

DOI: 10.13758/j.cnki.tr.2021.06.023

邹杰, 张金珠, 王振华, 等. 膜下滴灌棉田 Dobson 介电模型参数修改及水盐含量反演. 土壤, 2021, 53(6): 1281–1289.

膜下滴灌棉田 Dobson 介电模型参数修改及水盐含量反演^①

邹杰¹, 张金珠^{1,2*}, 王振华^{1,2}, 宗睿^{1,2}, 温越^{1,2}, 陈潇洁¹

(1 石河子大学水利建筑工程学院, 新疆石河子 832000; 2 石河子大学现代节水灌溉兵团重点实验室, 新疆石河子 832000)

摘要: 新疆土壤盐渍化严重, 亟需防治土壤盐渍化继续蔓延, 水盐含量能直观表述盐渍化程度, 所以反演土壤水盐含量对于土壤盐渍化的防治具有重要意义。以新疆典型的膜下滴灌棉田土壤为例, 利用探地雷达 250 MHz 和 1 000 MHz 两个频率天线, 通过共中心点法获取波速后转换为视在介电常数, 结合野外实测数据, 修正胡庆荣盐渍土介电模型参数, 以修正后的胡庆荣盐渍土介电模型反演膜下滴灌棉田表层土(0~30 cm)的水盐含量, 最终验证反演结果的适用性。结果表明: ①通过修正胡庆荣介电模型中的参数, 使该模型可以适用于膜下滴灌棉田土壤水盐含量的反演。参数 A 修正后的取值在 0.74 左右, 参数 ζ 修正后的取值在 0.14 左右。② 1 000 MHz 频率天线反演的含水量优于 250 MHz 频率, 且反演值与实际值具有较好的线性拟合关系, $R^2=0.948$, RMSE 为 $2.67 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。③探地雷达 250 MHz 和 1 000 MHz 频率天线的组合能够有效反演膜下滴灌棉田表层土的含盐量, 反演值与实测值拟合程度较高, $R^2=0.835$, RMSE 为 1.43 g/kg。探地雷达技术结合参数修正后的胡庆荣介电模型不仅提高了水盐含量的调查效率, 还有利于绘制中尺度棉田土壤水盐含量分布图, 为防治土壤盐渍化提供了理论数据支持。

关键词: 膜下滴灌; 共中心点法; 介电模型; 反演; 水盐含量

中图分类号: S159-3 **文献标志码:** A

Parameter Modification of Dobson Dielectric Model and Water and Salt Content Inversion in Drip Irrigation Cotton Field Under Film

ZOU Jie¹, ZHANG Jinzhu^{1,2*}, WANG Zhenhua^{1,2}, ZONG Rui^{1,2}, WEN Yue^{1,2}, CHEN Xiaojie¹

(1 College of Water & Architectural Engineering, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China; 2 Key Laboratory of Modern Water-saving Irrigation of Xinjiang Production & Construction Group, Shihezi University, Shihezi, Xinjiang 832000, China)

Abstract: Soil salinization is serious in Xinjiang, and it is urgent to prevent the spread of soil salinization. Water and salt contents can directly indicate the degree of salinization, so their rapid inversion is of great significance for preventing soil salinization. In this paper, typical cotton fields with drip irrigation under mulch were selected in Xinjiang, wave velocities were obtained with 250 MHz and 1 000 MHz antennas of ground penetrating radar (GPR) through common center point method and were converted to apparent dielectric constants. Meanwhile, combined with field measured data, the parameters in Hu Qingrong dielectric model of saline soil were modified, water and salt contents in topsoils (0 - 30 cm) of selected cotton fields were inverted by the modified model, and the inversion results were also verified. The results showed that the corrected value was 0.74 for parameter A and 0.14 for parameter ζ in Hu Qingrong dielectric model, and the modified model was feasible for the inversion of soil water and salt contents in cotton fields with drip irrigation under film. Water content inverted better by 1 000 MHz frequency antenna than by 250 MHz frequency, and inverted value had significant linear correlation with measured one ($R^2=0.948$, RMSE= $2.67 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$). Salt content in topsoil of cotton field could be effectively inverted by combining 250 MHz and 1 000 MHz frequency antennas of GPR, and inverted value fitted well with measured one ($R^2=0.835$, RMSE=1.43 g/kg). In conclusion, the modified model combined with GPR could not only improve the survey efficiency of water and salt contents in cotton fields, but also helped edit the distribution map of soil water and salt contents in cotton fields at meso-scale, which provided theoretical data support for soil salinization prevention.

①基金项目: 国家自然科学基金项目(51869027)和兵团科技创新团队项目(2019CB004)资助。

* 通讯作者(xjshzzjz@sina.cn)

作者简介: 邹杰(1995—), 男, 四川乐至人, 硕士研究生, 主要研究方向为节水灌溉理论与技术。E-mail: zj712469@163.com

Key words: Drip irrigation under film; Common midpoint method; Dobson dielectric model; Inversion; Water and salt contents

盐渍土是我国主要的中低产土壤类型之一,也是我国重要的农耕后备资源^[1]。我国盐渍土分布广泛,干旱半干旱地区分布着绝大部分的盐渍土,据统计中国西北六省盐渍土占全国盐渍土面积的 69.03%^[2]。新疆作为西北最大省份,是西北六省盐渍土之最。盐碱化问题严重制约着新疆膜下滴灌棉田的可持续发展^[3]。为防治新疆膜下滴灌棉田土壤盐渍化的继续蔓延,有必要预先了解膜下滴灌棉田土壤的水盐含量。但以往获取土壤水盐含量多采用取土化验的方式,该法费时、费力、不经济。因此,亟需一种科学、高效的方法去揭示新疆膜下滴灌棉田土壤的水盐含量情况。

土壤的水盐含量与其介电常数息息相关,土壤的介电常数不但可以描述土壤的介电特性,而且可以反映电质与电磁波相互作用的特征,它是反演土壤水盐含量的重要参数^[4]。而介电模型是研究介电常数的重要理论工具,所以介电模型的建立和修正对定量反演土壤的水盐含量起着至关重要的作用。目前,已知介电模型主要分为 3 类:经验模型、半经验模型和理论模型^[5-7]。而 3 类介电模型多建立在非盐渍土的基础上,对于盐渍土分布广泛的中国,3 类介电模型需进一步探讨。邵芸等^[8]、熊成文^[9]以及吕远和邵芸^[10]率先在国内分析研究了含水含盐土壤的微波介电特性,为我国盐渍化土壤介电模型的建立提供了理论依据。胡庆荣^[11]则在前人的研究基础上建立起适用于盐渍化土壤的介电模型(修正的 Dobson 介电模型),使定量反演土壤水盐含量成为可能。之后,虽有许媛媛^[12]、唐彦^[13]和张成雯等^[14]研究了不同区域盐渍化土壤水盐含量的定量反演,但他们多在大尺度范围上使用遥感技术进行观测和研究。微波遥感技术虽探测面积大但探测深度和分辨率较低,使探测土壤水盐含量方面存在一定的局限性。对于新疆膜下滴灌棉田而言更多是在中尺度范围,中尺度范围的研究需要更为准

确的信息去反映研究体特征。其中,探地雷达因设备便于车载、可移动性强、探测深度深、分辨率高和可选电磁波频率多的优势,使该技术成为中尺度范围探测土壤水盐含量的重要工具^[15]。

为此,本文根据新疆干旱半干旱区长期膜下滴灌棉田的实际情况,首先利用 Dobson 介电模型模拟频率分别为 250 MHz 和 1 000 MHz 视在介电常数在含水量为 10 ~ 40 cm³/cm³ 范围内不同含盐量条件下的特征规律,为水盐的反演假设提供依据;然后根据野外实测的土壤物化信息,修正 Dobson 介电模型中的参数;接着使用探地雷达共中心点法(common-midpoint, CMP)获取视在介电常数后,反演膜下滴灌棉田水盐含量,最后与实测水盐含量对比分析,验证反演结果的适用性。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区地处天山北麓、古尔班通古特大沙漠南缘(图 1),位于玛纳斯河流域下野地灌区内的 121 团,121 团隶属于新疆生产建设兵团第八师。其地理位置为 85°01' ~ 86°32'E, 43°27' ~ 45°21'N, 平均海拔 337 m,属于温带大陆性气候,年平均降雨量 142 mm,年平均蒸发量 1 826 mm,日照时数 2 860 h,平均无霜期 163 d,年平均气温 6.2 ~ 7.2 °C,地下水位埋深 3.0 ~ 4.5 m,地下水矿化度 2.5 ~ 5.0 g/L^[16-17],土壤平均容重为 1.41 g/cm³,质地为粉砂壤土,土壤平均黏粒含量为 17.27%,平均砂粒含量为 27.21%,各地块具体土壤物理特性见表 1。

试验区 121 团是新疆应用膜下滴灌技术最早的团场,目前,全团棉花种植均采用此技术,试验区取样地块平面分布见图 1。沿取样地块对角线方向设置 3 个样点,一个样点设置 3 个重复,总计取样 45 个,同步进行探地雷达 CMP 法的数据收集。

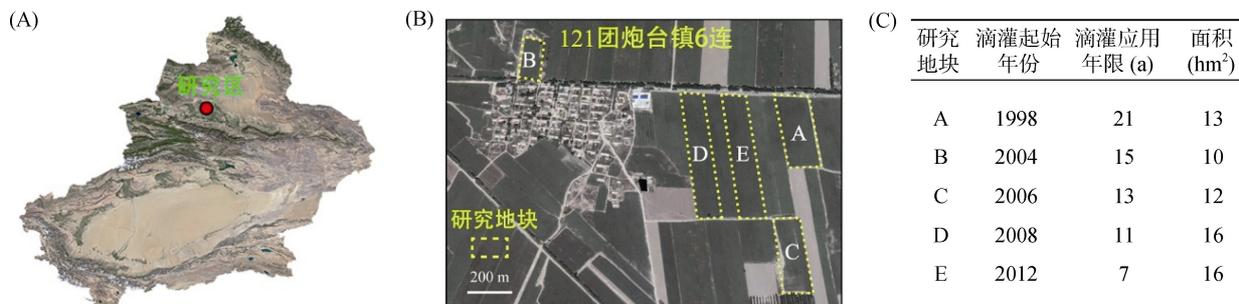


图 1 研究区与取样地块位置
Fig.1 Location of study area and sampling plots

表 1 不同滴灌年限棉田土壤物理特性
Table 1 Soil physical properties of cotton fields under different years of drip irrigation

土壤样品	土壤质地	容重(g/cm ³)	砂粒含量(%)	黏粒含量(%)	土壤含水率(cm ³ /cm ³)	土壤含盐量(g/kg)	pH
A	粉砂壤土	1.46 ± 0.03	27.45 ± 2.13	23.61 ± 3.21	20.40 ± 3.44	3.41 ± 0.31	7.59 ± 0.33
B	粉砂壤土	1.43 ± 0.05	32.24 ± 3.42	10.44 ± 2.48	19.22 ± 3.52	2.19 ± 0.24	7.15 ± 0.24
C	粉砂壤土	1.39 ± 0.03	26.31 ± 3.51	21.23 ± 1.78	26.68 ± 4.12	3.28 ± 0.28	7.72 ± 0.31
D	粉砂壤土	1.41 ± 0.04	21.48 ± 2.32	16.76 ± 2.56	23.41 ± 3.65	1.76 ± 0.12	7.54 ± 0.25
E	粉砂壤土	1.37 ± 0.05	27.56 ± 1.34	14.32 ± 2.35	23.19 ± 2.78	1.61 ± 0.18	7.47 ± 0.18
平均值	-	1.41 ± 0.04	27.01 ± 2.47	17.27 ± 2.47	22.52 ± 3.50	2.45 ± 0.23	7.49 ± 0.26

注：A、B、C、D 和 E 代表不同滴管年限棉田 0~30 cm 的土样，各数据均为 3 个重复的平均值。

1.2 测定方法

将 2019 年 10 月 20 日取回的土样采用烘干法 (103~108 °C, 10 h)测定土壤含水率；把烘干土样碾碎，过 2 mm 筛子后按 1 : 5(m : V)土水比混合，提取上层清液测电导率(electrical conductivity, EC)；利用烘干标定后建立的关系式转换土壤的全盐含量；利用比重计法测定土壤不同颗粒含量所占比例，并采用美国农业部制定的土壤质地三角图进行土壤质地划分；利用环刀法测定土壤容重；选用哈希便携式水质检测仪测土壤 pH；采用火焰光度计测定土壤 Na⁺、K⁺ 含量，AgNO₃ 滴定法测 Cl⁻含量，EDAT 间接滴定法测 SO₄²⁻含量，络合标定法测 Mg²⁺、Ca²⁺ 含量，CO₃²⁻、HCO₃⁻用双指示剂滴定法测定。

1.3 盐渍土介电模型(HQR 介电模型)

胡庆荣^[11]针对含水含盐土壤的情况，对 Dobson 介电模型进行修正，并建立符合盐渍土的介电模型，该模型为含水含盐半经验四分物理量的介电模型可表示为：

$$\epsilon'_m = \left[1 + \frac{\rho_b}{\rho_s} (\epsilon_s^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} \epsilon_{fv}^\alpha - m_v \right]^{1/\alpha} \quad (1)$$

$$\epsilon''_m \approx \gamma \cdot m_v^{\beta''/\alpha-2} \frac{S}{f} \quad (2)$$

$$\beta' = (127.480 - 0.519G - 0.152C) / 100 \quad (3)$$

$$\beta'' = (133.797 - 0.603G - 1.66C) / 100 \quad (4)$$

$$\gamma = \frac{A\xi\chi(\rho_s - \rho_b)\rho_b}{2\pi\epsilon_0\rho_s} \quad (5)$$

$$\chi = \left[\frac{1.000 - 1.962 \times 10^{-2}V + 8.080 \times 10^{-5}V^2 - VN \cdot \left\{ 3.020 \times 10^{-5} + 3.922 \times 10^{-5}V + N(1.721 \times 10^{-5} - 6.584 \times 10^{-6}V) \right\}}{N(1.721 \times 10^{-5} - 6.584 \times 10^{-6}V)} \right] \quad (5)$$

式中， ϵ'_m 和 ϵ''_m 分别为视在介电常数的实部和虚部。其形状因子 $\alpha=0.65$ ， β 为结合水修正系数，与土壤的

含砂量(G)和黏粒量(C)相关，单位为 %。对于 NaCl，参数 A 取 1； ρ_s 是土粒密度，通常取 2.65 g/cm³； ϵ_s 是土壤基质的介电常数，取 4.7； ρ_b 是土壤容重，g/cm³； ϵ'_{fv} 为不同温度不同频率下纯水的介电常数实部；S 为土壤的含盐量，%； m_v 为体积含水量，%；f 为频率，GHz； ξ 为 Stogryn 盐水模型中电导率与含盐量关系的一阶拟合系数，取 0.14； χ 为温度修正系数($V = 25 - t$)；N 为离子浓度，mol/L； ϵ_0 为真空介电常数($\epsilon_0=8.854 \times 10^{-12}$)。

1.4 盐渍土介电模型的模拟

为研究滴灌棉田盐渍土含水量、含盐量对视在介电常数的影响规律，本文设置含水量的步长为 1 cm³/cm³，并在含水量 10~40 cm³/cm³ 范围内，根据我国土壤盐渍化分级指标^[18](表 2)，设置 5 个盐分水平(0.5、1.5、3.0、4.5 和 6.0 g/kg)进行模拟。同时为匹配探地雷达两个天线的频率，将模型频率分别设置为 250 MHz 和 1 000 MHz，依据表 1 实测的土壤理化数据，代入 Dobson 介电模型式(1)~(5)分别计算介电常数实部 ϵ'_m 和虚部 ϵ''_m ，视在介电常数则由 $\epsilon_m = \sqrt{\epsilon'^2_m + \epsilon''^2_m}$ 计算获得，最后建立不同含水量、不同含盐量与视在介电常数关系图。

1.5 水盐含量的反演方法

研究表明高频波段土壤盐分对土壤视在介电常数的影响小于低频波段，且高频波段的视在介电常数与其实际相似^[11]。因此可以近似认为视在介电常数约等于介电常数的实部，即 $\epsilon'_m \approx \epsilon_m$ 。同时，周立刚等^[19]研究发现使用高频探地雷达探测表层土壤含水量效果更好。于是本文选择探地雷达 1 000 MHz 频率天线 CMP 法所测的介电值视为模型中的视在介电常数，然后通过式(1)反演土壤的体积含水量。

盐分的反演需要多频数据的组合。胡庆荣^[11]研究表明介电常数的实部随频率的变化较小，且两不同

表 2 我国土壤盐渍化分级
Table 2 Classification of soil salinization of China

适用地区	土壤含盐量(g/kg)					盐分类型
	非盐化	轻度	中度	强度	盐土	
干旱、半干旱地区	<1.0	1.0~2.0	2.0~4.0	4.0~6.0(10)	>6.0(10)	HCO ₃ ⁻ +CO ₃ ²⁻ , Cl ⁻ , Cl ⁻ -SO ₄ ²⁻ , SO ₄ ²⁻ -Cl ⁻

注：括号数据表示在高盐渍化区域强盐渍化范围可扩大至 10 g/kg。

频率介电常数虚部的差值远大于实部之差。于是可以假定： $\epsilon_{mf_1}'' - \epsilon_{mf_2}'' \approx \epsilon_{mf_1}'' - \epsilon_{mf_2}''$ 。因此本文选用探地雷达 250 MHz(f_1)和 1 000 MHz(f_2)的频率天线进行组合，由 CMP 法获取波速后，利用公式 $v = c/\sqrt{\epsilon}$ 转换为视在介电常数，再根据盐渍土介电模型式(2)的转换，可得：

$$\epsilon_{mf_1}'' - \epsilon_{mf_2}'' \approx \gamma \cdot m_v^{\beta''/\alpha-2} \cdot S \left(\frac{1}{f_1} - \frac{1}{f_2} \right) \tag{6}$$

$$S \approx \frac{1}{\gamma} \cdot \frac{f_1 f_2}{f_2 - f_1} \cdot m_v^{-\beta''/\alpha+2} \cdot (\epsilon_{mf_1}'' - \epsilon_{mf_2}'') \tag{7}$$

式中： f_1 、 f_2 分别为 250 MHz 和 1 000 MHz 的频率； ϵ_{mf_1} 、 ϵ_{mf_2} 分别为对应频率的视在介电常数； m_v 是 1 000 MHz 频率条件下，通过视在介电常数反演的土壤体积含水量。

1.6 探地雷达共中心点法

采用加拿大 Pulse EKKO PRO 系列探地雷达，使用主机 DVL Firmware 配合 250 MHz 频率和 1 000

MHz 频率的屏蔽天线进行 CMP 法的数据采集，采集参数设定见表 3。

表 3 探地雷达 CMP 法参数设置

Table 3 Parameter setting for CMP method of ground penetrating radar

天线频率 (MHz)	材料类型	采样步长(m)	时窗 (ns)	叠加次数
250	滴灌棉田盐渍土	0.15	30	64
1 000	滴灌棉田盐渍土	0.05	18	64

通过自带的“Line View”软件进行速度拟合可得电磁波的传播速度，如：图 2A 为 A 地块探地雷达 1 000 MHz 天线 CMP 法采集的波谱图，图 2B 为拟合的速度云图。根据表 1 可知各地块最大平均盐分含量为 3.41 g/kg，研究区属于中度盐渍化，故各地块表层土的电损耗较小，其视在介电常数 ϵ 可采用下式(8)计算：

$$\epsilon = (c/v)^2 \tag{8}$$

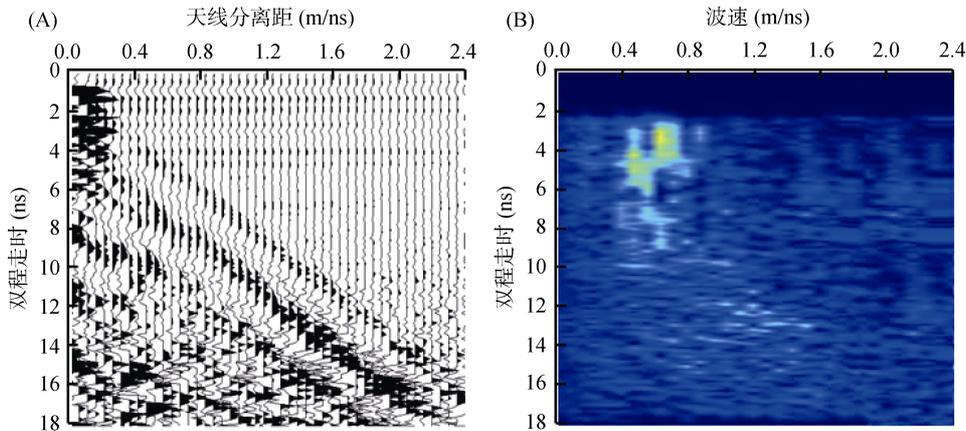


图 2 CMP 获取波速示意图
Fig.2 Schematic diagram of CMP acquisition wave speed

2 结果与分析

2.1 不同含水率、不同含盐量对视在介电常数的影响

从图 3A 和 3B 可以发现，盐分含量越高，视在介电常数越大，且这种现象在 250 MHz 频率条件下表现得更为明显。这是由于随着盐分梯度的增大，非饱和土

壤中离子的迁移运动加强，土壤微孔里的液体与土壤颗粒界面产生空间电荷极化效应，导致视在介电常数增加^[4]。而当盐分含量较小时，视在介电常数随含水量的增加而增加，如图 3A 中盐分含量为 0.5 g/kg 的情况。但当盐分含量随梯度逐渐增大时，视在介电常数随含水量的增加呈先减后增的趋势，其中，当视在介电常数减至最低后，视在介电常数随含水量呈指数形式增长。

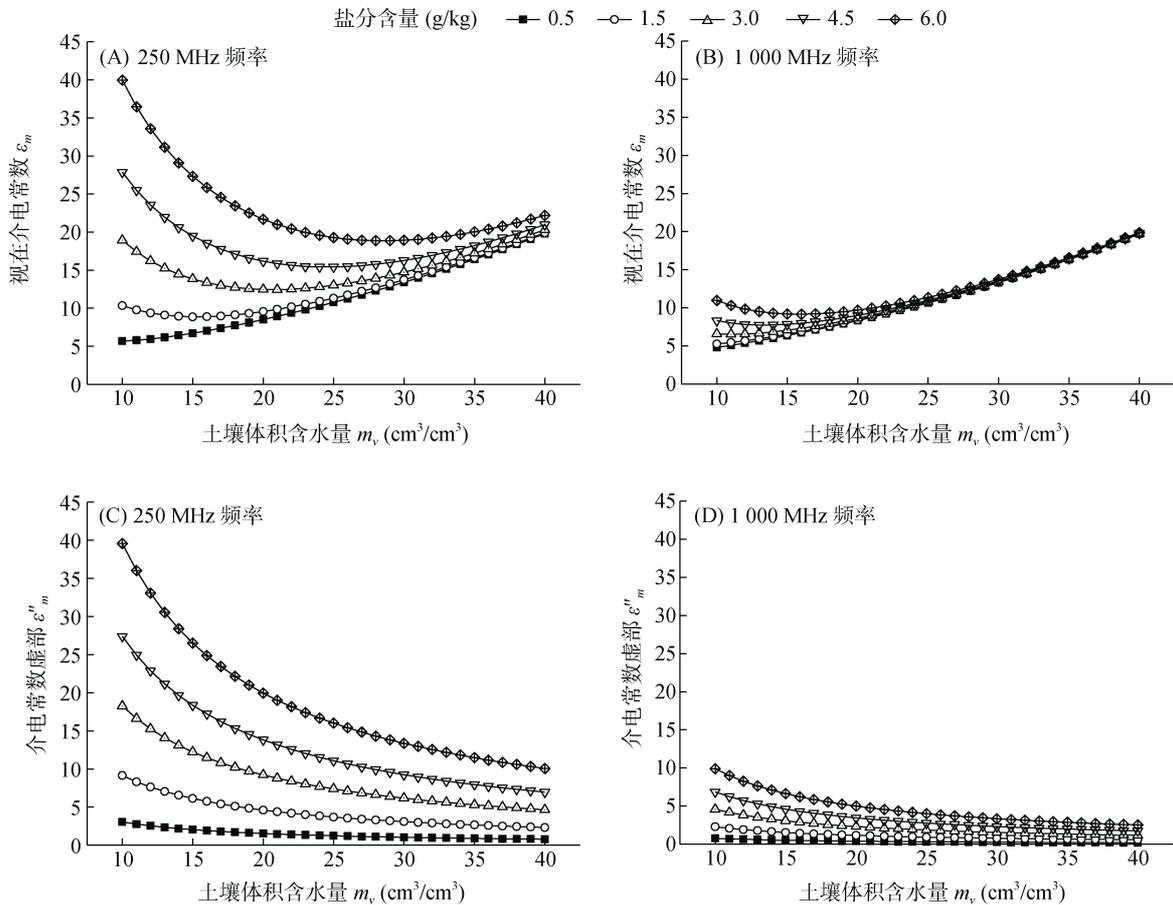


图 3 250 MHz 和 1 000 MHz 复介电常数及虚部在不同盐分梯度条件下随含水量的变化

Fig.3 Variation of 250 MHz and 1 000 MHz complex dielectric constant and imaginary part with water content under different salt content conditions

通过图 3B 发现，用 1 000 MHz 频率模拟时，含水率到达一定数值后，盐分含量对视在介电常数的影响程度开始减弱，如：含水率达到 $25 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 之后，5 个盐分梯度的视在介电常数随含水量的变化基本一致，含水量的高低开始主导视在介电常数的大小，且两者具有较高的相关性。同时，通过图 3C 和 3D 发现，盐分含量对介电常数虚部的影响较大，盐分含量越高，介电常数虚部越大，并且频率对介电常数虚部具有显著影响，250 MHz 频率模拟的介电常数虚部明显大于 1 000 MHz 频率，其虚部随含水量呈指数形式减小。虽然低频天线穿透能力强，但在盐分含量较高的情况下电磁波传播受阻，能量衰减迅速，介电损耗增加，导致低频虚部大于高频虚部。

2.2 模型计算视在介电常数与 CMP 法对比

将模拟的视在介电常数与 CMP 法获取的视在介电常数统计绘制成图 4A。通过图 4A 发现 CMP 法获取的视在介电常数明显大于模拟的视在介电常数，且 250 MHz 频率天线所测视在介电常数大于 1 000 MHz 频率所测。这与模拟结果一致，低频条件下的

视在介电常数大于高频视在介电常数。

同时，为探明不同滴灌年限棉田复介电常数的变化趋势，使用箱式图形式绘制成图 4B 和 4C，发现 2006 年地块的视在介电常数的平均值最大，2004 年地块的视在介电常数最小，不同滴灌年限棉田表层土的视在介电常数虽有所差异，但差异并不明显。这是由于研究区在使用滴灌之前均为荒地，5 个地块相对集中在 2 km^2 范围之内，土质和土壤结构基本一致，且属同一支渠灌溉，耕作期灌水、施肥方式相近，从而导致各地块的视在介电常数存在差异却不显著。而造成各地块视在介电常数有所差异是由于水盐含量和黏粒含量不同所致。水分和盐分的相互作用使得土壤中的电导消耗增大，而黏粒则是带电固相，随着黏粒含量的增加，土壤中的固相介电特性也会有所改变，从而引起介电损失，降低土壤的视在介电常数。

2.3 HQR 介电模型参数的修正

通过图 4 发现介电模型计算的视在介电常数与探地雷达 CMP 法实测值相差比较大，为适应新疆区域膜下滴灌棉田盐渍土情况，有必要对其修正，已达

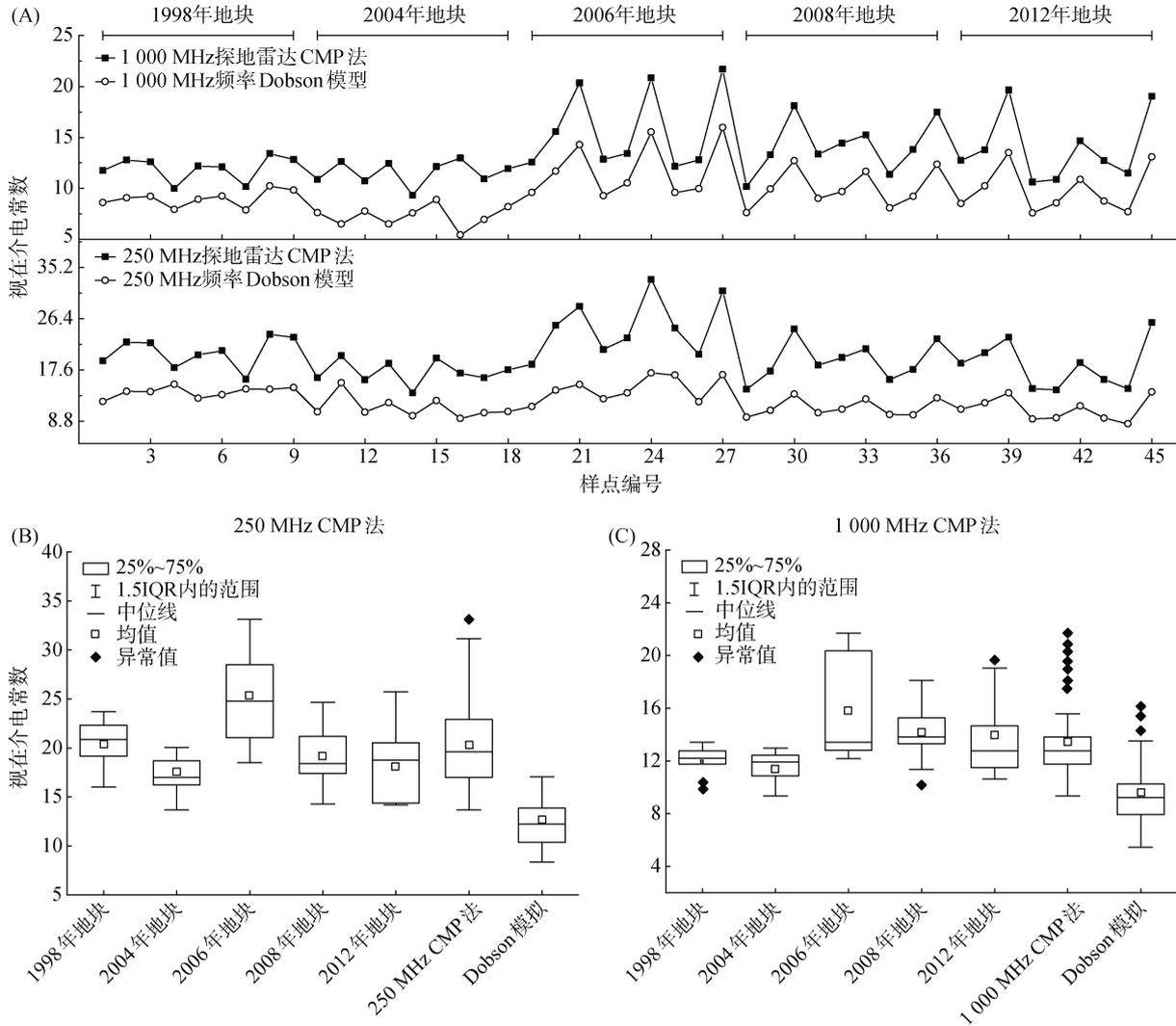


图 4 250 MHz 与 1 000 MHz 频率视在介电常数对比
Fig.4 Comparison of the complex dielectric constant of 250 MHz and 1 000 MHz

到利用修正后的 HQR 介电模型和 GPR 获取的视在介电常数能正确反演膜下滴灌棉田盐渍土水盐含量的目的。

本文以实测土壤体积含水量与介电模型反演的体积含水率的误差最小为修正依据，通过式(1)的转换，得：含水率 $m_v = a + b + (\epsilon_{f2}^{0.65} - 0.654\rho_b - 1)$ 。式中 a、b 为修正系数，其中，各地块修正参数具体见表 4。

表 4 土壤半经验修正参数(温度 $T=22\text{ }^{\circ}\text{C}$)
Table 4 Soil semi-empirical correction parameters

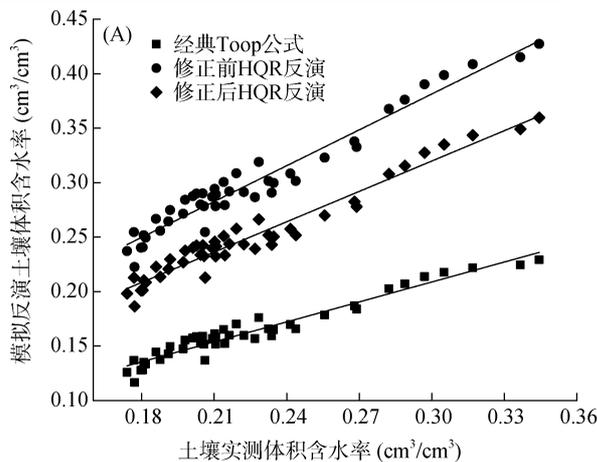
参数	土壤 A	土壤 B	土壤 C	土壤 D	土壤 E
β'	1.273	1.272	1.273	1.273	1.273
β''	1.332	1.334	1.332	1.333	1.333
a	5.363	5.143	6.088	5.725	5.727
b	5.753	5.789	5.456	5.574	5.528

通过离子分析和含盐量情况修正 Dobson 介电模型中虚部的参数 A 和 ζ 。其中，参数 A 由土壤溶液中离子的荷质比和组成决定。参数 ζ 是 Stogryn 水盐模型中电导率和含盐量的一阶拟合系数，但事实上参数 ζ 会随溶液中的含盐量的变化而变化，需进一步调整。各类离子含量具体情况见表 5。

从表 5 可知：研究区盐分离子主要有 Na^+ 、 Ca^{2+} 、 K^+ 、 SO_4^{2-} 、 Cl^- 、 HCO_3^- 、 Mg^{2+} 7 种离子，其中 Na^+ 含量相对最大， CO_3^{2-} 含量极低，本文将其忽略。对于 NaCl 溶液而言， $A = 1$ ，但对于复杂的棉田土壤环境而言，其取值明显小于 1，通过 Na^+ 和 Cl^- 含量比总离子含量，发现滴灌棉田盐渍土配置的土壤溶液，A 的取值在 0.74 范围波动。对于 ζ 根据实测电导率情况加以调整，发现盐分含量越高其一阶拟合系数 ζ 越大。

表 5 修正参数及离子含量统计表
Table 5 Corrected parameters and ion contents

离子	单位	土壤 A	土壤 B	土壤 C	土壤 D	土壤 E
Na ⁺	g/kg	3.770 8	2.458 3	3.632 2	2.001 8	1.833 9
Ca ²⁺	g/kg	0.730 9	0.476 5	0.704 0	0.388 0	0.355 5
K ⁺	g/kg	0.059 6	0.053 0	0.050 8	0.048 6	0.044 2
SO ₄ ²⁻	g/kg	0.313 2	0.204 2	0.301 7	0.166 3	0.152 3
Cl ⁻	g/kg	0.420 7	0.284 1	0.390 1	0.359 6	0.208 2
HCO ₃ ⁻	g/kg	0.057 4	0.051 2	0.048 8	0.054 8	0.043 4
Mg ²⁺	g/kg	0.490 0	0.319 4	0.471 9	0.260 1	0.238 3
CO ₃ ²⁻	g/kg	-	-	-	-	-
合计	g/kg	5.6186	3.691 0	5.399 0	3.024 1	2.763 3
A	-	0.746	0.743	0.745	0.737	0.739
ξ	-	0.154	0.142	0.151	0.138	0.133



2.4 含水率的反演

土壤含水量介电测量公式众多，属 Toop 公式最为经典。其中，朱安宁等^[20]基于 Toop 公式构建了 8 种不同土质介电常数和体积含水量之间的经验关系式，且成功准确地反演出土壤体积含水量，进一步说明了 Toop 公式在含水量介电测量方面的广泛性。为评价参数修正后的 HQR 介电模型土壤体积分含水量的反演效果，选取经典 Toop 公式和 1 000 MHz 频率天线修正前后的 HQR 含水量反演公式与实测土壤体积分含水量作对比，其结果如图 5 所示。

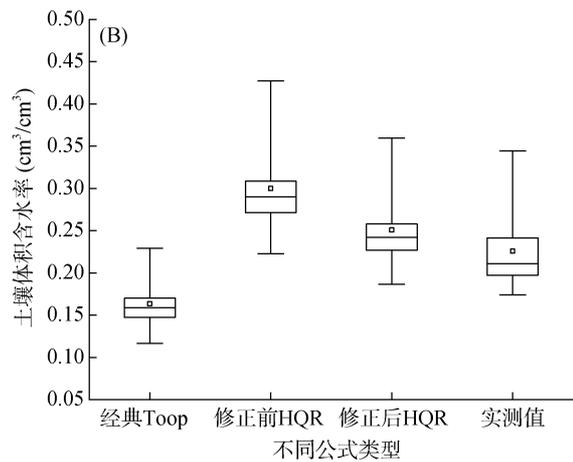


图 5 不同公式土壤体积分含水量对比图

Fig.5 Comparison chart of soil water content in different formulas

从图 5A 可以看出，Toop 公式和修正前后的 HQR 含水量反演公式，均具有较好的线性关系。结合图 5B 中的平均值，发现 Toop 公式计算结果明显偏低，而未修正的 HQR 含水量反演公式计算结果偏高，只有修正后的 HQR 含水量反演公式计算结果较好，其拟合方程为 $y=0.930x+0.041$ ，一阶线性拟合的斜率为 0.93。

同时，为定量分析修正前后的土壤体积分含水量的反演值与实测含水量标准值的差异性，以公式计算精度与准确性选取决定系数(R^2)、均方根误差(RMSE)、相对分析误差(RPD)等对上述经验公式进行评价，结果如表 6 所示。

表 6 不同公式与实测体积分含水量标准值对比精度
Table 6 Accuracy comparison between volumetric water contents measured and inverted by different formulas

土壤含水量计算公式	R^2	RMSE (cm ³ /cm ³)	SD (cm ³ /cm ³)	MRE (%)	RPD
经典 Toop 公式	0.938	6.49	2.74	27.26	0.422
修正前 HQR 公式	0.947	7.51	4.90	33.62	0.652
修正后 HQR 公式	0.948	2.69	4.15	11.72	1.540

从表 6 可以看出修正的 Dobson 含水量反演公式相比其他两个公式，其 RPD 最大，RMSE 和 MRE 最小；且 $R^2>0.94$ ， $RPD>1.5$ ， $RMSE<2.70$ cm³/cm³， $MRE<12.0\%$ 。表明修正后的 Dobson 含水量反演公式，其计算精度较高，并具有较好定量分析计算能力。

2.5 含盐量的反演

根据公式(7)和反演的体积分含水量 m_v 以及修正的参数 A、ξ，计算土壤的含盐量，并与实测含盐量对比(图 6)。

从图 6A 可以看出：修正前的盐分含量明显小于实测的盐分含量，而通过修正后的 HQR 介电模型能较好地反演出各地块表层土的盐分情况，且与实测结果相近，其标准差 SD 为 0.082 g/kg。同时，通过图 6B 发现反演结果具有较高的线性相关性， $R^2=0.835$ ，拟合方程为 $y=0.820x+0.441$ ，一阶线性拟合的斜率为 0.820，RMSE 为 1.43 g/kg，MRE 为 15.3%。相比修正前 RMSE 减小 1.75 g/kg，MRE 减小 13.29%。

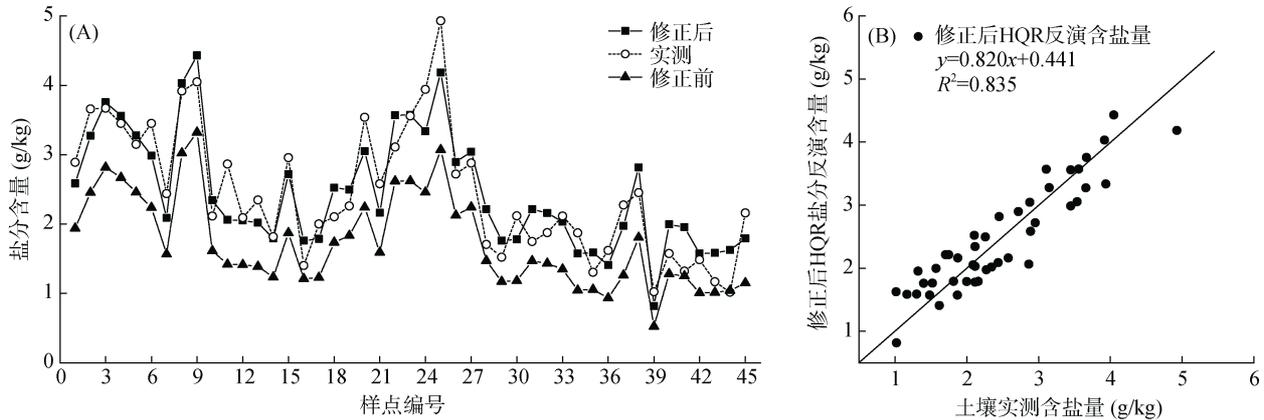


图 6 土壤盐分实测与反演数据对比图

Fig.6 Comparison chart of measured and retrieved data of soil salinity

3 讨论

本文通过探地雷达的共中心点法计算的视在介电常数普遍大于模型计算的视在介电常数,但其相关性较高。这是由于地下土壤的成分和组成较为复杂,多种因素共同影响视在介电常数所致。其中,通过众多学者研究发现影响介电常数的因素有孔隙比、土壤质地、有机质、盐度、矿物质、温度、频率、含水量等^[21]。而本文在棉田取样时,发现 0~30 cm 的土层总有一些棉秆、腐根和残膜的存在。其中,潘金梅等^[22]研究表明:在容重相近,且相对湿润的土壤中,腐殖质含量越高的土壤其复介电常数越大。而在新疆由于地膜的长期使用与回收不彻底的矛盾,使残膜已成为膜下滴灌棉田土壤中的一部分。残膜对盐渍土复介电常数的影响鲜有报道,在今后的研究中,探讨残膜对介电常数的影响很有必要,同时建立残膜与介电常数关系,并修正盐渍土介电模型,丰富盐渍土介电模型在膜下滴灌棉田中的适用性。

获取准确的介电常数是验证盐渍土介电模型的关键,也是修正和完善盐渍土介电模型的基础。目前,获取介电常数的方法主要有空间波法和探针法^[23]。空间波法多采用 GPR 进行探测,基于 GPR 测算介电常数的方法有:反射波法、地波法、表层反射法、全波形反演法和雷达波振幅包络平均值法^[24-27]。本文采用的 CMP 法优点在于有配套的软件可以快速获取介电常数,其缺点在于工作量较大,实际操作程序繁琐且耗时较长。而吴志远等^[28]采用的雷达波振幅包络平均值法(AEA 法)计算介电常数,很好地解决了耗时长和工作量大的问题。在今后获取介电常数的研究中,应朝着准确、快速、便捷、大范围的方向发展。盐渍土介电模型结合 GPR 技术获取的大范围介电常

数有助于含水量和含盐量的反演及制图。

本文采用的是修正后的 Dobson 介电模型(适用于盐渍土的介电模型)进行水盐的反演,但从拟合程度上看,水分反演效果明显好于盐分的反演效果($R_w^2 > R_s^2$)。而造成盐分反演效果差的原因:一是盐分含量较大时,可能土壤中部分盐分发生沉降;二是通过波速换算的视在介电常数,是根据 $\varepsilon = (c/v)^2$ 计算的理论值,与其真实值存在一些差异。

4 结论

1)由 HQR 介电模型计算结果比较可知,在膜下滴灌棉田土壤中, CMP 法转换的视在介电常数相比 HQR 介电模型计算结果偏大。在利用 HQR 介电模型计算介电常数时,需要对模型参数进行修正。通过修正 HQR 介电模型中的重要参数 A 和 ζ , 使该公式可以用于新疆膜下滴灌棉田土壤水盐含量的定量反演中, A 的取值范围在 0.74 左右, ζ 的取值在 0.14 左右。

2)相比 250 MHz 天线,采用 1 000 MHz 频率天线 CMP 法获取的视在介电常数,代入修正后的 HQR 介电模型能更好地反演膜下滴灌棉田表层土的含水量,反演的含水量与实测值误差较小,且具有较好的拟合效果,其 $R^2=0.948$, RMSE 为 $2.67 \text{ cm}^3/\text{cm}^3$ 。

3)采用探地雷达 250 MHz 和 1 000 MHz 频率天线的组合,结合 HQR 修正的 Dobson 介电模型,利用修正后的参数,能较好地反演出膜下滴灌棉田表层土的含盐量,反演值与实测值相近, $R^2 = 0.835$, RMSE 为 1.43 g/kg 。虽然本文通过 250 MHz 和 1 000 MHz 频率天线的组合反演出土壤的含盐量,但并非最优的天线频率组合,在今后的研究中可以选择多种天线频率的组合探究反演土壤盐分含量的最优组合。

参考文献:

- [1] 张治, 高明秀, 朱昌达. 基于WebGIS的盐碱地水盐动态监测系统[J]. 土壤, 2019, 51(2): 413-417.
- [2] 田长彦, 周宏飞, 刘国庆. 21世纪新疆土壤盐渍化调控与农业持续发展研究建议[J]. 干旱区地理, 2000, 23(2): 177-181.
- [3] 杨劲松. 中国盐渍土研究的发展历程与展望[J]. 土壤学报, 2008, 45(5): 837-845.
- [4] 张鹏. 主要因素对土壤介电特性的影响分析研究[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2013.
- [5] Nie J L, Yang F, Peng S P, et al. Geological radar detection algorithm research of water content in the shallow surface layers and its application[J]. Disaster Advances, 2013, 6: 44-53.
- [6] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil-part II: Dielectric mixing models[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 1985, GE-23(1): 35-46.
- [7] 刘军, 赵少杰, 蒋玲梅, 等. 微波波段土壤的介电常数模型研究进展[J]. 遥感信息, 2015, 30(1): 5-13, 70.
- [8] 邵芸, 吕远, 董庆, 等. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感学报, 2002, 6(6): 416-423.
- [9] 熊文成. 含水含盐土壤介电特性及反演研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2005.
- [10] 吕远, 邵芸. 含水含盐土壤的微波介电特性分析研究[J]. 遥感信息, 2001, 16(3): 19-23.
- [11] 胡庆荣. 含水含盐土壤介电特性实验研究及对雷达图像的响应分析[D]. 北京: 中国科学院研究生院(遥感应用研究所), 2003.
- [12] 许媛媛. 盐渍土复介电常数定量研究——以渭干河一库车河流域三角洲绿洲为例[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2012.
- [13] 唐彦. 土壤含盐量反演的研究[J]. 测绘工程, 2010, 19(6): 65-67, 72.
- [14] 张成雯, 唐家奎, 于新菊, 等. 黄河三角洲土壤含盐量定量遥感反演[J]. 中国科学院研究生院学报, 2013, 30(2): 220-227.
- [15] Wu B, Li X F, Zhao K, et al. A nondestructive conductivity estimating method for saline-alkali land based on ground penetrating radar[J]. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2020, 58(4): 2605-2614.
- [16] 贺怀杰, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田残膜变化趋势研究[J]. 干旱区研究, 2018, 35(6): 1487-1495.
- [17] 李文昊, 王振华, 郑旭荣, 等. 长期膜下滴灌棉田土壤盐分变化特征[J]. 农业工程学报, 2016, 32(10): 67-74.
- [18] 王遵亲. 中国盐渍土[M]. 北京: 科学出版社, 1993.
- [19] 周立刚, 于东升, 王玺洋, 等. 基于高频探地雷达的土壤表层含水量测定[J]. 土壤学报, 2016, 53(3): 621-626.
- [20] 朱安宁, 吉丽青, 张佳宝, 等. 不同类型土壤介电常数与体积含水量经验关系研究[J]. 土壤学报, 2011, 48(2): 263-268.
- [21] 高菁, 李志萍, 刘少康, 等. 土壤介电常数影响因素的研究综述[J]. 人民珠江, 2017, 38(5): 15-18.
- [22] 潘金梅, 张立新, 吴浩然, 等. 土壤有机物质对土壤介电常数的影响[J]. 遥感学报, 2012, 16(1): 1-24.
- [23] 魏玮. 介电常数的实地测量方法研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院(空间科学与应用研究中心), 2006.
- [24] Klotzsche A, Jonard F, Looms M C, et al. Measuring soil water content with ground penetrating radar: A decade of progress[J]. Vadose Zone Journal, 2018, 17(1). DOI: 10.2136/vzj2018.03.0052
- [25] François J, Bogena H, Caterina D, et al. Ground-based soil moisture determination[M]. Heidelberg: Springer Berlin, 2019.
- [26] Liu X B, Chen J, Cui X H, et al. Measurement of soil water content using ground-penetrating radar: A review of current methods[J]. International Journal of Digital Earth, 2019, 12(1): 95-118.
- [27] Tosti F, Slob E. Determination, by Using GPR, of the Volumetric Water Content in Structures, Substructures, Foundations and Soil Civil Engineering Applications of Ground Penetrating Radar, 2015: 163-194. DOI:10.1007/978-3-319-04813-0_7
- [28] 吴志远, 彭苏萍, 杜文凤, 等. 基于探地雷达波振幅包络平均值确定土壤含水率[J]. 农业工程学报, 2015, 31(12): 158-164.