

遥感监测介电常数与土壤含水率关系模型

陈 权¹, 曾江源^{1,2}, 李 震¹, 周建民¹, 田帮森¹, 周霁进^{1,2}

(1. 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 北京 100094; 2. 中国科学院研究生院, 北京 100049)

摘 要: 为了获取大范围地表土壤水分时空分布信息, 该文开展了微波辐射计/散射计监测介电常数与土壤体积含水率之间的关系研究。微波观测的信号与目标的介电常数密切相关, 而土壤含水率是决定土壤介电常数的决定性因素, 这是利用微波遥感监测土壤水分的物理基础。该研究针对土壤介电常数到土壤水分之间的转换问题, 利用 Dobson 半经验模型建立模拟数据库, 用建立的模拟数据库对 Hallikainen 关系式进行最小二乘回归法标定, 建立了适用于微波辐射计 SMOS (频率 1.4 GHz)、AMSR-E (频率 6.9 GHz) 和微波散射计 ERS-WCS/METOP-ASCAT (频率 5.3 GHz) 监测的介电常数到土壤体积含水率转换的简化模型。利用模拟数据和实测数据的联合验证结果表明, 简化模型具有良好的精度和实用性。

关键词: 介电常数, 土壤, 含水率, 辐射计, 散射计

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.12.028

中图分类号: S152.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-12-0171-05

陈 权, 曾江源, 李 震, 等. 遥感监测介电常数与土壤含水率关系模型[J]. 农业工程学报, 2012, 28(12): 171—175.
Chen Quan, Zeng JiangYuan, Li Zhen, et al. Relationship model of soil moisture and dielectric constant monitored with remote sensing[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(12): 171—175. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

土壤水分是农作物生长所需水分的主要源泉, 也是植物吸收养分的主要输入渠道^[1-2]。土壤水还参与了土壤中许多重要的物理、化学和生物过程, 其运动和变化不但影响植物生长, 也影响土壤中各种物质与能量的运动过程^[3-4]。此外, 频繁的全球土壤水分观测对很多环境学科, 例如洪水监测^[5], 改良土壤侵蚀模型^[6], 天气和气候预报^[7]以及农业应用^[8]都至关重要。所以, 科学家们十分关心高重复覆盖、区域尺度的陆表土壤水分信息。微波遥感领域中的辐射计和散射计即可提供这样的对地观测数据——数十公里的分辨率, 特别有利于在大尺度上对陆表土壤水分进行监测, 是遥感数据服务于农业调查和干旱监测的重要基础数据^[9-10]。

微波遥感监测土壤水分的物理基础是土壤的介电特性与土壤的含水率之间有非常密切的联系。同时有研究表明, 土壤介电常数的实部由土壤的含水率决定^[11-12], 而土壤介电常数的虚部会同时受到土壤含水率与含盐量的影响^[13]。所以, 建立介电常数实部与土壤体积含水率之间关系, 是微波遥感监测土壤水分过程中必须解决的问题。

传统利用微波遥感技术监测土壤水分的过程中, 往

往将工作的重心放在如何建立微波观测值(主动: 后向散射系数; 被动: 亮度温度)与土壤水分相关量的遥感探测模型上, 如 Grippa 等^[14]利用微波散射计反演土壤水分中, 直接用法向方向的 Fresnel 反射系数代表土壤水分, Shi 等^[15]在利用 SAR (合成孔径雷达, synthetic aperture radar) 反演土壤水分中用极化幅度代表土壤水分, 而被动微波遥感中, 更多的用反射率或直接用介电常数代表土壤水分^[16-17]。相比之下, 介电常数与土壤水分之间的定量转换关系往往受关注不多。其中比较有代表性的是 Hallikainen^[18]根据不同土壤类型的试验结果于 1985 年提出的二次多项式拟合模型, 但是, 该拟合模型只在几个固定频点下获得, 这些频点并不是微波遥感器的常用频点, 并且其用于标定系数的样本数过少(样本数 $N < 100$), 所以标定得到的系数说服力不强。此外, Dobson^[19]等在利用波导介电常数测量系统和自由空间传播技术获取的 5 种不同土壤类型的实测数据, 提出了土壤介电常数与土壤体积含水率之间的半经验模型, 即著名的 Dobson 半经验模型, 由于 Dobson 模型适用电磁波频率范围宽, 模拟精度较高, 且模型中参数不依赖于具体土壤类型, 这一模型已被广泛用于土壤介电常数到土壤水分间的转换。但是, 该模型运算过程中必须预先输入土壤体积质量、温度、以及土壤的砂土和黏土含量信息, 限制了模型的实用性。

本研究利用 Dobson 半经验模型建立的模拟数据库标定了微波辐射计 SMOS、AMSR-E 和散射计 ERS-WCS/METOP-ASCAT 的观测频点(1.4, 6.9 和 5.3 GHz, 注: 当前在轨运行的 Ku 波段 Seawinds 散射计(频率 13.6 GHz)数据因不是监测土壤水分的理想波段, 故不在本研究工作范围)下 Hallikainen 关系式的系数, 以期在无需土壤体积质量和温度作为输入条件的情况

收稿日期: 2012-02-22 修订日期: 2012-04-18

基金项目: 中科院对地观测中心主任基金(Y1ZZ03101B), 863 项目(2011AA120403), 国家自然科学基金(41101391), 973 项目(2009CB723901, 2010CB951403)联合资助

作者简介: 陈 权(1980—), 男, 吉林省辽源市人, 博士, 副研究员, 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 主要从事微波散射机理、地表参数反演等方面研究。北京 中国科学院对地观测与数字地球科学中心, 100094。
Email: qchen@ceode.ac.cn

下，仍能保持较高的监测精度。

1 土壤介电常数模型

描述土壤介电常数与土壤体积含水率之间关系的介电模型中，最常用的主要是 Hallikainen 经验模型和 Dobson 半经验模型。

1.1 Hallikainen 经验模型

Hallikainen 经验模型的形式为

$$\varepsilon' = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2 \quad (1)$$

式中， ε 为土壤介电常数实部， S 、 C 分别表示土壤的砂土、粘土体积百分比含量，%； m_v 表示土壤的体积含水率，%； $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 是标定系数，这些系数是利用车载散射计实测数据，在频率为 1.4、4、6、8、10、12、14、16 和 18 GHz 下拟合得到的。Hallikainen 模型虽然形式简单，但由于实测数据过少 ($N < 100$)，所以得到的系数的鲁棒性不强；此外，一些典型微波波段的主要频点下的系数未给出。

1.2 Dobson 半经验模型

Dobson 半经验模型是表征入射波的频率、土壤水分体积含水率、土壤砂土和黏土体积百分比含量、土壤体积质量和土壤温度与土壤介电常数依赖关系的土壤混合介电模型，适用频率范围为 1.4~18GHz。具体表达式为

$$\varepsilon' = [1 + \frac{\rho_b}{\rho_s}(\varepsilon_s^\alpha - 1) + m_v^{\beta'} \varepsilon_{fw}^\alpha - m_v]^\frac{1}{\alpha} \quad (2)$$

式中， ρ_b 表示土壤体积质量 g/cm^3 ； ρ_s 表示土壤中固态物质密度，对于不同类型土壤，其固态物质密度差别不大，一般取 $\rho_s = 2.66 \text{ g/cm}^3$ ； ε_s 为土壤中固态物质介电常数，可以通过土壤固态物质密度 ρ_s 和土壤温度 T ($^\circ\text{C}$) 计算得到； α 表示一常数因子， α 因子对所有土壤的最优值为 0.65； β 是可调的参数，它与土壤类型有关，可由 S 、 C 计算得到； ε'_{fw} 表示自由水介电常数实部，可以通过水温度（与土壤温度相同）和频率计算得到。

1995 年 Neil R. Peplinski^[20-21] 在 0.3~1.3 GHz 频率范围对 Dobson 模型进行了扩充，从而使得 Dobson 模型频率适用范围扩展为 0.3~18 GHz。Dobson 模型是半经验模型，其优点是模拟的数据精度较高，但理论过程复杂，简洁性远不如 Hallikainen 经验模型。该模型涉及的方程较多且繁琐，所需输入参数相比 Hallikainen 经验模型多了土壤体积质量和土壤温度 2 个参数，所以，要想利用 Dobson 模型实现土壤介电常数与土壤体积含水率之间的高精度转换，就要以较大的假设（如固定土壤体积质量和温度）或增加野外工作量为代价。

2 简化模型的获取

2.1 建立模拟数据库

以 Dobson 半经验模型为基础建立模拟数据库，模型运行需要的参数包括土壤体积含水率、土壤体积质量、土壤砂土和黏土体积百分数以及土壤温度。在分别设置频率为 1.4、6.9 和 5.3 GHz 条件下，各输入参数的模拟范围如表 1 中所示，考虑到实际地表情况，模拟数据库中只保留 $(S+C) \leq 1$ 。

表 1 Dobson 模型的参数范围
Table 1 Range of the parameters of Dobson model

土壤表面参数	体积含水率 m_v /%	体积质量 ρ_b ($\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$)	土壤温度 T / $^\circ\text{C}$	砂土体积百分含量 S /%	黏土体积百分含量 C /%
最小值	2	0.9	5	5	5
最大值	60	1.7	40	95	95
步长	4	0.1	1	5	5

2.2 最小二乘回归标定系数

将 Hallikainen 关系式即公式 (1) 的右边拆解成 9 项

$$\varepsilon' = a_0 + a_1S + a_2C + b_0m_v + b_1S \times m_v + b_2C \times m_v + c_0m_v^2 + c_1S \times m_v^2 + c_2C \times m_v^2 \quad (3)$$

式中，把 S 、 C 、 m_v 、 $S \times m_v$ 、 $C \times m_v$ 、 m_v^2 、 $S \times m_v^2$ 、 $C \times m_v^2$ 这 8 项看作独立变量， $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 为待标定的系数，将原来的非线性问题转化为线性问题。

利用以上模拟数据库，对 9 个待定参数进行标定。以频率 1.4 GHz 为例，利用最小二乘回归分析得到的结果为

$$\varepsilon' = (2.378 + 0.326S - 0.046C) + (10.750 + 59.894S + 15.703C) m_v + (73.555 - 58.372S - 14.154C) m_v^2 \quad (4)$$

同理可以得到频率 5.3 和 6.9 GHz 下介电常数实部的简化模型，如表 2 所示。

表 2 3 个频点下简化模型系数查找表
Table 2 Look-up table of the simplified model at the three frequency points

频率/GHz	$\varepsilon' = (a_0 + a_1S + a_2C) + (b_0 + b_1S + b_2C)m_v + (c_0 + c_1S + c_2C)m_v^2$								
	a_0	a_1	a_2	b_0	b_1	b_2	c_0	c_1	c_2
1.4	2.378	0.326	-0.046	10.750	59.894	15.703	73.555	-58.372	-14.154
5.3	2.388	0.348	-0.033	10.418	56.211	14.750	68.507	-54.968	-13.351
6.9	2.395	0.361	-0.025	10.188	53.775	14.119	65.180	-52.714	-12.819

注： ε 为土壤介电常数实部， S 和 C 分别为土壤的砂土、黏土体积百分比含量，%； $a_0, a_1, a_2, b_0, b_1, b_2, c_0, c_1, c_2$ 是标定系数。

3 结果与分析

3.1 简化模型与 Dobson 模型的对比分析

将以上基于 Hallikainen 关系式拟合的简化模型与同条件下 Dobson 模型模拟的数据进行相应的对比。为了对比的全面性，分别固定 $C=0.2, S=0.4$ ，变化 m_v ；固定 $m_v=0.3, C=0.2$ ，变化 S ；固定 $m_v=0.3, S=0.4$ ，变化 C 。在模拟过程中，Dobson 模型还需要以土壤体积质量和温度作为输入，研究中采用的方法是把这 2 个参数在表 1 的范围内做两重循环，得到所有介电常数实部然后取平均值，作为与 Hallikainen 关系式直接计算结果的比较值。以 1.4 GHz 为例，对比结果如图 1 所示。

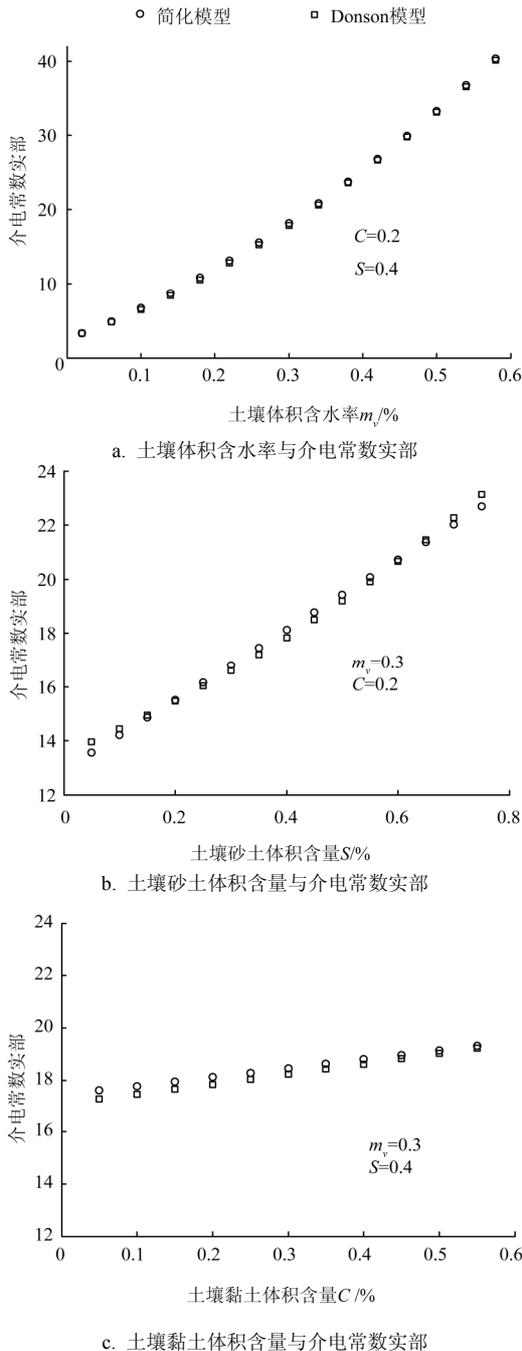
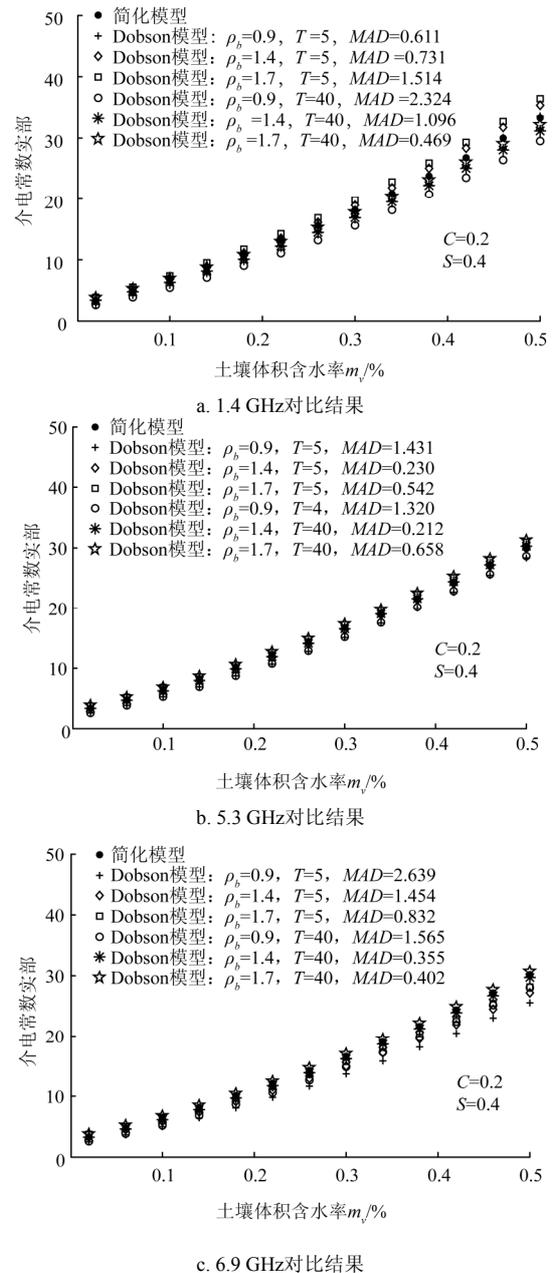


图 1 频率 1.4 GHz 下简化模型与 Dobson 模型模拟的介电常数实部对比

Fig.1 Comparison of the real part of dielectric constant from the simplified model and that of the Dobson model ($L=1.4$ GHz)

从图 1 可见，简化模型与同条件下 Dobson 模型模拟结果具有非常好的一致性，存在的一些误差是由于简化模型中省略了土壤体积质量 ρ_b 和土壤温度 T ，最小二乘回归方法将这 2 个量的影响参数化在简化模型的 9 个系数中。所以，为了进一步分析标定完系数后的简化模型的精度，固定 2 个模型中的 S 和 C ，其中 $S=0.4, C=0.2$ ，利用 Dobson 模型分别建立 $\rho_b=0.9, T=5; \rho_b=1.4, T=5; \rho_b=1.7, T=5; \rho_b=0.9, T=40; \rho_b=1.4, T=40; \rho_b=1.7, T=40$ 这 6 种情况下的随机数据（其中 $\rho_b=0.9 \text{ g/cm}^3, T=5^\circ\text{C}; \rho_b=1.7 \text{ g/cm}^3, T=40^\circ\text{C}$ 属于这 2 个参数的较极端值，代表最大误差可能出现的情况），并设定平均绝对误差（mean absolute difference, MAD）作为误差衡量标准，对 3 个频点下 2 个模型模拟的效果进行对比。对比结果如图 2 所示。



注： ρ_b 为土壤体积质量， g/cm^3 ； T 表示土壤温度， $^\circ\text{C}$ ；MAD 为平均绝对误差， S 和 C 分别为土壤的砂土、黏土体积百分比含量，%，下同。

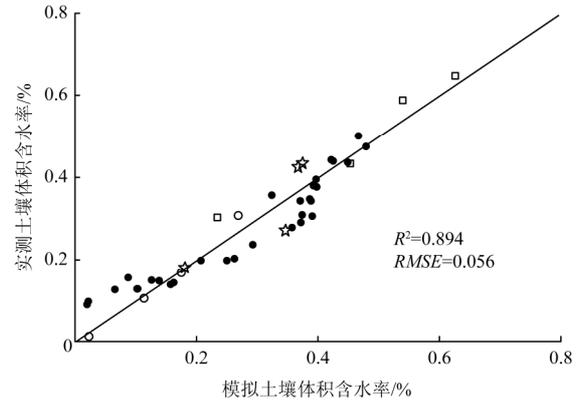
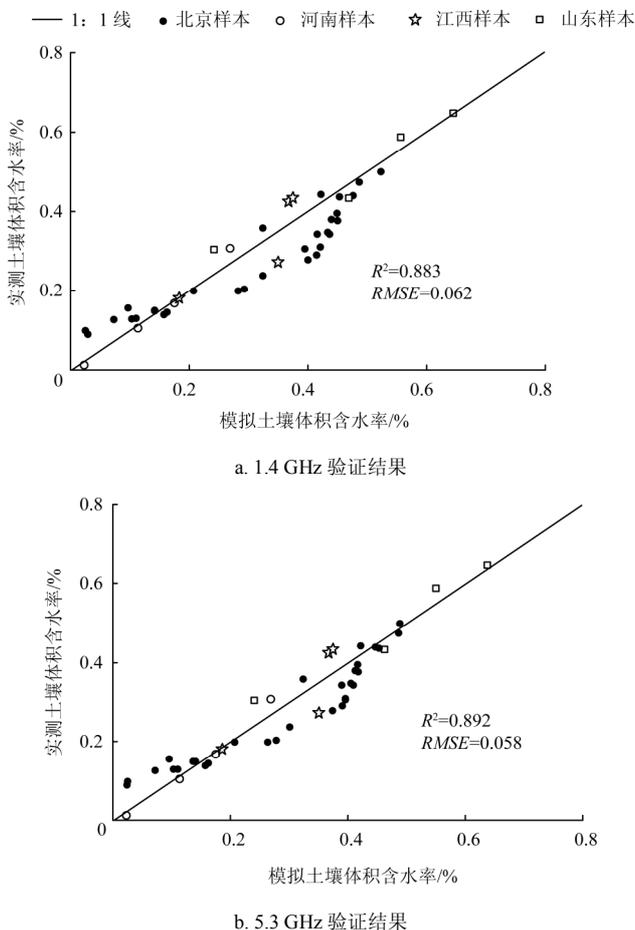
图 2 简化模型与 Dobson 模型模拟的对比

Fig.2 Comparison of results simulated by the simplified model with those of the Dobson model

从图 2 对比中可以看出,在这 3 个频点下,尽管土壤体积质量、温度的变化会对土壤介电常数实部产生一定的影响,但即便在最极端的情况,所建立的简化模型还是能与同条件下 Dobson 模型的数据较好地拟合,只有 2 种情况 ($\rho_b=0.9, T=5$; $\rho_b=0.9, T=40$),其平均绝对误差大于 2,说明简化模型能够较好的反映土壤介电常数实部与土壤体积含水率之间的关系。

4 简化模型的验证

以上只是用模拟数据对简化模型进行了验证,表明虽然减少了土壤体积质量和土壤温度 2 个参数,但模型依然能与 Dobson 模型保持较高的一致性。为了进一步验证简化模型的精度,在北京周边采集 30 个土壤实测样品,在河南登封市、江西新干县和山东聊城分别取 4 个样本,构成 42 个实测样本。利用微波矢量网络分析仪 E8362B 测量得到这些样品的介电常数实部;由于条件限制无法得到目标区精细尺度的 S 和 C 分布情况,实验中采用美国国家地球物理数据中心 (national geophysical data center, NGDC) 提供的 0.0833° (约 10 km,与辐射计/散射计分辨率相当) 分辨率的全球大尺度土壤质地数据代替^[22],将介电常数实部测量结果和 NGDC 提供的大尺度 S 和 C 带入简化模型计算土壤体积含水率的模拟值;同时,利用烘干称重法结合环刀法测量土壤体积含水率,与以上模拟结果进行对比验证,如图 3 所示。



c. 6.9 GHz 验证结果

图 3 简化模型与实测介电常数实部对比

Fig.3 Comparison of measured real part of dielectric constant and simplified model

从图 3 对比的情况上看,3 个频点下的相关系数均接近 0.9,说明实测数据与简化模型相关性很好,均方根误差均不超过 3。分析误差的来源,一部分是由于本研究的简化模型是采用 Dobson 半经验模型建立的,而该模型本身可能不够精确(如介电常数较小时产生低估现象),另外一方面是因为简化模型中省略了土壤温度和土壤体积质量 2 个参数所引入的误差,还有就是因为地面试验中缺少目标区域精细尺度的土壤质地数据带来的误差。

5 结论与讨论

本研究利用 Dobson 半经验模型建立的模拟数据库对 Hallikainen 关系式在大尺度的微波辐射计和散射计观测数据频点下的系数进行了标定,得到了土壤介电常数实部与土壤体积含水率关系的简化模型。利用 Dobson 模型的模拟数据进行验证,平均绝对误差 MAD 在极端的情况下也不会超过 2.7 ($\rho_b=0.9 \text{ g/cm}^3, T=5^\circ\text{C}$ 条件下, $\text{MAD}=2.639$),利用实测介电常数数据验证的结果表明,相关系数不低于 0.86,均方根误差在 3 个频点 (1.4、5.3、6.9 GHz) 下都小于 3,证明了本文建立的简化模型有较高的精度。避免了传统方法中 Dobson 模型对土壤体积质量和土壤温度的依赖,减少了繁重的野外工作,并可在全球大尺度 S 和 C 数据的支持下^[22],方便的实现土壤介电常数到土壤体积含水率的转换(适用范围:土壤温度 $5\sim 40^\circ\text{C}$ 、体积质量 $0.9\sim 1.7 \text{ g/cm}^3$ 、含水率 $2\%\sim 60\%$)。

但是,本文的实测数据目前还主要利用北京周边土壤进行,类型不够丰富。下一步,将根据中国境内的主要土壤类型,如南方第四纪红黏土、长三角水稻土、华北潮土、东北黑土等开展相关的实测工作,进行模型的进一步验证和修订,相关成果对在中国区域利用微波辐射计和散射计进行大尺度土壤水分监测将有重要意义。

[参考文献]

- [1] 马维伟,王辉,连树清.兰州北山侧柏人工林地土壤水分研究[J].土壤,2009,41(1):102-106.
Ma Weiwei, Wang Hui, Lian Shuqing. Soil moisture physical property of platycladus orientalis plantation in Northern

- Mountain of Lanzhou City[J]. *Soil*, 2009, 41(1): 102–106. (in Chinese with English abstract)
- [2] Deutsch E S, Bork E W, Willms W D. Soil moisture and plant growth responses to litter and defoliation impacts in Parkland grasslands[J]. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 2010, 135(1): 1–9.
- [3] 邴龙飞, 苏红波, 邵全琴, 等. 近 30 年来中国陆地蒸散量和土壤水分变化特征分析[J]. *地球信息科学学报*, 2012, 14(1): 1–13.
Bing Longfei, Su Hongbo, Shao Quanqin, et al. Changing characteristic of land surface evapotranspiration and soil moisture in China during the Past 30 Years[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2012, 14(1): 1–13. (in Chinese with English abstract)
- [4] Sonia I Seneviratne, Thierry Corti, Edouard L Davin, et al. Investigating soil moisture - climate interactions in a changing climate: A review[J]. *Earth-Science Reviews*, 2010, 99(3), 125–161.
- [5] Western A W, Zhou S L, Grayson R B, et al. Spatial correlation of soil moisture in small catchments and its relationship to dominant spatial hydrological processes[J]. *Journal of Hydrology*, 2004, 286(2): 113–134.
- [6] Castillo V M, Gómez-Plaza A, Martínez-Mena M. The role of antecedent soil water content in the runoff response of semiarid catchments: A simulation approach[J]. *Journal of Hydrology*, 284(2): 114–130, 2003.
- [7] Conil S, Douville H, Tyteca S. The relative influence of soil moisture and SST in climate predictability explored within ensembles of AMIP type experiments[J]. *Climate Dynamics*, 2007, 28(2): 125–145.
- [8] Bolten J D, Crow W T, Jackson T J, et al. Evaluating the utility of remotely-sensed soil moisture retrievals for operational agricultural drought monitoring[J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(1): 57–66.
- [9] Sasmita Chaurasia, Do Thanh Tung, Thapliyal P K, et al. Assessment of the AMSR-E soil moisture product over India[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2011, 32(23), 7955–7970.
- [10] Zoltan Bartalis, Wolfgang Wagner, Vahid Naeimi, et al. Initial soil moisture retrievals from the METOP-A Advanced Scatterometer (ASCAT)[J]. *Geophysical Research Letters*, 2007, 34(L20401): 1–5.
- [11] Cao Chun, Xing Zhen, Zheng Wengang, et al. Evaluation of the high-frequency capacitance sensor for measuring soil moisture[J]. *Sensor Letters*, 2012, 10(2): 447–452.
- [12] Hajnsek I, Jagdhuber T, Schon H, et al. Potential of estimating soil moisture under vegetation cover by means of poSAR[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2009, 47(2): 442–454.
- [13] 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.
Shao Yun, Lu Yuan, Dong Qing, et al. Study on soil microwave dielectric characteristic as salinity and water content[J]. *Journal of Remote Sensing*, 2002, 6(6): 416–423. (in Chinese with English abstract)
- [14] Grippa M, Woodhouse I H. Retrieval of bare soil and vegetation parameters from wind scatterometer measurements over three different climatic regions[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2002, 84(1): 16–24.
- [15] Shi J, Wang J, Hsu A, et al. Estimation of bare surface soil moisture and surface roughness parameter using L-band SAR image data[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1997, 35(5): 1254–1266.
- [16] Shi Jiancheng, Jiang Lingmei, Zhang Lixin, et al. A parameterized multifrequency-polarization surface emission model[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2005, 43(12): 2831–2841.
- [17] Eni G, Njoku T J, Jackson, Lakshmi V, et al. Soil moisture retrieval from AMSR-E[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2003, 41(2): 215–229.
- [18] Hallikainen M T, Ulaby F T, Dobson M C, et al. Microwave dielectric behavior of wet soil: part I: Empirical models and experimental observation[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1985, GE-23(1): 25–34.
- [19] Dobson M C, Ulaby F T, Hallikainen M T, et al. A 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.
- [20] Peplinski N R, Ulaby F T, Dobson M C. Dielectric properties of soils in the 0.3-1.3-GHz range[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(3): 803–807.
- [21] Peplinski N R, Ulaby F T, Dobson M C. Corrections to dielectric properties of soils in the 0.3-1.3GHz ranges[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1995, 33(6): 1340.
- [22] <http://www.ngdc.noaa.gov/ecosys/cdroms/reynolds/reynolds/reynolds.htm>, 1999, C.A. Reynolds, T. J. Jackson, and W.J. Rawls.

Relationship model of soil moisture and dielectric constant monitored with remote sensing

Chen Quan¹, Zeng JiangYuan^{1,2}, Li Zhen¹, Zhou Jianmin¹, Tian Bangsen¹, Zhou Jijin^{1,2}

(1. Center for Earth Observation and Digital Earth Chinese Academy of Sciences, Beijing 100094, China;

2. Graduate University of the Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: Surface soil moisture is an important parameter in draught monitoring and crop yield estimation, it is important to obtain spatial-temporal soil moisture information in large range. Microwave signal is much related to dielectric constant of object observed, and soil dielectric constant is determined by soil moisture, which was the basis of the use of microwave remote sensing technology for soil moisture monitoring. To solve the transformation of soil moisture and soil dielectric constant, the Dobson semi-empirical model was used to build a simulated database, and then the Hallikainen formula calibrated by the least square regression method at radiometer SMOS(1.4 GHz), AMSR-E(6.9 GHz), and scatterometer ERS-WCS and METOP-ASCAT (both at 5.3 GHz) frequency-points were performed to set up the simplified models to transform the real part of the dielectric constant to the soil volumetric moisture content. The validations were performed using both simulated data of the Dobson model and in-situ observations, and the results showed that the simplified models had good accuracy and practicability.

Key words: permittivity, soils, moisture, radiometers, scatterometers