

基于 Weibull 分布函数的槟榔干燥模拟

郭守志¹, 宋占华^{1,2}, 李法德^{1,2}, 宋华鲁¹, 张宁¹, 闫银发^{1,2*}

1. 山东农业大学 机电学院, 山东 泰安 271018

2. 山东省园艺机械与装备重点实验室, 山东 泰安 271018

摘要: 本文利用 Weibull 分布函数描述槟榔在不同干燥方式(烘箱干燥和热风干燥)、不同干燥温度(60、80 和 100 °C)下的干燥过程, 并模拟和分析了其干燥动力曲线。结果表明, Weibull 分布函数能够很好地模拟槟榔在试验条件下的干燥过程; 尺度参数 α 随着干燥温度的升高而减小; 尺度参数 β 对干燥温度影响很小。干燥过程中的水分扩散系数 D_{cal} 分布在 $0.1123 \times 10^{-7} \sim 0.4105 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 之间, 在烘箱干燥和热风干燥方式下的干燥活化能分别为 33.19 和 32.55 kJ/mol。

关键词: 干燥; Weibull 分布函数; 槟榔; 模拟

中图分类号: TF532+.1

文献标识码: A

文章编号: 1000-2324(2016)05-0710-06

The Simulation for Drying Areca Nut with Weibull Distribution Function

GUO Shou-zhi¹, SONG Zhan-hua^{1,2}, LI Fa-de^{1,2}, SONG Hua-lu¹, ZHANG Ning¹, YAN Yin-fa^{1,2*}

1. College of Mechanical and Electronic Engineering/Shandong Agricultural University, Tai'an 271018, China

2. Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment, Tai'an 271018, China

Abstract: Application of Weibull distribution was used in this study to describe the drying process of areca nut under different drying methods (dry-chamber drying, hot air drying) and drying temperature (60, 80 and 100 °C), simulate and analyze the drying kinetics curves. The result indicated that Weibull distribution could provide good prediction for the moisture content. Scale parameter α decreased with the increase of drying temperature. However shape parameter β had a little impact on drying temperatures. Calculated moisture diffusion coefficient D_{cal} of areca nut samples was calculated, which ranged from 0.1123×10^{-7} to $0.4105 \times 10^{-7} \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. According to Arrhenius equation, dry activation energy of dry-chamber drying and hot air drying could be calculated to be 33.19 and 32.55 kJ/mol respectively. The result provided a reference for the application of Weibull distribution on areca nut drying.

Keywords: Drying; Weibull distribution function; areca nut; simulation

由于槟榔种植的区域性, 其果实的干制为槟榔的运输和贮藏提供了方便。我国南方地区, 槟榔的干燥方式通常是自然晒干或熏干, 大约需要一周左右的时间, 工艺周期较长, 生产效率低^[1]。因为传热传质效率、能源消耗和产品品质等是槟榔干燥的过程中的重要指标, 所以对干燥过程的有效预测、控制和优化具有十分重要的意义。一些经典或半经典模型, 如 Henderson-Pabis, Page, Modified Page, Logarithmic 模型, 近似扩散模型等, 被用来拟合干燥动力曲线^[2,3,4]。尽管一些模型能够很好的描述干燥过程, 但干燥过程还是被认为处在“黑箱”阶段, 干燥物料和干燥条件等很难与上述模型中的各参数关联起来^[5]。

Weibull 分布函数以其较好的适用性和兼容性被广泛用于材料科学、制药学以及热力学等领域^[6-9]。近年来一些研究学者把 Weibull 分布函数逐步应用于干燥动力学方面, 并取得一些进展。Corzo^[10] 等用 Weibull 分布函数描述不同成熟期的芒果薄片的干燥过程; Bantle^[11] 等研究了物料在常压冷冻干燥方式下, 不同温度、风速和粒径对 Weibull 函数各参数的影响。但就总体而言, Weibull 分布函数各参数的物理意义和影响因素有待进一步的深入研究。

本文主要研究了不同干燥方法和干燥温度对槟榔干燥动力学的影响, 利用 Weibull 分布函数建立了其干燥过程的模型, 并探究和阐述了模型中各参数的影响因素以及物理意义。为槟榔的干燥加工的预测和调控提供了依据, 也为 Weibull 分布函数在干燥领域的运用提供一些理论支持。

收稿日期: 2015-04-24

修回日期: 2015-04-28

作者简介: 郭守志(1988-),男,在读研究生. 研究方向:干燥技术及干燥机械装备研究. E-mail:452136161@qq.com

***通讯作者:** Author for correspondence. E-mail:sd28@163.com

1 材料与方方法

1.1 试验材料

试验所用槟榔由湖南胖哥食品有限公司提供,在其原产地海南省经过坑式干燥处理。样品平均长度和直径分别为 53 ± 5 mm 和 20 ± 2 mm,平均质量为 8.37 ± 1.7 g。槟榔初始含水率为 $36\% \pm 0.2\%$ (由烘干法测定)。试验前,槟榔放在 4 ± 1 °C 的冰箱中冷藏。

1.2 试验方法

尽量挑选尺寸相当的槟榔作为实验材料。本文主要应用两种干燥方式:烘箱干燥(202-2型电热干燥箱,上海第二五金厂)和热风干燥(自制热风干燥箱,主要由三部分构成——风机、热交换器和干燥室。风机提供干空气的流动,热交换器由电加热管和温控仪共同作用来调控温度,干燥室用来放置被干燥物料。)干燥温度分别设定为 60、80 和 100 °C,风速恒定为 1 m/s。从干燥开始起利用电子称(G&G JJ1000型电子称,常熟双杰实验仪器厂)测量槟榔的质量,之后每隔 1 h 称重 1 次,直到槟榔含水率降至 15% 时停止试验,每组试验重复 3 次。

1.3 Weibull 分布函数模型

干燥过程中槟榔的水分比(MR, Moisture Ratio)可以通过式(1)计算^[4,12]:

$$MR = \frac{M_t - M_e}{M_0 - M_e} \quad (1)$$

式中, M_0 , M_t 和 M_e 分别表示槟榔在干燥起始、任意时刻 t 以及达到平衡时的干基含水率, g/g。干燥速率(DR, Drying Rate)可由式(2)表示:

$$DR = \frac{M_{t_1} - M_{t_2}}{t_2 - t_1} \quad (2)$$

式中, M_{t_1} 和 M_{t_2} 分别表示槟榔在干燥过程中 t_1 和 t_2 时刻的干基含水率, g/g。Weibull 分布函数由式(3)表示^[4,9,10]:

$$MR = \exp \left[- \left(\frac{t}{\alpha} \right)^\beta \right] \quad (3)$$

式中,尺度参数 α 和形状参数 β 决定了槟榔在任意 t 时刻时的水分比 MR。尺度参数 α 表示干燥的速率常数, min, 其值大约等于干燥过程完成 63% 时所用的时间。形状参数 β 与干燥初期物料的传质速率有关, β 值越小,说明干燥初期的干燥速率越大^[3,4,13]。

用非线性回归分析对试验数据进行 Weibull 分布函数模型的拟合。模型拟合优劣的指标主要是由相关系数 R^2 、均方根误差 RMSE 以及离差平方和 χ^2 进行评估, R^2 值越大、RMSE 和 χ^2 值越小,说明拟合的越好,其计算公式如下^[1,2,8]。模型拟合过程是由分析软件 Origin 9.0 完成。

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2}{\sum_{i=1}^N (\overline{MR_{pre,i}} - MR_{exp,i})^2} \quad (4)$$

$$RMSE = \left[\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (MR_{pre,i} - MR_{exp,i})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (5)$$

$$\chi^2 = \frac{\sum_{i=1}^N (MR_{exp,i} - MR_{pre,i})^2}{N - z} \quad (6)$$

式中, MR_{exp} 和 MR_{pre} 分别为试验实测值和模型预测值; N 为试验测得的数据个数。

2 试验结果

2.1 干燥动力曲线

2.1.1 烘箱干燥曲线 不同干燥温度下槟榔的烘箱干燥曲线如图 1-a 所示。槟榔干燥至目标含水率所用的时间随着干燥温度的增大而减少。提升干燥温度可以明显缩短干燥时间，提高效率。干燥速率曲线如图 1-b 所示，干燥过程中无恒速干燥阶段，并且随着干燥的进行，干燥速率基本呈下降趋势。

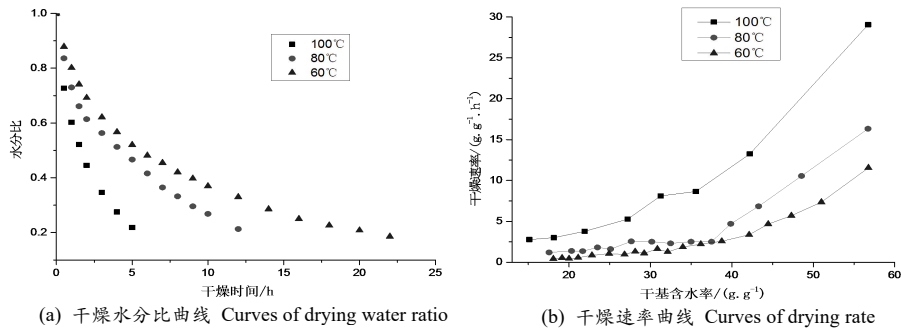


图 1 不同干燥温度下槟榔的烘箱干燥曲线

Fig.1 Curves of drying Areca nut with dry-chamber at different temperatures

2.1.2 热风干燥曲线 不同干燥温度下槟榔的热风干燥曲线如图 2-a 所示。同烘箱干燥一样，达到目标含水率所用的时间随着干燥温度的增大而降低。干燥速率曲线如图 2-b 所示，从图中明显可以看出整个干燥过程都主要处于降速阶段，并且也未出现恒速干燥阶段。尽管如此，从图 1 和图 2 的结果可以看出，烘箱干燥和热风干燥，干燥到目标含水率所用的时间和干燥速率，几乎没有显著差异。

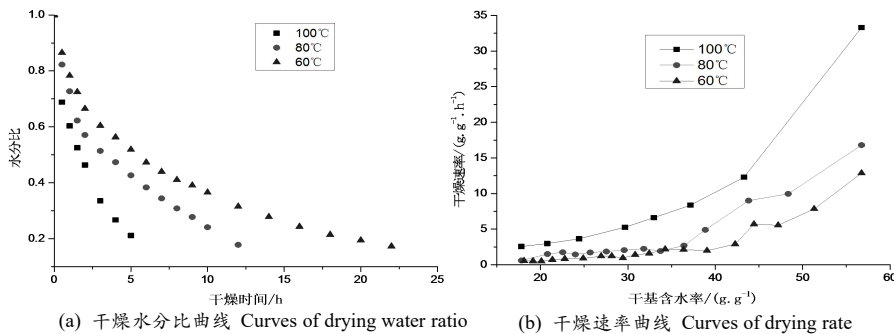


图 2 不同干燥温度下的槟榔热风干燥曲线

Fig.2 Curves of drying Areca nut with hot air at different temperatures

注:气流速度为恒速 1 m/s. Note: air velocity was constant of 1 m/s.

2.2 干燥曲线的 Weibull 分布函数模型

2.2.1 尺度参数 α 的物理意义以及影响因素 运用 Weibull 分布函数去拟合不同干燥条件下的槟榔干燥曲线，拟合结果见下表 1。从表中可以看出，相关系数 R^2 在 0.993~0.999 区间内，均方根误差 $RMSE$ 在 3.35×10^{-3} ~ 1.995×10^{-2} 之间，离差平方和 χ^2 在 1.12×10^{-5} ~ 3.97×10^{-4} 之间。由拟合结果可知，Weibull 分布函数能很好的拟合槟榔的干燥曲线，也为干燥过程的分析提供基础条件。

Weibull 分布函数中尺度参数 α ，表示干燥过程的速率常数，其值大约为干燥过程完成 63% 所需要的时间（以 min 表示）。从表 1 可以看出，随着干燥温度的提升（60, 80, 100 °C），经烘箱干燥的槟榔尺度参数 α 由 593.259 min 减小到 164.644 min，而经热风干燥的槟榔尺度参数 α 由 565.5 min 减小到 162.384 min。尽管相同的干燥温度条件下，不同的干燥方式对应的尺度参数 α 也不相同。

这就说明，对同一干燥物料来说，尺度参数 α 与干燥方式和干燥温度有关。在相同干燥方式下，尺度参数 α 随着干燥温度的升高而减小。

2.2.2 形状参数 β 的物理意义以及影响因素 相关研究表明^[3,8,11]，形状参数 β 与干燥过程中水分的迁移机理有关，即当形状参数 β 在 0.3~1 时，表示物料在干燥过程中受内部水分扩散控制，主要表现为降速干燥的特点；而当形状参数 β 大于 1 时，干燥曲线呈现“Z”字形，即物料在干燥初期有延滞阶段，表现为干燥速率在干燥前期有先升高后降低的变化趋势。因此当描述某种干燥状态时，可根据形状参数 β 的值和 1 的大小关系来判断干燥过程的进行^[4,14]。

表 1 Weibull 分布函数对槟榔干燥曲线的拟合结果

Table 1 Results of Areca nut drying curves modeled by Weibull distribution function

干燥方式 Drying ways	尺度参数 Scale parameter (α /min)	形状参数 Shape parameter (β)	相关系数 Coefficient coefficient (R^2)	均方根误差 Root mean squared error	离差平方和 Reduced chi-square (x^2)
烘箱干燥(60 °C)	593.259	0.644	0.999	6.11×10^{-3}	3.73×10^{-5}
烘箱干燥(80 °C)	409.584	0.636	0.994	1.728×10^{-2}	2.98×10^{-4}
烘箱干燥(100 °C)	164.644	0.679	0.999	3.35×10^{-3}	1.12×10^{-5}
热风干燥(60 °C)	565.5	0.628	0.998	8.75×10^{-3}	7.65×10^{-5}
热风干燥(80 °C)	356.035	0.619	0.993	1.995×10^{-2}	3.97×10^{-4}
热风干燥(100 °C)	162.384	0.658	0.995	1.889×10^{-2}	3.56×10^{-4}

2.3 槟榔水分扩散系数的计算

干燥过程中的水分的迁移是由多种因素共同作用的结果,包括毛细管流动、液体扩散、蒸汽扩散等,故通常被认为是一个很复杂的过程。为综合考量这些影响因素,本试验测量并计算了干燥过程中的水分有效扩散系数 D_{eff} 。这对干燥过程的描述和优化有十分重要的意义。

干燥过程中水分有效扩散系数的计算通常是采用 Fick 第二定律。但 Fick 第二定律有其局限性,因为它成立的前提条件是整个干燥过程要始终处于降速干燥过程,这就大大限制了其适用范围。然后 Weibull 分布函数在干燥过程上的另一重要应用,就是它可以在不考虑水分迁移特点的情况下,估算出干燥过程中的水分扩散系数 D_{cal} 。可以通过下面的公式进行计算^[6,8,15]:

$$D_{cal} = \frac{r^2}{\alpha} \quad (7)$$

式中, D_{cal} 是干燥过程中估算的水分扩散系数, m^2/s ; r 是槟榔的等效半径,其值大约为 0.02 m; α 是 Weibull 分布函数中的尺度参数, s。

计算水分扩散系数与水分有效扩散系数的关系可由下式表示:

$$D_{eff} = \frac{D_{cal}}{R_g} \quad (8)$$

式中, D_{eff} 是干燥过程中的水分有效扩散系数, m^2/s ; R_g 是一个与几何尺寸有关的常数。槟榔干燥过程中的水分有效扩散系数见表 2。

表 2 槟榔干燥过程中的水分有效扩散系数

Table 2 Moisture effective diffusion coefficients in drying Areca nut

干燥方式 Drying ways	估算水分扩散系数 Calculated moisture diffusion coefficient $D_{cal}/(10^{-7}m^2 \cdot s^{-1})$	水分有效扩散系数 Moisture effective diffusion coefficient $D_{eff}/(10^{-7}m^2 \cdot s^{-1})$	几何因素 Geometric factor $R_g/(10^{-2})$
烘箱干燥(60 °C)	0.1123	0.3441	32.6358
烘箱干燥(80 °C)	0.1645	0.5086	32.3436
烘箱干燥(100 °C)	0.4049	1.2561	32.2346
热风干燥(60 °C)	0.1179	0.3592	32.8229
热风干燥(80 °C)	0.1872	0.5751	32.5086
热风干燥(100 °C)	0.4105	1.2752	32.1910

由表 2 可知, 槟榔干燥过程中的估算水分扩散系数 D_{cal} 在 $0.1123 \times 10^{-7} \sim 0.4105 \times 10^{-7} m^2/s$ 之间, 并且对于烘箱干燥和热风干燥两种干燥方式, 估算水分扩散系数 D_{cal} 随着干燥温度的提高, 都呈现出增大的趋势。本试验中槟榔的干燥过程表现出典型的内部水分控制的特征, 故可以直接运用 Fick 第二定律计算其水分有效扩散系数。

2.4 干燥活化能的计算

干燥活化能表示物料在干燥过程中除去单位的水分所需要的能量。通过干燥活化能的大小可以看出物料干燥的难易程度, 并可以估算出干燥能耗^[16]。槟榔在干燥过程中的干燥活化能可以根据阿伦尼乌斯公式进行计算:

$$\ln D_{eff} = \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T + 273.15)} \quad (9)$$

式中, D_0 是一个定值, 为有效扩散系数的频率因子, m^2/s ; E_a 为物料的干燥活化能, J/mol ; R 为气体摩尔常数, 其值为 $8.314J/(mol \cdot K)$; T 为物料的干燥温度, $^{\circ}C$ 。

将式(8)代入式(9)得,

$$\ln D_{cal} = \ln R_g + \ln D_0 - \frac{E_a}{R(T + 273.15)} \tag{10}$$

由公式(10)可知, $\ln D_{cal}$ 与 $1/(T+273.15)$ 呈线性关系, 且对于同一物料来说, R_g 为定值, 故可以根据直线的斜率计算得出干燥活化能 E_a 。公式(10)比公式(9)具有更广泛的应用, 可适用于所有干燥过程的活化能的计算, 而且估算水分扩散系数 D_{cal} 可以由 Weibull 分布函数的尺度参数 α 直接求得。

从图 3 中直线的斜率可以求得, 烘箱干燥和热风干燥方式处理下的槟榔干燥活化能分别为 33.19 和 32.55 kJ/mol 。由此可见, 干燥方式对于干燥活化能有一定的影响。

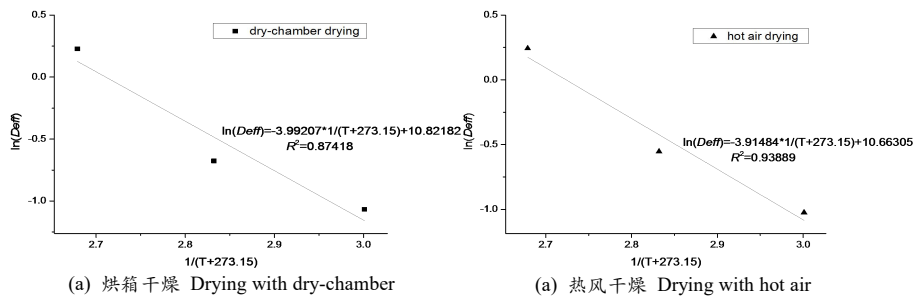


图 3 水分有效扩散系数与干燥温度的关系

Fig.3 Relation between moisture effective diffusion coefficients and drying temperatures

注: D_{eff} 是水分有效扩散系数, m^2/s 。Note: D_{eff} is the moisture effective diffusion coefficient, m^2/s 。

3 讨论

两种干燥方式(烘箱干燥和热风干燥)槟榔的干燥动力曲线不存在显著差异, 出现这种情况的原因可能是, 槟榔是一种多孔性物料, 大部分非结合水主要分布在其表面和孔隙内, 这部分水分能很快从物料内部迁移到物料表面, 基本在干燥初期就被除去。随着干燥的进行, 槟榔含水率逐渐降低, 并且减小得越来越慢, 因为这个阶段主要去除的是结合水, 而结合水的迁移需要更久的时间。尤其是干燥的最后时期, 基本为降速干燥阶段, 会花费更多的干燥时间^[1]。理论上, 干燥温度较高时的干燥速率应该大于干燥温度较低时的干燥速率, 但随着干燥的进行, 这种差异会逐渐减弱。本试验中的槟榔样品在其原产地已经过坑式干燥, 由于样品被放在冰箱中冷藏, 才使得测量的初始含水率在 36%左右, 也就是说, 这些水份大部分为槟榔表面的自由水会在干燥初期被迅速除去, 从而进入降速干燥阶段, 表现为内部水分扩散控制, 并且本试验干燥停止时的目标含水率也相对较高。另外, 加快空气流动有利于增大传热系数, 从而提升传质速率, 而试验中的气流速度并不高, 也就造成了烘箱干燥和热风干燥两种不同的干燥方式达到目标含水率所用的干燥时间无显著差异。

从表 1 可知, 烘箱干燥方式的形状参数 β 值在不同干燥温度下位于 0.636~0.679 之间, 而热风干燥方式下的形状参数 β 在 0.619~0.658 之间。由此可以看出, 对于同一种干燥物料, 形状参数 β 的值与干燥方式有关, 而干燥温度对其影响较小, 这跟 Corzo^[5]的研究结果一致。本试验中, 不论是烘箱干燥还是热风干燥, 槟榔干燥的形状参数 β 值都小于 1, 也就是说, 槟榔的整个干燥过程受内部水分扩散控制, 从图 1-b 和图 2-b 中也可以看出。由于气流速度较低, 两种干燥方式的 β 值没有显著性差异。

4 结论

- 1) Weibull 分布函数可以很好的描述烘箱干燥和热风干燥方式下的槟榔干燥过程;
- 2) 尺度参数 α 与干燥温度相关, 形状参数 β 与干燥方式有关。同一干燥方式下, 尺度参数 α 随着干燥温度的升高而减小, 而形状参数 β 在不同干燥温度下变化很小;
- 3) 通过尺度参数 α 计算得出的槟榔的估算水分扩散系数 D_{cal} 在 $0.1123 \times 10^{-7} \sim 0.4105 \times 10^{-7} m^2/s$ 之间。并且可以根据阿伦尼乌斯公式计算出烘箱干燥和热风干燥方式下的槟榔干燥活化能分别为 33.19 和 32.55 kJ/mol 。

参考文献

- [1] 张可喜,符新,王祝年,等. 槟榔热风干燥工艺的研究[J]. 热带农业工程, 2006(1):20-22
- [2] 林喜娜,王相友. 苹果切片红外辐射干燥模型建立与评价[J]. 农业机械学报, 2010,41(6):128-132
- [3] 张茜,肖红伟,代建武,等. 哈密瓜片气体射流冲击干燥特性和干燥模型[J]. 农业工程学报, 2011,27(增刊 1):382-388
- [4] 白峻文,王吉亮,肖红伟,等. 基于 Weibull 分布函数的葡萄干燥过程模拟及应用[J]. 农业工程学报, 2013,29(16):278-285
- [5] Corzo O, Bracho N, Pereira A, *et al.* Weibull distribution for modeling air drying of coroba slices[J]. *LWT-Food Science and Technology*, 2008,41(10):2023-2028
- [6] 李耀明,田进,赵湛,等. 联合收割机行走底盘变速箱齿轮的疲劳分析[J]. 农业工程学报, 2011,27(4):106-110
- [7] 卢蓉蓉,钱平,何红艳,等. 超高压杀灭低酸性食品中耐压菌的动力学模型[J]. 农业工程学报, 2010,26(9):350-356
- [8] 郑建祥,高翔,周明锋. 基于分段 Weibull 分布的使用可靠性统计模型[J]. 农业机械学报, 2008,39(6):50-53
- [9] 郭剑伟,吴俊珠,王成军,等. 三种方法求解药物溶出度 Weibull 分布参数的探讨[J]. 大理学院学报, 2011,10(8):1-4
- [10] Corzo O, Bracho N, Alvarez C. Weibull model for thin-layer drying of mango slices at different maturity stages[J]. *Journal of Food Processing and Preservation*, 2010,34(6):993-1008
- [11] Bantle M, Kolsaker K, Eikevik TM. Modification of the weibull distribution for modeling atmospheric freeze-drying of food[J]. *Drying Technology*, 2011,29(10):1161-1169
- [12] 肖红伟,张世湘,白峻文,等. 杏子的气体射流冲击干燥特性[J]. 农业工程学报, 2010,26(7):318-323
- [13] 曾目成,毕金峰,陈芹芹,等. 基于 Weibull 分布函数对猕猴桃切片中短波红外干燥过程模拟及应用[J]. 现代食品科技, 2014,30(6):146-151
- [14] Machado MF, Oliveira FAR, Cunha LM. Effect of milk fat and total solids concentration on the kinetics of moisture uptake by ready-to-eat breakfast cereal[J]. *International Journal of Food Science and Technology*, 1999,34(1):47-57
- [15] 王蕴博,王宝和. Weibull 函数及其在干燥动力学研究中的应用[J]. 干燥技术与设备, 2011,9(3):103-109
- [16] Gögüş F, Maskan M. Air drying characteristics of solid waste (pomace) of olive oil processing[J]. *Journal of Food Engineering*, 2006,72(4):378-382

(上接第 709 页)

研究中按照研究区土地利用/覆被的景观特征空间差异,将图像进行裁剪后分别用一套分割参数即可获取理想的同质地类对象,为面向对象尺度分割提供了新的参考思路;

(3) 单纯使用基于规则的方法工作量较大,只使用基于样本的分类方法不能做到全要素的高精度提取,研究将两者相结合能兼顾精度和速度,为土地利用/覆被动态监测的现势性提供了保障;

(4) 研究中也存在着一些不足,基于规则的面向对象的分类提取中,相关参数及阈值的确定无法查询或生成,需要人为多次试验进行调整,主观性较大,拟在下一步工作中对参数阈值的自动生成进行探讨研究。

参考文献

- [1] Simas T, Nunes JP, Ferreria JG. Effects of global climate change on coastal salt marshes[J]. *Ecological Modeling*, 2001,139:1-15
- [2] Solomon SD, Qin D, Manning M, *et al.* Climate change 2007: the physical science basis. Contribution of Working Group I to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[M]. New York:Cambridge University Press, 2007
- [3] 徐东霞,章光新. 人类活动对中国滨海湿地的影响及其保护对策[J]. 湿地科学, 2007,5(3):282-288
- [4] Evans TL, Costa M. Land cover classification of the Lower Nhecolândia subregion of the Brazilian Pantanal Wetlands using ALOS/PALSAR, RADARSAT-2 and ENVISAT/ASAR imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2013,128:118-137
- [5] Myint SW, Gober P, Brazel A, *et al.* Per-pixel vs. object-based classification of urban land cover extraction using high spatial resolution imagery[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2011,115(5):1145-1161
- [6] 钱巧静,谢瑞,张磊,等. 面向对象的土地覆盖信息提取方法研究[J]. 遥感技术与应用, 2005,20(3):338-342
- [7] 郭文娟,张佳华. 利用 ASTER 遥感资料提取南京城郊土地利用信息的研究[J]. 农业工程学报, 2005,21(9):62-66
- [8] 徐涵秋,唐菲. 新一代 Landsat 系列卫星: Landsat 8 遥感影像新增特征及其生态环境意义[J]. 生态学报, 2013,33(11):3249-3257
- [9] 莫利江,曹宇,胡远满,等. 面向对象的湿地景观遥感分类——以杭州湾南岸地区为例[J]. 湿地科学, 2012,10(2):206-213
- [10] 常春艳,赵庚星,王凌,等. 滨海光谱混淆区面向对象的土地利用遥感分类[J]. 农业工程学报, 2012,28(5):226-231