

DOI:10.16030/j.cnki.issn.1000-3665.201906062

人工溴示踪法评价潜水蒸发可行性数值模拟

王 登¹, 霍思远^{1,2}, 孙 芳¹, 曾 娟¹, 伊明启¹

(1. 长江大学资源与环境学院, 湖北 武汉 430100; 2. 长江大学国际水生态研究院, 湖北 武汉 430100)

摘要: 潜水蒸发是四水转换的重要环节。人工溴示踪法是指示非饱和带水流运动的有效手段, 详细分析蒸发条件下包气带中溴离子运移规律以及示踪剂投放条件对潜水蒸发评价效果的影响, 对于论证利用人工溴示踪法评价潜水蒸发的可行性, 丰富潜水蒸发评价方法体系具有重要意义。利用 HYDRUS 软件构建多组一维非饱和水流—溶质运移模型, 分析不同水位埋深、不同岩性条件下的溴离子运移规律, 进而探究示踪剂投放深度、投放浓度对潜水蒸发评价的影响。结果表明: 水位埋深越浅、包气带土壤颗粒越细, 潜水蒸发强度越大, 溴离子向上运移越快, 其对不同包气带特征条件下的潜水蒸发过程响应显著, 能够有效指示潜水蒸发规律及变化。示踪剂投放深度和投放浓度是影响评价结果的重要人为因素, 投放深度越小, 潜水蒸发计算值与实际值更为接近; 示踪剂投放浓度决定其峰值浓度, 弥散作用使示踪剂分布范围逐渐扩大, 浓度分布趋于均一而难以确定浓度峰值位置, 增大投放浓度有助于延长评价周期。

关键词: 潜水蒸发; 溴离子; 示踪; 数值模拟; HYDRUS; 包气带

中图分类号: P641

文献标识码: A

文章编号: 1000-3665(2020)01-0019-09

Numerical simulation on applicability of bromide tracer method for evaluating groundwater evaporation

WANG Deng¹, HUO Siyuan^{1,2}, SUN Fang¹, ZENG Juan¹, YI Mingqi¹

(1. College of Resources and Environment, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China;

2. International Institute of Water Ecology, Yangtze University, Wuhan, Hubei 430100, China)

Abstract: Ground water evaporation is an important process in water cycling. The bromide tracer is an effective tool to indicate the unsaturated zone flow process. It is of great significance to analyze the transport process of bromide under continuous evaporation condition and to estimate the effects of tracer injection conditions on estimating groundwater evaporation, and then to prove the applicability of bromide tracer for evaluating groundwater evaporation. In this study, HYDRUS software is used to build multiple sets of one-dimensional unsaturated water-solute transport models. Simulations were run to analyze the bromide transport under different conditions of water table depth and lithology, and to estimate the impact of tracer injection depth and concentration on evaluation of groundwater evaporation. The results show that: the bromide concentration peak moved upward fast due to the high intensity of groundwater evaporation when the vadose zone is thick and consisted of fine sediment. The different response of bromide transport to different conditions of vadose zone indicated the potential of bromide tracer to evaluate groundwater evaporation. The injection depth and concentration of tracer are important human factors affecting the evaluation results. The quantity of groundwater evaporation calculated by bromide tracer method was closer to the actual quantity when the injection depth is shallower. The injection concentration of tracer determines its peak concentration observed in

收稿日期: 2019-06-26; 修订日期: 2019-10-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(41602246); 长江大学大学生创新创业训练计划项目(2018226)

第一作者: 王登(1994-), 男, 硕士研究生, 主要从事地下水研究。E-mail: 1556793646@qq.com

通讯作者: 霍思远(1988-), 男, 讲师, 博士, 主要从事地下水与环境研究。E-mail: syhuo@yangtzeu.edu.cn

the soil profile during the experiment period. The dispersion effect gradually enlarges the distribution range of tracer, thus the distribution of bromide concentration tends to be uniform in the profile and it is difficult to ascertain the position of bromide concentration peak. High injection concentration is conducive to prolong the evaluation period. Rainfall and the fluctuation of soil water content are potential negative factors affecting the evaluation results of field tracer test.

Keywords: evaporation from groundwater; bromide; tracer; numerical simulation; HYDRUS; unsaturated zone

潜水蒸发是大气水、地表水、土壤水和地下水循环转换的重要环节^[1]。潜水蒸发过程中,浅层地下水携带盐分在土壤中自下而上运动,水分最终通过土壤蒸发和植物蒸腾的形式耗散,盐分滞留在土壤表层。准确评价潜水蒸发量,对于地下水资源量评价、天然植被生态需水量计算、土壤盐渍化防治等具有重要意义。

潜水蒸发同时受制于大气蒸发能力和土壤供水能力^[2-3],气象条件^[4]、土壤岩性及质地^[5]、土壤结构^[6]、潜水位埋深^[7]、潜水溶解性总固体^[8]、植被类型^[9]、季节变化^[10]和灌溉情况^[11]等众多影响因素,导致潜水蒸发量评价具有较高的不确定性。试验观测法、机理分析法和数值模拟法等方法被广泛运用于潜水蒸发评价研究^[12-14],但多侧重于不同条件下潜水蒸发量的评价,一般未充分考虑水分在包气带中的向上传输过程。人工溴示踪法是指示非饱和带水流运动的有效手段,被广泛应用于干旱、半干旱地区地下水入渗补给评价研究^[15]。然而,蒸发作用对水量的消耗会使土壤水分上移,从而导致示踪剂峰值上移,这不利于入渗补给量的评价^[16-17],但表明利用人工溴示踪法表征蒸发作用驱动下的水分上升运动、进而评价潜水蒸发过程及潜水蒸发量具有理论可行性。因此,详细分析蒸发条件下包气带中溴离子运移规律、示踪剂投放过程中人为因素的影响等具体问题对于论证人工溴示踪法评价潜水蒸发的准确性及适用性,指导野外溴示踪实验具有重要意义。

数值模拟是研究地下水流与溶质运移规律的重要方法之一^[18-19]。本文运用 HYDRUS-1D 软件^[20]建立蒸发条件下的一维非饱和水分—溶质运移模型,模拟不同水位埋深、岩性条件下包气带中溴离子运移规律,进而探讨示踪剂投放深度和投放浓度等因素对潜水蒸发评价的影响。

1 数值模拟

1.1 概念模型

构建天然持续蒸发条件下一维均质非饱和水分—

溶质运移模型(图1)。针对包气带岩性(L)、地下水位埋深(H)、溴示踪剂投放深度(D)和浓度(C)建立多组模型(表1),模型控制单一变量,分析人工溴示踪法各影响因素对潜水蒸发评价的影响,论证方法可行性及适用性。

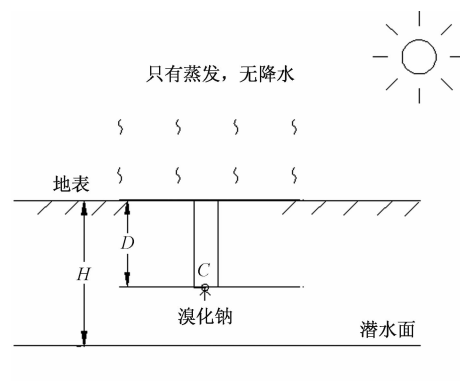


图1 概念模型

Fig. 1 Model of concept

表1 影响因素控制条件设置

Table 1 List of control condition of influence factors

探究因素	单位参数
包气带特征	
水位埋深 H /m	2, 3, 4
岩性 L	粉质壤土、砂土
投放条件	
投放深度 D /m	1, 2, 3
投放浓度 C /(g·L ⁻¹)	100, 300, 500, 700, 900

1.2 数学模型

1.2.1 水分运移模型

水流模型概化为一维均质非饱和水流模型,上边界是大气边界,下边界是变水头边界。垂向一维土壤水分运动模型控制方程由 Darcy-Richards 方程表示^[21]:

$$c(h) \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \left(K(h) \frac{\partial h}{\partial z} \right) + \frac{\partial K(h)}{\partial z} \quad (1)$$

$$\text{初始条件: } h(z, t) = h_0(z) (t = 0) \quad (2)$$

$$\text{上边界: } -K(h) \left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1 \right) = -E \quad (3)$$

$$\text{下边界: } h(z, t) |_{z=D} = h(D, t) \quad (4)$$

式中: h ——土壤负压/cm;
 $c(h)$ ——容水度/ cm^{-1} ;
 $K(h)$ ——土壤非饱和水力传导度/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 h_0 ——初始土壤负压值/cm;
 E ——蒸发量/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 t ——时间/d;
 D ——模型下边界/cm。
土壤水分特征曲线及非饱和水力传导度采用 van Genuchten 方程表示:

$$\theta(h) = \begin{cases} \theta_r + \frac{\theta_s - \theta_r}{[1 + |\alpha h|^n]^m} & h < 0 \\ \theta_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (5)$$

$$K(\theta) = \begin{cases} K_s S_e^L [1 - (1 - S_e^{1/m})^m]^2 & h < 0 \\ K_s & h \geq 0 \end{cases} \quad (6)$$

$$S_e = \frac{\theta - \theta_r}{\theta_s - \theta_r} \quad (7)$$

式中: θ_r ——土壤残余含水率/%;
 θ_s ——土壤饱和含水率/%;
 a, n, m ——土壤水分特征曲线形状参数;
 K_s ——饱和水力传导度/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 S_e ——有效饱和度。

1.2.2 溶质运移模型

溴离子运动基本方程^[18]:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(D \frac{\partial c}{\partial z} \right) - \frac{\partial (qc)}{\partial z} = \frac{\partial (\theta c)}{\partial t} \quad (8)$$

溶质模型上边界为浓度通量边界,下边界为浓度边界条件:

初始条件: $c(z, 0) = c_0(z)$ (9)

上边界条件: $-D \frac{\partial c}{\partial t} + qc = q_s(t) c_s(t)$ (10)

下边界条件: $c(z, t) = c_b(t)$ (11)

式中: D ——水动力弥散系数/ $(\text{cm}^2\cdot\text{d}^{-1})$;
 c ——土壤水中溴离子浓度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$;
 q ——土壤中水流速度/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 c_0 ——初始剖面溴离子浓度分布/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$;
 $q_s(t)$ ——地表水分通量/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 $c_s(t)$ ——地表土壤水中溴离子浓度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$;
 $c_b(t)$ ——下边界土壤水中溴离子浓度/ $(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ 。

1.3 数值模拟

1.3.1 离散化

一维土柱模型以 1 cm 为间距等距剖分,模型模拟期为 3 650 d,采用变时间间隔剖分方式,初始时间间隔为 0.001 d,最小时间间隔为 10^{-5} d,最大时间间隔 2 d。

1.3.2 模型参数

模型中砂土水力参数取自 HYDRUS 软件岩性数据库,粉质壤土水力参数及土壤溶质运移扩散系数取自文[22-24](表 3)。

表 2 土壤水力参数

Table 2 Soil hydraulic parameters

土壤类型	残余含水率 $\theta_r / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	饱和含水率 $\theta_s / (\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3})$	经验参数 α / cm^{-1}	曲线形状参数 n	渗透系数 $K_s / (\text{cm} \cdot \text{d}^{-1})$	经验参数 L
粉质壤土	0.014	0.48	0.013 1	1.518 1	3.12	0.5
砂土	0.045	0.43	0.145	2.68	712.8	0.5

表 3 土壤溶质运移参数

Table 3 Parameter of solute transportation in soil layer

土壤类型	土壤密度 $\rho / (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	纵向弥散性 D_L / cm	自由水中扩散系数 $D_w / (\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$	空气中扩散系数 $D_G / (\text{cm}^2 \cdot \text{d}^{-1})$
粉质壤土	1.45	0.35	1.8	0
砂土	1.136 9	3.93	1.8	0

1.3.3 边界条件及初始条件

水流模型上边界为大气边界,为保证示踪剂在包气带中单方向向上运移,仅考虑土壤蒸发影响,不考虑降水及根系吸水作用。根据栾城地区 2009 年实测水面蒸发量(E_{20})数据(图 2),采用式(11)计算土壤潜在蒸发量 E_p 循环带入模型。模型上边界实际蒸发量根据潜在蒸发量及土壤含水率由 HYDRUS 软件计算得到:

$$E_p = \beta E_{20} \quad (12)$$

式中: E_p ——土壤潜在蒸发量/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 E_{20} ——实测水面蒸发量/ $(\text{cm}\cdot\text{d}^{-1})$;
 β ——折算系数,本文选取 0.5^[25]。

下边界为变水头边界,反映示踪剂投放深度处的水头变化。通过构建下边界为稳定潜水面的水流模型(其他条件均与文中模型相同),确定一定水位埋深条

件下示踪剂投放深度处的水头值,对模型下边界条件进行赋值。持续蒸发条件下,下边界向上通量等于实际潜水蒸发量 $E_{g实}$ 。模型通过循环迭代计算获取持续蒸发条件下的稳定剖面负压分布作为初始条件。溶质模型上边界为浓度通量边界,下边界为浓度边界条件。示踪剂于 1 d 瞬时投放,投放后以 100 d 为间隔观测包气带中示踪剂浓度变化。

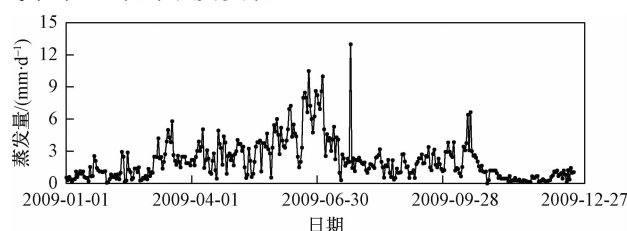


图 2 栾城地区 2009 年土壤潜在蒸发量 (E_p)

Fig. 2 E_p in Luancheng area in 2009

2 溴示踪法计算潜水蒸发量的原理

在无灌溉区,水流携带溴离子示踪剂单一向上运动。溴离子示踪剂向上运移速度与潜水蒸发强度密切相关,蒸发强度越大,溴离子示踪剂向上运移越快;反之,蒸发强度越小,溴离子示踪剂向上运移越慢。在持续蒸发条件下(无入渗),溴离子向上运移速度反映潜水蒸发强度大小,根据单位时段内溴离子浓度峰值上移距离,可以计算时段内潜水蒸发速率 $E_g^{[26]}$,即潜水蒸发计算值:

$$E_g = \frac{\Delta z}{\Delta t} \theta \quad (13)$$

式中: E_g ——潜水蒸发速率/($\text{cm} \cdot \text{d}^{-1}$);

Δt ——计算时段;

Δz ——时段内示踪剂峰值上移距离/cm,由时段初和时段末的示踪剂峰值位置计算而得;

θ ——示踪剂峰值运移区间内的含水率平均值。

3 结果与讨论

3.1 包气带特征对溴离子运移规律的影响

包气带岩性及厚度(水位埋深)是影响潜水蒸发过程的天然因素,包气带中溴离子运移规律随包气带特征变化的显著程度,决定了其对潜水蒸发过程的指示意义。

如图 3 所示,在岩性为粉质壤土的包气带中(溴离子投放深度为 1 m,投放浓度为 900 g/L),示踪剂浓度峰值在投放后不断上移,体现了持续蒸发作用对于包气带水分运动的影响,但随着运移时间的增加,示踪

剂在水动力弥散作用下逐渐均匀分布在包气带中,其对水分运动的指示意义逐渐减弱。

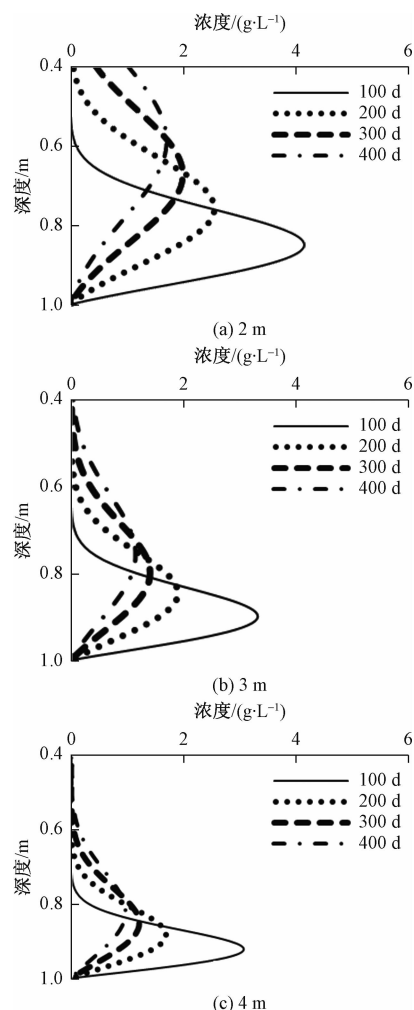


图 3 溴离子在不同水位埋深粉质壤土中运移分布

Fig. 3 Transport profile of bromide ions in silty loam of different water level

水位埋深决定了包气带供水能力,是影响潜水蒸发的首要因素。水位埋深较浅,水流受蒸发作用向上运动显著,随着水位埋深的增大,溴离子从投放深度(1 m)向上运移距离逐渐变小,且溴离子浓度整体偏低。不同水位埋深条件下,溴离子在包气带中运移规律的改变表征了潜水蒸发强度的差异。对比溴示踪法评价潜水蒸发的计算值 $E_{g计}$ 和实际潜水蒸发值 $E_{g实}$ (图 4),发现计算值整体略大于实际值,且水位埋深越大二者值相对差异越明显。当水位埋深较浅时,潜水蒸发作用强烈,溴离子在包气带中运移较快,浓度峰值运移明显,溴离子在土壤中弥散作用和吸附作用等因素影响小,因此两者偏差较小。但当水位埋深过浅时,示踪剂上移空间有限,导致实验周期短,同时示踪剂在

表层累积对实验影响较大。随着时间的推移,潜水蒸发量计算值与实际值差异逐渐减小,这是由于在示踪剂峰值向上运移的过程中,虽然峰值向上运动的速度差异不大,但不同深度处的含水率存在一定差异,含水率随着深度的减小不断减小,潜水蒸发计算量不断减小越来越接近实际值。

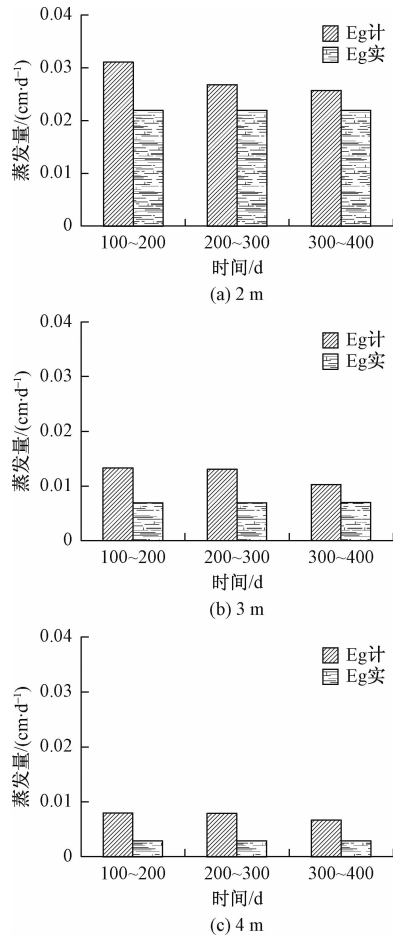


图 4 溴示踪法计算值($E_{g计}$)与实际潜水蒸发量($E_{g实}$)对比图(粉质壤土)

Fig. 4 Comparison diagram of the $E_{g计}$ with $E_{g实}$ (silty loam)

对比包气带岩性分别为粉质壤土和砂土时的溴离子运移情况(图 5),结果表明溴离子峰值运移规律受包气带岩性影响显著,在水位埋深(2 m)、示踪剂投放条件(投放深度 1 m、投放浓度 900 g/L)一致的前提下,溴离子在粉质壤土中运移更快。不同岩性包气带中毛细上升高度存在差异,导致潜水蒸发强度及极限蒸发深度不同。另一方面,持续蒸发条件下砂土中绝大多数孔隙中的水被排空,含水率较低,成为不导水的孔隙,此时砂土的导水率比粉质壤土的导水率低,砂土的潜水蒸发量小于粉质壤土。因此在极限蒸发深度以上,包气带中溴离子向上运动速度与包气带岩性相关,

且能够显著响应岩性差异导致的潜水蒸发强度差异。

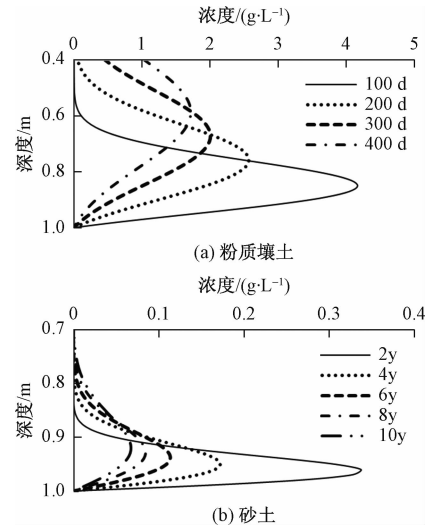


图 5 溴离子在粉质壤土和砂土中运移分布
Fig. 5 Transport profile of bromide ions in silty loam and sand

3.2 示踪剂投放条件对潜水蒸发评价的影响

溴离子示踪法实验条件人为可控,示踪剂可实现定时、定位、定量的投放,但不同投放条件对于溴离子运移规律的影响同样决定了潜水蒸发评价效果。

在野外示踪实验中,溴离子投放深度与极限蒸发深度、及与潜水面的相对位置决定了其垂向运移及分布状态,是影响评价结果的首要因素。如图 6 所示,包气带特征(水位埋深为 4 m,岩性为粉质壤土)一定时,不同投放深度下溴离子垂向浓度分布规律具有一定差异,表现为溴离子投放深度增大时,溴示踪剂运移速度略微增大,这是由于在持续蒸发条件下,土壤含水率随深度的增加而增加,不同深度的土壤水力特征具有差异,从而导致溴离子在不同投放深度条件下运移速率不同。含水率在剖面上的差异同样影响潜水蒸发量评价结果,当示踪剂峰值运移距离接近时,运移区间的含水率越大,评价结果越大(式 13)。如图 7 所示,各模拟时段潜水蒸发量计算值均大于实际值,投放深度浅或在模拟后期,示踪剂运移区间深度较浅,此时计算值与实际值更为接近。开展野外溴示踪试验过程中,应保证示踪剂投放于极限蒸发深度以上较浅的位置,但投放深度过小,溴离子向上运移在地表处积累会对实验造成影响,同时限制了示踪剂上移的区间及评价周期;投放深度过于接近潜水面,地下水位波动可能使其超过投放深度,影响评价结果。

示踪剂投放浓度决定了其对潜水蒸发过程的指示效果。对比不同投放浓度条件下的示踪剂运移规律发

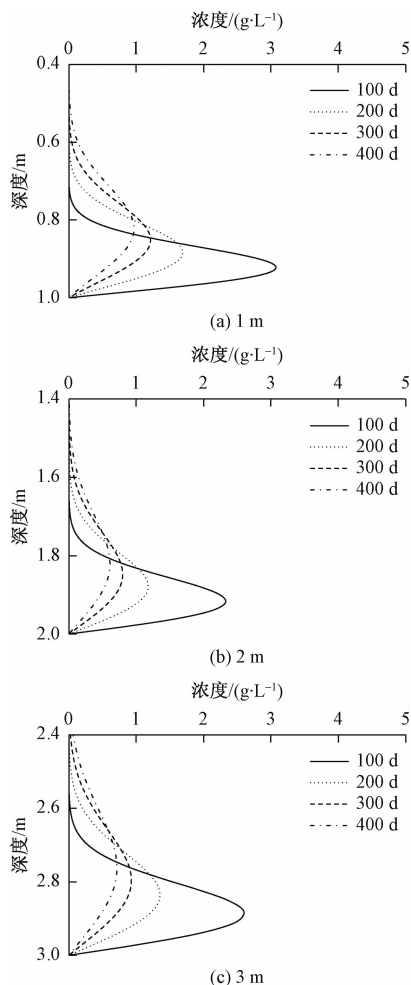


图6 溴离子在不同投放深度的粉质壤土中运移分布

Fig.6 Transport profile of bromide ions in silty loam of different applied depth

现,溴示踪剂浓度越高,浓度峰值越明显(图8)。在岩

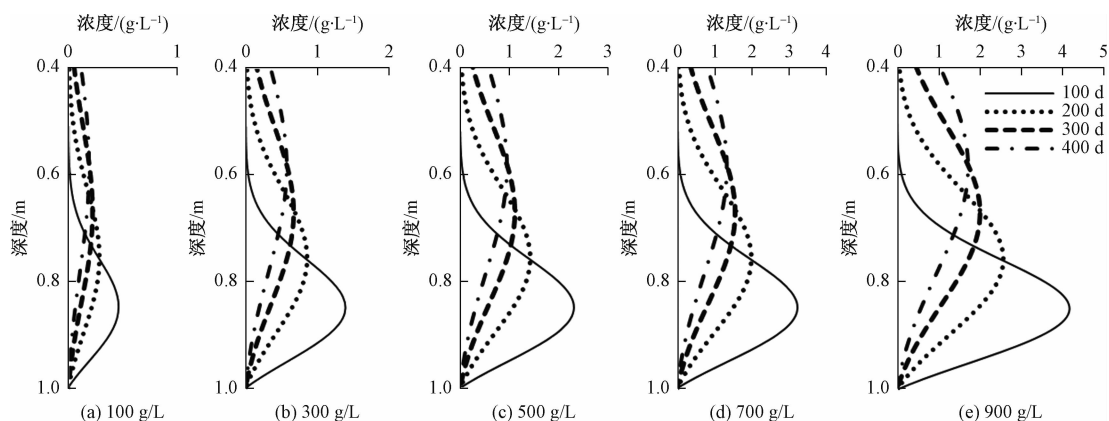


图8 不同投放浓度变化

Fig.8 The changes of different applied concentration

3.3.1 弥散作用和吸附作用的影响

在野外试验过程中,示踪剂随一定速率的土壤水

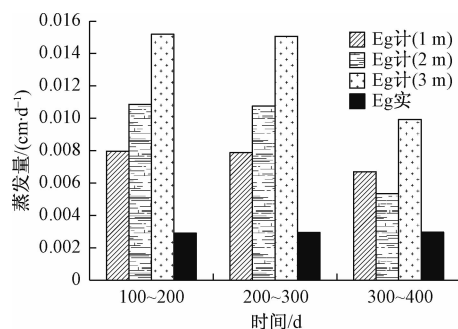


图7 不同投放深度条件下潜水蒸发量计算值

($E_{g计}$)与实际值($E_{g实}$)对比

Fig.7 Comparison of $E_{g计}$ and $E_{g实}$

性为粉质壤土的包气带中,溴离子运移受水流运动和弥散作用共同影响,溴离子浓度峰值不断衰减。溴离子投放浓度越高,溴离子浓度峰值衰减时间越长,相对延长了示踪实验周期,提高评价结果可靠性。持续蒸发条件下,包气带中水流运动相对稳定,且模型设定包气带岩性均一(弥散系数不变),相同时间内峰值运移距离不随投放浓度改变而变化(图9)。但在实际野外示踪实验中,考虑到环境中溴离子背景值的干扰,以及实验后期溴离子浓度峰值过低无法达到仪器检测限等因素的影响,相对增大示踪剂投放浓度,有助于增强其对潜水蒸发过程的指示效果,保证评价结果准确。

3.3 讨论

溴离子在包气带中运移的影响因素较多,需考虑并讨论模型刻画条件与实际条件之前存在的差异及其影响。

流整体运移,弥散作用使其分布范围不断增大,示踪剂在剖面上的浓度分布趋于均一,因而示踪剂取样与投

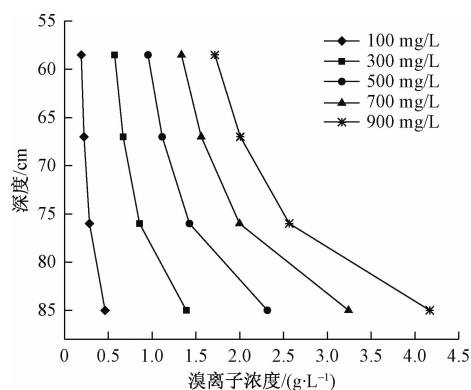


图9 不同投放浓度溴离子峰值运移图

Fig. 9 Peak transport of bromide ions at different applied concentrations

放时间间隔越大,示踪剂峰值越不明显难以判断准确位置,同时实际包气带岩性及结构存在不均一性,示踪剂运用过程更为复杂,剖面上可能出现多个峰值,这均会对评价结果造成影响。

土壤颗粒对包气带中溶质的吸附作用会影响示踪剂的运移过程及其分布规律,尤其当包气带岩性较细时,潜水蒸发强度大,但细粒土壤对于示踪剂的吸附作用会减弱其对潜水蒸发过程的指示效果,增加评价的不确定性,因而选取化学性质相对稳定的示踪剂有利于准确评价潜水蒸发量。前人研究表明,溴离子与土壤中化学物质不发生反应,也不易被土壤黏粒和有机质表面吸附^[27]。因此,利用溴离子评价潜水蒸发可忽略吸附作用的影响。

3.3.2 其他影响因素

模型假定上边界为持续蒸发条件,不考虑降雨,但实际野外试验过程中降雨会使示踪剂随入渗水流向下运移,导致溴离子在包气带中的运移过程更为复杂,增加了潜水蒸发量评价的不确定性。

水位埋深较浅时,包气带含水率的波动性是导致潜水蒸发计算值与实际值存在一定偏差的主要原因。利用溴示踪法评价入渗补给时,计算剖面的深度较大,处于深部的含水率稳定段,因此采用示踪剂峰值运移区间的含水率平均值误差并不大。但是对于潜水蒸发评价问题水位埋深一般较浅,计算剖面埋深浅,含水率存在一定波动性,将平均含水率用于计算会导致计算误差。

影响潜水蒸发评价准确性的人为投放条件除投放深度及投放浓度外,示踪剂投放孔的布孔方式决定了实验期间示踪剂在空间上的分布特征,从而影响有效取样点位置及数目,探究其规律可以提高实验精度并

减少工作量。

4 结论及建议

(1)包气带岩性及厚度是影响溴示踪剂运移的天然因素,水位埋深越浅,包气带岩性越细,潜水蒸发量越大,溴离子向上运移越快,其对潜水蒸发规律的指示效应显著。

(2)溴示踪剂的人为投放条件(投放浓度和深度)直接影响潜水蒸发评价效果。投放深度较小时,潜水蒸发计算值与实际值更为接近。投放浓度决定了示踪剂峰值浓度,影响其对潜水蒸发过程的指示效果。

(3)通过数值模拟手段探究溴示踪法适用于水位埋深较浅,岩性质密的包气带的潜水蒸发量评价。结合包气带岩性及水位埋深等条件,选取适中的投放深度及较大的投放浓度等投放条件,有助于延长评价周期、提高评价准确性。

(4)应用溴离子示踪法评价潜水蒸发需要尽量避免降雨因素的干扰,该方法更适用于干旱和半干旱地区,对于天然降雨较为充沛的研究区,可采取搭建人工遮挡设施以避免降水干扰。

为了减小含水率波动导致计算误差,建立更为合理的溴示踪法评价潜水蒸发的计算公式是需要进一步解决的重要问题。建议通过构建三维变饱和水流-溶质运移模型对其进行进一步探讨示踪剂投放孔的布孔方式对潜水蒸发评价的影响。

参考文献(References):

- [1] 雷志栋,尚松浩,杨诗秀,等. 土壤冻结过程中潜水蒸发规律的模拟研究[J]. 水利学报,1999,30(6): 6-10. [LEI Z D, SHANG S H, YANG S X, et al. Simulation on phreatic evaporation during soil freezing [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 1999, 30(6): 6-10. (in Chinese)]
- [2] 胡顺军,宋郁东,田长彦,等. 潜水埋深为零时塔里木盆地不同土质潜水蒸发与水面蒸发关系分析[J]. 农业工程学报,2005,21(增刊1): 80-83. [HU S J, SONG Y D, TIAN C Y, et al. Relationship between water surface evaporation and phreatic water evaporation when phreatic water buried depth is zero for different soil in Tarim River basin[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(Sup1): 80-83. (in Chinese)]
- [3] YANG M D, YANFUL E K. Water balance during evaporation and drainage in cover soils under different

- water table conditions[J]. *Advances in Environmental Research*, 2002, 6(4): 505 – 521.
- [4] 于海龙,姜峰,苏浩. 气象因素对潜水蒸发影响探讨[J]. *水土保持应用技术*, 2011(3): 24 – 25. [YU L H, JIANG F, SU H. Discussion on the influence of climate factors on phreatic evaporation[J]. *Technology of Soil and Water Conservation*, 2011(3): 24 – 25. (in Chinese)]
- [5] 邱胜彬,张江辉. 浅析土壤质地及结构对潜水蒸发的影响[J]. *水土保持研究*, 1996, 3(3): 30 – 34. [QIU S B, ZHANG J H. Preliminary analysis on effect of soil texture and structure upon groundwater evaporation [J]. *Research of Soil and Water Conservation*, 1996, 3(3): 30 – 34. (in Chinese)]
- [6] 来剑斌,王永平,蒋庆华,等. 土壤质地对潜水蒸发的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(6): 153 – 157. [LAI J B, WANG Y P, JIANG Q H, et al. Study on phreatic evaporation under different soil textures[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31(6): 153 – 157. (in Chinese)]
- [7] 周燕怡,王旭升. 巴丹吉林沙漠潜水蒸发的数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 44 – 54. [ZHOU Y Y, WANG X S. Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 44 – 54. (in Chinese)]
- [8] 贾瑞亮,周金龙,高业新,等. 干旱区高盐度潜水蒸发溶解性总固体折算系数分析[J]. *水文地质工程地质*, 2015, 42(3): 19 – 26. [JIA R L, ZHOU J L, GAO Y X, et al. An analysis of the conversion coefficient of evaporation TDS of the high salinity phreatic water in arid areas [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2015, 42(3): 19 – 26. (in Chinese)]
- [9] 郭占荣,荆恩春,聂振龙,等. 种植条件下潜水入渗和蒸发机制研究[J]. *水文地质工程地质*, 2002, 29(2): 42 – 44. [GUO Z R, JING E C, NIE Z L, et al. Study on infiltration and evaporation mechanism of diving under planting conditions[J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2002, 29(2): 42 – 44. (in Chinese)]
- [10] 朱晓倩,金晓媚,张绪财,等. 格尔木河流域山前平原区蒸散量的分布特征[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(5): 55 – 64. [ZHU X Q, JIN X M, ZHANG X C, et al. Numerical simulation of groundwater evaporation in the Badain Jaran Desert of China [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(5): 44 – 54. (in Chinese)]
- [11] 曹红霞,康绍忠,何华. 灌溉对土壤水分分布和潜水蒸发的影响[J]. *西北农林科技大学学报(自然科学版)*, 2003, 31(5): 69 – 72. [CAO H X, KANG S Z, HE H. Effects of irrigation on soil water distribution and shallow groundwater evaporation[J]. *Journal of Northwest Sci-Tech University of Agriculture and Forestry*, 2003, 31(5): 69 – 72. (in Chinese)]
- [12] RAES D, DEPROOST P. Model to assess water movement from a shallow water table to the root zone [J]. *Agricultural water management*, 2003, 62(2): 79 – 91
- [13] 尚松浩,毛晓敏. 潜水蒸发研究进展[J]. *水利水电科技进展*, 2010, 30(4): 85 – 89. [SHANG S H, MAO X M. Research progress on evaporation from phreatic water [J]. *Advances in Science and Technology of Water Resources*, 2010, 30(4): 85 – 89. (in Chinese)]
- [14] WILLIS W O. Evaporation from layered soils in the presence of a water table[J]. *Soil Science Society of America Journal*, 1960, 24(4): 239.
- [15] WANG B G, JIN M G, NIMMO J R, et al. Estimating groundwater recharge in Hebei Plain, China under varying land use practices using tritium and bromide tracers[J]. *Journal of Hydrology*, 2008, 356(1/2): 209 – 222.
- [16] LIN D, JIN M G, BRUSSEAU M L, et al. Using tracer tests to estimate vertical recharge and evaluate influencing factors for irrigated agricultural systems [J]. *Environmental Earth Sciences*, 2016, 75(22): 1440.
- [17] 谭秀翠,杨金忠,宋雪航,等. 华北平原地下水补给量计算分析[J]. *水科学进展*, 2013, 24(1): 73 – 81. [TAN X C, YANG J Z, SONG X H, et al. Estimation of groundwater recharge in North China [J]. *Plain Advances in Water Science*, 2013, 24(1): 73 – 81. (in Chinese)]
- [18] 杨杨,赵良杰,苏春田,等. 基于 CFP 的岩溶管道流溶质运移数值模拟研究[J]. *水文地质工程地质*, 2019, 46(4): 51 – 57. [YANG Y, ZHAO L J, SU C T, et al. A study of the solute transport model for Karst conduits based on CFP [J]. *Hydrogeology & Engineering Geology*, 2019, 46(4): 51 – 57. (in Chinese)]
- [19] 周超,邵景力,崔亚莉,等. 基于地下水流数值模型的改进 DRASTIC 方法[J]. *水文地质工程地质*,

- 2018,45(1):15-22. [ZHOU C, SHAO J L, CUI Y L, et al. A Groundwater-Model-Based DRASTIC for assessing aquifer vulnerability [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (1): 15 - 22. (in Chinese)]
- [20] ŠIMŮNEK J, VAN GENUCHTEN M T, ŠEJNA M. Development and applications of the HYDRUS and STANMOD software packages and related codes[J]. Vadose Zone Journal,2008,7(2):587-600.
- [21] 霍思远,靳孟贵. Van Genuchten 模型参数对降水入渗数值模拟的敏感性[J]. 地球科学,2017,42(3):447-452. [HUO S Y, JIN M G. Effect of parameter sensitivity of van Genuchten model on numerical simulation of rainfall recharge [J]. Earth Science, 2017,42(3):447-452. (in Chinese)]
- [22] 刘俊秋. 蒸发条件下覆膜盐渍土水盐运移特性及数值模拟[D]. 西安:西安理工大学,2012. [LIU J Q. Characteristics and numerical simulation of salinized soil with plastic mulch on water and salt migration under evaporation conditions [D]. Xi'an: Xi'an University of Technology,2012. (in Chinese)]
- [23] SCHULIN R, VAN GENUCHTEN M T, FLÜHLER H, et al. An experimental study of solute transport in a stony field soil [J]. Water Resources Research, 1987,23(9):1785-1794.
- [24] BEVEN K J, ED HENDERSON D, REEVES A D. Dispersion parameters for undisturbed partially saturated soil[J]. Journal of Hydrology,1993,143(1/2):19-43.
- [25] 胡顺军,康绍忠,宋郁东,等. 阿拉尔灌区参考作物潜在腾发量的变化特征及相关分析[J]. 灌溉排水学报,2004,23(6):59-61. [HU S J, KANG S Z, SONG Y D, et al. Characteristics and dependence analysis reference crop evapotranspiration in Alaer irrigated area in Tarim river basin [J]. Journal of irrigation and drainage, 2004, 23 (6): 59 - 61. (in Chinese)]
- [26] 王健,梁杏,靳孟贵,等. 运用溴离子示踪法评价玛纳斯河流域平原区潜水蒸发[J/OL]. 地球科学, <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20190428.1012.010.html>. [WANG J, LIANG X, JIN M G, et al. Evaluation of phreatic evaporation in manas River basin plain by using bromine tracing method [J/OL]. Earth Science , <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1874.P.20190428.1012.010.html>. (in Chinese)]
- [27] 杨欢. 基于平衡和非平衡模型的包气带土壤中氨氮运移过程研究[D]. 北京:中国地质大学(北京), 2015. [YANG H. Studies of ammonia nitrogen in the vadose zone by equilibrium and nonequilibrium models [D]. Beijing: China University of Geosciences, 2015. (in Chinese)]

编辑:张若琳