

HYDRUS及其耦合模型研究与应用进展

王涛涛, 张 蓓, 陈慧华, 惠建伟, 郝 龙, 陈 亮

Progress in developments and applications of the HYDRUS model and associated coupling model packages

WANG Taotao, ZHANG Bei, CHEN Huihua, HUI Jianwei, HAO Long, and CHEN Liang

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403006>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

膨胀土边坡非饱和渗流及渐进性破坏耦合分析

A coupling analysis of unsaturated seepage and progressive failure of an expansive soil slope

陈亮胜, 韦秉旭, 廖欢, 张寒冰 水文地质工程地质. 2020, 47(4): 132-140

包气带岩性结构对地下水生态功能影响特征

Influences of lithology and structure of the vadose zone on groundwater ecological function

崔浩浩, 张光辉, 刘鹏飞, 王金哲, 田言亮, 王茜 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 52-62

水位波动下包气带透镜体影响LNAPL迁移的数值模拟研究

A numerical simulation study of the effect of the vadose zone with lenses on LNAPL migration under the fluctuating water table

潘明浩, 时健, 左锐, 赵晓, 刘嘉蔚, 薛镇坤, 王金生, 胡立堂 水文地质工程地质. 2022, 49(1): 154-163

桩埋管参数对渗流下能量桩热-力耦合特性的影响

Effects of the pile buried pipe parameters on the thermal-mechanical coupling characteristics of energy pile under the groundwater seepage

杨卫波, 张来军, 汪峰 水文地质工程地质. 2022, 49(5): 176-185

高放废物深地质处置地下水流数值模拟方法研究进展

Advances in groundwater numerical simulation in deep geological disposal of high-level radioactive waste

李露露, 周志超, 邵景力, 崔亚莉, 赵敬波 水文地质工程地质. 2021, 48(6): 13-23

层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究

A comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure

高靖勋, 冯洪川, 祝晓彬, 吴吉春, 吴剑锋, 卫云波, 王水 水文地质工程地质. 2022, 49(2): 24-32



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

DOI: 10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.202403006

王涛涛, 张蓓, 陈慧华, 等. HYDRUS 及其耦合模型研究与应用进展 [J]. 水文地质工程地质, 2025, 52(2): 72-84.
WANG Taotao, ZHANG Bei, CHEN Huihua, et al. Progress in developments and applications of the HYDRUS model and associated coupling model packages[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2025, 52(2): 72-84.

HYDRUS 及其耦合模型研究与应用进展

王涛涛^{1,2}, 张 蓓³, 陈慧华⁴, 惠建伟⁵, 郝 龙⁵, 陈 亮^{1,2}

(1. 天津大学水利工程智能建设与运维全国重点实验室, 天津 300350; 2. 天津大学建筑工程学院, 天津 300350; 3. 西北农林科技大学风景园林艺术学院, 陕西 杨凌 712100; 4. 金华华创环保工程有限公司, 浙江 金华 321017; 5. 中铁二十局集团第六工程有限公司, 陕西 西安 710032)

摘要: HYDRUS 模型由于可以综合考虑土壤-植物-大气系统中水、热及污染物的运移, 已被广泛应用于农业灌溉和污染运移的模拟, 但已有关于 HYDRUS 模型的综述尚缺乏对植物根系影响下水分和溶质运移模拟以及对低影响开发 (low impact development, LID) 设施模拟的总结。文章系统综述了植物根系影响下 HYDRUS 模型对水、盐和氮、重金属及有机物等污染物运移的模拟以及对 LID 设施的模拟, 并分析了影响模拟精度的因素。结果表明, HYDRUS 模型可以很好地模拟植物根系影响下水分和盐分以及污染物等溶质的运移, 但模拟精度受到植物根系、土壤及其物理化学生物特征等多种因素的影响。同时, 由于模型相关参数可以通过历史文献、实验测量、模型预测和参数反演等不同方式确定, 模拟效果也有一定差异。未来, 应重点考虑以下几方面的研究: (1) HYDRUS 模型对植物根系效应的模拟应重点考虑植物不同生长年限、不同植物根系类型以及不同根长、根直径、根体积和根密度等根系特征; (2) HYDRUS 模型对新污染物运移的模拟需要进一步积累大量新污染物运移参数, 包括扩散、吸附和降解等; (3) HYDRUS 模型对包气带介质的非均质性需要进一步详细刻画及模拟; (4) HYDRUS 模型对参数的获取及确定需要结合机器学习和人工智能手段进一步加强; (5) HYDRUS 耦合模型仍需进一步开发及应用, 以实现渗流过程中地表水-土壤水-饱和地下水的全过程模拟。

关键词: 渗流; 植物; 包气带; HYDRUS 模型; 新污染物

中图分类号: P641.8

文献标志码: A

文章编号: 1000-3665(2025)02-0072-13

Progress in developments and applications of the HYDRUS model and associated coupling model packages

WANG Taotao^{1,2}, ZHANG Bei³, CHEN Huihua⁴, HUI Jianwei⁵, HAO Long⁵, CHEN Liang^{1,2}

(1. State Key Laboratory of Hydraulic Engineering Intelligent Construction and Operation, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 2. School of Civil Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China; 3. College of Landscape Architecture and Art, Northwest A & F University, Yangling, Shaanxi 712100, China; 4. Jinhua Huachuang Environmental Protection Engineering Co. Ltd., Jinhua, Zhejiang 321017, China; 5. China Railway 20th Bureau Group Sixth Engineering Co. Ltd., Xi'an, Shaanxi 710032, China)

Abstract: HYDRUS model is widely used in agricultural irrigation and pollution transport because it can comprehensively consider the movement of water, heat, and pollutants in the soil-plant-atmosphere system.

收稿日期: 2024-03-04; 修订日期: 2024-05-17

投稿网址: www.swd zgcdz.com

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (42277046)

第一作者: 王涛涛 (2000—), 男, 硕士研究生, 主要从事渗流过程水量水质变化相关研究。E-mail: w23231759@163.com

通讯作者: 陈亮 (1985—), 男, 博士, 副教授, 主要从事渗流过程水量水质变化及污染物治理新技术研究。E-mail: liangchen@tju.edu.cn

However, there is no summary of water and solute transport simulations under the influence of plant roots and the simulation of Low Impact Development (LID) facilities. This paper systematically summarized the simulation of water, salt, nitrogen, heavy metals and organic substances under the influence of plant roots and the simulation of LID facilities, and analyzed the simulation accuracy. The results show that HYDRUS can well simulate the movement of water, salts, and pollutants under the influence of plant roots, but the simulation accuracy is affected by many factors such as plant roots, soil and its physical, and chemical and biological characteristics. Additionally, since the relevant model parameters can be determined by historical documents, experimental measurements, and model prediction and inversion, the simulation results are also different. Future research should focus on the following aspects: (1) Considering the effects of different planting years, different root types, and different root characteristics such as root length, root diameter, root volume, and root density in the simulation of plant root effect by HYDRUS. (2) Accumulating more transport parameters for new pollutants, including diffusion, adsorption, and degradation, to improve the simulation of pollutant transport. (3) Enhancing the description and simulation of the heterogeneity of unsaturated zone media. (4) Strengthening the acquisition and determination of parameters through the integration of Machine Learning and Artificial Intelligence. (5) Further developing and applying HYDRUS coupling models to enable comprehensive simulations of the entire process of surface water, soil water, and saturated groundwater during seepage.

Keywords: seepage; plant; aerated zone; HYDRUS; new pollutants

近年来,随着洪涝以及城市、农业面源污染问题日益受到广泛关注和重视,水以及盐、氮、重金属和有机污染物等溶质在土壤和地下水中的运移问题已然成为国内外学者关注和研究的热点与难点^[1-2]。在降雨、灌溉等过程中,水分及溶质等会随着地表径流入渗并向下运移进入土壤,同时受到地表径流、土壤、植物等多种因素影响。因此,为了更准确地研究水分和溶质在土壤中的运移,基于物理模拟试验或者野外观测数据建立准确的数值模拟模型至关重要。目前,国内外已有较多模拟土壤中水分和溶质运移的数值模型,如 SWAT^[3]、SWAP^[4]、HYDRUS^[5]等。其中, HYDRUS 模型由于可以综合考虑土壤-植物-大气系统中的水、热和溶质运移以及根系吸水等关键过程且模拟效果较好被广泛研究和应用。

HYDRUS 模型包括 HYDRUS-1D、2D 和 3D 三个版本,主要基于水量平衡方程和对流-弥散方程实现对非饱和区水分以及溶质的运移,具体原理如图 1 所示。HYDRUS-1D 由美国农业部国家盐土实验室研发,用于模拟水、热和溶质在非饱和区中一维垂向的运移^[6],具有丰富的土壤介质水力参数数据库和植物根系作用数据库以及灵活的边界条件和输入输出功能^[7]。与 HYDRUS-1D 相比,1999 年 Simunek 等开发的 HYDRUS-2D 以及之后发展的 HYDRUS-3D,可以用有限元法基于偏微分方程的数值解模拟二维或三维轴对称流动,使得 HYDRUS 模型可以适用于更多情景^[8-9]。

本文基于 CNKI 和 Web of Science 数据库,以“HYDRUS”为关键词检索统计相关研究文献,总结了 HYDRUS 模型研究历程,如图 2 所示。现有综述多关注于农业灌溉、盐分淋洗和模型耦合等方面的应用,缺乏 HYDRUS 模型对植物根系影响下水分和溶质运移模拟以及对低影响开发(low impact development, LID)设施模拟的总结分析。因此,本文较为全面地综述了植物根系影响下 HYDRUS 模型在水、盐以及氮、重金属和有机物等污染物运移模拟和 LID 设施模拟等方面的研究与应用进展,并分析总结了影响 HYDRUS 模型模拟精度的因素。

1 HYDRUS 及其耦合模型应用

1.1 植物影响下土壤水分模拟

HYDRUS 模型能够模拟包括降雨过程中植物蒸腾、地表蒸散发以及土壤水下渗在内的土壤水分平衡过程,在水土保持、生态修复等领域有广泛应用^[10]。土壤水是土壤水量平衡和水循环的重要环节,与植被存在密切的相互作用。土壤水分一方面影响着作物的生长和分布,一方面又受到植物和土地利用等因素的影响,并受到气候、地形等多种因子的影响^[11]。表 1 比较了种植草本植物和木本植物条件下 HYDRUS 模型对土壤水分运移的模拟。

可以看出, HYDRUS 模型可以很好地模拟植物根系影响下土壤水分的运移,模拟效果受到参数的获取

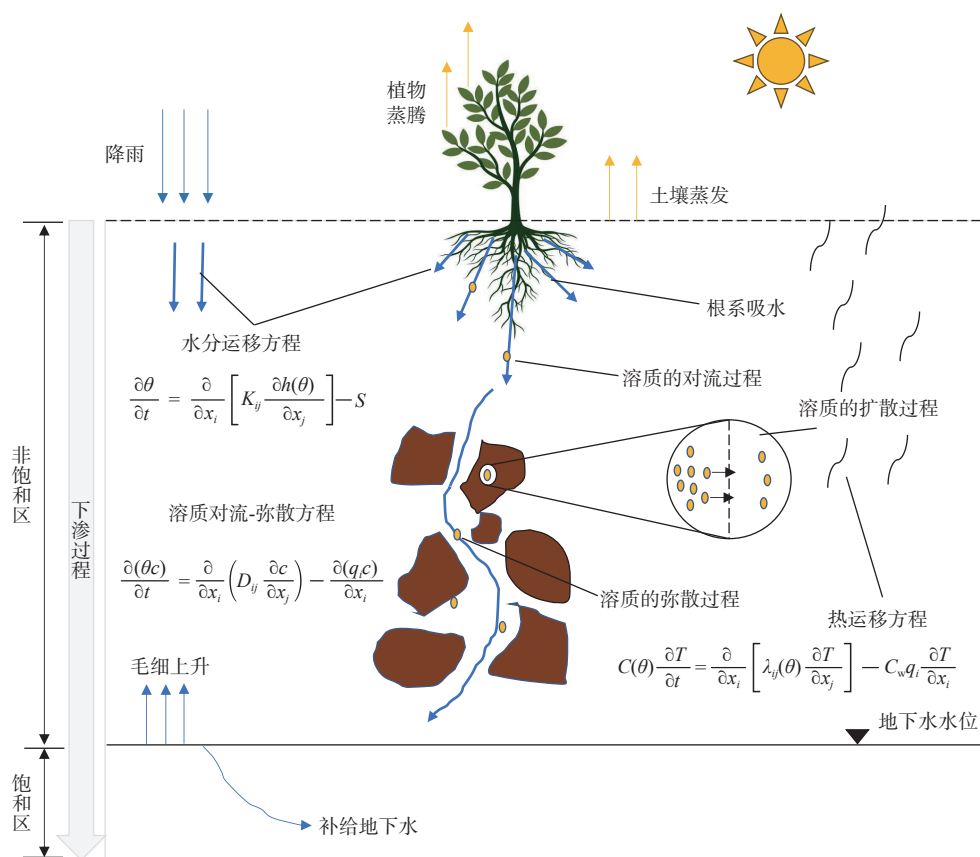


图 1 HYDRUS 模型模拟原理

Fig. 1 Simulation principle of HYDRUS model

注: θ 为体积含水量/($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$); S 为根系吸水项, 通过 Feddes 模型计算; c 为溶质液态质量浓度/($\text{g} \cdot \text{L}^{-1}$); q_i 为水流量/($\text{cm} \cdot \text{h}^{-1}$); D_{ij} 为弥散系数/($\text{cm}^2 \cdot \text{h}^{-1}$); T 为温度/K; $\lambda_{ij}(\theta)$ 为土壤的表观导热系数/($\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$); $C(\theta)$ 和 C_w 分别为多孔介质和液相的体积热容/($\text{J} \cdot \text{m}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$)。

和确定方式的影响。在水分模拟中, HYDRUS 模型中的神经网络预测模块可以基于土壤粒径及容重等数据确定土壤水力参数, 但此方法得到的参数取值误差较大^[10]。因此, 水力参数的确定大多为基于实测数据再经过反演率定所得。虽然 HYDRUS 模型水分模拟结果与实测值吻合度较高, 但仍存在一些不足。

首先, 在利用 HYDRUS 模型模拟土壤水分时, 未系统考虑植物根系及其相关影响因素。一方面, 以往的模拟研究通常采用裸土的土壤水分特征曲线代替根系土, 忽略了根系效应^[17]。鲁建荣等^[12]研究发现茵陈蒿(草本植物)在根系效应下, 土壤含水量增大, 饱和导水率在 0~20 cm 和 20~60 cm 深度分别增加 254% 和 61%, 模型观测值与拟合值的相关系数由不考虑根系效应下的 0.83 提高至 0.85, 土壤含水量的实测值与模拟值的均方根误差分别减少 61% 和 83%, 根系效应的存在提高了模型模拟精度; Yuge 等^[18]考虑根系效应下发现西蓝花根区土壤储水量增加, 进而增加蒸散发量, 进一步验证了需考虑根系效应重新率定参数结果

的必要性。另一方面, 根系密度、土壤蒸发和土壤质地等条件影响下根系吸水速率会随土壤含水率变化而变化。比如, 土壤浅层含水率受到土壤蒸散发等的影响变化剧烈, 而深层土壤含水率则较稳定, 根系吸水速率也随之发生变化, 这使得表层的模拟精度较深层有所偏低(均方根误差表层为 $0.0348 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$, 深层为 $0.0053 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$)^[19]。因此, 明确根系的影响并优化模型参数是下一步的研究重点。

其次, 即使部分研究已经在模拟土壤水分时考虑了植物根系的影响, 但是在 HYDRUS 模型中植物根系多采用静态数据刻画。对于草本植物, 由于其根系较浅且根系发育程度好, 利用静态数据可以较好地模拟土壤水分^[20]。但是, 对于木本植物, 由于其根系较长且根系分布不均匀, 仅通过某一时刻的静态数据刻画木本植物根系不足以反映较长时间尺度内木本植物根系对土壤水分的影响^[21]。因此, 对于木本植物根系影响下土壤水分模拟, HYDRUS 模型只可用于短期土

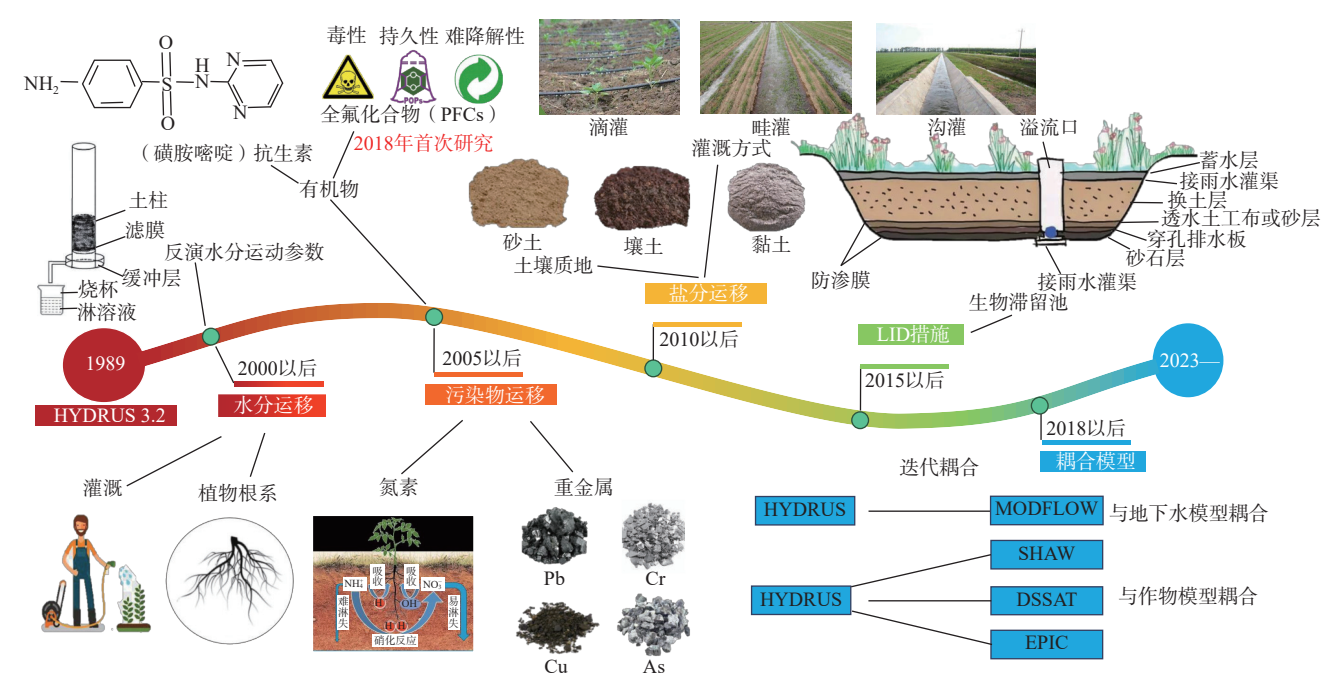


图 2 HYDRUS 模型研究历程

Fig. 2 Research course of HYDRUS model

表 1 基于 HYDRUS 模型的不同植被类型影响下土壤水分运移模拟研究

Table 1 Simulations on the soil water transport under the influences of different plant types based on HYDRUS					
植被		研究内容	参数确定	模拟效果	参考文献
草本植物	茵陈蒿	利用HYDRUS-1D分析根系效应在不同水文条件下对湿地水分垂向通量的影响	历史文献+试验测定+反演率定	$RMSE$: 0.017 ~ 0.120 cm ³ /cm ³ R^2 : 0.87 ~ 0.91	[12]
	狼尾草、紫花苜蓿	利用HYDRUS-1D模拟不同水文年气候特征下的蒸发和蒸腾过程	试验测定+人工调试+反演率定	R^2 : 0.67 ~ 0.80 R^2 : 0.72 ~ 0.74	[13]
	小麦	利用HYDRUS-1D模拟研究影响水分运移的驱动因素	试验测定+模型预测	$RMSE$: 0.005 3 ~ 0.034 8 cm ³ /cm ³ NSE : 0.782 ~ 0.897	[14]
木本植物	苹果	利用HYDRUS-1D模拟苹果园深度10 m剖面土壤水分的垂直分布和时间变化	试验测定+反演率定	$RMSE$: 0.01 ~ 0.02 cm ³ /cm ³ R^2 : 0.65 ~ 0.85 NSE : 0.55 ~ 0.83	[15]
	毛白杨	利用HYDRUS-2D/3D模拟毛白杨人工林地土壤水分短期运移规律的精度和可行性	试验测定+模型预测+反演率定	$RMSE$: 0.017 ~ 0.023 cm ³ /cm ³ R^2 : 0.85 ~ 0.99	[16]

注: RMSE 为均方根误差; R² 为决定系数; NSE 为纳什效率系数。

壤水分动态的模拟研究,对于长时间序列的水分模拟,需在建立动态根系吸水模型的同时对土壤水分变化进行长期监测,以保证模拟精度^[22]。

1.2 包气带污染物运移模拟

包气带作为地球关键带的重要组成部分,不仅是大气圈、水圈、岩石圈等相互作用的联系纽带,也为土-气界面间质能交换、土壤水热传输以及植物根系吸水等水分与能量交换活动提供了场所^[23]。灌溉水、降水通过包气带入渗补给地下水的过程是水文循环和地下水污染过程中至关重要的环节之一,由单相到多相的数值模拟技术是研究包气带中水分和污染物运移的重要手段^[24]。因此,研究污染物在包气带中的运移对地下水污染控制有着重要意义。由于污染物

在包气带中的运移受到土壤介质、土壤水分、植物等众多因素的影响,所以 HYDRUS 模型多与野外试验结合来模拟污染物(如氮、重金属和有机物等)在包气带中的运移,表 2 列举了 HYDRUS 模型对包气带不同污染物运移的模拟。

可以看出, HYDRUS 模型在污染物模拟过程中参数的确定主要是基于试验数据或历史文献进行反演所得。此过程需要确定的参数有土壤容重、弥散度、扩散系数等,此外还有不同污染物运移过程中的关键参数,比如氮运移模拟过程中的吸附分配系数、氮扩散系数、氮硝化和反硝化系数,重金属运移中的吸附等温系数和有机物运移中的降解转化反应速率等。污染物的运移涉及参数众多,参数的获取亦会影响模

表 2 基于 HYDRUS 模型的包气带不同污染物运移模拟研究

Table 2 Simulations on the migration of the different pollutants in vadose zone based on HYDRUS

污染物	研究内容	参数确定	模拟效果	参考文献
氮	氨氮 利用HYDRUS-1D模拟 NH_4^+ 在壤土中的运移	试验测定+模型反演	$RMSE: 0.020 \sim 0.034 \text{ mg/L}$ $R^2: 0.87 \sim 0.98$	[25]
	硝氮 利用HYDRUS-1D模拟农业区非饱和带的含水量和 NO_3^- 分布	历史文献+模型反演	$RMSE: 0.005 \sim 9 \text{ mg/cm}^3$ $MAE: 0.003 \sim 2 \text{ mg/cm}^3$	[26]
重金属	Cr 利用HYDRUS-1D模拟 Cr^{6+} 浓度、流速及pH对 Cr^{6+} 在土壤中运移的影响	试验测定+反演率定	$R^2: 0.978 \sim 0.998$	[27]
有机物	全氟化合物(PFCs) 利用HYDRUS-1D模拟PFCs在土壤中的运移	试验测定+模型反演	$RMSE: 0.069 \sim 0.113 \text{ mg/L}$ $R^2: 0.967 \sim 0.991$	[28]

注: MAE为平均绝对误差。

拟的效果。研究表明,通过柱实验得到的锌在土壤中的吸附系数模拟效果要好于批量吸附实验得到的系数^[29]。目前, HYDRUS 模型对于污染物的运移模拟效果较好,但由于包气带结构复杂,影响因素众多。因此,模型模拟也存在一些不足。

首先,包气带介质存在非均质性,而大多数研究只是简单的处理为均质结构。研究发现,非均质性土壤中“上粗下细”型的水分运移速率(1.86 cm/d)较“上细下粗”型(0.77 cm/d)增大^[30]。非均质性土壤影响土壤水分运动和溶质运移过程,其中粗质土壤保留的水分明显少于细质土壤,并促进溶质向下淋洗浸出,细质土层如黏土层对水分和溶质运移具有阻滞作用,容易产生溶质聚集区。王士军等^[31]研究不同土壤质地地下 NO_3^- -N含量变化,发现壤土层为0~85.8 mg/kg,而黏土层为6.3~390.4 mg/kg。因此,如何刻画包气带中非均质性土壤结构对HYDRUS模型模拟污染物运移精度的影响是主要问题。

其次,不同污染物在包气带中的运移过程影响因素众多。氮的运移主要受到水分运动、初始氮浓度以及土壤质地的影响^[32];重金属的运移主要受对流、水动力弥散、吸附解吸和氧化还原等多种复杂作用的影响^[33];有机物主要受温度、土壤颗粒吸附以及微生物降解过程等的影响^[34]。因此,在模拟过程中对不同污染物的影响因素进行敏感性分析是关键。王珍等^[35]利用全局敏感性分析方法分析了滴灌条件下砂壤土土壤水力参数对水分渗漏率和 NO_3^- -N淋失率的影响,结果表明弱变异砂壤土条件下土壤初始含水率(θ_0)、土壤饱和含水率(θ_s)和土壤饱和导水率(K_s)全局敏感性指数分别为0.90、0.72、0.42,污染物浓度(C_0)敏感性指数为0.27。此外,不同污染物在不同水文地质条件下的削减速率也不一样,受到各种因素的影响。杨洋等^[36]基于HYDRUS-1D模拟填埋场渗滤液中不同条件下氨氮削减速率,结果表明当氨氮浓度设置为3 620, 7 420, 14 480 mg/L时,地下水水位处氨氮质量浓度分别

为166.8, 333.5, 667.0 mg/L。另外,对于抗生素等新型有机污染物,在模型模拟过程中容易忽略其降解转化过程。张惠等^[37]利用HYDRUS-1D模拟磺胺嘧啶在土壤中的运移过程,发现当铁含量为1.3, 2.1, 3.5 mg/g时,反演所得吸附分配系数分别为0.138, 0.140, 0.234,但并未考虑抗生素的降解转化过程。而且, HYDRUS 模型只能模拟污染物在包气带中的运移转化,对于流域大尺度上的污染物模拟需耦合其他地下水模型。

1.3 水盐运移模拟

水分和盐分是影响作物生长的两个关键因素,盐分运移过程与水分密切相关,揭示土壤水盐运移机制对研究作物利用土壤水分过程具有重要意义。土壤水盐运移研究主要有田间观测法和模型模拟法,但田间观测受多种条件制约,因此国内外学者针对不同的影响因素建立了不同条件下的水盐运移模型,以此来模拟土壤中水分和盐分的运移过程,进而明确不同情境中土壤水盐运移的影响因素及动态变化规律,最终实现预测功能^[38]。HYDRUS 模型可以定量描述水盐运移的过程,在模拟土壤质地和灌溉方式等条件下水盐运移效果较好,见表3。

盐分运移中通常伴随着水分运移的过程,需要确定的参数包含水力参数和溶质参数,由表3可以看出,水盐运移参数主要是根据试验数据或者历史文献进行反演确定,还有的研究直接采用实测数据与模型数据库进行拟合确定。同一维度下,用HYDRUS模型反演得到的参数进行模拟的效果好于直接用实测数据计算得到的参数进行模拟的效果,均方根误差分别为0.014~0.022 g/kg^[45]和0.017 8~0.0320 dS/m^[46]。

尽管模拟效果有所差距,但现有研究表明HYDRUS模型可以很好地模拟水盐运移过程。HYDRUS模型在模拟研究不同土壤质地与不同灌溉方式下土壤水盐运移中得到广泛应用,并且能从三维角度更为直观地反映水盐运移动态过程,但由于田间尺度土壤空间变异性强、模型边界条件复杂,从而多采用室内土柱

表 3 基于 HYDRUS 的不同土壤质地和灌溉方式土壤水盐运移模拟研究

Table 3 Simulations on the soil water and salt transport under different soil textures and irrigation methods based on HYDRUS				
类型	研究内容	参数确定	模拟效果	参考文献
土壤质地	黏土 利用HYDRUS-1D模拟微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水分和盐分运移规律	历史文献+反演率定	RMSE: 0.008 ~ 0.023 dS/m	[39]
	砂土 利用HYDRUS-1D研究砂土对水盐运移影响	历史文献	—	[40]
	夹砂层 利用HYDRUS-1D模拟不同夹砂层分布下的玉米农田蒸散发、土壤水分深层渗漏与地下水补给、玉米根系吸水等过程	试验测定	R ² : 0.89 ~ 0.94	[41]
			NSE: 0.85 ~ 0.94 RMSE: 0.06 ~ 0.10 cm ³ /cm ³	
灌溉方式	滴灌 利用HYDRUS-2D模拟盐碱地农田土壤盐分运移	试验测定+模型预测	RMSE: 0.39 ~ 1.26 g/kg NSE: 0.66 ~ 0.97	[42]
	畦灌 利用HYDRUS-3D模拟畦灌模式下盐随水动的驱动过程	试验测定+模型预测	RMSE: 0.176 ~ 0.231 mg/cm ³	[43]
	沟灌 利用HYDRUS-3D模拟一个灌水周期内田间土壤水盐运移	试验测定+模型预测	RMSE: 0.166 ~ 0.272 mg/cm ³	[44]

模拟方法替代田间研究^[38];而且,不同土壤质地对水盐运移过程中模型参数的影响不同。例如,夹砂层根系吸水量比不含夹砂层的要少 11%^[41];由夹砂层进入砂土层,土壤入渗率会变为常数^[47]。因此,在模型模拟过程中需确定土壤含水率、根系吸水量等相关参数。而且,虽然大多数模拟研究考虑土壤水势、基质势对水盐运移的作用,但缺少对温度势的定性量化描述^[48],HYDRUS 模型未来应该考虑不同条件下水土之间相互作用以及热性质,综合分析土壤水热-水盐耦合作用下的水盐运移,从而提高模拟精度。

1.4 LID 设施运行效果模拟

HYDRUS 模型不仅在农田土壤水、盐、热以及氮

等养分运移方面得到了大量应用,还在 LID 设施和海绵城市建设等城市雨洪管理中被重点研究和应用。为了应对城市化迅速发展带来的水量水质问题,LID 设施作为径流源头削减措施开始被广泛研究和应用,为保证不同 LID 设施的设计、施工及运维效果,针对不同 LID 设施的数值模拟模型应运而生,如 SWMM^[49]、DRAINMOD^[50]、RECARGA^[51]、HYDRUS^[52]等。其中, HYDRUS 模型可被用于生物滞留设施^[53]、透水铺装^[54]、雨水花园^[55]以及绿色屋顶^[56]等不同 LID 设施中水量以及氮磷^[57]、重金属^[58]等污染物的模拟,具有实用性强、模拟精度高、可以实现水量、水质同步模拟等优点,具体如表 4 所示。

表 4 基于 HYDRUS 模型不同 LID 措施下雨水径流及其污染物迁移模拟研究

Table 4 Simulations on the rainwater runoff and pollutant migration under different LID measures based on HYDRUS				
LID措施	研究内容	参数确定	模拟效果	参考文献
生物滞留池	利用HYDRUS-1D 分析不同水力负荷、蓄水层高和初始含水率影响因素下生物滞留设施雨水径流水文调控效应	试验测定+模型预测	RMSE: 0.038 ~ 0.134 cm ³ /cm ³ R ² : 0.894 ~ 0.999	[53]
绿色屋顶	研究HYDRUS-1D在预测不同空间尺度下浅层和 大面积绿屋顶水文行为方面的适用性	试验测定+模型预测	NSE: 0.16 RSR: 0.84	[59]
雨水花园	利用HYDRUS-1D计算次降雨入渗补给系数	试验测定+模型预测	NSE: 0.804 ~ 0.957 R ² : 0.824 ~ 0.969	[60]
透水铺装	利用HYDRUS-1D研究透水铺装的 水力特性以及填料的水力参数	试验测定+历史文献+模型反演	NSE: 0.91 ~ 0.99 R ² : 0.83 ~ 0.91	[61]

注: RSR 为均方根误差与测量数据标准差之比。

由表 4 可以看出,LID 设施运行效果模拟中参数主要是基于实测数据与模型神经网络预测数据拟合所得,也有部分研究是通过输入实测数据进行反演确定,模拟效果要好于模型预测,决定系数(R²)可达到 0.969 以上^[62]。但是,LID 设施中水力参数较为复杂,受到诸多因素的影响。

在实际工程中,不同 LID 设施均有延缓产流、削减径流、去除污染物等功能,但却受到设施自身特性(介质、植被等)、降雨特征(降雨模式、雨量、降雨重现期、汇水面积等)和污染物迁移转化(浓度、吸附解吸、溶解沉淀、氧化还原、生物降解、植物吸收等)等

不同因素的影响。因此,结合不同尺度的物理模拟实验和实际工程应用,通过 HYDRUS 模型模拟 LID 设施效果时,必须系统详细考虑上述影响因素。比如,王超月等^[54]通过 HYDRUS 模型研究发现,恒定降雨模式和芝加哥降雨模式下生物滞留池底部出流量分别为 31.9, 30.7 cm,但由于恒定降雨模式未考虑积水时间,从而导致模型延迟时间(11 min)较早于芝加哥雨型延迟时间(20 min);由于模型中未考虑优先流的存在,实验观测的洪峰延迟时间均小于模拟值^[63]。Hakimdavar 等^[59]在基于 HYDRUS-1D 研究不同绿色屋顶排水面积对径流的水文调控,发现排水面积对单位

屋顶面积径流量峰值削减影响最大,当绿色屋顶面积为 0.09, 99, 600 m² 时,峰值径流量的削减率依次为 60%、88%、92%。HYDRUS 模型不能模拟生物滞留设施中微生物的生化反应,仅能模拟部分污染物的物理吸附和化学反应^[64]。同时,LID 措施填料渗透、吸附等性能随时间变化的情况不明晰^[65],而土壤参数对模型模拟影响很大,现阶段很难准确获得 LID 设施中下层非饱和介质土壤特征曲线的参数值,所以这也将是 HYDRUS 模型应用于现有 LID 措施模拟的障碍。

综上所述, HYDRUS 模型可用于植物根系下水分运移模拟、田间尺度的水盐运移规律、包气带污染物的监测评估,也适用于分析生物滞留系统对城市径流的净化效果和污染物的迁移机理。同时,由于传统的单一模型无法满足研究的需要,研究学者开始尝试进一步将 HRDRUS 与其他模型进行耦合来解决实际问题。

1.5 HYDRUS 耦合模型

HYDRUS 模型可以灵活处理非饱和带中复杂的

边界问题,应用非常广泛,但也存在局限性。比如,由于区域土壤含水量的监测技术有限, HYDRUS 模型通常仅局限于小范围包气带土壤水计算,无法解决大区域范围地下水计算问题;同时,对于污染物由地表进入土壤后的运移模拟研究,只能明确污染物在包气带的运移过程,不能模拟污染物进入地下水之后的变化情况;另外,在农田灌溉对水盐运移模拟研究中,现有研究在土壤水盐运移过程中仅研究非生育期的淋洗过程,未考虑冻融作用对灌溉过程中农田水盐重分布的影响,不能有效确定作物播种前土壤水盐状态。因此,有必要将 HYDRUS 模型同其他模型耦合来解决实际问题。

目前,研究者已经开发了几种 HYDRUS 耦合模型,对大尺度地下水计算和特殊情况下水和溶质运移过程有了新的了解,如与地下水模型 MODFLOW 耦合的模型^[66],与冻融模拟模型 SHAW 耦合的模型^[67],以及作物模型 DSSAT 模型耦合的模型^[68],具体如表 5 所示。

表 5 不同 HYDRUS 耦合模型功能特点比较

Table 5 Comparison of functional characteristics of different HYDRUS coupling models

耦合模型	耦合类型	模拟功能	模型应用	参考文献
MODFLOW-HYDRUS	迭代耦合	可以实时计算包气带和饱和带的水分交换量,降水入渗或灌溉入渗补给量、潜水蒸发量具有自适应性,提高了非饱和带和饱和带上边界源汇项的计算精度,增加了数值模拟的仿真度	分析不同情景下地下水水位控制范围及排水效果	[66]
SHAW-HYDRUS	迭代耦合	可以模拟全年际(作物主要为生育期、秋浇期和冻融期)的水量、热量和溶质运移过程	为季节性冻融区膜下滴灌农田确定合理的非生育期淋洗制度	[67]
DSSAT-HYDRUS	迭代耦合	可以将作物参数和天气数据作为输入参数来计算作物生长,模拟农作物生长发育期间的营养生长和生殖生长等,而且可以对气象和土壤参数实现准确的定量预估	预测不同环境下土壤水动态变化情况和作物生长发育情况	[68]
EPIC-HYDRUS	迭代耦合	可以推导基于保护地下水的土壤风险控制值,评估盐度胁迫对蒸散、粮食产量和水分利用效率的影响,以及长期使用盐水对粮食产量和盐分积累的影响	应用于土壤与地下水治理修复或风险管控	[69]

HYDRUS 耦合模型可以有效解决 HYDRUS 模型的局限性,提高饱和带和非饱和带边界的计算精度,增加数值模拟的仿真度。Zeng 等^[70]采取线性外推和迭代反馈对 HYDRUS 模型和 MODFLOW 模型进行耦合,结果表明耦合模型模拟结果的均方根误差(0.012 ~ 0.115 cm³/cm³)小于 HYDRUS 模型模拟的均方根误差(1.526 ~ 10.115 cm³/cm³)。HYDRUS 模型还可与地下水稀释模型进行耦合,该耦合模型考虑了包气带吸附作用,与土壤-水分配耦合地下水稀释模型相比,其计算的土壤中 Cr⁶⁺和 Ni 的风险控制值分别提高了 10 倍和 45 倍^[71]。另外, HYDRUS 模型还可与 FREZCHEM 模型耦合计算冻融期土壤液相和固相的含水量和含盐量并模拟土壤液态水和可溶性盐的运动,解决了 HYDRUS 模型无法模拟冻融期土壤盐分运移的不

足。Wang 等^[72]将 HYDRUS 模型与 FREZCHEM 模型耦合计算了冻融期土壤液相和固相的含水量和含盐量并模拟了土壤液态水和可溶性盐的运移,发现 SO₄²⁻, Na⁺和 Cl⁻的潜在对流量为 39.6%、30.0% 和 21.4%,说明其对冻融期土壤盐分的运移影响较大。

目前, HYDRUS 模型与其他模型的耦合才刚刚起步,主要侧重于与地下水模型、作物模型等的耦合,而且多属于简单的迭代耦合。随着智算技术的发展及土壤参数获取技术的提高,可以预期未来将实现地表水-土壤水-地下水的完全耦合。同时, HYDRUS 模型未来可与能够模拟污染物物理化学反应的模型如 FLUENT 模型耦合,解决单一 HYDRUS 模型在模拟污染物迁移过程中无法考虑物理化学反应问题的局限性。

2 存在问题及展望

(1)加强 HYDRUS 模型中植物根系效应的模拟

在渗流过程中,根系特征的变化会改变土壤孔隙特征、容重、团聚体和有机质含量等,进而影响土壤水分变化及污染物运移,产生不同的根系效应。目前, HYDRUS 模型对根系效应的模拟只是简单的归结于根系吸水,忽略了植物生长过程中不同种植年限、不同植物根系类型以及不同根长、根直径等根系特征。比如,草本植物根系生长可以增加土壤进气值和蒸散发量,不同生长时期不同根系特征的本本植物可能会对土壤饱和导水率产生促进或者抑制的影响,植物根系也会通过新陈代谢过程和根系分泌物对渗流过程中污染物的运移产生不同的影响。在模拟实际场地渗流过程中,考虑根系效应有助于提高 HYDRUS 模型模拟精度,但是木本植物和藤本植物由于其根系发达且分布不均匀, HYDRUS 模型在考虑其根系效应的同时应重点考虑植物生长过程中不同种植年限、不同植物根系类型以及不同根长、根直径、根体积和根密度等根系特征对根系效应的影响。

(2)关注 HYDRUS 模型对新污染物运移过程的模拟

新污染物是指具有生物毒性、环境持久性、难降解性等特征的有毒有害化学物质,常见的有全氟化合物(per- and polyfluoroalkyl substances, PFAs)以及医药和个人护理产品(pharmaceutical and personal care products, PPCPs)等。由于新污染物具有难降解性,且缺乏其在土壤中运移机理的相关研究,这导致 HYDRUS 模型在新污染物运移模拟中缺少包括扩散、吸附、降解等的相关运移参数,这显著增加了模拟结果的不确定性。因此,对于具有环境持久性和难降解性等特性的新污染物,获得准确的新污染物运移参数对于提高 HYDRUS 模型的适用性有着重要意义。

(3)提高 HYDRUS 模型对包气带介质非均质性的刻画

不同土壤质地是影响土壤水分和溶质运移的重要因素。作为非饱和带,包气带介质的非均质性会造成水流阻滞效应,使得分界面处的土壤孔隙和水力学性质出现明显的不连续,从而影响整个介质的水流通量和含水量分布,并进一步影响渗流过程中污染物的运移。在非均质包气带中,不同类型的土壤具有不同的渗透系数、持水能力和水力传导性等水力参数,而这些水力参数受到如土壤结构、孔隙度、有机质含量

等多种因素的影响,并随着时间、空间和环境条件的变化而发生变化。因此 HYDRUS 模型在非均质性介质研究过程中需考虑水力参数的变化问题。

(4)进一步完善对 HYDRUS 模型参数的获取及确定

参数获取以及确定是 HYDRUS 模型的关键过程。目前, HYDRUS 模型参数主要是基于不同尺度的实验得到初始值,然后通过反演率定确定。但是,由于非饱和带涉及参数较多且有些不易获取,导致三维空间上 HYDRUS 模型模拟过程极为复杂,而且计算负荷巨大(甚至难以收敛)。目前,在 HYDRUS 模型溶质运移模拟中,已有利用第三方软件(EPI SuiteTM)获取相关参数的案例。因此,随着大数据和 AI 智能模型的深入发展和广泛应用,未来通过引入机器学习和人工智能等手段,可以有效弥补 HYDRUS 模型参数获取方面的困难和局限,进而提高 HYDRUS 模型的模拟精度。

(5)进一步开发和拓展 HYDRUS 耦合模型

HYDRUS 耦合模型目前仍处于初步开发阶段,且多集中于与饱和地下水模型的简单迭代耦合。但是,在实际渗流过程中,从地表水入渗到包气带渗流再到饱和地下水径流,是一个连续且完整的过程,虽然 HYDRUS 模型可以灵活模拟包气带中的渗流问题,但是对于地表产流过程以及饱和地下水径流过程的模拟没有充分考虑,且 HYDRUS 模型对植物根系效应的刻画不够详细,因此 HYDRUS 模型经常需要与一些地表水产流模型(SWMM 模型)、作物模型(SHAW 模型)和饱和地下水径流模型(MODFLOW 模型)进行耦合,以实现地表水-土壤水-饱和地下水的全过程模拟,并进一步考虑了植物或作物生长的影响。另外, HYDRUS 耦合模型还可以进一步延伸至环境领域,解决一些更加复杂的污染物在地表水-土壤水-饱和地下水中的运移问题。

3 结论

HYDRUS 模型因其可以综合考虑土壤-植物-大气系统中的水、热、溶质运移以及根系吸水等关键过程而被广泛研究和应用,可以通过实验测定、模型预测以及参数反演等方法确定参数,模拟效果较好。目前,主要进展及展望如下:

(1)随着 HYDRUS 模型的应用及发展,其对水分、盐分和污染物的运移以及对 LID 设施的模拟愈加成熟,模型精度也逐渐提高。

(2)HYDRUS 模型与地下水模型 MODFLOW 模

型、作物冻融模拟模型 SHAW 模型和作物生长模型 DSSAT 模型等耦合模型的发展解决了单一模型使用的局限性。但是, HYDRUS 模型及其耦合模型的研究与应用受到根系、土壤和各种物理、化学及生物反应等多种因素的影响, 还需进一步深入研究。

参考文献 (References) :

- [1] MA Lin, LIU Yifei, ZHANG Jin, et al. Impacts of irrigation water sources and geochemical conditions on vertical distribution of pharmaceutical and personal care products (PPCPs) in the vadose zone soils[J]. *Science of the Total Environment*, 2018, 626: 1148 – 1156.
- [2] 陈磊, 周雪辉, 余宇, 等. 城镇建成区内涝和非点源污染联合风险评估方法 [J]. 水科学进展, 2023, 34(1): 76 – 87. [CHEN Lei, ZHOU Xuehui, YU Yu, et al. A joint risk assessment method of waterlogging and non-point source pollution in urban built-up areas[J]. *Advances in Water Science*, 2023, 34(1): 76 – 87. (in Chinese with English abstract)]
- [3] WANG Ruoyu, YUAN Yongping, YEN H, et al. A review of pesticide fate and transport simulation at watershed level using SWAT: Current status and research concerns[J]. *Science of the Total Environment*, 2019, 669: 512 – 526.
- [4] LI Pei, REN Li. Evaluating the saline water irrigation schemes using a distributed agro-hydrological model[J]. *Journal of Hydrology*, 2021, 594: 125688.
- [5] BOUZOUIDJA R, SÉRÉ G, CLAVERIE R, et al. Green roof aging: Quantifying the impact of substrate evolution on hydraulic performances at the lab-scale[J]. *Journal of Hydrology*, 2018, 564: 416 – 423.
- [6] 高震国, 钟瑞林, 杨帅, 等. Hydrus 模型在中国的最新研究与应用进展 [J]. 土壤, 2022, 54(2): 219 – 231. [GAO Zhenguo, ZHONG Ruilin, YANG Shuai, et al. Recent progresses in research and applications of hydrus model in China[J]. *Soils*, 2022, 54(2): 219 – 231. (in Chinese with English abstract)]
- [7] 王旭东, 韩鹏飞, 张锁, 等. 基于 HYDRUS 模拟的 ABCD 模型变量及参数物理基础研究 [J]. 水文地质工程地质, 2023, 50(5): 20 – 27. [WANG Xudong, HAN Pengfei, ZHANG Suo, et al. Research on the physical basis of variables and parameters of ABCD model based on HYDRUS simulation[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2023, 50(5): 20 – 27. (in Chinese with English abstract)]
- [8] GILTRAP D, JOLLY B, BISHOP P, et al. Modelling 3D urine patch spread in grazed pasture soils to determine potential inhibitor effectiveness[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 292: 106809.
- [9] 杨海, 姜月华, 周权平, 等. 空间链接器式多维通用饱和-非饱和流模型研究 [J]. 水文地质工程地质, 2020, 47(5): 31 – 42. [YANG Hai, JIANG Yuehua, ZHOU Quanping, et al. A generalized multi-dimensional saturated-unsaturated flow model based on spatial linkers[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2020, 47(5): 31 – 42. (in Chinese with English abstract)]
- [10] 白晓, 贾小旭, 邵明安, 等. 黄土高原北部土地利用变化对长期土壤水分平衡影响模拟 [J]. 水科学进展, 2021, 32(1): 109 – 119. [BAI Xiao, JIA Xiaoxu, SHAO Ming'an, et al. Simulating long-term soil water balance in response to land use change in the Northern China's Loess Plateau[J]. *Advances in Water Science*, 2021, 32(1): 109 – 119. (in Chinese with English abstract)]
- [11] BUTTAFUOCO G, CASTRIGNANÒ A, BUSONI E, et al. Studying the spatial structure evolution of soil water content using multivariate geostatistics[J]. *Journal of Hydrology*, 2005, 311(1/2/3/4): 202 – 218.
- [12] 鲁建荣, 张奇, 李云良, 等. 鄱阳湖典型洲滩湿地植物根系对水分垂向通量的影响 [J]. 中国环境科学, 2020, 40(5): 2180 – 2189. [LU Jianrong, ZHANG Qi, LI Yunliang, et al. Impact of typical plant roots on vertical soil water movement in Poyang Lake wetland: A numerical study[J]. *China Environmental Science*, 2020, 40(5): 2180 – 2189. (in Chinese with English abstract)]
- [13] LI Lanjun, SONG Xiaoyu, XIA Lu, et al. Modelling the effects of climate change on transpiration and evaporation in natural and constructed grasslands in the semi-arid Loess Plateau, China[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2020, 302: 107077.
- [14] 李琦, 李发东, 张秋英, 等. 基于 HYDRUS 模型的华北平原小麦种植区水盐运移模拟 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2021, 29(6): 1085 – 1094. [LI Qi, LI Fadong, ZHANG Qiuying, et al. Water and salt transport simulation in the wheat growing area of the North China Plain based on HYDRUS model[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2021, 29(6): 1085 – 1094. (in Chinese with English abstract)]
- [15] LI Bingbing, WANG Yunqiang, HILL R L, et al. Effects of apple orchards converted from farmlands on soil water balance in the deep loess deposits based on HYDRUS-1D model[J]. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 2019, 285: 106645.

- [16] 李豆豆,席本野,唐连峰,等.砂壤土下滴灌毛白杨幼林土壤水分运移规律与模拟[J].林业科学,2018,54(12):157-168. [LI Doudou, XI Benye, TANG Lianfeng, et al. Patterns of soil water movement in drip-irrigated young populus tomentosa plantations on sandy loam soil and their simulation[J]. *Scientia Silvae Sinicae*, 2018, 54(12): 157-168. (in Chinese with English abstract)]
- [17] 陈喜,宋琪峰,高满,等.植被—土壤—水文相互作用及生态水文模型参数的动态表述[J].北京师范大学学报(自然科学版),2016,52(3):362-368. [CHEN Xi, SONG Qifeng, GAO Man, et al. Vegetation-soil-hydrology interaction and expression of parameter variations in ecohydrological models[J]. *Journal of Beijing Normal University (Natural Science)*, 2016, 52(3): 362-368. (in Chinese with English abstract)]
- [18] YUGE K, SHIGEMATSU K, ANAN M, et al. Effect of crop root on soil water retentivity and movement[J]. *American Journal of Plant Sciences*, 2012, 3(12): 1782-1787.
- [19] 吴元芝,黄明斌.基于Hydrus-1D模型的玉米根系吸水影响因素分析[J].农业工程学报,2011,27(增刊2):66-73. [WU Yuanzhi, HUANG Mingbin. Analysis of influencing factors on water absorption of maize roots based on hydrus-1D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(Sup 2): 66-73. (in Chinese)]
- [20] XU Xiuli, ZHANG Qi, LI Yunliang, et al. Evaluating the influence of water table depth on transpiration of two vegetation communities in a lake floodplain wetland[J]. *Hydrology Research*, 2016, 47(Sup 1): 293-312.
- [21] 席本野,贾黎明,王烨,等.地下滴灌条件下三倍体毛白杨根区土壤水分动态模拟[J].应用生态学报,2011,22(1):21-28. [XI Benye, JIA Liming, WANG Ye, et al. Simulation of soil water dynamics in triploid *Populus tomentosa* root zone under subsurface drip irrigation[J]. *Chinese Journal of Applied Ecology*, 2011, 22(1): 21-28. (in Chinese with English abstract)]
- [22] 虎胆·吐马尔白,焦萍,米力夏提·米那多拉.新疆干旱区成龄核桃滴灌制度优化[J].农业工程学报,2020,36(15):134-141. [HUDAN Tumarday, JIAO Ping, MILIXIATI Minadola. Optimization of drip irrigation scheme for mature walnut in arid areas of Xinjiang, China[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2020, 36(15): 134-141. (in Chinese with English abstract)]
- [23] 郑策,高万德,陈云飞,等.季节性冻土区包气带水汽热耦合运移研究进展[J].农业工程学报,2022,38(24):110-117. [ZHENG Ce, GAO Wande, CHEN Yunfei, et al. Review of coupled water, vapor, and heat transport of the vadose zone in the seasonal frozen soil region[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2022, 38(24): 110-117. (in Chinese with English abstract)]
- [24] 江训才,冯洪川,祝晓彬,等.入渗补给范围对包气带水气两相流运移过程影响的数值模拟研究[J].灌溉排水学报,2022,41(11):78-84. [JIANG Xunca, FENG Hongchuan, ZHU Xiaobin, et al. Numerical simulation of the influence of infiltration range on gas and water flow in vadose zone[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(11): 78-84. (in Chinese with English abstract)]
- [25] HOU Lizhu, HU B X, QI Zhiming, et al. Evaluating equilibrium and non-equilibrium transport of ammonium in a loam soil column[J]. *Hydrological Processes*, 2018, 32(1): 80-92.
- [26] ZHANG Han, YANG Ruxing, GUO Shanshan, et al. Modeling fertilization impacts on nitrate leaching and groundwater contamination with HYDRUS-1D and MT3DMS[J]. *Paddy and Water Environment*, 2020, 18(3): 481-498.
- [27] 焦独醒,李家斌,李进花,等.应用HYDRUS-1D模型分析Cr(VI)在负载针铁矿的石英砂中的迁移特征[J].环境工程,2023,41(增刊2):1186-1189. [JIAO Duxing, LI Jiabin, LI Jinhua, et al. Simulation of Cr(VI) transport in goethite coated sand column by hydrus-1D model[J]. *Environmental Engineering*, 2023, 41(Sup 2): 1186-1189. (in Chinese)]
- [28] 邵托娅,郑跃军,王金生.应用HYDRUS-1D模型模拟分析PFCs在土壤中的迁移特征[J].农业环境科学学报,2018,37(10):2175-2182. [TAI Tuoya, ZHENG Yuejun, WANG Jinsheng. Simulation and analysis of PFCs migration in the soil column using the Hydrus-1D model[J]. *Journal of Agro-Environment Science*, 2018, 37(10): 2175-2182. (in Chinese with English abstract)]
- [29] BEHROOZI A, ARORA M, FLETCHER T D, et al. Sorption and transport behavior of zinc in the soil: Implications for stormwater management[J]. *Geoderma*, 2020, 367: 114243.
- [30] 高靖勋,冯洪川,祝晓彬,等.层状非均质结构包气带入渗过程单相流与两相流数值模拟对比研究[J].水文地质工程地质,2022,49(2):24-32. [GAO Jingxun, FENG Hongchuan, ZHU Xiaobin, et al. A

- comparative numerical simulation study of single-phase flow and water-gas two-phase flow infiltration process in the vadose zone with the layered heterogeneous structure[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2022, 49(2): 24 – 32. (in Chinese with English abstract)]
- [31] 王士军, 田路遥, 刘丙霞. 地下水浅埋区层状土壤结构对包气带硝态氮累积和淋失的影响 [J]. 中国生态农业学报(中英文), 2023, 31(1): 125 – 135. [WANG Shijun, TIAN Luyao, LIU Bingxia. Effects of layered soil on the accumulation and leaching of nitrate-nitrogen in shallow groundwater regions[J]. *Chinese Journal of Eco-Agriculture*, 2023, 31(1): 125 – 135. (in Chinese with English abstract)]
- [32] LU Jie, BAI Zhaoai, VELTHOF G L, et al. Accumulation and leaching of nitrate in soils in wheat-maize production in China[J]. *Agricultural Water Management*, 2019, 212: 407 – 415.
- [33] EKEMEN KESKIN T, TOPTAŞ S. Heavy metal pollution in the surrounding ore deposits and mining activity: A case study from koyulhisar (Sivas-Turkey) [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2012, 67(3): 859 – 866.
- [34] PATTERSON B M, DAVIS G B. Quantification of vapor intrusion pathways into a slab-on-ground building under varying environmental conditions[J]. *Environmental Science & Technology*, 2009, 43(3): 650 – 656.
- [35] 王珍, 李久生, 栗岩峰. 土壤空间变异对滴灌水氮淋失风险影响的模拟评估 [J]. 水利学报, 2013, 44(3): 302 – 311. [WANG Zhen, LI Jiusheng, LI Yanfeng. Assessing the influence of soil spatial variability on water leakage and nitrate leaching under drip irrigation through simulation[J]. *Journal of Hydraulic Engineering*, 2013, 44(3): 302 – 311. (in Chinese with English abstract)]
- [36] 杨洋, 李娟, 李鸣晓, 等. HYDRUS-1D 软件在地下水污染源强定量评价中的应用 [J]. 环境工程学报, 2014, 8(12): 5293 – 5298. [YANG Yang, LI Juan, LI Mingxiao, et al. Application of HYDRUS-1D model in quantitative assessment of groundwater pollution resource intensity[J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2014, 8(12): 5293 – 5298. (in Chinese with English abstract)]
- [37] 张惠, 林青, 徐绍辉. 磺胺嘧啶在覆铁石英砂中迁移特征及数值模拟 [J]. 中国环境科学, 2019, 39(11): 4712 – 4721. [ZHANG Hui, LIN Qing, XU Shaohui. Characteristics of sulfadiazine migration in iron oxide coated sand and a comparison with simulation results[J]. *China Environmental Science*, 2019, 39(11): 4712 – 4721. (in Chinese with English abstract)]
- [38] 杜学军, 闫彬伟, 许可, 等. 盐碱地水盐运移理论及模型研究进展 [J]. 土壤通报, 2021, 52(3): 713 – 721. [DU Xuejun, YAN Binwei, XU Ke, et al. Research progress on water-salt transport theories and models in saline-alkali soil[J]. *Chinese Journal of Soil Science*, 2021, 52(3): 713 – 721. (in Chinese with English abstract)]
- [39] 陈丽娟, 冯起, 王昱, 等. 微咸水灌溉条件下含黏土夹层土壤的水盐运移规律 [J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 44 – 51. [CHEN Lijuan, FENG Qi, WANG Yu, et al. Water and salt movement under saline water irrigation in soil with clay interlayer[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(8): 44 – 51. (in Chinese with English abstract)]
- [40] 范严伟, 黄宁, 马孝义, 等. 应用 HYDRUS-1D 模拟砂质夹层土壤入渗特性 [J]. 土壤, 2016, 48(1): 193 – 200. [FAN Yanwei, HUANG Ning, MA Xiaoyi, et al. Simulation of infiltration characteristics in soil with sand interlayer using HYDRUS-1D[J]. *Soils*, 2016, 48(1): 193 – 200. (in Chinese with English abstract)]
- [41] 冯壮壮, 史海滨, 苗庆丰, 等. 基于 HYDRUS-1D 模型的河套灌区典型夹砂层耕地水分利用分析 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(18): 90 – 99. [FENG Zhuangzhuang, SHI Haibin, MIAO Qingfeng, et al. Water use analysis of cultivated land with typical sand layers in Hetao irrigation district of Inner Mongolia using HYDRUS-1D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(18): 90 – 99. (in Chinese with English abstract)]
- [42] 刘洪光, 白振涛, 李开明. 基于 HYDRUS-2D 模型的膜下滴灌暗管排水棉田土壤盐分变化 [J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 130 – 141. [LIU Hongguang, BAI Zhentao, LI Kaiming. Soil salinity changes in cotton field under mulched drip irrigation with subsurface pipes drainage using HYDRUS-2D model[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2021, 37(2): 130 – 141. (in Chinese with English abstract)]
- [43] 徐钰德, 刘子金, 程慧, 等. 基于 HYDRUS-3D 的畦灌模式下田间水盐运移模拟 [J]. 水利水电技术(中英文), 2021, 52(7): 14 – 22. [XU Yude, LIU Zijin, CHENG Hui, et al. Simulation of water and salt transportation under border irrigation in field scale based on HYDRUS-3D[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2021, 52(7): 14 – 22. (in Chinese with English abstract)]
- [44] 徐存东, 赵志宏, 程慧, 等. 基于 HYDRUS-3D 的干旱

- 区土壤沟灌模式水盐运移模拟[J]. 干旱区资源与环境, 2021, 35(12): 134 – 141. [XU Cundong, ZHAO Zhihong, CHENG Hui, et al. HYDRUS-3D-based simulation of water and salt transport in arid land soil under furrow irrigation patterns[J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 2021, 35(12): 134 – 141. (in Chinese with English abstract)]
- [45] 马波, 周青云, 张宝忠, 等. 基于 HYDRUS-2D 的滨海地区膜下滴灌土壤水盐运移模拟研究[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(5): 182 – 191. [MA Bo, ZHOU Qingyun, ZHANG Baozhong, et al. Simulation of soil water and salt transport under mulched drip irrigation based on HYDRUS Model in coastal area[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2020, 38(5): 182 – 191. (in Chinese with English abstract)]
- [46] CHEN Lijuan, FENG Qi, LI Fengrui, et al. A bidirectional model for simulating soil water flow and salt transport under mulched drip irrigation with saline water[J]. *Agricultural Water Management*, 2014, 146: 24 – 33.
- [47] 王云权. 腾格里沙漠边缘不同土壤类型水盐运移规律与数值模拟研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2011. [WANG Yunquan. Study on water and salt transport law and numerical simulation of different soil types on the edge of Tengger desert[D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2011. (in Chinese with English abstract)]
- [48] 李仁海, 周志超, 李杰彪, 等. 甘肃北山地区典型沟谷包气带土壤渗透特征研究[J]. 土壤通报, 2020, 51(6): 1380 – 1385. [LI Renhai, ZHOU Zhichao, LI Jiebiao, et al. Characteristics of the soil permeability in a typical gully aerated zone of Beishan in Gansu Province[J]. Chinese Journal of Soil Science, 2020, 51(6): 1380 – 1385. (in Chinese with English abstract)]
- [49] 马萌华, 李家科, 邓陈宁. 基于 SWMM 模型的城市内涝与面源污染的模拟分析[J]. 水力发电学报, 2017, 36(11): 62 – 72. [MA Menghua, LI Jiake, DENG Chenning. Analysis of urban waterlogging and pollution load based on SWMM model[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2017, 36(11): 62 – 72. (in Chinese with English abstract)]
- [50] BROWN R A, SKAGGS R W, HUNT W F. Calibration and validation of DRAINMOD to model bioretention hydrology[J]. *Journal of Hydrology*, 2013, 486: 430 – 442.
- [51] 涂安国, 李英, 莫明浩, 等. 基于 RECARGA 模型生物滞留池设计参数的水文效应[J]. 水土保持学报, 2020, 34(1): 149 – 153. [TU Anguo, LI Ying, MO Minghao, et al. Hydrological effects of design parameters optimization of bioretention facility based on RECARGA model[J]. *Journal of Soil and Water Conservation*, 2020, 34(1): 149 – 153. (in Chinese with English abstract)]
- [52] LI Jiake, ZHAO Ruisong, LI Yajiao, et al. Simulation and optimization of layered bioretention facilities by HYDRUS-1D model and response surface methodology[J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 586: 124813.
- [53] 张炜, 王浩远, 赵玉华, 等. 基于 HYDRUS-1D 生物滞留设施雨水径流水文调控模拟[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 102 – 108. [ZHANG Wei, WANG Haoyuan, ZHAO Yuhua, et al. Hydrological regulation simulation of rainwater runoff of bioretention based on HYDRUS-1D[J]. *Water Resources Protection*, 2022, 38(3): 102 – 108. (in Chinese with English abstract)]
- [54] 王超月, 李方红, 韩忠民, 等. 生物滞留池对石家庄市雨水径流的水文响应[J]. 灌溉排水学报, 2022, 41(8): 87 – 94. [WANG Chaoyue, LI Fanghong, HAN Zhongmin, et al. The effect of bioretention systems on stormwater runoff of Shijiazhuang[J]. *Journal of Irrigation and Drainage*, 2022, 41(8): 87 – 94. (in Chinese with English abstract)]
- [55] LI Jiake, LIU Zhouli, JIANG Chunbo, et al. Optimization design of key parameters for bioretention cells with mixed filter media via HYDRUS-1D model and regression analysis[J]. *Ecological Engineering*, 2021, 164: 106206.
- [56] 李家科, 蒋春博, 张思翀, 等. 生态滤沟对城市路面径流的净化效果试验及模拟[J]. 水科学进展, 2016, 27(6): 898 – 908. [LI Jiake, JIANG Chunbo, ZHANG Sichong, et al. Pilot scale experiments and simulation of the purification effects of bioswale on urban road runoff[J]. *Advances in Water Science*, 2016, 27(6): 898 – 908. (in Chinese with English abstract)]
- [57] 李鹏, 李家科, 林培娟, 等. 生物滞留槽对城市路面径流水质处理效果的试验研究[J]. 水力发电学报, 2016, 35(8): 72 – 79. [LI Peng, LI Jiake, LIN Peijuan, et al. Experimental study on effects of bioretention tank purifying urban road runoff[J]. *Journal of Hydroelectric Engineering*, 2016, 35(8): 72 – 79. (in Chinese with English abstract)]
- [58] GURUNG S B, GERONIMO F K, HONG J, et al. Application of indices to evaluate LID facilities for sediment and heavy metal removal[J]. *Chemosphere*, 2018, 206: 693 – 700.
- [59] HAKIMDAVAR R, CULLIGAN P J, FINAZZI M, et al. Scale dynamics of extensive green roofs: Quantifying the effect of drainage area and rainfall characteristics on

- observed and modeled green roof hydrologic performance[J]. *Ecological Engineering*, 2014, 73: 494 – 508.
- [60] 李凯, 王建龙, 王雪婷, 等. 次降雨入渗补给系数评估雨水花园补给地下水可行性及计算方法研究 [J]. 水利水电技术(中英文), 2023, 54(2): 108 – 117. [LI Kai, WANG Jianlong, WANG Xueting, et al. The feasibility and compute methods of sub-rainfall infiltration recharge coefficient used for evaluation of groundwater recharge capacity by rain garden[J]. *Water Resources and Hydropower Engineering*, 2023, 54(2): 108 – 117. (in Chinese with English abstract)]
- [61] TURCO M, KODEŠOVÁ R, BRUNETTI G, et al. Unsaturated hydraulic behaviour of a permeable pavement: Laboratory investigation and numerical analysis by using the HYDRUS-2D model[J]. *Journal of Hydrology*, 2017, 554: 780 – 791.
- [62] 陈雨, 陈璇, 刘瑞芬. 基于 HYDRUS-1D 模型的植物根系对人工基质水分特征曲线参数的影响 [J]. 环境科学学报, 2022, 42(8): 325 – 336. [CHEN Yu, CHEN Xuan, LIU Ruifen. Effect of plant roots on water characteristic curve parameters of artificial substrate based on HYDRUS-1D model[J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2022, 42(8): 325 – 336. (in Chinese with English abstract)]
- [63] LIU Ruifeng, FASSMAN-BECK E. Pore structure and unsaturated hydraulic conductivity of engineered media for living roofs and bioretention based on water retention data[J]. *Journal of Hydrologic Engineering*, 2018, 23(3): 1 – 13.
- [64] 李亚娇, 徐毓江, 李家科. 低影响开发单项设施模拟模型研究与应用进展 [J]. 水资源与水工程学报, 2017, 28(5): 135 – 141. [LI Yajiao, XU Yujiang, LI Jiake. Research and application progress of low-impact development single facility simulation model[J]. *Journal of Water Resources and Water Engineering*, 2017, 28(5): 135 – 141. (in Chinese with English abstract)]
- [65] LISENBEE W A, HATHAWAY J M, BURNS M J, et al. Modeling bioretention stormwater systems: Current models and future research needs[J]. *Environmental Modelling & Software*, 2021, 144: 105146.
- [66] 代锋刚, 王晓燕, 谷明旭, 等. 基于 Modflow-Hydrus 耦合模型的改良盐碱土水平井排水效果分析 [J]. 排灌机械学报, 2021, 39(1): 61 – 67. [DAI Fenggang, WANG Xiaoyan, GU Mingxu, et al. Analysis of horizontal drainage well effect of saline-alkali soil amelioration based on Modflow-Hydrus coupling model[J]. *Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering*, 2021, 39(1): 61 – 67. (in Chinese with English abstract)]
- [67] ZHAO Ying, PETH S, HORN R, et al. Modeling grazing effects on coupled water and heat fluxes in Inner Mongolia grassland[J]. *Soil and Tillage Research*, 2010, 109(2): 75 – 86.
- [68] SHELIA V, ŠIMŮNEK J, BOOTE K, et al. Coupling DSSAT and HYDRUS-1D for simulations of soil water dynamics in the soil-plant-atmosphere system[J]. *Journal of Hydrology and Hydromechanics*, 2018, 66(2): 232 – 245.
- [69] 郝远远, 徐旭, 任东阳, 等. 河套灌区土壤水盐 and 作物生长的 HYDRUS-EPIC 模型分布式模拟 [J]. 农业工程学报, 2015, 31(11): 110 – 116. [HAO Yuanyuan, XU Xu, REN Dongyang, et al. Distributed modeling of soil water-salt dynamics and crop yields based on HYDRUS-EPIC model in Hetao Irrigation District[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(11): 110 – 116. (in Chinese with English abstract)]
- [70] ZENG Jicai, YANG Jinzhong, ZHA Yuanyuan, et al. Capturing soil-water and groundwater interactions with an iterative feedback coupling scheme: New HYDRUS package for MODFLOW[J]. *Hydrology and Earth System Sciences*, 2019, 23(2): 637 – 655.
- [71] 林挺, 罗飞, 朱艳, 等. Hydrus-1D 模型在推导基于保护地下水的土壤风险控制值中的应用 [J]. 环境科学, 2019, 40(12): 5640 – 5648. [LIN Ting, LUO Fei, ZHU Yan, et al. Calculation of the soil risk control value through a hydrus-1D model for groundwater protection[J]. *Environmental Science*, 2019, 40(12): 5640 – 5648. (in Chinese with English abstract)]
- [72] WANG Mengqin, ZHU Yan, MAO Wei, et al. Chemical characteristics and reactive transport of soil salt ions in frozen soil during the freeze and thaw period[J]. *Journal of Hydrology*, 2023, 621: 129580.

编辑: 张若琳