

磷石膏淋滤液氟磷在贵州红黏土中的 运移规律研究及模型构建

漆增璠¹, 王中美¹, 李贵冬¹, 褚学伟^{1,2}, 苏成波¹, 袁欢¹

(1. 贵州大学 资源与环境工程学院, 贵阳 550025;

2. 贵州大学 喀斯特地质资源与环境教育部重点实验室, 贵阳 550025)

摘要: [目的] 探究不同降雨强度条件下磷石膏淋滤液中氟、磷在不同深度红黏土中的垂向运移规律, 揭示溶质运移过程模型, 为岩溶山区磷石膏堆场渗漏污染防控与水生态环境治理提供理论依据。[方法] 以贵州某磷石膏堆场及周边红黏土为研究对象, 开展室内物理模型淋滤试验, 采用 Excel、Origin 与 SPSS 进行数据统计分析, 并利用 Hydrus-1D 土壤溶质运移模型对氟、磷在红黏土中的迁移过程进行模拟与验证。[结果] 相同土层深度条件下, 降雨强度越大, 氟、磷在红黏土中运移越快, 浓度降低幅度越小; 相同降雨强度条件下, 红黏土深度越大, 氟、磷运移越慢, 浓度降低幅度越大, 且在 0—10 cm 深度范围内运移最为显著。Hydrus-1D 模型模拟值与试验实测值变化趋势一致, 溶质浓度均随淋滤时间延长而增加, 相关系数 R^2 均高于 0.9, 模型拟合程度较高。[结论] Hydrus-1D 模型能够较好地模拟磷石膏淋滤液中氟、磷在红黏土中的运移过程, 研究结果可为岩溶山区磷石膏堆场渗漏污染防治与水生态环境保护提供参数借鉴。

关键词: 磷石膏淋滤液; 红黏土; 运移规律; Hydrus-1D; 数值模拟

中图分类号: X53

文献标识码: A

文章编号: 1005-3409(2026)03-0150-08

Study on transport patterns and model construction of fluoride and phosphorus from phosphogypsum leachate in Guizhou red clay

Qi Zengfan¹, Wang Zhongmei¹, Li Guidong¹, Chu Xuewei^{1,2}, Su Chengbo¹, Yuan Huan¹

(1. College of Resources and Environmental Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China; 2. Key Laboratory of Karst Geological Resources and Environment of Ministry of Education, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

Abstract: [Objective] This study aims to investigate the vertical transport patterns of fluoride and phosphorus in phosphogypsum leachate at different depths within red clay under varying rainfall intensities, to elucidate the solute transport process model, and to provide theoretical support for preventing and controlling leakage pollution from phosphogypsum stockpiles and for water ecological environment protection in karst mountainous regions. [Method] Using a phosphogypsum stockpile and surrounding red clay in Guizhou as the study subjects, indoor physical model leaching tests were conducted. Statistical data analysis was performed using Excel, Origin, and SPSS. The Hydrus-1D soil solute transport model was employed to simulate and validate the transport process of fluoride and phosphorus in the red clay. [Results] Under identical soil depth conditions, the greater the rainfall intensity, the faster the transport of fluoride and phosphorus in red clay, and the smaller the reduction in their concentrations. Under identical rainfall intensity conditions, the greater the red clay depth, the slower the transport of fluoride and phosphorus, and the greater the reduction in their concentrations. Transport was most pronounced

收稿日期: 2025-07-21

修回日期: 2025-08-04

接受日期: 2025-08-22

资助项目: 国家自然科学基金项目(42062016); 贵州大学引进人才科研项目(贵大人基合字[2019]36号)

第一作者: 漆增璠(2001—), 男, 甘肃临夏人, 硕士研究生, 研究方向为岩溶水文地质工程。E-mail: 3515775844@qq.com

通信作者: 王中美(1975—), 女, 贵州遵义人, 博士, 教授, 主要从事岩溶水文地质教学与研究。E-mail: 891342472@qq.com

<https://stbeyj.publish.founderss.cn>

within the 0—10 cm depth range. The Hydrus-1D model simulations aligned with the trends observed in experimental measurements. Solute concentrations increased with prolonged leaching duration, with correlation coefficients R^2 consistently exceeding 0.9, indicating a good model fit. [Conclusion] The Hydrus-1D model effectively simulates the transport process of fluoride and phosphorus in phosphogypsum leachate within red clay. The findings provide reference parameters for preventing leakage pollution and protecting aquatic ecosystems at phosphogypsum stockpile sites in karst mountainous regions.

Keywords: phosphogypsum leachate; red clay; transport patterns; Hydrus-1D; numerical simulation

磷石膏作为湿法制造磷酸工业生产过程中伴生的固体废弃物,其年产量已逾7500万t,目前多以渣场露天堆积方式储存^[1]。在自然堆放条件下,磷石膏中所含的磷、氟等污染物在降水淋滤作用下浸出后迁移渗入至周边土壤,造成水土环境的污染。而西南岩溶山区大量磷化工企业和磷石膏废渣堆场几乎都建在地势低洼处,地表往往覆盖着具有天然防渗作用的红黏土风化层^[2],因此,研究磷、氟等污染物在红黏土中的运移规律对于环境污染的防治具有重要意义。

目前,国内外关于土壤溶质运移的研究较多^[3-6],对土壤中氟、磷的运移规律研究大多是通过动、静态淋滤试验和物理模拟的方法进行。刘仍阳^[7]运用土壤对磷吸附理论知识,并结合室内土柱模型试验,建立一维溶质迁移模型,分析了在淹-排条件下,磷在土壤剖面上的迁移转化及吸附规律;魏文硕等^[8]通过开展室内模拟降雨试验,探究了土壤吸附性溶质总磷在降雨—入渗—径流相互作用下的运移规律;朱雪千^[9]通过渗流柱试验模拟了磷在地下水中的迁移过程,构建磷在含水层中的一维迁移模型,并通过对比模型预测结果与试验结果,验证了该模型能较好地反映岩土颗粒对磷的吸附作用。王波^[10]选取符合磷石膏渗滤液特性的水分运动模型及溶质运移模型,借助 Hydrus-1D 软件建立了在土壤包气带垂直向上的一维溶质运移模型,模拟了在不同类型土壤中磷石膏渗滤液磷的运移过程。强毅等^[11]基于室内非扰动土柱试验,探究了初始含水率对氟溶质在非饱和红黏土中运移规律的影响机制;刘亚男^[12]通过配置不同比例石英和氢氧化铝的红黏土作为试验原料,进行静态吸附试验、土柱淋滤试验以及双电层 Zeta 电位试验,研究了红黏土中双电层对氟化物的迁移

影响机制;王云龙^[13]利用前期取得的各项参数求得了氟化物在红黏土中的吸附分配系数及阻滞系数,定性定量地说明红黏土对氟化物有较好的去除效果,并通过 Hydrus-1D 软件评价了变饱和毛细水对污染物带来了阻滞作用。

根据前人研究,土壤中氟、磷的运移规律已经取得了一定的研究成果,但大多数集中在单一污染物运移规律方面,而对于磷石膏淋滤液中的氟、磷在红黏土中的运移规律研究较少,因此提出本文研究。通过开展不同试验条件下磷石膏淋滤液中氟、磷在红黏土中的物理模拟试验,并结合 Hydrus-1D 溶质运移模型模拟运移规律,并预测其在不同时间和不同深度的运移过程,该研究结果能为磷石膏渣场和磷化工企业的渗漏污染治理提供参数借鉴。

1 试验材料

1.1 试验材料

研究所用的磷石膏与红黏土样品均采集自贵州瓮福磷矿摆纪磷石膏堆场及附近区域,磷石膏样品为堆场堆放一个月后,在10cm深度处取得,并将取回的磷石膏置于40℃恒温烘箱中烘8h,碾细过0.5mm筛备用;红黏土是由石灰岩风化而形成的,在地面以下50cm深处取得,取出的样品用密封袋取回通过室内自然风干碾碎后过2mm筛备用。

本次所测定的磷石膏与红黏土基本物理力学性质指标主要包括pH、含水率、天然密度、比重、孔隙比、干密度、黏聚力、内摩擦角等(见表1),这些指标的测定均按照《土工试验方法标准》(GB/T50123—2019)、《石膏化学分析方法》(GB/T5484—2012)^[14-15]进行试验。

表1 原状样品基本物理力学特征

Table 1 Basic physical and mechanical properties of undisturbed samples

名称	pH	含水率 $\omega/\%$	天然密度 $\rho/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	比重 G_s	孔隙比	干密度 $\rho_s/$ ($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	黏聚力 $c/(\text{kPa})$	内摩擦角 $\varphi/$ ($^\circ$)
磷石膏	2.35	52.48	1.28	2.26	1.058	1.12	15.13	32.10
红黏土	5.01	63.59	1.778	2.67	1.457	1.089	34.276	17.713

1.2 试验装置与设计

本次试验所用模型装置如图1所示,主要由模型

箱、降雨装置、磷石膏、红黏土、取样装置、排水口构成。模型箱采用亚克力材料,设计为长40cm、宽20cm、高

100 cm;模型箱内最上面部分为降雨装置,采用透明PVC材料打孔制作,用来模拟不同降雨强度,其次是磷石膏,磷石膏使用野外采集的样品经过烘干研磨之后,平铺于模型箱中,厚度分别为20 cm,30 cm,40 cm,最后为红黏土层,该部分使用野外采集的土样烘干研磨之后,加入其中同样平铺成30 cm厚度,模拟磷石膏堆场的现状;在磷石膏底部和红黏土层10 cm,20 cm,30 cm深度处设置淋滤液取样孔,取样孔通过小型两通阀塑料开关控制,定期取土层各深度处水样进行测定;在模型箱底部设置排水口,使淋滤试验能够正常进行。为了防止降雨直接落入磷石膏中使磷石膏飞溅于模型装置四周,在降雨装置与磷石膏之间均匀铺设一层2 cm的玻璃珠。为了防止淋滤过程中磷石膏颗粒堵塞红黏土孔隙,在磷石膏与土壤相接处使用均匀打孔的PVC板隔开,且在PVC板上使用200目的纱网铺垫。

利用室内物理模型箱进行淋滤试验,设计在不同磷石膏厚度(20 cm,30 cm,40 cm)和不同降雨条件(60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h)下各红黏土土层深度(10 cm,20 cm,30 cm)中氟、磷的运移规律^[16]。以土层深度为定值,其他影响因素为变量分别进行试验设计,并在开始淋滤后0.5,1,1.5,2,3,4,5,6,8,12,16,24,36,72 h定时取样^[17]。对取出的水样进行预处理,使用0.45 μm过滤器对水样进行过滤,一部分水样参照《水质氟化物的测定—离子选择性电极法》(GB7484-87),使用HPFS-80型氟离子计测定氟浓度;另外一部分水样参照《水质—总磷的测定—钼酸铵分光光度法》(GB11893-89),使用SP-752型可见分光光度计测定磷浓度^[18-19]。

2 结果与分析

2.1 氟运移规律

通过物理模型的淋滤试验表明,不同降雨强度条件下氟浓度随时间的变化特征表现为两个阶段:一是快速降低阶段,二是缓慢降低至平稳阶段(见图2)。具体表现为当降雨强度为60 mm/h时,10 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~6 h内先快速下降,在6~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低了83.3%;20 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~2 h内先快速下降,在2~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低91.7%;30 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~2 h内先快速下降,在2~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低91.9%。当降雨强度为90 mm/h时,10 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~6 h内先快速下降,在6~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低88.4%;20

cm土层处的淋滤液氟浓度在0~4 h内先快速下降,在4~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低85.7%;30 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~2 h内先快速下降,在2~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低91.7%。当降雨强度为120 mm/h时,10 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~10 h内先快速下降,在10~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低86.5%;20 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~4 h内先快速下降,在4~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低80.0%;30 cm土层处的淋滤液氟浓度在0~2 h内先快速下降,在2~72 h内慢慢降低并趋于稳定,氟浓度降低81.2%。氟的运移规律总体上表现为不同降雨强度条件下氟离子在红黏土中的垂向运移表现出随时间增加浓度逐渐降低的规律,且在0—10 cm深度范围浓度变化最明显,表现出降雨强度越大浓度衰减越快。

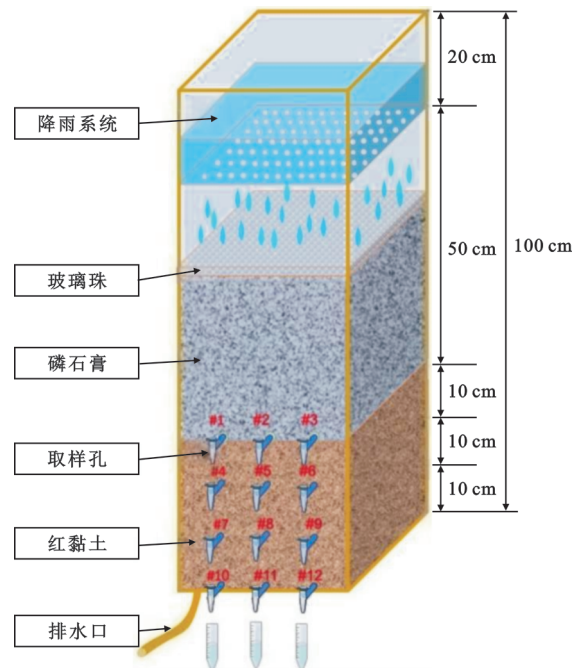


图1 淋滤试验模型装置图

Fig. 1 Diagram of model setup for leaching experiment

从图2可见,当降雨强度分别为60 mm/h,90 mm/h,120 mm/h时,氟在红黏土中的浓度值降低最大分别为91.9%,91.7%,86.5%,具有降雨强度越大红黏土中氟离子运移越快的规律。出现这一规律的原因可能有两方面:一是磷石膏中的氟化物主要以离子形式存在,遇水易于溶解;二是由于贵州处于湿润气候区,降雨量充沛,红黏土天然孔隙比高(常见值为1.0~1.7)、天然含水率高(常见值为30%~65%)^[20],因此能溶解的氟离子越多^[21]。

2.2 磷运移规律

通过物理模型的淋滤试验表明,不同降雨强度

条件下磷在红黏土中的垂向运移表现出与氟离子相似的规律,即随时间增加运移速度逐渐降低的规律(见图 3)。具体运移特征表现为当降雨强度为 60 mm/h 时,10 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~10 h 内先快速下降,在 10~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 99.0%;20 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~4 h 内先快速下降,在 4~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 92.1%;30 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~4 h 内先快速下降,在 4~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 99.3%。当降雨强度为 90 mm/h 时,10 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~16 h 内先快速下降,在 16~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷

浓度降低 97.9%;20 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~10 h 内先快速下降,在 10~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 96.5%;30 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~4 h 内先快速下降,在 4~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 98.8%。当降雨强度为 120 mm/h 时,10 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~6 h 内快速下降,在 6~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 87.9%;20 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~6 h 内先快速下降,在 6~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 97.5%;30 cm 土层处的淋滤液磷浓度在 0~4 h 内先快速下降,在 4~72 h 内慢慢降低并趋于稳定,磷浓度降低 86.7%。

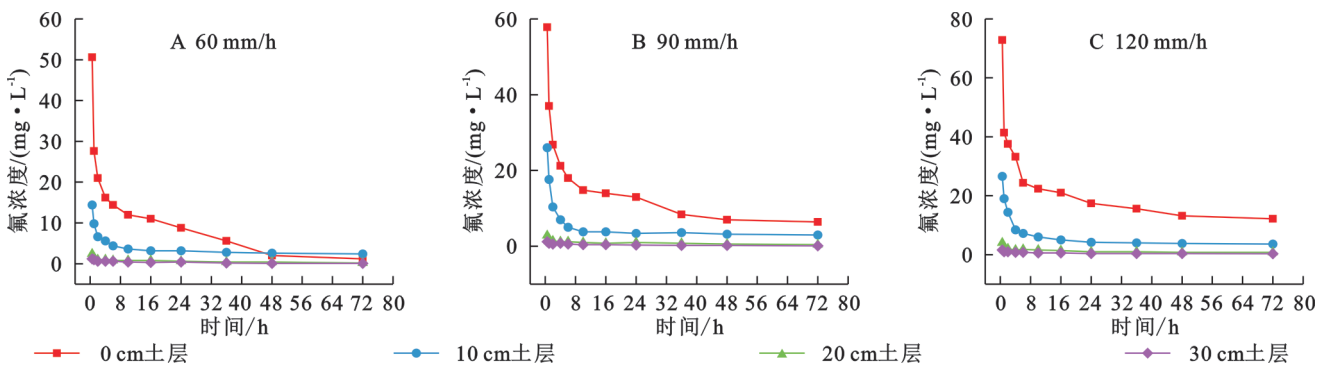


图 2 不同降雨强度条件下氟离子浓度随时间的变化规律

Fig. 2 Variation of fluoride ion concentration with time under different rainfall intensities

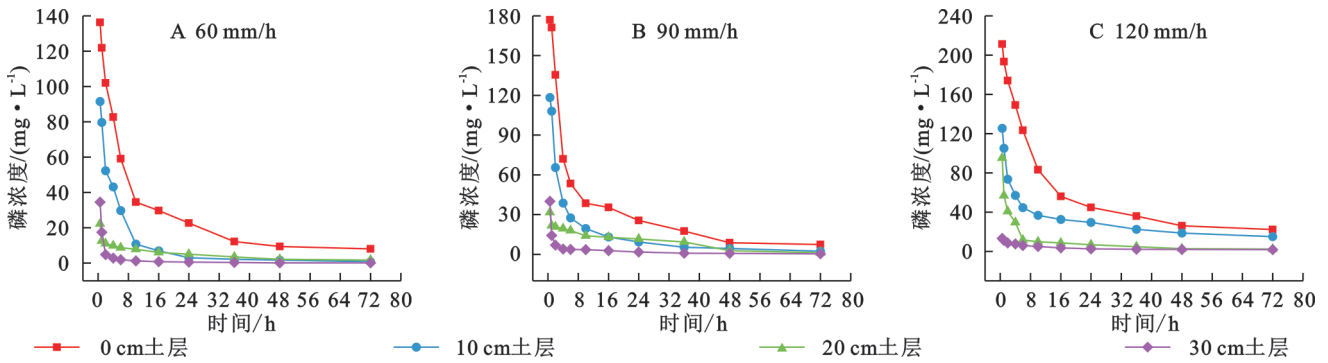


图 3 不同降雨强度条件下磷浓度变化

Fig. 3 Variation of phosphorus concentration under different rainfall intensities

从图 3 可见,当降雨强度分别为 60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h 时,磷在红黏土中的浓度值降低最大分别为 99.3%, 98.8%, 97.5%, 具有降雨强度越大红黏土中磷运移越快的规律。出现这一规律的原因可能是随着降雨强度的增加磷石膏将产生轻微程度的飞溅侵蚀,从而产生小颗粒的磷石膏,增加与水分接触的面积,使得磷石膏被充分淋溶,同时也使雨水渗透排放更为容易^[22-23]。

2.3 溶质运移数值模拟

根据淋滤试验可知,磷石膏淋滤液中氟、磷在红黏土中的运移过程不仅有弥散作用,还有红黏土对它们的吸附作用^[24]。为了揭示磷石膏淋滤液中氟、磷在红

黏土中的运移规律,选取 Richards 修正方程(见式 1)和 Van Genuchten - Mualem 方程(见式 2)作为水分运移模型,土壤溶质运移模型选择双点位非平衡吸附模型(见公式 3),再利用土壤溶质迁移常用的 Hydrus-1D 模型对其进行模拟,将模拟结果与试验实测值进行对比分析,并预测其不同时间及不同深度的运移规律。

Richards 修正方程^[25]:

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} \left[K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial x} - 1 \right) \right] \quad (1)$$

式中: h 是压力水头; $K(h)$ 是非饱和导水率; θ 为容积含水率; t 为时间。

Van Genuchten - Mualem 方程^[26]:

$$\theta(h) = \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{\left(1 + |ah|^n\right)^m} \quad (2)$$

式中： θ 为容积含水率； θ_s 为土壤饱和含水率； θ_r 为土壤残余含水率； h 为压力水头差； a, n, m 均为表征水分特征曲线的参数。

双点位非平衡吸附模型 (Two-site sorption model)^[27]：

$$\left[1 + \frac{f\rho}{\theta} \left(\frac{S_{\max}b}{(1+bc)^2}\right)\right] \frac{\partial c}{\partial t} = D \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} - v \frac{\partial c}{\partial x} - \frac{\alpha\rho}{\theta} \left[(1-f) \frac{S_{\max}bc}{1+bc} - S \right] \quad (3)$$

式中： c 是溶质浓度； ρ 是土壤容重； f 是平衡吸附位点占比； a 是一级动力学速率常数； S 吸附点的吸附量； S_{\max} 是最大吸附量； b 为吸附常数。

2.3.1 参数选取 在Hydrus-1D软件中设置土柱中的土壤为均质土，土柱的高度设置为30 cm，设置模拟时间单位为小时，本次模拟将土柱划分为100个等距网格单元，每个网格所对应的实际土壤厚度为0.3 cm，并分别在土柱的10 cm, 20 cm及30 cm设置观测

点。水分运移模型上边界条件为定流量边界，下边界条件为自由排水边界；土壤溶质运移模型上边界条件为溶质通量边界，下边界条件为零浓度边界。

通过Hydrus-1D软件自带的神经网络预测功能得到红黏土的土壤水分运移参数：残余含水率 Q_r 为0.0972、饱和含水率 Q_s 为0.4588、饱和导水率 K_s 为0.6145 cm/d、进气值倒数 α 为0.015、孔隙大小分布指数 n 为1.252 9、孔隙连通性参数 l 为0.5；运用模型反演功能得到红黏土的土壤溶质运移参数：弥散系数Disp为1.34 cm²/d、阻滞因子 f 为0.199、吸附系数 K_d 为0.316cm³/g、反应系数 α 为0.1。

2.3.2 溶质运移模拟 选取试验组(20 cm磷石膏及90 mm/h降雨)的试验数据，将磷石膏淋滤液中氟、磷浓度的实测值及在Hydrus-1D软件中通过溶质运移模型得到的曲线模拟值相对比，如图4、图5所示，实际值与模拟值具有明显相同的变化趋势，相对浓度值都随着淋滤时间的增加而增加。通过表2可知，不同土层的拟合相关系数 R^2 均在0.9以上，说明拟合程度较为理想，能将上述溶质运移模型应用于磷石膏淋滤液中氟、磷的运移过程中。

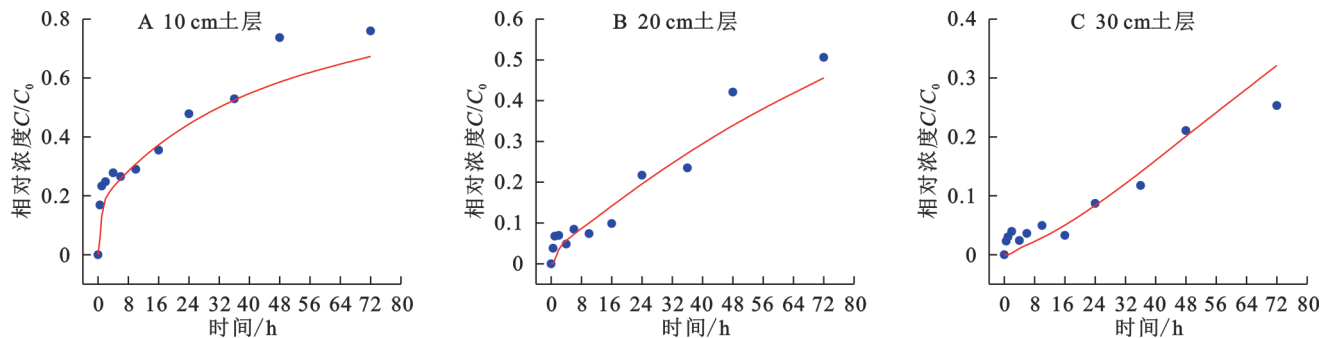


图4 氟相对浓度实测值与模拟值对比图

Fig. 4 Comparison of measured and simulated relative concentrations of fluoride

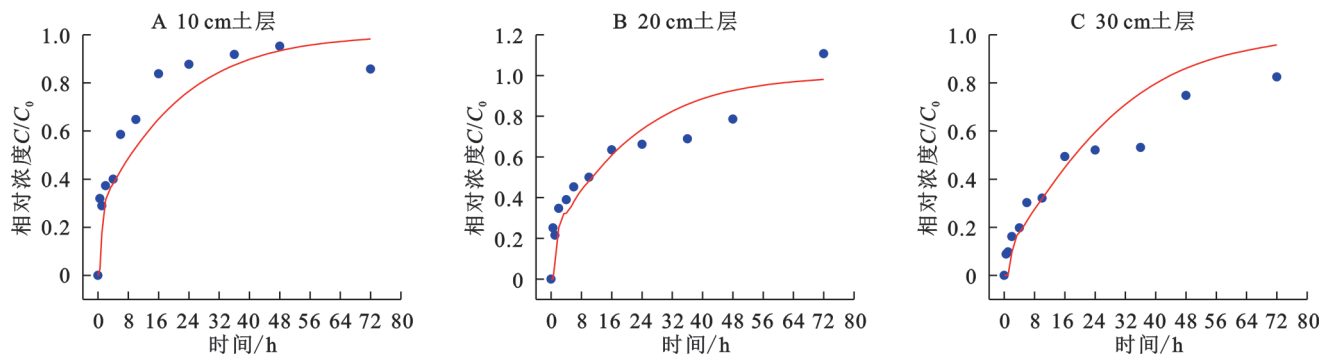


图5 磷相对浓度实测值与模拟值对比图

Fig. 5 Comparison of measured and simulated relative concentrations of phosphorus

2.3.3 预测结果 通过上面数值模拟结果可知，该溶质运移模型能够较好地模拟预测磷石膏淋滤液中氟、磷随淋滤时间的变化规律。根据贵州磷石膏堆场及附近红黏土的实际情况，设计分别在土壤剖面的5 m, 10 m, 15 m, 20 m, 30 m处设置观测点，并将

氟、磷初始浓度设置为50 mg/L和100 mg/L进行运移模拟预测，其结果见图6。由图6可知，磷石膏淋滤液中氟、磷浓度在红黏土中5个观测点的运移模拟分别于74.6 d, 227.5 d, 410.8 d, 596.0 d, 783.1 d达到峰值，其中氟峰值浓度分别为1.42 mg/L, 0.71 mg/L,

0.51 mg/L, 0.42 mg/L 及 0.37 mg/L; 磷峰值浓度分别为 2.61 mg/L, 1.29 mg/L, 0.93 mg/L, 0.75 mg/L 及 0.68 mg/L。

淋滤时间的不同会使溶质浓度变化有明显差异^[28], 为了更好地预测磷石膏淋滤液中氟、磷在不同时间节点下的运移, 分别在淋滤 10 d, 50 d, 100 d, 200 d, 1 000 d 后设置观测点, 并将氟、磷初始浓度设置为 50 mg/L 和 100 mg/L, 模拟预测结果见图 7。由图 7 可知, 磷石膏淋滤液中氟、磷浓度在红黏土中前 4 个观测时间的迁移模拟分别于 0.9 m, 3.0 m, 4.8 m, 8.4 m 达到峰值, 其中氟峰值浓度分别为 8.71 mg/L, 2.06 mg/L, 1.25 mg/L, 0.79 mg/L; 磷峰值浓度分

别为 16.00 mg/L, 3.79 mg/L, 2.29 mg/L, 1.46 mg/L, 1 000 d 时未达到峰值, 氟、磷浓度最大分别为 0.25 mg/L, 0.46 mg/L。

表 2 穿透曲线拟合效果评价系数表
Table 2 Evaluation coefficients of penetration curve fitting performance

元素	土层	R ²	ME	MAE	RMSE
氟	10 cm 土层	0.92551	0.07913	0.08937	0.11970
	20 cm 土层	0.93724	0.03240	0.07351	0.08748
	30 cm 土层	0.95793	0.01714	0.09516	0.12100
磷	10 cm 土层	0.90264	0.12880	0.15610	0.19080
	20 cm 土层	0.91231	0.04413	0.12860	0.15720
	30 cm 土层	0.96447	0.01764	0.10610	0.13440

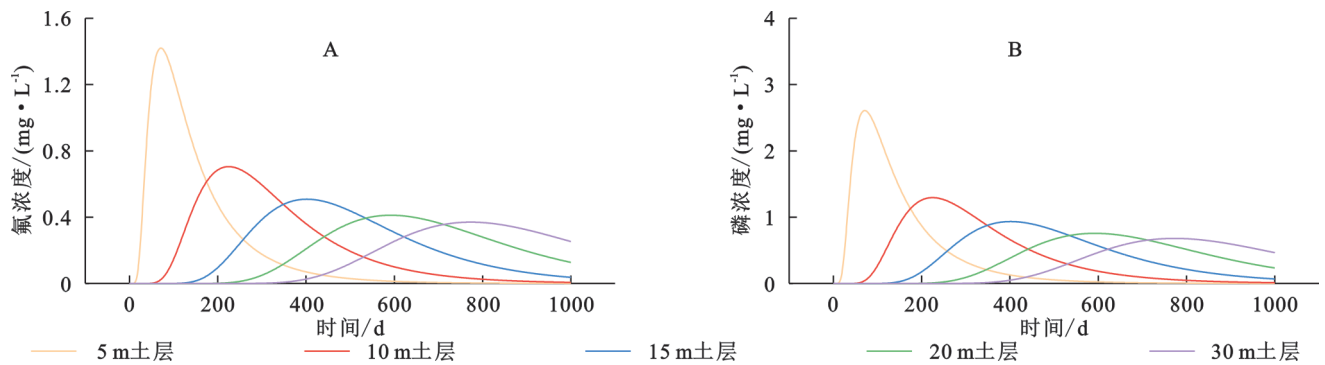


图 6 不同土层深度观测点氟、磷浓度随时间变化趋势预测

Fig. 6 Predicted trends in fluoride and phosphorus concentrations over time for observation points at different soil depths

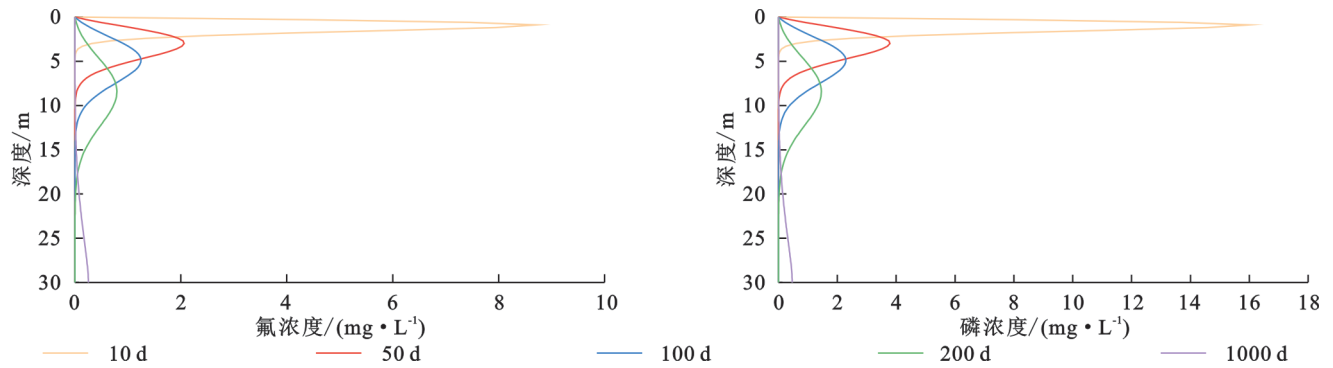


图 7 不同淋滤时间观测点氟、磷浓度随土层深度变化趋势预测

Fig. 7 Predicted trends in fluoride and phosphorus concentrations with soil depth at different leaching durations

根据模拟预测结果可知, 无论是在不同深度土层还是在不同淋滤时间氟、磷浓度变化都是先从低浓度增加到峰值, 再从峰值不断降低为零。

3 结论

(1) 降雨强度越大红黏土中氟、磷运移越快, 浓度降低值越小。当降雨强度分别为 60 mm/h, 90 mm/h, 120 mm/h 时, 氟在红黏土中的浓度值降低最大分别为 91.9%, 91.7%, 86.5%, 磷在红黏土中的浓度值降低最大分别为 99.3%, 98.8%, 97.5%。红黏土的深度越大氟、磷运移越慢, 且在 0—10 cm 深度范围内运移最快。

(2) Hydrus-1D 溶质运移模型能够很好地用于氟、磷在红黏土中的运移过程, 其模拟值与实测值变化趋势一致, 相关系数 R² 均在 0.9 以上。模型预测表明, 在运移过程中无论是在不同深度土层还是在不同淋滤时间氟、磷运移变化都是先从低浓度增加到峰值, 再从峰值不断降低为零, 且峰值浓度随深度增加和淋滤时间延长而显著衰减。

(3) 基于上述规律和模型预测结果: 氟、磷在 0—10 cm 较浅土层运移速度最快, 因此需在磷石膏堆场底部及侧壁设置高效防渗层, 以最大限度地延缓氟、磷等污染物的迁移速度; 根据预测的氟、磷最大迁移距离(1 000 d)及浓度分布(氟小于 0.25 mg/L, 磷小

于0.46 mg/L)可为划定污染控制区提供关键参数;同时根据模型预测的氟、磷在不同深度达到峰值的时间及浓度变化曲线,可用于指导堆场下游地下水监测井的布设深度、监测频率及重点关注污染物(氟、磷)的预警阈值设定。

参考文献(References):

- [1] 陈秋松,吴爱祥.磷石膏充填技术研究进展[J].工程科学学报,2025,47(2):195-214.
Chen Q S, Wu A X. Research progress of phosphogypsum-based backfill technology [J]. Chinese Journal of Engineering, 2025, 47(2): 195-214.
- [2] 邓争荣.红黏土的垂向工程地质特征与作天然建材的特性研究[J].长江工程职业技术学院学报,2007,24(2):25-27.
Deng Z R. On vertical engineering geology characteristic of red clay and analysis of it as a nature construction material [J]. Journal of Changjiang Engineering Vocational College, 2007, 24(2): 25-27.
- [3] 李文娟,颜永毫,郑纪勇,等.生物炭对黄土高原不同质地土壤中NO₃-N运移特征的影响[J].水土保持研究,2013,20(5):60-63,68.
Li W J, Yan Y H, Zheng J Y, et al. Effect of biochar on the transfer of nitrate in three different soils on the Loess Plateau [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2013, 20(5): 60-63, 68.
- [4] 赵斌,王红,张瑞芳,等.片麻岩新成土中硝态氮垂直运移规律模拟研究[J].水土保持研究,2014,21(1):122-126.
Zhao B, Wang H, Zhang R F, et al. Simulation study on nitrate transport and leaching in the gneiss entisols [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2014, 21(1): 122-126.
- [5] Zhen Q, Zheng J Y, Zhang X C, et al. Changes of solute transport characteristics in soil profile after mining at an opencast coal mine site on the Loess Plateau, China [J]. Science of the Total Environment, 2019, 665: 142-152.
- [6] 金梓昕,杨扬,张辉,等.典型退化黑土坡面土壤示踪亮蓝和Br⁻分布特征对比[J].水土保持研究,2025,32(5):95-101,121.
Jin Z X, Yang Y, Zhang H, et al. Comparison of distribution characteristics between Brilliant Blue FCF and Br⁻ as tracers on typical degraded slopes of black soil [J]. Research of Soil and Water Conservation, 2025, 32(5): 95-101, 121.
- [7] 刘仍阳.淹-排水条件土壤中磷的迁移转化实验与模拟研究[D].江苏徐州:中国矿业大学,2018.
Liu R Y. Experiment and simulation study on phosphorus migration and transformation in soil under variable water-logging [D]. Xuzhou, Jiangsu: China University of Mining and Technology, 2018.
- [8] 魏文硕,童菊秀,杨瑞,等.模拟降雨条件下土壤溶质迁移规律试验研究[J].中国农村水利水电,2016(9):168-173.
Wei W S, Tong J X, Yang R, et al. Experimental study on the migration of solutes in soil under simulated rainfall [J]. China Rural Water and Hydropower, 2016(9): 168-173.
- [9] 朱雪千.四川某磷石膏堆场磷、氟浸出规律及磷在地下水中迁移规律研究[D].成都:成都理工大学,2019.
Zhu X Q. Research on leaching of phosphorus and fluoride and phosphorus migration in groundwater at certain phosphogypsum stack in Sichuan Province [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2019.
- [10] 王波.磷石膏渗滤液磷在不同类型土壤中的迁移转化规律研究[D].成都:成都理工大学,2021.
Wang B. Mechanisms of migration and transformation of phosphorus in phosphogypsum leachate in different types from soil [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [11] 强毅,李勇,邱仁敏,等.西南岩溶区非饱和红黏土初始含水率对氟运移影响试验研究[J].安全与环境学报,2021,21(6):2827-2834.
Qiang Y, Li Y, Qiu R M, et al. Experimental study on the influence of initial water content of unsaturated red clay on fluorine transport in Karst area, SW China [J]. Journal of Safety and Environment, 2021, 21(6): 2827-2834.
- [12] 刘亚男.红黏土中双电层对氟化物迁移吸附的影响机制试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2022.
Liu Y N. Experimental study on the influence mechanism of electric double layer on fluoride transport and adsorption in red clay [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2022.
- [13] 王云龙.氟化物在变饱和红黏土介质中迁移试验研究[D].昆明:昆明理工大学,2020.
Wang Y L. Fluoride in metasaturated red clay media migration test study [D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [14] 中华人民共和国住房和城乡建设部.土工试验方法标准:GB/T 50123-2019[S].北京:中国计划出版社,2019.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for Geotechnical Testing Method: GB/T 50123-2019 [S]. Beijing: China Planning Press, 2019.
- [15] 国家质量监督检验检疫总局 中国国家标准化管理委员会.石膏化学分析方法:GB/T 5484-2012[S].北京:中国标准出版社,2013.
Standardization Administration of the People's Republic of China. Methods for Chemical Analysis of Gypsum: GB/T 5484-2012 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2013.
- [16] 闫建,贺珺.黔中红粘土含水性及指标特殊性研究[J].勘察科学技术,2011(1):5-9.
Yan J, He J. Study of water content and index particularity of Qianzhong red clay [J]. Site Investigation Science and Technology, 2011(1): 5-9.
- [17] 王亮亮.贵州某金矿尾渣固化回填体As的析出规律研

- 究[D]. 贵阳:贵州大学, 2023.
- Wang L L. Study on the precipitation regularity of as from tailings solidified backfill of a gold mine in Guizhou [D]. Guiyang: Guizhou University, 2023.
- [18] 国家环境保护总局. 水质 氟化物的测定 离子选择电极法: GB7484-1987[S]. 北京: 中国标准出版社, 1987.
- State Environmental Protection Administration of the People's Republic of China. Water quality; determination of fluoride; ion selective electrode method: GB 7484-1987[S]. Beijing: Standards Press of China, 1987.
- [19] 中华人民共和国生态环境部. 水质-总磷的测定-钼酸铵分光光度法, GB/T11893-1989 [S]. 北京: 中国环境科学出版社, 1989.
- Ministry of Ecology and Environment of the People's Republic of China. Water quality-Determination of total phosphorus-Ammonium molybdate spectrophotometric method, GB/T 11893-1989 [S]. Beijing: China Environmental Science Press, 1989.
- [20] 廖义玲, 朱立军. 贵州碳酸盐岩红土[M]. 贵阳: 贵州人民出版社, 2004.
- Liao Y L, Zhu L J. Guizhou carbonate rock red soil[M]. Guiyang: Guizhou People's Publishing House, 2004.
- [21] 邱仁敏. 非饱和红黏土初始含水率对氟运移影响试验研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2020.
- Qiu R M. Experimental study on the effect of unsaturated red clay initial moisture content on fluorine transport[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology, 2020.
- [22] Wang Y, Chen F X, Zhao H, et al. Characteristics of agricultural phosphorus migration in different soil layers on purple soil sloping cropland under natural rainfall conditions[J]. *Frontiers in Environmental Science*, 2023, 11:1230565.
- [23] 黄中子, 吴晓芙, 赵芳, 等. 红壤对磷的吸附特性及其影响因素研究[J]. *中国给水排水*, 2009, 25(21):91-94.
- Huang Z Z, Wu X F, Zhao F, et al. Phosphorus adsorption characteristics of red soil and its influencing factors[J]. *China Water & Wastewater*, 2009, 25(21): 91-94.
- [24] 韩学威. 四川某磷石膏堆场渗滤液磷在地下水中的迁移转化研究[D]. 成都: 成都理工大学, 2021.
- Han X W. Study on the migration and transformation of phosphorus in the groundwater of leachate from a phosphogypsum storage yard in Sichuan [D]. Chengdu: Chengdu University of Technology, 2021.
- [25] Lipnikov K, Moulton D, Svyatskiy D. New preconditioning strategy for Jacobian-free solvers for variably saturated flows with Richards' equation [J]. *Advances in Water Resources*, 2016, 94:11-22.
- [26] Guarracino L. Estimation of saturated hydraulic conductivity K_s from the van Genuchten shape parameter α [J]. *Water Resources Research*, 2007, 43(11):2006WR005766.
- [27] 冯树娜. 冻融与淋洗协同驱动土壤中汞的迁移过程及HYDRUS数值模拟研究[D]. 陕西杨凌: 西北农林科技大学, 2023.
- Feng S N. Experimental and numerical simulation of transfer process of mercury in soil driven by freezing-thawing and soil leaching technology [D]. Yangling, Shaanxi: Northwest A & F University, 2023.
- [28] 谢燕华, 韩学威, 王波, 等. 四川典型新旧磷石膏磷、氟浸出机制[J]. *应用化工*, 2020, 49(10):2455-2459, 2464.
- Xie Y H, Han X W, Wang B, et al. Phosphorus and fluorine leaching mechanism of typical new and old phosphogypsum in Sichuan [J]. *Applied Chemical Industry*, 2020, 49(10):2455-2459, 2464.

(上接第149页)

- [26] 揣小伟, 黄贤金, 赖力, 等. 基于GIS的土壤有机碳储量核算及其对土地利用变化的响应[J]. *农业工程学报*, 2011, 27(9):1-6.
- Chuai X W, Huang X J, Lai L, et al. Accounting of surface soil carbon storage and response to land use change based on GIS [J]. *Transactions of the CSAE*, 2011, 27(9):1-6.
- [27] 高建峰, 潘剑君, 刘绍贵, 等. 土地利用变化对吴江市水田土壤有机碳储量的影响分析[J]. *地球信息科学学报*, 2011, 13(2):164-169.
- Gao J F, Pan J J, Liu S G, et al. Influence of land use change on topsoil organic carbon storage of paddy fields in Wujiang City [J]. *Geo-Information Science*, 2011, 13(2):164-169.
- [28] Wang X, Li S J, Wang L P, et al. Effects of cropland reclamation on soil organic carbon in China's black soil region over the past 35 years [J]. *Global Change Biology*, 2023, 29(18):5460-5477.
- [29] Bonfanti J, Langridge J, Beillouin D. A global database to catalogue the impacts of agricultural management practices on terrestrial biodiversity [J]. *Data in Brief*, 2023, 50:109555.
- [30] 许煜麟, 赵雅萍, 赵雨晴, 等. 黄土高原退耕还林(草)前后土壤有机碳密度变化及其对气候变化和人类活动的响应[J]. *环境科学*, 2024, 45(8):4696-4708.
- Xu Y L, Zhao Y P, Zhao Y Q, et al. Changes in soil organic carbon density and its response to climate change and human activities before and after the grain for green project on the Loess Plateau [J]. *Environmental Science*, 2024, 45(8):4696-4708.