研究不断衍申拓展、日益深化。

由表 4—6 可知,国内外研究突现强度最大的关键词分别是“入渗”“植被”和“降雨特征”,凸显了这 3 个方面在该领域研究中的重要地位。降雨产流研究前期主要关注降雨、入渗、产流产沙过程,并借助数理模型来进行拟合研究;逐渐地,模拟降雨和径流小区的试验观测手段趋于增强,地表微地形与坡面变化的

影响受到重视;近年来,地表覆被、土壤结构、生态脆弱区的水文过程以及水文连通性、水分管理的研究越发受到重视。值得注意的是,国内学者针对不同土壤类型降雨产流的研究更多依照发生学土壤分类体系开展,而国外则普遍按照诊断土壤分类体系进行;国内学者探讨土壤物理性质对降雨产流的影响时,更为关注土壤含水量和前期土壤含水量,而国外学者在此基础上,还涉及了土壤团聚体稳定性、斥水性等方面。此外,国内对于拦截及阻滞雨水的地表不同物质发生层研究更加注重地表过程,即研究植被覆盖的影响,也较多探究了砂石覆盖、秸秆覆盖、森林枯落物等的影响;国外研究仍侧重于植被覆盖的影响研究,但同时,国外对团聚体稳定性、水文连通性等次表层土壤结构的研究也形成了特色。国内学者广泛开展了地表微地形的影响研究,尤其是在喀斯特地区;国外也重视微地形的影响,并结合半干旱地区水管理的研究,应用山坡水文学研讨降雨产流的时空变异性/相似性。近期,该领域研究的热词集中于喀斯特、径流小区、枯落物、降雨特征、地下水补给、水文连通性、坡度、土壤理化性质、水管理等方面,很大程度反映了降雨产流研究领域当下的研究前沿。

5 结论

自 1975 年以来,降雨产流研究已取得长足进步,国内外学者的努力获得了丰厚的研究积淀。梳理和总结近 50 a 的研究成果后,得出以下认识。

表 4 国内降雨产流研究前 20 名英文关键词突现

关键词	突现值	开始年份	结束年份	2005—2020 年
runoff and sediment production	0.89	2005	2007	
numerical modelling	1.98	2006	2007	
loess	0.40	2008	2009	
evapotranspiration	0.85	2010	2014	
catchment	0.44	2010	2011	
nutrient loss	1.84	2012	2013	
soil and water conservation	1.41	2012	2013	
rainfall simulation	1.62	2013	2014	
GRA	1.13	2013	2017	
GIS	0.80	2014	2018	
red soil	1.17	2015	2017	
slope length	0.66	2015	2017	
soil type	0.58	2015	2016	
subsurface runoff	0.46	2015	2016	
vegetation	2.25	2016	2017	
soil crust	1.63	2016	2017	
soil physical property	0.44	2016	2017	
impact factors	2.09	2017	2018	
rock fragment cover	1.62	2017	2018	
groundwater recharge	0.69	2017	2020	

表 5 国内降雨产流研究前 20 名中文关键词突现

关键词	突现值	开始年份	结束年份	1992—2020 年
入 渗	7.27	1996	2006	
坡 度	1.73	1999	2005	
土地利用变化	1.55	2001	2010	
数值模拟	1.31	2002	2004	
土壤水分	1.83	2003	2007	
紫色土	1.13	2006	2011	
径 流	3.88	2007	2010	
自然降雨	1.88	2010	2011	
侵 蚀	1.62	2011	2013	
流 域	1.10	2012	2014	
地表微地形	1.40	2013	2015	
砂石覆盖	3.49	2015	2016	
土壤类型	1.96	2015	2018	
养分流失	1.37	2015	2017	
秸秆覆盖	1.36	2015	2017	
土壤前期含水量	2.25	2016	2018	
喀斯特	1.71	2016	2020	
径流小区	1.51	2016	2020	
枯落物	1.44	2017	2020	
降雨特征	3.53	2018	2020	

(1) 降雨产流的研究始终集中在降雨—入渗—产流—侵蚀关系以及坡面产流的模拟两个方面,前者借助人工降雨模拟平台、数理统计方法、示踪技术、3S 技术、三维激光扫描技术、传感技术以及机器学习等,研究方法与技术手段已日益丰富,对降雨产流的认知亦更加科学、精准;后者依托相关学科的理论、方法与技术的进步,已开发出大量适应不同条件的流域产汇流应用模型,其中,耦合模型(例如水文—水动力学耦

合、多模型耦合等模型)的构建,以及基于水文模型与人工智能(AI),3S 技术集成建立空间分布模型正成为目前新的发展趋向。但是,如何不断完善与自然过程更贴合的人工降雨模拟试验技术手段,以及借助人

工智能(AI)、3S 技术来构建适用的区域产汇流耦合模型,并且更好地统合流域宏观尺度降雨产流模拟与局部微观层面的精细化技术分析等研究工作仍有待提升。

表 6 国外降雨产流研究前 20 名关键词突现

关键词	突现值	开始年份	结束年份	1992—2020 年
erosion	1.64	1990	1994	
soil crust	2.74	1992	2000	
rainfall	2.07	1995	1997	
hydrology	2.04	1995	1999	
subsurface runoff	1.45	1996	1998	
hillslope hydrology	1.49	1998	2003	
spatial and temporal variability	2.66	1999	2002	
spatial and temporal similarity	1.95	2002	2007	
infiltration	1.94	2002	2003	
rainfall simulation	1.37	2003	2005	
semi-arid	2.95	2007	2009	
soil type	1.38	2007	2008	
vegetation	2.18	2008	2009	
microtopography	1.91	2008	2009	
rainfall characteristics	3.00	2011	2012	
hydrologic connectivity	2.76	2013	2018	
slope	1.75	2014	2015	
aggregate stability	2.16	2015	2017	
soil moisture	1.83	2015	2016	
water management	2.65	2016	2017	

(2) 国内外降雨—入渗—产流—侵蚀关系的研究内涵不断拓展,对降雨产流过程的关键影响因素即地表形态、降雨特征和土壤性质的研究持续深化。自然及人为干扰下坡度、坡长、地表覆被等地表形态的变化对产流过程的影响研究已逐步深入,并已延伸至探讨地表结皮、岩溶地貌、岩层倾向等对降雨产流过程的影响;不同雨量、雨强等对降雨产流过程的影响研究更是普遍受到关注;同时,结合土壤剖面含水量、入渗率、憎水性等土壤性质研究不同土壤类型的降雨产流的成果产出亦较多。但是,在研讨降雨产流过程中,对坡长及坡地微地形特征、植被和砂石覆盖对地貌形态的改变、植物截留水平、林下枯落物持水性等影响因子的研究,区域次降雨过程时空变化的影响研究,以及不同土壤类型及不同自然环境下同种土壤类型的地表产流对比研究等方面还有待全面推进,尤其应加强学科交叉,拓展土壤—植被—地形的耦合影响研究。

(3) 国内多借助人工降雨试验平台开展局域性的产汇流影响因素的深入探究,国外则普遍基于水文连通性,结合水文模型及 3S 技术进行流域尺度的产

流过程及其时空变异和地表微地形影响的研究,研究尺度趋向于宏观和微观的全面与纵深发展。喀斯特地区、干旱与半干旱地区等生态脆弱区的降雨产流和水土保持/水文/水管理的专题研究正日益受到重视;入渗、植被和降雨特征在降雨产流研究历程中占有重要地位。国内外具有影响力的研究前沿主要有:喀斯特、径流小区、枯落物、降雨特征、地下水补给、水文连通性、坡度、土壤理化性质、水管理等。

在可预见的未来,随着各相关学科领域的专业理论研究进展和新技术应用,尤其是人工智能在地表过程研究中的边缘智能开发,降雨—入渗—产流—侵蚀过程研究的学科交叉与技术集成水平将稳步提升,对区域整体人文生态系统(total human ecosystem, Zev Naveh,1994)中水文现象的认识势必将会更为全面、系统、深刻与精准,并进而促进区域水土资源的可持续利用与人人地协调发展。

[参 考 文 献]

[1] Chen Chaomei, CiteSpace(Ⅱ): Detecting and visualizing emerging trends and transient patterns in scientific literature [J]. Journal of the American Society for Information Sci-

- ence and Technology, 2006, 57(3):359-377.
- [2] 王全辉,胡国庆,董元杰,等.磁性示踪条件下坡面土壤侵蚀产流、产沙及侵蚀空间分异特征[J].水土保持学报, 2012, 26(2):21-23.
 - [3] Seyfried M S. Infiltration patterns from simulated rainfall on a semiarid rangeland soil [J]. Soil Science Society of America Journal, 1991, 55(6):1726-1734.
 - [4] Onda Y, Kato H, Tanaka Y, et al. Analysis of runoff generation and soil erosion processes by using environmental radionuclides in semiarid areas of Mongolia [J]. Journal of Hydrology, 2007, 333(1):124-132.
 - [5] 王秀英,曹文洪,付玲燕,等.分布式流域产流数学模型的研究[J].水土保持学报, 2001, 15(3):38-40.
 - [6] Bhuyan S J, Marzen L J, Koelliker J K, et al. Assessment of runoff and sediment yield using remote sensing, GIS, and AGNPS [J]. Journal of Soil & Water Conservation, 2002, 57(6):351-364.
 - [7] Hong Yang, Adler R F, Hossain F, et al. A first approach to global runoff simulation using satellite rainfall estimation [J]. Water Resources Research, 2007, 43(8):523-534.
 - [8] 唐辉,李占斌,李鹏,等.模拟降雨下坡面微地形量化及其与产流产沙的关系[J].农业工程学报, 2015, 31(24):127-133.
 - [9] De Jong S M, Addink E A, van Beek L P H, et al. Physical characterization, spectral response and remotely sensed mapping of Mediterranean soil surface crusts [J]. Catena, 2011, 86(1):24-35.
 - [10] Moody J A, Martin R G. Measurements of the initiation of post-wildfire runoff during rainstorms using in situ overland flow detectors [J]. Earth Surface Processes and Landforms, 2015, 40(8):1043-1056.
 - [11] Julien P Y, Saghaian B, Ogden F L. Raster-based hydrologic modeling of spatially-varied surface runoff [J]. Journal of the American Water Resources Association, 1995, 31(3):523-536.
 - [12] Sharma K D, Menenti M, Huygen J, et al. Distributed numerical rainfall-runoff modelling in an arid region using thematic mapper data and a geographical information system [J]. Hydrological Processes, 1996, 10(9):1229-1242.
 - [13] Koblouti M, Ouerdachi L, Berhail S. The use of weather radar for rainfall-runoff modeling: Case of Seybouse watershed (Algeria) [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2015, 8(1):1-11.
 - [14] Kim K, Whelan G, Purucker S T, et al. Rainfall-runoff model parameter estimation and uncertainty evaluation on small plots [J]. Hydrological Processes, 2014, 28(20):5220-5235.
 - [15] Ibrahim A B, Cordery I. Estimation of recharge and runoff volumes from ungauged catchments in eastern Australia [J]. Hydrological Sciences Journal, 1995, 40(4):499-515.
 - [16] Gilfedder M, Rassam D W, Stenson M P, et al. Incorporating land-use changes and surface-groundwater interactions in a simple catchment water yield model [J]. Environmental Modelling & Software, 2012, 38:62-73.
 - [17] 胡堃,于静洁,夏军,等.华北石质山区坡地产流模型[J].地理研究, 2006, 25(4):673-680.
 - [18] Langhans C, Govers G, Diels J. Development and parameterization of an infiltration model accounting for water depth and rainfall intensity [J]. Hydrological Processes, 2013, 27(25):3777-3790.
 - [19] Dessie M, Verhoest N E C, Pauwels V R N, et al. Analyzing runoff processes through conceptual hydrological modeling in the Upper Blue Nile Basin, Ethiopia [J]. Hydrology and Earth System Sciences, 2014, 18(12):5149-5167.
 - [20] 冯平,李建柱.土壤水分下渗机制及其在半干旱区产流模拟中的应用[J].干旱区资源与环境, 2008, 22(6):95-98.
 - [21] 李和谋,梁心蓝,赵小东,等.模拟降雨条件下地表起伏对产流产沙的影响[J].水土保持学报, 2019, 33(6):99-104.
 - [22] 屈丽琴,雷廷武,赵军,等.室内小流域降雨产流过程试验[J].农业工程学报, 2008, 24(12):25-30.
 - [23] 李建柱,冯平.滦河流域产流特性变化趋势分析[J].干旱区资源与环境, 2009, 23(8):79-85.
 - [24] Yair A, Lavee H. Runoff generative process and runoff yield from arid talus mantled slopes [J]. Earth Surface Processes, 1976, 1(3):235-247.
 - [25] Nicolau J M, Solé-Benet A, Puigdefàbregas J, et al. Effects of soil and vegetation on runoff along a catena in semi-arid Spain [J]. Geomorphology, 1996, 14(4):297-309.
 - [26] 汤珊珊,李占斌,任宗萍,等.覆沙坡面产流产沙过程试验研究[J].水土保持学报, 2015, 29(5):25-28.
 - [27] 张会茹,郑粉莉.不同降雨强度下地面坡度对红壤坡面土壤侵蚀过程的影响[J].水土保持学报, 2011, 25(3):40-43.
 - [28] 陈诚,郝治邦.模拟降雨下不同坡度土壤坡面产流产沙特征及磷和钾素流失研究[J].水土保持研究, 2017, 24(2):70-76.
 - [29] De Lima J L M P, Isidoro J M G P, de Lima M I P, et al. Longitudinal hillslope shape effects on runoff and sediment loss: Laboratory flume experiments [J]. Journal of Environmental Engineering, 2018, 144(2):04017097.

- [30] Bissonnais Y L, Singer M J. Crusting, runoff, and erosion response to soil water content and successive rainfalls [J]. Soil Science Society of America Journal, 1992, 56(6):1898-1903.
- [31] 李鹏, 李占斌, 郑良勇. 植被恢复演替初期对模拟降雨产流特征的影响[J]. 水土保持学报, 2004, 18(1):54-57.
- [32] Chamizo S, Cantón Y, Lázaro R, et al. Crust composition and disturbance drive infiltration through biological soil crusts in semiarid ecosystems [J]. Ecosystems, 2012, 15(1):148-161.
- [33] Faist A M, Herrick J E, Belnap J, et al. Biological soil crust and disturbance controls on surface hydrology in a semi-arid ecosystem [J]. Ecosphere, 2017, 8(3):e01691.
- [34] 杨凯, 赵军, 赵允格, 等. 生物结皮坡面不同降雨历时的产流特征[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23):135-141.
- [35] 谢申琦, 高丽倩, 赵允格, 等. 模拟降雨条件下生物结皮坡面产流产沙对雨强的响应[J]. 应用生态学报, 2019, 30(2):391-397.
- [36] 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.
- [37] 覃自阳, 甘凤玲, 何丙辉. 岩层倾向对喀斯特槽谷区地表/地下产流过程的影响[J]. 水土保持学报, 2020, 34(5):68-75.
- [38] Rennes A, Tillman R W, Syers J K, et al. Effect of mole drainage on surface runoff from a soil under pasture [J]. New Zealand Journal of Agricultural Research, 1977, 20(1):45-49.
- [39] Beke G J, Faroud N, Channappa T C, et al. Runoff and soil loss from experimental plots in southern Alberta using simulated rainfall [J]. Canadian Society for Bioengineering, 1991, 33(2):205-210.
- [40] 王鸣远, 王礼先. 鄂西长江三峡库区产流降雨特征的研究[J]. 水土保持学报, 1995, 9(2):9-18.
- [41] 张兴奇, 顾礼彬, 张科利, 等. 坡度对黔西北地区坡面产流产沙的影响[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4):18-22.
- [42] Santos J C N, Andrade E M, Medeiros P H A, et al. Effect of rainfall characteristics on runoff and water erosion for different land uses in a tropical semiarid region [J]. Water Resources Management, 2017, 31(1):173-185.
- [43] 胡奕, 戴全厚, 王佩将. 喀斯特坡耕地产流特征及影响因素[J]. 水土保持学报, 2012, 26(6):46-51.
- [44] 严登明, 翁白沙, 宋新山, 等. 那曲流域草地覆盖变化对降雨产流过程的影响[J]. 水资源保护, 2019, 35(6):44-51.
- [45] 王宇, 宋金函, 马悦, 等. 黑土坡面径流特征模拟研究[J]. 吉林农业大学学报, 2014, 36(1):77-81.
- [46] Tao Wanghai, Wu Junhu, Wang Quanjie. Mathematical model of sediment and solute transport along slope land in different rainfall pattern conditions [J]. Scientific Reports, 2017, 7:44082.
- [47] Mavimbela S S W, Dlamini P, van Rensburg L D. Infiltration-excess runoff properties of dryland floodplain soil types under simulated rainfall conditions [J]. Arid Land Research and Management, 2019, 33(3):235-254.
- [48] 顾礼彬, 张兴奇, 杨光徽, 等. 黔西高原坡面次降雨产流产沙特征[J]. 中国水土保持科学, 2015, 13(1):23-28.
- [49] 霍云梅, 毕华兴, 朱永杰, 等. 模拟降雨条件下南方典型粘土坡面土壤侵蚀过程及其影响因素[J]. 水土保持学报, 2015, 29(4):23-26.
- [50] 孙佳美, 余新晓, 李瀚之, 等. 模拟降雨下枯落物调控坡面产流产沙过程及特征研究[J]. 水利学报, 2017, 48(3):341-350.
- [51] Kinnell P I A. The influence of time and other factors on soil loss produced by rain-impacted flow under artificial rainfall [J]. Journal of Hydrology, 2020, 587:125004.
- [52] Prasuhn. Comparison of German and Swiss rainfall simulators-Influence of rainfall characteristics on soil surface roughness [J]. Ztschrift Fuer Pflanzenernaehrung Und Bodenkunde, 1993, 156(1):33-37.
- [53] 张金柱, 李保国, 郭素萍, 等. 河北片麻岩山区坡地产流特征[J]. 河北农业大学学报, 1999, 22(4):103-106.
- [54] 孔刚, 王全九, 樊军, 等. 前期含水量对坡面降雨产流和土壤化学物质流失影响研究[J]. 土壤通报, 2008, 39(6):1395-1399.
- [55] Ruggenthaler R, Schöberl F, Markart G, et al. Quantification of soil moisture effects on runoff formation at the hillslope scale [J]. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, 2015, 141(9):05015001.
- [56] Cerdà A. Seasonal variability of infiltration rates under contrasting slope conditions in southeast Spain [J]. Geoderma, 1996, 69(3/4):217-232.
- [57] Leitingner G, Tasser E, Newesely C, et al. Seasonal dynamics of surface runoff in mountain grassland ecosystems differing in land use [J]. Journal of Hydrology, 2010, 385(1/2/3/4):95-104.
- [58] Sampson A A, Wright D B, Stewart R D, et al. The role of rainfall temporal and spatial averaging in seasonal simulations of the terrestrial water balance [J]. Hydrological Processes, 2020: hyp.13745.
- [59] Jordán A, Zavala L M, Nava A L, et al. Occurrence and hydrological effects of water repellency in different soil and land use types in Mexican volcanic Highlands [J]. Catena, 2009, 79(1):60-71.

化生态补偿机制研究:以五马河流域为例[J].中国环境科学,2018,38(12):4755-4763.

[23] 刘桂环,文一惠,张惠远.基于生态系统服务的官厅水库流域生态补偿机制研究[J].资源科学,2010,32(5):856-863.

[24] 伏润民,缪小林.中国生态功能区财政转移支付制度体系重构:基于拓展的能值模型衡量的生态外溢价值[J].经济研究,2015,50(3):47-61.

[25] 耿翔燕,葛颜祥.基于水量分配的流域生态补偿研究:以小清河流域为例[J].中国农业资源与区划,2018,39(4):36-44.

[26] 周春芳,张新,刘斌.基于演化博弈的流域生态补偿机制研究:以贵州赤水河流域为例[J].人民长江,2018,49(23):38-42.

[27] 李宁,王磊,张建清.基于博弈理论的流域生态补偿利益相关方决策行为研究[J].统计与决策,2017(23):54-59.

[28] 王奕淇,李国平.基于选择实验法的流域中下游居民生态补偿支付意愿及其偏好研究:以渭河流域为例[J].生态学报,2020,40(9):2877-2885.

[29] 徐大伟,刘春燕,常亮.流域生态补偿意愿的 WTP 与 WTA 差异性研究:基于辽河中游地区居民的 CVM 调查[J].自然资源学报,2013,28(3):402-409.

[30] 周晨,李国平.流域生态补偿的支付意愿及影响因素:以南水北调中线工程受水区郑州市为例[J].经济地理,2015,35(6):38-46.

[31] 彭晓春,刘强,周丽旋,等.基于利益相关方意愿调查的东江流域生态补偿机制探讨[J].生态环境学报,2010,19(7):1605-1610.

[32] 张化楠,葛颜祥,接玉梅,等.生态认知对流域居民生态补偿参与意愿的影响研究:基于大汶河的调查数据[J].中国人口·资源与环境,2019,29(9):109-116.

[33] 赵玉,张玉,熊国保.基于随机效用理论的赣江流域生态补偿支付意愿研究[J].长江流域资源与环境,2017,26(7):1049-1056.

[34] 肖俊威,杨亦民.湖南省湘江流域生态补偿的居民支付意愿 WTP 实证研究:基于 CVM 条件价值法[J].中南林业科技大学学报,2017,37(8):139-144.

[35] 王怀毅,李忠魁,俞燕琴.基于 PPP 模式实施林业项目的思考[J].林业资源管理,2021(5):20-26.

[36] 王军锋,侯超波.中国流域生态补偿机制实施框架与补偿模式研究:基于补偿资金来源的视角[J].中国人口·资源与环境,2013,23(2):23-29.

[37] 何可,闫阿倩,王璇,等.1996—2018 年中国农业生态补偿研究进展:基于中国知网 1582 篇文献的分析[J].干旱区资源与环境,2020,34(4):65-71.

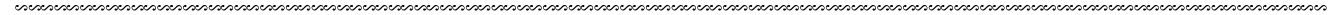
[38] 王慧杰,毕粉粉,董战峰.基于 AHP-模糊综合评价法的新安江流域生态补偿政策绩效评估[J].生态学报,2020,40(20):7493-7506.

[39] 孟钰,张宽,高富豪,等.基于组合赋权模型的小洪河流域生态补偿效果评价[J].节水灌溉,2019(10):64-67.

[40] 于鲁冀,葛丽燕,梁亦欣.河南省水环境生态补偿机制及实施效果评价[J].环境污染与防治,2011,33(4):87-90.

[41] 张来章,党维勤,郑好,等.黄河流域水土保持生态补偿机制及实施效果评价[J].水土保持通报,2010,30(3):176-181.

[42] 邓伟,夏正洪.基于科学知识图谱的应急救援研究可视化分析[J].科学技术与工程,2020,20(19):7573-7578.



(上接第 295 页)

[60] Yang Haotian, Liu Lichao, Li Xinrong, et al. Water repellency of biological soil crusts and influencing factors on the southeast fringe of the tengger desert, north-central China [J]. Soil Science, 2014,179(9):424-432.

[61] Ries F, Schmidt S, Sauter M, et al. Controls on runoff generation along a steep climatic gradient in the Eastern Mediterranean [J]. Journal of Hydrology: Regional Studies, 2017,9:18-33.

[62] 方荣杰,朱晓锋,江斌伟,等.模拟降雨条件下岩溶坡耕地产流产沙特征[J].水土保持研究,2018,25(3):11-16.

[63] Mayerhofer C, Meißl G, Klebinder K, et al. Comparison of the results of a small-plot and a large-plot rainfall simulator: Effects of land use and land cover on surface runoff in Alpine catchments [J]. Catena, 2017,156:184-196.

[64] Kutiel P, Lavee H, Segev M, et al. The effect of fire-induced surface heterogeneity on rainfall-runoff-erosion relationships in an eastern Mediterranean ecosystem, Israel [J]. Catena, 1995,25(1/2/3/4):77-87.

[65] Joel A, Messing I, Seguel O, et al. Measurement of surface water runoff from plots of two different sizes [J]. Hydrological Processes, 2002,16(7):1467-1478.

[66] Martinez G, Weltz M, Frederick B. Pierson, et al. Scale effects on runoff and soil erosion in rangelands: estimations with predictors of different availability Observations and estimations with predictors of different availability [J]. Catena, 2017,151(3):161-173.

[67] Mounirou L A, Zoure C O, Yonaba R, et al. Multi-scale analysis of runoff from a statistical perspective in a small Sahelian catchment under semi-arid climate [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2020,13(4):521-535.