

文章编号: 1007-4619 (2002) 01-0019-05

水稻生长期微波介电特性研究

廖静娟, 邵芸, 郭华东, 齐震

(中国科学院 遥感应用研究所遥感信息科学开放研究实验室, 北京 100101)

摘要: 利用植被介电常数的 Debye-Cole 双频色散模型, 模拟计算了广东肇庆水稻试验区 1996 年晚稻和 1997 年早稻从插秧期、够苗期、分蘖期、扬花期到成熟期各生长期的介电常数值, 并根据计算结果, 探讨了电磁波频率、水稻含水量、温度、含盐度及水稻冠层干体密度对介电常数的影响。其中, 不同生长期水稻的介电常数各不相同, 不同水稻类型(早稻和晚稻), 介电常数的变化趋势不尽相同。电磁波频率、水稻含水量、温度和水稻冠层干体密度均对介电常数有不同程度的影响, 而含盐度却对介电常数影响不大。

关键词: 水稻; 生长期; 介电常数; 影响因素

中图分类号: TP722.6 **文献标识码:** A

1 引言

水稻是世界上重要的粮食作物。由于它依赖水而生长, 因而特别适合生长在湿润多雨的地区, 这使得具有全天候、全天时成像能力的成像雷达能够有效监测其生长状态。为此, 许多研究者利用已有的成像雷达系统对水稻的生长状态进行了有效的监测^[1,2]。在开展水稻生长状态监测时, 了解水稻的微波后向散射特性极为重要, 而其微波后向散射特性除了与成像雷达的系统参数有关外, 还与水稻本身的介电特性和几何参数有关。其中水稻的几何参数在实地通过测量较容易获取, 但在实地测量其介电特性, 却影响因素较多, 直接获取数据困难较大。因此, 从微观机制出发, 建立理论模型研究其介电特性显得尤为必要。

同所有地物一样, 水稻的介电特性是通过复介电常数($\epsilon = \epsilon' - j\epsilon''$)表征的。复介电常数的实部 ϵ' 决定电磁波在介质中传播时的色散特性, 而虚部 ϵ'' 决定电磁波在介质中的耗损。前人的研究表明, 利用介质的色散和耗损理论, 建立相应的理论模型, 得出的理论预期结果与实验结果能较好地吻合^[3-6]。因此, 本文利用植被材料介电常数的 Debye-Cole 双频色散模型, 根据计算水稻不同生长期的介电常数,

并开展水稻介电特性影响因素的分析研究。

2 植被介电常数模型

植被是枝叶、茎秆、果实等植被材料和空气的混合物。从介电性质上看, 植被材料由植物体、自由水(free-water)和束缚水(bound-water)³部分组成。其中自由水则是能自由移动的水分子, 束缚水是指被物理力紧紧束缚在有机物中的水分子, 二者具有不同的介电特性。

由于植被中的自由水含有溶解盐, 一般把这种自由水作为盐水处理, 盐水的介电常数可由 Debye 公式表示为^[7,8]:

$$\epsilon_f = \epsilon_{f\infty} + \frac{\epsilon_{f_0} - \epsilon_{f\infty}}{1 + j2\pi f\tau_f} + j \frac{\sigma}{2\pi\epsilon_0 f} \quad (1)$$

式中下标 f 表示自由水, $\epsilon_{f\infty}$, ϵ_{f_0} 和 ϵ_0 分别表示高频极限时的介电常数、静态介电常数和自由空间介电常数, 其中 $\epsilon_{f\infty} = 4.9$, $\epsilon_0 = 8.854 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; τ_f 为自由水松弛时间, 即自由水从开始极化到达到极化最终状态所用时间, 单位为 s ; f 为电磁波频率, σ 为自由水溶液的离子电导率, 单位为 $\text{S} \cdot \text{m}^{-1}$ 。

(1) 式中的 ϵ_{f_0} , τ_f 和 σ 与自由水溶液的温度 (T) 及含盐度 (s) 有关, 因此有^[8]

收稿日期: 2000-11-02; 修订日期: 2001-01-10

基金项目: 国家自然科学基金重点基金支持项目(编号: 49989001), 中国科学院知识创新工程重要方向项目(编号: KZCX2-312)

作者简介: 廖静娟(1966—), 女, 1993 年获中国科学院地球物理研究所固体地球物理专业博士学位。现任中国科学院遥感应用研究所副研究员, 主要从事雷达遥感地物散射特性、信息提取及应用研究, 已发表学术论文 20 余篇。

$$\epsilon_{f_0} = \epsilon_{w_0} \cdot a \quad (2)$$

$$\tau_f = \tau_w \cdot b \quad (3)$$

$$\sigma = \sigma^0 \cdot e^{-\phi} \quad (4)$$

其中 ϵ_{w_0} , τ_w , σ^0 分别为纯水的静介电常数、松弛时间和离子电导率, a , b , ϕ 分别为与温度和含盐度有关的多项式。分别为^[8]

$$\epsilon_{w_0} = 88.045 - 0.4147T + 6.295 \times 10^{-4}T^2 + 1.075 \times 10^{-5}T^3 \quad (5)$$

$$a = 1.0 + 1.613 \times 10^{-5}T_s - 3.656 \times 10^{-3}s + 3.210 \times 10^{-5}s^2 + 4.232 \times 10^{-7}s^3 \quad (6)$$

$$\tau_w = 1.7680 \times 10^{-11} - 6.0861 \times 10^{-13}T + 1.1113 \times 10^{-14}T^2 - 8.1105 \times 10^{-17}T^3 \quad (7)$$

$$b = 1.0 + 2.282 \times 10^{-5}T_s - 7.638 \times 10^{-4}s - 7.760 \times 10^{-6}s^2 + 1.105 \times 10^{-8}s^3 \quad (8)$$

$$\sigma^0 = s(0.18252 - 1.4619 \times 10^{-3}s + 2.093 \times 10^{-5}s^2 - 1.282 \times 10^{-7}s^3) \quad (9)$$

$$\phi = \Delta[2.033 \times 10^{-2} + 1.266 \times 10^{-4}\Delta + 2.464 \times 10^{-6}\Delta^2 - s(1.849 \times 10^{-5} - 2.551 \times 10^{-7}\Delta + 2.551 \times 10^{-7}\Delta^2)] \quad (10)$$

$$\Delta = 25 - T \quad (11)$$

束缚水受到的非电性亲和力使束缚水的松弛时间长于自由水,即束缚水的松弛频率显著低于自由水的松弛频率。由于蔗糖是植被中普遍存在的一种典型有机物质,而且蔗糖分子与水分子的结合比例已知为 1:6,使用此比例可以计算出任何给定混合物中束缚水的浓度。因此,为了得到束缚水介电常数的实验数据,Ulaby 等人^[3,4]测量了蔗糖水的介电常数。测量结果用 Cole-Cole 色散公式拟合为:

$$\epsilon_b = \epsilon_{b\infty} + \frac{\epsilon_{b0} - \epsilon_{b\infty}}{1 + (jf/f_{b0})^{1-\alpha}} \quad (12)$$

式中下标 b 表示束缚水, α 为松弛参数,其它参数的意义同(1)式说明。其中 $\epsilon_{b\infty} = 2.9$, $\epsilon_{b0} = 59.7$, $f_{b0} = 0.18 \text{ GHz}$, $\alpha = 0.5$ 。

因此,植被介电常数的 Debye-Cole 双频色散模式为:

$$\epsilon_b = \epsilon_r + \nu_f \epsilon_f + \nu_b \epsilon_b \quad (13)$$

式中 ϵ_r 是植被体的介电常数, ν_f , ϵ_f 是自由水的体积含量及其介电常数, ν_b , ϵ_b 是束缚水与其结合植被的体积含量及其介电常数。

由于自由水和束缚水的体积含量很难确定,因此 Ulaby 等人^[3,4]通过对玉米叶的大量测量,得出了如下模型参数与重量含水量 M_g (%) 的关系为:

$$\epsilon_r = 1.7 - 0.74M_g + 6.16M_g^2 \quad (14)$$

$$\nu_f = M_g(0.55M_g - 0.076) \quad (15)$$

$$\nu_b = 4.64M_b/(1 + 7.36M_g^2) \quad (16)$$

至此,通过植被含水量可以计算植被的介电常数。Ulaby 等人^[4]利用该模型计算了玉米叶的介电常数,与实验结果吻合得较好。

2 水稻试验区概况及有关实验数据获取

2.1 水稻试验区概况

本文选取的水稻试验区位于中国广东省肇庆地区,地处珠江三角洲西北缘,气候湿润多雨,境内的西江和北江两河流域所形成的冲击平原,是水稻的方要种植区,而周围的丘陵和山区则以果园种植和森林覆盖为特征。该区不仅是珠江三角洲地区主要的水稻产粮区,也是唯一的水稻商品粮出口地区。该区所产水稻根据季节划分,有早稻和晚稻两种类型。每种类型水稻的生长期划分为 5 个阶段,即插秧期、够苗期、分蘖期、扬花期和成熟期。其中早稻对应这 5 个阶段生长期的时间分别为 3 月 25 日—4 月 5 日,4 月 15—25 日,5 月 10—30 日,6 月 10—25 日和 7 月 5—31 日。晚稻对应时间分别为 7 月 20 日—8 月 5 日,8 月 10—20 日,9 月 1—30 日,10 月 1—20 日和 11 月 1—25 日。

2.2 实验数据获取

在肇庆水稻试验区内,选取一块 $1000\text{m} \times 500\text{m}$ 的水稻田,从 1996-08-23—1997-07-07,共测量了 17 次,每次测量样本 20 个,样本间隔 100m,测量路线呈“山”字型分布。为了使测量结果较好地反映水稻从插秧到成熟的整个生长期,测量日期的选择参照了“肇庆地区水稻亩产千斤规范化栽培图表”。其中 1996-08-23—1996-11-08 为晚稻的生长期,1997-03-28—1997-07-07 为早稻的生长期。1996 年晚稻的插秧期由于受气候的影响,比正常的推迟了近 20 天。为了使水稻能在预定的日期成熟,因此采用了人工的方法,如加水、加肥等措施,使分蘖期和扬花期相对缩短,从而保证水稻能如期成熟。

直接测量的数据包括水稻生长的几何参数、水稻秧苗的鲜重量和气象数据。其中水稻的几何参数包括行距、墩(束)距、每墩的株数、每株的叶数、株高、叶长、茎宽和叶倾角。气象数据包括温度、相对湿度、风向、风速和水气压。水稻的重量含水量为水稻含水量与其鲜重之重量之比,为间接获取,即在野

外采取新鲜的秧苗后秤其鲜重, 然后烘干再秤其干重, 即可得其重量含水量。

从以上植被的介电常数模型中可见, 与介电常数有关的植被参数主要为含水量、温度和含盐度等, 而与植被的几何参数关系不大, 因此表 1 中仅列出测得的水稻各生长期的重量含水量和温度。对于正常植被而言, 含盐度一般在 5‰—12‰。由于水稻的含盐度较难测得, 在计算水稻生长期的介电常数时, 我们选取典型含盐度 8‰ 计算, 并在如下的介电常数影响因素中, 讨论含盐度的影响。

表 1 肇庆试验区早稻和晚稻生长过程中重量含水量和温度测量值

Table 1 Measurements of gravimetric moisture and temperature during the growing period of early and late season rice crops in Zhaoqing test site

测量日期	重量含水量/%	温度/℃
1996-08-23	59.8	28.7
1996-09-01	65.2	28.6
1996-09-16	68.0	27.7
1996-09-24	75.4	26.0
1996-10-10	69.6	23.8
1996-10-24	69.8	25.1
1996-11-04	55.7	25.0
1996-11-08	57.0	24.7
1997-03-28	80.8	19.4
1997-04-11	82.4	21.4
1997-04-22	85.2	24.0
1997-05-04	83.4	23.7
1997-05-19	76.8	28.5
1997-06-05	71.9	27.9
1997-06-12	70.0	27.6
1997-06-29	55.4	27.2
1997-07-07	54.1	28.1

3 水稻生长期介电常数计算结果

频率分别为 1.25GHz, 5.3GHz 和 9.6GHz 的 3 种微波波段, 在遥感资源环境调查研究中常用来监测水稻生长的过程。因此我们利用植被材料介电常数的 Debye-Cole 双频数散模型和以上测量数据, 分别计算了这 3 种频率下肇庆试验区 1996 年晚稻和 1997 年早稻生长期的介电常数(图 1, 图 2)。

从水稻生长期介电常数随时间变化图上可见, 随着水稻从插秧期到成熟期时间的变化, 无论是介

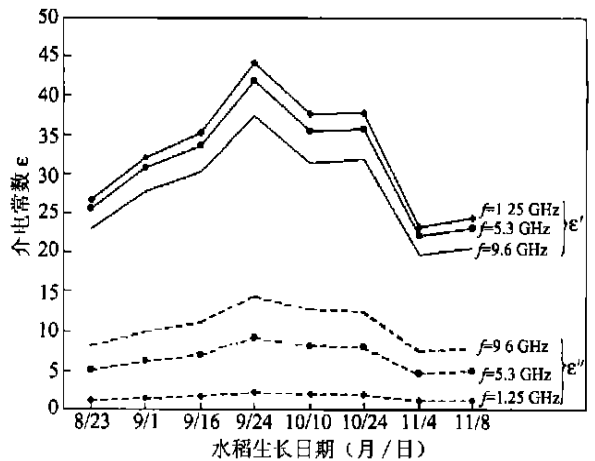


图 1 肇庆试验区 1996 年晚稻生长期介电常数随时间变化图

Fig. 1 Variation of the dielectric constant with time from the late season rice of 1996 in Zhaoqing test site

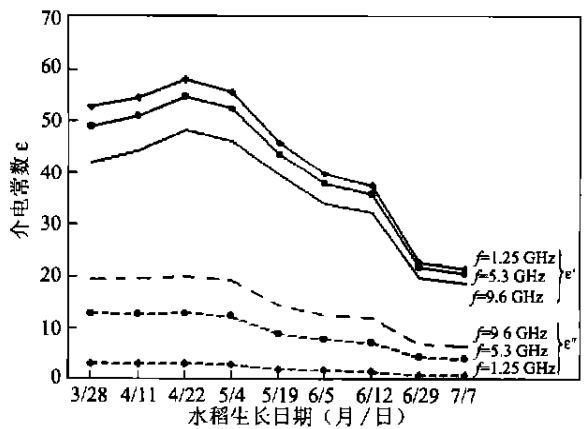


图 2 肇庆试验区 1997 年早稻生长期介电常数随时间变化图

Fig. 2 Variation of the dielectric constant with time from the early season rice of 1997 in Zhaoqing test site

电常数的实部还是虚部, 都呈现出先升后降的变化模式, 其中介电常数实部的变化远较虚部大得多, 并都在水稻的够苗期(9 月 24 日和 4 月 22 日)时, 介电常数达到最高值。对于 1996 年的晚稻, 在从够苗期向分蘖期过度时, 介电常数的实部下降较快, 而 1997 年的早稻在此时则缓慢减少, 在分蘖期向扬花期过度时才急剧下降。1996 年的晚稻由于插秧期的推迟, 分蘖期和扬花期相对缩短, 表现在介电常数实部的变化上较为平缓。最后从扬花期向成熟期过度时, 无论是早稻还是晚稻, 介电常数实部均是下降较快, 而虚部较慢。

4 介电常数影响因素

从上述植被介电常数的 Debye-Cole 双频色散模型可知,与水稻介电常数有关的主要因素主要有电磁波的频率、水稻的含水量、含盐度、温度和水稻冠层密度。以下将就这些因素对介电常数的影响进行探讨。

频率 从以上的图 1 和 2 可见,随着频率的增加,介电常数的实部减小,而虚部增大。这主要是由于频率的增加,电磁波能量衰减的比例增大,因而表现出反映电磁波衰减特性的介电常数虚部的增大,而电磁波色散比例相对减少,故实部减小。

含水量 同样结合图 1、图 2 和表 1 亦可看出介电常数随水稻含水量的变化。随着水稻含水量的增加,介电常数的实部和虚部均相应增大,这是由于水分子的取向极化导致电磁波的衰减所致。

温度 我们在此选择频率为 5.3GHz,含盐度为 8%,重量含水量分别为 50%、70%和 90%的条件来讨论温度对介电常数的影响(图 3)。从图 3 可见,随着温度从 5℃向 40℃的增加,介电常数的实部和虚部均相应增大,并且含水量愈大,增加的幅度愈快。这是由于温度升高,使分子的热运动加剧,电磁波能量的衰减的比例增加所致。

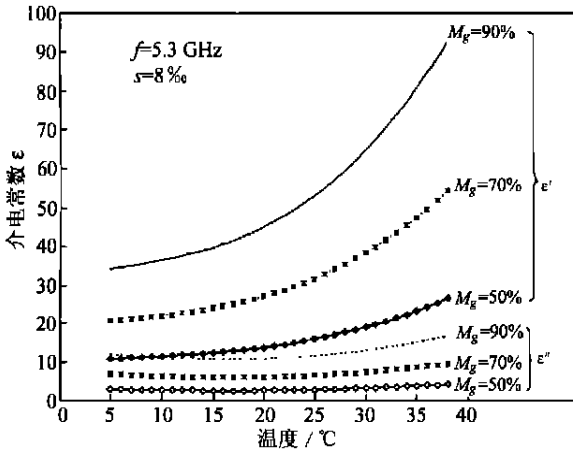


图 3 水稻介电常数随温度的变化图

Fig. 3 Variation of the dielectric constant of rice with temperature

含盐度 选择频率为 5.3GHz,温度为 25℃,重量含水量分别为 50%、70%和 90%的条件来讨论含盐度对介电常数的影响(图 4)。从图 4 可见,介电常数基本不受含盐度的影响,说明含盐度对电磁波能量分配的比例影响不大。

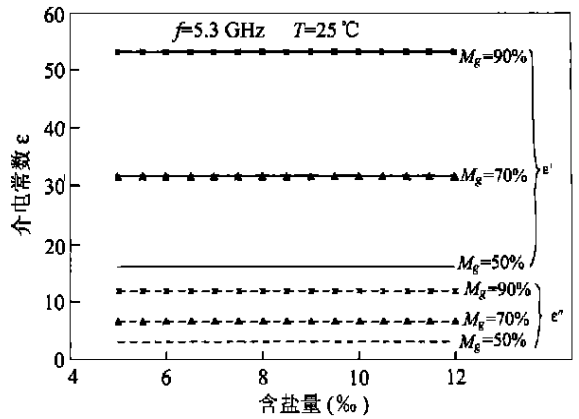


图 4 水稻介电常数随含盐度的变化图

Fig. 4 Variation of the dielectric constant of rice with salinity

对介电常数的影响,利用水稻冠层的干体密度来探讨介电常数对其影响。为此选择频率为 5.3GHz,温度为 25℃,含盐度为 8%,重量含水量分别为 50%、70%和 90%的条件讨论(图 5)。从图 5 可见,随水稻冠层干体密度的增加,介电常数的实部单调增加,虚部则变化较小。这是因为随水稻冠层干体密度的增加,电磁波能量的衰减比例上升。而虚部变化小,是由于水稻体内的自由水比重较大,即使水稻冠层干体密度增加,使得束缚水增多,但自由水的影响因子仍然很大,故使介电常数的虚部增加幅度较小。

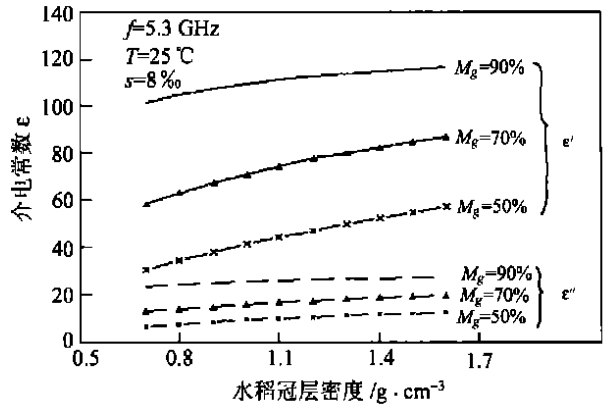


图 5 水稻介电常数随水稻冠层干体密度的变化图

Fig. 5 Variation of the dielectric constant of rice with dry canopy density

5 结 论

植被的介电常数较难于直接获取,因而利用模型计算不失为一种有效的选择。前人的研究均已表明,植被介电常数的 Debye-Cole 双频色散模型是计算植被介电常数的有效手段。因此本文利用该模型计算了肇庆试验区内早稻和晚稻不同生长期的

介电常数。从计算结果可见,不同的生长期,介电常数各不相同,从插秧期到够苗期过渡,介电常数增大,至够苗期时最大。而够苗期后,向分蘖期、扬花期和成熟期过渡,介电常数相应减少,并因早稻和晚稻在生长期的表现不同,介电常数增加和减少的幅度也相应不同。

同时,通过对水稻介电常数影响因素的探讨得出,电磁波频率、水稻的含水量、温度和水稻冠层的干体密度均对水稻的介电常数有不同程度的影响,而含盐度则影响不大。其中随着电磁波频率的增加,介电常数实部减小,而虚部增大;随着水稻含水量和温度的增加,介电常数实部和虚部均增大;而水稻冠层干体密度的增加,则对介电常数的实部的增加较快,而虚部影响较小。

致谢: 本文的部分工作是在意大利国家理事理事会信号与图像处理研究所完成,得到了联合国教科文组织(UNESCO)国际理论物理中心(ICTP)TRIL项目的支持,在此谨致谢忱!

Study of Microwave Dielectric Properties of Rice Growth Stages

LIAO Jing-juan, SHAO Yun, GUO Hua-dong, QI Zhen

(Laboratory of Remote Sensing Information Sciences, Institute of Remote Sensing Applications, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101)

Abstract: Rice is a vital world food crop, and most paddy rice fields distribute in warm, humid environmental regions with heavy cloud cover and rainfall. It is difficult to acquire optical remote sensing data in these regions. So SAR system is used to map and monitor rice crop growth status. It is important for rice monitoring to understand the microwave backscattering. The backscattering is related to the dielectric properties and geometric parameters besides the radar system parameters. The geometric parameters of the rice can be easily measured, but it is very difficult to get the dielectric constant from ground observation due to many influence factors. So it is necessary to compute the dielectric constant using models.

This paper presents the modeling results of dielectric constants from different rice growth stages in Zhaoqing test site using Debye-Cole dual-dispersion mode of vegetation. In the test site, two crops of early season rice and late season rice are planted in 1997 and 1996, and the growing period of rice crop is divided into five major stages: transplant, seeding developing, ear differentiation, heading and mature period. Based on the results, the paper discusses the influences from microwave frequency, gravimetric moisture content of rice, temperature, salinity and bulk density of dry vegetation materials on dielectric constant. The rice crops of different growth stages have the various dielectric constants, and the dielectric constants of early and late season rice crops show the diverse changes. The parameters, including microwave frequency, gravimetric moisture content of rice, temperature and bulk density of dry vegetation materials, have the influence on dielectric constant, but salinity has no effect on the dielectric constant.

Key words: rice; growing period; dielectric constant; influence

参 考 文 献 (References)

- [1] Le Toan, Ribbes F, Wang L *et al.* Rice crop mapping and monitoring using ERS-1 data based on experiment and modeling results [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote sensing*, 1997, **GE-35**: 41-56.
- [2] Shao Yun, Fan Xiangtao, Wang Cuizhen *et al.* Estimation rice growth stage using Radarsat data [A]. *Proceedings of IEEE Geosci. and Remote Sensing [C]*. Singapore, 1997.
- [3] El-rayes M A, Ulaby F J. Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part-I: experimental observation [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote sensing*, 1987, **GE-25**(5): 541-549.
- [4] Ulaby F J, El-rayes M A. Microwave dielectric spectrum of vegetation-Part-II: dual-dispersion model [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote sensing*, 1987, **GE-25**(5): 550-557.
- [5] Ulaby F J, Jedlicka R P. Microwave dielectric properties of plant materials [J]. *IEEE Trans. on Geosci. and Remote sensing*, 1984, **GE-22**(4): 406-415.
- [6] Zhang Junrong, Wang Liwei, Zhang Dehai. The microwave dielectric constant of canopy and soil [J]. *Remote Sensing Technology and Application*, 1995, **10**(3): 40-50. [张俊荣, 王丽巍, 张德海. 植被和土壤的微波介电常数[J]. *遥感技术与应用*, 1995, **10**(3): 40-50.]
- [7] Ulaby F J, Moore R K, Fung A K. *Microwave remote sensing (Vol. 3)* [M]. Artech House, 1986.
- [8] Jin Yaqiu. *Remote Sensing Theory of Scatter and Radiation from the Electromagnetic Wave* [M]. Beijing: Science Press, 1993. 金亚秋. *电磁散射和热辐射的遥感理论* [M]. 北京: 科学出版社, 1993.