

基于介电频谱特征参数的红壤 干旱指标评价研究

王海军¹, 徐兴倩¹, 屈新², 赵熹¹, 王能龙¹, 曹涵¹

(1. 云南农业大学水利学院, 云南 昆明 650201; 2. 安阳工学院土木与建筑工程学院, 河南 安阳 455000)

摘要:为获取红壤含水量对电磁波介电频谱的响应特征,探讨介电频谱特征参数作为红壤干旱评价指标的可行性,以红壤为研究对象,开展不同体积含水量红壤的频域介电谱(FDS)试验,提取介电谱特征曲线积分值,分析介电频谱特征参数与体积含水量的相关性,结合国家《农业干旱等级》标准提出基于介电频谱特征参数的红壤干旱评价指标。结果表明:红壤介电常数实部和虚部均随着介电频谱频率的增大而逐渐减小,两者与体积含水量均呈正相关关系;介电损耗因数随频率变化具有波动性,且体积含水量越小波动性越强,总体呈现出先减小后增大的趋势;通过最小二乘法拟合得到介电频谱特征参数与体积含水量的量化关系,采用细菌觅食算法确定最优的模型系数,拟合精度均大于0.95;基于介电谱特征参数建立红壤干旱指标评价模型,预测值与标准值之间的误差均为 $\pm 1\%$ 左右。该模型能有效地评价红壤干旱程度,可为红壤区域性农业干旱调查、评估及预警提供参考指标。

关键词:红壤;频域介电谱;特征参数;体积含水量;干旱指标

中图分类号:S152;S155.2⁺5 文献标志码:A

Evaluation of red soil drought index based on dielectric spectrum characteristic parameters

WANG Haijun¹, XU Xingqian¹, QU Xin², ZHAO Xi¹, WANG Nenglong¹, CAO Han¹

(1. College of Water Conservancy, Yunnan Agricultural University, Yunnan, Kunming 650201, China;

2. School of Civil and Construction Engineering, Henan Anyang Institute of Technology, Anyang, Henan 455000, China)

Abstract: The purpose of this study was to obtain the response characteristics of red soil moisture content to the dielectric spectrum of electromagnetic wave and discuss the feasibility of dielectric spectrum characteristic parameters as the evaluation red soil drought index. The frequency domain dielectric spectroscopy (FDS) test of red soil with different volume water content was finished, and the integral value of the dielectric spectrum characteristic curves was extracted to analyze the correlation between the dielectric spectrum characteristic parameters and the volume water content. Combined with the national agricultural drought grade standard, the red soil drought evaluation indexes based on dielectric spectrum characteristic parameters were proposed. The results showed that the real and imaginary parts of the dielectric constant of red soil gradually decrease with the increase of the frequency of the dielectric spectrum, and both were positively correlated with the volumetric water content. The dielectric loss factor fluctuates with the increasing frequencies, the smaller the volumetric water content, the stronger the fluctuation, and a trend of decreasing first and then increasing was showed. The quantitative relationship between the characteristic parameters of the dielectric spectrum and the volumetric water content was given by the least square method. The bacterial foraging algorithm was used to determine the optimal model coefficients, and the fitting accuracy was greater than 0.95. Finally, the evaluation model of red soil drought index was established based on the characteristic parameters of dielectric spectroscopy. The error between the predicted value and the standard value was between \pm

收稿日期:2023-09-01

修回日期:2023-10-11

基金项目:国家自然科学基金(42367025);云南省基础研究计划面上基金(202101AT070271);云南省高层次人才支持计划“青年拔尖人才”专项(YNWR-QNBJ-2020-030);云南省教育厅科学研究基金(2023Y1017)

作者简介:王海军(1996-),男,四川汉源人,硕士研究生,研究方向为水土保持工程。E-mail: wanghaijun_6@163.com

通信作者:徐兴倩(1985-),男,云南宣威人,博士,副教授,主要从事环境岩土工程研究。E-mail: xuxingqian_123@163.com

1%. The model could effectively evaluate the degree of red soil drought degree to provide the reference indicators for regional agricultural drought investigation, assessment, and early warning in red soil.

Keywords: red soil; frequency domain dielectric spectroscopy; characteristic parameter; volumetric water content; drought index

红壤是我国南方主要的土壤资源,其分布面积高达 $2.2 \times 10^6 \text{ km}^2$,处于热带和亚热带季风气候敏感区域,干湿季节特征明显。在湿热气候的交替作用下,红壤分布地区易出现干旱或半干旱自然灾害,造成植物缺水而生长发育不良,严重时甚至出现红壤荒漠化现象。一般而言,农业干旱等级划分为 4 级,即轻旱、中旱、重旱和特旱,通常用作物水分亏缺距平指数、农田与作物干旱形态指数、土壤相对湿度指数等对农业干旱等级进行界定^[1]。其中,作物水分亏缺距平指数和农田与作物干旱形态指数主要用于表征作物生长过程中的缺水程度,相对湿度则可直观反映红壤的干湿程度。土壤水分检测大多基于电磁波技术,通过分析土壤水分的电磁波介电响应反演计算含水量,进而间接评价土壤干湿指数^[2-3]。然而不同频率电磁波的土壤介电谱响应特征各异,即频域介电技术对土壤含水量的测试存在频率依赖性问题,而通过频域介电谱定量化预估红壤含水率的研究鲜有报道,缺乏电磁波频域特征的量化分析。因此,开展电磁波法快速、精确地反演红壤水分含量的试验研究,对评价区域性红壤的干湿状态有重要意义。

频域介电谱法(FDS)是一种用于测量物质介电常数随频率变化的电磁波无损检测技术,具有抗干扰能力强、包含信息丰富等优势。频域介电谱技术通过低频和高频测量土壤的介电损耗和介电常数随频率的变化特性,可间接反演土壤受潮程度或干湿状态^[4]。在不同频段电磁波激励信号作用下,土壤产生的介质极化类型和程度不同,按频段可分为界面极化、转向极化、离子极化和电子极化^[5-6]。当频率低时,土壤存在多种介质极化现象致使对应的极化程度增强,介电常数显著增加;当频率高于某类极化发生频率时,该类极化会被逐渐削弱直至消失^[7-8]。所以,土壤极化与电磁波频率直接相关,影响介电测试结果的关键因素为测试频率。红壤属于多相不均匀分散体,在不同电磁波频率条件下红壤孔隙水的分布促使介电频散现象十分明显,从而表现出不同的频域介电谱响应特征。

土壤介电频谱测量技术主要包括探地雷达(GPR)、频域反射(FDR)和矢量网络分析仪。探地雷达适用于野外测量工作,通过测量土壤对不同频

率电磁波的反馈信号,选取某个频率下的介电模型转换出土壤含水量^[9-11]。频域反射仪适用于田间原位测量,通过发射不同振荡频率的电磁脉冲信号,形成 LC 振荡电路,由振荡频率变化获取介电谱^[12-13]。矢量网络分析仪适用于室内研究,依据不同土壤类型发射不同频段的电磁波,测量幅频特征和电磁波相位信息,计算介电频谱反演土壤含水率^[14]。频域介电谱测量技术存在频率依赖性,需经复杂的后处理来标定模型系数和选取频率,往往难以消除土壤含水率反演时频变因素的影响,且存在耗时费力和测试精度受限的问题。因此,开展红壤频域介电谱试验分析研究,探索引入介电谱特征参数解决红壤介电常数的频率依赖性问题,有望为频域介电谱反演红壤干旱程度提供理论依据。

本文通过红壤频域介电谱特性试验研究,分析不同体积含水量条件下红壤的频域介电谱特征曲线,提取频域介电谱实部、虚部、介电损耗因数的数值积分;然后通过最小二乘法拟合得到红壤的频域介电谱模型,并采用细菌觅食算法(BFOA)优化模型系数;最后结合国家农业干旱等级划分标准,提出基于介电谱特征参数的红壤干旱等级划分指标。

1 土壤频域介电谱(FDS)理论

FDS 是指在低压正弦交流激励下,通过不同频率测试对应的介质损耗值,再根据介质两端的电压幅值信息与相位信息计算出频域介电谱参数。若在充满相对介电常数的平行板电极间施加交流电压 U ,则电极之间形成的电位移 D 滞后于介质材料两端施加的交流电场强度 E 。此时,在平行板电极之间发生的介质响应过程可通过相关参数(D 和 E)进行表征。当频变交流电场通过土壤时,形成频域介电谱,此时 D 和 E 之间有相角差,土壤复介电常数(ε^*)满足以下条件^[15]:

$$\varepsilon^* = \frac{D}{\varepsilon_0 \times E} = \varepsilon' - j\varepsilon'' \quad (1)$$

在交变电压条件下复介电常数(ε^*)为:

$$\varepsilon^* = \frac{C^*}{C_0} = \frac{\varepsilon' C_0 - j\varepsilon'' C_0}{C_0} = \frac{C' - jC''}{C_0} \quad (2)$$

介电损耗因数($\tan\delta$)为:

$$\tan\delta = \frac{\varepsilon''}{\varepsilon'} = \frac{C''}{C'} \quad (3)$$

式中, ϵ' 为介电常数实部; ϵ'' 为介电常数虚部; C^* 为复电容; C' 为实部电容; C'' 为虚部电容; C_0 为介质几何电容; ϵ_0 为真空介电常数; j 为虚数单位。

2 材料与方 法

2.1 试验材料

供试红壤取自云南省昆明市,呈棕红色,去除表层扰动土后,取约 15 cm 深处土样,测量天然含水率。将试验土样自然风干、碾碎,过 2 mm 网筛,烘干 12 h 后装入密封塑料盒中备用,并测得土样的基本物理性质:最大干容重和平均干容重分别为 $1.46 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 和 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$,最优含水率和天然含水率分别为 27.99% 和 14.19%,液限和塑限分别为 27.1% 和 55.9%,比重为 $2.73 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。

2.2 试验方案

采用同体积质量法严格控制红壤含水率和干容重,将红壤控制为直径 61.8 mm、高 20.0 mm 的土柱样。土柱样干容重分别控制为 1.15、1.20、1.25、1.30、1.35、1.40 $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$,并依次控制质量含水率为 15%、18%、21%、24%、27%、30%。将制备好的土柱样放入自制平行板电极装置中,采用安捷伦 Agilent 4294A 仪进行土柱样电容和介电损耗因数频谱测量,在 1~7 MHz 频率范围内开展红壤频域介电谱测量。测量结束后,采用烘干法测定土样实际含水率,计算土样实际干容重,并换算出实际体积含水量 θ_1 、 θ_2 、 θ_3 、 θ_4 、 θ_5 、 θ_6 ,从而分析红壤 FDS 谱图的变化规律。

2.3 试验步骤

(1) 烘干土样后按同体积质量法称取不同干容重对应的干土质量;(2) 按方案分别向干土中加入既定质量的水,充分拌制均匀,并静置 8 h 使水分均匀分布;(3) 按直径 61.8 mm、高 20.0 mm 的模具进

行红壤样压实,以控制其干容重;(4) 进行土柱样的介电频谱测试,扫频范围为 1~7 MHz;(5) 测试结束后采用烘干法实测含水率,并换算出实际体积含水量;(6) 整理数据,分析红壤介电频谱特性。

2.4 测试原理

将安捷伦 Agilent 4294A 仪与自制平行板电极装置相连,通过测试红壤土柱样复电容实部和介电损耗因数 ($\tan\delta$),再换算出复介电常数实部和虚部,原理为:

$$\epsilon' = \frac{d \times C}{A \times \epsilon_0} \quad (4)$$

$$\epsilon'' = \epsilon' \tan\delta \quad (5)$$

式中, ϵ' 为介电常数实部; ϵ'' 为介电常数虚部; A 为土样的截面积 (m^2); d 为土样的厚度 (m); C 为电容值 (F)。如图 1 所示,将制备好的红壤柱放入自制平行板电极装置中,再将安捷伦 Agilent 4294A 测试仪与自制平行板电极相连,然后测量土柱样电容谱,从而获取红壤的复介电常数频谱。

3 基于介电频谱特征参数的土壤干旱指标

3.1 红壤介电频谱响应特征分析

为探究不同含水率下红壤频域介电谱变化规律,测量了不同体积含水量条件下红壤介电频谱响应值。通过系统分析土壤介电频谱实测数据,绘制了红壤复介电常数实部和虚部随频率变化的关系 (图 2)。红壤复介电常数实部和虚部均随频率增大而逐渐减小,在整个频率范围内复介电常数实部、虚部与体积含水量呈正相关关系。当体积含水量较小时,红壤复介电常数实部和虚部变化率较小;反之,红壤复介电常数实部和虚部变化率较大。上述结果表明,当复介电常数随体积含水量逐渐减小

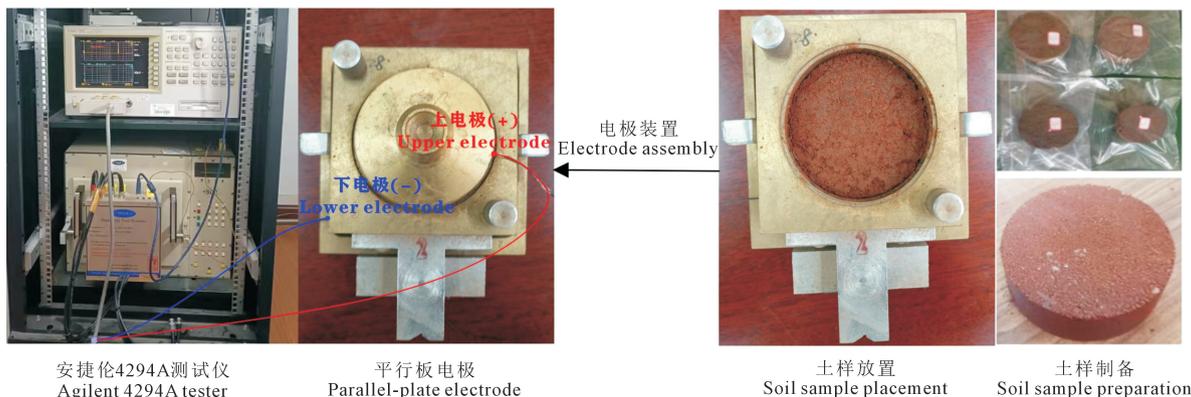


图 1 频域介电谱测试

Fig.1 Frequency domain spectroscopy

时,频率越大复介电常数的数值波动越小。因此,不论从频率角度还是体积含水量角度来看,复介电常数均表征了红壤水分对电磁波频率的响应特征。

图 3 为不同体积含水量条件下红壤介电损耗因数($\tan\delta$)的频谱变化规律。红壤介电损耗因数具有一定频谱波动性,与土壤体积含水量和频率密切相关。当体积含水量较小时,红壤介电损耗因数频谱

波动性小于 ± 0.1 ,不同体积含水量条件下 $\tan\delta$ 波动性差异较大且频谱波峰较窄(图 3a、b、c)。当体积含水量较大时,红壤介电损耗因数频谱波动性介于 $\pm 0.25 \sim \pm 0.40$,不同体积含水量条件下 $\tan\delta$ 波动性趋势一致且频谱波谷较宽(图 3d、e、f)。不同交变电场频率条件下红壤介电频谱波动性不同,引起介质极化程度不同,直观地反映了不同体积含水量下红壤介电谱损耗特性及介电能力强弱。

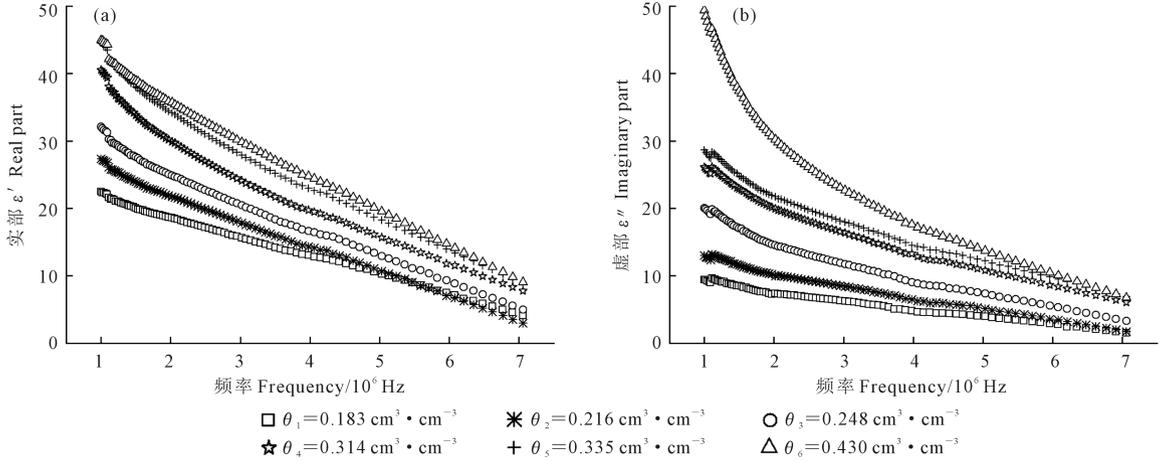


图 2 红壤 FDS 特征曲线的变化规律

Fig.2 The change rule of red soil FDS characteristic curve

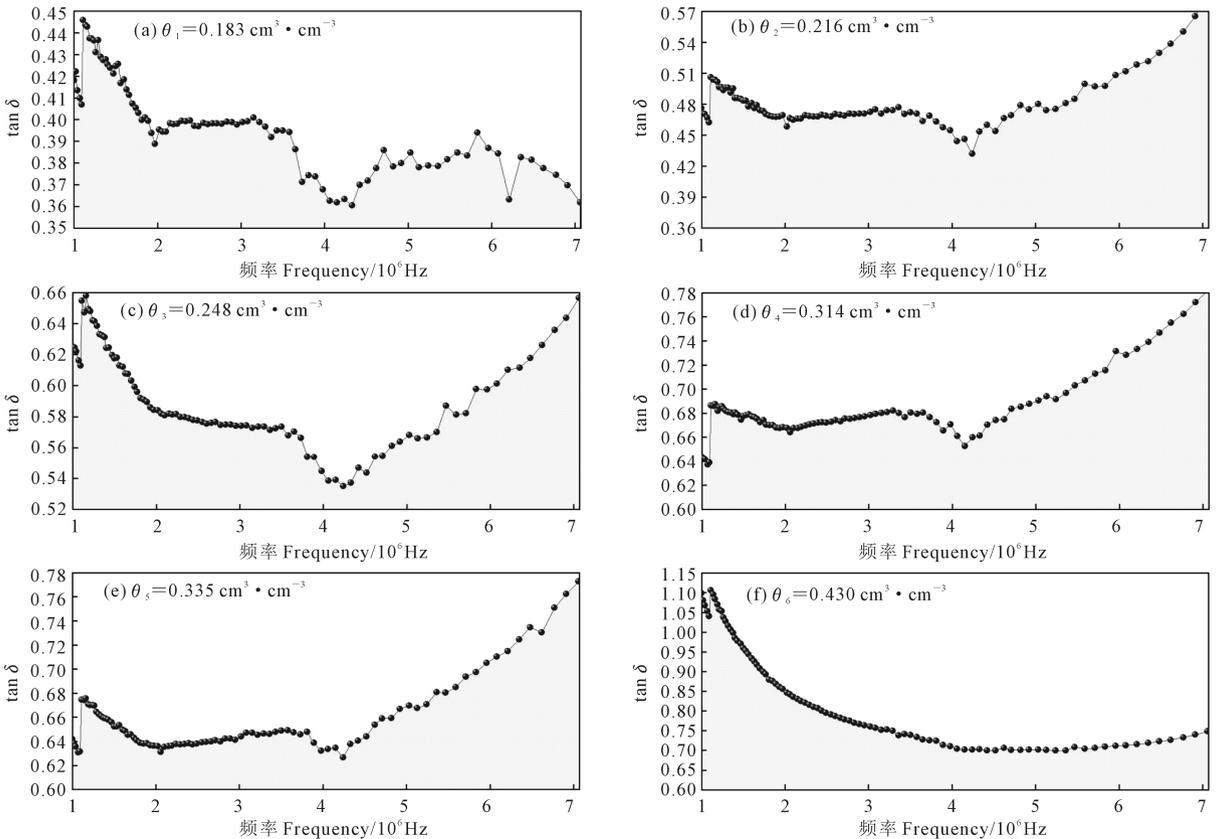


图 3 红壤介电损耗因数曲线的变化规律

Fig.3 Variation of dielectric loss factor curve of red soil

3.2 红壤介电频谱特征参数评价指标分析

为系统探究频域介电谱定量评价红壤干旱程度的可行性,现对 FDS 特征曲线进行后处理分析。在电子松弛极化频段范围内,提取 FDS 特征曲线的积分值来实现红壤频域介电谱的定量化表征。基于红壤频域介电谱测量结果,本文提出频域介电常数实部、虚部、介电损耗因数共 3 个特征参数:

$$\kappa' = \int_a^b \varepsilon'(f) \cdot df \quad (6)$$

$$\kappa'' = \int_a^b \varepsilon''(f) \cdot df \quad (7)$$

$$\lambda = \int_a^b \tan\delta(f) \cdot df \quad (8)$$

式中, κ' 、 κ'' 、 λ 分别表示实部、虚部和介电损耗因数对应的介电谱特征参数; a 、 b 分别表示测试频率的上下限; f 表示频率(Hz); df 为频率的微分。在数学定积分原理中,通过计算 FDS 特征曲线与频率所围成区域的微元面积之和,即可获得 κ' 、 κ'' 、 λ 值。因此,为求解 FDS 特征曲线的积分值,采用数值积分 trapz(X, Y) 函数进行红壤频域介电谱特征参

数提取。该函数主要是通过梯形公式求解沿任意给定轴和数据边界点的积分,即假设将相同长度的离散数据样点(X, Y) 看成微元梯形,通过求解微元梯形面积之和来确定积分值(表 1)。

表 1 红壤 FDS 特征曲线的特征参数
Table 1 Characteristic parameters of red soil FDS characteristic curve

体积含水量 Volumetric water content /($\text{cm}^3 \cdot \text{cm}^{-3}$)	特征参数 Characteristic parameter		
	实部特征 参数 κ' Real part characteristic parameter($\times 10^8$)	虚部特征 参数 κ'' Imaginary part characteristic parameter ($\times 10^8$)	介电损耗因数 特征参数 λ Characteristic parameters of dielectric loss factor($\times 10^8$)
0.180	0.782	0.308	0.024
0.216	0.868	0.414	0.029
0.248	1.025	0.601	0.036
0.314	1.265	0.854	0.041
0.335	1.416	0.944	0.042
0.430	1.581	1.732	0.047

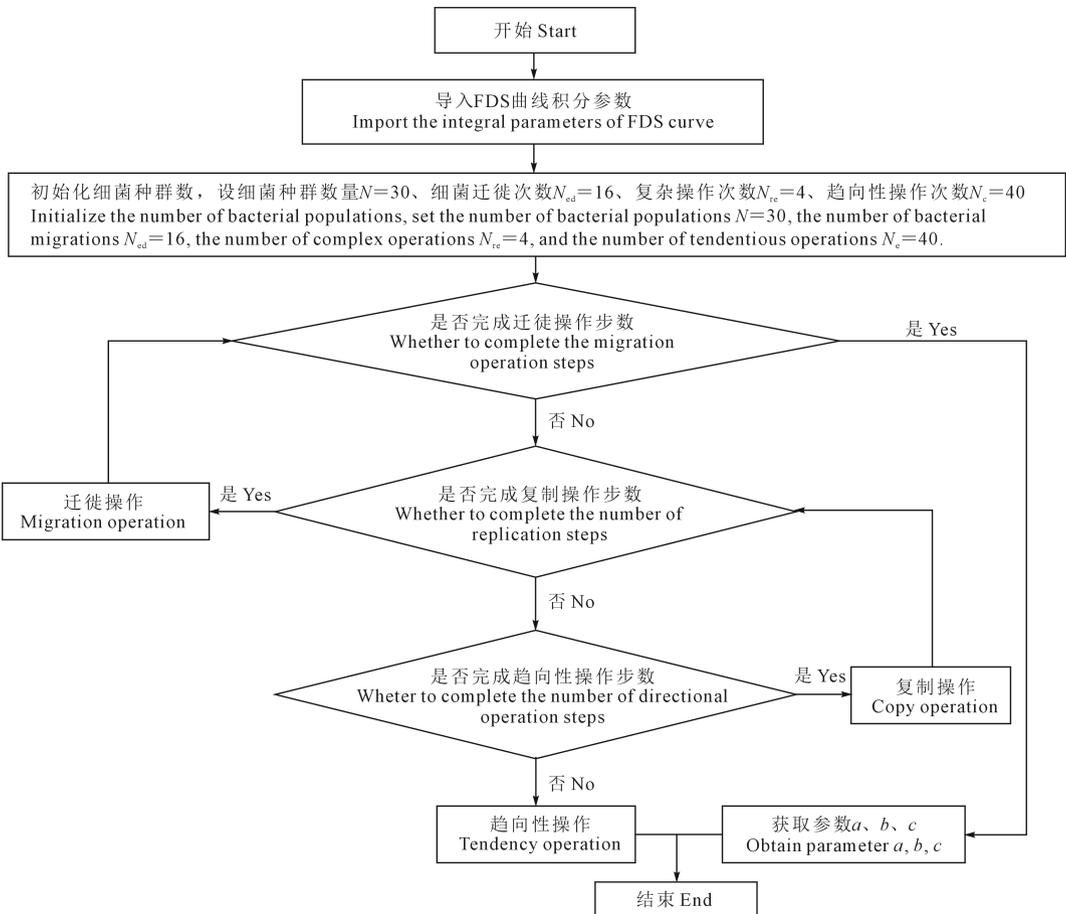


图 4 BFOA 算法流程

Fig.4 BFOA algorithm flow

在红壤三相体系中,频域介电谱对水的敏感性较强,通过求解红壤 FDS 特征曲线积分值可以定量评价土壤水分含量。根据介电谱特征参数与红壤体积分含水量的离散点分布情况,拟采用最小二乘法拟合构建频域介电谱模型:

$$\kappa' = a + b\theta_v \quad (9)$$

$$\kappa'' = a + \exp(b\theta_v) \quad (10)$$

$$\lambda = a + b\theta_v + c\theta_v^2 \quad (11)$$

利用最小二乘法获取上式中系数 a 、 b 、 c 时,为避免最小优化二乘法求解辨识结果受初始值影响,采用智能优化算法寻找最优化参数值。目前,常用的介电模型参数辨识智能优化算法有遗传算法、粒子群算法和细菌觅食算法等^[16]。相比而言,遗传算法和粒子群算法在求解时容易陷入局部最

优,而细菌觅食算法(BFOA)作为一种新型智能仿生类优化算法,具有并行搜索、不易陷入局部最优等优点。因此,选用 BFOA 算法对模型(9)、(10)、(11)进行模型参数辨识。如图 4 所示,细菌觅食算法优化过程主要分为 3 层循环,即内层循环、中层循环和外层循环^[17]。在内层循环过程中,细菌进行趋向性操作为种群寻找更好的食物,即更优适应度;当趋化操作进行一定次数后细菌转入中层循环进行复制操作,进而淘汰适应度较差的细菌;外层循环中细菌则通过迁徙操作保持种群的多样性,即跳出局部最优解。通过 BFOA 算法获取模型参数 a 、 b 、 c 值后,将最小二乘法构建的拟合模型与试验数据离散点进行对比分析,验证最优化参数的准确性。

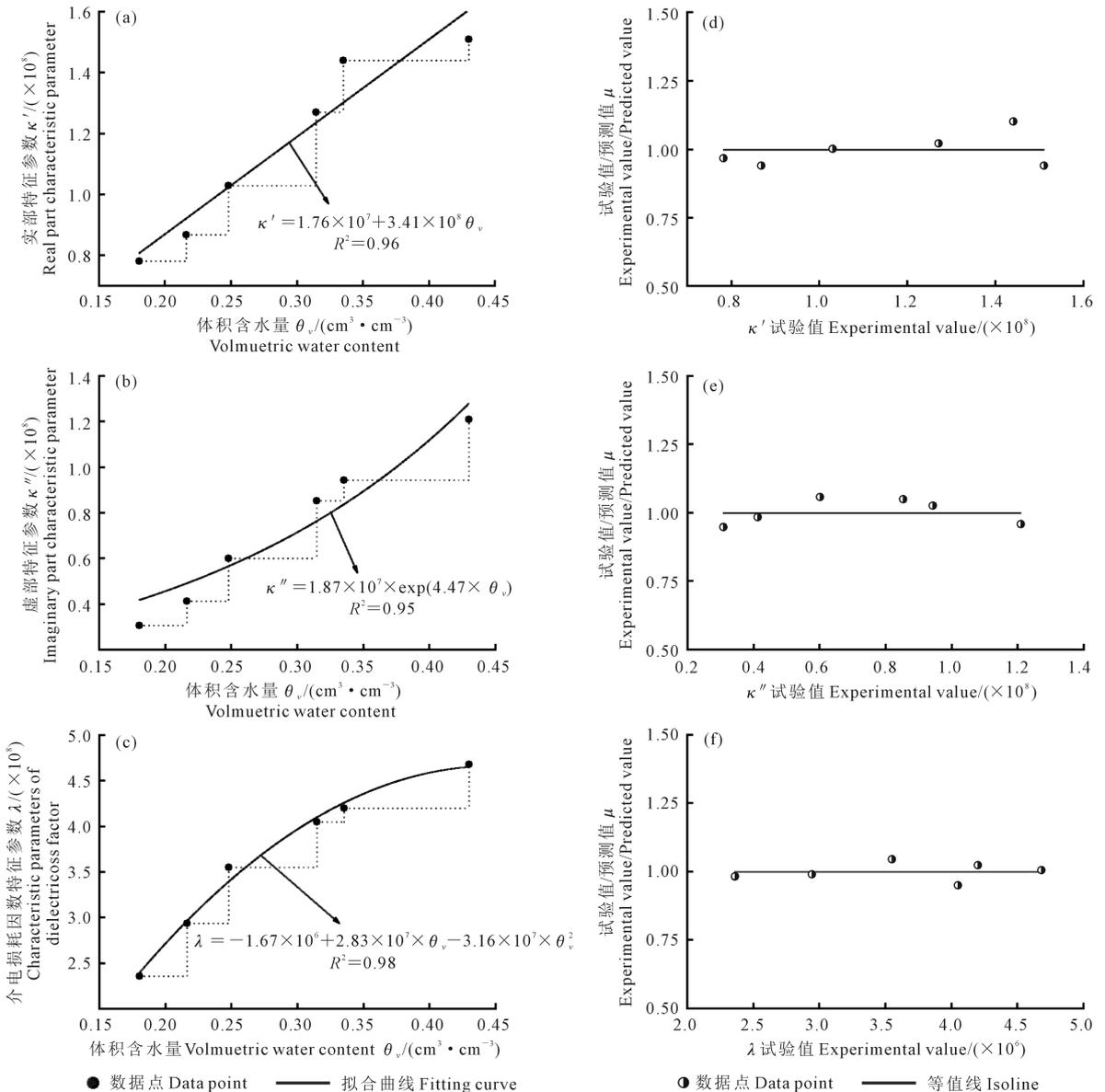


图 5 红壤频域介电谱积分参数与体积分含水量的关系

Fig.5 Relationship between red soil frequency domain dielectric spectroscopy integral parameters and volumetric water content

图 5 表示通过 FDS 特征曲线特征参数构建的最小二乘法频域介电谱拟合模型值与试验数据离散点的关系。由图 5a、b、c 可以看出,通过最小二乘法拟合构建的频域介电谱模型值与试验数据离散点的吻合性高,准确性可靠。为进一步验证最优化算法确定的模型预测精度,对试验值与预测值的比值波动性进行误差分析。由图 5d、e、f 可知,横坐标表示红壤频域介电谱特征参数试验值,纵坐标表示试验值与预测值的比值(μ),实线表示等值线。经检验分析, κ' 、 κ'' 和 λ 这 3 个特征参数 μ 的均值分别为 0.99865、0.98589 和 0.99959,均在 1.0 附近波动,即离散性小,吻合度高,符合数据点波动性规律,其相对误差小,拟合模型的预测精度高。

3.3 基于介电频谱特征参数的红壤干旱指标等级划分

土壤相对湿度干旱指数(r)反映了土壤持水量及作物生长需水量,是农业旱情的重要指标。根据国家《农业干旱等级》标准(GB/T 32136—2015)采用土壤相对湿度等级干旱指数将干旱划分为 4 个等级^[18],即一级轻旱($50\% \leq r < 60\%$)、二级中旱($40\% \leq r < 50\%$)、三级重旱($30\% \leq r < 40\%$)和四级特旱($r < 30\%$),其中土壤相对湿度与体积含水量的转换关系满足以下公式条件^[19]:

$$\theta_v = \frac{\rho_d \cdot f_c \cdot r}{\rho_w} \quad (12)$$

式中, f_c 为田间土壤持水量,取 25%; w 为重量含水率; ρ_w 为水的密度,取 $1 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$; ρ_d 为土壤容重,取 $1.26 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。将式(12)带入式(9)、(10)、(11)得

到基于介电谱特征参数的红壤干旱指标评价模型:

$$\kappa' = a + b \times \frac{\rho_d \cdot f_c \cdot r}{\rho_w} \quad (13)$$

$$\kappa'' = a + \exp\left(b \times \frac{\rho_d \cdot f_c \cdot r}{\rho_w}\right) \quad (14)$$

$$\lambda = a + b \times \frac{\rho_d \cdot f_c \cdot r}{\rho_w} + c \times \left(\frac{\rho_d \cdot f_c \cdot r}{\rho_w}\right)^2 \quad (15)$$

由红壤干旱指标评价模型可得红壤相对湿度,从而提出基于介电谱特征参数的干旱评价指标(表 2)。结合国家农业干旱等级划分标准,以介电谱特征参数为干旱指标划分了红壤干旱等级,进而评价了红壤干湿状态。采用介电谱特征参数(κ' 、 κ'' 、 λ)划分红壤轻旱、中旱、重旱、特旱等级,有效克服了频域介电谱频率依赖的局限性。一般而言,通过介电谱特征参数能有效表征宏观红壤的水分含量,在交变频率作用下红壤内部会发生介电损耗,进而将介电谱特征参数分解为实部和虚部。当介电谱的 3 个特征参数表现一致时,可直接评价红壤的干旱程度;当介电谱的 3 个特征参数表现不一致时,由于介电谱满足 $\tan\delta = \varepsilon''/\varepsilon'$,则可通过介电谱特征参数 λ 来评价红壤的干旱等级。

由表 3 可知,通过红壤频域介电谱 3 个特征参数计算得到的相对湿度与“标准相对湿度”十分接近,其误差均在 $\pm 1\%$ 左右范围波动。由此说明,提出的频域介电谱 3 个特征参数是合理可靠的,能够用于预判红壤是否干旱。相对湿度 r_1 、 r_2 、 r_3 由频域介电谱特征参数 κ' 、 κ'' 、 λ 计算得出,其表征了基于介电谱特征参数预测得到的红壤干湿程度。

表 2 红壤干旱指标等级划分

Table 2 Classification of red soil drought index

等级 Grade	类型 Type	相对湿度 r Relative humidity	κ' ($\times 10^8$)	κ'' ($\times 10^8$)	λ ($\times 10^8$)
1	轻旱 Light drought	$50\% \leq r < 60\%$	$0.71 \leq \kappa' < 0.82$	$0.31 \leq \kappa'' < 0.37$	$0.053 \leq \lambda < 0.059$
2	中旱 Mid-drought	$40\% \leq r < 50\%$	$0.61 \leq \kappa' < 0.71$	$0.25 \leq \kappa'' < 0.31$	$0.047 \leq \lambda < 0.053$
3	重旱 Heavy drought	$30\% \leq r < 40\%$	$0.50 \leq \kappa' < 0.61$	$0.20 \leq \kappa'' < 0.25$	$0.041 \leq \lambda < 0.047$
4	特旱 Extraordinary drought	$r < 30\%$	$\kappa' < 0.50$	$\kappa'' < 0.20$	$\lambda < 0.041$

表 3 红壤干旱指标误差分析

Table 3 Error analysis of red soil drought index

等级 Grade	类型 Type	标准相对湿度 r Standard relative humidity	相对湿度 r_1 Relative humidity	相对湿度 r_2 Relative humidity	相对湿度 r_3 Relative humidity
1	轻旱 Light drought	$50\% \leq r < 60\%$	$49.7\% \leq r_1 < 59.95\%$	$50.90\% \leq r_2 < 59.74\%$	$49.25\% \leq r_3 < 60.20\%$
2	中旱 Mid-drought	$40\% \leq r < 50\%$	$40.40\% \leq r_1 < 49.71\%$	$40.14\% \leq r_2 < 50.90\%$	$39.47\% \leq r_3 < 49.25\%$
3	重旱 Heavy drought	$30\% \leq r < 40\%$	$30.16\% \leq r_1 < 40.40\%$	$28.99\% \leq r_2 < 40.14\%$	$30.54\% \leq r_3 < 39.47\%$
4	特旱 Extraordinary drought	$r < 30\%$	$r_1 < 30.16\%$	$r_2 < 28.99\%$	$r_3 < 30.54\%$

4 讨 论

土壤水分作为表征土壤墒情的重要指标,其电磁无损诊断方式越来越受到重视。我国红壤分布区域气候环境变化复杂,易出现干旱或半干旱等自然灾害,这使得高效、精准预判红壤是否发生旱情至关重要。目前,基于频域电磁波测量土壤含水量的技术方法主要有 GPR、FDR 和矢量网络分析仪等,但这些测量技术均存在介电频谱依赖性问题,无法直接表征红壤干湿程度。相比而言,本文提出的 3 个特征参数可直接量化介电谱与红壤相对湿度的关系,在实际工程中具有一定优势:一方面直接获取红壤频域介电谱得到的结果具有抗干扰能力强、准确性高、获取信息快等特点;另一方面采用电磁波无损技术测量出红壤介电谱,再直接提取 3 个特征参数,标定频域介电谱模型系数后可得到红壤相对湿度,从而精确地判断红壤的干旱等级。

此外,利用该频域介电谱模型预判红壤干湿程度还受地质、作物和其他因素影响。在不同地质和作物根系生长环境中红壤的持水量不同,而不同植物或作物对水分需求或吸收量不同,致使红壤的干湿程度不同。当红壤水分含量相同时,由于不同植物根系对土壤水分含量的需求差异大,其生长状态也不同,因而难以根据某种植物生长状态直接评价该区域的干旱情况。在实际工作中,利用频域介电技术对覆盖不同植物或作物的红壤地区开展介电谱测量,将测量数据带入式(9)、(10)、(11)中,标定和校正模型系数 a 、 b 、 c 之后,即可反演计算出红壤的相对湿度,进而直接划分评价红壤的干旱等级。由此可见,利用频域介电谱模型评价红壤干旱情况具有可行性。未来需要通过大量实测数据来标定或校正红壤质地、植物或作物因素影响下的介电谱特征参数,从而提高介电谱特征参数对区域性红壤干旱的判别精度;同时融合微波遥感观测技术测量不同植被覆盖层的土壤频域介电谱,有望进一步提升介电谱特征参数在区域性土壤旱情评价方面的推广应用。

5 结 论

1) 红壤介电常数实部、虚部均随介电频谱频率增大呈逐渐减小趋势,而介电损耗因数随频率变化呈现出波动性响应。在一定体积含水量条件下,红壤介电常数实部、虚部及介电损耗因数对应不同的频谱特征曲线,且随体积含水量增大频谱幅值也相应增大,具有较强的频率依赖性。

2) 通过分析频谱特征曲线提出了评价红壤干旱的介电谱特征参数,利用最小二乘法拟合特征参数与体积含水量的关系,并采用细菌觅食算法求解出模型最优系数,拟合得到的模型精度较高 (R^2 均大于 0.95)。红壤介电谱特征参数的提出解决了介电谱技术对频率依赖性的问题,该特征参数可作为红壤干旱指标等级划分的重要依据。

3) 采用介电谱特征参数作为红壤干旱评价指标,划分了红壤轻旱、中旱、重旱和特旱 4 个等级,相对湿度预测值与标准值之间的误差为 $\pm 1\%$ 左右。相比于传统土壤相对湿度的干旱等级划分标准,基于频域介电谱的特征参数的评价方法具有高效、经济、无损等优势,可为土壤干旱等级划分提供新的指标参考。

参 考 文 献:

- [1] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会. 农业干旱预警等级: GB/T 34817-2017[S]. 北京: 中国标准出版社, 2018.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Warning grade of agricultural drought: GB/T 34817-2017[S]. Beijing: Standards Press of China, 2018.
- [2] 胡建东, 李林泽, IDERAWUMI A M, 等. 介电特性土壤水分测定方法研究进展[J]. 河南农业大学学报, 2021, 55(4): 603-611, 638.
HU J D, LI L Z, IDERAWUMI A M, et al. Research progress of soil water content measurements using dielectric properties[J]. Journal of Henan Agricultural University, 2021, 55(4): 603-611, 638.
- [3] NAKAYAMA C. Non-contact water content measurement of soil based on thermal imaging[C]//2008 International Conference on Control, Automation and Systems, Korea: IEEE, 2008: 2767-2770.
- [4] 张涛, 王铄, 杨文雁, 等. 基于 Debye 介电模型参数辨识的油纸绝缘状态评估[J]. 水电能源科学, 2020, 38(1): 178-181.
ZHANG T, WANG S, YANG W Y, et al. Oil-paper insulation evaluation based on parameter identification of Debye dielectric model[J]. Water Resources and Power, 2020, 38(1): 178-181.
- [5] 赵钟声, 许景辉, 王一琛, 等. 基于双线性理论的黏质土介电谱与含水量频域测量研究[J]. 土壤学报, 2021, 58(3): 685-693.
ZHAO Z S, XU J H, WANG Y C, et al. Measurement of dielectric spectra and water content frequency domain of clay soil based on bilinear theory[J]. Acta Pedologica Sinica, 2021, 58(3): 685-693.
- [6] AHN Y, HAN M, CHOI J. Effect of electrode types and soil moisture on the application of electrical resistivity tomography and time-domain induced polarization for monitoring soil stabilization[J]. Measurement, 2022, 187: 110220.
- [7] 马红章, 柳钦火, 王合顺, 等. 基于微波干涉技术的土壤介电特性测量[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 159-163.
MA H Z, LIU Q H, WANG H S, et al. Soil dielectric characteristic determination based on microwave interferometry theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(9): 159-163.
- [8] 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.
LIU J, ZHAO S J, JIANG L M, et al. Research progress on dielectric constant model of soil at microwave frequency[J]. Remote Sensing Information, 2015, 30(1): 5-13, 70.

- [9] 吕恒, 聂俊丽, 王智慧, 等. 利用 GPR 早期信号振幅属性监测土壤含水率[J]. 土壤, 2022, 54(1): 169-176.
LV H, NIE J L, WANG Z H, et al. Monitoring soil moisture content using early-signal of GPR amplitude[J]. Soils, 2022, 54(1): 169-176.
- [10] LV G, YANG J, LI N, et al. Dielectric characteristics of unsaturated loess and the safety detection of the road subgrade based on GPR[J]. Journal of Sensors, 2018, 2018: 5185460.
- [11] 赵贵章, 闫永帅, 闫亚景, 等. 介质含水率与探地雷达电磁波特征参数关系[J]. 灌溉排水学报, 2020, 39(3): 85-90.
ZHAO G Z, YAN Y S, YAN Y J, et al. The relationship between soil water content and parameters of electromagnetic wave of ground penetration radar[J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2020, 39(3): 85-90.
- [12] GHARECHELOU S, TATEISHI R, JOHNSON B A. Mineral soil texture-land cover dependency on microwave dielectric models in an arid environment[J]. Land, 2020, 9(2): 39.
- [13] XU J H, LOGSDON S D, MA X Y, et al. Measurement of soil water content with dielectric dispersion frequency[J]. Soil Science Society of America Journal, 2014, 78(5): 1500-1506.
- [14] 许景辉, 马孝义, LOGSDON S D, 等. FDR 探头结构对土壤介电谱测量的影响分析[J]. 农业机械学报, 2014, 45(1): 102-107.
XU J H, MA X Y, LOGSDON S D, et al. FDR probe structure influence on the soil dielectric spectrum measurement[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery, 2014, 45(1): 102-107.
- [15] 丁宁, 穆海宝, 丁清鹏, 等. 基于频域介电谱的环氧树脂受潮评估及影响因素[J]. 高电压技术, 2022, 48(2): 706-715.
DING N, MU H B, DING Q P, et al. Moisture evaluation and influencing factors of epoxy resin based on frequency domain spectroscopy[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(2): 706-715.
- [16] 王力, 赵洁, 刘涤尘, 等. 基于遗传粒子群优化算法的调速器执行机构分段线性模型及参数辨识[J]. 电工技术学报, 2016, 31(12): 204-210.
WANG L, ZHAO J, LIU D C, et al. Governor actuator piecewise linear model and parameter identification based on genetic algorithm-particle swarm optimization[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(12): 204-210.
- [17] 谷旭平, 唐大全. 基于细菌觅食算法的多异构无人机任务规划[J]. 系统工程与电子技术, 2021, 43(11): 3312-3320.
GU X P, TANG D Q. Multi-heterogeneous UAV task planning based on bacterial foraging algorithm[J]. Systems Engineering and Electronics, 2021, 43(11): 3312-3320.
- [18] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 农业干旱等级: GB/T 32136-2015[S]. 北京: 中国标准出版社, 2016.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China. Grade of agricultural drought: GB/T 32136-2015 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2016.
- [19] YANG M Z, XIAO W H, ZHAO Y, et al. Assessing agricultural drought in the anthropocene: a modified palmer drought severity index[J]. Water, 2017, 9(10): 725.

(上接第 260 页)

- [18] 吴黎. 基于 MODIS 数据温度植被干旱指数干旱监测指标的等级划分[J]. 水土保持研究, 2017, 24(3): 130-135.
WU L. Classification of drought grades based on temperature vegetation drought index using the MODIS data[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2017, 24(3): 130-135.
- [19] 程军, 李云祯, 邹渝. 新疆干旱时空动态及其对气候变化的响应[J]. 自然资源遥感, 2022, 34(4): 216-224.
CHENG J, LI Y Z, ZOU Y. Spatial and temporal dynamics of drought in Xinjiang and its response to climate change[J]. Remote Sensing for Natural Resources, 2022, 34(4): 216-224.
- [20] 罗倩, 李谢辉, 王磊, 等. 四川省 1960-2017 年旱涝时空变化特征分析[J]. 成都信息工程大学学报, 2020, 35(2): 214-220.
LUO Q, LI X H, WANG L, et al. Analysis of spatial and temporal change characteristics of drought and flood in Sichuan Province from 1960 to 2017[J]. Journal of Chengdu University of Information Technology, 2020, 35(2): 214-220.
- [21] 王雨歌, 兰玲, 雷声, 等. 四川省典型干旱事件时空特征分析[J]. 中国防汛抗旱, 2023, 33(4): 22-26.
WANG Y G, LAN L, LEI S, et al. Study on spatial-and-temporal characteristics of typical drought events in Sichuan Province[J]. China Flood & Drought Management, 2023, 33(4): 22-26.
- [22] 崔立鲁, 何明睿, 罗川江, 等. 基于重力卫星的四川省干旱事件特征研究[J]. 成都大学学报(自然科学版), 2023, 42(2): 212-218.
CUI L L, HE M R, LUO C J, et al. Research on characteristics of drought events in Sichuan Province based on gravity satellite[J]. Journal of Chengdu University (Natural Science), 2023, 42(2): 212-218.
- [23] 蔡怡亨, 李帅, 张强, 等. 1997-2021 年四川省干旱时空变化特征分析[J]. 干旱气象, 2023, 41(2): 241-250.
CAI Y H, LI S, ZHANG Q, et al. Spatio-temporal variation of drought in Sichuan Province from 1997 to 2021[J]. Journal of Arid Meteorology, 2023, 41(2): 241-250.
- [24] 景岗. 利用多源遥感数据的四川省近年特大干旱时空分布特征研究[D]. 成都: 四川师范大学, 2015.
JING G. Using multi-source remote sensing data to research the temporal and spatial distribution of Sichuan Province drought in recent years[D]. Chengdu: Sichuan Normal University, 2015.
- [25] 谢以萍, 杨再强. 攀西干旱河谷退化生态系统的恢复与重建对策[J]. 贵州林业科技, 2004, 32(1): 8-12.
XIE Y P, YANG Z Q. Countermeasure on restoration and reconstruction of degraded ecosystem in dry and hot valley in Panxi[J]. Guizhou Forestry Science and Technology, 2004, 32(1): 8-12.
- [26] 黄静, 张运, 汪明秀, 等. 近 17 年新疆干旱时空分布特征及影响因素[J]. 生态学报, 2020, 40(3): 1077-1088.
HUANG J, ZHANG Y, WANG M X, et al. Spatial and temporal distribution characteristics of drought and its relationship with meteorological factors in Xinjiang in last 17 years[J]. Acta Ecologica Sinica, 2020, 40(3): 1077-1088.
- [27] 屈新星, 何云玲, 闫文波, 等. 基于 MODIS 数据的滇中高原农业干旱时空变化分析[J]. 云南大学学报(自然科学版), 2022, 44(4): 744-753.
QU X X, HE Y L, YAN W B, et al. Spatial-temporal variation of agricultural drought on Central Yunnan Plateau based on MODIS data[J]. Journal of Yunnan University (Natural Sciences Edition), 2022, 44(4): 744-753.