

# 盐碱地水盐运移研究现状与展望

刘 鹏<sup>1,2</sup>, 姜月华<sup>3,4</sup>, 杨 海<sup>3,4</sup>, 杨 辉<sup>3,4</sup>, 吕劲松<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>中国地质科学院, 北京

<sup>2</sup>中国地质大学(北京), 北京

<sup>3</sup>中国地质调查局南京地质调查中心, 江苏 南京

<sup>4</sup>自然资源部流域生态地质过程重点实验室, 江苏 南京

收稿日期: 2021年11月4日; 录用日期: 2021年11月19日; 发布日期: 2021年11月29日

## 摘 要

盐渍土在我国广泛分布, 西北、华北、东北及沿海是我国盐渍土的主要集中分布地区, 耕地中也有大量盐渍化土壤分布。盐碱地治理和改良的关键在于探究土壤水盐运移规律, 而盐碱地监测技术和水盐模型又是模拟和预测农田土壤水盐动态变化最为有效的途径。本文从监测技术、影响因素及模型应用等角度进行综述, 进而指出了土壤水盐运移机理研究的不足之处, 在此基础上, 进一步提出水盐运移研究未来的发展趋势。

## 关键词

盐碱地, 水盐运移, 监测技术, 影响因素, 数值模拟

# Development and Prospect of the Research on Water-Salt Transport in Saline-Alkali Soil

Peng Liu<sup>1,2</sup>, Yuehua Jiang<sup>3,4</sup>, Hai Yang<sup>3,4</sup>, Hui Yang<sup>3,4</sup>, Jinsong Lv<sup>3,4</sup>

<sup>1</sup>Chinese Academy of Geological Science, Beijing

<sup>2</sup>China University of Geosciences, Beijing

<sup>3</sup>Nanjing Center, China Geological Survey, Nanjing Jiangsu

<sup>4</sup>Key Laboratory of Watershed Eco-Geological Processes, Ministry of Natural Resources, Nanjing Jiangsu

Received: Nov. 4<sup>th</sup>, 2021; accepted: Nov. 19<sup>th</sup>, 2021; published: Nov. 29<sup>th</sup>, 2021

## Abstract

Saline-alkali soils are widely distributed in northwest, north, northeast and coastal regions in China, and large areas of arable land are salt affected as well. The key to the management and im-

文章引用: 刘鹏, 姜月华, 杨海, 杨辉, 吕劲松. 盐碱地水盐运移研究现状与展望[J]. 地球科学前沿, 2021, 11(11): 1506-1516. DOI: 10.12677/ag.2021.1111145

provement of saline-alkali soils is to explore the law of soil water and salt migration, and saline-alkali soils monitoring technology and water-salt models are the most effective ways to simulate and predict the dynamic changes of soil water and salt in farmland. This article reviews the monitoring technology, influencing factors and model application, and then points out the shortcomings of the research on the mechanism of soil water and salt transport. On this basis, it further proposes the future development trend of water and salt transport research.

## Keywords

Saline-Alkali Soils, Water-Salt Transport Mechanism, Monitoring Technology, Influencing Factors, Numerical Simulation

Copyright © 2021 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

## 1. 引言

土壤盐渍化是全球性生态环境问题之一，也是最常见的土地退化类型之一，对世界农业可持续发展构成较大威胁[1]。盐渍化土壤不仅会造成土壤肥力下降，还会造成现有的耕地资源减少，给国民经济带来重大损失，威胁地区生态环境安全。盐渍土在我国广泛分布，从热带到寒温带、滨海到内陆、湿润地区到极端干旱的荒漠地区，均有大量盐渍土的分布。我国有各类盐碱地  $3.6 \times 10^7$  公顷(见图 1)，占全国可利用土地面积的 4.88% [2]。可见，盐碱地作为我国后备土地资源是具有广阔前景的。一般而言，水盐运移遵循“盐随水来，盐随水去”的基本规律，受气象因素、土壤质地等多种因素影响，而掌握水盐运移规律是治理盐碱地重要前提，盐碱地监测技术以及模型应用的研究已取得长足的发展，尤其在田间观测过程整体数据较为困难，使得学者们更加注重数值模拟的发展从而解决了这一难题。此外，田间监测数据可以为数值模拟结果进行校正和验证，在此过程中进一步为水盐调控技术的建立奠定了理论基础。

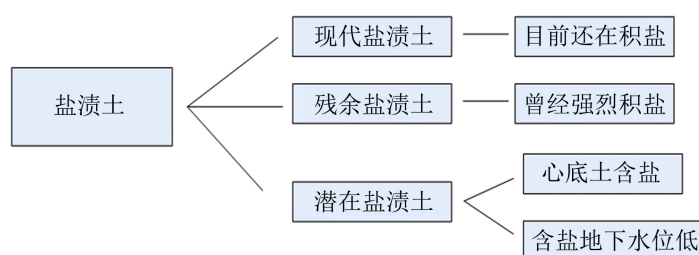


Figure 1. Classification of saline-alkali soils

图 1. 盐渍土分类

本文在查阅国内外文献的基础上，综述了土壤水盐运移过程和运移机理研究，重点介绍了土壤水盐运移研究中几个主要研究领域，如监测技术、影响水盐运移的因素、数值模拟等国内外研究取得的进展，进而指出了土壤水盐运移机理研究的不足之处，在此基础上，进一步提出水盐运移研究的发展趋势。

## 2. 盐渍土监测技术的研究现状

盐渍化的形成与演变是一个复杂的动态过程，其受到自然条件和人类活动的共同影响，因而具有区

域性的特征。传统的取样分析方法、电学方法、遥感方法和同位素方法是监测土壤盐渍化的主要方法，这些方法各自针对的研究区域尺度不同，监测的精度也不相同，因此适用性也存在较大的差异。

野外调查是传统取样分析方法的主要手段，现场取样分析进而获取土壤盐渍化的直观信息，是盐碱地监测最可靠的方法。取样的形式多种多样，包括纯随机取样、分层随机取样、网格取样和整体取样等。在传统取样分析法中，土壤监测过程的前提也是重要环节就是现场的布点。原因也很好理解，只有样点比较均匀地分布在全工作区域内，并且能划分出包含各类景观的典型采样区区域，监测工作才具有代表性。采集到的土壤样本，我们既可以用仪器测定电导率，也可采用离子色谱仪测定  $\text{Na}^+$ 、 $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{K}^+$ 、和  $\text{Cl}^-$  等离子含量后计算出相应的土壤全盐含量[3] [4] [5]。原位的采样分析虽然可以直接可靠地掌握现实的土壤盐分和水分等数据，然而很难实现连续动态监测是该种方法的主要弊端，而且数据的准确性较难得到保证，计算值与实际运移结果往往相差 1~2 个数量级，此外，采样周期长、耗资损时以及偶然误差较大、代表性差也是亟待解决的问题[6]。

随着人们对盐渍土研究的不断深入，传统监测方法已无法满足学者的需求，学者们也转向使用快速、便捷的仪器和手段[7]，电学方法就是其中的一种，目前电学方法在盐渍土监测的应用主要是通过以下 4 个方面：土壤 1:5 浸出液的电导率、土壤原位的电阻率、电磁感应装置以及时域反射仪(TDR)。

Archie (1942)提出的阿尔奇公式是电学方法应用在土壤学的标志，以电导率作为指标描述了土壤的特性。原理是土壤盐分组成的不同会导致电导率的差异，根据这一原理，美国盐土所通过测定土壤浸出液的电导率来判定盐度。建立浓度与电导率的相关关系以及确定浸出液的水土比是一开始研究的重点，用测定土壤的浸出液电导率来确定其盐度，也就是传统取样分析法[8] [9]。后来随着研究的不断深入，人们才逐步研发了如时域反射仪(TDR)、电导率法、电磁法以及电阻率法的相关仪器。

时域反射仪(TDR)最早用于土壤含水率的测定，后来又被应用在土壤电阻率的测定[10] [11]。同步测量水分及电阻率、灵敏度较高且具有非侵入性是该种方法的鲜明特点，但研究发现其与电磁法和电导率方法相比较在稳定性和简便性上还存在着较大的差距[12] [13] [14]。

电磁感应仪为非接触直接测量土壤表观电导率(见图 2)，其显著优点是实现了大面积土壤盐渍化的测量，是介于遥感方法与田间采样实测方法之间具有一定现实意义的采样形式。Rhoades *et al.* (1981)等人最先利用电磁感应方法测定土壤盐度，后来他又创造了车载式的 MESS 系统，使土壤盐度测量更加便捷快速[15] [16]。

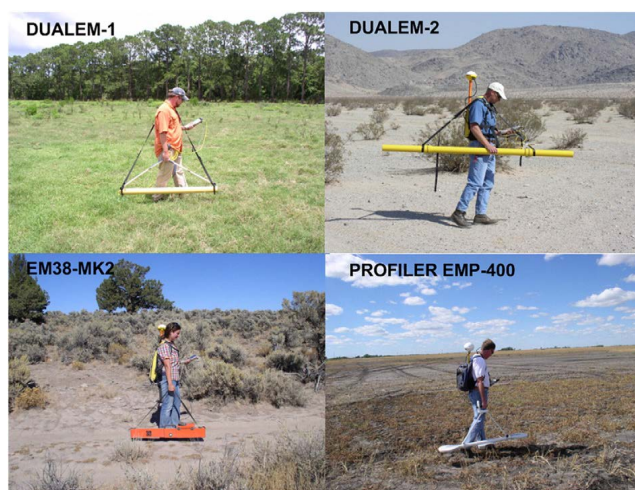


Figure 2. Four common electromagnetic induction sensors  
图 2. 四种常见的电磁感应仪

上世纪 90 年代以来,采用电磁感应仪对土壤盐分、含水量、粘粒含量等土壤属性分布特征方面的研究已经大量开展,其研究尺度也已经扩展到区域尺度,并成为研究土壤其它重要性质的有利工具。迄今为止,国内外众多学者研究了利用电磁感应仪测量的土壤表观电导率进行土壤盐渍特征的预测与评价,有关这方面的研究较为广泛和深入[4] [17] [18] [19] [20]。该方法具有测量速度快、数据精度高、采集信息丰富、测量的实时性与直接获得结果等特点,但是其并非直接测量土壤电导率,而是在深度上的测量结果进行加权函数处理,因此电磁感应仪测定的土壤表观电导率受到诸多因素的影响,其中土壤水分中可溶性盐浓度起着关键性作用。在一定范围内,土壤水分含量的增加会提高土壤可溶性盐浓度,但超过该范围的水分含量则会使可溶性盐浓度下降。这种水分含量与盐溶液的动态平衡使得电磁感应仪能在一个较大的水分变动范围内有效。除了水盐因素以外,土壤温度、粘粒含量及类型、地下水性质和母质的性质(如含有磁性矿物)等因素也需要学者去掌握了解[21]。

电阻率方法与电磁法特征相似,都具有操作便捷、测量准确、监测无损的优点,18 世纪 20 年代美国的 Frank Wenner 创造出该方法,之后经各国学者不断改进,形成了如今的 Wenner 装置[22],在不断的探索过程中,诸如二极法、三极法等一些常用的电极布设方式也随之被开发出来[23]。Wenner 装置在 1993 年就被应用于盐分监测[24],1996 年被改造成拖曳式装置[25],用于大尺度的测量。学者还针对 wenner 法测得的电阻率数据,研发了反演软件 RES3DINV 等用于更加直观的描述土壤特性[26]。然而,由于电极的测量都要与被测量物体紧密接触,因此其监测属于侵入式测量,对于无法紧密接触的介质其测量的准确性就会大幅下降。

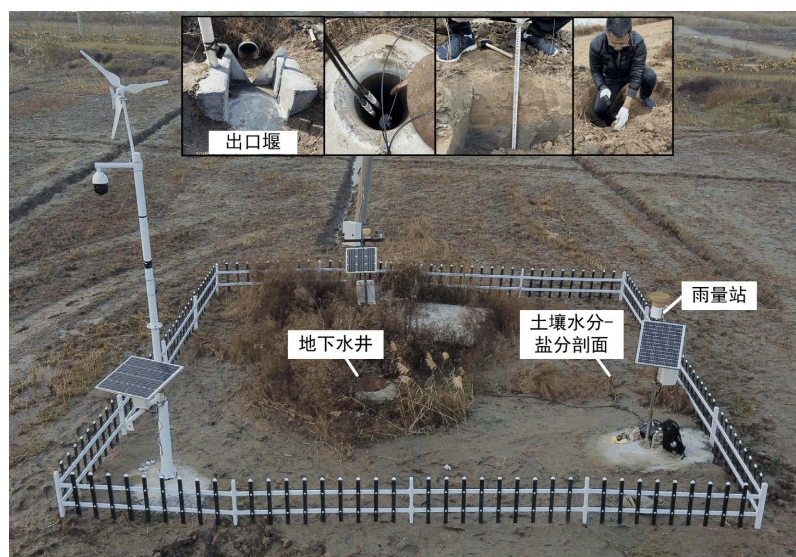


Figure 3. Soil salinization monitoring base of Rudong, Jiangsu  
图 3. 江苏如东土壤盐渍化监测基地

随着无线技术的日益发展,拖曳式、车载式的监测仪器也不能完全满足当前研究需要,而基于物联网的在线监测技术应用已成为主流趋势。基于物联网的监测技术有两大优势,其一,实现了无线操控原位仪器,实现了人物的有效连接,其二,其终端的安装方便、可灵活选取典型区域典型时段监测、一次布设可进行长期连续监测,因此已经在现代化建设各个领域得到了广泛的应用[27] [28] [29] [30]。目前,无线传输技术已经被引入到地质灾害的监测中,如崩塌、滑坡等突发性地质灾害以及变化缓慢的地下水污染等[31] [32]。对于土壤盐渍化灾害的在线监测技术,土壤电导率(盐分)软硬件研制是当前研究重点。

土壤电导率在线监测仪器投入到实际监测应用中已有大量成功案例[33]。例如南京地质调查中心在江苏如东建立的无线土壤盐分监测系统,由传感器、遥测数据采集系统、基站、上位机服务器及客户终端共同组成,实现数据的采集、传输和处理,用户可以通过客户终端在任意地点、时间查看并处理测量数据(见图3)。而美国 Decagon 公司生产的 Em50 土壤电导率在线监测仪,其下位机为具备 5 通道的无线模式数据采集器,可以配置多种类型传感器,用户通过遥测模块将指令传输到 DataStation 上,进行多个 Em50 的数据收集,用户则可随时下载数据。目前国内关于土壤盐渍化在线监测仪器的应用范围相对较小,往往局限在某一研究机构或某一研究区,大面积推广工作还没开展起来,究其原因一是仪器设备大面积布设成本相对较高,二是作为一种较高科技含量的仪器面世时间并不长,大多数用户还停留在传统方法和利用遥感进行监测上。但是不可否认,在线监测是未来土壤盐渍化监测的主要方法和技术手段。

### 3. 影响土壤水盐运移的因素

土壤水盐运动是一个复杂的系统,是土壤水分、盐分以及植物等各因子间相互制约耦合,构成了土壤水盐动态变化。而土壤盐渍化是各种自然和人为因素综合作用下对区域土壤水盐平衡产生影响的结果[34]。其中自然因素主要包括地下水埋深、气象因素、矿化度和土壤质地等,人为因素主要包括灌溉措施和土地利用类型的变化等。

#### 3.1. 自然因素

##### 3.1.1. 地下水埋深

刘广明(2002)通过研究发现埋藏浅的潜水与非饱和土壤水及大气水作用剧烈,是形成土壤盐渍化与沼泽化的主要原因[35];王水献(2004)对地下水浅埋区(埋深小于等于 2 m)水平排水条件下的农田地下水、土壤水和表层(0~30 cm)土壤盐分变化进行对比分析发现土壤盐分的变化与与地下水埋深的动态变化密切相关(负相关系数为 0.75)[36];张红(2008)通过对人工控制不同潜水位(1.0 m、1.4 m、1.8 m、2.2 m、2.5 m)下苏打盐渍土土壤含水量和盐分在剖面深度和实验期间的变化进行分析发现土壤盐分含量在深度 60 cm 或 100 cm 处表现为最大值[37];李小倩(2017)在咸水矿化度下(6.0 g/L),模拟设置 6 种潜水水位发现:0~10 cm 土层土壤含盐量均表现为先升高后降低,呈抛物线型。在 0~1.2 m 潜水位下,土壤含盐量增加显著,在 1.2 m 处达到最大值;10~20 cm 土层土壤含盐量在潜水水位 0~0.9 m 土壤含盐量逐渐降低[38];随着研究的不断深入与全面,我们可以将潜水埋深分为三种情况:潜水面位于土壤耕层、潜水面位于土壤耕层底部与临界潜水面之间、潜水面低于临界潜水面三种情况,系统讨论了各种潜水埋深条件下,潜水与土壤水相互作用的原理及过程[39](朱文东 2019)。

##### 3.1.2. 气象因素

尹建道(2002)将室内降雨人工实验与野外脱盐实验的结果相结合,并将土壤和淋溶液中的电导率、盐基粒子以及 PH 的动态变化进行了对比分析,探讨了滨海盐渍土土壤的脱盐动态规律与机理[40];赵耕毛(2003)采用原状土柱,对滨海盐渍土的水盐运动进行了室内模拟研究。结果表明:小雨很难使土体脱盐;中雨能使土体在短时间内部分脱盐,但在较长时间范围内整个剖面脱盐效果不理想;大雨能使整个土壤剖面处于脱盐状况,因此脱盐效果好[41]。

##### 3.1.3. 地下水矿化度

李莎(2009)通过室内试验初步研究了入渗水矿化度对点源滴灌土壤水盐运移特征的影响,结果发现在入渗土层深度相同时,入渗水矿化度越高,土壤剖面含水率和土壤剖面含盐量相对越大[42];王艳(2011)通过用淡水、微咸水和咸水淋洗重度盐碱土发现,微咸水和咸水的入渗速率较高。微咸水和淡水淋洗后

土壤含盐量下降幅度较咸水大,但淡水淋洗后土壤 pH 值升高明显,因此,微咸水淋洗重盐碱土脱盐效果较好[43];王全九(2015)将微咸水入渗特性的研究分为:1)微咸水矿化度对土壤入渗特征的影响;2)微咸水钠吸附比对土壤入渗特征的影响;3)土壤理化特性对土壤入渗特征的影响[44];唐胜强(2016)在研究淡水与微咸水降水头入渗的差异时发现:采用淡水灌溉的黄棕壤表层脱盐、深层积盐;采用微咸水灌溉的土柱剖面因表层土壤孔隙结构被破坏,持水能力增强,使表层土壤与深层土壤均积累了较高含量盐分[45];王震(2016)通过自主研发改进型高密度电阻率探杆监测系统调控不同矿化度淋洗水质、时间、含水率变化三个因素,发现淋洗水质矿化度越高,水盐运移速率越大,不同矿化度水质淋洗后,土体垂向上表现出盐分重新分布的变化规律[46];王全九(2017)采用 300 mT 磁感应强度恒定磁水器对不同矿化度微咸水(0.14、2、3、4、5 g/L)进行磁化处理,进行土柱实验发现:磁化微咸水入渗能增加土壤持水能力,相同土层深度的土壤体积含水率显著增加,此外,土壤微咸水磁化后土壤脱盐率也显著提高[47]。

#### 3.1.4. 土壤质地

土壤颗粒是土壤结构形成的重要基础,土壤砂粒、粉粒和黏粒的含量会影响到土壤物理、化学和生物过程,土壤质地与结构对水盐运移影响较大,土壤空隙直接影响水盐垂直方向运动[48]。从不同质地盐碱分析结果看,盐分高低次序为重壤质、中壤质、黏质、轻壤质、砂壤质、砂质,且盐碱地中土壤颗粒分形维数与土壤阳离子交换量呈显著正相关。土壤颗粒越细,毛细管上升高度和速度越大,但土壤质地越黏重其淋滤性越差,越容易发生盐渍化[49]。土壤质地一般先影响地下水状况然后再间接影响土壤盐渍化的空间分布。不同质地土壤水分扩散和热性质也不同,温度影响水盐运动的同时,水盐运动反过来也会影响土壤热性质。

### 3.2. 人为因素

#### 3.2.1. 灌排措施

排水沟渠是田间耕作不可获取的一部分,当产生降雨或田间灌溉时,排水沟的设置也极大地影响着水盐的运移。(李卓然 2018)通过在膜下滴灌棉田的基础上设置 10 cm 与 30 cm 两种深度排盐浅沟,结果表明土壤电导率受到排盐浅沟影响较为明显,排盐浅沟深度越大,排盐效果越明显[50];将模拟技术运用于沟渠排水对水盐运移的影响逐渐成为研究重点,李开明(2018)模拟分析了明沟排水条件下盐碱地棉花一个生育周期内盐分变化情况,结果发现距离明沟越近,排盐的效率越高[51],胡钜鑫(2019)以膜下滴灌棉田土壤水盐运移为研究对象,根据室内实验参数及田间测坑实验在 HYDRUS-2D 中建立模型,分析模拟结果对比不同排盐沟的上口宽对土壤排盐效果的影响[52];黄凤(2020)通过采用排水沟调控坝后农田的地下水位,并利用 HYDRUS 模拟出在不同地下水位和深度的条件下土壤含水率与含盐量的变化情况,结果发现通过排水沟降低地下水位可有效防止耕地盐渍化[53]。

#### 3.2.2. 土地利用类型的变化

随着世界人口的快速增长,人地矛盾显得格外突出,因此大量非农业用地通过开发转变成农业用地,这也打破了原有的如毁草开荒对土壤界面和结构都会产生剧烈的影响,破坏土壤的“淡化层”,导致盐分由深层运移到地表,产生盐渍化[54];滩涂围垦、新土填埋等土地整理和开发利用方式改变了局部地区土壤的结构和类型,造成了盐分运输通道和转移速率的变化。

## 4. 土壤水盐运移数值模拟

田间实地观测法和模型模拟法是土壤水盐运移研究主要研究方法,由于田间实地观测法在研究土壤水盐运移规律时有诸多缺点,诸如耗时费力、成本高以及各种条件限制等,人们开始转向运用模型研究

土壤水盐运移, 而有关土壤水运移的模型也很多, 它们从各自不同的角度讨论影响水分动态平衡的一个或多个因素[55]。Feddes (1982)把早期建立的土壤水分平衡模型; 与作物生产函数综合在一起, 可同时评价环境因素变化对土壤水分利用和作物产量的影响, 使水平衡模型向更高级、综合的方向发展, 同时也使模型变得更加复杂[56]。Zhang (1990)等用导水率对数函数的高斯协方差函数分析了三维各向异性土壤中的溶质运移[57]。Dhanapala (1992)利用土壤水平衡模型模拟了斯里兰卡干旱区红土壤上种植玉米的土壤水分平衡, 结果很令人满意[58]; 20世纪90年代, Toride 等人针对稳定下渗和初级运动线性吸附过程构建了CDE模型[59]。

对于土壤水盐运移数值模拟, 经过国内外学者坚持不懈的研究, 已建立多种多样的数学模型, 在此笔者将其归纳如表1所示:

**Table 1.** Summary of mathematical models of soil water - salt transport mechanism

**表 1.** 土壤水盐运移数学模型汇总

名称	含义
物理模型	主要采用相似准则, 通过建立实物体来模拟所要研究的问题。
宏观水文盐渍化模型	以区域到流域为单位的宏观水文盐渍化模型的特点是进行大量的野外定点观测, 根据观测资料找出规律, 绘出变化曲线, 求出经验公式来描述水盐运动。
确定性数学模型	由基本的对流 - 弥散方程和它们的辅助方程构成, 模型中参数、变量及边界条件都是确定性的。
传递函数模型(TFM)	为了较准确、简单地确定田间溶质宏观运移特性, 将溶质在土壤空隙中的复杂运移作为随机处理。
随机统计模型	以 Melsen 的土壤空间变异理论为基础, 将土壤参数视为平稳随机空间变量, 通过分析野外测量结构空间矩得到均值、方差等统计参数, 从而确定出土壤参数在随机场中的统计结构。

溶质运移模拟计算需要具备准确、充足的基础数据和适宜的计算方法。合适的计算方法不仅影响模拟计算的精度和效率, 对选取数值方程的实际应用也起到至为关键的作用。目前关于溶质运移方程的数值解析法主要可分为三类: 1) 欧拉观点是以固定不动的坐标系为参考系; 2) 拉格朗日观点是以跟随流体质点运动的坐标系为参考系的坐标方法; 3) 欧拉 - 拉格朗日观点, 即将前两者结合起来进行计算。

有限元法、有限差分法、特征差分法、迎风差分法和连续可动质点法是土壤溶质运移的数值计算方法。在这些计算方法中, 当问题的 Pecllet 数较大时, 就会发生“数值弥散”和“数值波动”现象。为了解决这一难题, Frind 提出 Peaceman 交替方向 Galerkin 有限单元法。部分学者又把特征法的思想引入到 Frind 交替方向中, 提出了交替方向特征有限单元法。随后又有研究学者引用 Yanenko 的时间分裂思想, 即 Eulerian-Lagrangian 有限差分法等, 这种方法是把一个多维问题拆分成几个一维问题, 并对每个一维问题采用上述方法求解, 使得计算量大大减少。

目前描述饱和非饱和和多孔介质水和溶质运移的数值模型多数是以 Richards 方程和对流弥散方程为基础[60], 在潜埋条件下, 地下水通过毛管力作用进入包气带土壤层, 直接参与物质与能量的转换过程, 并且把包气带中发生的各种物理、化学及生物过程与地下水联系在一起, 从而形成一个复杂的联合动水系统。

## 5. 存在问题及研究展望

### 5.1. 存在问题

随着监测手段以及数值模拟技术的不断发展, 学者们对水盐运移规律研究也在不断深入, 尽管研究成果越来越丰富, 但目前盐碱地研究尚有不足之处如下:

- 1) 只考虑单一因素(气象、水文、地形等)对土壤水盐运移的影响已不能满足当前研究需要, 多种因素耦合作用下的水盐运移规律的研究将是下一步研究重点。
- 2) 国内外研究土壤水盐动态大多采用室内人工模拟的方法, 对土壤水盐动态变化的自然过程研究较少。总结原因如下 a) 自然过程的研究一般周期相对较长; b) 自然过程易受到各种环境因素的影响和限制, 给数据的采集和分析会带来很大困难。
- 3) 有关水盐运移数学模型目前还主要以室内试验为基础, 缺乏在野外条件下的应用。

### 5.2. 研究展望

针对以上提出水盐运移规律研究存在的问题, 笔者认为未来盐碱地研究的发展方向如下:

- 1) 考虑多种影响因素耦合作用下盐分运移规律研究。
- 2) 由于影响土壤水盐含量的因素众多, 对土壤水盐运移规律的野外观测和室内土壤理化性质的常规分析应同时进行, 通过更多和更全面的指标来探讨和揭示土壤水盐含量的动态变化规律和空间分布格局。
- 3) 水盐运移的模型研究仍将是今后研究的重点内容, 但需深入, 不同模型有不同的适用性, 对已提出的模式和方程加以完善; 进一步找出各自的应用条件和限制因子, 合理确定边界条件, 如何确定土壤水力特征的空间结构, 建立溶质运移的参数方程是目前的重要课题。

## 6. 结论

- 1) 盐碱地监测技术发展先后经历了: 传统的取样分析、饱和浸提液、时域反射仪、电磁感应装置、电阻率法以及土壤电导率在线监测技术。这些方法并不是相互独立, 往往可以配合着使用。
- 2) 盐碱地水盐运移受自然因素和人为因素共同影响。其中自然因素主要包括地下水埋深、气象因素、矿化度和土壤质地等, 人为因素主要包括灌溉措施和土地利用类型的变化等。
- 3) 土壤水盐运移数学模型发展先后经历了: 物理模型、宏观水文盐渍化模型、确定性数学模型、传递函数模型(TFM)以及随机统计模型。

## 基金项目

由中国地质调查局地质调查项目“长江经济带地质资源环境综合评价”(DD20190260)资助。

## 参考文献

- [1] 杨玉坤, 耿计彪, 于起庆, 王嘉, 于文勇, 赵薇. 盐碱地土壤利用与改良研究进展[J]. 农业与技术, 2019, 39(24): 108-111.
- [2] 宋静茹, 杨江, 王艳明, 宋常吉. 黄河三角洲盐碱地形成的原因及改良措施探讨[J]. 安徽农业科学, 2017, 45(27): 95-97+234.
- [3] 刘庆生, 刘高焕, 励惠国. 辽河三角洲土壤盐渍化现状及特征分析[J]. 土壤学报, 2004, 41(2): 190-195.
- [4] 姚荣江, 杨劲松, 姜龙. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异及其剖面分布特征研究[J]. 浙江大学学报: 农业与生命科学版, 2007, 33(2): 207-216.
- [5] 刘文全, 于洪军, 徐兴永. 莱州湾南岸表层土壤含盐量与有机质空间分布的定量研究[J]. 海洋通报, 2014, 33(3): 277-282.



- [6] 杜国平, 董巧云. 非饱和地下水溶质运移的测量仪器与测量方法[J]. 江苏农业学报, 2003, 19(2): 127-128.
- [7] 杨劲松, 姚荣江, 刘广明. 电磁感应仪用于土壤盐分空间变异性的指示克立格分析评价[J]. 土壤学报, 2008, 45(4): 585-593.
- [8] McNeal, B.L., Oster, J.D. and Hatcher, J.T. (1970) Calculation of Electrical Conductivity from Solution Composition Data as an Aid to *In-Situ* Estimation of Soil Salinity. *Soil Science*, **110**, 405-414. <https://doi.org/10.1097/00010694-197012000-00008>
- [9] Bohn, H.L., McNeal, B.L. and O'Connor, G.A. (1979) *Soil Chemistry*. Wiley, New York. <https://doi.org/10.1097/00010694-198006000-00010>
- [10] Topp, G.C., Davis, J.L. and Annan, A.P. (1980) Electromagnetic Determination of Soil Water Content: Measurements in Coaxial Transmission Lines. *Water Resources Research*, **16**, 574-582. <https://doi.org/10.1029/WR016i003p00574>
- [11] Dalton, F.N., Herkelrath, W.N., Rawlins, D.S., *et al.* (1984) Time-Domain Reflectometry: Simultaneous Measurement of Soil Water Content and Electrical Conductivity with a Single Probe. *Science*, **224**, 989-990. <https://doi.org/10.1126/science.224.4652.989>
- [12] Heimovaara, T.J., Focke, A.G., Bouten, W., *et al.* (1995) Assessing Temporal Variations in Soil Water Composition with Time Domain Reflectometry. *Soil Science Society of America Journal*, **59**, 689-698. <https://doi.org/10.2136/sssaj1995.03615995005900030009x>
- [13] Reece, C.F. (1998) Simple Method for Determining Cable Length Resistance in Time Domain Reflectometry Systems. *Soil Science Society of America Journal*, **62**, 314-317. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200020003x>
- [14] Rhoades, J.D. (1996) Salinity: Electrical Conductivity and Total Dissolved Solids. In: Sparks, D.L., Ed., *Methods of Soil Analysis: Part 3. Chemical Methods*, Soil Science Society of America, Madison, 417-435. <https://doi.org/10.2136/sssabookser5.3.c14>
- [15] Rhoades, J.D. and Corwin, D.L. (1981) Determining Soil Electrical Conductivity-Depth Relations Using an Inductive Electromagnetic Soil Conductivity Meter. *Soil Science Society of America Journal*, **45**, 255-260. <https://doi.org/10.2136/sssaj1981.03615995004500020006x>
- [16] Rhoades, J.D. (1992) Instrumental Field Methods of Salinity Appraisal. In: *Advances in Measurement of Soil Physical Properties: Bringing Theory into Practice*, Soil Science Society of America, Madison, 231-248. <https://doi.org/10.2136/sssaspecpub30.c12>
- [17] Williams, B.G. and Hoey, D. (1987) The Use of Electromagnetic Induction to Detect the Spatial Variability of the Salt and Clay Contents of Soils. *Soil Research*, **25**, 21-27. <https://doi.org/10.1071/SR9870021>
- [18] 宋长春, 阎百兴, 宋新山. 电磁技术在苏打盐渍化土壤研究中的应用[J]. 地理科学, 2002, 22(1): 91-95.
- [19] 陈玉娟. EM38 大地电导仪的应用研究[J]. 干旱地区农业研究, 2004, 22(2): 146-148.
- [20] 李海涛, 李小梅, Philip B, 等. 电磁感应方法在土壤盐渍化评价中的应用研究[J]. 水文地质工程地质, 2006, 33(1): 95-98.
- [21] Rhoades, J.D. and Halvorson, A.D. (1977) Electrical Conductivity Methods for Detecting and Delineating Saline Seeps and Measuring Salinity in Northern Great Plains Soils. Excessive Salt Accumulation.
- [22] ARS-W-US Agricultural Research Service, Western Region (USA), 1977.
- [23] Burger, H.R. (1992) *Exploration Geophysics of the Shallow Subsurface*. Prentice Hall, Hoboken.
- [24] Rhoades, J.D. (1993) Electrical Conductivity Methods for Measuring and Mapping Soil Salinity. *Advances in Agronomy*, **9**, 201-251. [https://doi.org/10.1016/S0065-2113\(08\)60795-6](https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60795-6)
- [25] Lund, E.D., Colin, P.E., Christy, D., *et al.* (1999) Applying Soil Electrical Conductivity Technology to Precision Agriculture. *Proceedings of the Fourth International Conference on Precision Agriculture*, St. Paul, 19-22 July 1998, 1089-1100. <https://doi.org/10.2134/1999.precisionagproc4.c12b>
- [26] Loke, M.H. and Barker, R.D. (1996) Rapid Least-Squares Inversion of Apparent Resistivity Pseudosections by a Quasi-Newton Method. *Geophysical Prospecting*, **44**, 131-152. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2478.1996.tb00142.x>
- [27] 龚永坚, 盛法生, 陈霓. 基于无线传输的轮胎气压监测系统的设计[J]. 农业机械学报, 2005, 36(6): 79-81.
- [28] 杨柳, 毛志怀, 蒋志杰, 等. 基于无线传输的粮仓温湿度远程监测系统[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 155-159.
- [29] 明五一, 沈娣丽, 刘武发. 基于 ARM7 无线传输的热电偶远程监控系统[J]. 单片机与嵌入式系统应用, 2010(3): 61-64.
- [30] 孙宏志, 王学成, 刘一萌, 等. 基于 3G 无线传输的测震台站监控设备的研制[J]. 地震工程学报, 2014, 36(2): 387-392.
- [31] 胡胜利, 万晋军. 基于 GPRS 的地下水自动监测系统的设计[J]. 水利水电技术, 2011, 42(1): 89-91.

- [32] 李禹霏, 陈世昌, 徐湘涛. 贵州都匀马达岭地质灾害链的自动化监测[J]. 工程地质学报, 2014, 22(3): 482-488.
- [33] 徐艳玲, 马道坤, 曾庆猛, 等. 一种多点土壤电导率实时监测系统的研制[J]. 中国农业大学学报, 2006, 11(5): 75-80.
- [34] 赵学伟. 基于 GPR 的黄河三角洲滨海盐渍土水盐含量探测模型研究[D]: [硕士学位论文]. 泰安: 山东农业大学, 2019.
- [35] 刘广明, 杨劲松. 地下水作用条件下土壤积盐规律研究[J]. 土壤学报, 2003, 40(1): 65-69.
- [36] 王水献, 周金龙, 董新光. 地下水浅埋区土壤水盐试验分析[J]. 新疆农业大学学报, 2004, 27(3): 52-56.
- [37] 张红, 章光新, 杨建锋, 杨帆. 人工控制潜水位下苏打盐渍土水盐动态分析[J]. 干旱区资源与环境, 2008, 22(5): 149-154.
- [38] 李小倩, 夏江宝, 赵西梅, 杨吉华. 不同潜埋深下浅层土壤的水盐分布特征[J]. 中国水土保持科学, 2017, 15(2): 43-50.
- [39] 朱文东, 杨帆. 潜水作用下土壤水盐运移过程[J]. 土壤与作物, 2019, 8(1): 11-22.
- [40] 尹建道, 伊奥田朱美, 生原喜久雄, 杨勇, 姜志林. 人工降水条件下土壤脱盐动态规律的实验研究[J]. 山东农业大学学报(自然科学版), 2002, 33(3): 264-268.
- [41] 赵耕毛, 刘兆普, 陈铭达, 邓力群. 不同降雨强度下滨海盐渍土水盐运动规律模拟实验研究[J]. 南京农业大学学报, 2003, 26(2): 51-54.
- [42] 李莎, 何新林, 王振华, 陈书飞, 贾文俊. 微咸水灌溉对膜下滴灌棉花土壤盐分的影响试验[J]. 武汉大学学报(工学版), 2010, 43(5): 571-575.
- [43] 王艳, 吴勇, 廉晓娟, 王正祥, 张余良, 贺宏达. 不同矿化度水淋洗重度盐碱土的水盐运移特征[J]. 灌溉排水学报, 2011, 30(4): 39-43.
- [44] 王全九, 单鱼洋. 微咸水灌溉与土壤水盐调控研究进展[J]. 农业机械学报, 2015, 46(12): 117-126.
- [45] 唐胜强, 余冬立. 灌溉水质对土壤饱和导水率和入渗特性的影响[J]. 农业机械学报, 2016, 47(10): 108-114.
- [46] 王震, 贾永刚, 连胜利. 不同矿化度水淋洗对盐碱土电阻率及水盐运移的影响试验[J]. 环保科技, 2016, 22(1): 58-64.
- [47] 王全九, 许紫月, 单鱼洋, 张继红. 磁化微咸水矿化度对土壤水盐运移的影响[J]. 农业机械学报, 2017, 48(7): 198-206.
- [48] 张余良, 王正祥, 廉晓娟, 等. 滨海盐土灌水脱盐动态的土壤质地和水质差异性研究[J]. 农业环境科学学报, 2010, 29(3): 515-520.
- [49] 刘庆生, 刘高煊, 赵军. 质地和土地类型对土壤盐渍化水平的指示[J]. 中国农学通报, 2008, 24(1): 297-300.
- [50] 李卓然, 虎胆·吐马尔白, 由国栋. 基于 HYDRUS-2D 滴灌棉田不同深度排盐沟土壤水盐运移的试验及模拟[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2018, 36(3): 376-384.
- [51] 李开明, 刘洪光, 石培君, 李鑫鑫. 明沟排水条件下的土壤水盐运移模拟[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1299-1307.
- [52] 胡钜鑫, 虎胆·吐马尔白, 李卓然, 穆丽德尔·托伙加. 基于 HYDRUS-2D 模型膜下滴灌棉田不同上口宽排盐浅沟下土壤水盐运移模拟[J]. 水利科学与寒区工程, 2019, 2(5): 1-9.
- [53] 黄风, 严新军, 毛海涛, 王琳. 干旱区平原水库坝后排水沟对下游农田土壤水盐运移的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2020, 38(2): 44-50+57.
- [54] 郭全恩, 王益全, 马忠明, 等. 植物类型对土壤剖面盐分离子迁移以累积的影响[J]. 中国农业科学, 2011, 44(13): 2711-2720.
- [55] 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.
- [56] Feddes, R.A. (1982) Simulation of Field Water Use and Crop Yield. In: Penning de Vries, F.W.T. and van Laar, H.H., Eds., *Simulation of Plant Growth and Crop Production*, PUDOC, Wageningen, 194-209.
- [57] Zhang, Y.K. and Neuman, S.P. (1990) A Quasi-Linear Theory of Non-Fickian and Fickian Subsurface Dispersion: 2. Application to Anisotropic Media and the Borden Site. *Water Resources Research*, **26**, 903-913. <https://doi.org/10.1029/WR026i005p00903>
- [58] Dhananpala, A.H. (1992) Simulation of Soil Water Regime, Application of the SWATRE Model to Maize Crop on the Reddish Brown Earths in the Dry Zone of Sri Lanka. *Agricultural Systems*, **38**, 61-73. [https://doi.org/10.1016/0308-521X\(92\)90087-5](https://doi.org/10.1016/0308-521X(92)90087-5)

- [59] Toride, N. and Leij, F.J. (1996) Convective-Dispersive Stream Tube Model for Field-Scale Solute Transport: I Moment Analysis. *Soil Science Society of America Journal*, **60**, 342-352.  
<https://doi.org/10.2136/sssaj1996.03615995006000020004x>
- [60] 代涛. 西北干旱区水盐动态模拟及排水优化模型研究[D]: [硕士学位论文]. 武汉: 武汉大学, 2004.