

网络出版时间:2024-01-10 12:38 DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2024.07.010
网络出版地址:https://link.cnki.net/urlid/61.1390.S.20240109.1707.002

甘肃温室葡萄生产的能量利用与碳足迹研究

李银科^{1a,1b}, 王耀琳^{1a,1b}, 刘开琳^{1a,1b}, 孙涛^{1a,1b}, 李硕², 杨彦军³

(1 甘肃省治沙研究所 a 甘肃省荒漠化与风沙灾害防治重点实验室-省部共建国家重点实验室培育基地,

b 甘肃民勤荒漠草地生态系统国家野外科学观测研究站,甘肃兰州 730070;

2 永登县农业技术推广中心,甘肃永登 730300;3 武威市威龙有机葡萄种植有限公司,甘肃武威 733099)

【摘要】【目的】探明甘肃温室葡萄生产的能量投入和碳足迹构成,识别主要的碳排放贡献因子,为温室葡萄清洁生产提供依据。【方法】以甘肃温室葡萄为研究对象,将温室葡萄栽培区分为兰州市永登县及武威市凉州区、古浪县、天祝县华藏寺镇和天祝县哈溪镇 5 个不同海拔区域,通过农户调查获得 2019 年葡萄生产数据,核算温室葡萄生产各环节的能量输入、能量输出和碳排放,对比分析不同海拔区域温室葡萄生产的能量利用效率、能量生产率、净能量、比能和碳足迹。【结果】甘肃温室葡萄生产的能量输入为 273 862~434 421 MJ/hm²,能量输出为 170 723~327 962 MJ/hm²,葡萄产量为 14 460~27 793 kg/hm²,属于高投入高产型。甘肃温室葡萄生产的能量利用效率为 0.45~1.13,能量生产率为 0.038~0.096 kg/MJ,净能量为-263 798~2 496 MJ/hm²,比能为 13.51~44.85 MJ/kg;直接能量投入和可再生能量投入占比低,间接能量投入和不可再生能量投入占比高。单位面积碳足迹和单位产量碳足迹分别为 32 959~55 075 kg/hm² 和 1.59~5.70 kg/kg,碳足迹很大程度上来源于氮肥的投入,其占比达 45.5%~62.4%。不同区域相比,天祝县哈溪镇温室葡萄生产的能量输入低,能量输出和产量较高,能量利用效率和能量生产率也较高,净能量最大且为正值,比能最小,单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均最小;天祝县华藏寺镇能量利用指标最差,碳足迹最大。【结论】甘肃温室葡萄生产的能量利用效率较低,碳足迹较高,能量利用效率的提高和碳足迹的降低空间均较大。因此应采取降低氮肥使用量、优化氮肥与有机肥配比等科学合理的管理措施,提高甘肃温室葡萄生产的能量利用效率,降低碳足迹,改善其环境效应。

【关键词】 温室葡萄;能量利用效率;碳足迹;甘肃省

【中图分类号】 S663.1;S628

【文献标志码】 A

【文章编号】 1671-9387(2024)07-0089-10

Energy use and carbon footprint of greenhouse grape production in Gansu

LI Yinke^{1a,1b}, WANG Yaolin^{1a,1b}, LIU Kailin^{1a,1b}, SUN Tao^{1a,1b}, LI Shuo², YANG Yanjun³

(1 a State Key Laboratory Breeding Base of Desertification and Aeolian Sand Disaster Combating, b Gansu Minqin National Studies Station for Desert Steppe Ecosystem, Gansu Desert Control Research Institute, Lanzhou, Gansu 730070, China;

2 Agricultural Extension Center of Yongdeng County, Yongdeng, Gansu 730300, China;

3 Wuwei City Weilong Organic Grape Planting Co., LTD, Wuwei, Gansu 733099, China)

Abstract: 【Objective】 This study investigated energy input and carbon footprint composition of greenhouse grape production in Gansu and identified main contribution factors of carbon emission to provide basis for clean production of greenhouse grapes. 【Method】 The greenhouse grape cultivation region in Gansu was divided into five regions with different altitudes including Yongdeng County, Lanzhou, Liangzhou District, Wuwei, Gulang County, Huazangsi Town, Tianzhu County and Haxi Town, Tianzhu County. The data

【收稿日期】 2023-05-09

【基金项目】 甘肃省省级财政林业改革发展资金-甘肃省林业和草原局科技创新项目“甘肃葡萄产业碳足迹评价”;国家自然科学基金项目“绿洲防护带植被变化对土壤水分的响应”(31960334)

【作者简介】 李银科(1982-),男,甘肃徽县人,研究员,硕士,主要从事荒漠化防治研究。E-mail:lyk819@163.com

【通信作者】 王耀琳(1965-),男,甘肃秦安人,研究员,博士,主要从事碳循环与农业碳减排研究。E-mail:wangylgs@126.com

of grape production in 2019 were obtained through farmer household survey. The energy input, energy output and carbon emission of each link in greenhouse grape production were calculated, and energy use efficiency, energy productivity, net energy, specific energy and carbon footprint of greenhouse grape production in regions at different altitudes were compared and analyzed. **【Result】** The energy input of greenhouse grape production was 273 862–434 421 MJ/hm², energy output was 170 723–327 962 MJ/hm², and grape yield was 14 460–27 793 kg/hm². Thus, the grapes in Gansu belonged to high input and high output types. The energy use efficiency of greenhouse grape production was 0.45–1.13, energy productivity was 0.038–0.096 kg/MJ, net energy was –263 798–2 496 MJ/hm², and specific energy was 13.51–44.85 MJ/kg. The proportions of direct energy input and renewable energy input were low, while the proportions of indirect energy input non-renewable energy input were high. Carbon footprint per unit area and carbon footprint per unit yield were 32 959–55 075 kg/hm² and 1.59–5.70 kg/kg, respectively. Carbon footprint was largely from nitrogen fertilizer input with proportion of 45.5%–62.4%. Comparison of different regions showed that Haxi Town, Tianzhu County had the best indexes of low energy input, high energy output, yield, energy use efficiency and energy productivity, the highest and positive net energy, the minimum specific energy, carbon footprint per unit area and carbon footprint per unit yield. Huazangsi Town, Tianzhu County had the worst energy use indexes and the largest carbon footprint. **【Conclusion】** Greenhouse grape production in Gansu had low energy use efficiency and higher carbon footprint, with large spaces for improvement. It is suggested to apply scientific and reasonable management measures such as reducing nitrogen fertilizer usage and optimizing the ratios of nitrogen fertilizer and organic fertilizer, so as to improve energy use efficiency, reduce carbon footprint and improve environmental effects for greenhouse grape production in Gansu.

Key words: greenhouse grape; energy use efficiency; carbon footprint; Gansu province

气候变化作为重大全球性问题,会对人类的生产生活造成影响。农业现代化发展取得了令人瞩目的成就,然而现代农业具有资源消耗高、污染排放大、物质和能量利用效率低等特点^[1]。中国作为世界上一个重要的农业大国,作物生产对碳排放的影响不可忽视。近年来,碳足迹作为一个新的研究方法,成为气候变化领域新的研究热点^[2]。农业是重要的温室气体排放源,农业生产的碳排放量占全国碳排放总量的 17%,在“碳达峰”“碳中和”压力下,如何降低能耗、降低碳排放,实现绿色、可持续生产,是亟需解决的一个重要问题^[3]。农作物碳足迹可以理解为农作物生产过程中,各项农田管理活动直接和间接的温室气体排放总量^[4],因此,农业生产领域缓解温室气体排放的减排潜力在于改善作物生产的田间管理。碳足迹分析是对温室气体排放过程的量测,包括温室气体的来源、构成和数量,作物生产碳足迹的计量分析有助于农业温室气体减排关键技术和措施的选择与确立^[5]。

碳足迹已经被广泛应用于全球范围内与作物生产相关的碳投入的量化评价。目前,国内对农业生产碳足迹、碳排放的相关研究不断增加,关于小

麦^[6]、水稻^[7]、玉米^[8]等主要粮食作物的碳足迹已有较多研究,对蔬菜^[9]、苹果^[10]生产的碳足迹也开展了一些研究,而葡萄生产的碳足迹研究才刚刚起步。马婷^[11]估算了干旱区葡萄生产系统的碳足迹,朱宗文等^[12]核算了山东蓬莱地区极简生态模式下酿酒葡萄园的碳足迹,Wang 等^[13]研究了甘肃酿酒葡萄有机和传统栽培模式的环境影响,这些研究核算了不同葡萄生产模式下的碳足迹,并明确了其主要的碳排放来源。甘肃温室葡萄生产主要集中在河西走廊东端的武威市凉州区、古浪县、天祝县和兰州市永登县等地区。2004 年前后,温室葡萄开始在海拔低于 2 000 m 的永登地区种植,随后逐步辐射到武威地区,在当地技术人员的努力下,温室葡萄在海拔高于 2 000 m 的天祝县种植成功。那么,随着海拔高度的增加,种植葡萄的能量投入会否增加,甘肃温室葡萄生产的能量利用和碳足迹情况如何,这些均不清楚。为实现温室葡萄绿色生产,提高能量利用效率,促进减排,保护环境,本研究开展了甘肃省不同区域温室葡萄生产系统的能量利用和碳排放研究,以为温室葡萄的可持续生产提供依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

研究区位于武威市凉州区、古浪县、天祝县及兰州市永登县,属于典型的大陆性气候,海拔 1 500~4 800 m,降水量 180~405 mm,但蒸发量在 1 500~2 000 mm,气候干旱,水资源短缺。年平均气温 0~7.1 °C,无霜期 86~147 d,气候温凉,热量资源丰富,昼夜温差大,且夏季大于冬季,能很好地满足喜温喜凉作物生长发育的需求,有利于作物光合作用的进行和含糖量的积累,大大提高了农作物的产量和品质。温室葡萄品种为鲜食葡萄红提,生产以户为单位,有的农户参加合作社。永登县最早种植温室葡萄,由近及远辐射至天祝县华藏寺镇、天祝县哈溪镇、古浪县和凉州区,这 5 个区域温室葡萄的平均树龄分别为 11.4,9.8,9.1,8.4 和 7.7 a。

1.2 研究方法

2020 年 9—10 月,通过农户调查获得 2019 年葡萄生产数据。采取分层抽样法^[14]确定调查量:

表 1 甘肃省不同海拔区域温室葡萄调查样本数

Table 1 Numbers of greenhouse grape investigation samples in different altitude regions of Gansu

调查区域 Investigate region	海拔/m Altitude	调查样本数/户 Investigation samples
凉州区 Liangzhou District	1 500	32
古浪县 Gulang County	1 800	45
永登县 Yongdeng County	2 100	51
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town, Tianzhu County	2 200	39
天祝县哈溪镇 Haxi Town, Tianzhu County	2 400	34

温室葡萄生产系统中,葡萄果实所蕴含的能量为能量输出,能量输入则包括生产管理活动中投入的人力,以及生产化肥、有机肥、农药、地膜、纸袋、电力、机械、燃油、钢材、水泥、棚膜、塑料管、塑料绳等生产资料和抽取灌溉水所消耗的能量总和。按照不同的标准,可将能量输入分为直接能量、间接能量或可再生能源和不可再生能源。直接能量(田地里消耗的能量)包括人力、灌溉水、电力、燃油,间接能量(生产化肥、农药、钢材、水泥、塑料、旋耕机等物质资料生产过程中消耗的能量)包括化肥、有机肥、农药、地膜、纸袋、机械、钢材、水泥、棚膜、塑料管、塑料绳等;可再生能源包括人力、灌溉水、有机肥、纸袋,不可再生能源包括化肥、农药、电力、机械、燃油、钢材、水泥、棚膜、塑料管、塑料绳等。

碳足迹是温室葡萄生产中所投入的各类物质资料生产过程中的碳排放,以及田间碳排放(只涉及氮肥和有机肥排放的 N₂O)的总和。碳排放以 CO₂ 当量表示,CO₂、CO、CH₄ 和 N₂O 的当量系数分别为

$$n = N \times S^2 \times t^2 / ((N-1)d^2 + S^2 \times t^2)。$$

式中: n 为抽取的样本数, N 为生产的总户数, S 为标准差, d 为误差限(5%), t 为可靠性系数(取 1.96,对应 95%的可靠性)。

调查温室葡萄生产情况时,咨询当地林业部门和种植户确定温室鲜食葡萄集中种植区,按不同海拔分为 5 个区域,分别为凉州区谢河镇叶家村、古城镇绿通丰禾种植农民专业合作社、柏树镇智信达农业开发有限公司,古浪县泗水镇泗水村、铁门村、唐庄村、上四坝村,永登县柳树镇韩家井村、清水村、康家井村与城关镇满城村,天祝县华藏寺镇南山村及哈溪镇古城村、友爱村。以户为单位,1 户为 1 个调查样本,不同调查区域海拔和调查样本数如表 1。调查内容包括葡萄生产过程中的投入和产出情况:①产量;②肥料、农药、地膜、纸袋等农资投入;③人力、灌溉水、电力、机械等能耗;④温室建设材料投入及能耗。以此为基础,核算 2019 年葡萄生产过程(从葡萄发芽开始到葡萄收获)的能量投入和温室气体排放。

1,2,21 和 298^[13],所有投入物的能量和碳排放参数均源于已发表的文献,分别以能量当量和 CO₂ 当量表示,具体见表 2。

钢铁、水泥、塑料管与塑料绳、棚膜、地膜等生产资料的使用寿命分别为 20,20,10,3 和 1 a。运用能量利用效率、能量生产率、净能量和比能等指标对温室葡萄的能量利用进行评价^[15],分别用单位面积排放和单位产量排放对碳足迹进行评价,各指标计算公式如下:

$$\text{能量利用效率} = \text{能量输出 (MJ/hm}^2\text{)} / \text{能量输入 (MJ/hm}^2\text{)};$$

$$\text{能量生产率} = \text{产量 (kg/hm}^2\text{)} / \text{能量输入 (MJ/hm}^2\text{)};$$

$$\text{净能量} = \text{能量输出 (MJ/hm}^2\text{)} - \text{能量输入 (MJ/hm}^2\text{)};$$

$$\text{比能} = \text{能量输入 (MJ/hm}^2\text{)} / \text{产量 (kg/hm}^2\text{)};$$

$$\text{单位面积碳足迹} = \text{碳排放总量 (kg)} / \text{面积 (hm}^2\text{)};$$

单位产量碳足迹=碳排放总量(kg)/产量(kg)。

表 2 温室葡萄生产中投入和产出的能量当量及投入物的碳排放参数

Table 2 Energy equivalents of inputs and outputs and carbon emission parameters of inputs in greenhouse grape production

投入 Input	能量当量 Energy equivalent	碳排放(CO ₂ 当量) Carbon emission (CO ₂ -eq)	参考文献 Reference
氮肥(N)Nitrogen	92.024 MJ/kg	10.605 kg/kg	[16]
磷肥(P ₂ O ₅)Phosphate	20.958 MJ/kg	1.504 kg/kg	[16]
钾肥(K ₂ O)Potassium	13.13 MJ/kg	0.984 kg/kg	[16]
钙肥(Ca)Calcium	8.8 MJ/kg	—	[17]
硫肥(S)Sulphurous	1.12 MJ/kg	—	[18]
微量元素肥 Microelement	120 MJ/kg	—	[19]
有机肥 Organic manure	0.297 MJ/kg	0.013 61 kg/kg	[10]
农田 Farmland (N ₂ O)		N×1.25%×298 kg/kg	[20]
农药 Pesticide	240 MJ/kg	18 kg/kg	[16]
旋耕机 Rotavator	21 MJ/(kg·a)	0.21 kg/(kg·a)	[21]
柴油 Diesel	6.65 MJ/kg	3.933 kg/kg	[16]
灌溉水 Irrigation water	1.02 MJ/m ³	—	[18]
电力 Electricity	11.7 MJ/(k·Wh)	1.922 54 kg/kg	[22]
塑料管绳 Plastic pipe and rope	3.23 MJ/(kg·a)	0.009 64 kg/(kg·a)	[23]
地膜 Mulch film	32.3 MJ/(kg·a)	0.096 35 kg/(kg·a)	[23]
棚膜 Greenhouse film	10.767 MJ/(kg·a)	0.321 2 kg/(kg·a)	[23]
钢材 Steel	1.174 32 MJ/(kg·a)	0.118 54 kg/(kg·a)	[24]
水泥 Cement	0.159 MJ/(kg·a)	0.041 43 kg/(kg·a)	[25]
纸袋 Paper bag	46.6 MJ/kg	1.69 kg/kg	[21]
人力 Human forces	1.96 MJ/h	—	[26]
葡萄 Grape	11.80 MJ/kg	—	[26]

注:表中“—”表示无数据,空白表示无此项。农田 N₂O 包括氮肥和有机肥的排放,其中 N 为总施氮量。

Note:In the table,“—” means no data,and blank means no such item. Farmland N₂O including emission of both nitrogen and organic fertilizers,N means total amount of nitrogen application.

1.3 数据分析

采用 SPSS 13.0 统计分析软件,分别以不同区域为变量因素对能量利用指标和碳足迹进行单因素方差分析,用最小显著性差异(LSD)法($P < 0.05$)进行处理间差异显著性比较。

2 结果与分析

2.1 温室葡萄生产的能量输入输出分析

表 3 显示,甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产的能量输入为 273 862~434 421 MJ/hm²,其中以天祝县华藏寺镇最大,古浪县、凉州区与天祝县华藏寺镇之间无显著差异,但均显著大于永登县,天祝县哈溪镇与永登县之间无显著差异。甘肃省 5 个

不同海拔区域温室葡萄生产的能量输出为 170 723~327 962 MJ/hm²,以武威市凉州区最大,天祝县华藏寺镇最小,古浪县、天祝县哈溪镇与凉州区之间无显著差异,永登县与天祝县华藏寺镇无显著差异。5 个不同区域温室葡萄产量为 144 60~27 793 kg/hm²,以凉州区最大,其与古浪县、天祝县哈溪镇之间无显著差异,以天祝县华藏寺镇最小,永登县与天祝县华藏寺镇无显著差异。凉州区和古浪县能量投入高,能量输出和产量也较高;天祝县华藏寺镇能量投入很高,但能量输出和产量最低,说明该区域温室葡萄生产模式最不合理;天祝县哈溪镇能量投入低,而能量输出和产量较高,提示其生产管理比较合理。

表 3 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产的能量输入、能量输出及产量的比较

Table 3 Comparison of energy input,energy output and yield of greenhouse grape production in different altitude regions of Gansu

区域 Region	能量输入/(MJ·hm ⁻²) Energy input	能量输出/(MJ·hm ⁻²) Energy output	产量/(kg·hm ⁻²) Yield
凉州区 Liangzhou District	362 922±274 523 ab	327 962±174 145 a	27 793±14 758 a
古浪县 Gulang County	398 623±170 014 a	323 484±140 355 a	27 414±11 895 a
永登县 Yongdeng County	273 862±139 080 c	206 755±85 852 b	17 522±7 276 b
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town,Tianzhu County	434 421±161 731 a	170 723±95 395 b	14 460±8 084 b
天祝县哈溪镇 Haxi Town,Tianzhu County	279 985±82 411 bc	282 481±85 131 a	23 939±7 214 a

注:表中数据后标不同小写字母表示不同海拔区域间差异显著($P < 0.05$)。下表同。

Note:Different lowercase letters after the data in the table indicate significant differences between different altitudes ($P < 0.05$). The same below.

2.2 温室葡萄生产的能量指标分析

甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产的能量利用效率、能量生产率、净能量和比能见表 4。由表 4 可见,5 个不同区域温室葡萄生产的能量利用效率为 0.45~1.13,能量生产率为 0.038~0.096 kg/MJ,不同区域能量利用效率和能量生产率的差异性表现一致,均为凉州区最大,与古浪县、永登县和天祝县哈溪镇之间差异不显著,但均显著大于天祝县华藏寺镇。不同海拔区域温室葡萄生产的净能

量为-263 798~2 496 MJ/hm²,只有天祝县哈溪镇为正值,其他区域均为负值,凉州区、古浪县、永登县和天祝县哈溪镇之间差异不显著,但均显著大于天祝县华藏寺镇。不同区域温室葡萄生产的比能为 13.51~44.85 MJ/kg,其中以天祝县华藏寺镇最大,且显著大于其他 4 个区域,而其他 4 个区域之间差异不显著,天祝县哈溪镇最小。以上结果说明,天祝县哈溪镇能量利用相对最优,天祝县华藏寺镇相对较差。

表 4 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产的能量利用效率、能量生产率、净能量和比能的比较

Table 4 Comparison of energy use efficiency, energy productivity, net energy and specific energy of greenhouse grape production in different altitude regions of Gansu

区域 Region	能量利用效率 Energy use efficiency	能量生产率/(kg·MJ ⁻¹) Energy productivity	净能量/(MJ·hm ⁻²) Net energy	比能/(MJ·kg ⁻¹) Specific energy
凉州区 Liangzhou District	1.13±0.64 a	0.096±0.055 a	-34 960±342 171 a	17.64±20.58 b
古浪县 Gulang County	0.95±0.56 a	0.080±0.047 a	-75 140±221 249 a	17.32±10.62 b
永登县 Yongdeng County	0.93±0.60 a	0.079±0.051 a	-67 106±165 223 a	18.61±11.88 b
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town, Tianzhu County	0.45±0.29 b	0.038±0.025 b	-263 798±200 279 b	44.85±37.35 a
天祝县哈溪镇 Haxi Town, Tianzhu County	1.10±0.48 a	0.094±0.041 a	2 496±129 165 a	13.51±8.30 b

甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产投入的直接能量、间接能量及其在投入总能量中的占比见表 5。表 5 表明,不同区域温室葡萄生产投入的直接能量为 15 339~61 695 MJ/hm²,其中以古浪县最大,且显著大于其他 4 个区域,其他 4 个区域之间差异不显著,永登县投入的直接能量最小。不同区域温室葡萄生产投入的直接能量占比均较小,在 5.11%~13.19%,其中以凉州区最大,与古浪县、天祝县哈溪镇之间无显著差异,永登县最小,天祝县华藏寺镇与永登县差异不显著,天祝县华藏寺镇与哈溪镇差异也不显著。不同区域温室葡萄生产投入的

间接能量为 253 328~404 060 MJ/hm²,以天祝县华藏寺镇最大,天祝县哈溪镇最小,古浪县与天祝县华藏寺镇之间无显著差异,凉州区、永登县和天祝县哈溪镇之间无显著差异,凉州区与古浪县之间也无显著差异。不同区域温室葡萄生产的间接能量投入占比均较大,在 85.56%~93.92%,其中以永登县最大,古浪县最小,天祝县华藏寺镇与永登县无显著差异,凉州区、天祝县哈溪镇与古浪县之间无显著差异,天祝县华藏寺镇与哈溪镇也无显著差异。总之,研究区温室葡萄生产的直接能量投入少,间接能量投入多,这与化肥、农药等农资的高投入有关。

表 5 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产投入的直接能量、间接能量及其占比的比较

Table 5 Comparison of direct energy, indirect energy and their proportion of input of greenhouse grape production in different altitude regions of Gansu

区域 Region	直接能量/(MJ·hm ⁻²) Direct energy	直接能量占比/% Proportion of direct energy	间接能量/ (MJ·hm ⁻²) Indirect energy	间接能量占比/% Proportion of indirect energy
凉州区 Liangzhou District	37 800±24 236 b	13.19±10.40 a	325 122±278 121 bc	86.81±10.40 c
古浪县 Gulang County	61 695±100 966 a	12.84±16.81 a	336 928±135 045 ab	85.56±16.81 c
永登县 Yongdeng County	15 339±26 225 b	5.11±6.32 c	258 522±130 654 c	93.92±6.32 a
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town, Tianzhu County	30 361±11 805 b	7.42±2.45 bc	404 060±156 638 a	91.43±2.45 ab
天祝县哈溪镇 Haxi Town, Tianzhu County	26 657±7 248 b	9.99±3.16 ab	253 328±79 631 c	87.70±3.16 bc

甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产投入的可再生能源、不可再生能源及其在投入总能量中的占比如表 6 所示。由表 6 可见,不同区域温室葡萄投入的可再生能源为 22 074~47 789 MJ/hm²,其中以凉州区最大,凉州区、古浪县和天祝县华藏寺镇

互相之间无显著差异;天祝县哈溪镇投入的可再生能源最小,但与永登县、天祝县华藏寺镇之间无显著差异。不同区域温室葡萄生产的可再生能源在投入总能量中的占比均较小,在 8.13%~15.84%,其中凉州区最大且显著大于其他区域,古浪县次之,天祝

县华藏寺镇与古浪县之间无显著差异,天祝县哈溪镇可再生能量投入的占比最小,但与永登县、天祝县华藏寺镇之间无显著差异。不同区域葡萄生产投入的不可再生能量为 246 327~396 768 MJ/hm²,以天祝县华藏寺镇最多,其次为古浪县,二者之间无显著差异;永登县投入的不可再生能量最少,其与凉州区、天祝县哈溪镇之间差异不显著。不同区域葡萄

生产中不可再生能量占投入总能量的比例均较大,在 84.16%~91.86%,其中以天祝县哈溪镇最大,但与永登县、天祝县华藏寺镇之间无显著差异,凉州区最小且显著小于其他区域。研究区温室葡萄生产的可再生能量投入很少,不可再生能量投入较多,这与化肥、农药、温棚材料等的投入高有关,且容易造成环境污染。

表 6 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产投入的可再生能量、不可再生能量及其占比的比较

Table 6 Comparison of renewable energy, non-renewable energy and their proportion of input of greenhouse grape production in different altitude regions of Gansu

区域 Region	可再生能量/(MJ·hm ⁻²) Renewable energy	可再生能量占比/% Proportion of renewable energy	不可再生能量/ (MJ·hm ⁻²) non-renewable energy	不可再生能量占比/% Proportion of non- renewable energy
凉州区 Liangzhou District	47 789±17 262 a	15.84±7.23 a	315 134±273 369 bc	84.16±7.23 c
古浪县 Gulang County	43 877±18 245 a	12.01±4.87 b	354 746±165 905 ab	87.99±4.87 b
永登县 Yongdeng County	27 535±67 388 b	8.77±9.01 c	246 327±116 848 c	91.23±9.01 a
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town, Tianzhu County	37 653±13 531 ab	9.47±3.85 bc	396 768±159 367 a	90.53±3.85 ab
天祝县哈溪镇 Haxi Town, Tianzhu County	22 074±13 262 b	8.13±4.62 c	257 911±79 378 c	91.86±4.62 a

2.3 温室葡萄生产的碳足迹

由表 7 可以看出,甘肃省 5 个不同海拔区域之间温室葡萄生产的碳足迹存在一定差异。5 个不同区域单位面积碳足迹为 32 959~55 075 kg/hm²,其中以天祝县华藏寺镇最大,与古浪县无显著差异,但均显著大于其他 3 个区域,天祝县哈溪镇单位面积碳足迹最小,与凉州区、永登县之间无显著差异,而

凉州区和古浪县也无显著差异。不同区域单位产量碳足迹为 1.59~5.70 kg/kg,也以天祝县华藏寺镇最大,且显著大于其他 4 个区域,而其他 4 个区域之间无显著差异,单位产量碳足迹最小的区域也出现在天祝县哈溪镇,这表明天祝县华藏寺镇温室葡萄生产的碳足迹最大,其环境效应最差,哈溪镇碳足迹最小,对环境的影响最小。

表 7 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产碳足迹的比较

Table 7 Comparison of carbon footprint of greenhouse grape production in different altitude regions of Gansu

区域 Region	单位面积碳足迹/(kg·hm ⁻²) Carbon footprint per unit area	单位产量碳足迹/(kg·kg ⁻¹) Carbon footprint per unit yield
凉州区 Liangzhou District	43 323±28 907 bc	2.08±2.18 b
古浪县 Gulang County	51 181±24 520 ab	2.23±1.48 b
永登县 Yongdeng County	36 786±30 516 c	2.47±2.07 b
天祝县华藏寺镇 Huazangsi Town, Tianzhu County	55 075±21 925 a	5.70±4.96 a
天祝县哈溪镇 Haxi Town, Tianzhu County	32 959±11 617 c	1.59±1.00 b

图 1 表明,研究区温室葡萄生产系统碳足迹主要来源于大量的农资投入和温室大棚建设的投入,其中氮肥、有机肥、磷肥、电力和温室大棚材料等方面的投入是碳足迹的主要贡献源。葡萄生产碳足迹最大的贡献源是氮肥,不同区域中以凉州区氮肥的碳足迹贡献最小,为 45.5%,其他 4 个区域氮肥的碳足迹贡献均超过 50%,天祝县华藏寺镇达到了 62.4%。可见,减少氮肥的使用量能大幅降低温室葡萄生产系统的碳足迹。不同区域碳足迹贡献中居第二位的是有机肥,且不同区域之间差异不大,其占比在 12.9%~19.6%。温室大棚建设材料、电力、磷肥等的碳足迹贡献依次居第 3~5 位,其中温室大

棚建设材料的碳足迹贡献占比以凉州区较大,为 18.2%,原因是该区两家企业的温室大棚为全钢结构,钢材用量占比大,其他区域温室大棚建设材料的碳足迹占比在 5.8%~9.1%;电力碳足迹占比以古浪县较大,为 14.7%,其他区域为 3.7%~9.3%;不同区域磷肥碳足迹差异不大,在 5.9%~7.5%。农药碳足迹占比较小,5 个不同区域中以天祝县华藏寺镇和哈溪镇较大,其占比为 3.2%和 5.1%;钾肥的碳足迹占比也较小,其值为 1.4%~2.2%。所有区域纸袋、塑料管、塑料绳、地膜、机械和柴油的碳足迹均很小,其总和占比也均在 1%以下。

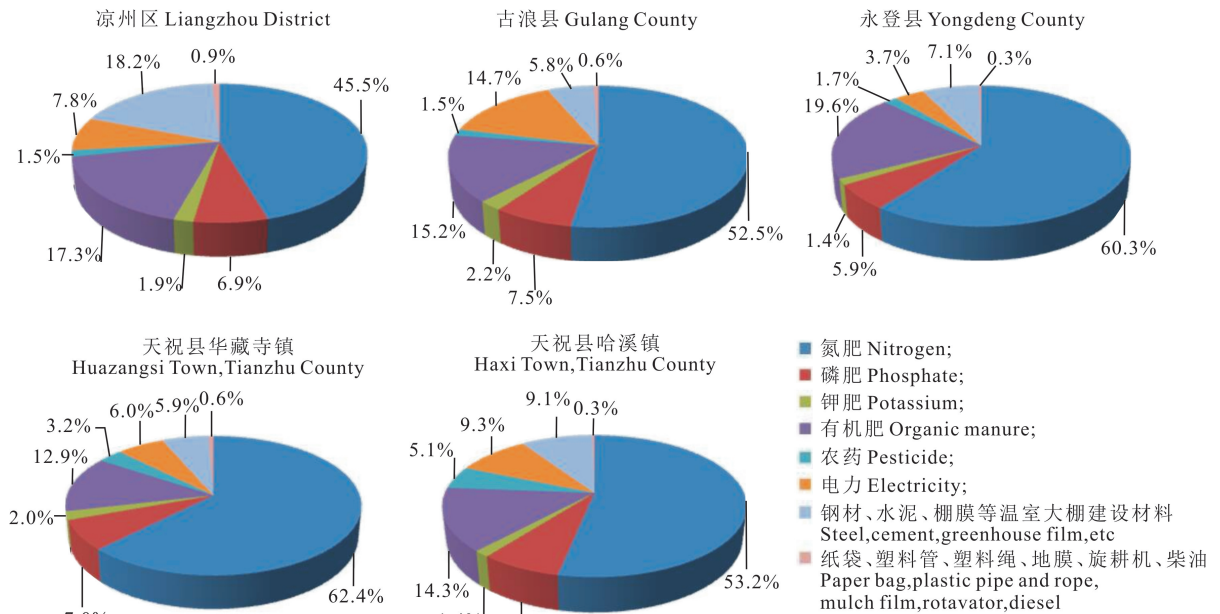


图 1 甘肃省不同海拔区域温室葡萄生产过程碳足迹来源分析

Fig. 1 Analysis of carbon footprint sources of greenhouse grape production process in different altitude regions of Gansu

3 讨论

本研究表明,随着海拔高度的增加,甘肃省 5 个不同区域温室葡萄生产系统的能量投入并未呈现出明显的变化规律。这可能是由于随着海拔的升高,热量相应减少,温室葡萄生产所需的最小能量投入可能与海拔的升高呈正相关,但是实际生产中的能量投入普遍大于或远大于实际所需,而能量投入与当地的施肥习惯有很大关系,所以实际的能量投入与海拔的升高无直接关系。

本研究显示,甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产的能量输入为 273 862~434 421 MJ/hm²,能量输出为 170 723~327 962 MJ/hm²,产量为 14 460~27 793 kg/hm²,属于高投入高产出型。有研究表明,土耳其温室葡萄生产的能量输入为 24 513.0 MJ/hm²,能量输出为 73 396.0 MJ/hm²,产量为 6 220 kg/hm²[26],属于低投入低产出型。本研究的能量输入是土耳其的 11.2~17.7 倍,而能量输出是土耳其的 2.3~4.5 倍,表明甘肃温室葡萄生产的能量利用效率低下,需要降低投入以提高能量利用效率。

土耳其温室葡萄生产的能量利用效率为 2.99^[26],温室有机梨为 0.09^[27],枸杞为 0.52^[15],水稻为 3.13^[28],伊朗葡萄为 5.47^[29]。本研究表明,甘肃省 5 个不同海拔区域温室葡萄生产的能量利用效

率为 0.45~1.13,进一步说明本研究区能量利用效率较低,即使是能量利用效率相对较高的凉州区(1.13)和天祝县哈溪镇(1.10)也有较大的提升空间,最低的天祝县华藏寺镇(0.45)更需要提高。甘肃温室葡萄生产的能量生产率为 0.038~0.096 kg/MJ,与温室有机梨的 0.042 kg/MJ^[27]相当,比枸杞的 0.014 kg/MJ^[15]高,比中国贵州水稻的 0.21 kg/MJ^[28]和伊朗葡萄的 0.46 kg/MJ^[29]低很多,还有较大的提升空间。本研究中,温室葡萄生产的净能量只有天祝县哈溪镇为正值,其他区域均为负值,负值意味着温室葡萄生产过程中存在能量损失,能量利用效率低下。净能量为负值同样出现在温室有机梨^[27]、枸杞^[15]等生产系统中,土耳其温室葡萄^[26]、伊朗葡萄^[29]和中国贵州水稻^[28]生产系统的净能量则为正值。比能是指生产单位质量产品需要的能量,研究区温室葡萄生产的比能为 13.51~44.85 MJ/kg,远高于土耳其温室葡萄的 3.94 MJ/kg^[26]、伊朗葡萄的 2.17 MJ/kg^[29]和中国贵州水稻的 4.83 MJ/kg^[28],与温室有机梨的 24 MJ/kg^[27]相当,低于枸杞的 71.51 MJ/kg^[15]。研究区温室葡萄生产比能有很大的降低空间,尤其是比能很高的天祝县华藏寺镇。不同区域中,天祝县哈溪镇温室葡萄生产的能量利用效率和能量生产率均较大,净能量最大且为正值,而比能最小,说明哈溪镇葡萄生产的能量利用效率较高,管理较为合理。

研究区温室葡萄生产系统的直接能量投入相对较少,其占比在 5.11%~13.19%,而间接能量投入很高,其占比在 85.56%~93.92%,这与枸杞生产的直接能量投入占比(79.86%)和间接能量投入占比(20.14%)^[15]相反。原因是枸杞生产区位于黄河提灌区,土壤存在次生盐渍化,生产中需要大量灌水洗盐而增大了电力的投入。本研究中化肥投入占比很大,所以间接能量投入很高。不同区域中,古浪县直接能量投入最多且占比较大,相应地间接能量投入占比最小,永登县直接能量投入占比最小而间接能量投入占比最大。可再生能量投入相对较少,其占比在 8.13%~15.84%,而不可再生能量投入很高,其占比在 84.16%~91.86%,这与枸杞生产的可再生能量占比(11.48%)和不可再生能量占比(88.52%)^[15]相似。不同区域中,凉州区可再生能量占比较大,相应地不可再生能量占比较小,天祝县哈溪镇可再生能量占比较小而不可再生能量占比较大。不可再生能量和间接能量投入占比均很大,意味着化肥、农药等物资的投入量大,会造成环境污染和资源过度消耗。

据报道,枸杞碳足迹为 26 018.64 kg/hm²^[15],水稻为 5 536.30 kg/hm²^[28],8 种露天无公害蔬菜为 539.7~4 810.4 kg/hm²^[30],冬小麦-夏玉米种植模式为 1 737.37 kg/hm²^[31];温室葡萄单位产量碳足迹为 1.59~5.70 kg/kg,棉花为 1.04 kg/kg^[32]。本研究中,温室葡萄生产的单位面积碳足迹为 32 959~55 075 kg/hm²,这表明研究区温室葡萄生产的碳足迹很高,需要大幅减低碳足迹。不同区域中,不论是单位面积碳足迹还是单位产量碳足迹,均以天祝县华藏寺镇最大,天祝县哈溪镇最小。

2015 年中国粮食作物的化肥和农药利用率分别为 35.2% 和 36.6%^[33],生产中常因利用率低而增大了用量。为此,农业部提出要减少化肥和农药使用量。有研究表明,通过化肥减量、有机肥替代化肥氮等优化模式可有效提升能量利用效率,降低碳足迹^[28,34-35]。本研究中,温室葡萄生产的碳足迹很大程度上来源于氮肥的投入,其占比达 45.5%~62.4%,这与其他研究结果^[36]相近。甘肃温室葡萄生产中施用了较多的有机肥,要降低碳足迹首先应减少氮肥使用量,优化氮肥与有机肥的使用量及其比例,并可通过施用缓、控释肥和深施等措施优化施肥量^[36],提高氮肥利用率。温室建筑材料的碳足迹占比也较大,但这是必需的而不能随意减少;其他投入材料中,碳足迹占比较大的区域应适当减少投入,

如在农药的使用方面,天祝县投入较大而需减少。至于化肥、农药减少至多少为宜,以及氮肥与有机肥的优化配比,应在不明显降低产量和经济效益的同时进一步研究确定。

4 结 论

甘肃温室葡萄生产系统的能量输入和能量输出均较高,葡萄产量也较高,属于高投入高产型。能量利用效率、能量生产率均较低,净能量很小,比能很大,直接能量及可再生能量投入占比低,间接能量及不可再生能量投入占比高,单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均很高。不同区域相比,天祝县哈溪镇能量输入低,能量输出、产量及能量利用效率和能量生产率较高,净能量最大且为正值,比能最小,单位面积碳足迹和单位产量碳足迹均最小,管理相对合理,应总结经验加以推广。天祝县华藏寺镇能量效率最低,碳足迹最大,管理最不合理,应注意调整。

总体而言,与国外葡萄或其他农作物生产相比,甘肃温室葡萄生产系统的能量利用效率较低,碳足迹较高,提高能量利用效率和降低碳足迹的潜力很大。氮肥的投入是甘肃省温室葡萄生态系统碳足迹的主要来源,因此,在研究区温室葡萄生产中,要采取降低氮肥使用量、优化氮肥与有机肥配比等科学合理的管理措施,提高甘肃温室葡萄生产的能量利用效率,降低间接能量和不可再生能量的投入比例,降低碳足迹,改善其环境效应。

[参考文献]

- [1] 王钰,吴发启,彭小瑜,等.黄土丘陵区山地立体种养循环生产能流特征与经济效益分析[J].农业工程学报,2016,32(S2):199-206.
Wang Y, Wu F Q, Peng X Y, et al. Analysis of economic efficiency and energy flow characteristics of a circular and integrated agriculture model in the loess hilly region [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32 (S2):199-206.
- [2] 王占彪,王猛,陈阜.华北平原作物生产碳足迹分析[J].中国农业科学,2015,48(1):83-92.
Wang Z B, Wang M, Chen F. Carbon footprint analysis of crop production in North China Plain [J]. Scientia Agricultura Sinica, 2015, 48(1):83-92.
- [3] 徐淑娅,贺婷,王晓龙,等.基于生命周期评价法对燕麦碳足迹的研究[J].麦类作物学报,2019,39(12):1459-1467.
Xu S Y, He T, Wang X L, et al. Life cycle assessment of carbon footprint for oats [J]. Journal of Triticeae Crops, 2019, 39 (12):1459-1467.
- [4] 张丹,张卫峰.低碳农业与农作物碳足迹核算研究述评[J].资

- 源科学,2016,38(7):1395-1405.
- Zhang D,Zhang W F. Low carbon agriculture and a review of calculation methods for crop production carbon footprint accounting [J]. Resources Science,2016,38(7):1395-1405.
- [5] 闫明. 农业生产碳足迹及氮肥去向的计量研究 [D]. 南京:南京农业大学,2015.
- Yan M. Quantitative evaluation of carbon footprint and fertilizer nitrogen fate in agricultural production [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2015.
- [6] 徐小明. 基于非线性规划的冬小麦生产碳足迹优化研究 [J]. 环境科学学报,2015,35(8):2648-2654.
- Xu X M. Carbon footprint optimization of winter wheat production based on nonlinear programming [J]. Acta Scientiae Circumstantiae,2015,35(8):2648-2654.
- [7] 路壹,黄璜,郑华斌,等. 水稻生产系统固碳能力与碳足迹研究:以湖南省为例 [J]. 作物研究,2015,29(3):240-243.
- Lu Y,Huang H,Zheng H B,et al. Evaluation of the carbon sequestration capacity and carbon footprints in the rice production systems: a case of Hunan Province [J]. Crop Reseach, 2015,29(3):240-243.
- [8] 黄晓敏,陈长青,陈铭洲,等. 2004-2013年东北三省主要粮食作物生产碳足迹 [J]. 应用生态学报,2016,27(10):3307-3315.
- Huang X M,Chen C Q,Chen M Z,et al. Carbon footprints of major staple grain crops production in three provinces of Northeast China during 2004-2013 [J]. Chinese Journal of Applied Ecology,2016,27(10):3307-3315.
- [9] 胡亮,文礼章,彭云鹏,等. 不同蔬菜品种生产效益和碳效益评价 [J]. 农业资源与环境学报,2016,33(1):92-101.
- Hu L,Wen L Z,Peng Y P,et al. Evaluation of production and carbon benefit of different vegetables [J]. Journal of Agricultural Resources and Environment,2016,33(1):92-101.
- [10] 蔡宇杰,乔玉辉,徐敬,等. 有机和常规苹果生产环境影响的生命周期评价 [J]. 中国生态农业学报,2017,25(10):1527-1534.
- Cai Y J,Qiao Y H,Xu J,et al. Environmental impact assessment via life cycle analysis for organic and conventional apple productions [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture,2017,25(10):1527-1534.
- [11] 马婷. 干旱区葡萄生态系统碳循环特征研究 [D]. 兰州:兰州大学,2020.
- Ma T. Carbon cycle characteristics of vineyard ecosystem in arid region [D]. Lanzhou:Lanzhou University,2020.
- [12] 朱宗文,张亮,钟晓敏,等. 极简生态模式下酿酒葡萄园碳足迹与碳储量研究 [J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2023,51(12):120-131.
- Zhu Z W,Zhang L,Zhong X M,et al. Carbon footprint and carbon storage of wine vineyard under extremely simplified ecological mode [J]. Journal of Northwest A&F University (Nat Sci Ed),2023,51(12):120-131.
- [13] Wang Y L,Li Y K,Sun T,et al. Environmental impact of organic and conventional wine grape production: a case study from Wuwei wine region,Gansu Province,China [J]. Ecological Indicators,2023,154:1-10.
- [14] Kizilaslan H. Input-output energy analysis of cherries production in Tokat Province of Turkey [J]. Applied Energy,2009,86:1354-1358.
- [15] Wang Y L, Ma Q L, Li Y K, et al. Energy consumption, carbon emissions and global warming potential of wolfberry production in Jingtai oasis, Gansu province, China [J]. Environmental Management,2019,64(6):772-782.
- [16] 梁龙. 基于 LCA 的循环农业环境影响评价方法探讨与实证研究 [D]. 北京:中国农业大学,2009.
- Liang L. Environmental impact assessment of circular agriculture based on life cycle assessment: methods and case studies [D]. Beijing:China Agricultural University,2009.
- [17] Vafabakhsh J, Mohammadzadeh A. Energy flow and GHG emissions in major field and horticultural crop production systems (case study: Sharif Abad Plain) [J]. Journal of Agroecology,2019,11(2):365-382.
- [18] Rajaeifar M A, Akram A, Ghobadian B, et al. Energy-economic life cycle assessment (LCA) and greenhouse gas emissions analysis of olive oil production in Iran [J]. Energy,2014,66:139-149.
- [19] Asgharipoura M, Mondani F, Riahinia S. Energy use efficiency and economic analysis of sugar beet production system in Iran: a case study in Khorasan Razavi province [J]. Energy, 2012,44:1078-1084.
- [20] 杨肖,钟方雷,郭爱君,等. 干旱区绿洲制种玉米生命周期环境影响评价:以张掖市为例 [J]. 农业环境科学学报,2017,36(8):1664-1671.
- Yang X,Zhong F L,Guo A J,et al. Assessment of the environmental impact of seed maize production in oasis agriculture of arid regions based on the life cycle assessment method: a case study of Zhangye City [J]. Journal of Agro-Environmental Sciences,2017,36(8):1664-1671.
- [21] Liu Y X, Langer V, Høgh-Jensen H, et al. Life cycle assessment of fossil energy use and greenhouse gas emissions in Chinese pear production [J]. Journal of Cleaner Production, 2010,18:1423-1430.
- [22] 侯萍. 中国电网电力的生命周期评价研究 [D]. 成都:四川大学,2012.
- Hou P. Life cycle assessment of Chinese grid power [D]. Chengdu:Sichuan University,2012.
- [23] 李蔓,王震,孙德智. 聚乙烯生产生命周期评价的研究 [J]. 环境科学与技术,2009,32(5):191-195.
- Li M,Wang Z,Sun D Z. Study on life cycle assessment of polythene production [J]. Environmental Science and Technology,2009,32(5):191-195.
- [24] 万腾方. 钢铁产品的生命周期分析及环境影响评价 [D]. 武汉:武汉科技大学,2017.
- Wan T F. The life cycle analysis and environmental impact assessment of steel product [D]. Wuhan:Wuhan University of Science and Technology,2017.
- [25] 徐小宁. 中国水泥工业的生命周期评价 [D]. 辽宁大连:大连

- 理工大学, 2013.
- Xu X N. Life cycle assessment of cement in China [D]. Dalian Liaoning: Dalian University of Technology, 2013.
- [26] Ozkan B, Fert C, Karadeniz C F. Energy and cost analysis for greenhouse and open-field grape production [J]. *Energy*, 2007, 32: 1500-1504.
- [27] Liu Y X, Høgh-Jensen H, Egelyng H, et al. Energy efficiency of organic pear production in greenhouses in China [J]. *Renewable Agriculture and Food Systems*, 2010, 25(3): 196-203.
- [28] 梁龙, 郑雪艳, 李仲伍. 贵州粮食作物生产综合效益及减排增值潜力分析: 以锦屏县为例 [J]. *作物研究*, 2021, 35(5): 435-441.
- Liang L, Zheng X Y, Li Z B. The analysis of comprehensive effect and potential for reduction of value-added of cereal production in Guizhou province: a case study of Jinping County [J]. *Crop Research*, 2021, 35(5): 435-441.
- [29] Mardani A, Taghavifar H. An overview on energy inputs and environmental emissions of grape production in west Azerbaijan of Iran [J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 54: 918-924.
- [30] 胡亮. 几种蔬菜生产的碳足迹及其秸秆还田效果的初步评价 [D]. 长沙: 湖南农业大学, 2016.
- Hu L. A preliminary evaluation of the carbon footprint and the effect of straw returning to the production of several vegetables [D]. Changsha: Hunan Agricultural University, 2016.
- [31] 史磊刚, 陈阜, 孔凡磊, 等. 华北平原冬小麦-夏玉米种植模式碳足迹研究 [J]. *中国人口·资源与环境*, 2011, 21(9): 93-98.
- Shi L G, Chen F, Kong F L, et al. The carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping pattern on North China Plain [J]. *China Population, Resources and Environment*, 2011, 21(9): 93-98.
- [32] 王占彪, 陈静, 张立峰, 等. 河北省棉花生产碳足迹分析 [J]. *棉花学报*, 2016, 28(6): 594-601.
- Wang Z B, Chen J, Zhang L F, et al. Carbon footprint analysis of cotton production in Hebei province [J]. *Cotton Science*, 2016, 28(6): 594-601.
- [33] 仲乃琴, 刘宁, 赵盼, 等. 中国马铃薯化肥农药减施的现状与挑战 [J]. *科学通报*, 2018, 63(17): 1693-1702.
- Zhong N Q, Liu N, Zhao P, et al. Current status and challenges for potato chemical fertilizer & pesticide reductions in China [J]. *Chinese Science Bulletin*, 2018, 63(17): 1693-1702.
- [34] 罗自威, 陶晶霞, 侯凯捷, 等. 养分优化管理实现蜜柚高产高效和降低碳排放 [J]. *植物营养与肥料学报*, 2022, 28(4): 688-700.
- Luo Z W, Tao J X, Hou K J, et al. Optimized nutrient management improves fruit yield and fertilizer use efficiency and reduces carbon emissions in pomelo production [J]. *Journal of Plant Nutrition and Fertilizers*, 2022, 28(4): 688-700.
- [35] 朱凤婷, 李奥, 于晓曼, 等. 有机与常规培肥模式生产水稻的碳足迹 [J]. *生态学杂志*, 2020, 39(7): 2233-2241.
- Zhu F T, Li M, Yu X M, et al. Carbon footprint of rice production under organic and conventional fertilization modes [J]. *Chinese Journal of Ecology*, 2020, 39(7): 2233-2241.
- [36] 朱永昶, 李玉娥, 姜德锋, 等. 基于生命周期评估的冬小麦-夏玉米种植系统碳足迹核算: 山东省高密地区为例 [J]. *农业资源与环境学报*, 2017, 34(5): 473-482.
- Zhu Y C, Li Y E, Jiang D F, et al. Life cycle assessment on carbon footprint of winter wheat-summer maize cropping system based on survey data of Gaomi in Shandong Province, China [J]. *Journal of Agricultural Resources and Environment*, 2017, 34(5): 473-482.

(上接第 88 页)

- [25] 陈立松, 齐一萍, NOSE Akihiro. 菠萝叶片绿色组织与贮水组织中代谢物水平的昼夜变化(英文) [J]. *植物生理与分子生物学学报*, 2001, 27(3): 253-260.
- Chen L S, Qi Y P, NOSE A. Diurnal changes in metabolite levels in the chlorenchyma and the water storage parenchyma of *Ananas comosus* leaves [J]. *Acta Phytophysiological Sinica*, 2001, 27(3): 253-260.
- [26] Priyadarshani S N, Hu B Y, Li W M, et al. Simple protoplast isolation system for gene expression and protein interaction studies in pineapple (*Ananas comosus* L.) [J]. *Plant Methods*, 2018, 14(1): 95.
- [27] Zhao W F, Yang W X, Wei C B, et al. A simple and efficient method for isolation of pineapple protoplasts [J]. *Biotechnology & Biotechnological Equipment*, 2011, 25(3): 2464-2467.
- [28] Borochoy A, Halevy A H, Shinitzky M. Increase in microviscosity with ageing in protoplast plasmalemma of rose petals [J]. *Nature*, 1976, 263(5573): 158-159.
- [29] Oh M H, Kim S G. Plant regeneration from petal protoplast culture of *Petunia hybrida* [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture*, 1994, 36(3): 275-283.
- [30] 李余润, 王馨, 杨丽英, 等. 酶解时间对灯盏花原生质体产量及活力的影响 [J]. *天津农业科学*, 2020, 26(6): 12-14, 20.
- Li Y R, Wang X, Yang L Y, et al. Effect of enzymatic hydrolysis time on yield and viability of protoplast in *Erigeron breviscapus* [J]. *Tianjin Agricultural Sciences*, 2020, 26(6): 12-14, 20.
- [31] Zhao F L, Li Y J, Hu Y, et al. A highly efficient grapevine mesophyll protoplast system for transient gene expression and the study of disease resistance proteins [J]. *Plant Cell, Tissue and Organ Culture (PCTOC)*, 2016, 125(1): 43-57.
- [32] Wang H L, Wang W, Zhan J C, et al. An efficient PEG-mediated transient gene expression system in grape protoplasts and its application in subcellular localization studies of flavonoids biosynthesis enzymes [J]. *Scientia Horticulturae*, 2015, 191: 82-89.