

无损检测 5 种药用植物叶片含水量的通用模型研究

郑俊波(浙江省中药研究所有限公司, 杭州 310023)

摘要: 目的 利用电测法对药用植物叶片含水量进行快速、准确和无损检测。方法 以女贞、何首乌、银杏、葛和龙葵叶片为研究对象, 自行设计平行板电容传感器, 改进电阻测量方法, 对叶片电容、电阻和叶厚进行检测。采用 SPSS 19.0 软件对测量数据进行组内相关系数分析, 验证数据的可靠性。将叶片分成训练集和测试集, 用 Excel 对训练集进行回归分析, 建立叶片含水量与电容、电阻和叶厚的拟合方程, 并利用拟合方程对测试集叶片含水量进行预测。结果 相同药用植物不同叶片间的电容测量值可靠性良好, 何首乌、葛和龙葵叶片电阻测量值可靠性良好, 女贞和银杏电阻测量值可靠性一般。不同药用植物叶片间的电容和电阻测量值可靠性一般, 组间叶厚测量值可靠性良好。经 Excel 线性回归, R^2 为 0.959 7, 调整 R^2 为 0.951 0, 显著性值 $P=5.36 \times 10^{-10}$, 拟合方程为 $Y=23.548 3+0.021 6 X_1+12.705 8 X_2+106.786 1 X_3$, $DW=2.284$, 模型拟合效果良好。利用该模型对测试集叶片含水量进行预测, 与烘干法比较误差值在 1.98%~1.55%之间。结论 该模型可以作为该 5 种药用植物叶片含水量预测的通用模型。

关键词: 电容; 电阻; 叶厚; 叶片含水量; 模型

中图分类号: R284.1

文献标志码: B

文章编号: 1007-7693(2019)21-2687-06

DOI: 10.13748/j.cnki.issn1007-7693.2019.21.011

引用本文: 郑俊波. 无损检测 5 种药用植物叶片含水量的通用模型研究[J]. 中国现代应用药学, 2019, 36(21): 2687-2692.

Study of Generic Model to Nondestructively Test Leaf Moisture Content in Five Medicinal Plants

ZHENG Junbo(Zhejiang Research Institute of Traditional Chinese Medicine Co., Ltd., Hangzhou 310023, China)

ABSTRACT: OBJECTIVE To rapidly, correctly and nondestructively detect leaf moisture content by electrical measuring method in medicinal plants. **METHODS** The leaf capacitance, resistance and thickness were detected by using the self-designed parallel-plate capacitor and improving resistance measuring method in privet, polygonum multiflorum, ginkgo, kudzu and solanum sigmum sinne. Measured data was analyzed by SPSS 19.0 software for intraclass correlation coefficient verify the reliability of the data. The leaves were divided into training set and test set. The training set was analyzed with Excel regression. The fitting equation was established among leaf moisture content, capacitance, resistance and thickness. The fitting equation was used to predict the leaf moisture content in the test set. **RESULTS** The data reliability of capacitance among different leaves of the same medicinal plant was good. The data reliability of resistance among different leaves in polygonum multiflorum, kudzu and solanum sigmum sinne was good, and the data reliability of leaf resistance was general in privet and Ginkgo. The data reliability of capacitance and resistance among different medicinal plants was general. The data reliability of thickness among groups of different medicinal plants was good. By Excel regression analysis, R^2 was 0.959 7, adjusted R^2 was 0.951 0, significant value $P=5.36 \times 10^{-10}$, fitting equation $Y=23.548 3+0.021 6 X_1+12.705 8 X_2+106.786 1 X_3$, $DW=2.284$, the fitting effect of the model was good. The model was used to predict the moisture content of the test set, and the errors were between 1.98% and -1.55% compared with the drying method. **CONCLUSION** The model can be used as a generic model for predicting leaf water content of the five medicinal plants.

KEYWORDS: capacitance; resistance; thickness; leaf moisture content; model

根据作物需求实施智能灌溉是未来农业的发展方向, 尤其是药用植物的生长发育和有效成分积累对水分的要求更加苛刻。朱灿灿等^[1]发现银杏叶内黄酮的含量受到土壤水分含量的影响显著, 中度干旱相比适宜水分、轻度干旱和重度干旱, 更有利于叶黄酮类物质积累。刘威等^[2]发现不同肥水搭配对何首乌品质的影响明显, 最优搭配组合为土壤持水量 80%, 氮肥施用量每盆 0~2.32 g, P_2O_5 施用

量每盆 0~2.16 g, K_2O 施用量每盆 3.00 g。其他如白菊花^[3]、菘蓝^[4]及苦参^[5]等药用植物也发现适度缺水有助于有效成分积累。因此水分控制对提高药用植物的产量和质量具有重要意义。

不同药用植物及生长阶段对水分的需求不同。植物叶片含水量能比较敏感地反映植株干旱程度, 因此对叶片含水量进行实时、无损监测具有指导意义。电测法(包括电阻式和电容式)可以短

基金项目: 中药所天台团队科技特派员项目(47)

作者简介: 郑俊波, 男, 硕士, 高级工程师

Tel: (0571)85228620

E-mail: 511939142@qq.com

时间内实现对被测样品进行重复多次测量,且不损坏样品结构,可以实现快速无损检测叶片含水量的目的。如鲍一丹等^[6]通过平板式电容研究了植物缺水信息与植物叶片电特性和叶水势之间的变化规律,证明植株干旱程度与叶片电特性和叶水势按一定规律变化。郭文川^[7]等研究失水对离体和活体植物叶片的生理特性参数和电特性参数的影响,表明植物叶片电特性能反映植物的水分生理特性。宣奇丹^[8]对毛白杨、加杨、杜仲的电容值和含水量进行相关性分析,3种树木的叶片电容值与含水量间的相关系数分别为0.830,0.908和0.843,且均达极显著水平。其他研究也得到了类似的规律^[9-13]。然而这些研究所建模型仅限于单一植物叶片含水量的预测,生产应用存在一定局限性。

考虑到叶片电容与含水量存在密切相关性,但电容的测量值与平行板电极间的面积、距离及介质有直接关系,不同植物叶片的厚度、纤维结构和组成对电容测量有不同影响,本研究通过自行设计电容传感器、改进电阻测量方法,对5种药用植物的叶片电容、电阻和厚度进行测量研究,旨在建立一种通用模型,用于多种药用植物叶片含水量的预测。

1 材料与方法

1.1 试验材料和仪器

女贞(*Ligustrum lucidum* Ait)、银杏(*Ginkgo biloba* L.)、葛(*Pueraria lobata* Willd. ohwi)、何首乌(*Polygonum multiflorum* Thunb.)和龙葵(*Solanum nigrum* L.)叶片采自杭州余杭区五常湿地,由浙江省中药研究所有限公司俞旭平高级工程师鉴定。9月至10月采后立即用塑料袋密封带回。每种植物取9片叶,随机编号为1至9号,分成3组,1,2,3号为第1组,4,5,6号为第2组,7,8,9号为第3组。叶片采回测量电容、电阻和叶厚后,女贞在室内自然阴干,每隔1h再测量电容和叶厚,何首乌、银杏、葛和龙葵叶片不阴干。

LC100-A型电容测量仪(郑州明禾电子科技有限公司),电容传感器为自行设计的专利产品(专利号201810235518.1);VC830L万用表(深圳市胜禄高电子科技有限公司);ZLSY数显千分尺(武汉精测电子科技有限公司)。

1.2 试验方法

1.2.1 叶片电容测定 电容传感器采用导电纤维布作为平行板,固定在具压力为8N的塑料夹上,

极板间面积为1cm×2cm,见图1。2个传感器并联组成。测量电容时将2个传感器夹住叶片两侧,开机读取初始电容值。每叶重复测3次。

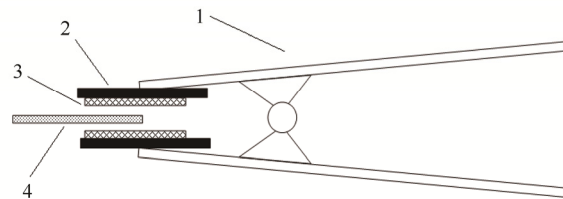


图1 电容传感器的结构示意图

1-塑料夹;2-基板;3-平行板电极;4-叶片。

Fig. 1 Structural schematic diagram of capacitance sensor
1-plastic clip; 2-substrate; 3-parallel-plate electrode; 4-leaf.

1.2.2 含水量测定^[14] 含水量计算公式为叶片含水量=(鲜质量-干质量)/鲜质量×100。

1.2.3 电阻测定 万用表2M档测电阻,电笔固定在上下可自由伸缩的自制架子上垂直测量,电笔间距离为5cm,采用平头电笔,测量时在2电笔接触叶片部位各滴一小滴饱和盐水,稳定30s后读数。测叶片背面电阻,每叶重复测2次。

1.2.4 叶片厚度测量 叶厚测量时避开粗叶脉,测电容测量部位的叶片厚度。为减小误差将每组3片叶叠在一起测量,每3片叶重复测4次。

1.2.5 统计方法 组内相关系数(intraclass correlation coefficient, ICC)常用于评价同一个体多次测量结果的一致性 or 可靠性。一般认为 ICC<0.4表示可靠性较差,0.4~0.75之间可靠性一般,>0.75表示可靠性良好。组内相关系数用SPSS 19.0软件分析,输入数据,点击“分析”—“度量”—“可靠性分析”,选择“类内相关系数”。结果输出中,单个测量是指单个评定者的评分,给出单个评定者评分的可靠性,平均测量是多个评定者的评分均值,给出多个评定者评分均值的可靠性,本研究为单个评定者,采用单个测量分析。

回归采用excel软件分析,点击“数据”—“数据分析”,窗口中点“回归”—“确定”,Y输入区域为含水量数据,X输入区域为电容、电阻和叶厚数据,置信度95%。

2 结果与分析

2.1 相同药用植物不同叶片间测量数据可靠性评价

2.1.1 相同药用植物不同叶片间电容组内相关系数 女贞1~9号叶片,每次每叶测电容3次,刚采回时的电容测量结果见表1。

表 1 女贞叶片电容测量值

Tab. 1 Capacitance of leaf in privet pF

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
| 重复 1 | 206 | 189 | 180 | 191 | 269 | 269 | 199 | 243 | 206 |
| 重复 2 | 214 | 187 | 179 | 190 | 269 | 269 | 192 | 245 | 206 |
| 重复 3 | 220 | 187 | 180 | 194 | 260 | 268 | 185 | 245 | 203 |

对表 1 中女贞叶片电容 3 次重复之间进行 SPSS 19.0 ICC 分析, 结果见表 2。女贞叶片之间电容单个测量 ICC 值为 0.987($P<0.001$), 数据可靠性良好。

表 2 女贞叶片间电容组内相关系数

Tab. 2 Intraclass correlation coefficient of capacitance among different leaves in privet

| 组别 | ICC | 95%置信区间 | | 使用真值 0 的 F 检验 | | | |
|------|-------|---------|-------|---------------|-----|-----|-------|
| | | 下限 | 上限 | 值 | df1 | df2 | Sig |
| 单个测量 | 0.987 | 0.962 | 0.997 | 214.739 | 8 | 16 | 0.000 |
| 平均测量 | 0.996 | 0.987 | 0.999 | 214.739 | 8 | 16 | 0.000 |

与女贞一样, 对何首乌、银杏、葛、龙葵叶片电容进行组内相关系数分析, 何首乌叶片间电容单个测量 ICC 值为 0.917($P<0.001$), 银杏为 0.941($P<0.001$), 葛为 0.963($P<0.001$), 龙葵为 0.869($P<0.001$), 数据可靠性都良好。

2.1.2 相同药用植物不同叶片间电阻组内相关系数 女贞 1~9 号叶片, 每次每叶测电阻 2 次, 刚采回时的电阻测量结果见表 3。

表 3 女贞叶片电阻测量值

Tab. 3 Resistance of leaf in privet MΩ

| 编号 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 |
|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 重复 1 | 0.728 | 0.864 | 0.88 | 0.861 | 0.932 | 0.864 | 0.802 | 0.873 | 0.807 |
| 重复 2 | 0.731 | 0.861 | 0.899 | 0.941 | 0.883 | 0.857 | 0.905 | 0.828 | 0.780 |

对表 3 中女贞叶片电阻用 SPSS 19.0 进行组内相关系数分析, 女贞叶片间电阻单个测量 ICC 值为 0.696($P<0.01$), 数据可靠性一般。结果见表 4。

表 4 女贞叶片间电阻组内相关系数

Tab. 4 Intraclass correlation coefficient of resistance among different leaves in privet

| 组别 | ICC | 95%置信区间 | | 使用真值 0 的 F 检验 | | | |
|------|-------|---------|-------|---------------|-----|-----|-------|
| | | 下限 | 上限 | 值 | df1 | df2 | Sig |
| 单个测量 | 0.696 | -0.015 | 0.928 | 10.135 | 8 | 16 | 0.002 |
| 平均测量 | 0.996 | -0.030 | 0.963 | 10.135 | 8 | 16 | 0.002 |

对何首乌、银杏、葛、龙葵叶片电阻进行组内相关系数分析, 得到何首乌叶片间电阻单个测

量 ICC 值为 0.868($P<0.01$), 银杏为 0.460($P<0.05$), 葛为 0.876($P<0.01$), 龙葵为 0.777($P<0.01$), 何首乌、葛和龙葵数据可靠性良好, 银杏数据可靠性一般。

2.2 不同药用植物叶片间测量数据可靠性评价

2.2.1 不同药用植物叶片间电容组内相关系数 对女贞、何首乌、银杏、葛和龙葵刚采回时 9 片叶的电容求均值和标准差, 结果见表 5。

表 5 不同植物叶片间电容均值

Tab. 5 Mean value of leaf capacitance among different plants pF

| 编号 | 女贞 | 何首乌 | 银杏 | 葛 | 龙葵 |
|----|-------|--------|-------|-----------|--------|
| 1 | 213±7 | 415±14 | 163±2 | 1 252±89 | 852±85 |
| 2 | 188±1 | 451±17 | 159±2 | 429±59 | 823±46 |
| 3 | 180±1 | 468±11 | 160±1 | 565±49 | 579±10 |
| 4 | 192±2 | 602±7 | 159±0 | 1 100±60 | 711±41 |
| 5 | 266±5 | 517±16 | 161±3 | 500±16 | 609±13 |
| 6 | 269±1 | 595±39 | 158±1 | 535±72 | 640±19 |
| 7 | 192±7 | 523±26 | 165±1 | 360±26 | 671±27 |
| 8 | 244±1 | 563±10 | 153±1 | 1 009±107 | 605±42 |
| 9 | 205±2 | 508±10 | 147±1 | 685±21 | 555±22 |

对表 5 中 5 种药用植物 9 片叶片的电容均值进行 SPSS 19.0 组内相关系数分析, 结果见表 6。电容均值单个测量 ICC 值为 0.724($P<0.001$), 数据可靠性一般。

表 6 不同植物叶片间电容组内相关系数

Tab. 6 Intraclass correlation coefficient of leaf capacitance among different plants

| 组别 | ICC | 95% 置信区间 | | 使用真值 0 的 F 检验 | | | |
|------|-------|----------|-------|---------------|-----|-----|-------|
| | | 下限 | 上限 | 值 | df1 | df2 | Sig |
| 单个测量 | 0.724 | 0.434 | 0.959 | 25.375 | 4 | 32 | 0.000 |
| 平均测量 | 0.959 | 0.873 | 0.995 | 25.375 | 4 | 32 | 0.000 |

2.2.2 不同药用植物叶片间电阻组内相关系数

对女贞、何首乌、银杏、葛和龙葵刚采回时 9 片叶二次重复测量电阻求均值, 结果见表 7。

表 7 不同植物叶片间电阻均值

Tab. 7 Mean value of leaf resistance among different plants MΩ

| 编号 | 女贞 | 何首乌 | 银杏 | 葛 | 龙葵 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|
| 1 | 0.730 | 1.087 | 1.145 | 1.058 | 1.257 |
| 2 | 0.863 | 1.047 | 1.179 | 1.348 | 1.213 |
| 3 | 0.890 | 1.096 | 1.146 | 1.466 | 1.095 |
| 4 | 0.901 | 1.393 | 1.316 | 1.388 | 1.248 |
| 5 | 0.908 | 1.261 | 1.355 | 1.822 | 1.153 |
| 6 | 0.861 | 1.291 | 1.261 | 1.442 | 1.248 |
| 7 | 0.854 | 1.405 | 1.231 | 1.667 | 1.242 |
| 8 | 0.851 | 1.567 | 1.278 | 1.787 | 1.344 |
| 9 | 0.794 | 1.603 | 1.274 | 1.542 | 1.044 |

对表 7 中 5 种药用植物叶片电阻均值进行 SPSS 19.0 软件组内相关系数分析, 结果见表 8。电阻均值单个测量 ICC 值为 0.701($P < 0.001$), 数据可靠性一般。

表 8 不同植物叶片间电阻组内相关系数

Tab. 8 Intraclass correlation coefficient of leaf resistance among different plants

| 组别 | ICC | 95% 置信区间 | | 使用真值 0 的 F 检验 | | | |
|------|-------|----------|-------|---------------|-----|-----|-------|
| | | 下限 | 上限 | 值 | df1 | df2 | Sig |
| 单个测量 | 0.701 | 0.403 | 0.953 | 29.406 | 4 | 32 | 0.000 |
| 平均测量 | 0.955 | 0.859 | 0.995 | 29.406 | 4 | 32 | 0.000 |

2.2.3 不同药用植物叶厚组内相关系数 对女贞、何首乌、银杏、葛和龙葵刚采回时 9 片叶分成 3 组, 每组测量叶厚 4 次, 求各组叶厚均值和标准差, 结果见表 9。

表 9 不同植物 3 组叶片叶厚均值

Tab. 9 Mean value of leaf thickness among three groups of different plants

| 组别 | 女贞 | 何首乌 | 银杏 | 葛 | 龙葵 |
|-------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 第 1 组 | 0.293±0.004 | 0.293±0.005 | 0.293±0.018 | 0.166±0.006 | 0.286±0.015 |
| 第 2 组 | 0.272±0.009 | 0.259±0.007 | 0.294±0.017 | 0.177±0.003 | 0.283±0.008 |
| 第 3 组 | 0.283±0.003 | 0.268±0.013 | 0.291±0.020 | 0.163±0.008 | 0.274±0.007 |

对表 9 中 5 种药用植物 3 组叶片叶厚均值进行 SPSS 19.0 软件组内相关系数分析, 结果见表 10。叶厚均值单个测量 ICC 值为 0.962($P < 0.001$), 数据可靠性良好。

表 10 不同植物 3 组间叶厚组内相关系数

Tab. 10 Intraclass correlation coefficient of leaf thickness among three groups of different plants

| 组别 | ICC | 95% 置信区间 | | 使用真值 0 的 F 检验 | | | |
|------|-------|----------|-------|---------------|-----|-----|-------|
| | | 下限 | 上限 | 值 | df1 | df2 | Sig |
| 单个测量 | 0.962 | 0.839 | 0.996 | 89.212 | 4 | 8 | 0.000 |
| 平均测量 | 0.987 | 0.940 | 0.999 | 89.212 | 4 | 8 | 0.000 |

2.3 5 种药用植物叶片电容、电阻、叶厚与含水量回归分析

将女贞、何首乌、银杏、葛、龙葵叶片分成 3 组, 第 1 组和第 3 组作为训练集, 女贞第 1 组和第 3 组数据合并平均, 何首乌、银杏、葛、龙葵第 1 组和第 3 组数据分开平均, 回归分析建立预测模型, 第 2 组作为测试集, 预测叶片含水量。女贞叶片刚采回时测鲜重、电容、电阻和叶厚后, 阴干, 每隔 1 h 再测鲜重、电容和叶厚, 考虑到阴干后因细胞膜破裂, 原生质体流出影响电阻测定, 回归分析时电阻值取刚采回时的测量值, 何首乌、

银杏、葛、龙葵叶片刚采回时测鲜重、电容、电阻、叶厚, 实验结束后 5 种药用植物叶片烘干计算含水量。第 1 组和第 3 组数据均值见表 11。对表 11 数据用 Excel 回归分析, 含水量为因变量, 电容、电阻、叶厚均值为自变量, 回归分析结果见表 12~14。

表 11 5 种药用植物叶片训练集电容、电阻、叶厚和含水量均值

Tab. 11 Mean values of training set of leaf capacitance, resistance, thickness and moisture content of 5 medicinal plants

| 植物 | 序号 | 分组均值 | 阴干时间/h | 电容/pF | 电阻/MΩ | 叶厚/mm | 含水量/% |
|-----|----|------------|--------|-------|-------|-------|-------|
| 女贞 | 1 | 第 1, 3 组均值 | 0 | 204 | 0.830 | 0.288 | 70.57 |
| | 2 | 第 1, 3 组均值 | 1 | 222 | 0.830 | 0.281 | 69.80 |
| | 3 | 第 1, 3 组均值 | 2 | 245 | 0.830 | 0.277 | 69.31 |
| | 4 | 第 1, 3 组均值 | 3 | 260 | 0.830 | 0.270 | 68.79 |
| | 5 | 第 1, 3 组均值 | 4 | 255 | 0.830 | 0.265 | 68.26 |
| | 6 | 第 1, 3 组均值 | 5 | 270 | 0.830 | 0.258 | 67.72 |
| | 7 | 第 1, 3 组均值 | 6 | 291 | 0.830 | 0.254 | 67.29 |
| | 8 | 第 1, 3 组均值 | 7 | 330 | 0.830 | 0.251 | 66.78 |
| | 9 | 第 1, 3 组均值 | 8 | 342 | 0.830 | 0.247 | 66.41 |
| | 10 | 第 1, 3 组均值 | 9 | 314 | 0.830 | 0.244 | 66.11 |
| 银杏 | 11 | 第 1 组均值 | 0 | 445 | 1.077 | 0.293 | 80.80 |
| | 12 | 第 3 组均值 | 0 | 532 | 1.525 | 0.268 | 82.76 |
| 何首乌 | 13 | 第 1 组均值 | 0 | 161 | 1.156 | 0.293 | 73.00 |
| | 14 | 第 3 组均值 | 0 | 155 | 1.261 | 0.291 | 72.11 |
| 葛 | 15 | 第 1 组均值 | 0 | 749 | 1.290 | 0.166 | 74.13 |
| | 16 | 第 3 组均值 | 0 | 685 | 1.665 | 0.163 | 77.53 |
| 龙葵 | 17 | 第 1 组均值 | 0 | 751 | 1.188 | 0.286 | 83.06 |
| | 18 | 第 3 组均值 | 0 | 610 | 1.210 | 0.274 | 82.75 |

经 Excel 多元线性回归分析, R^2 为 0.959 7, 调整 R^2 为 0.951 0, 模型拟合效果良好, 从表 12 结果看出, 显著性值 $P=5.36 \times 10^{-10}$, 表明建立的线性关系回归模型具有极显著的统计学意义, 表 13 显示电容与含水量、电阻与含水量、叶厚与含水量都存在极显著意义。表 14 表明预测含水量残差在 2.63% 和 -2.33% 之间。线性拟合方程为 $Y=23.548 3+0.021 6 X_1+12.705 8 X_2+106.786 1 X_3$ (Y 为含水量, X_1 为电容, X_2 为电阻, X_3 为叶厚)。模型残差独立性检验, $DW=2.284$, 查询 Durbin Watson table 本例 DW 值恰好落在无自相关性的值域之中, 认定残差独立, 通过检验。

表 12 方差分析表

Tab. 12 Anova table

| 项目 | df | SS | MS | F | Significance F |
|------|----|-----------|-----------|-----------|------------------------|
| 回归分析 | 3 | 606.746 8 | 202.248 9 | 111.045 6 | 5.36×10^{-10} |
| 残差 | 14 | 25.498 4 | 1.821 314 | | |
| 总计 | 17 | 632.245 2 | | | |

表 13 回归参数表

Tab. 13 Regression parameter table

| 项目 | 系数 | 标准误差 | t Stat | P-value | 下限 95.0% | 上限 95.0% |
|----|-------------|------------|------------|----------|------------|-------------|
| 截距 | 23.548 340 | 3.431 696 | 6.862 013 | 7.78E-06 | 16.188 090 | 30.908 600 |
| 电容 | 0.021 608 | 0.002 401 | 8.999 439 | 3.39E-07 | 0.016 458 | 0.026 758 |
| 电阻 | 12.705 790 | 1.604 814 | 7.917 298 | 1.55E-06 | 9.263 806 | 16.147 770 |
| 叶厚 | 106.786 100 | 10.364 500 | 10.303 070 | 6.45E-08 | 84.556 500 | 129.015 800 |

表 14 残差输出结果

Tab. 14 Residual output results

| 观测值 | 预测 Y | 残差 | 标准残差 | 观测值 | 预测 Y | 残差 | 标准残差 |
|-----|-----------|------------|------------|-----|-----------|------------|------------|
| 1 | 69.247 72 | 1.326 090 | 1.082 782 | 10 | 66.897 43 | -0.791 750 | -0.646 480 |
| 2 | 68.913 96 | 0.884 894 | 0.722 535 | 11 | 73.039 08 | -0.039 080 | -0.031 910 |
| 3 | 68.976 81 | 0.330 303 | 0.269 700 | 12 | 73.976 58 | -1.863 900 | -1.521 920 |
| 4 | 68.589 02 | 0.201 455 | 0.164 492 | 13 | 78.172 05 | 2.627 955 | 2.145 783 |
| 5 | 67.947 05 | 0.317 530 | 0.259 270 | 14 | 83.074 50 | -0.318 590 | -0.260 140 |
| 6 | 67.503 97 | 0.215 947 | 0.176 326 | 15 | 73.832 03 | 0.302 245 | 0.246 790 |
| 7 | 67.514 70 | -0.221 580 | -0.180 930 | 16 | 76.857 82 | 0.676 422 | 0.552 314 |
| 8 | 68.010 37 | -1.225 830 | -1.000 920 | 17 | 85.393 59 | -2.334 770 | -1.906 390 |
| 9 | 67.869 22 | -1.456 810 | -1.189 520 | 18 | 81.380 53 | 1.369 471 | 1.118 203 |

注: Y-含水量

Note: Y-moisture content

2.4 5种药用植物叶片含水量的预测

女贞、何首乌、银杏、葛、龙葵叶片第 2 组作为测试集, 电容、电阻、叶厚和含水量均值见表 15。利用拟合方程对 5 种药用植物叶片含水量进行预测, 与干燥法比较误差值为 1.98%~1.55%, 该模型对女贞、何首乌、银杏、葛、龙葵叶片含水量的预测准确度较高。

3 结论与讨论

本研究通过 5 种药用植物叶片的电容、电阻、叶厚与含水量的相关与回归研究, 得到了叶片含水量与电容、电阻、叶厚间的拟合方程, 并根据拟

合方程对 5 种药用植物叶片含水量进行预测, 取得了预期效果, 笔者认为该模型可以作为女贞、何首乌、银杏、葛、龙葵叶片含水量预测的通用模型。

本研究仅对离体叶片进行了研究观察, 在线测量有待进一步研究。叶表面凹凸不平或带绒毛的叶片对叶片电容和叶厚测量误差较大, 叶表面较多蜡质影响电阻测量, 因此对其他药用植物叶片的测量研究还有待方法的改进。本研究仅对 5 种药用植物进行了检测, 下一步应扩大药用植物种类和范围, 以尽快应用于大田药用植物的诊断, 提升药用植物的产量和质量。

表 15 根据拟合方程预测 5 种药用植物含水量

Tab. 15 Estimation of leaf moisture content according to fitting equation in 5 medicinal plants

| 植物 | 电容/pF | 电阻/MΩ | 叶厚/mm | 实测含水量/% | 预测含水量/% | 误差值/% |
|-----|---------|-------------|-------------|------------|---------|-------|
| 女贞 | 242±44 | 0.890±0.025 | 0.272±0.026 | 69.02±0.52 | 69.13 | 0.11 |
| 何首乌 | 572±47 | 1.315±0.069 | 0.259±0.021 | 81.84±0.15 | 80.29 | 1.55 |
| 银杏 | 159±2 | 1.310±0.047 | 0.294±0.017 | 73.06±0.16 | 75.04 | 1.98 |
| 葛 | 712±336 | 1.550±0.236 | 0.177±0.003 | 77.68±0.29 | 77.49 | 0.18 |
| 龙葵 | 653±52 | 1.216±0.055 | 0.283±0.008 | 82.12±0.48 | 83.36 | 1.25 |

REFERENCES

- [1] ZHU C C, TIAN Y L, CAO F L, et al. Effects of drought stress on annual dynamic change of flavonoid contents in *Ginkgo biloba* leaves [J]. *China Forest Sci Technol*(林业科技开发), 2010, 24(4): 67-71.
- [2] LIU W, ZHAO Z, WANG H L, et al. Effects of different combination of fertilizer and water on quality of annual *Polygonum multiflorum* Thunb [J]. *Guangdong Agric Sci*(广东农业科学), 2013(18): 46-48.
- [3] JIANG Y, LIU Q, FENG S G, et al. Effects of environmental factors on the content of flavonoids and chlorogenic acid in *Chrysanthemum morifolium* Ramat. [J]. *Chin J Mod Appl Pharm*(中国现代应用药理学), 2018, 35(2): 225-230.
- [4] TAN Y, LIANG Z S, DONG J E, et al. Effect of water stress on growth and accumulation of active components of *Isatis indigotica* [J]. *China J Chin Mater Med*(中国中药杂志), 2008, 33(1): 19-22.
- [5] LIU L Y, HE H Z, LI H S. Effects of water stress on growth and physiological-biochemical characteristics of *Sophora flavescens* Ait. [J]. *Guangdong Agric Sci*(广东农业科学), 2015(23): 76-81.
- [6] BAO Y D, SHEN J H. Study of plant water lack message based on electric property and water potential of leaf [J]. *J Zhejiang Univ Agric Life Sci*(浙江大学学报 农业与生命科学版), 2005, 31(3): 341-345.
- [7] GUO W C, WU L, WEI Y S. Influence of water loss on physiological and electrical properties of plants [J]. *J Northwest A F Univ Soc Sci Ed*(西北农林科技大学学报 社会科学版), 2007, 35(4): 185-188.
- [8] XUAN Q D, FENG X W, ZHANG W J. Study on the relationship between capacitance and water content of plant leaves [J]. *Mod Agric Sci Technol*(现代农业科技), 2010(2): 216-221.
- [9] LI D S, TANG X H, LIU J Q, et al. The precision diagnosis technique of plant water for precise irrigation [J]. *J China Inst Metrol*(中国计量学院学报), 2003, 14(1): 11-14.
- [10] MIZUKAMI Y, SAWAI Y, YAMAGUCHI Y. Moisture content measurement of tea leaves by electrical impedance and capacitance [J]. *Bio Eng*, 2006, 93(3): 293-299.
- [11] AFZAL A, MOUSAVI S, KHADEMI M. Estimation of leaf moisture content by measuring the capacitance [J]. *J Agric Sci Technol*(农业科技杂志), 2010, 12(3): 339-346.
- [12] WEI Y S, LI D X, MU C L, et al. Relationship between the wheat seedling leaf electric property and test frequency and voltage [J]. *CAB Internat*(农业工程学报), 2008, 24(5): 166-169.
- [13] ISMAIL K M, ALYAH YA S A. A quick method for measuring data moisture content [J]. *Am Soc Agric Eng*, 2002, 46(2): 401-405.
- [14] FENG X W, XUAN Q D, ZHANG W J. Study on non-destructive inspection system for *populus tomentosa* carr leaf water content [J]. *J Anhui Agric Sci*(安徽农业科学), 2010, 38(15): 8213-8215.

收稿日期: 2018-12-10

(本文责编: 李艳芳)