

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2017.S0.058

# 面向一年两熟设施葡萄的能耗评估系统研究

田东 熊楚翘 魏学鉴 张雪洁 冯建英

(中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083)

**摘要:** 一年两熟设施葡萄栽培系统的能耗研究具有很强的典型性和现实意义,但传统的能耗分析具有人工计算繁琐、易出错、工作效率低等缺陷。为了解决以上问题,本研究通过分析一年两熟设施葡萄的生产流程和系统特点,建立了其能源投入产出指标,构建了 DEA-BCC 模型和 Malmquist 指数法相结合的能源效率评估模型。模型首先基于投入主导型的 DEA-BCC 模型测算出一两熟设施葡萄园的技术效率、纯技术效率和规模效率这 3 个关键能源效率参数;然后,通过引入 Malmquist 函数,将生产效率变动分解为技术效率变动指数、技术进步指数和规模效率变动指数,探索能源效率增长的动力,以此对设施葡萄能源效率进行全面评估。最后基于 JavaEE 平台下的 MVC 模式的 B/S 结构,结合 Matlab Builder JA 功能开发了面向一年两熟设施葡萄的能源消耗评估系统。应用测试表明,系统各功能正常运行,显著提高了能耗研究的计算效率和准确性,为一年两熟栽培模式能耗问题研究提供了可靠的数据处理支撑。

**关键词:** 能源消耗; 评估系统; 一年两熟葡萄; 设施农业; 能源效率

**中图分类号:** TP315      **文献标识码:** A      **文章编号:** 1000-1298(2017)S0-0381-06

## Evaluation System of Energy Consumption for Two-harvests-a-year Protected Grape

TIAN Dong XIONG Chuqiao WEI Xuejian ZHANG Xuejie FENG Jianying

(College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

**Abstract:** The energy survey of two-harvests-a-year protected viticulture has a strong and typical significance, but traditional energy consumption analysis has some drawbacks: complicated artificial calculation, long period and low data quality. Aiming at solving above problems, an energy consumption evaluation system for two-harvests-a-year protected viticulture was developed based on MVC (mode, view, and controller) framework, B/S (browser/server) structure and Matlab Builder JA function. Firstly, a complex analysis of production process of two-harvest-a-year protected viticulture was conducted, an energy input and output system was established, and an energy efficiency evaluation model combined with DEA-BCC model and Malmquist index method was proposed. The model based on the input-oriented DEA-BCC model, through the three parameters: technical efficiency, pure technical efficiency and scale efficiency, to evaluate energy efficiency. At the same time, obtaining technical efficiency change, technical progress and scale efficiency change by Malmquist index decomposition, and conduct a comprehensive assessment of energy efficiency through the above two aspects. Then, the data from Guangxi province was chosen to test the system. Results showed that the system improved the computational efficiency, and can meet the needs of different users, as well as provided reliable data processing support for the study of energy consumption in two-harvests-a-year protected viticulture.

**Key words:** energy consumption; assessment system; two-harvests-a-year grape; protected grape; energy efficiency

收稿日期: 2017-07-17 修回日期: 2017-11-20

基金项目: 国家自然科学基金项目(41501585)和现代农业产业技术体系建设专项资金项目(CARS-29)

作者简介: 田东(1972—),女,副研究员,主要从事农业信息化技术研究,E-mail: td\_tiangong@cau.edu.cn

通信作者: 冯建英(1982—),女,副教授,主要从事农业信息管理与系统建模研究,E-mail: fjying@cau.edu.cn

## 引言

一年两熟设施栽培模式是一种创新性的葡萄生产方式,它使葡萄植株在一年内两次萌芽、发育和结果,显著提高了葡萄产量和种植户收益,并有效扩大了我国葡萄栽培的适生区域。但相比普通设施栽培,一年两熟栽培模式因其独特的生长过程,需要辅以大量人工辅助的环境调控和植株生理调节操作,具有人力、能源、成本的高投入、高消耗和生产过程被人类高度干预和调控的特点。能源的高效利用是可持续农业生产方式的核心内容之一<sup>[1]</sup>,因此一年两熟设施葡萄栽培系统的能源消耗研究具有迫切性。传统能源消耗研究由人工处理,运算繁琐且易出错,工作效率低;而通过信息系统、互联网、可视化技术相结合,可以实现数据在线获取、能耗评估自动化和系统化,极大提高了数据处理效率和准确性<sup>[2]</sup>。

国内外研究表明,农业生产系统能源消耗研究已广泛针对不同尺度和不同领域<sup>[3-7]</sup>。另一方面,随着农业技术的变革,信息化技术在农业生产和评估中的应用也越来越广泛,国内研究者在农业信息化领域已经取得了一定进展,比如基于GIS技术的农业干旱评估系统<sup>[8]</sup>,基于Web模式的具有统计功能和灾害指标分析功能的农业信息系统<sup>[9]</sup>等。在葡萄生产系统的信息系统研究方面,国内学者也进行了大量尝试,如基于数据质量控制的葡萄生产信息采集系统<sup>[10]</sup>,基于人工神经网络的葡萄病害诊断专家系统<sup>[11]</sup>等。然而,目前信息系统在农业中的应用主要集中在栽培技术管理、灾害监测、病虫害智能防控和生产信息管理等方面,如何将信息技术和信息系统应用于一年两熟设施葡萄栽培的能耗评估还需要进一步的研究和分析。

因此,本文对设施葡萄一年两熟栽培模式生产流程进行梳理和分析,构建能源消耗评价指标体系,建立能源消耗核算、能源效率评估模型。在此基础上设计一套设施葡萄一年两熟栽培模式能源消耗评估系统,实现能耗评估的自动化和信息化。

## 1 系统分析与设计

### 1.1 生产流程分析

在南方一年两熟设施葡萄栽培模式中,根据一季果和二季果的生长期不同,可以分为“两代同堂”和“两代不同堂”两种生产模式。“两代不同堂”的一、二季果生长期不重叠,显著延缓了葡萄供应时间,提高了葡萄供应时长,能为种植户带来较好收益,具有良好发展前景和研究价值。因此,本文主要

针对“两代不同堂”的一年两熟栽培模式进行研究,图1为一年两熟栽培模式的生产流程。

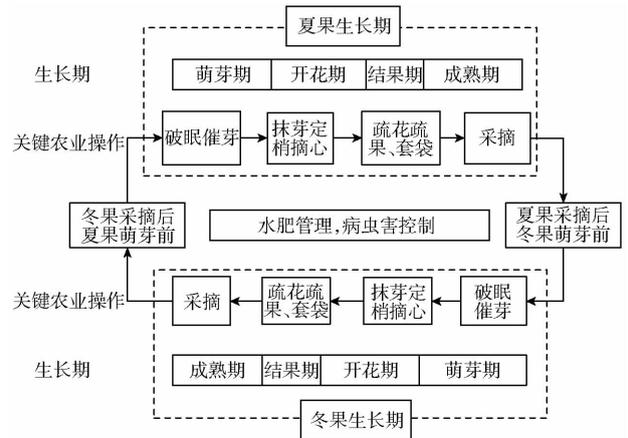


图1 “两代不同堂”一年两熟栽培模式生产流程

Fig. 1 Two-harvests-a-year grape production process with two production seasons don't overlap

### 1.2 用户及需求分析

设施葡萄一年两熟栽培能源消耗评估系统旨在满足农业可持续发展领域研究者的相关需求,同时也为葡萄种植户提供一个存储、展示、查询和分析生产信息的平台,辅助管理葡萄园生产活动。因此,将本系统的使用对象分为3类,即普通用户、专家用户和系统管理员。普通用户主要指葡萄种植者,系统提供给普通用户的功能包括数据录入、数据管理、评估结果查询等;专家用户主要指一年两熟设施葡萄栽培领域的研究人员,系统为专家用户提供3方面功能:录入数据管理、评估指标计算、结果分析上传;系统管理员是整个系统平稳运行的保障者,具有4类主要功能:基本信息管理、系统更新、评估结果管理和用户管理。系统用例图如图2所示。

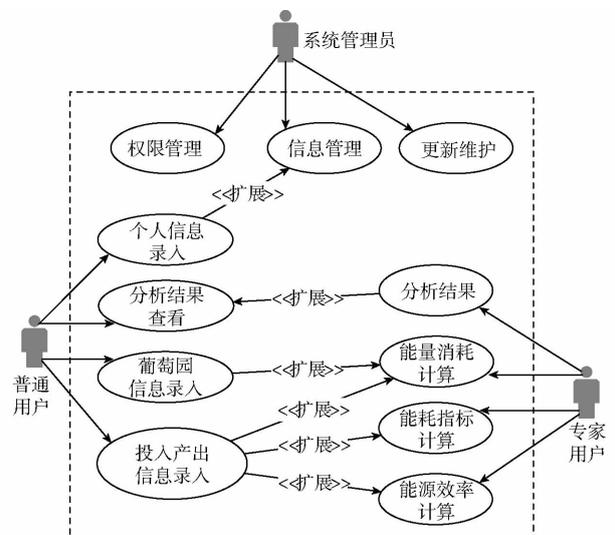


图2 能源消耗评估系统用例图

Fig. 2 Use-case diagram of energy consumption evaluation system

### 1.3 系统功能模块设计

根据系统功能需求和用户需求,本研究将评估系统分为3个模块:数据管理模块、能源消耗评估模块和系统管理模块,如图3所示。

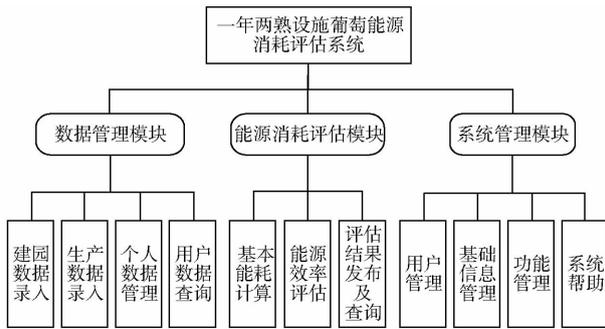


图3 能耗评估系统功能模块

Fig. 3 Function block of energy consumption evaluation system

#### 1.3.1 数据管理模块

数据管理模块是本系统的基础模块,普通用户通过录入和上传葡萄建园信息和生产中能源消耗基础数据,评估系统才能进行后续评估操作。此模块的功能有:注册用户录入个人基本信息和葡萄园基本信息,如园区地址、建园投入等数据;录入每个生产季各能源项目的投入以及产出数据;还可以对录入后数据进行后期检验和改正,剔除异常数据,以及进行数据查询。

#### 1.3.2 能源消耗评估模块

能源消耗评估模块是评估系统的核心模块,在数据管理模块获取的数据,通过能耗评估模块中模型库对数据进行处理,得到能源消耗和能源效率的评估结果。首先提取建园和生产中能源的投入产出信息,通过折能系数折算出各投入产出项的能耗值;结合设施葡萄一年两熟栽培模式中的能耗评价指标体系,分别测算葡萄园的基本能耗指标、能源结构和能源效率;此模块还包括了专家用户和系统管理员向种植户发布分析结论和改进意见的功能,普通用户可依据权限查看相应信息。

#### 1.3.3 系统管理模块

系统管理模块面向系统管理员和专家用户,管理员可以通过此功能模块进行创建新用户,管理已注册用户个人信息和葡萄园信息,更新维护系统以及提供系统帮助等操作;专家用户可以通过此模块发布分析结果。

### 1.4 数据库设计

考虑到种植户和研究人员的实际需求和评估系统的整体设计,设施葡萄一年两熟栽培模式能耗评估系统数据库应包括用户信息表(UserInfo)、建园投入表(VineyardCost)、生产投入产出表(MaterialCost、

LaborCost、GrapeIncome)、葡萄园信息总表(GrapBasicInfo)等,葡萄园信息总表通过主键InputID与其他表相关联。数据库的表结构见图4。

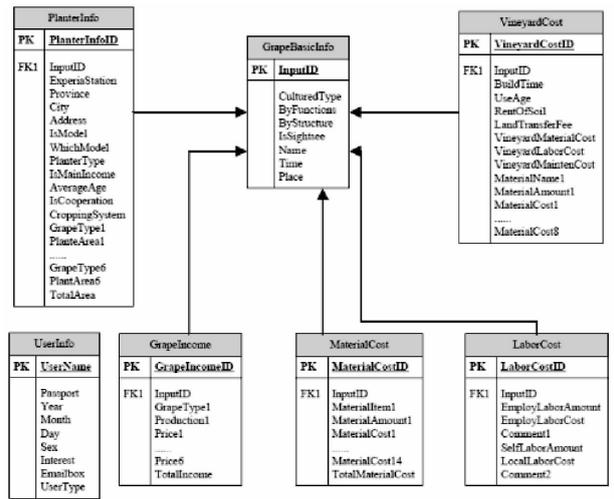


图4 数据库表结构

Fig. 4 Database table structure

## 2 能耗评估方法与模型

### 2.1 系统评价的框架结构

由于一年两熟设施葡萄栽培需要人工通过调控环境因子和化学生物手段实现葡萄休眠、破眠,促使花芽二次分化等生长环节,对人工辅助能的依赖更强,因此本研究将葡萄园能源消耗的边界界定为只核算人工辅助能的消耗与商品化的葡萄产品的产出(修剪的葡萄枝条花果以及落叶等非优势生物和其他产出不予考虑)。经过实地调研和文献研究,并遵循科学性与可行性、易测度性和实用性、代表性与导向性的原则,建立多角度、多指标的能源消耗评价框架结构,如图5所示。

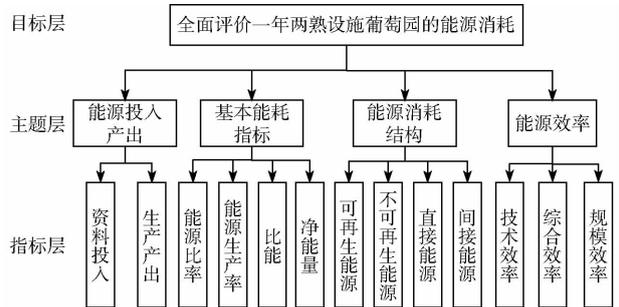


图5 一年两熟设施葡萄系统能源评价结构框图

Fig. 5 Energy evaluation structure of two-harvest-a-year protected vineyard

### 2.2 能源消耗的折算方法

在设施葡萄一年两熟栽培模式的一个完整生产周期中,主要包括3部分的能源投入:第1部分为建园初期使用的建园物资,如水泥、钢架、铁丝、棚膜、地膜、基础灌溉设施等所对应的能源消耗,需要根据

使用年限分摊到每个生产季;第2部分和第3部分分别为一年两熟栽培模式中第一生产季和第二生产季的能源投入,如柴油、电力、化肥、农药、灌溉水、机械等对应的能源消耗<sup>[12-13]</sup>。以上这些葡萄生产中的能源消耗,按照能源投入方式可以分为直接能源(DE)与间接能源(IDE),其中直接能源包括电力、燃油、人力、灌溉水等,间接能源包括化肥、农药、农膜、机械设备等;按照能源是否可再生可分为可更新能源(RE)与不可更新能源(NRE),其中可更新能源包括人力、灌溉水、苗木、有机肥等,不可更新能源包括燃油、电力、化肥、农药等<sup>[14-15]</sup>。

第*i*项能源消耗的具体测算公式为

$$E_i = M_i \kappa \quad (1)$$

式中  $M_i$ ——第*i*种原始生产资料消耗数量

$\kappa$ ——对应的折能系数

生产季总能耗计算公式为

$$E = \sum E_i \quad (2)$$

折能系数取值见表1。

表1 一年两熟栽培模式折能系数

Tab.1 Energy equivalent of two-harvests-a-year protected grape

能源种类	折能系数	数据来源
铁丝	15 815.52 kJ/kg	文献[16]
钢材	46 860.80 kJ/kg	文献[16]
农膜	51 931.81 kJ/kg	文献[16]
劳动力	12 600 kJ/d	文献[17]
氮肥(N)	92 048.00 kJ/kg	文献[16]
磷肥(P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> )	13 388.80 kJ/kg	文献[16]
钾肥(K <sub>2</sub> O)	9 204.80 kJ/kg	文献[16]
农药	1 020 896.90 kJ/kg	文献[16]
有机肥	300 kJ/kg	文献[17]
水	1 020 kJ/m <sup>3</sup>	文献[16]
电	3 598.24 kJ/(kW·h)	文献[16]
农作物(葡萄)	2 205.80 kJ/kg	文献[16]

### 2.3 基本能耗指标计算方法

对于评价分析农作物生产过程中的总体能源消耗情况,国外学者通常使用能源比率、能源生产率、比能、净能量等指标进行分析。因此,本研究同样引入国外研究农作物能源问题比较成熟的指标作为农作物的能源利用效率评估依据<sup>[18]</sup>,相关计算公式为

$$R = \frac{E_p}{E_T} \quad (3)$$

$$P = \frac{M}{E_T} \quad (4)$$

$$S = \frac{E_T}{M} \quad (5)$$

$$N = E_p - E_T \quad (6)$$

式中  $R$ ——能源比率  $P$ ——能源生产率

$S$ ——比能  $N$ ——净能量

$E_p$ ——能源产出  $E_T$ ——能源投入

$M$ ——产量

这是评判农作物总体能源消耗情况的重要参数,通过与国外研究对比,可对我国设施葡萄能源消耗的整体情况进行充分了解和掌握,有利于今后农作物的可持续发展。

### 2.4 能源效率评估模型

本研究基于全要素生产率,采用投入主导型DEA与Malmquist指数方法结合的能效评估模型,通过技术效率、纯技术效率和规模效率3个参数,对葡萄园能源效率进行综合评价<sup>[19]</sup>。

(1)投入主导型的DEA-CCR(规模报酬不变)模型表示为

$$\begin{cases} \text{Min} \theta \\ \text{s. t.} \begin{cases} \sum_{j=1}^n \lambda_j x_{ij} + s_i^- = \theta x_{i0} & (i = 1, 2, \dots, m) \\ \sum_{j=1}^n \lambda_j y_{rj} - s_r^+ = y_{r0} & (r = 1, 2, \dots, s) \\ \lambda_j, s_i^-, s_r^+ \geq 0 \end{cases} \end{cases} \quad (7)$$

式中  $x_{ij}$ ——第*j*个决策单元的第*i*种投入

$y_{rj}$ ——第*j*个决策单元的第*r*种产出

$x_{i0}$ ——所有决策单元的第*i*种投入之和

$y_{r0}$ ——所有决策单元的第*r*种产出之和

$\lambda_j$ ——投入与产出的权系数

$\theta$ ——被评价的决策单元的相对效率

$s_i^-$ ——第*i*种投入的剩余变量

$s_r^+$ ——第*r*种产出的剩余变量

若在上述模型中加入公式

$$\sum_{j=1}^n \lambda_j = 1 \quad (8)$$

则得到BCC(规模报酬可变)模型,最后得到的 $\theta_{CCR}^*$ 为技术效率, $\theta_{BCC}^*$ 为纯技术效率,而规模效率则表示为

$$\theta_{scale}^* = \frac{\theta_{CCR}^*}{\theta_{BCC}^*} \quad (9)$$

若 $\theta^* = 1$ ,且 $s_i^- = 0, s_r^+ = 0$ 时,被评价的决策单元为DEA有效;若 $\theta^* < 1$ ,被评价的决策单元为DEA无效。

(2)Malmquist指数法

FARE等在距离函数的基础上定义了Malmquist函数,将Malmquist指数分解成技术效率变动、技术进步和规模效率变动指数<sup>[20]</sup>。

$$M_{t,t+1} = \left[ \frac{D_t(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_t(X_t, Y_t)} \frac{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_{t+1}(X_t, Y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} = \left[ \frac{D_t(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})} \frac{D_t(X_t, Y_t)}{D_{t+1}(X_t, Y_t)} \right]^{\frac{1}{2}} \frac{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})}{D_t(X_t, Y_t)} \quad (10)$$

如式(10),取  $t$  和  $t+1$  时期的均值作为衡量两个时期的能源效率变化的 Malmquist 指数,消除不同时期的随意性差异,可以将 Malmquist 指数分解为技术变化(TCP)和技术效率的变化(TEC),其中技术效率的变化  $T$  又可进一步分解为纯技术效率变化(PTEC)和规模效率变化(SE)。

$$T = \frac{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1} | V, S)}{D_t(X_t, Y_t | V, S)} \frac{D_t(X_t, Y_t)}{D_{t+1}(X_{t+1}, Y_{t+1})} \quad (11)$$

### 3 系统实现

#### 3.1 系统开发工具与环境

系统采用基于 JDK1.7 版本的 J2EE 三层 B/S 结构,在 Windows 环境下进行开发。在 Web 前端部分,应用 JSP 以及 JavaScript 框架进行前端的开发;在 Web 后端开发部分,以 Tomcat 7.0 作为服务器,以 Myeclipse7.0 为开发工具,采用 JSP + JAVA + Matlab 联合开发,开发工具为 Myeclipse10.0 和 Matlab 2014a,同时使用 MySQL 作为数据库管理工具。

#### 3.2 能源消耗评估模块的实现

##### 3.2.1 能源消耗评估的实现

能源消耗评估主要包括能源消耗量的折算,以及能源比率、能源生产率、比能和投入净能量等基本能耗指标的计算。这些数据的计算主要通过 AngularJS 框架来实现。

##### 3.2.2 能源效率评估的实现

能源效率评估模型涉及多种数理统计函数和方法,包括数据包络分析(DEA)和 Malmquist 指数分析等,本研究通过 JAVA 和 Matlab 混合编程来实现。Java 和 Matlab 混合编程可以通过 Matlab 调用 Java 程序,也可以是 Java 程序调用 Matlab<sup>[21-23]</sup>。而 Java 程序访问 Matlab 主要有 3 种方式:利用 COM 对象实现访问,利用 Matlab 软件中 Matlab Builder JA 功能实现访问和使用 JNI 技术实现访问。通过综合考虑实现难度与本系统的开发语言,选择使用 Matlab 软件的 Builder JA 功能实现评估模型的建立。实现流程如图 6 所示。

以下为 Matlab Builder JA 功能的实现流程:首先配置环境变量与系统变量;在 Matlab 窗口执行 deploytool,创建新的工程文件;编写模型库中 DEA

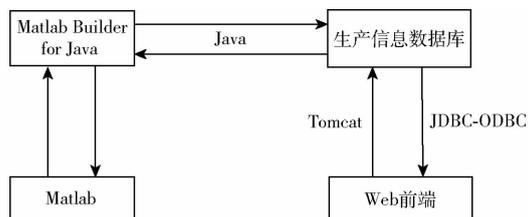


图 6 Matlab 和 Java 混合编程流程

Fig. 6 Mixed language programming based on Matlab and Java

和 Malmquist 算法的 m 文件;将 DEA 和 Malmquist 算法文件添加到新建的 Java 类中,通过 Java Package 中的编译功能对 M 文件进行 Java 编译;在 Myeclipse 中创建 Java 工程,在工程属性的 BuildPath 中添加两个 jar 包: javabuilder.jar 以及新生成的 projectname.jar;编写 Java 函数,调用上一步的 \*.jar 包;最后完成 Java 到 Matlab 之间的数据类型转换。

#### 3.3 实证测试

系统开发完成后,选择 10 组数据对系统进行了测试。测试表明系统能完成能源消耗量计算、能源消耗评估和能源效率计算等功能,测试结果如图 7 所示。



图 7 实证测试图

Fig. 7 Test result page

可以看出,10 个样本的各项能源效率值普遍较高,说明该取样区域的一年两熟葡萄园的能源投入结构较好,能源投入得到了合理利用;第二生产季的能源效率普遍低于第一生产季,说明该地区第二生产季的能源利用效率较低,能源投入存在不合理现象,需要种植者根据能源效率表的具体数值来进行调整和优化。

本研究从全要素投入导向能源效率的角度出发构建了能源效率模型,后期可以增加从单要素投入方面来评估其对总体能源效率的影响。在系统技术层次上,由于用户较少,系统界面的交互还需完善,随着使用用户的增多,数据量的增大,还需要对系统

进行优化。同时,系统测试只是进行了数据测试,还需进一步完善对系统性能的测试。

## 4 结论

(1)在结合一年两熟设施葡萄“两代不同堂”模式生产过程的基础上,建立了葡萄园能源消耗评估体系,从能源投入产出、基本能耗指标、能耗结构、能源效率方面综合建模,多角度、多类型地评估一年两熟栽培模式能源消耗问题。评估结果表明,此模型能够客观、全面地评价葡萄园的能源利用水平,用统一的标准直观衡量各葡萄园的能源效率,有效弥补了传统能量分析中不同类型能量不能互相比较的缺陷。

(2)系统旨在构建一套适合一年两熟栽培模式的能耗评价模型与系统,实现葡萄园能耗评价的自动化、信息化和高效化。测试表明,本系统可以实现生产信息在线获取、能源消耗和能源效率自动计算以及多角度评估;有效改善了纸质问卷录入过程繁琐、传统能耗数据计算误差较大以及人工计算耗时耗力的问题,节省了经济和时间成本,也提高了评估结果的准确性和工作效率。

(3)实证测试显示,样本葡萄园的能源效率值普遍较高,表明该取样区域的一年两熟葡萄园的能源投入结构较合理、能源投入得到了合理利用;但第二季的能源效率普遍低于第一季,说明第二生产季的能源投入存在不合理现象,需要进行调整和优化。

## 参 考 文 献

- VLONTZOS G, NIAVIS S, MANOS B. A DEA approach for estimating the agricultural energy and environmental efficiency of EU countries[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2014, 40:91-96.
- 段家豪, 杨卓翰, 项凌威. 计算机信息技术在农业生产中的应用[J]. *南方农机*, 2016, 47(10):82.
- BLANCARD S, MARTIN E. Energy efficiency measurement in agriculture with imprecise energy content information[J]. *Energy Policy*, 2014(66):198-208.
- HOUSHYAR E, DALGAARD T, TARAZKAR M H, et al. Energy input for tomato production what economy says, and what is good for the environment[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2014(89):99-109.
- MARDANI A, TAGHAVIFAR H. An overview on energy inputs and environmental emissions of grape production in West Azerbaijan of Iran[J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54:918-924.
- 徐键辉. 粮食生产的能源消耗及其效率研究[D]. 杭州:浙江大学, 2011.  
XU Jianhui. A study on the energy use and energy efficiency of grain production-empirical analyse based on DEA [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2011. (in Chinese)
- 徐家鹏. 中国农业能源消耗与 CO<sub>2</sub> 排放:趋势及减排路径——基于 Holt-Winter 无季节性模型和“十三五”的预测[J]. *生态经济(中文版)*, 2016(2):122-126.  
XU Jiapeng. China's agricultural energy consumption and CO<sub>2</sub> emissions: current situation, trend and path to reduce emissions [J]. *Ecological Economy*, 2016(2):122-126. (in Chinese)
- 李卫宁, 匡昭敏, 卢远, 等. 基于 GIS 技术的农业干旱监测与评估系统[J]. *安徽农业科学*, 2011, 39(9):17296-17298.  
LI W N, KUANG Z M, LU Y, et al. Monitoring and assessment system of agricultural drought based on GIS technology[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2011, 39(9):17296-17298. (in Chinese)
- 明德廷. 基于 Web 的农业气象信息系统的开发及应用[J]. *安徽农业科学*, 2010, 38(9):4920-4922.  
MING Deting. Development and application of agricultural climate information system based on Web [J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2010, 38(9):4920-4922. (in Chinese)
- 冯建英, 魏学鉴, 肖广汀, 等. 基于数据质量控制的葡萄生产信息采集系统设计与应用[J]. *农业工程学报*, 2017, 33(增刊1):192-198.  
FENG Jianying, WEI Xuejian, XIAO Guangting, et al. Design and application of grape production information collecting system based on data quality controlling[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2017, 33(Supp. 1):192-198. (in Chinese)
- 金燕, 石雪晖, 熊兴耀, 等. 基于人工神经网络的葡萄病害诊断专家系统[J]. *计算机工程与应用*, 2009, 45(21):215-217.  
JIN Yan, SHI Xuehui, XIONG Xingyao, et al. Grape diseases diagnose expert system based on artificial neural network[J]. *Computer Engineering and Applications*, 2009, 45(21):215-217. (in Chinese)
- OZKAN B, FERT C, KARADENIZ C F. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production[J]. *Energy*, 2007, 32(8):1500-1504.
- KHOSHROO A, MULWA R, EMROUZNEJAD A, et al. A non-parametric data envelopment analysis approach for improving energy efficiency of grape production[J]. *Energy*, 2013, 63(1):189-194.
- NABAVI-PELESARAEI A, ABDI R, RAFIEE S, et al. Applying data envelopment analysis approach to improve energy efficiency and reduce greenhouse gas emission of rice production[J]. *Engineering in Agriculture Environment & Food*, 2014, 7(4):155-162.

- Mongolia Agricultural University, 2005. (in Chinese)
- 16 陈修斌,潘林,王勤礼,等. 温室番茄水肥耦合数学模型及其优化方案研究[J]. 南京农业大学学报, 2006, 29(3): 138-141.  
CHEN Xiubin, PAN Lin, WANG Qinli, et al. Water fertilizer coupling effects and its optimization in greenhouse tomato production[J]. Journal of Nanjing Agricultural University, 2006, 29(3): 138-141. (in Chinese)
- 17 杜清洁,李建明,潘铜华,等. 滴灌条件下水肥耦合对番茄产量及综合品质的影响[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(3): 10-17.  
DU Qingjie, LI Jianming, PAN Tonghua, et al. The compound effects of water and fertilizer on yield and quality of tomato under drip irrigation[J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(3): 10-17. (in Chinese)
- 18 崔毅,陈思,柴瑞育,等. 番茄产量对各生育阶段土壤水分的响应分析[J]. 干旱地区农业研究, 2015, 33(6): 14-21.  
CUI Yi, CHEN Si, CHAI Ruiyu, et al. Responsive analysis of tomato yield to soil moisture during different growth stage [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2015, 33(6): 14-21. (in Chinese)
- 19 冀春花,林升强,黄露茹,等. 叶面肥对无土栽培樱桃番茄性状的影响及产量与植株性状的数学模型研究[J]. 中国农学通报, 2014, 30(4): 175-178.  
JI Chunhua, LIN Shengqiang, HUANG Luru, et al. Effects of soilless culture on cherry tomato characters after using foliar fertilizer and study on the mathematical model of plant characters and yield [J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2014, 30(4): 175-178. (in Chinese)
- 20 石小虎,曹新霞,杜太生,等. 温室膜下沟灌水氮耦合对番茄品质的影响和评价研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(3): 79-82, 105.  
SHI Xiaohu, CAO Hongxia, DU Taisheng, et al. Impact of water and nitrogen coupling on quality of greenhouse tomato with furrow irrigation under film [J]. Agricultural Research in the Arid Areas, 2013, 31(3): 79-82, 105. (in Chinese)
- 21 PHENE C J, HUTMACHER R B, DAVIS K R, et al. Water and fertilizer management of processing tomatoes [J]. Acta Horticulture, 1990, 277: 137-193.
- 22 PLAYAN E, FACI J M B. Fertigation field experiments and a simple model [J]. Irrigation Science, 1997, 17: 163-171.
- 23 WEIVER U, VAN RIESEN U, SVPHARPF H C. Nil-N-plots: system to estimate the amount of the nitrogen topdressing of vegetables [J]. Acta Hort, 2001(563): 47-52.
- 24 雷喜红,李新旭,王铁臣,等. 不同种植密度对番茄长势、果实品质及产量的影响[J]. 北方园艺, 2015(7): 30-33.  
LEI Xihong, LI Xinxu, WANG Tiechen, et al. Effect of planting development, fruit quality and yield of tomato [J]. Northern Horticulture, 2015(7): 30-33. (in Chinese)
- 25 陈贤,王其刚,关文灵,等. 番茄品系产量的逐步回归分析[J]. 北方园艺, 2007(3): 8-9.  
CHEN Xian, WANG Qigang, GUAN Wenling, et al. The stepwise regression analysis of yields of tomato breeding lines [J]. Northern Horticulture, 2007(3): 8-9. (in Chinese)

(上接第 386 页)

- 15 冯建英. 葡萄设施栽培技术效果与效益评价研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2013.  
FENG Jianying. Evaluation on the technical benefits of the protected grapecultivation [D]. Beijing: China Agricultural University, 2013. (in Chinese)
- 16 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001.
- 17 KOCTÜRK O M, ENGIN DENI Z S. Energy and cost analysis of sultana grape growing: a case study of Manisa, west Turkey [J]. African Journal of Agricultural Research, 2009, 4(10): 938-943.
- 18 BOLANDNAZAR E, KEYHANI A, OMID M. Determination of efficient and inefficient greenhouse cucumber producers using data envelopment analysis approach, a case study: Jiroft city in Iran [J]. Journal of Cleaner Production, 2014, 79(18): 108-115.
- 19 ZHANG L, WANG J, WEN H, et al. Operating performance, industry agglomeration and its spatial characteristics of Chinese photovoltaic industry [J]. Renewable & Sustainable Energy Reviews, 2016, 65: 373-386.
- 20 FÄRE R, GROSSKOPF S, NORRIS M. Productivity growth, technical progress, and efficiency change in industrialized countries: reply [J]. American Economic Review, 1997, 87(5): 1033-1039.
- 21 曾威, 杨建东, 凌宇. 基于 Java 和 Matlab 混合编程的水泵水轮机全特性构造系统 [J]. 大电机技术, 2014(4): 55-58.  
ZENG Wei, YANG Jiandong, LING Yu. The generation of pump-turbine characteristics based on hybrid programming between Java with Matlab [J]. Large Electric Machine & Hydraulic Turbine, 2014(4): 55-58. (in Chinese)
- 22 王薇, 杨丽萍. Java 和 Matlab 混合编程及其应用 [J]. 长春大学学报, 2012, 22(10): 1186-1189.  
WANG Wei, YANG Liping. Mixed programming of Java and Matlab and its application [J]. Journal of Changchun University, 2012, 22(10): 1186-1189. (in Chinese)
- 23 李斌全, 穆维松, 郑小平. 基于 B/S 和 SFA 的葡萄生产技术效率评估系统 [J]. 计算机与现代化, 2013(10): 125-130.  
LI Binqun, MU Weisong, ZHENG Xiaoping. Technical efficiency evaluating system for grape production based on B/S architecture and SFA [J]. Computer & Modernization, 2013(10): 125-130. (in Chinese)