



Progress of Numerical Simulation for the Salinization of Soil Caused by the Discharge of Salt Containing Waste Water

Shaocui Li, Lisheng Wang

School of Chemical Engineering and the Environment, Beijing Institute of Technology, Beijing, China

Email address:

a85628449@foxmail.com (Shaocui Li), lishengwang@bit.edu.cn (Lisheng Wang)

To cite this article:

Shaocui Li, Lisheng Wang. Progress of Numerical Simulation for the Salinization of Soil Caused by the Discharge of Salt Containing Waste Water. *Science Discovery*. Vol. 4, No. 5, 2016, pp. 347-352. doi: 10.11648/j.sd.20160405.26

Received: August 28, 2016; **Accepted:** November 9, 2016; **Published:** November 10, 2016

Abstract: The pollution caused by oil extraction waste water to the environment has gradually caused the attention of environmentalists; high salinity oil extraction wastewater will also cause soil salinization and bring great harm to the environment. However, due to the lack of the standard data and instructional experiment methods, the environmental protection department can't set up formal system of desalination processing. In this paper we give the mathematical model for the simulation of the salinization process caused by the discharge of salt-containing waste water, and explain the application of Hydrus-1D for simulating water and salt in the soil on the basis of experiment data. The water content of soil samples is measured through soil-column experiment and salt content is simulated with Hydrus-1D according to the experiment results and model parameters and the composition of the bottoms of soil immersed in the salt solution. The application of Hydrus-1D for simulating water and salt in the soil determines the boundary condition and initial condition of the simulation, and the model parameters are corrected based on the experimental data of water content and salt content in the thirtieth day. The basic soil water movement equation are Richards equation and van Genuchten-Mualem model, and the basic soil movement equation is advection-dispersion equation for simulating; upper boundary condition is atmospheric boundary, lower boundary is a constant flux boundary, i.e., the initial water content, the initial salt content. The model parameters have adaptability and representative for simulating water and salt in the soil.

Keywords: Soil Salinity, Potential Evapotranspiration, Hydrus-1D Software, Simulation

含盐废水排放致沿线土地盐渍化的数值模拟研究进展

李绍萃, 王利生

化工与环境学院, 北京理工大学, 北京, 中国

邮箱

a85628449@foxmail.com(李绍萃), lishengwang@bit.edu.cn(王利生)

摘要: 在石油开采中产生的含盐废水排放所导致的环境问题已经引起了人们的重视。高含盐的采油废水在排放过程中会导致沿线土地发生盐渍化。由于缺乏标准数据和系统的仪器检测方法, 中国的环境保护部门尚未制定含盐废水的治理标准。本文将介绍用于描述含盐废水排放所致土壤盐渍化过程的基本数学模型, 并对目前用于模拟水盐在土壤中迁移的Hydrus-1D软件的应用现状和使用方法, 特别是对软件中所使用的基本参数的确定详细说明, 从而可为进行土壤盐渍化问题研究和环境数值模拟工作提供参考。

关键词: 含盐土壤, 潜水蒸散, Hydrus-1D软件, 模拟

1. 引言

石油开采在世界经济中有着举足轻重的地位，现今大部分国家都采用一次采油、二次采油、三次采油的三步采油法。一次采油是指地层不经过外界补充能量而进行开采。二次采油是指保持地层压力的条件下向地下油层注入水或者注入蒸汽进行开采。三次采油以提高原油的采收率为目的，根据油和水在岩层中流度比的不同，向油层中注入水溶性高分子聚合物。聚合物阻止地层水流向油井，并且驱动和携带原油流向井底，增加采收率。采油过程中由于地层中自然存在大量的盐类并且大量原油出水严重导致采收率低，注入的水在地层中形成高浓度含盐废水。采油废水含有石油烃类、固体颗粒、细菌等物质、无机盐。其金属盐成分主要是地层水中经常含有的钠、钙、钾、镁等元素，采油废水一大特点即矿化度高。

现今采油废水对环境的极大危害已经引起了广泛关注，采油废水的高含盐量也是污染环境的一大原因。西方国家已经开始对油田采出水进行脱盐处理，但在公开文献中尚未查询出采油含盐废水进行工业化脱盐处理的具体报道。含盐土壤的潜水蒸散可以借助计算机进行模拟，获得大量分析数据，并以该数据作为基准进行预报，从而弥补单纯依赖实地布点采样获得的分析数据在时空范围上的局限性。因此，以盐在土壤中的潜水蒸散为研究背景的课题既可以为环境机构提供规范化的数据，突显高含盐量采油废水方向的重要性；也可以为采油废水治理工作中盐的监测与治理提供方法。

在中国废水排放标准中尚无对废水中含盐量的限制性规定，而在石油、化工等行业中有大量含盐废水排放。以胜利油田现河采油厂为例，该厂所处理后的含盐废水直接经广利沟外排入海。在排放过程中，含盐废水主要通过渗入排放渠沿线土地并经过潜水蒸散的过程，导致沿线土地的盐渍化。

随着电子计算机在土壤盐渍化过程模拟技术的发展和相关软件的推广应用，使我们能对土壤盐渍化的发生和进展进行快速的监测预报，进一步深入揭示土壤水盐动态机理，对水盐运动过程进行定量研究，并大大提高预测预报的准确性。有研究结果表明，大型灌溉渠对土地盐渍化有一定的影响[1-4]。一方面灌溉渠的渗漏水可以补给地下水，抬高灌溉地区的地下水位，增加了潜水的蒸散，因而增加了土体及地下水中盐分的积累。另一方面，降雨与灌溉水的向下渗漏又增加了盐分的淋溶，因而必须同时研究蒸发与入渗条件下的土壤水盐动态，才能对盐渍化进行准确预报。据文献报道，渠道两侧和水库周边土壤次生盐渍化主要是由于渠道和水库渗漏补给地下水，抬高附近地下水位而引起的[5]。进行输水渠道两侧土壤次生盐渍化过程的模拟，首先需要模拟渠道排水中的盐分向地下水中的运移过程；其次需要模拟盐分从地下水中垂直向上的运移，及潜水蒸散过程的模拟[4,6]。

2. 水在土壤中的运移模型

2.1. 土壤水分运动方程研究

土壤水是地表至潜水面之间的水分，不同状态下的土壤水对生态环境起着不同的作用，它是联系着地表与地下水资源的重要纽带。1852年至1855年法国水利学家Darcy通过大量实验开启了水动力研究理论的大门，实验得出水在砂质土壤中的渗流规律，研究发现土壤水通量与土壤水势梯度成正比关系。到了1907年，Buckingham将Darcy定律推广到非饱和土壤水的研究中，修正了达西定律得出Buckingham-Darcy定律，并且引入土壤水势的概念，将土壤水运动与能量问题结合在一起。在1931年Richards将Buckingham-Darcy定律与连续相方程相结合，最终确立多孔介质中流体运动基本方程。Richards方程根据所需要解决的问题不同，可使用不同的表达形式，Richards方程可以有三种表达形式，压力水头、含水率以及混合形式。

Richards方程三维表达形式为

$$\frac{\partial \theta}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial x} [K_x(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial x}] + \frac{\partial}{\partial y} [K_y(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial y}] + \frac{\partial}{\partial z} [K_z(\theta) \frac{\partial \phi_m}{\partial z}] - r_w \quad (1)$$

Richards以压力水头形式的垂直方向一维方程为

$$\frac{\partial \theta(h,t)}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial z} \{ K(h) \left[\frac{\partial h}{\partial z} + 1 \right] \} \quad (2)$$

(1-1) (1-2) 式中： θ 为土壤含水率，%； K 为导水率，cm/d； h 为负水压头，cm； t 为时间，min； z 为空间坐标，原点在地面，向上为正；无植物覆盖 $r_w = 0$ 。

土壤水的吸湿与脱湿互相为不可逆过程，以压力水头形式表达的传导系数受滞后效应的影响，可适用于单一吸湿或脱湿的现象。若使用含水率形式表达传导系数则将避免滞后现象的影响。

2.2. 土壤水分运动参数

土壤水分运动方程中涉及到的土壤水分运动参数有导水率(K)、比水容(C)以及扩散率(D)，三者之间存在函数关系。导水率至土壤水在压力水头差的作用下流动的性能，导水率的极限值为饱和导水率以及残余导水率，为导水率的上下理论极限值。导水率为压力水头或含水率的函数，随含水率降低，土壤导水率减小。一般情况下，土壤颗粒越粗导水性能越好，颗粒越细导水性能越差，但是基质吸力较大情况下，粘质土壤的缝隙间依旧具有导水性能，且导水率下降缓慢，因此导水率与压力水头(含水率)之间的关系非常复杂。水分扩散率指单位含水率梯度通过单位面积的水流量，其公式为

$$D(\theta) = K(\theta) \frac{\partial h}{\partial \theta} \quad (3)$$

经验公式为

$$D(\theta) = a e^{b\theta} \quad (4)$$

(1-3) (1-4) 中 a , b 均为经验参数。经验公式适用于含水率较高的情况下水分扩散率的计算, 当含水率较低时, 扩散率随含水率增大而减小; 当含水率较高时, 扩散率趋近无穷大。

比水容量表示水分特征曲线上某一点含水率的斜率, 其公式为

$$C(h) = \frac{d\theta}{dh} \quad (5)$$

2.3. 水分特征曲线

水分特征曲线指非饱和土壤水中的压力水头(基质吸力)与含水率之间的关系。土壤特性、温度等因素都将影响压力水头与含水率之间的关系。国内外的研究人员先后提出若干研究模型, 其中运用广泛的几种有1964年提出的Brooks-Corey模型[7]、1970年提出的Gardner模型[8, 9]以及1980年提出的van-Genuchten模型[10]。以上三种模型的特点就是参数较多, 且均属于非线性参数拟合方法。Brooks-Corey模型用来模拟非饱和土壤水的渗流系数, 缺点是对于颗粒较细的土壤和为扰动土壤的模拟效果不理想。van-Genuchten模型对于较宽范围的压力水头和含水率均具有较强适应性, 但参数较多, 不宜拟合。Gardner模型是体积含水率与压力水头之间的函数关系, 其形式简单, 应用方便。

2.4. 土壤水分运动的初始条件与边界条件

初始条件:

$$h(z, 0) = h_0(z) \quad (6)$$

边界条件:

$$-K(h)\left(\frac{\partial h}{\partial z} - 1\right) = -\varepsilon \quad (7)$$

下边界条件:

$$h(l, 0) = l \quad (8)$$

在(1-6) (1-7) (1-8) 式中: K 为导水率, cm/d ; h 为负水压头, cm ; z 为空间坐标, 原点在地面。

3. 盐在土壤中的运动模型

3.1. 土壤溶质运移研究

土壤溶质分为无机和有机两个部分。自然条件下的无机部分包括: 阳离子为 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 、 Na^+ 、 K^+ 等; 阴离子为 SO_4^{2-} 、 HCO_3^- 、 Cl^- 等; 有的还包括一些其它离子。土壤中有时候存在 Fe^{3+} 、 Zn^{2+} 、 Cu^{2+} 的金属无机盐。有机部分包括氨基酸、腐殖酸等。另外包括悬浮的有机无机胶体、病毒细菌和溶解度较大的气体。随着时代的发展, 土壤中的溶质也可能是一些有重金属元素和农药[11]。

土壤中水盐运移理论的研究起源于达西定律, 固体热传导方程的深入研究, 为土壤溶质运移方向的研究提供很大帮助[12], 土壤中水分的定量研究则起源于Buckingham把能量概念引入土壤水[13]、逐渐开始用偏微分方程来描述非饱和土壤中水分运行[14], 并建立了多孔介质中水的运移方程后开始的。因此土壤水分方程的研究历史比溶质运移方程更悠久。

国外是从上世纪70年代开始研究土壤盐分运移, 建立盐化、碱化模型。Bresler[15]在《盐化与苏打化土壤》一书中总结了盐分运移的原理以及运移模型, 该书代表了当时盐碱土的改良及、盐渍土壤监测成果。

国内的土壤溶质运移研究起步于上世纪80年代, 张蔚榛[1]于1983年提出了初步的土壤中水盐运移模型。李韵珠等人[2]于1985年研究了非稳态蒸发的夹粘土层的水盐运动。1997年, 张妙仙[3]提出渠道两侧以及水库周边土壤的盐渍化主要由渠道和水库渗漏补给地下水, 太高附近地下水位造成, 进行该方向的模拟, 首先需要模拟渠道排水中的盐分向地下水进行运移, 其次再模拟盐分从地下水垂直向上的运移和潜水蒸散。土壤溶质运移的研究已作为多学科交叉基础和前沿研究领域, 越来越得到重视。国内外正在积极进行水盐运移的实验与模拟, 得到很多数据成果[4, 5, 16]。

2009年, 韩霖昌、解建仓等人研究了蓄水条件下水体与相邻土壤之间盐分的运移的实验与模拟[17], 遵守着“改排为蓄”的治理方针, 其通过调节蓄水沟的水位, 使土壤中盐分进行运移来改变盐分在土壤中的垂直分布, 进而实现对盐碱地有效治理。具体研究过程为: 首先提取土壤浸出液, 测量浸出液的PH及电导率等相关数据, 再对水体与相邻土壤界面的盐分运移规律进行分析, 最后经过实验与模拟。韩霖昌、解建仓等人通过在实验室模拟的方法, 得出水体与相邻土壤盐分运移情况与土壤以及水体中盐分浓度有着紧密的联系结论。

土壤中的盐分运移是与水分运移密切相关, 因此在研究过程中可在土壤水分运移的基础上进一步研究盐分运移规律。利用有限差分法将计算域离散, 并在每个结点处建立盐分运移差分方程。

盐分运动基本方程为

$$\frac{\partial}{\partial z}(\theta D \frac{\partial c}{\partial z}) - \frac{\partial qc}{\partial z} - \lambda_1 \theta c - \lambda_2 \rho_0 s = \frac{\partial \theta c}{\partial t} + \frac{\partial \rho_b s}{\partial t} \quad (9)$$

(9) 式中: D 为水动力弥散系数, cm^2/d ; s 为被吸附固相质量分数, %; q 为土壤水流速, cm^3/s ; c 为溶质质量浓度, g/cm^3 ; ρ_b 为盐溶液密度, g/cm^3 ; λ_1 , λ_2 为经验参数。

3.2. 土壤盐分运移的初始条件与边界条件

初始条件:

$$[-D \frac{\partial c}{\partial z} + \varepsilon_1 c]_{z=0} = 0, c_{z=0} < c_m \quad (10)$$

下边界条件:

$$c(z,t) = c_d \quad (11)$$

在(1-10) (1-11)式中: ε_1 为蒸发强度, cm/d, c_0 为初始剖面溶质质量浓度分布, g/cm³, c_m 为土壤溶液饱和和质量浓度, g/cm³; c_d 为地下水矿化度, g/cm³

盐分自排放渠向地下水中的渗透扩散运移过程的计算现在已经广泛采用Modflow等软件来进行。其中Visual Modflow是由加拿大Waterloo Hydrogeology公司在Modflow的基础上开发研制, 主要通过其内含的Modflow、Modpath、MT3D、PEST、Zonebudget等模块进行三维水流、溶质运移、生物降解等模拟计算的可视化专业软件系统。自问世以来, 在全世界范围内的水资源利用、环境保护、城乡发展规划等许多行业和部门得到了广泛应用。在软件应用方面, 李云祯等在四川省环保厅的资助下, 基于Visual Modflow软件对西南矿区土壤的地下水重金属污染进行评价, 模拟了矿区地下水流场和重金属在土壤地下水环境系统中的运移情况, 为矿山土壤地下水重金属污染风险评价、管理和污染修复提供了依据。

4. 盐在土壤中潜水蒸散模拟的进展

从潜水蒸散模型的建立方法来划分, 可以分为潜水蒸散经验模型、半经验半理论模型和基于土壤水分运动微分方程的理论模型。经验模型和半经验模型缺乏对潜水蒸散机理的严格分析, 其中的参数往往缺乏物理意义且较难获取, 因而限制了它们的广泛应用。水盐运动理论最早起源于Darcy定律, 而固体热传导方程则为土壤溶质运移提供了依据。Nassor等建立了土壤中水、热、盐运动方程和连续方程, 其中对于水的运移采用Darcy定律, 对热运动采用Fourier定律, 对盐的传递采用Fick定律, 提出了描述非恒定条件下水、热、盐运动的控制方程, 并在进行水、热和溶质在不饱和和多孔介质中的迁移时提出了传递系数的估值方法。Buckingham等将能量概念引入土壤水[13], Richards等用偏微分方程描述不饱和土壤水的运行, 建立了多孔介质中水流运动的基本方程, 这奠定了土壤水定量研究的基础[14]。从尺度上划分, 可将土壤溶质运移模型划分为三个类型, 即点尺度下、微区域和区域三种尺度下的土壤溶质运移模型。

这一类基于不饱和土壤中水盐运移运动方程的理论数学模型为建立商业化软件奠定了基础。HYDRUS-1D是美国盐土实验室研制成功的用于模拟饱和与不饱和多孔介质中水分、能量、溶质运移的一维数值模型。经过多年的改进与完善, 得到了广泛的认可与应用, 能够较好地模拟水分、溶质与能量在土壤中的垂直分布、时空变化及运移规律, 适用于模拟由于含盐地下水经过潜水蒸散而导致的土壤盐渍化问题。近年来, HYDRUS-1D软件在国内得到了推广和应用。李亮等采用HYDRUS-1D软件针对内蒙古河套灌区无灌溉荒地土壤的水盐运移规律进行了模拟, 研究了田间土壤盐分的变化特征, 模拟荒地地下水之间的垂直水分及盐分的交换过程, 研究结果对进一步探讨盐渍化防治具有重要意义[18]。

(1) Hydrus-1D模型

Hydrus-1D是可以用来计算在不同边界约束条件下的水分与盐分运移规律模型的软件。模型可忽略空气对土壤内的水流运动的影响, 水流状态满足二维或者轴对称三维的等温饱和一非饱和达西水流条件, 水流控制方程采用的是考虑作物根系吸水因素的修正Richards对流-弥散方程。通过对水流区域进行不规则三角形网格剖分, 控制方程采用有限元法进行求解。

模型有多个详细划分的水流边界模型, 可用以灵活处理各类水流边界, 可供选择的边界条件分为地面边界和下端边界, 地面边界类型有: 定压力水头、大气边界产流、变水头、变水头和通量、定水分通量; 下端边界类型有: 定压力水头、定水分通量、水平排水、自由下渗排水、渗出面、变流量、变地下水位。水流区域本身可以是不规则水流边界, 甚至还可以由各向异性的非均质土壤组成。在软件中有不同的水含量方程、植物根系作用方程、土壤介质的水力参数的数据库可供选择。使用Hydrus-1D软件可对水盐在不饱和土壤中的垂直分布、时空变化和以及运移规律进行模拟, 该软件适用于模拟含盐地下水在土壤中潜水蒸散的问题。

(2) Hydrus-1D数学模型

Hydrus-1D采用有限差分法进行水、溶质以及能量的运移情况, 有限差分法即根据时间与空间步长将时间与空间划分, 网格点值通过差分近似代替, 从而将偏微分方程离散化, 近似成线性方程进行数值求解。

(3) Hydrus-1D模拟过程的潜在蒸散量

Hydrus-1D模拟过程中, 潜在蒸散量是一个及其重要的数据, 在输入可变边界条件信息时, 需要输入每天的降水、叶面指数, 以及潜在蒸散量。潜在蒸散量的测量在某些模型中需要借助公式或者其他的软件。潜在蒸散量的获得普遍使用FAO组织的Penman-Monteith公式, 但是如果想要使用该公式得到潜在蒸散量, 需要辐射、湿度等一系列的气象数据。实际的模拟过程中极有可能无法全部得到所需要的数据, 因此需要掌握在气象数据缺失实测条件下如何使用已有数据去进行模拟, 以求最高的模拟准确度。刘钰[19]进行河北雄县和望都两气象站的数据的获取, 对FAO组织推荐的由于实验环境影响造成无法测得所有数据时, 气象数据近似获得方法, 保证实验可行的同时提高实验结果准确度。数据的微小差距可能对潜在蒸散量有很大的影响, 张瑞美[20]研究不同实际蒸汽压的测量方法对Penman-Monteith公式的影响。采用FAO推荐的相对湿度法和露点温度法两种方法计算了实际蒸汽压和旬参考作物蒸发蒸腾量ET₀, 结果表明这两种方法计算结果有98%以上的计算结果其误差小于20%。

(4) Hydrus-1D模拟与遥感技术、Hydrus-2D模拟

金晓媚等[21]运用遥感技术研究了银川平原土壤盐渍化与植被发育和地下水埋深关系, 我们对野外调查获得的土壤含盐量数据进行分析GPS定位得到的含盐量观测点坐标提取出相应位置的NDVI数据, 得到NDVI随土壤含盐量的变化规律。由于表层土壤含盐量超过10g/kg时几乎没有任何植被发育, 因此, 将含盐量大于10g/kg的数值剔除。但是该研究只适应于植被覆盖区, 从植被覆盖区的实验数据来追溯盐在土壤中的潜水蒸散问题, 并且该技术缺乏对地面的穿透能力, 很难和试验区进行准确配合。而使用

Hydrus-1D软件则可以进行更准确的模拟[22]。2014年, 李亮、李美艳、张军军等基于Hydrus-2D模型内蒙古河套灌区耕荒地水盐运移规律的模拟[18], 试验期为4月末至10月初, 试验区位于内蒙古河套灌区, 试验内容为模拟盐荒地土壤的含水率以及含盐率在水平-垂直方向变化趋势。模拟结果能够较好模拟出水盐在土壤中的运移状态, 对灌区水盐监测具有重要意义。

(5) Hydrus模拟盐在土壤中的潜水蒸散问题

早在上个世纪50年代就有研究结果表明大型灌溉渠与盐在土壤中的潜水蒸散有关[23, 24]。一方面灌溉渠渗漏补给地下水, 灌溉区的地下水位提升, 增加潜水蒸散, 增加盐分积累。另一方面, 降水和灌溉水使土壤中的盐分得到浸渍。因此, 只有同时研究蒸发与入渗的水盐动态, 才能全面的研究盐在土壤中的潜水蒸散的问题。

2014年, Zeng等人用Hydrus-1D软件对内蒙古河套灌区进行田间灌溉制度实验[25], 研究灌溉制度对土壤剖面盐分运移的影响, 模拟的数据进行校准和验证, 模型可以准确模拟土壤剖面的水盐运移, 他们模拟了15个不同的灌溉模型, 模拟的结果表明, 灌溉量虽然没有显著影响土壤蓄水, 但灌溉量的增加会加速盐析。然而, 当灌溉量大于20cm时, 盐浸出的加速就不明显了, 相比较只灌溉一次, 间歇性灌溉对土壤蓄水和盐析影响更大, 过度灌溉不会提升盐析。2009年, 金晓媚等人[21]基于遥感数据研究了银川平原土壤盐渍化问题以及植被的发育与地下水埋深关系。实验结果表明, 表层土壤含盐量越大, NDVI越小。在植被发育较好的区域, 每g土壤的含盐量低于3mg, 在中度或者重度盐渍化的地区是几乎没有植被覆盖的。在枯水季节, 位于研究区范围内土壤盐渍化最严重的位置, 地下水位深度大致在1.5m; 而土壤盐渍化比较严重的位置地下水位深度范围在1m至3m。孙法圣在2011-2014年研究了关于Hydrus-1D在大安灌区土壤明渠排水洗盐模拟中应用, 建立了以达西定律为依据的土壤水分运动模型和以对流弥散理论为基础的盐分运移模型, 利用有限元的方法对水盐运移模型进行数值求解[26]。模型的计算结果显示, 经过连续三年洗碱, 重度盐渍上区上层1dm范围内, 含盐量已经下降至1.5mg/cm³以下。灌溉影响深度已达到潜水面附近, 其土壤含盐量下降至可以进行水田种植的水平。并且研究表明排水沟间距为100m左右时, 间距地段的洗盐效果趋于稳定, 100m为最佳排水沟间距。

5. 结论

本文首先介绍了用于描述含盐废水排放所致土壤盐渍化过程的基本数学模型, 并对目前用于模拟水盐在土壤中运移的Hydrus-1D软件的应用现状和使用方法, 特别是对软件中所使用的基本参数的确定详细说明, 本文总结了使用Hydrus-1D软件对盐在土壤中的潜水蒸散的课题进行模拟的有关研究进展, 指出了开展研究应同时考虑蒸发和入渗两个过程。将土壤盐渍化问题与数值模拟方法相结合, 采用Hydrus-1D软件模拟土壤盐渍化问题可将盐渍化过程实时展现, 可预测土壤中水盐含量, 使之符合自然环

境下水盐在土壤中的运移, 从而可为开展土壤盐渍化问题的环境数值模拟工作者提供参考。

致谢

本文为国家自然科学基金面上项目《高含盐采油废水排放导致土地盐渍化的过程数值模拟研究》(41471412)的阶段性成果之一。

参考文献

- [1] 张蔚榛. 地下水非稳定流计算方法和地下水资源评价[M]. 北京: 科学出版社, 1983.
- [2] 李韵珠, 陆锦文, 黄坚. 蒸发条件下粘土层与土壤水盐运移(国际盐渍土改良学术讨论会论文集)[M]. 北京: 农业大学出版社, 1985: 176-190.
- [3] 张妙仙. 潜水蒸发规律和调控中国水利部水利科技的曙光[M]. 北京: 科学技术出版社, 1997.
- [4] 李韵珠, 李保国. 土壤溶质运移[M]. 北京: 科学出版社, 1998.
- [5] 王利生, 李绍萃, 孙俭. 油田高含盐采油废水排放致沿线土地盐渍化问题调查: (1) 胜利油田支脉河沿线[EB/OL]. 中国科技论文在线 [2015-12-17], <http://www.paper.edu.cn/html/releasepaper/2015/12/916/>.
- [6] 雷志栋, 胡和平, 杨诗秀. 土壤水研究进展与评述[J]. 水科学进展, 1999, 10(3): 311-318.
- [7] Milly P. C. D. Estimation of the Brooks-Corey parameters from water retention data [J]. Water Resource Research, 1987, 23: 1085-1089.
- [8] Gardnerwr, Hilleid, Benyaminiy. Post irrigation movement of soil water redistribution [J]. Water Resource Research, 1970, (6) 851-861.
- [9] Gardnerwr, Hilleid, Benyaminiy, Benyaminiy. Post irrigation movement of soil water Simultaneous redistribution and evaporation [J]. Water Resource Research, 1970, 1148-1153.
- [10] van-Genuchten T. H. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soil [J]. Soil Sci Soc Am J, 1980, 44: 892-898.
- [11] 李保国, 胡克林, 黄元仿, 刘刚. 土壤溶质运移模型的研究及应用 [J]. 中国农业大学资源与环境学院, 2005, 37(4): 345-352.
- [12] Narasimhan. T. N., Hydraulic characterization of aquifers, reservoir rocks and soils: A history of ideals [J]. Water Resources Research, 1998 (1): 33-46.

- [13] Buckingham.E, Studies on the movement of soil water [J]. U.S. Dep. Of Agric., Washington, D.C , 1907: 37-38.
- [14] Richards L. A. Capillary condition of liquids in porous mediums [J]. Physic, 1931,1:318-333.
- [15] Bresler E, Mcneal B. L, Carter D.L. Saline and sodic soils (principles dynamics modeling) [M]. Advanced Series in Agricultural Science, 1982, 10-236.
- [16] 陈启生, 戚隆溪. 有植被覆盖条件下土壤水盐运动规律研究 [J]. 水利学报, 1996(1):38-45.
- [17] 韩霁昌, 解建仓, 王涛. 蓄水条件下蓄水沟水体与相邻土壤的盐分运移规律研究 [J]. 水力学报, 2009, 40(5):635-640.
- [18] 李亮, 李美艳, 张军军. 基于HYDRUS-2D模型模拟耕荒地水盐运移规律 [J]. 中国水利水电科学研究院牧区水利科学研究所, 内蒙古自治区水利水电勘测设计院, 灌区解放闸灌域沙壕渠试验站, 2014, 1(1):66-71.
- [19] 刘钰. 气象数据缺测条件下参照腾发量的计算方法 [J]. 水力学报, 2001, 3(03):11-16.
- [20] 张瑞美, 彭世彰, 徐俊增. 不同 e_a 计算方法对 Penman-Monteith公式的影响 [J]. 河海大学学报(自然科学版), 2006, 34(6):660-663.
- [21] 金晓媚, 胡光成, 史晓杰. 银川平原土壤盐渍化与植被发育和地下水埋深关系 [J]. 中国地质大学, 2009, 23(1):23-27.
- [22] 王旭升. 用Hydrus-1D模拟剖面变饱和度地下水流简明手册 [J]. 中国地质大学.
- [23] 席承藩等译. 盐渍土的发生演变 [M]. 北京: 科学出版社, 1959.
- [24] 尤文瑞, 土壤盐渍化预测预报的研究 [J], 土壤学进展, 1988, (1):1-8.
- [25] Wenzhi Zeng, Jiesheng Huang. Soil salt leaching under different irrigation regimes: Hydrus-1D modelling and analysis [J]. J Arid Land, 2014, 6(1): 44-58.
- [26] 孙法圣, 程品. Hydrus-1D在土壤明渠排水洗盐模拟中应用 [J]. 节水灌溉, 2014(2):44-51.