

# 陆面水文循环及模型应用综述

郑世威<sup>1</sup>, 陈钢<sup>1</sup>, 马腾飞<sup>2</sup>, 曾贤敏<sup>2</sup>, 王船海<sup>1</sup>

(1.河海大学水文水资源学院, 江苏南京 210098; 2.南京慧水软件科技有限公司, 江苏南京 210036)

**摘要:** 在全球气候变化与人类活动双重驱动下, 陆面水文循环过程呈现显著的非线性与尺度复杂性, 地表水、土壤水与地下水及其相互作用已成为制约水文模拟精度与预测能力的关键因素。本文以水文循环为核心视角, 系统梳理了地表水、土壤水与地下水的相互作用机制, 重点涵盖入渗、蒸发、侧向补给与排泄以及饱和区-非饱和区过渡等关键过程; 从模型结构、耦合方式与尺度适应性等方面, 对主流水利专业模型进行对比分析, 并从物理驱动与人工智能两类方法出发, 探讨水文模拟的发展路径。研究表明, 现有模型在多介质耦合表征、跨尺度参数一致性及非线性过程刻画方面仍存在明显不足, 模型复杂度与计算可行性、参数可辨识性以及跨尺度适应能力之间的权衡问题突出, 且数据驱动方法在物理约束与外推能力方面仍有待加强。未来水文模型的发展需在强化物理机理表达的基础上, 融合多源观测数据与智能算法, 构建兼具物理一致性、计算效率与尺度适应性的综合模拟框架, 以支撑复杂环境变化背景下的水文循环研究与决策应用。

**关键词:** 水文循环; 陆面水文过程; 水文模型; 模型耦合; 尺度适应性

**中图分类号:** P339 **收稿日期:** 2026-01-05

## A Review of Land Surface Hydrological Cycle and Model Applications

Zheng Shiwei<sup>1</sup>, Chen Gang<sup>1</sup>, Ma Tengfei<sup>2</sup>, Zeng Xianmin<sup>2</sup>, Wang Chuanhai<sup>1</sup>

(1.College of Hydrology and Water Resources, Hohai University, Nanjing 210098, China; 2.Nanjing Huishui Software Technology Co., Ltd, Nanjing 210036, China)

**Abstract:** Under the combined influences of global climate change and human activities, land surface hydrological processes exhibit pronounced nonlinearity and scale complexity, and the individual components of surface water, soil water, and groundwater, as well as their interactions, have become key factors constraining the accuracy and predictive capability of hydrological models. This study adopts the hydrological cycle as a central perspective and systematically reviews the interaction mechanisms among surface water, soil water, and groundwater, with particular emphasis on key processes including infiltration, evaporation, lateral recharge and discharge, and transitions between saturated and unsaturated zones. Major hydrological models in the field of water resources and hydrology are comparatively analyzed in terms of model structure, coupling strategies, and scale adaptability. Furthermore, development pathways of hydrological modeling are discussed from the perspectives of physically based models and artificial intelligence based approaches. The review indicates that existing models still exhibit notable limitations in multi media coupling representation, cross scale parameter consistency, and characterization of nonlinear processes. Trade offs among model complexity, computational feasibility, parameter identifiability, and cross scale adaptability remain prominent, while data driven approaches still face challenges related to insufficient physical constraints and limited extrapolation capability. Future advances in hydrological

---

**第一作者简介:** 郑世威 (1998-), 博士研究生, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。ORCID: 0009-0002-5963-3104, E-mail: 250201010009@hhu.edu.cn, Tel: 18262633093.

**通信作者简介:** 王船海 (1963-), 教授, 博士生导师, 主要从事水文物理规律模拟及水文预报研究。ORCID: 0009-0003-0079-3872, E-mail: chwang@hhu.edu.cn, Tel: 13605181550.

modeling require strengthening physical process representation while integrating multi source observations and intelligent algorithms to develop comprehensive modeling frameworks that balance physical consistency, computational efficiency, and scale adaptability, thereby better supporting hydrological research and decision making under complex environmental change.

**Key words:** hydrological cycle; land surface hydrological processes; hydrological models; model coupling; scale adaptability

研究表明, 受全球气候变化及人类活动导致下垫面变化的影响, 自然界的水循环过程和规律表现出日益增强的不确定性与复杂性(宋晓猛等, 2024; 徐宗学等, 2022)。地表水、土壤水与地下水是陆地水文系统的核心组成部分, 其共同参与了流域水分的蒸散发、入渗、径流以及再循环等过程, 并通过能量与水分交换紧密耦合、相互制约, 共同驱动流域水分的时空演变。目前, 已有大量关于地表水、土壤水及地下水方面的研究, 为深入探讨水文循环奠定了坚实的基础, 但大多数研究主要聚焦于降水-地表径流、土壤水分运移或地下水流运动等单一过程(高玉芳等, 2025; Liu et al., 2025; Elrashedy et al., 2025), 尽管也有不少研究尝试探索地表水与地下水之间的耦合机制, 但往往仍采用较为简化的处理方式(Han et al., 2024; Rasouli et al., 2025)。此外, 随着人工智能的快速发展, 越来越多的学者将神经网络与机器学习模型应用于水文过程模拟, 然而, 由于其可解释性较差, 通常需要借助物理机理对模型进行约束(袁赛瑜等, 2025; Zhou et al., 2025), 或仅将其用于结果的误差校正(李彬权等, 2024)。由此可见, 现有研究对水文循环过程的表征仍不够充分。

在水文学的研究范畴内, 深入理解并准确描述流域水文循环中地表径流、壤中径流、地下径流以及回归流等复杂径流过程及其之间的相互关联机制, 基于此开发水文模型进行模拟与预测, 对洪水与干旱风险评估、水质安全保障, 以及水资源变化趋势预测与科学管理具有重要意义。本文系统梳理了陆面水文循环过程的相关研究进展, 从模型结构、耦合方式及尺度适应性等方面对当前主流水文模型的特点与局限性进行了对比分析, 并进一步探讨了未来水文模型的发展方向, 旨在为全球气候变化与人类活动影响共同作用下的水文循环研究提供理论支持与方法参考。

## 1 陆面水文过程研究进展

### 1.1 地表径流过程

目前, 对于一般的流域地表径流研究已经较为成熟, 当前主流的地表径流数值模拟方法正由传统的概念性水文模型加速向分布式、物理过程更加完整的水文水动力耦合框架模型演进, 模拟范围可同时覆盖上游山丘区、下游平原河网以及城市不透水面等多类型区域。随着研究尺度不断拓展, 地表水研究对象也从常规流域扩展至沼泽湿地、冰川积雪区和高原冻土等地表过程复杂的区域(李志威等, 2014; 刘吉平等, 2021; 董宁澎等, 2024), 研究重点逐渐从单纯的径流过程延伸至污染负荷、水质演变和生态系统修复等多要素耦合问题(刘庄等, 2015; 刘晓东和王珏, 2020; 唱彤等, 2024)。同时, 由于机器学习技术发展迅速, 新近研究将物理模型产生的关键过程信息, 用作数据驱动模型的输入或约束, 通过这种方式, 不仅提升了径流和水质预测的准确性, 还增强了模型的可解释性和泛化能力(Wang and Gupta, 2024; Kratzert et al., 2018)。遥感与云端处理平台的应用也为大尺度和长期的地表变化监测提供了新的技术路径, 借助高分辨率的遥感影像资料, 包括 Sentinel 和 Landsat 系列等, 能够在区域尺度上快速获取土地利用变化、土壤湿度和植被状态等关键信息, 用于产流潜能评估和地表水过程的连续监测(Shadmehri et al., 2025)。近几年, 随着数字孪生理念的快速兴起, 水文模拟对真实系统的空间精细化描述、过程耦合深度和实时性提出了更高要求(Yang et al., 2024), 当前地表径流研究正从传统的产汇流计算逐步迈向更高分辨率、更强耦合、更依赖数据和更具实时性的综合模拟方向, 并在水文预报、城市内涝管理和生态水文评价等领域呈现出明显的应用拓展, 同时, 模型与观测的融合持续深化, 多源数据同化、水情实时校正及模型云服务等技术手段日益成熟。

然而, 在实际应用中, 上述方法仍面临一系列挑战, 例如, 依托机器学习和遥感数据的方法在

应对极端事件时往往难以准确反映快速变化的地表过程，同时难以提供空间和时间分辨率足够精细的模拟结果；高分辨率和强耦合模型则对基础地理资料、地表参数和边界条件的完整性与精度提出了较高要求，其参数数量庞大，导致参数可识别性不足，计算量显著增加，并对高性能计算平台与实时数据流形成强烈依赖。在实际工程应用中，这些限制因素通常使高分辨率模型只能在数据充足的关键区域部署，而在更大范围内仍需采用一定程度的概化处理，以在计算效率与资料可获得性之间取得平衡。

### 1.2 壤中非饱和区水分运移

壤中非饱和区水分运移中较典型的表现形式为基质入渗和优先流，基质入渗指的是水在毛细作用下通过土壤颗粒的缓慢流动，而优先流是指水分在入渗或土壤水分迁移过程中，绕过基质孔隙的均匀缓慢下渗路径，而沿着土体中的非均质结构或连通的大孔隙通道发生的快速迁移过程(Liao et al., 2025)，其表现形式主要包括大孔隙流、环绕流、管流、指流、漏斗流、沟槽流、短路流、部分置换流、地下强径流、非饱和重力流、异质流、摆动流及低洼再蓄满(徐宗恒等, 2012)。目前水文模型多以 Richards 方程描述的基质入渗过程为主要模拟方式，但已有研究表明，在坡地、林地以及受扰动土壤中，优先流现象普遍存在，并对地表-地下水交换过程以及溶质绕过基质的迁移路径产生显著影响(Bogner et al., 2013; Holbak et al., 2021)，其时空格局受降雨强度、土层厚度、大孔隙网络连通性及土地利用类型等多因素共同控制(Zhang et al., 2025; Demand et al., 2019; Gao et al., 2018)，研究重点也正由局地实验逐步向跨地点、跨流域的比较研究扩展。

近年来，在定量模拟方面，优先流过程逐渐被纳入流域尺度水文模型中，其中双导通性、双孔隙模型及大孔隙网络模型等在描述基质入渗与优先流相互作用方面取得显著进展(Aguilar-López et al., 2020; Lu et al., 2022; Casali et al., 2024)，部分半连续模型能够较好再现实验和示踪观测数据(Kmec et al., 2023)，也有研究提出 Richards 方程与优先流耦合的多尺度方法(Currle et al., 2025)等。同时，融合物理模型结构信息与机器学习的混合方法开始用于提升壤中非饱和区水分运移在大尺度模型中的表征能力与短时径流预测精度(Bandai et al., 2022)。然而，土壤的空间异质性和尺度依赖性仍使关键参数难以从常规观测中直接确定，不同地区之间缺乏可推广的参数集；高维参数空间进一步加大了模型不确定性。实验与剖面尺度上得到的优先流机制在流域尺度仍面临上尺度化困难，尤其是如何将网格异质性稳健映射到流域模型中仍是重要挑战。此外，优先流的连通性在短时间尺度内会随降雨强度与初始含水量快速变化，而现有基于时不变假设的参数化方法难以刻画这种突发性动态行为，在极端降雨条件下模型表现尤为不足。

### 1.3 地下饱和区水流运动

研究表明，含水层的空间异质性与连通结构是控制地下水流动的关键因素，少量高渗透性通道即可承担主要流量，并主导补给、退水和污染迁移过程(Yin et al., 2023; Bianchi et al., 2011)。近年来，饱和带地下水研究在过程认知、模型构建与观测技术方面取得了显著进展，研究逐渐聚焦于地下水与地表过程、岩土介质及生态系统之间的相互作用关系，地表水与地下水的交换被重新认识为受压力、温度梯度和溶质浓度等要素共同驱动的动态过程(陈焕雄等, 2025; 杨泽森等, 2025; Boano et al., 2014)，高分辨率三维模型(Karlović et al., 2022)、离散裂隙基质模型(Hyman et al., 2022)、多尺度有限元模型(WANG et al., 2022)和离散裂隙网络模型(黄鸿蓝等, 2024)等得到快速发展。与此同时，地下水模拟的空间尺度不断扩展，由点位和场地尺度延伸至流域、区域尺度(Reinecke et al., 2020)，推动了地下水研究从传统的水动力过程分析转向多过程、多要素的综合集成模拟。地下水被逐步纳入“地-水-气-生”耦合系统中加以研究，形成了更加复杂和系统化的多圈层耦合建模框架(Wu et al., 2025; Tian et al., 2012)。随着遥感观测、地球物理反演以及多源数据集成能力的不断提升，地下水研究逐步向数据驱动建模方向拓展，此外，数据同化和机器学习辅助的混合建模成为新的预测范式，支持向量机、随机森林和梯度提升树等机器学习方法已被广泛应用于地下水水位预测(Nguyen et al., 2022)。

然而，天然介质的强异质性仍导致关键参数难以识别，剖面尺度机制难以上至流域尺度，长期和大尺度高频监测不足限制模型验证，同时在极端气候条件下地下水系统常呈现剧烈的非线性响应，

这些因素共同构成当前研究与应用的主要瓶颈。

## 2 陆面水文循环耦合研究进展

地表水、土壤水与地下水构成的完整陆面水文循环体系，决定了水分在不同空间尺度上的分布与转化，也是陆面水文模拟与水资源管理的理论基础。为更清晰地梳理相关耦合过程的研究进展，本节从地表入渗、蒸散发、土壤侧向补给与排泄以及饱和与非饱和区过渡四个方面展开。

### 2.1 地表入渗

地表入渗与蒸散发过程是耦合地表与壤中的基本水文过程，其不仅调节着水分的垂直迁移与能量交换，还对非饱和带的水文响应、植被生长及地气耦合过程产生深远影响，是陆面水文循环过程不可或缺的组成部分。从微观水文过程的角度来看，地表产流的本质可统一理解为一种“超渗产流机制”，即当地表积水量超过土壤在当前水分条件下的入渗能力时，超出部分无法入渗而形成径流（此处未直接采用传统降雨强度与入渗能力对比的说法，是考虑到地表在汇流过程中还可能接收到来自周围区域的径流补给，进而影响降雨、入渗与产流关系的判断）。无论土壤初始湿度如何，这一机制在多数自然降雨事件中均具有普遍适用性。因此，在流域水文过程模拟中，入渗过程的精确刻画不仅是产流机制合理性的基础，也是确保模拟结果可靠性的关键环节。

自 Green-Ampt 入渗模型(Green and Ampt, 1911)提出以来，大量兼具解析性与实用性的入渗模型相继发展，显著提升了对不同土壤类型与水文条件下入渗过程的描述能力，但进入 21 世纪以后，入渗模型趋于成熟，专门针对入渗现象进行的研究与模拟相对减少，研究重点逐步从入渗模型本体的公式推导与现象验证转向其在水文模型中的集成与应用，并结合具体流域特征对相应的入渗模型进行修正或改进，以提高其在实际应用中的适应性与模拟精度(何丹等, 2013; 贾宏伟等, 2006)。本文总结了 1911 年以来的经典下渗模型，如表 1 所示。

表 1 入渗模型一览表

Table 1 A list of infiltration models

模型名称	类型 1	核心思想	参考文献
Green-Ampt模型	PB M	$f = K_s(1 + \phi_f \Delta\theta / F)$	(Green and Ampt, 1911)
Kostiakov模型	EM	$f = kt^a$	(King, 1992)
Horton模型	EM	$f = (f_0 - f_c)e^{-kt} + f_c$	(Horton, 1933)
Kostiakov-Lewis模型	EM	$f = kt^a + f_c$	(King, 1992)
方正三模型	EM	$f = K + \frac{K_1}{1 - \alpha} t^{-\alpha}$	(方正三等, 1958)
Philip模型	SA M	$f = 0.5St^{-1/2} + A$	(Philip, 1957)
Holtan模型	EM	$f = akS_r^n + f_c$	(Holtan, 1961)
Overton模型	SEM	$f = f_c \sec^2[\sqrt{af_c}(t_c - t)]$	(Overton, 1964)
Huggins-Monke模型	SEM	$f = A[(S - F)/T_p]^B + f_c$	(Huggins and Monke, 1968)
Smith模型	SEM	$f = f_c + f_c(1 - \alpha)(t_s - t_{0s})^{-\alpha}$	(Smith, 1972)
Talsma-Parlange模型	SA M	$\begin{cases} f = V(K_1 - K_0) + K_1 \\ T = (K_1 - K_0)^2 t / (\pi S^2) \\ 2\pi T / 3 = (1 + 2V) \ln[(1 + V)/V] - 2 \end{cases}$	(Talsma and Parlange, 1972)
Mein-Larson模型	PB	$f = \begin{cases} i & K_s \leq f_p < i \\ K_s(1 + S_{av}M_d/F) & K_s \leq f_p < i \end{cases}$	(Mein and

模型名称	类型 1	核心思想	参考文献
	M		Larson, 1973)
Stroosnijder模型	SA M	$f = k_{sw} + \frac{1}{2}St^{-1/2}e^{[-4k_{sw}t^{1/2}]/(3S)}$	(Stroosnijder, 1976)
Brutsaert模型	SA M	$f = k_0 + \frac{1}{2}A_0t^{-1/2} \left[ 1 + \beta_0 \left( \frac{k_0t^{1/2}}{A_0} \right) \right]^{-2}$	(Brutsaert, 1977)
Collis-George模型	SEM	$f = i_0 \sqrt{\tanh(t/t_c)} + Kt$	(Collis-George, 1977)
Smith-Parlange模型	SA M	$f = \frac{K_s e^{FK_s/C}}{e^{FK_s/C} - 1}$	(Smith and Parlange, 1978)
Parlange模型	SA M	$F = K_1 t + [S^2/(2K_1)] \ln(1 + 2FK_1/S^2)$	(Parlange, 1980)
双曲入渗模型	SEM	$f = \frac{\bar{i}}{2\cosh^2\alpha\sqrt{r_t}} + \frac{\bar{i}}{2\alpha\sqrt{r_t}} \tanh\alpha\sqrt{r_t}$	(王芝桂, 1983)
Granger模型	EM	$F = a(SWE/\theta_p)^n$	(Granger et al., 1984)
黄土高原土壤入渗模型	EM	$f = (f_i - f_c)t^{-a} + f_c$	(蒋定生和万国俊, 1986)
Swartzendruber-Claguc模型	SA M	$f = \frac{S}{2\sqrt{t}} e^{-A_0\sqrt{t}} + K$	(Swartzendruber and Clague, 1989)
Singh-Yu模型	SA M	$f = f_c + \frac{a[S(t)]^m}{(S_0 - S(t))^n}$	(Singh and Yu, 1990)
Haverkamp模型 (1990)	SA M	$\begin{cases} F = K_0 t + (h_{surf} - h_{str})(\theta_s - \theta_0)K_s/(q_s - K_s) + A \ln B \\ A = [S^2 + 2h_{str}K_s(\theta_s - \theta_0)]/[2\delta(K_s - K_0)] \\ B = 1 + \delta(K_s - K_0)/(q_s - K_s) \end{cases}$	(Haverkamp et al., 1990)
Cabral模型	SA M	$f = \begin{cases} R \cos\alpha & N_t > 0 \\ K_{0n} \frac{AN_f}{e^{AN_f} - 1} \cos\alpha & N_t = 0 \end{cases}$	(Cabral et al., 1992)
Haverkamp模型 (1994)	SA M	$f = \frac{S_0}{2}t^{-1/2} + \left[ K_n + \frac{\gamma S_0^2}{r_d(\theta_0 - \theta_n)} + \frac{(K_0 - K_n)(2 - \beta)}{3} \right]$	(Haverkamp et al., 1994)
黄土地区降雨入渗模型	SA M	$f = K[1 + B_s/(F + F_A)]$	(郝振纯, 1994)
Barry模型	SA M	$F = I^*(S^2 + 2K_s h_{surf} \Delta\theta)/(2\Delta K) + K_i t$	(Barry et al., 1995)
Zhao-Gray模型	SA M	$F = C_1 S_0^{4.4} (1 - S_i)^{1.9} (k_s t)^{0.5} \left( \frac{273.15 - T_i}{273.15} \right)^{-0.35}$	(Zhao and Gray, 1998)
Gusev-Nasonova模型	SEM	$F = \begin{cases} V \\ k_0 \left( \frac{W_{sat} - I_c - u_s}{W_{sat} - u_s} \right)^4 / (1 + 8I_c)^2 & u = W_{sat} - I_c \end{cases}$	(Gusev and Nasonova, 1998)
Mishra模型	SA M	$f = f_c + aS_{abs} \left( \frac{C_{No}}{100} \right)^n \frac{(100 - C_{Nt})^{n+1}}{C_{Nt}(C_{Nt} - C_{No})^n}$	(Mishra et al., 1999)
Basha模型	SA M	$f = \frac{d}{dz} \left[ k(\psi) \left( \frac{d\psi}{dz} - 1 \right) \right]$	(Basha, 1999)

模型名称	类型	核心思想	参考文献
Triadis-Broadbridge 模型	SA M	$F = \int_0^{\infty} [\theta(z, t) - \theta_n] dz + K_n t$	(Triadis and Broadbridge, 2010)
非饱和和湿润锋模型	SA M	$F = \begin{cases} \frac{\pi}{4}(\theta_i - \theta_0)z_f & 0 \leq T < T_c \\ K(\theta_c)(T - T_c) + \frac{\pi}{4}(\theta_c - \theta_0)z_{fc} & T_c \leq T \end{cases} \quad i \leq K(\theta)$ $F = \begin{cases} \frac{\pi}{4}(\theta_i - \theta_0)z_f & 0 \leq T < T_s \\ K(\theta_s)(T - T_s) + \frac{\pi}{4}(\theta_s - \theta_0)z_{fs} & T_s \leq T \end{cases} \quad i > K(\theta)$	(徐旭等, 2019)

注<sup>1</sup>: PBM-物理机理模型; SAM-物理机理半解析模型; EM-经验性模型; SEM-半经验性模型;  $F$ 为累积入渗量,  $L$ ;  $f$ 为入渗率,  $L/T$ ; 其余变量请参考对应文献。

## 2.2 地表蒸散发

地表蒸散发主要由水面蒸发、土壤蒸发和植物散发三部分组成。不同于降雨入渗过程, 地表蒸散发过程通过消耗地表积水或土壤中的水分, 降低土壤湿度, 进而为后续降雨提供潜在的入渗容量。在长期干旱、连续降雨事件或者干湿交替条件下, 这一动态变化对地表入渗与流域产汇流过程具有重要调节作用。

相比于可直接观测、且与洪水调控及农业生产密切相关的降雨径流过程, 蒸发作为水循环中的隐性环节, 因其难以直观捕捉而长期未受到足够重视。Penman(1948)在 Rohwer 等人研究的基础上, 基于能量平衡与空气动力学原理, 结合 Bowen 比率与 Brunt 净辐射计算公式, 首次构建了能量与大气输送能力有机结合的蒸发估算框架, 标志着地表蒸发研究从经验阶段迈入物理机制驱动阶段, 成为蒸发理论发展的重要里程碑。相比于水面蒸发, 土壤蒸发与植物散发由于过程更为微观、测量难度更大、受控因素更多, 其研究更为滞后。Philip(1957)提出了统一土壤中水分、热量传输与蒸发过程的理论框架, 以及后世广泛应用的阶段性蒸发理论, 其物理机制和数理描述在后来的研究中被进一步完善与扩展, 至今仍被广泛应用于数值模型中。与依赖表层水分的土壤蒸发不同, 植物散发受植物自身生理调控, 能从深层土壤持续提取水分以支持蒸腾过程。有不少田间实测数据表明, 在植被覆盖良好的地区, 植物散发最高可占总蒸散发的 83%~90%(Kang et al., 2003; Gao et al., 2022)。Monteith(1965)认为传统的 Penman 模型主要适用于自由水面蒸发, 难以充分解释植物叶片蒸腾等复杂过程, 因此, 其在 Penman 模型基础上纳入植物生理的调节机制, 提出了 Penman-Monteith 方程, 建立了植物蒸腾受环境与生理双重调控的理论框架, 该理论至今仍被广泛应用于水文学、生态学和农业气象等领域。但该方法通常更适合小型实验地块, 因为这些区域的气象参数和植被参数易于获取。该方法的主要局限在于需要依赖多种气候输入参数, 包括气温、风速及太阳辐射等。在流域尺度上, 获取这些必要数据会变得异常困难, 这进一步限制了该方法在较大尺度流域中的实际应用(Xing et al., 2023)。

随着观测技术与物联网的迅速发展, 地表蒸散发过程的监测手段不断丰富, 数据获取的时空分辨率和精度显著提升。然而, 目前实测蒸发数据仍以水面蒸发为主, 对于土壤蒸发和植物散发的实时监测仍存在一定的技术限制。在现代水文模型中, 准确理解水面蒸发、土壤蒸发与植物散发三者之间的联系, 并在此基础上利用水面蒸发实测数据合理推算陆地生态系统中的实际蒸散发过程, 是实现水文模型长期连续滚动预报的关键因素之一。因此, 明确不同蒸发路径之间的能量与水分耦合机制, 构建能够有效融合实测水面蒸发与陆面蒸散发过程的转换模型, 对于提升水文模型精度和流域水资源动态管理能力具有重要意义。

## 2.3 土壤水分的侧向补给与排泄

在许多水文模型中, 土壤侧向水分运动常被简化处理, 甚至直接忽略。对于实验室或小尺度试

验而言, 忽略侧向流动对整体水分分布影响有限, 但在流域尺度, 特别是在山丘区, 土壤侧向水分流动是基流形成和维持的重要来源之一, 若予以忽略, 将难以准确描述实际水文过程。因此, 在较大尺度水文模拟中, 应充分考虑地形驱动下的侧向水分再分布过程, 并通过高分辨率地形数据、土壤水动力学模型与观测数据融合的方法, 提升对侧向补给与排泄机制的刻画能力, 这不仅有助于更准确模拟基流生成过程, 也对洪水预警、水资源管理和生态系统响应评估具有重要意义(周子皓等, 2024)。

20 世纪 60 年代以前, 主流水文学观点普遍认为, 暴雨期间的径流主要源自地表径流, 但 Hewlett and Hibbert(1967)通过实地观测发现, 即使在森林覆盖良好、几乎不存在地表径流的条件下, 流域出口的径流仍可对降雨事件作出快速响应, 该现象与传统理论相悖, 基于此, 他们开创性地提出坡面浅层侧向流和局部饱和区是湿润山区小流域快速产流的关键机制, 这一理论从根本上改变了研究者们对小流域水文过程的认知路径。Freeze(1972)将地下水补给纳入坡面径流模型, 首次从物理模型角度证明地下水对河道流量的贡献, 明确了地表径流不仅由地表超渗流产生, 侧向地下水流也会补给地表水流系统。Anderson et al.(1997)利用染色实验与监测技术, 首次可视化地揭示了湿润山区坡面浅层水流路径的结构性、动态性与非均匀性, 并深化了对浅层侧向流空间生成机制的认识。Niswonger and Fogg(2008)从三维建模角度系统表明, 即使滞水含水层与主含水层不连通, 其通过坡面浅层流仍可能对基流形成显著、时变性补给。

随着数值模拟工具的广泛应用与发展, 土壤侧向补给与排泄研究逐渐被纳入到现代水文建模体系之中, 逐步走向系统化、多学科交叉与模型精细化。从早期对现象的定性描述, 到现在关注土壤水分在地表-地下-邻坡之间的动态转化机制, 研究范式已经从单点、单坡向丘陵向流域多尺度嵌套系统建模演进, 在此过程中, 对生态系统水分利用效率、地表产流生成机制和地下水补给响应的定量研究成为核心。在模型框架上, 集成土壤异质性、地形地貌特征与植被覆盖动态耦合成为趋势导向, 能够同时考虑各要素对土壤含水率、水力传导度及补给与排泄速率的影响, 从而更真实地还原自然系统中复杂的水文过程。

#### 2.4 土壤饱和区与非饱和区过渡

土壤饱和区与非饱和区的交界通常表现为两种形式: 一种为埋藏于地表以下第一个稳定隔水层之上且具有自由表面的地下水层, 作为上方非饱和区与下方饱和区之间的稳定分界面, 称为潜水面; 另一种为垂向水分运动过程中, 由于下层土壤具有较低的水力传导率, 导致入渗水分在其上方积聚, 形成变动饱和带(李彬权等, 2022), 而其下方仍处于非饱和状态。由于受重力影响, 变动饱和带通常不具稳定性, 仅在地表供水充足条件下才有可能维持。

对于潜水面, 自 Boussinesq 方程提出后, Boulton(1963)在潜水面流动研究中发现了非饱和带延迟释水效应, 其通过引入延迟释水函数, 修正了传统瞬时释水假设, 推动了潜水面动力学由瞬时释水假设向非瞬时响应机制的理论演进。Neuman(1972)在 Boulton 研究的基础上, 基于含水层系统的明确定义的物理参数, 消除了 Boulton 延迟释水理论遇到的概念困难, 为延迟释水效应提供了物理解释。Bouwer and Rice(1978)从空气动力学视角出发, 提出延迟进气机制, 指出非饱和带中空气难以及时进入会导致孔隙水释放滞后, 进而以气-液两相流动物理过程解释了潜水面延迟释水现象。Tartakovsky et al.(2007)等基于 Neuman 的研究, 进一步引入非饱和水流机制, 明确指出潜水面不是固定边界, 而是一个动态移动边界, 其运动由非饱和带的排水延迟控制。Mishra et al.(2010)将潜水面视作会产生强烈水平梯度与垂直流动交错的层面, 在 Tartakovsky 模型基础上, 采用更通用的 VG-Mualem 模型表达非饱和区的水力性质, 提升了潜水面动态的解释性与实用性。Lin et al.(2019)在上述模型基础上引入了两个具有物理意义的滞后时间参数, 更准确地模拟了潜水面在抽水过程中的滞后响应, 显著提升了对延迟释水效应和比出水量的估计精度。

关于变动饱和带, Palkovics et al.(1975)在宾夕法尼亚州中部山区小流域通过实地观测, 发现地表水体下方并不总是直接连通饱和区地下水, 中间还可能隔着一层低渗层, 并在其上方形成变动饱和带。为更准确地刻画变动饱和带中的水流物理过程, Ivanov et al.(2004)理论分析了饱和水力传导度

随深度递减的非均质、各向异性坡面土壤中的渗流分布，揭示了下层水力传导度较低的土壤层可显著阻滞水分下移，形成变动饱和带。Klaus and Jackson(2018)指出，坡面变动饱和带的空间离散性导致水文连通性具有阈值特征，坡面间流动呈现强烈的动态性和非连续性。Cheng et al.(2025)通过数值模拟研究了低渗透层溶质传输的适用性，发现忽略低渗透层影响可能会导致污染物运移预测出现较大偏差。

随着对饱和非饱和交界面理解的深入，研究者意识到有必要将饱和与非饱和区作为一个整体进行耦合研究。当前，土壤水流数值模拟主要依赖于 Richards 方程和土壤水分特征曲线（非饱和区）以及 Darcy 定律和储水系数（饱和区）的耦合描述，而其本身具有高度非线性特征，特别是在潜水面抬升与下降的过程中，土水势、含水率以及水力传导度之间的关系可能发生剧烈变化，水流过程的非线性特征更加显著。此外，由于饱和区与非饱和区采用不同土壤水分特征关系，在饱和与非饱和状态间的数值计算模式转换中存在一定局限，难以充分捕捉潜水面处复杂的土壤水动力行为。另一方面，目前绝大多数土壤水动力模型常将压力势与基质势统一处理为压力水头，以简化模型构建与运算。然而，基质势反映的是土壤颗粒对水分的吸附能力，即使在供水充足条件下，也难以完全降为零(王建新, 2010)。因此，传统模型在忽略基质势复杂性和动态性的情况下，可能无法准确刻画土壤水分的真实运移规律，进而影响模拟精度与物理解释性。在饱和状态下，大多数模拟方法直接假定土壤含水率恒定为饱和含水率，采用压力水头作为主要变量进行计算，这种处理方式忽略了在有压条件下土壤水对土壤骨架以及孔隙残存气体的挤压作用(Sakaki et al., 2016)，无法完全真实反映饱和状态下的土壤水分动态演变。

### 3 全过程水循环的水文模型前沿问题

全过程水循环涉及多圈层、多尺度的水分传输与转化，对水文模型的结构设计与耦合方式提出了更高要求。同时，不同时空尺度下的水文过程差异显著，模型的尺度适应性成为影响模拟精度与适用性的关键因素。因此，本节将围绕模型结构与耦合方式，以及模型的尺度适应性展开讨论。

#### 3.1 模型结构与耦合方式

目前大多数水文模型都侧重于某一特定环节或某一维度，其模型结构也具有明显的特征差异，包括空间结构、时间结构、过程结构、数值求解结构等。模型的空间结构直接决定了其对空间异质性与过程耦合的描述能力，可分为集总式、半分布式与全分布式。其中分布式架构按单元结构可分为结构网格单元、非结构网格单元以及对象导向结构(Dehotin and Braud, 2008; Wang et al, 2005)，结构网格单元结构便于与遥感数据对接，非结构网格单元结构则更适用于复杂边界条件的精细模拟，对象导向结构以坡面、河道等水文对象为建模单元，有利于多过程集成建模。在考虑跨尺度模拟需求时，一些模型也会考虑引入嵌套网格结构或多层次子流域结构(Dehotin and Braud, 2008; 张红萍等, 2023; 芮孝芳, 2017)。模型时间结构是指模型对时间维度的组织方式，其直接关系到模拟的精度、计算效率与适用场景，包括时间尺度、同步/异步处理(Gupta et al., 2016)、事件驱动/连续模拟、时间序列插值方法等。过程结构是指模型内部各个水文过程的组织方式与相互关系，是水文模型模拟水文循环中各个环节的动态演变的框架，不同模型侧重的过程结构不同，复杂度和模拟对象也不同(芮孝芳, 2017)。数值求解结构是模型中各个水文过程在时间与空间上的离散方式以及数值求解方法，是过程结构在数值层面的具体实现，其包括时间离散（显式、隐式与半隐式）、空间离散（FDM、FEM、FVM 等）、线性化与求解器（Newton-Raphson、Picard 迭代、PCG 等）等(舒乐乐等, 2024)。

在地表-壤中-地下耦合方面，目前大多数水文模型都只是为了模拟而将侧重于某一特定环节或某一维度的模型通过定义边界条件的方式来进行拼接，而未从水文循环的角度出发，进行地表-壤中-地下在数值上的紧密耦合，如此“集装箱式”的耦合模式无法全面准确地描述水文循环过程。以 Hydrus 为代表的非饱和土壤水动力模型，以及以 MODFLOW 为代表的饱和地下水动力模型，虽然它们各自领域表现较为出色，但由于其模型本身的封装独立性，将其进行拼接耦合必然存在一定的局限性，例如只能将地表径流深作为土壤水动力模型水头边界，或将土壤入渗作为地下水动力模型的通量边

界等, 这种耦合方式通常假设交界边是固定的, 难以动态捕捉真实的多尺度水文过程, 并且地表、非饱和区和饱和区之间的信息传递缺乏反馈机制, 无法充分反映各水文过程之间的动态交互。

目前已有不少成熟的水利专业模型软件, 其在模型结构设计与过程耦合方式上, 已能够较为准确地根据研究对象特征, 对流域水文过程进行综合模拟, 例如 MIKE 系列、太湖流域模型 (TBM)、ParFlow、HydroGeoSphere、WRF-Hydro、InfoWorks ICM、HEC 系列等。MIKE SHE(DHI, 2025)实现了地表径流、非饱和带水流与饱和区地下水流的集成模拟, 但其地表水流采用扩散波方程, 忽略了水流的惯性项, 限制了其在快速流动或复杂水动力条件下的适用性。此外, 其土壤非饱和区采用一维模型, 忽略侧向流动, 难以模拟非饱和土壤侧向补给与排泄等过程, 并且其地表、非饱和区、饱和区之间通过边界条件进行耦合, 未能实现全过程统一求解, 这使得三者之间的互馈作用不能够完整体现, 难以完全反映实际的水分运动过程, 在一定程度上限制了模型在模拟复杂水流过程方面的能力; TBM 虽然在模拟地表二维漫流时, 考虑了入渗与壤中流, 但其使用均化方法模拟壤中流, 没有根据动力机理动态计算土壤水流运动, 无法全面精细化体现面上空间分布的水文过程; ParFlow(Kuffour et al., 2020)在地表-地下交界面处采用 Neumann 边界公式, 结合 Richards 方程消去入渗通量, 建立地表水深与土壤水头联系耦合求解, 但其采用运动波方程来近似模拟地表漫流, 无法准确捕捉地表漫流的全部特征; HydroGeoSphere(Aquanty Inc, 2025)与 ParFlow 类似, 其地表采用扩散波方程, 更适用于描述小至中等流域的水文过程; WRF-Hydro(WRF-Hydro Team, 2025)采用分模块、分层简化处理算法模拟地表径流与壤中流过程, 对地下水仅进行调蓄模拟, 耦合较为松散。InfoWorks ICM(Alcrudo and Mulet-Marti, 2005)与 HEC-RAS(USACE, 2024)仅考虑入渗过程对地表水流的影响, 对于土壤水和地下水的深度耦合并没有内建的处理机制, 不适用于需要详细描述地表-壤中-地下水文过程的场景。

### 3.2 尺度适应性

尺度适应性指模型在不同时空尺度下均能保持合理的精度与稳定性, 其对应的水文尺度问题主要包括尺度效应和尺度转换两方面。尺度效应指水文过程的特征随观测的尺度变化而发生变化的现象; 尺度转换则是将某一尺度上的观测结果推断到更高或更低的空间分辨率, 或更小或更大的空间范围的过程(芮孝芳, 2015)。降尺度通常需要依赖高分辨率、精细的观测和模拟资料作为支撑, 以准确描述局部水文过程; 而升尺度则更多依赖合理的参数化方案及综合分析方法, 以有效表征小尺度过程在大尺度下的整体影响。

目前, 提升模型尺度适应性的方法主要有两种, 一种由物理过程驱动, 直接在物理模型结构与数值求解中直接引入跨尺度机制, 使模型能够在不同空间和时间分辨率下自动保持较高的模拟精度与稳定性。这类方法通常依托对关键水文物理过程的精细刻画与合理的参数化方案, 实现从细尺度到粗尺度的有效转换, 典型技术包括嵌套网格、动态网格细化、多尺度耦合建模等(Perrini et al, 2024; Alaminie et al, 2023; Savant et al, 2019)。另一种由数据混合驱动, 利用观测数据、统计方法与机器学习等技术, 辅助或直接实现模型在不同尺度下的精度保持, 这类方法能够弥补物理模型在尺度转换中的不足, 例如遥感数据多源同化、尺度统计转换、AI 跨尺度预测关系等(Li, Springer et al., 2025; Li Sahotra et al., 2025; Li et al., 2024)。

同时, 由于水文尺度问题需要大量试验和数据支撑以验证相关理论, 尽管已有不少学者从不同角度对流域尺度展开了探讨, 但整体仍处于探索阶段, 尚未形成系统完备的理论体系, 也尚无能够全面考虑水文尺度效应与尺度转换的成熟模型。因此, 关于水文模型尺度适应性的研究, 还有很长的路要走。

## 4 结论与展望

陆面水文循环过程作为与人类生活息息相关的重要水文过程, 随着水文循环机理研究的不断深入和计算机算力以及深度学习技术的快速发展, 其模拟方法呈现多样化的发展趋势。当前研究表明, 尽管纯物理驱动的高精度模型在描述流域产汇流特征方面具备较高的准确性, 但其对高精度资料和

计算资源的需求使得实时滚动预报难以实现。另一方面,人工智能模型因其训练与推理分离机制,计算效率远高于物理驱动模型,但对大量高质量训练数据的依赖以及对于极端情景的泛化能力仍是限制其广泛应用的瓶颈,尽管目前已处于大数据时代,但仅靠现有的水文监测数据仍难以满足人工智能模型训练所需的数据规模。

此外,陆面水文循环过程不仅包括汛期的人文变化,干旱过程同样是水文循环研究的重要组成部分;同时,基于动力机理的模型往往还需要准确的边界条件,但在水文预报中未来边界条件难以预知,若未能合理处理开边界条件,将直接影响模型预报计算的稳定性与可靠性;进一步地,未来水文模型的发展正呈现智能化、耦合化与实时化的综合趋势,一方面,随着气候变化与人类活动强化了水文过程的非平稳性,跨尺度机理统一、地表-地下耦合以及时间变参数等新理论将进一步完善模型的物理基础。另一方面,遥感、物联网与高密度观测网络的迅速发展,为模型提供了丰富的实时数据,使水文模拟逐步从离线运行向数据持续注入的在线系统演化;与此同时,机器学习与物理模型的深度融合正在突破传统结构限制,促进模型预测精度与适应性的提升。

未来的发展方向应聚焦于融合物理驱动模型与人工智能方法,充分发挥两者优势。例如可尝试在确保物理驱动模型精度的前提下,辅以多场景,特别是极端情景设计,生成大量高质量算据,推动合理物理约束条件下人工智能模型的训练,使其在保证精度的同时大幅降低计算成本。同时,物理驱动模型应为概念性模型提供更加丰富的理论支撑与数据支持,促进模型参数率定优化与模型机理的进一步改进。未来的水文模型将向更加精细、智能、可解释且具备决策功能的综合化平台迈进,为水安全管理与极端事件应对提供更可靠的科学支撑。

作者贡献度:

1. 郑世威: 数据收集, 论文撰写与修改;
2. 陈钢: 论文审阅、指导与修改;
3. 马腾飞: 数据收集;
4. 曾贤敏: 数据收集;
5. 王船海: 论文审阅、指导与修改

## References

- Aguilar-López J. P., Bogaard T., Gerke H. H., 2020. Dual-Permeability Model Improvements for Representation of Preferential Flow in Fractured Clays. *Water Resources Research*, 56(8): e2020WR027304. <https://doi.org/10.1029/2020WR027304>
- Alaminie A. A., Amarnath G., Padhee S. K., et al., 2023. Nested Hydrological Modeling for Flood Prediction Using CMIP6 Inputs Around Lake Tana, Ethiopia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 46: 101343. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101343>
- Alcrudo F., Mulet-Martí J., 2005. Urban Inundation Models Based upon the Shallow Water Equations: Numerical and Practical Issues. *Hermes Science Publications*, 1-12.
- Anderson S. P., Dietrich W. E., Montgomery D. R., et al., 1997. Subsurface Flow Paths in a Steep, Unchanneled Catchment. *Water Resources Research*, 33(12): 2637-2653. <https://doi.org/10.1029/97WR02595>
- Aquanty Inc, 2025. HGC Theory Manual. *Aquanty Inc*.
- Bandai T., Ghezzehei T. A., 2022. Forward and Inverse Modeling of Water Flow in Unsaturated Soils with Discontinuous Hydraulic Conductivities Using Physics-Informed Neural Networks with Domain Decomposition. *Hydrology and Earth System Sciences*, 26: 4469-4495. <https://doi.org/10.5194/hess-26-4469-2022>
- Barry D. A., Parlange J. Y., Haverkamp R., et al., 1995. Infiltration under Pondered Conditions: 4. An Explicit Predictive Infiltration Formula. *Soil Science*, 160(1): 8-17. <https://doi.org/10.1097/00010694-199507000-00002>
- Basha H. A., 1999. One-Dimensional Nonlinear Steady Infiltration. *Water Resources Research*, 35(6): 1697-1704. <https://doi.org/10.1029/1999WR900039>
- Bianchi M., Zheng C. M., Wilson C., et al., 2011. Spatial Connectivity in a Highly Heterogeneous Aquifer: From Cores to Preferential Flow Paths. *Water Resources Research*, 47(5). <https://doi.org/10.1029/2009WR008966>

- Boano F., Harvey J. W., Marion A., et al., 2014. Hyporheic Flow and Transport Processes: Mechanisms, Models, and Biogeochemical Implications. *Reviews of Geophysics*, 52(4): 603-679. <https://doi.org/10.1002/2012RG000417>
- Bogner C., Mirzaei M., Ruy S., et al., 2013. Microtopography, Water Storage and Flow Patterns in a Fine-Textured Soil under Agricultural Use. *Hydrological Processes*, 27: 1797-1806. <https://doi.org/10.1002/hyp.9337>
- Boulton N. S., 1963. Analysis of Data from Non-Equilibrium Pumping Tests Allowing for Delayed Yield from Storage. *Proceedings of the Institute of Civil Engineers*, 26: 469-482. <https://doi.org/10.1680/iicep.1963.10409>
- Bouwer H., Rice R. C., 1978. Delayed Aquifer Yield as a Phenomenon of Delayed Air Entry. *Water Resources Research*, 14(6): 1068-1074. <https://doi.org/10.1029/WR014i006p01068>
- Brutsaert W., 1977. Vertical Infiltration in Dry Soil. *Water Resources Research*, 13(2): 363-368. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00363>
- Cabral M. C., Garrote L., Bras R. L., et al., 1992. A Kinematic Model of Infiltration and Runoff Generation in Layered and Sloped Soils. *Advances in Water Resources*, 15(5): 311-324. [https://doi.org/10.1016/0309-1708\(92\)90017-V](https://doi.org/10.1016/0309-1708(92)90017-V)
- Casali E., Larsbo M., Koestel J., et al., 2024. Macropore Flow in Relation to the Geometry and Topology of Soil Macropore Networks: Re-Visiting the Kinematic Wave Equation. *Journal of Hydrology*, 630: 130732. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.130732>
- Chang T., Li J. Q., Chen W. X., 2024. Research Progress in Theories and Approaches for Lake Ecosystem Restoration. *Advances in Water Science*, 35(6): 1005-1020. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2024.06.013>
- Chen H. X., Li J., Huang C. M., et al., 2025. Effects of Cave Filling on Seepage and Hydraulic Parameters of Aquifers. *Earth Science*, 50(6): 2416-2427. ( in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2024.098
- Cheng H., Wang F. G., Yuan Y. L., et al., 2025. Ignoring the Pre-Darcy Flow Phenomenon in Low Permeability Media May Lead to Great Deviation in Contaminant Transport Prediction. *Journal of Hydrology*, 659: 133287. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133287>
- Collis-George N., 1977. Infiltration Equations for Simple Soil Systems. *Water Resources Research*, 13(2): 395-403. <https://doi.org/10.1029/WR013i002p00395>
- Currie F., Therrien R., Schilling O. S., 2025. Explicit Simulation of Microbial Transport with a Dual-Permeability, Two-Site Kinetic Deposition Formulation Using the Integrated Surface-Subsurface Hydrological Model HydroGeoSphere. *Hydrology and Earth System Sciences*, 29: 5383-5403. <https://doi.org/10.5194/hess-29-5383-2025>
- Dehotin J., Braud I., 2008. Which Spatial Discretization for Distributed Hydrological Models? Proposition of a Methodology and Illustration for Medium to Large-Scale Catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 12: 769-796. <https://doi.org/10.5194/hess-12-769-2008>
- Demand D., Blume T., Weiler M., 2019. Spatio-Temporal Relevance and Controls of Preferential Flow at the Landscape Scale. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23: 4869-4889. <https://doi.org/10.5194/hess-23-4869-2019>
- DHI, 2025. MIKE SHE User Guide and Reference Manual. *DHI*.
- Dong N. P., Wang H., Yang M. X., et al., 2024. An Improved Xin'anjiang Model with Snow Melting and Soil Freeze-Thaw Processes and Its Application in Streamflow Simulations of the Upper Yalongjiang River Basin. *Advances in Water Science*, 35(4): 530-542. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2024.04.002>
- Elrashedy S., Zhang Y., Geurink J. S., et al., 2025. Inter-Basin Groundwater Flow in West-Central Florida. *Journal of Hydrology*, 660(B): 133423. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133423>
- Fang Z. S., Yang W. Z., Zhou P. H., et al., 1958. Investigation of Terracing in the Loess Plateau of the Middle Reaches of the Yellow River. *Science Press*. ( in Chinese)
- Freeze R. A., 1972. Role of Subsurface Flow in Generating Surface Runoff: 1. Base Flow Contributions to Channel Flow. *Water Resources Research*, 8(3): 609-623. <https://doi.org/10.1029/WR008i003p00609>
- Freeze R. A., 1972. Role of Subsurface Flow in Generating Surface Runoff: 2. Upstream Source Areas. *Water Resources Research*, 8(5): 1272-1283. <https://doi.org/10.1029/WR008i005p01272>

- Gao G. Y., Wang D., Zha T. S., et al., 2022. A Global Synthesis of Transpiration Rate and Evapotranspiration Partitioning in the Shrub Ecosystems. *Journal of Hydrology*, 606: 127417. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2021.127417>
- Gao M., Li H. Y., Liu D. F., et al., 2018. Identifying the Dominant Controls on Macropore Flow Velocity in Soils: A Meta-Analysis. *Journal of Hydrology*, 567: 590-604. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2018.10.044>
- Gao Y. F., He C., Peng T., et al., 2025. Impact of Precipitation Spatial Information Processing Strategies on Runoff Prediction. *Advances in Water Science*, 36(1): 143-154. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.013>
- Granger R. J., Gray D. M., Dyck G. E., 1984. Snowmelt Infiltration to Frozen Prairie Soils. *Canadian Journal of Earth Sciences*, 21(6): 669-677. <https://doi.org/10.1139/e84-073>
- Green W. H., Ampt G. A., 1911. Studies on Soil Physics: I. Flow of Air and Water through Soils. *Journal of Agricultural Science*, 4(1): 1-24. <https://doi.org/10.1017/S0021859600001441>
- Gupta S., Wohlmuth B., Helmig R., 2016. Multi-Rate Time Stepping Schemes for Hydro-Geomechanical Model for Subsurface Methane Hydrate Reservoirs. *Advances in Water Resources*, 91: 78-87. <https://doi.org/10.1016/j.advwatres.2016.02.013>
- Gusev Y. M., Nasonova O. N., 1998. The Land Surface Parameterization Scheme SWAP: Description and Partial Validation. *Global and Planetary Change*, 19(1-4): 63-86. [https://doi.org/10.1016/S0921-8181\(98\)00042-3](https://doi.org/10.1016/S0921-8181(98)00042-3)
- Han X. D., Zhu Y., Wang X. G., et al., 2024. A Coupled Regional-Scale Numerical Model for Hydrological Processes and Interactions between Groundwater and Surface Water in a Controlled Drainage District. *Journal of Hydrology*, 643: 132036. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132036>
- Hao Z. C., 1994. A Study of Infiltration Model for Loess Region. *Advances in Water Science*, (03): 186-192. ( in Chinese with English abstract))
- Haverkamp R., Parlange J. Y., Starr J. L., et al., 1990. Fuentes C. Infiltration under Pondered Conditions: 3. A Predictive Equation Based on Physical Parameters. *Soil Science*, 149(5): 292-300.
- Haverkamp R., Ross P. J., Smettem K. R. J., et al., 1994. Three-Dimensional Analysis of Infiltration from the Disc Infiltrimeter: 2. Physically Based Infiltration Equation. *Water Resources Research*, 30(11): 2931-2935. <https://doi.org/10.1029/94WR01788>
- He D., Ma D. H., Zhang X. Z., et al., 2013. Regularity of Spatial Variability of Soil Infiltration and Its Variation Sources. *Advances in Water Science*, 24(03): 340-348. ( in Chinese with English abstract)
- Hewlett J. D., Hibbert A. R., 1967. Factors Affecting the Response of Small Watersheds to Precipitation in Humid Areas. *Sopper W E, Lull H W, eds. Proceedings of the International Symposium on Forest Hydrology. New York: Pergamon, Pennsylvania State University, 275-290.*
- Holbak M., Abrahamsen P., Hansen S., et al., 2021. A Physically Based Model for Preferential Water Flow and Solute Transport in Drained Agricultural Fields. *Water Resources Research*, 57(3): e2020WR027954. <https://doi.org/10.1029/2020WR027954>
- Holtan H. N., 1961. A Concept for Infiltration Estimates in Watershed Engineering. *United States Department of Agriculture.*
- Horton R. E., 1933. The Rôle of Infiltration in the Hydrologic Cycle. *Transactions, American Geophysical Union*, 14(1): 446-460.
- Huang H. L., Song J., Yang Y., et al., 2024. Reactive Transport Numerical Modeling of Typical Heavy Metal Pollutants in Three-Dimensional Fracture Networks. *Earth Science*, 49(8): 2879-2890. doi: 10.3799/dqkx.2022.103
- Huggins L. F., Monke E. J., 1968. A Mathematical Model for Simulating the Hydrologic Response of a Watershed. *Water Resources Research*, 4(3): 529-539. <https://doi.org/10.1029/WR004i003p00529>
- Hyman J. D., Sweeney M. R., Gable C. W., et al., 2022. Flow and Transport in Three-Dimensional Discrete Fracture Matrix Models Using Mimetic Finite Difference on a Conforming Multi-Dimensional Mesh. *Journal of Computational Physics*, 466: 111396. <https://doi.org/10.1016/j.jcp.2022.111396>
- Ivanov V. Y., Vivoni E. R., Bras R. L., et al., 2004. Catchment Hydrologic Response with a Fully Distributed Triangulated

- Irregular Network Model. *Water Resources Research*, 40(11). <https://doi.org/10.1029/2004WR003218>
- Jia H. W., Kang S. Z., Zhang F. C., et al., 2006. Spatial Variability of Soil Water Infiltration in the Plain of Shiyang River Basin. *Advances in Water Science*, (04): 471-476. ( in Chinese with English abstract)
- Jiang D. S., Huang G. J., 1986. Study on Soil Infiltration Rate in the Loess Plateau. *Acta Pedologica Sinica*, 23(2): 178-186. ( in Chinese with English abstract)
- Kang S. Z., Gu B. J., Du T. S., et al., 2003. Crop Coefficient and Ratio of Transpiration to Evapotranspiration of Winter Wheat and Maize in a Semi-Humid Region. *Agricultural Water Management*, 59(3): 239-254. [https://doi.org/10.1016/S0378-3774\(02\)00150-6](https://doi.org/10.1016/S0378-3774(02)00150-6)
- Karlović I., Posavec K., Larva O., et al., 2022. Numerical Groundwater Flow and Nitrate Transport Assessment in Alluvial Aquifer of Varaždin Region, NW Croatia. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 41: 101084. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2022.101084>
- King R. B., 1992. Overview and Bibliography of Methods for Evaluating the Surface-Water-Infiltration Component of the Rainfall-Runoff Process. *U.S. Geological Survey. Water-Resources Investigations Report*, 92-4095. 170 p. <https://doi.org/10.3133/wri924095>
- Klaus J., Jackson C. R.. 2018. Interflow Is Not Binary: A Continuous Shallow Perched Layer Does Not Imply Continuous Connectivity. *Water Resources Research*, 54(9): 5921-5932. <https://doi.org/10.1029/2018WR022920>
- Kmec J., Šir M., Fürst T., et al., 2023. Semi-Continuum Modeling of Unsaturated Porous Media Flow to Explain Bauters' Paradox. *Hydrology and Earth System Sciences*, 27: 1279-1300. <https://doi.org/10.5194/hess-27-1279-2023>
- Kratzert F., Klotz D., Brenner C., et al., 2018. Rainfall-Runoff Modelling Using Long Short-Term Memory (LSTM) Networks. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22: 6005-6022. <https://doi.org/10.5194/hess-22-6005-2018>
- Kuffour B. N. O., Engdahl N. B., Woodward C. S., et al., 2020. Simulating Coupled Surface-Subsurface Flows with ParFlow v3.5.0: Capabilities, Applications, and Ongoing Development of an Open-Source, Massively Parallel, Integrated Hydrologic Model. *Geoscientific Model Development*, 13(3): 1373-1397. <https://doi.org/10.5194/gmd-13-1373-2020>
- Li B. Q., Chen C., Xiao Y., et al., 2024. A Hydrological and Hydrodynamic Coupling Model in Polder Areas with a Complex Underlying Surface. *Advances in Water Science*, 35(5): 805-816. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2024.05.011>
- Li B. Q., Liang Z. M., Fu Y. P., 2022. A Runoff Generation and Concentration Model Based on the Variable Saturation Zone Concept and Its Parameter Determination. *Advances in Water Science*, 33(02): 208-218. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2022.02.005>
- Li F. P., Springer A., Kusche J., et al., 2025. Reanalysis and Forecasting of Total Water Storage and Hydrological States by Combining Machine Learning with CLM Model Simulations and GRACE Data Assimilation. *Water Resources Research*, 61(2): e2024WR037926. <https://doi.org/10.1029/2024WR037926>
- Li P. J., Zha Y. Y., Zhang Y. G., et al., 2024. Deep Learning Integrating Scale Conversion and Pedo-Transfer Function to Avoid Potential Errors in Cross-Scale Transfer. *Water Resources Research*, 60: e2023WR035543. <https://doi.org/10.1029/2023WR035543>
- Li Z. B., Sahotra H., Ahmad S., et al., 2025. A Distributed Machine Learning Model for Blue and Green Water Resources with Transferable Applications in Similar Climatic Zones. *Water Resources Research*, 61: e2024WR039169. <https://doi.org/10.1029/2024WR039169>
- Li Z. W., Wang Z. Y., Zhang C. D., et al., 2014. A Study on the Mechanism of Wetland Degradation in Ruergai Swamp. *Advances in Water Science*, 25(2): 172-180. ( in Chinese with English abstract)
- Liao Y. L., Pan T. S., Deng Y. Y., et al., 2025. Comparing Soil Matrix Infiltration and Preferential Flow Across Different Land Use Types in Karst Landscapes: Implications for Soil and Water Conservation. *CATENA*, 256: 109127. <https://doi.org/10.1016/j.catena.2025.109127>
- Lin Y. C., Huang C. S., Yeh H. D., 2019. Analysis of Unconfined Flow Induced by Constant-Rate Pumping Based on the Lagging Theory. *Water Resources Research*, 55(5): 3925-3940. <https://doi.org/10.1029/2018WR023893>

- Liu J. P., Jin J., Li S. M., et al., 2021. Dynamic Changes of Typical Glacier-Fed Lakes in Different Climatic Zones Around the World from 1995 to 2015. *Advances in Water Science*, 32(1): 1-9. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2021.01.001>
- Liu K., Zhai J. Q., Zhao Y., et al., 2025. Soil Water Infiltration under Thickening Unsaturated Zone: Patterns, Mechanisms, and Quantitative Formula. *Journal of Hydrology*, 660(B): 133450. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133450>
- Liu X. D., Wang Y., 2020. Advances in Methods for Identifying Surface Water Pollution Sources. *Advances in Water Science*, 31(2): 302-311. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2020.02.016>
- Liu Z., Chao J. Y., Zhang L., et al., 2015. Current Status and Problems of Non-Point Source Pollution Load Calculation in China. *Advances in Water Science*, 26(3): 432-442. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2015.03.014>
- Lu D. B., Wang H., Geng N., et al., 2022. Imaging and Characterization of the Preferential Flow Process in Agricultural Land Using Electrical Resistivity Tomography and Dual-Porosity Model. *Ecological Indicators*, 134: 108498. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.108498>
- Mein R. G., Larson C. L., 1973. Modeling Infiltration During a Steady Rain. *Water Resources Research*, 9(2): 384-394. <https://doi.org/10.1029/WR009i002p00384>
- Mishra P. K., Neuman S. P., 2010. Improved Forward and Inverse Analyses of Saturated-Unsaturated Flow Toward a Well in a Compressible Unconfined Aquifer. *Water Resources Research*, 46(7). <https://doi.org/10.1029/2009WR008899>
- Mishra S. K., Kumar S. R., Singh V. P., 1999. Calibration and Validation of a General Infiltration Model. *Hydrological Processes*, 13(11): 1691-1718. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19990815\)13:11<1691::AID-HYP818>3.0.CO;2-W](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19990815)13:11<1691::AID-HYP818>3.0.CO;2-W)
- Monteith J. L., 1965. Evaporation and Environment. *Symposia of the Society for Experimental Biology*, 205-234.
- Neuman S. P., 1972. Theory of Flow in Unconfined Aquifers Considering Delayed Response of the Water Table. *Water Resources Research*, 8(4): 1031-1045. <https://doi.org/10.1029/WR008i004p01031>
- Nguyen N. T., Thunyawatcharakul P., Nguyen H. N., 2022. Global Review of Groundwater Potential Models in the Last Decade: Parameters, Model Techniques, and Validation. *Journal of Hydrology*, 614(A): 128501. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128501>
- Niswonger R. G., Fogg G. E., 2008. Influence of Perched Groundwater on Base Flow. *Water Resources Research*, 44(3): W03405. <https://doi.org/10.1029/2007WR006160>
- Overton D. E., 1964. Mathematical Refinement of an Infiltration Equation for Watershed Engineering. *U.S. Department of Agriculture*.
- Palkovics W. E., Petersen G. W., Matelski R. P., 1975. Perched Water Table Fluctuation Compared to Streamflow. *Soil Science Society of America Journal*, 39: 343-348. <https://doi.org/10.2136/sssaj1975.03615995003900020030x>
- Parlange J. Y., 1980. Water Transport in Soils. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 12: 77-102. <https://doi.org/10.1146/annurev.fl.12.010180.000453>
- Penman H. L., 1948. Natural Evaporation from Open Water, Bare Soil and Grass. *Proceedings of the Royal Society of London*, 193: 120-145. <https://doi.org/10.1098/rspa.1948.0037>
- Perrini P., Cea L., Chiaravalloti F., et al., 2024. A Runoff-on-Grid Approach to Embed Hydrological Processes in Shallow Water Models. *Water Resources Research*, 60(7): e2023WR036421. <https://doi.org/10.1029/2023WR036421>
- Philip J. R., 1957. Evaporation, and Moisture and Heat Fields in the Soil. *Journal of Meteorology*, 14: 354-366. [https://doi.org/10.1175/1520-0469\(1957\)014<0354:EAMAHF>2.0.CO;2](https://doi.org/10.1175/1520-0469(1957)014<0354:EAMAHF>2.0.CO;2)
- Philip J. R., 1957. The Theory of Infiltration: 4. Sorptivity and Algebraic Infiltration Equations. *Soil Science*, 84(3): 257-264. <https://doi.org/10.1097/00010694-195709000-00010>
- Rasouli M. M., Ketabchi H., Mahmoodzadeh D., 2025. Groundwater-Surface Water Interaction in a River-Wetland-Aquifer Regional System Using a Coupled Simulation-Based Approach. *Journal of Hydrology*, 656: 133006. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2025.133006>

- Reinecke R., Wachholz A., Mehl S., et al., 2020. Importance of Spatial Resolution in Global Groundwater Modeling. *Groundwater*, 58(3): 363-376. <https://doi.org/10.1111/gwat.12996>
- Rui X. F., 2015. Discussion of Some Frontier Problems in Hydrology. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 35(5): 95-102. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2015.05.013>
- Rui X. F., 2017. Theory of Runoff Yield and Confluence by Grid Inlaid in Watershed Basic Unit. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 37(2): 1-6. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2017.02.001>
- Rui X. F., 2017. Discussion of Watershed Hydrological Model. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 37(4): 1-7. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.3880/j.issn.1006-7647.2017.04.001>
- Sakaki T., Komatsu M., Takeuchi R., 2016. Extending Water Retention Curves to a Quasi-Saturated Zone Subjected to a High Water Pressure up to 1.5 Megapascals. *Vadose Zone Journal*, 15(8): 1-7. <https://doi.org/10.2136/vzj2015.12.0165>
- Savant G., Trahan C. J., Petty L., et al., 2019. Urban and Overland Flow Modeling with Dynamic Adaptive Mesh and Implicit Diffusive Wave Equation Solver. *Journal of Hydrology*, 573: 13-30. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2019.03.061>
- Shadmehri Toosi A., Batelaan O., Shanafield M., et al., 2025. Land Use-Land Cover and Hydrological Modeling: A Review. *WIREs Water*, 12(2): e70013. <https://doi.org/10.1002/wat2.70013>
- Shu L. L., Chen H., Meng X. H., et al., 2024. A Review of Numerical Hydrological Models Coupling Surface and Subsurface Processes. *Science China: Earth Sciences*, 54(5): 1484-1505. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.1007/s11430-022-1312-7>
- Singh V. P., Yu F. X., 1990. Derivation of Infiltration Equation Using Systems Approach. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering*, 116(6): 837-858. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9437\(1990\)116:6\(837\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9437(1990)116:6(837))
- Smith R., 1972. The Infiltration Envelope: Results from a Theoretical Infiltrimeter. *Journal of Hydrology*, 17(1): 1-21. [https://doi.org/10.1016/0022-1694\(72\)90063-7](https://doi.org/10.1016/0022-1694(72)90063-7)
- Smith R. E., Parlange J. Y., 1978. A Parameter-Efficient Hydrologic Infiltration Model. *Water Resources Research*, 14(3): 533-538. <https://doi.org/10.1029/WR014i003p00533>
- Song X. M., Xu N. T., Zhang J. Y., et al. 2024. Urban Flooding in China: Current Status, Causes and Challenges. *Advances in Water Science*, 35(3): 357-373. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2024.03.001>
- Stroosnijder L., 1976. Infiltratie en Herverdeling van Water in Grond. *Landbouwhogeschool Wageningen*. <https://doi.org/10.18174/206147>
- Swartzendruber D., Clague F. R., 1989. An Inclusive Infiltration Equation for Downward Water Entry into Soil. *Water Resources Research*, 25(4): 619-626. <https://doi.org/10.1029/WR025i004p00619>
- Talsma T., Parlange J., 1972. One Dimensional Vertical Infiltration. *Australian Journal of Soil Research*, 10(2): 143-150. <https://doi.org/10.1071/SR9720143>
- Tartakovsky G. D., Neuman S. P., 2007. Three-Dimensional Saturated-Unsaturated Flow with Axial Symmetry to a Partially Penetrating Well in a Compressible Unconfined Aquifer. *Water Resources Research*, 43(1). <https://doi.org/10.1029/2006WR005153>
- Tian W., Li X., Cheng G. D., et al., 2012. Coupling a Groundwater Model with a Land Surface Model to Improve Water and Energy Cycle Simulation. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16: 4707-4723. <https://doi.org/10.5194/hess-16-4707-2012>
- Triadis D., Broadbridge P., 2010. Analytical Model of Infiltration under Constant-Concentration Boundary Conditions. *Water Resources Research*, 46(3). <https://doi.org/10.1029/2009WR008181>
- USACE, 2024. HEC-RAS 2D User's Manual, Version 6.6.
- Wang J., Hassett J. M., Endreny T. A., 2005. An Object Oriented Approach to the Description and Simulation of Watershed Scale Hydrologic Processes. *Computers & Geosciences*, 31(4): 425-435. <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2004.09.025>

- Wang J. X., 2010. The Water Potential Description, Theoretical Models Study of Rainfall Infiltration and Application(Dissertation). *Tsinghua University*. ( in Chinese with English abstract)
- Wang Y. R., Chung E., Fu S. B., 2022. A Local-Global Multiscale Method for Highly Heterogeneous Stochastic Groundwater Flow Problems. *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*, 392: 114688. <https://doi.org/10.1016/j.cma.2022.114688>
- Wang Y. H., Gupta Hoshin V., 2024. A Mass-Conserving Perceptron for Machine-Learning-Based Modeling of Geoscientific Systems. *Water Resources Research*, 60(4): e2023WR036461. <https://doi.org/10.1029/2023WR036461>
- Wang Z. G., 1983. An Approach to the Calculation of Yield-Water by a Hyperbolic Infiltration Model. *Journal of Hydraulic Engineering*, (08): 1-9. ( in Chinese with English abstract)
- WRF-Hydro Team, 2025. WRF-Hydro Modeling System, Release 5.4.0.
- Wu H. D., Ye X. Y., Du X. Q., et al., 2025. Assessing Groundwater Level Variability in Response to Climate Change: A Case Study of Large Plain Areas. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, 57: 102180. <https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102180>
- Xing L. W., Feng Y, Cui N. B., et al., 2023. Estimating Reference Evapotranspiration Using Penman-Monteith Equation Integrated with Optimized Solar Radiation Models. *Journal of Hydrology*, 620(A): 129407. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2023.129407>
- Xu X., Xi Y., Yao W. J., 2019. Unsaturated Wetting Front Model Based on the Whole Process of Rainfall Infiltration. *Journal of Hydraulic Engineering*, 50(09): 1095-1102. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.13243/j.cnki.slxh.20190391>
- Xu Z. H., Xu Z. M., Cao J. W., et al., 2012. Present and Future Research of Preferential Flow in Soil. *Soils*, 44(6): 905-916. ( in Chinese with English abstract).
- Xu Z. X., Ban C. G., Zhang R., 2022. Evolution Laws and Attribution Analysis in the Yarlung Zangbo River Basin. *Advances in Water Science*, 33(4): 519-530. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2022.04.001>
- Yang Y. F., Xie C., Fan Z. W., et al., 2024. Digital Twinning of River Basins Towards Full-Scale, Sustainable and Equitable Water Management and Disaster Mitigation. *Natural Hazards*, 1: 43. <https://doi.org/10.1038/s44304-024-00047-2>
- Yang Z. S., Chang Q. X., He S. Z., et al., 2025. Groundwater-Surface Water Interaction and Its Mechanism in a Piedmont Fluvial-Alluvial Fan of an Alpine Watershed. *Earth Science*, 50(2): 687-698. ( in Chinese with English abstract). doi: 10.3799/dqkx.2023.072
- Yin M. S., Ma R., Zhang Y., et al., 2023. Competitive Control of Multiscale Aquifer Heterogeneity on Solute Transport in an Alluvial Aquifer. *Journal of Hydrology*, 616: 128819. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.128819>
- Yuan S. Y., Chen Y. H., Luo X., et al., 2025. Knowledge- and Data-Driven Intelligent Simulation Method for Tidal River Network Hydrodynamics. *Advances in Water Science*, 36(1): 28-38. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2025.01.003>
- Zhang H. P., Hao X. L., Hu C. W., et al., 2023. A Hierarchically Nested Multi-Scale Modeling Technique for Urban Pluvial Floods. *Advances in Water Science*, 34(4): 510-519.. ( in Chinese with English abstract). <https://doi.org/10.14042/j.cnki.32.1309.2023.04.004>
- Zhang J., Wang S., FU Z. Y., et al., 2025. Regulation of Preferential Flow by Soil Thickness on Small Hillslopes with Complex Topography Through Intensive High-Frequency Soil Moisture Monitoring. *Geophysical Research Letters*, 52(5): e2024GL112674. <https://doi.org/10.1029/2024GL112674>
- Zhao L. T., Gray D. M., 1998. A Parametric Expression for Estimating Infiltration into Frozen Soils. *Hydrological Processes*, 11(13): 1761-1775. [https://doi.org/10.1002/\(SICI\)1099-1085\(19971030\)11:13<1761::AID-HYP604>3.0.CO;2-O](https://doi.org/10.1002/(SICI)1099-1085(19971030)11:13<1761::AID-HYP604>3.0.CO;2-O)
- Zhou J. J., Huang T. Y., Wang H., et al., 2025. Using Physical Method, Machine Learning and Hybrid Method to Model Soil Water Movement. *Journal of Hydrology*, 652: 132639. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2024.132639>
- Zhou Z. H., Du Y., Sun X. L., et al., 2024. Quantification of Groundwater Discharge and Its Spatial Variability in Jingjiang

## 中文参考文献

- 唱彤, 酈建强, 陈文学, 2024. 湖泊生态系统修复理论与技术研究进展. *水科学进展*, 35(6): 1005-1020.
- 陈焕雄, 李静, 黄聪明, 等, 2025. 溶洞填充对含水层渗流和水力参数的影响. *地球科学*, 50(6): 2416-2427.
- 董宁澎, 王浩, 杨明祥, 等, 2024. 考虑融雪及土壤冻融的新安江模型及其应用——以雅砻江上游径流模拟为例. *水科学进展*, 35(4): 530-542.
- 方正三, 杨文治, 周佩华, 等. 黄河中游黄土高原梯田的调查研究. 科学出版社.
- 高玉芳, 何川, 彭涛, 等, 2025. 降水空间信息的处理策略对径流预测的影响. *水科学进展*, 36(01): 143-154.
- 郝振纯, 1994. 黄土地区降雨入渗模型初探. *水科学进展*, (03): 186-192.
- 何丹, 马东豪, 张锡洲, 等, 2013. 土壤入渗特性的空间变异规律及其变异源. *水科学进展*, 24(03): 340-348.
- 黄鸿蓝, 宋健, 杨蕴, 等, 2024. 三维裂隙网络中典型重金属污染物反应运移数值模拟. *地球科学*, 2024, 49(08): 2879-2890.
- 贾宏伟, 康绍忠, 张富仓, 等, 2006. 石羊河流域平原区土壤入渗特性空间变异的研究. *水科学进展*, (04): 471-476.
- 蒋定生, 黄国俊, 1986. 黄土高原土壤入渗速率的研究. *土壤学报*, 23(2): 178-186.
- 李彬权, 陈丞, 肖洋, 等, 2024. 平原圩区复合下垫面水文水动力耦合模型. *水科学进展*, 35(05): 805-816.
- 李彬权, 梁忠民, 付宇鹏, 等, 2022. 基于变动饱和带的产汇流模型及其参数确定方法. *水科学进展*, 33(02): 208-218.
- 李志威, 王兆印, 张晨笛, 等, 2014. 若尔盖沼泽湿地的萎缩机制. *水科学进展*, 2014, 25(2): 172-180.
- 刘吉平, 金晶, 李晟铭, 等, 2021. 1995-2015 年全球不同气候带典型冰川补给型湖泊动态变化. *水科学进展*, 32(1): 1-9.
- 刘晓东, 王珏, 2020. 地表水污染源识别方法研究进展. *水科学进展*, 31(2): 302-311.
- 刘庄, 晁建颖, 张丽, 等, 2015. 中国非点源污染负荷计算研究现状与存在问题. *水科学进展*, 26(3): 432-442.
- 芮孝芳, 2015. 水文学前沿科学问题之我见. *水利水电科技进展*, 35(5): 95-102.
- 芮孝芳, 2017. 单元嵌套网格产汇流理论. *水利水电科技进展*, 37(2): 1-6.
- 芮孝芳, 2017. 论流域水文模型. *水利水电科技进展*, 37(4): 1-7.
- 舒乐乐, 陈昊, 孟宪红, 等, 2024. 地表-地下过程耦合的数值水文模型综述. *中国科学: 地球科学*, 54(5): 1484-1505.
- 宋晓猛, 徐楠涛, 张建云, 等, 2024. 中国城市洪涝问题: 现状、成因与挑战. *水科学进展*, 35(03): 357-373.
- 王建新, 2010. 降雨非饱和入渗过程的水势描述及理论模型研究与应用(博士学位论文). 清华大学.
- 王芝桂, 1983. 双曲入渗模型应用于产流计算的探讨. *水利学报*, (08): 1-9.
- 徐旭, 席越, 姚文娟, 2019. 基于降雨入渗全过程的非饱和湿润峰模型. *水利学报*, 50(09): 1095-1102.
- 徐宗恒, 徐则民, 曹军尉, 等, 2012. 土壤优先流研究现状与发展趋势. *土壤*, 44(6): 905-916.
- 徐宗学, 班春广, 张瑞, 2022. 雅鲁藏布江流域径流演变规律与归因分析. *水科学进展*, 33(04): 519-530.
- 杨泽森, 常启昕, 贺笙哲, 等, 2025. 典型高寒流域冲洪积扇地下水与地表水交互机制. *地球科学*, 50(2): 687-698.
- 袁赛瑜, 陈逸鸿, 罗霄, 等, 2025. 知识数据双驱动的情感河网水动力智能模拟方法. *水科学进展*, 36(01): 28-38.
- 张红萍, 郝晓丽, 胡昌伟, 等, 2023. 城市暴雨洪涝多尺度分层嵌套模拟技术. *水科学进展*, 34(4): 510-519.
- 周子皓, 杜尧, 孙晓梁, 等, 2024. 长江中游荆江段地下水排泄的量化及其空间差异性分析. *地球科学*, 49(4): 1448-1458.