

干旱半干旱地区土壤水分数值模拟研究进展

房文亚

内蒙古师范大学地理科学学院

DOI:10.32629/as.v9i6.4084

[摘要] 土壤水分精准模拟对干旱半干旱地区水资源高效利用具有决定性意义。本文综述了以HYDRUS模型为代表的土壤水分数值模拟在干旱半干旱地区的研究进展。首先,本文概述了HYDRUS模型的基本原理。其次,从土壤水分动态模拟、污染物运移模拟及模型应用挑战三个方面梳理了模型在干旱半干旱区的广泛应用。文献分析表明,HYDRUS模型已成功应用于干旱半干旱区中黄土丘陵区、沙地、灌区等多种景观的土壤水分入渗、再分布及蒸发过程研究。当前研究存在数据驱动不足、模拟场景相对理想化和模型间耦合与交互薄弱等局限。针对研究局限需要参数反演、集成建模以及管理与决策智能应用来解决。本文的研究为干旱半干旱地区土壤水分数值模拟方向的研究学者提供一定的参考。

[关键词] 干旱半干旱地区; 土壤水分; HYDRUS模型; 数值模拟

中图分类号: Q938.1+3 **文献标识码:** A

Progress in Numerical Simulation of Soil Water Fraction in Arid and Semi-Arid Regions

Wenya Fang

School of Geography Science, Inner Mongolia Normal University

[Abstract] Accurate soil moisture simulation is of decisive significance for the efficient utilization of water resources in arid and semi-arid regions. This paper reviews the research progress of soil water fraction numerical simulation, represented by the HYDRUS model, in arid and semi-arid areas. First, it outlines the basic principles of the HYDRUS model. Second, it systematically examines the model's extensive applications in arid and semi-arid regions from three aspects: dynamic soil moisture simulation, contaminant transport simulation, and challenges in model application. Literature analysis indicates that the HYDRUS model has been successfully applied to study soil moisture infiltration, redistribution, and evaporation processes in various landscapes such as loess hilly areas, sandy lands, and irrigation districts in arid and semi-arid regions. Current research has limitations, including insufficient data-driven approaches, relatively idealized simulation scenarios, and weak coupling and interaction between models. Addressing these limitations requires parameter inversion, integrated modeling, and intelligent applications for management and decision-making. This study provides a reference for researchers in the field of soil water fraction numerical simulation in arid and semi-arid regions.

[Key words] arid and semi-arid regions; soil moisture; HYDRUS model; numerical simulation

1 引言

干旱半干旱地区土壤水分成为限制生态系统生产力第一因素。准确预测干旱半干旱区域土壤水分的动态变化对防治土壤盐渍化非常重要。传统田间观测方法耗时费力且难以捕捉大范围的空间异质性。而数值模拟通过求解描述水流、溶质运移及热传递的物理方程能够预测土壤水分的时空演变过程。HYDRUS模型因良好模拟能力成为干旱半干旱地区土壤水文研究的重要工具。本文旨在基于近年来的研究成果分析HYDRUS模型在干旱半干旱地区土壤水分及相关领域的应用现状。同时分析其面临的挑战并展望未来发展方向以期对相关研究与实践提供参考。

2 HYDRUS模型概述

HYDRUS系列模型是基于Windows环境的一维、二维及三维变饱和孔隙介质中水分、热量及溶质运移的模拟软件,其核心是数值求解Richards方程和对流-弥散方程。

2.1 控制方程

HYDRUS模型主要控制方程包括Richards方程、对流-弥散方程(CDE)和热传导方程。

(1)Richards方程。Richards方程由美国土壤物理学家Lorenz A. Richards于1931年首次提出,用于模拟变饱和条件下土壤水分的运移,其方程式如式2.1。

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[D(\theta) \frac{\partial \theta}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} \left[K(\theta) \frac{\partial h}{\partial z} \right] - S(h) \quad (2.1)$$

其中:

θ 为体积含水量;

h 为压力水头;

$K(\theta)$ 为非饱和导水率;

$D(\theta)$ 为土壤水分扩散系数;

$S(h)$ 为根系吸水项(汇项)。

该方程通过有限元法进行数值求解,能够处理一维、二维和三维的复杂水流问题。

(2) 对流-弥散方程(CDE)。对流-弥散方程(CDE)由D. L. Nislen与J. W. Biggar于20世纪60年代初系统建立。其用于描述溶质在土壤中的运移,其方程式如式2.2。

$$\frac{\partial(\theta C)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left[\theta D \frac{\partial C}{\partial z} \right] - \frac{\partial}{\partial z} (qC) + \sum Ri \quad (2.2)$$

其中:

C 为溶质浓度;

q 为体积通量;

D 为弥散系数;

Ri 表示各种源汇项,如降解、吸附、生成等反应过程。

HYDRUS支持多种溶质反应类型,包括线性/非线性吸附、平衡/非平衡反应、一级衰变与生成反应等,最多可模拟15种耦合溶质的连锁迁移过程。

(3) 热传导方程。热传导方程是由法国物理学家Joseph Fourier于1822年在《热的解析理论》中提出。其用于模拟土壤中热量的传输,其方程式如式2.3。

$$\frac{\partial(\rho_w c_w T)}{\partial t} = \nabla \cdot (\lambda \nabla T) + \rho_w c_w q \cdot \nabla T \quad (2.3)$$

其中:

T 为温度;

$\rho_w c_w$ 为土壤体积热容;

λ 为热导率;

$\rho_w c_w$ 为水的体积热容;

q 为水流速度。

该方程能够模拟土壤温度的日变化、季节性波动及其对水分运动和溶质扩散的影响,常用于研究冻融过程、地热系统或灌溉水温效应。

2.2 初始条件与边界条件

初始条件通常指定为剖面均匀分布。边界条件包括定压力/水头、定通量、大气边界、自由排水等。在干旱半干旱区的研究中,张薇^[1] (2024) 和闫朋刚等人^[2] (2026) 研究表明大气边界条件常用于模拟降水入渗和土壤蒸发。蔡明豪^[3] (2025) 和张智翔^[4] (2025) 则认为变压力水头或渗流边界则常用于模拟灌溉或

地下水位变化的影响。

2.3 根系吸水模型

HYDRUS常采用Lorenz A. Richards等提出的经验模型,将根系吸水作为土壤水势的应力响应函数纳入源汇项S中。该模型定义了不同土壤水势阈值下的根系吸水速率。许多研究通过调整这些阈值来适应干旱区棉花、玉米和枣树等特定作物的耐旱特性。刘晨旭^[5] (2024) 利用经验模型通过调整阈值探究北疆干播湿出膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律。李云峰^[6] (2024) 通过调整阈值来研究北疆干播湿出膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律。满旭伦^[7] (2024) 通过调整阈值来探究覆盖方式对旱地春玉米根系发育与水分利用效率的影响机制。刘昊^[8] (2025) 通过调整阈值来探究灌溉定额对盐碱地玉米农田土壤水盐运移的影响。马尧^[9] (2025) 通过调整阈值来分析宁夏干旱沙区枣草间作系统土壤与水分特征。

2.4 水盐胁迫响应函数

在干旱半干旱灌溉农业区,盐分胁迫与水分胁迫往往同时存在,给作物生长带来复合影响。为精准模拟盐分对作物吸水过程的作用机制,相关研究中常引入相乘或相加形式的水盐胁迫响应函数^[10]。

这类函数的实用性已得到实践验证:在微咸水灌溉模拟、盐碱地改良效果分析等具体研究场景中,研究者通过对函数参数进行系统率定与验证,让模型能够真实反映水盐耦合胁迫条件下作物的实际响应情况,为相关农业生产与土壤改良工作提供了可靠的技术支撑。

3 HYDRUS模型的应用

3.1 土壤水分模拟

HYDRUS在干旱半干旱区土壤水分动态模拟方面应用最为广泛,涵盖不同土地利用类型和治理措施。

(1) 自然与修复生态系统领域。有研究借助HYDRUS-1D,模拟了半干旱区黄土丘陵区不同降水条件下草地的土壤水分特征;也有研究针对干旱区鱼鳞坑、水平阶等整地措施,分析其对黄土区人工林土壤水分的调节作用。在沙区相关研究中,既包括宁夏河东沙地固定沙丘的土壤水分动态模拟,也涉及凹凸棒土添加对风沙土水分运移的改良效果探究。

(2) 农田灌溉与管理方面,该模型被大量用于灌溉制度优化。例如,针对宁夏和内蒙古的盐碱地玉米田,研究了不同灌溉定额下的水盐运移规律;对比分析了不同灌溉方式对土壤水盐状况及燕麦生长的影响;同时,针对西北广泛应用的覆膜技术,模拟了其对于土壤水热状况及作物水分利用效率的作用机制。

(3) 关于特殊条件与过程模拟。相关研究揭示了降雨入渗对深层包气带的补给动力过程;在冻土区,基于HYDRUS模型模拟了黄河源区多年冻土热状态的长期演变规律。

3.2 污染物模拟

HYDRUS不仅能模拟水分,还能模拟溶质包括盐分、养分、污染物的运移,拓展了其在环境领域的应用。

(1)关于盐分运移与调控的研究。已有研究利用该模型模拟了干旱地区微咸水与高盐矿井水灌溉条件下的土壤水盐运移规律;针对干旱半干旱地区灌区,开展了竖井排水条件下的水盐运移相关研究;并探讨了浅埋暗管等工程措施对农田水盐调控效果及脱盐过程的影响。

(2)关于有机与化学污染物迁移研究。相关研究将HYDRUS应用于煤炭开采项目区的土壤石油烃污染的预测分析;通过耦合HYDRUS与MODFLOW模型,模拟了苯类污染物在包气带及含水层中的迁移转化过程;还对葵花田中药剂迁移规律进行模拟,为农业面源污染评价提供依据。

3.3模型应用挑战与改进方向

尽管应用广泛, HYDRUS模型在干旱半干旱区的应用仍面临以下挑战。

(1)参数获取与尺度效应研究。模型所需的土壤水力参数如水分特征曲线、导水率函数具有高度的空间变异性,在缺乏实测数据的地区,依赖土壤转换函数(PTFs)估算会引入不确定性。如何高效、低成本地获取区域尺度高精度参数是一大难题。

(2)过程耦合的复杂性研究。实际生态水文过程是水、热、盐、碳、氮及生物过程的紧密耦合。虽在水分-盐分-作物生长耦合方面取得进展,但将土壤-植物-大气连续体(SPAC)全部过程,尤其是生物与地球化学过程完全整合到模型中,仍面临理论与计算上的困难。

(3)对极端条件和人类活动的响应研究。模型在模拟干旱半干旱区常见的极端干湿循环、土壤裂隙、生物结皮效应以及强烈的人类活动如不同灌溉方式、土地覆盖剧变方面的机制尚需完善。

4 HYDRUS模型应用的挑战与未来方向

4.1当前局限性

综合文献来看,当前研究的局限性主要体现在以下三点。

(1)数据驱动不足。研究受限于观测数据尤其是长期、连续的剖面数据的稀缺,模型率定和验证不够充分,影响了模拟结果的可靠性和外推能力。

(2)模拟场景相对理想化。大量研究基于均匀土柱或剖面的一维模拟,对田间尺度存在的空间异质性如根系分布、土壤质地的空间变异以及二维、三维水流如滴灌点源入渗的刻画仍显不足。

(3)模型间耦合与交互薄弱。HYDRUS与遥感模型、流域水文模型或气候模型的耦合应用仍处于探索阶段。现阶段的研究限制了其从点位模拟向区域尺度推广的能力。

4.2前沿发展

为应对上述挑战,未来研究可能呈现以下趋势:

(1)多源数据同化与参数反演。融合地面传感器网络、遥感反演土壤水分产品如SMAP、Sentinel-1等多源数据,通过数据同化技术动态优化模型参数和状态变量,是提高区域模拟精度的重要途径。机器学习方法可用于开发更适用于本地条件的PTFs

或直接构建数据驱动的模拟模型。

(2)多过程与多尺度集成建模。发展更完善的、耦合水-热-盐-碳-氮-生态过程的集成模型是深化机理认识的必然方向。加强HYDRUS与区域水文模型、大气模型或作物生长模型的耦合以实现从土壤剖面到流域乃至区域尺度的跨尺度模拟与预报。

(3)面向管理与决策的智能应用。将充分验证的HYDRUS模型与优化算法如遗传算法相结合。开发智能决策支持系统用于实时优化灌溉调度。评估不同气候情景下的土壤水资源承载力或设计最佳的盐碱地改良工程方案,从而直接将模拟研究成果转化为生产力。

5 结语

HYDRUS模型是一款机理相对成熟的土壤水盐运移模拟工具。其在干旱半干旱地区的科学研究发挥了不可替代的作用。从黄土高原到西北戈壁,从农田到生态修复区,大量的实证研究不仅验证了模型的适用性,也针对本地特色问题推动了模型的发展。然而,面对复杂真实的自然-社会复合系统,未来的研究需超越单一的水分或盐分模拟,迈向更深度的多过程耦合、更智能的数据融合。

[参考文献]

[1]张薇.科尔沁沙丘-草甸生态系统降水下渗与蒸散发过程耦合模拟[D].内蒙古农业大学,2024.

[2]闫朋刚,焦峰,徐婷.黄土丘陵区草地不同降水条件下土壤水分特征及其入渗数值模拟[J/OL].中国水土保持科学(中英文),1-14[2026-02-25].

[3]蔡明豪.灌区竖井排水条件下农田水盐调控效应及数值模拟研究[D].西安理工大学,2025.

[4]张智翔.宁夏银北明灌暗排区土壤水盐运移及模型模拟研究[D].宁夏大学,2025.

[5]刘晨旭.北疆干播湿出膜下滴灌棉田土壤水盐运移规律研究[D].新疆农业大学,2024.

[6]李云峰.膜下滴灌棉田土壤水热盐运移与作物生长耦合模拟研究[D].中国农业科学院,2024.

[7]满旭伦.覆盖方式对旱地春玉米根系发育与水分利用效率的影响机制[D].中国农业科学院,2024.

[8]刘昊.灌溉定额对盐碱地玉米农田土壤水盐运移的影响与灌溉制度优化[D].宁夏大学,2025.

[9]马尧.宁夏干旱沙区枣草间作系统土壤与水分特征及生产力调控策略[D].宁夏大学,2025.

[10]闫妍.河套灌区耕地与盐荒地水盐氮运移规律及数值模拟[D].内蒙古农业大学,2025.

作者简介:

房文亚(1998--),女,满族,内蒙古赤峰市人,硕士研究生,单位:内蒙古师范大学地理科学学院,研究方向:水文水资源、土壤水分数值模拟。