

基于能值分析的设施葡萄生产系统可持续评价

冯建英¹ 穆维松¹ 田东¹ 傅泽田^{2*}

(1. 中国农业大学 信息与电气工程学院,北京 100083;

2. 中国农业大学 工学院,北京 100083)

摘要 为全面评价设施葡萄生产系统的经济效益、生态效益和可持续发展水平,利用能值分析方法,基于大量统计数据 and 调研数据,以露地栽培作为对照,对设施葡萄栽培系统的能值消耗总量、结构和主要能值分析指标进行了研究。结果表明:1)设施葡萄生产系统的能值投入总量为 5.32×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$),高于露地栽培;2)设施和露地这2种葡萄生产系统的能值消耗均以不可更新购入能值为主,且对购入能值的依赖强于自然资源能值,对不可更新资源能值的依赖强于可更新资源能值;3)与露地栽培相比,设施葡萄生产系统的能值自给率和产出率偏低,能值投资率和环境负载率偏高,可持续发展能力降低。设施葡萄生产系统的环境负载较高,应降低购入性能值消耗、改进系统内部资源反馈效率,以提高系统的可持续性水平。

关键词 能值分析;可持续评价;设施葡萄;农业生产系统

中图分类号 S 628; X 24

文章编号 1007-4333(2015)03-0223-08

文献标志码 A

Energy-based sustainability assessment for protected grape cultivation system

FENG Jian-ying¹, MU Wei-song¹, TIAN Dong¹, FU Ze-tian^{2*}

(1. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China;

2. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to assess the economic benefit, ecological benefit and sustainability in protected grape cultivation system, a methodology of emergy analysis was adopted to research the emergy accounting, emergy structure and emergy-based indicators for protected viticulture system. The data was acquired through statistical data and field investigation, and the open-field viticulture system was chosen to conduct the comparative study. The results indicate that the total emergy input in protected grape cultivation is 5.32×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$), which is higher than the open-field system. The emergy consumption in both grape production systems are characterized by more heavily dependent on the purchased energy and nonrenewable resource emergy. Compared to the open-field cultivation, the protected grape system has lower emergy self-sufficiency rate and emergy yield ratio, higher emergy investment rate and environmental loading ratio, and lower emergy sustainability index. The environmental loading in protected grape cultivation system is relative higher; it should reduce the purchased energy and increase the feedback efficiency of internal resources, so as to improve the sustainability of the system.

Key words emergy analysis; sustainability assessment; protected grape cultivation; agricultural production system

设施栽培模式以其“高投入、高产出”的良好经济效益吸引了广大生产者。据国家葡萄产业技术体系统计,2013年我国设施葡萄栽培面积超过13万

hm^2 ,占葡萄栽培总面积的20%,我国已连续多年位居世界设施葡萄生产第1大国。然而,单纯追求生产系统的高经济效益不适应可持续发展的理念,因

收稿日期:2014-07-10

基金项目:国家自然科学基金资助项目(50841101573);国家葡萄产业技术体系(CARS-30)

第一作者:冯建英,讲师,博士,主要从事农业系统评估与建模研究,E-mail:fjying@cau.edu.cn

通讯作者:傅泽田,教授,博士生导师,主要从事农业系统工程和信息化技术研究,E-mail:fzt@cau.edu.cn

此设施栽培的生态环境效益及其可持续发展问题逐渐引起了普遍关注。研究表明,设施栽培会带来高碳排放以及潜在的土壤盐化、酸化、土传病增加等环境危害^[1-4],同时设施栽培面临能源需求量大、环境压力突出等威胁系统可持续发展的问题^[5-7]。在众多评价系统可持续性的理论中,能值分析方法受到较多关注和应用。

能值分析方法由美国著名生态学家 Odum 于 20 世纪 80 年代创立,该理论通过将生态经济系统内流动和储存的各种不同类别的能量和物质转换为同一标准的太阳能值,单位为太阳能焦耳(Solar emjoules, sej),克服了传统能量分析方法中不同类别的能量“不可加”和“不可比”的弊端,提供了衡量和比较各种能量的共同尺度,从而形成了 1 个反映系统的经济效益、生态效益和可持续发展能力的综合指标体系^[8-10]。能值分析方法在农业生产系统的可持续评价中得到了广泛应用,包括种植业、加工业、水产养殖、农牧复合系统等^[11-15],但在设施葡萄领域却鲜有涉及。张小栓等^[16]开发了基于能值分析的设施葡萄可持续评价系统,然而该研究重在系统的设计与开发,仅以河北省昌黎县的设施葡萄栽培为例进行了系统测试,在设施葡萄生产系统的能值分析方面尚显不足。因此,有必要基于大量统计

和调研数据,对我国设施葡萄生产系统进行能值分析和可持续评价研究。

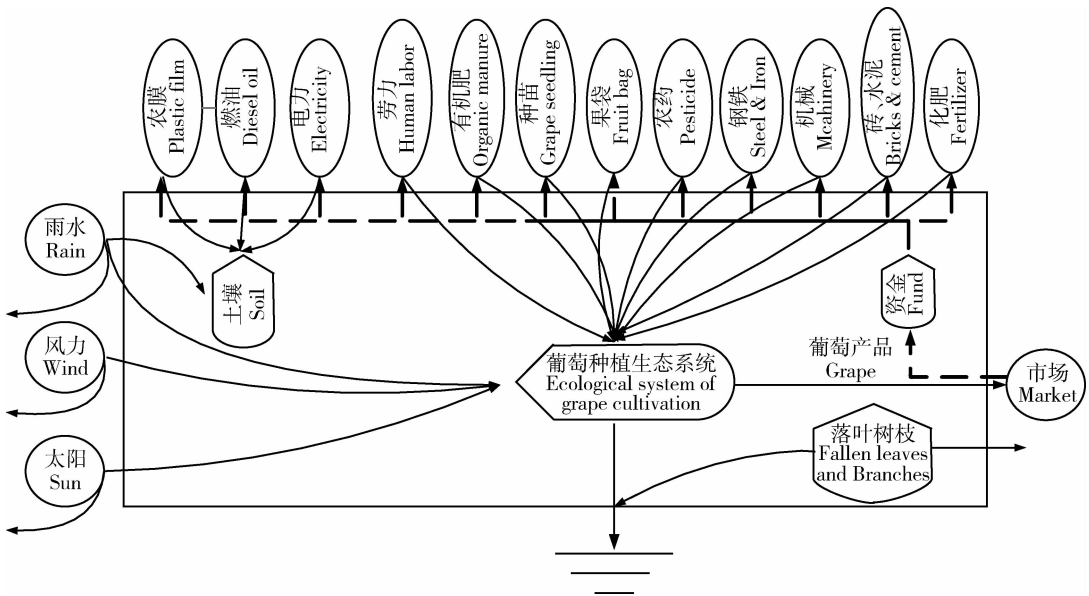
本研究以能值分析方法为理论基础,综合利用统计数据 and 调研数据,全面分析设施葡萄生产系统的能值投入总量、结构、环境压力和可持续发展能力,以为设施葡萄生产优化能值投入结构和提高可持续水平提供调控措施和建议。

1 研究方法

1.1 设施葡萄生产系统能值图

Odum 提出了“能量系统语言”及使用规范,用于绘制系统能值图。概括来讲,系统消耗自然资源(包括可更新资源、不可更新资源)和购入资源(也叫工业辅助能,包括可更新资源、不可更新资源),最终生产产出能值。假定消耗能量的能值为 0,则系统的产出能值为投入能值之和^[9]。

对于设施葡萄生产系统,能值投入分为建造设施大棚时的一次性资源消耗和每年葡萄生产所消耗的各项自然资源、购入的生产资料和劳动力等。系统的产出有葡萄、枝条、落叶等生物量。系统能值图清晰地反映了设施葡萄种植生态系统的能值投入和产出情况,以及物流、能流、货币流的流向关系(图 1)。



实线表示能值流动路线,虚线表示货币流通路线;个别在系统能值投入中占比太低的项目予以忽略。Solid line shows the energy flow route and the dotted line shows the currency circulation route. Several energy input items that account for too low ratio in protected grape cultivation system were omitted.

图 1 葡萄设施栽培系统能值图

Fig. 1 Emergy diagram for protected grape cultivation system

1.2 能值分析指标

能值分析指标可以反映生态经济系统的结构、功能与效率,是系统综合分析和制定发展决策的重要依据。为保持研究上的一致性和便于结果的比较,本研究参考已有研究使用的果业生态系统能值分析指标,建立设施葡萄生产系统的能值分析指标体系^[9,17-18]。

1)系统能值转换率 Tr 。能值转换率为每单位物质、服务或能量所包含的太阳能的数量,用系统产出所包含的太阳能值除以系统产出计算得出,即

$$Tr = Y/Y_1 \quad (1)$$

式中: Y 为系统的能值产出, Y_1 为系统的物质或能量产出。能值转换率反映了系统产品的能值地位等级,转换率越高表明能值等级越高。从生产系统的效率来看,能值转换率越高,生产单位产出所消耗的太阳能值越多,系统的生产效率越低。

2)能值自给率 ESR 。能值自给率为系统自然环境投入能值与系统能值投入总量之比,即

$$ESR = (R + N)/U \quad (2)$$

式中: R 为可更新自然资源能值, N 为不可更新自然资源能值, U 为能值总投入。 ESR 可以描述系统的对外交流程度和经济发展程度,一方面反映系统自给自足的能力,另一方面反映系统在能值投入中对外界系统的依赖程度。能值自给率越高,说明系统自给自足的能力越强,对内部资源开发程度越高,外部资源能值投入不够,系统经济发展程度不高。

3)净能值产出率 EYR 。净能值产出率为系统产出能值与经济反馈能值(购入能值)之比,即

$$EYR = Y/(F_1 + R_1) \quad (3)$$

式中: F_1 为购入的不可更新资源能值, R_1 为购入的可更新资源能值。净能值产出率是衡量系统产出对经济贡献大小的指标, EYR 越高,表明系统获得一定的经济能值投入,产出的能值越高,生产效率越高。

4)能值投资率 EIR 。能值投资率为购入能值与来自环境的无偿能值输入之比,即

$$EIR = (F_1 + R_1)/(R + N) \quad (4)$$

EIR 值越小说明系统的经济发展水平低而对环境的依赖性强,外界经济投入太少,不利于提高系统的产出。低能值投资率的系统比高能值投资率的系统拥有更多未开发利用的资源。

5)环境负载率 ELR 。环境负载率为系统不可更新资源能值投入总量与可更新资源投入总量之

比:

$$ELR = (N + F_1)/(R + R_1) \quad (5)$$

该变量用以衡量系统环境所承受的压力。 ELR 越高,表明系统环境所承受的压力越大,系统自然环境资源进一步开发利用的潜力降低。

6)可持续发展指数 ESI 。可持续发展指数为系统能值产出率与环境负载率之比:

$$ESI = EYR/ELR \quad (6)$$

式(6)中的 EYR 用以评价系统的产出效率, ELR 评价系统的环境压力,2者分别评价了系统可持续发展性能的2个方面,即既要经济社会发展,又要生态环境的可持续。当系统的能值产出率高而环境负载率低时,系统是可持续的。不过, ESI 并不是越高越好,按照研究经验,当 $ESI < 1$ 时,表明系统为高消耗驱动的系统;当 $1 < ESI < 10$ 时,表明系统处于富有活力和潜力的发展状态;当 $ESI > 10$ 时,说明系统经济不发达,对资源的开发利用不足。

1.3 能值转换率

能值转换率是能值分析中非常重要的概念。一般采用太阳能值转换率,指单位某种能量或物质所含太阳能值的量,单位为 sej/J 或 sej/g 。能值转换率具有时空差异性,因此选择恰当的能值转换率是能值分析准确的必要条件。本研究查阅了大量国内外能值分析文献,确定了本研究的能值转换率,具体数值及来源见能值分析表。

2 样本与数据

2.1 样本选择

能值分析不仅需要葡萄园详细的生产投入和产出数据,而且需要葡萄园所在地的自然资源数据,数据项目繁杂而细致,数据量庞大。本研究在国家葡萄产业技术体系的支持下,按照目前比较成熟的我国葡萄主产区的划分标准^[19],在我国葡萄主产区选择了266个设施葡萄园作为样本点获取数据,同时每个样本点附近选择1个露地栽培葡萄园作为对照。样本分布见表1。

2.2 数据来源

葡萄生产系统能值分析的数据主要通过2种途径获取:

1)统计数据:样本葡萄园所在地的各项自然资源数据,包括太阳辐射量、降雨量、海拔、风速、土壤性质等数据来自统计数据,主要参考中国气象局网站、中国水土保持监测网、中国水土保持生态建设

表1 葡萄生产系统能值分析调研样本分布

Table 1 Sample distribution of the emery analysis of grape cultivation system

产区 Producing regions	样本数 No. vineyards surveyed	样本点分布 Sample distribution
华北产区 North China region	99	北京(通州、房山)、天津(汉沽、武清)、河北(秦皇岛、衡水)、山西(运城)、内蒙(乌海)、山东(烟台、日照、济宁)、河南(郑州)
东北产区 Northeast region	31	辽宁(大连、沈阳)、吉林(四平)、黑龙江(哈尔滨)
南方产区 Southern region	86	上海(金山、嘉定)、江苏(无锡、南京)、浙江(宁波、湖州、金华)、安徽(合肥、芜湖)、福建(南平)、湖北(荆门)、广西(桂林、柳州)
西南产区 Southwest region	25	四川(成都、西昌)、云南(文山、玉溪)
西北产区 Northwest region	25	甘肃(武威、张掖)、新疆(鄯善、昌吉玛纳斯)

网、中国科学院南京土壤研究所的中国土壤数据库、各地政府网站公布的数据、以及相关政府部门提供的数据库。

2) 调研数据: 建造葡萄园设施的各项物质和人力的投入、葡萄生长期间的各项物质和能源投入、以及产出数据来自对样本葡萄园的跟踪调研。由葡萄园主人按照课题组事先设计好的调研问卷格式, 如实记录和填写。

2.3 数据计算与处理

考虑数据的可获得性和项目的代表性, 对占总体比例很低的项目, 如防鸟网、保险费、落叶、修剪枝条等项目予以忽略, 不纳入核算体系。

建造设施葡萄园的砖、钢材、铁、水泥、苗木等一次性投入数据, 依据实际情况、按照 20 年的平均寿命进行了折算和分摊。其他数据均是在一个完整的葡萄生长周期内, 从生产季节开始到本季生产管理活动结束记录的所有的投入和产出数据。能值计算以每 hm^2 每年葡萄园的能值投入和产出为基准, 调研年为 2012 年。

一般投入项目的太阳能值计算方法为: 太阳能值 = 原始数据 \times 太阳能值转换率。其他主要能值计算方法如下^[9, 20-21]:

$$\text{太阳能} = \text{葡萄栽培面积} \times \text{葡萄生育期内单位面积太阳平均辐射量} \times \text{太阳辐射吸收率}$$

其中, 露地栽培的太阳光吸收率设定为 1, 设施栽培的吸收率设定为 0.6

$$\text{雨水化学能} = \text{葡萄栽培面积} \times \text{平均降雨量} \times \text{水的密度} \times \text{雨水的吉布斯自由能}$$

$$\text{雨水势能} = \text{葡萄栽培面积} \times \text{平均海拔} \times \text{平均降雨量} \times \text{水的密度} \times \text{重力加速度}$$

$$\text{风能} = \text{葡萄栽培面积} \times \text{大气层厚度} \times \text{空气密度} \times \text{风速}^2 / 2$$

$$\begin{aligned} \text{表土损失} &= \text{栽培面积} \times \text{表土层损失速率} \times \\ &\text{土壤有机质含量} \times \text{单位土壤有机质所含能量} \\ \text{劳动力} &= \text{劳动力人数} \times \text{人均劳动天数} \times \\ &\text{标准能值} \times \text{劳动力太阳能值转换率} \end{aligned}$$

统计分析时, 首先计算每一个样本葡萄园的能值投入产出情况以及相应的能值指标, 然后将一类样本的计算结果进行算术平均得到该类葡萄生产系统的平均能值指标。

3 结果与分析

3.1 能值分析表

设施葡萄栽培和作为参照对象的露地葡萄栽培的能值分析结果见表 2。结果显示, 设施葡萄栽培系统的能值总投入为 $5.32 \times 10^{16} \text{ sej}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 比露地栽培高 $2.41 \times 10^{16} \text{ sej}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$, 表明设施葡萄生产系统需要消耗更多的太阳能值, 而 2 者的能值产出差异则较小。Wei 等^[20]的研究显示北京市设施桃生产系统能值总投入为 $6.29 \times 10^{15} \text{ sej}/(532.5 \text{ m}^2 \cdot \text{a})$, 这一结果显著高于本研究中设施葡萄栽培系统。王坤等研究得出番石榴、黄陂、枇杷和葡萄柚 4 种水果生产系统的能值总投入分别为 1.38×10^{16} 、 9.14×10^{15} 、 1.07×10^{16} 和 $6.83 \times 10^{15} \text{ sej}/(\text{hm}^2 \cdot \text{a})$ ^[17], 这 4 种水果生产系统的能值投入均低于设施葡萄生产系统。可见, 设施栽培比一般露地栽培的水果生产系统消耗的太阳能值更多; 而同为设施栽培模式时, 设施葡萄栽培系统的能值投入小于设施桃生产系统。

表2 设施与露地葡萄生产系统的能值分析表

Table 2 Energy accounting of protected and open-field grape cultivation systems

项目 Item	原始数据 Raw data		能值转换率 Transformity	太阳能值/(sej/(hm ² ·a)) Solar energy	
	设施栽培 Protected cultivation	露地栽培 Open-field cultivation		设施栽培 Protected cultivation	露地栽培 Open-field cultivation
	1)可更新自然资源能值投入(R) Renewable natural resource input				
太阳能 Solar energy	3.06×10 ¹³ *	5.00×10 ¹³ *	1**[9]	3.06×10 ¹³	5.00×10 ¹³
雨水化学能 Rainfall chemical energy	4.14×10 ¹⁰ *	4.17×10 ¹⁰ *	15 423**[22]	6.39×10 ¹⁴	6.435×10 ¹⁴
雨水势能 Rainfall potential energy	1.73×10 ¹⁰ *	2.19×10 ¹⁰ *	8 888**[22]	1.53×10 ¹⁴	1.95×10 ¹⁴
风能 Wind energy	4.08×10 ¹⁰ *	3.84×10 ¹⁰ *	623**[22]	2.54×10 ¹³	2.39×10 ¹³
小计 Subtotal	—	—	—	8.48×10 ¹⁴	9.12×10 ¹⁴
2)不可更新自然资源能值投入(N) Non-renewable natural resource input					
表土层损失 Top soil loss	2.69×10 ⁹ *	2.90×10 ⁹ *	6.25×10 ⁴ **[9]	1.68×10 ¹⁴	1.815×10 ¹⁴
小计 Subtotal	—	—	—	1.68×10 ¹⁴	1.815×10 ¹⁴
3)购入的可更新资源能值投入(R ₁) Purchased renewable resource input					
苗木 Grape seedlings	1.46×10 ^{3Δ}	1.61×10 ^{3Δ}	7.93×10 ^{11ΔΔ} [9]	1.16×10 ¹⁵	1.28×10 ¹⁵
有机肥 Organic manure	4.01×10 ^{7#}	3.15×10 ^{7#}	2.70×10 ^{6##} [9]	1.08×10 ¹⁴	8.51×10 ¹³
劳动力 Human labor	2.06×10 ^{10*}	1.28×10 ^{10*}	3.80×10 ^{5**} [9]	7.80×10 ¹⁵	4.86×10 ¹⁵
小计 Subtotal	—	—	—	9.06×10 ¹⁵	6.22×10 ¹⁵
4)购入的不可更新资源能值投入(F ₁) Purchased non-renewable resource input					
砖 Bricks	6.92×10 ^{6#}	0#	1.97×10 ^{9##} [20]	1.36×10 ¹⁶	0.00
钢材 Steel	1.83×10 ^{5#}	7.61×10 ^{3#}	4.13×10 ^{9##} [20]	7.58×10 ¹⁴	3.14×10 ¹³
铁 Iron	2.0×10 ^{5#}	1.74×10 ^{5#}	1.74×10 ^{9##} [23]	3.48×10 ¹⁴	3.03×10 ¹⁴
水泥 Cement	1.88×10 ^{6#}	1.73×10 ^{6#}	1.97×10 ^{9##} [20]	3.69×10 ¹⁵	3.41×10 ¹⁵
保温材料 Heat insulating material	5745 ^Δ	0 ^Δ	7.93×10 ^{11ΔΔ} [9]	4.56×10 ¹⁵	0.00
氮肥 Nitrogen fertilizer	7.64×10 ^{5#}	8.76×10 ^{5#}	4.62×10 ^{9##} [9]	3.53×10 ¹⁵	4.05×10 ¹⁵
磷肥 Phosphate fertilizer	3.83×10 ^{5#}	4.31×10 ^{5#}	1.78×10 ^{10##} [9]	6.80×10 ¹⁵	7.65×10 ¹⁵
钾肥 Potash fertilizer	8.64×10 ^{5#}	9.92×10 ^{5#}	2.96×10 ^{9##} [9]	2.57×10 ¹⁵	2.94×10 ¹⁵
农药 Pesticide	8.72×10 ^{4#}	1.37×10 ^{5#}	1.62×10 ^{9##} [9]	1.41×10 ¹⁴	2.22×10 ¹⁴
调节剂 Growth regulators	2.27×10 ^{4#}	3.18×10 ^{4#}	1.62×10 ^{9##} [9]	3.69×10 ¹³	5.15×10 ¹³
电 Electricity power	2.24×10 ^{9*}	7.92×10 ^{8*}	1.59×10 ^{5**} [9]	3.56×10 ¹⁴	1.26×10 ¹⁴
果袋 Fruit bag	523, 5 ^Δ	570 ^Δ	7.93×10 ^{11ΔΔ} [9]	4.16×10 ¹⁴	4.56×10 ¹⁴
塑料薄膜 Plastic film	7.25×10 ^{10*}	4.01×10 ^{9*}	6.60×10 ^{4**} [10]	4.79×10 ¹⁵	2.64×10 ¹⁴
农业机械 Agricultural machinery	1 245 ^Δ	1 725 ^Δ	7.93×10 ^{11ΔΔ} [9]	9.87×10 ¹⁴	1.39×10 ¹⁵
燃油 Diesel oil	7.83×10 ^{9*}	1.44×10 ^{10*}	6.60×10 ^{4**} [22]	5.18×10 ¹⁴	9.50×10 ¹⁴
小计 Subtotal	—	—	—	4.31×10 ¹⁶	2.18×10 ¹⁶
总能值投入(U) Total energy input	—	—	—	5.32×10 ¹⁶	2.91×10 ¹⁶
总能值产出(Y) Total energy output	—	—	—	5.32×10 ¹⁶	2.91×10 ¹⁶
能量产出(Y ₁) Energy output	6.15×10 ^{10*}	7.05×10 ^{10*}	—	—	—

注：右上标为*的数据单位为J/(hm²·a)；Δ,元/(hm²·a)；#,g/(hm²·a)；**,sej/J；ΔΔ,sej/元；##,sej/g。

Note: The unit of "*" is "J/(hm²·a)", "Δ" is "Yuan/(hm²·a)", "#" is "g/(hm²·a)"; "**" is "sej/J", "ΔΔ" is "sej/Yuan", "##" is "sej/g".

3.2 能值投入结构分析

设施和露地2种葡萄生产系统能值投入结构见图2。可以看出,葡萄设施栽培和露地栽培生产系统的能值投入结构呈现出一定的共性,也有一定的差异。共性是对于2种生产系统,能值投入结构中占比例最大的都是不可更新购入能值,其次是可更新购入能值,而可更新自然资源能值和不可更新自然资源能值所占的比例都很低。总体而言,2种生产系统对购入资源能值的依赖均显著强于对自然资

源能值的依赖,对不可更新资源能值的依赖均显著强于可更新资源能值的依赖。设施栽培系统的购入能值占98.09%,露地栽培略低为96.24%,相比之下自然资源能值所占的比例很低,这与已有研究结果一致^[17-18,20]。可见,在水果生产系统中,自然资源虽然是水果生产的必要条件,但是现代水果生产普遍对自然资源能值依赖较弱,而对购入性资源依赖很强,表明现代果业生产系统具有很强的人类参与和经济系统的特性。

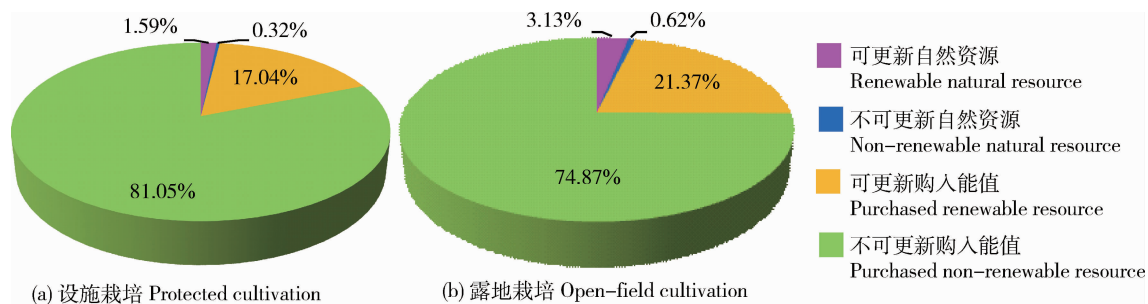


图2 不同种类能值在葡萄生产系统能值投入结构中的比例

Fig. 2 Proportions of different energy in energy input structure in two grape cultivation systems

2种葡萄栽培系统的能值结构的差异在于,设施栽培中不可更新购入资源能值的比重明显高于露地栽培,另外3种能值的比重则均低于露地栽培系统。究其原因,设施栽培中大棚覆盖材料会造成部分太阳能的损失;在相对封闭的设施栽培系统内,表土层的损失也比露地栽培减少。而设施葡萄园的设施建造需要消耗大量砖、钢材等建筑材料,同时设施栽培的集约化管理比露地栽培需要投入更多的劳动力、有机肥、塑料薄膜、保温材料等购入性的生产资料,导致对购入能值的消耗增多。

3.3 能值指标分析结果

设施和露地2种葡萄生产系统的主要能值指标评价结果见表3。可以看出,设施葡萄栽培系统的

能值转换率是 8.64×10^5 sej/J, 高于露地葡萄的 4.13×10^5 sej/J。骆世明^[22]曾经测算出我国农业生产中水果的能值转换率为 5.30×10^5 sej/J, 可见,设施葡萄的能值转换率高于我国水果平均能值转换率,而露地葡萄则略低于均值,因此设施葡萄在能值等级中的地位高于水果的平均等级,也高于露地葡萄;同时表明生产单位数量的设施葡萄需要消耗的太阳能值高于生产同等数量的水果消耗的平均能值,因而设施葡萄生产系统的生态效率较低。与意大利的葡萄种植系统($Tr = 9.72 \times 10^8$ sej/g, 折合 4.41×10^5 sej/J)^[24]相比,我国露地葡萄的能值转换率与之相当,而设施葡萄生产系统的能值转换率比意大利葡萄的更高。

表3 设施与露地葡萄生产系统的能值分析指标

Table 3 Emergy indicators for protected and open-field grape cultivation systems

能值指标 Emergy indicator	设施栽培 Protected cultivation	露地栽培 Open-field cultivation
系统能值转换率 $Tr/(sej/J)$	8.64×10^5	4.13×10^5
能值自给率 ESR	0.02	0.04
净能值产出率 EYR	1.02	1.04
能值投资率 EIR	51.33	25.63
环境负载率 ELR	4.37	3.08
可持续发展指数 ESI	0.23	0.43

设施葡萄生产系统的能值自给率为 0.02, 是露地栽培的一半。与其他研究结果^[17-18, 20, 25-26] (表 4) 相比, 设施葡萄生产系统的能值自给率也小于香蕉和葡萄柚。由于能值自给率反应的是系统自给自足

的能力和对外界的依赖程度, 因此较低的能值自给率表明设施葡萄系统对内部资源开发利用不够, 系统自给自足的能力不强, 系统发展主要依靠外部资源投入能值。

表 4 水果生产系统能值指标

Table 4 Energy indicators for fruits cultivation systems

能值指标 Emergy indicator	设施桃 Protected peach	葡萄柚 Grapefruit	苹果 Apple	香蕉 Banana	橙子 Orange
能值自给率 ESR		0.25		0.04	
净能值产出率 EYR	0.72	1.34	2.69	1.04	1.50
能值投资率 EIR		2.93	3.40		
环境负载率 ELR	0.48	2.56	4.83	10.01	43.00
可持续发展指数 ESI	1.50	0.52		0.10	0.03

设施葡萄栽培系统的能值产出率为 1.02, 略低于露地栽培。从表 4 可以看出, 与其他水果生产系统相比, 设施葡萄的能值产出率高于设施桃, 而低于其他露地水果生产。设施栽培系统的能值产出率低于露地系统, 表明设施农业生产系统的单位经济资源能值投入换取的产品能值偏低, 系统的生产效率较低, 究其原因是由于对自然资源的利用程度不高, 而购入资源能值投入过多导致。

设施与露地葡萄栽培系统的能值投资率分别为 51.33 和 25.63, 远高于苹果和葡萄柚生产 (表 4)。可见, 我国葡萄生产的能值投资率太高, 一方面表明葡萄生产系统的经济发展程度较高, 另一方面说明葡萄生产系统的外界经济投入偏多。与露地栽培相比, 我国设施葡萄生产系统的经济发展水平更高, 生产单位设施葡萄需要投入的购入性能值更多, 产品不具有价格竞争力。

设施葡萄生产系统的环境负载率高于露地栽培。相比于其他水果生产系统 (表 4), 设施葡萄的环境负载率低于苹果、香蕉、橙子, 而高于设施桃和葡萄柚。与露地栽培相比, 设施葡萄栽培系统主要依赖购入的不可更新资源能值, 比重高达 81.05%, 导致其环境压力较大, 系统自然资源进一步开发利用的潜力降低。同时, 设施葡萄生产系统也加大了对有机肥等可更新购入资源的投入, 从而对化肥、农药等不可更新购入资源的消耗有所降低, 对其环境压力有一定的改善, 因而环境负载率小于苹果、香蕉和橙子生产系统。

可持续发展指数从经济产出和环境压力 2 方面

反映系统的可持续发展能力。结合表 3 和表 4 可知, 我国设施葡萄栽培系统的可持续发展指数为 0.23, 低于露地葡萄生产系统的 0.43, 也低于设施桃和葡萄柚系统, 但高于香蕉和橙子生产系统。除设施桃之外, 其他水果生产系统的 ESI 都小于 1, 表明这些水果生产系统都为高消耗驱动的系统, 可持续发展能力有待提高。

总体看, 设施葡萄生产系统由于对购入性能值的依赖性太强, 尤其对购入的不可更新资源的消耗太多, 导致其能值自给率、能值产出率均低于露地葡萄栽培系统, 而能值投资率和环境负载率均高于露地生产系统, 因而其可持续发展能力低于露地葡萄栽培系统。与其他水果生产系统相比, 设施葡萄的可持续发展能力处于中等地位。

对于设施葡萄生产系统, 一方面要从自身入手, 充分利用自然资源, 适当简化设施结构、降低设施建造的能值投入, 发展节能低碳的保温材料 and 保温方式, 在生产管理中采用轻简化管理方式以减少劳动力消耗等, 从而改进能值自给率, 降低环境压力, 减少外界投入, 优化能值投入结构, 提高系统的可持续发展水平。另一方面, 探索新型栽培模式, 促进系统内部资源循环和反馈, 提高系统的产出也是提高系统可持续发展能力的重要途径。研究^[20]显示, 包含果树栽培、动物饲养、厕所、沼气利用的综合 (复合) 生态系统比单一生产系统的可持续更强, 果树有机栽培系统比普通栽培有利于提高系统产出, 降低环境压力, 提高可持续发展水平^[25], 这为提高设施葡萄生产系统可持续发展能力提供了有益的借鉴。

4 结 论

1)能值分析方法可以作为综合评价设施葡萄生产系统的经济效益、环境效益和可持续发展能力的有效工具,克服传统方法中无法准确衡量环境代价和综合考虑经济与生态效益的缺陷。

2)设施葡萄生产系统能值投入总量为 5.32×10^{16} sej/($\text{hm}^2 \cdot \text{a}$)。能值投入结构中占比例最大的是不可更新购入能值,系统能值消耗特点呈现为对购入能值的依赖显著强于对自然资源能值的依赖,对不可更新资源能值的依赖显著强于可更新资源能值的依赖。

3)设施葡萄与露地葡萄生产系统相比,能值投入总量多、购入性资源能值和不可更新资源能值的投入比重高,因而系统的能值自给率、能值产出率偏低,能值投资率、环境负载率高,系统的可持续发展能力降低。

4)设施栽培系统可以从降低购入性能值消耗、提高系统内部资源循环和反馈效率 2 方面优化其能值投入结构、提高可持续发展能力。

参 考 文 献

[1] 梁银丽,翟胜,陈志杰,等. 黄土高原设施农业与土壤环境效应[J]. 沈阳农业大学学报,2004,35(5):580-582

[2] 王仪焯. 大棚设施连作栽培的土壤障碍因子及其治理技术研究[D]. 福州:福建农林大学,2009

[3] Reith C C, Guidry M J. Eco-efficiency analysis of an agricultural research complex[J]. J Environ Manage, 2003, 68(3):219-229

[4] Gabzdylova B, Raffensperger F J, Castka P. Sustainability in the New Zealand wine industry: Drivers, stakeholders and practices[J]. J Clean Prod, 2009, 17:992-998

[5] Pahlavan R, Omid M, Akram A. Energy use efficiency in greenhouse tomato production in Iran[J]. Energy, 2011, 36:6714-6719

[6] Burhan O, Cemal F, Feyza C K. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production[J]. Energy, 2007, 32:1500-1504

[7] Heidari M D, Omid M. Energy use patterns and econometric models of major greenhouse vegetable productions in Iran[J]. Energy, 2011, 36:220-225

[8] Odum H T. Environmental accounting: Emergy and environmental decision making[M]. New York: Wiley, 1996

[9] 蓝盛芳, 钦佩, 陆宏芳. 生态经济系统能值分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2002

[10] 董孝斌, 高旺盛, 隋鹏, 等. 北方农牧交错带典型农户系统的能

值分析[J]. 干旱区资源与环境, 2006, 20(4):78-82

[11] Zhang L X, Yang Z F, Chen, G Q. Emergy analysis of cropping-grazing system in Inner Mongolia Autonomous Region, China [J]. Emergy Policy, 2007, 35:3843-3855

[12] Edward L, Torbjörn R. Emergy evaluation of three cropping systems in southwestern Australia[J]. Ecol Model, 2003, 161:195-211

[13] Lu Hongfang, Bai Yu, Ren Hai, et al. Integrated emergy, energy and economic evaluation of rice and vegetable production systems in alluvial paddy fields: Implications for agricultural policy in China[J]. J Environ Manage, 2010, 91:2727-2735

[14] Zhang L X, Ulgiati S, Yang Z F, et al. Emergy evaluation and economic analysis of three wetland fish farming systems in Nansi Lake area, China[J]. J Environ Manage, 2011, 92:683-694

[15] Li Linjun, Lu Hongfang, Ren Hai, et al. Emergy evaluations of three aquaculture systems on wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China[J]. Ecol Indic, 2011, 11:526-534

[16] 张小栓, 路施泽, 冯建英, 等. 基于能值分析的设施葡萄可持续性评估系统设计与实现[J]. 农业机械学报, 2013, 44(5):264-269

[17] 王坤, 陆宏芳, 谭耀文, 等. 四种岭南水果种植系统的能值、经济与土壤整合分析[J]. 生态环境学报, 2009, 18(6):2230-2236

[18] 王红红, 吴发启, 李荣标. 黄土高原沟壑区农户果业生态系统的能值分析[J]. 西北农林科技大学学报:自然科学版, 2008, 36(7):64-70

[19] HUANG Shou-bo, CHEN Zhi-yin, SHEN Chao-dong, et al. A study on climatic subdivisions for the viticulture in China[J]. J Zhejiang Univ-sc A, 2000, 26(6):670-674

[20] Wei X M, Chen B, Qu Y H, et al. Emergy analysis for 'Four in One' peach production system in Beijing [J]. Commun Nonlinear Sci, 2009, 14:946-958

[21] 王金照, 尚宗元, 王忠贤, 等. 陕北和关中农户苹果产业生态系统能值分析[J]. 林业经济, 2010(3):94-98

[22] 骆世明. 农业生态学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2001

[23] Lagerberg C, Brown M T. Improving agricultural sustainability: the case of Swedish greenhouse tomatoes[J]. J Clean Prod, 1999, 7(6):421-434

[24] Bastianoni S, Marchettini N, Panzieri M. Sustainability assessment of a farm in the Chianti area (Italy)[J]. J Clean Prod, 2001, 9:365-373

[25] Lu Hong-Fang, Kang Wen-Ling, Campbell D E, et al. Emergy and economic evaluations of four fruit production systems on reclaimed wetlands surrounding the Pearl River Estuary, China [J]. Ecol Eng, 2009, 35:1743-1757

[26] Rosa La, A D, Siracusa G, Cavallaro R. Emergy evaluation of Sicilian red orange production, A comparison between organic and conventional farming [J]. J Clean Prod, 2008, 16:1907-1914