

网络出版时间:2014-04-25 15:48
网络出版地址:<http://www.cnki.net/kcms/doi/10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.019.html>

DOI:10.13207/j.cnki.jnwafu.2014.05.019

光伏日光温室冬季发电效果初探

赵 雪^{a,b}, 邹志荣^{b,c}

(西北农林科技大学 a 机械与电子工程学院, b 农业部西北地区设施园艺工程重点实验室, c 园艺学院, 陕西 杨凌 712100)

[摘 要] **【目的】**探究冬季光伏日光温室发电系统的实际发电效果,为光伏日光温室的设计提供参考。**【方法】**以陕西杨凌地区 2 kW 光伏日光温室为研究对象,详细介绍了其室内光伏发电系统的构成,利用 C 语言编制发电量监测软件监测整个光伏发电系统的发电量,采用太阳总辐射采集仪获取温室外太阳总辐射数据,并运用 Excel 软件分析了室外太阳总辐射与系统发电量的相关性。**【结果】**光伏发电系统在 1 月份的发电功率为 0.618 kW;系统日发电量最大值为 9.544 kW·h,最小值为 1.414 kW·h;系统发电量与室外太阳总辐射呈现显著正相关关系,且晴天的相关性系数大于阴天。**【结论】**2 kW 光伏发电系统可为面积为 500 m² 的日光温室环境调控提供电力保证,同时本研究还为光伏日光温室发电量的计算提供了理论计算公式。

[关键词] 日光温室;光伏发电;发电量;太阳总辐射;冬季

[中图分类号] S625.1;TM914.4⁺2 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1671-9387(2014)05-0177-06

Preliminary study on power generation using photovoltaic solar greenhouse in winter

ZHAO Xue^{a,b}, ZOU Zhi-rong^{b,c}

(a College of Mechanical and Electronic Engineering, b Northwest Key Laboratory of the Ministry of Agriculture for Horticultural Engineering in Structure and Environment, c College of Horticulture, Northwest A&F University, Yangling, Shaanxi 712100, China)

Abstract: **【Objective】** This study explored the practical application and development potential of the photovoltaic solar greenhouse to improve the design of photovoltaic solar greenhouse. **【Method】** The components of the photovoltaic power generation system were introduced using a 2 kW photovoltaic solar greenhouse in Yangling as an example. The generation capacity of entire photovoltaic power generation system was monitored using a C based monitoring software. The correlation between total outside solar radiation obtained by a solar radiation collecting instrument and the system generation capacity was analyzed using Excel. **【Result】** The generating power of photovoltaic power generation system in January was 0.618 kW with the maximum daily generating capacity of 9.544 kW·h and the minimum value of 1.414 kW·h. Generating capacity and total solar radiation had a significantly positive correlation, and the correlation coefficient in sunny days was greater than in cloudy days. **【Conclusion】** The 2 kW photovoltaic power generation system could provide electricity for environmental regulation of a greenhouse with an area of 500 m². This study also provided the theoretical calculation method for capacity of the photovoltaic solar greenhouse.

Key words: solar greenhouse; photovoltaic power generation; system generation capacity; total solar radiation; winter

[收稿日期] 2013-04-01

[基金项目] 国家“十二五”科技支撑项目(2011BAD12B03);公益性行业(农业)科研专项(201203002)

[作者简介] 赵 雪(1987—),女,吉林白山人,硕士,主要从事农业生物环境与能源研究。E-mail: blacksnow.99@163.com

[通信作者] 邹志荣(1956—),男,陕西延安人,教授,博士生导师,主要从事设施农业研究。E-mail: zouzhirong2005@163.com

日光温室是具有我国知识产权的温室结构形式,在我国北方地区得到了大面积的推广和应用。近年来,随着“节能减排”概念的深入人心,如何减少大面积日光温室对传统火电的依赖也逐渐成为一个研究热点。随着光伏发电技术的发展^[1-3],越来越多的人开始考虑将光伏发电技术应用到设施农业中,即在不影响温室内作物生长的同时,增加光伏发电系统为温室提供自身设备运转所需的电力,从节能减排、保护环境、绿色低碳角度来看,该研究具有十分深远的意义。国外已有利用太阳能电池板为温室环境调控提供所需电力的相关研究报告^[4-9],然而国内的研究则多停留在理论与展望阶段^[10-12],关于日光温室光伏发电系统实际发电效果的文章更是鲜有

报道。为此,本试验以 2 kW 光伏日光温室为研究对象,对冬季光伏发电系统在日光温室中的实际发电数据进行统计与分析,并对系统发电量与室外太阳辐射之间的相关性进行了探讨,以期为今后我国光伏日光温室产业的健康发展提供借鉴。

1 光伏日光温室的结构

供试光伏日光温室内外结构如图 1 所示。该温室位于陕西省杨凌国家农业高新技术产业示范区(N34°17',E108°04'),该区年平均气温 12.9℃,年极端最高气温 38.5℃,年极端最低气温-13.4℃;年平均日照时数为 2 163.8 h,属于温带半湿润大陆性季风气候。



图 1 光伏日光温室室内外图

Fig. 1 Outside and inside views of the photovoltaic solar greenhouse

温室长 50 m,跨度 10 m,脊高 4.7 m,后墙高 3.3 m,墙体结构为 370 多孔砖,外侧采用 200 mm 厚聚苯板,外加 100 mm 厚彩钢板覆盖外侧作为保温结构。前屋面由非晶硅电池组件、PC 阳光板和塑料薄膜 3 种材料构成。PC 阳光板与非晶硅电池组件构成倾角为 25°的倾斜平面,该平面包含 6 列非晶硅电池组件,每列长 5.6 m,宽 1.1 m,自西向东每 3 列组件与 PC 阳光板分别以 1:2,1:3 比例间隔,其余部分均采用 PC 阳光板覆盖。该倾斜平面底部至温室屋面底角之间采用塑料薄膜覆盖。保温被材料为针刺毡。

2 光伏发电系统与测试项目

2.1 光伏发电系统

本日光温室中的光伏发电系统如图 2 所示。其工作原理是:非晶硅电池组件吸收太阳辐射产生电能,经控制逆变一体机后直接供负载使用或存储于蓄电池中。蓄电池中存储的电能则可供温室夜间或阴雨天使用。若蓄电池中电能供应不足,则负载可

通过控制逆变一体机自动与市电相连接。

光伏日光温室负载包括温室的卷帘机、电动开窗、照明系统、水肥一体化机、环境监控系统等部分。

2.1.1 光伏组件阵列 设计日光温室光伏发电系统时,选择具有良好透光性和弱光效果的非晶硅电池组件构成光伏阵列。该阵列中组件以串并联方式连接,以满足蓄电池充电的工作电压。本系统中包含 24 块非晶硅电池组件,2 块组件串联 1 组,12 组并联,整个系统功率为 2 kW。其中非晶硅电池组件规格为 1 400 mm×1 100 mm,峰值功率为 93 W,峰值电压为 73.5 V,峰值电流为 1.11 A。

2.1.2 蓄电池 蓄电池是最常见的储能装置,通过充电将电能转化为化学能储存,使用时再将化学能转化为电能释放出来。本研究中光伏发电系统设计的自给天数为 3 d,包含 9 只 12 V 200 Ah 的深循环胶体免维护蓄电池,以串联方式连接,放电深度为 0.8。

2.1.3 控制逆变一体机 光伏发电系统除组件与蓄电池之外,还包括控制器、逆变器、汇流箱等部件。控制器是对系统进行管理和控制的设备;逆变器是

将系统发出的直流电转化成可供交流负载使用的仪器装置。汇流箱则是将光伏组件所发电量汇集在一起的

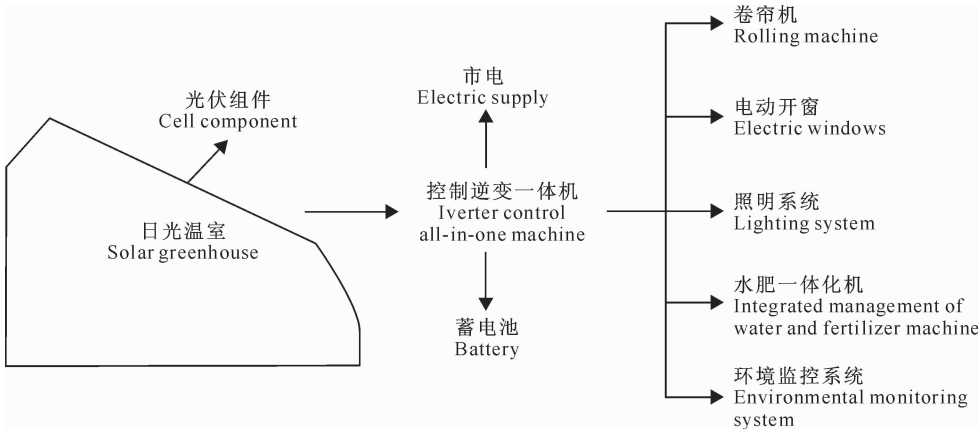


图 2 日光温室光伏发电系统示意图
Fig. 2 Schematic diagram of photovoltaic solar greenhouse

本发电系统容量较小,选择集控制器和逆变器功能为一体的控制逆变一体机。系统蓄电池充电电压为 110 V,逆变输出电压为 220 V,通过该装置可避免因相位分配不均衡而造成的不平衡负载。控制逆变一体机参数为额定容量 3 kW,额定电压 110 V,额定电流 27.5 A,欠压保护点 97.5 V。

2.2 测试项目

2.2.1 发电量测试 系统发电量根据充电电压、充电电流及时间计算而来。系统发电量监测软件是在 Windows 操作系统的开发环境下,利用 C 语言编程以及 Access 数据库管理工具实现开发设计的,软件界面如图 3 所示。



图 3 光伏发电系统监测软件界面
Fig. 3 Interface of the monitoring software for photovoltaic power system

2.2.2 太阳辐射测试 太阳总辐射数据采集仪由河北鼎睿电子产品销售有限公司生产制造,设置采集时间间隔为 10 min,精度 0.1 W/m²。辐射传感器放置于温室室外 1.5 m 高度处,测试时间为 2012-12-30 至 2013-03-31。

3 结果与分析

3.1 冬季光伏日光温室的发电量

选取光伏发电系统 2013-01 的发电量数据进行分析,结果如表 1 所示。受施工和天气影响,软件监测结果中只有 14 d 完整数据,其中日发电量最大值可达到 9.544 kW·h,而最小值仅有 1.414 kW·h;软件记录的 1 月份系统发电总量为 114.273 kW·h,发电时间为 184.83 h,1 月份实际发电总量与发电时间均应大于软件记录值,且经计算可知该系统中每千瓦非晶硅电池组件每小时的发电量为 0.309 kW·h。

3.2 典型天气下光伏发电系统发电量与太阳总辐射的相关性

由气象局发布的气象资料可知,2013-01-24 为晴天,2013-01-19 为雨雪天,即阴天,根据这 2 天的系统发电量和太阳总辐射数据,分析典型天气条件下系统发电量与太阳总辐射的相关性。典型天气即晴天和阴天条件下系统发电量和太阳总辐射的变化如图 4 所示。

由图 4 可以看出,日光温室光伏发电系统晴天的发电量明显大于阴天,其中晴天最大发电量可达 0.26 kW·h,而阴天最大发电量仅有 0.074 kW·h。这是因为晴天太阳总辐射远大于阴天,其中晴天太阳总辐射最大值为 615.1 W/m²,而阴天最大值仅有 223.7 W/m²,这反而说明非晶硅电池组件具有良好的弱光效应。

本研究还分析了该系统在典型天气条件下的发电量与太阳总辐射的相关性,若以 y 表示光伏发电系统发电量,x 表示太阳总辐射,则在晴天,样本容量 N=43,拟合得 $y=0.444x-0.01, R^2=0.997$;在

阴天,样本容量 $N=43$,可得 $y=0.281x+0.007$, 统发电量与太阳总辐射呈现显著线性正相关关系,
 $R^2=0.943$.说明在典型天气条件下,光伏发电系 且晴天的相关性明显优于阴天。

表 1 日光温室室外太阳辐射和光伏系统的发电状况

日期 Date	天气 Weather	发电量/(kW·h) Generating capacity	发电时间/h Generating hours	总辐射/(W·m ⁻²) Total solar radiation		备注 Remarks
				平均值 Mean value	最大值 Max value	
01-01	晴 Sunny	6.682	8.83	347.4	507.4	正常 Normal
01-02	多云 Cloudy	3.469	8.83	204.4	410.6	正常 Normal
01-03	多云 Cloudy	3.271	8.50	206.4	349.0	正常 Normal
01-04	多云 Cloudy	0.673	0.83	251.7	488.2	断电 Interrupt
01-05	多云 Cloudy	3.844	9.00	238.4	499.8	断电 Interrupt
01-06	阴 Overcast	1.032	5.00	128.3	200.6	断电 Interrupt
01-07	阴 Overcast	5.400	9.17	299.4	482.1	正常 Normal
01-08	多云 Cloudy	3.049	7.83	183.4	339.8	断电 Interrupt
01-09	晴 Sunny	2.278	3.83	348.3	497.5	过压 Over voltage
01-10	多云 Cloudy	5.314	7.67	328.1	492.8	过压 Over voltage
01-11	晴 Sunny	1.291	2.00	402.0	559.7	过压 Over voltage
01-12	多云 Cloudy	1.633	3.33	339.1	493.6	过压 Over voltage
01-13	多云 Cloudy	3.112	4.67	344.4	471.3	过压 Over voltage
01-14	阴 Overcast	0.874	3.50	229.9	363.7	断电 Interrupt
01-15	多云 Cloudy	7.105	8.83	367.6	583.6	正常 Normal
01-16	多云 Cloudy	6.879	8.17	358.3	532.8	正常 Normal
01-17	晴 Sunny	6.517	9.00	356.3	500.5	正常 Normal
01-18	多云 Cloudy	4.861	8.67	279.3	487.5	正常 Normal
01-19	雨雪 Snowy	1.414	7.33	85.8	223.7	正常 Normal
01-20	小雪 Snowy	1.412	3.50	156.2	320.6	晚开 Late
01-21	多云 Cloudy	6.945	9.00	361.4	538.2	正常 Normal
01-22	多云 Cloudy	6.666	9.17	357.7	499.0	正常 Normal
01-23	晴 Sunny	7.334	8.33	389.4	535.9	正常 Normal
01-24	晴 Sunny	9.544	9.17	460.6	615.1	正常 Normal
01-25	晴 Sunny	3.644	4.00	376.0	571.3	过压 Over voltage
01-26	晴 Sunny	0	0	436.1	608.9	停止 Stop
01-27	晴 Sunny	0	0	408.0	557.4	停止 Stop
01-28	多云 Cloudy	1.353	1.50	317.6	598.2	过压 Over voltage
01-29	阴 Overcast	0	0	329.1	466.7	暂停 Pause
01-30	阴 Overcast	4.295	6.67	275.6	487.5	晚开 Late
01-31	多云 Cloudy	4.381	8.50	258.6	410.6	正常 Normal

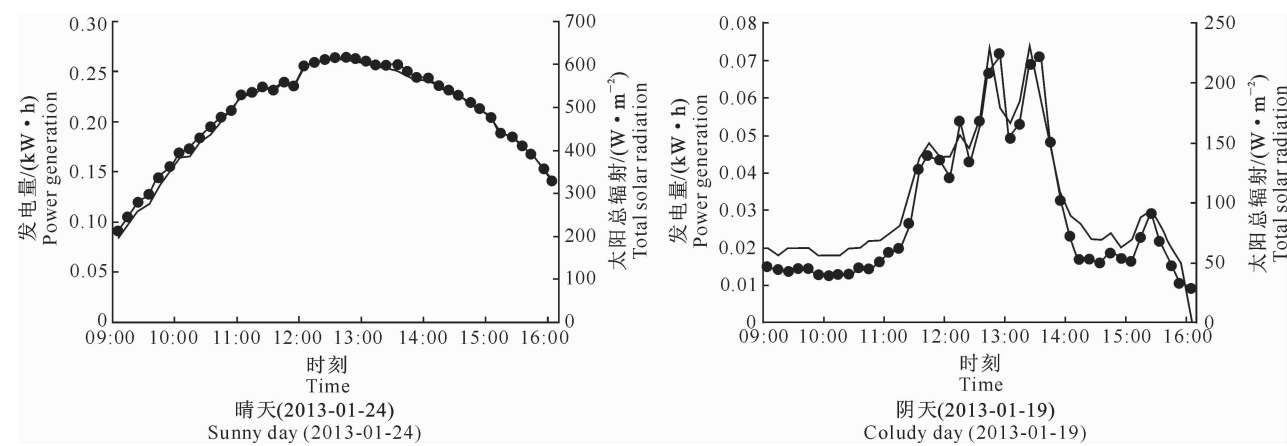


图 4 晴天和阴天典型天气条件下光伏发电系统发电量与太阳总辐射的变化

—●—, 太阳总辐射; —, 发电量

Fig. 4 Changes in system power generation and total solar radiation in typical sunny day and cloudy day

—●—, Total solar radiation; —, Generating capacity

4 讨论

1)本试验中非晶硅薄膜电池组件的安装倾角依据日光温室的设计经验设置为 25° ,但是根据光伏领域的有关研究成果可知,西安地区合适的光伏组件的安装角度为 34.18° ^[3],这说明光伏日光温室的发电量还有较大的提升空间,因此下一步有必要构建光伏日光温室模型,结合日光温室本身的结构特点,设计出不同地区日光温室前屋面光伏组件的合理倾角。

2)由于在冬季最寒冷的1月份,光伏日光温室并未定植作物,因此本研究并未获取植物生长状况的相关数据,这有待下一步的继续研究。

3)光伏日光温室在结构上还存有几个亟需改进的问题:

① 非晶硅薄膜电池组件外层结构是钢化玻璃,相对于普通塑料薄膜日光温室,前屋面铺设一定比例非晶硅薄膜组件的光伏日光温室对钢骨架的要求更高,规格不够的钢结构不足以承受光伏组件的自重,也会在卷帘机运行过程中对组件形成压迫,造成组件破碎。钢结构也是目前非晶硅薄膜日光温室建设成本居高不下的主要原因之一,经济安全的室内骨架结构是目前光伏温室亟待解决的技术难题。

② 卷帘机对日光温室保温起着非常重要的作用。在考虑到非晶硅电池组件材质和日光温室前屋面形状等因素之后,本研究中光伏日光温室卷帘机选择了侧置摆杆式安装。然而在系统运行过程中,卷帘机出现过卷帘杆扭断现象,这是由于光伏日光温室前屋面为倾斜平面,与传统曲线屋面相比,棉被在运行过程中摩擦力较小,从而造成了卷帘杆与卷帘机组的转速不同步。因此在卷帘机选型时应适当增加卷帘机的功率和卷帘杆的壁厚。另外,卷帘机管理时要特别注意连续雨雪天气,浸湿后的保温被会加重卷帘机荷载,容易造成卷帘机故障。

③ 日光温室前屋面不同覆盖材料之间的密封技术尚不成熟。雨天时,水滴会通过倾斜平面与塑料薄膜搭接处的缝隙流入温室内,从而给温室管理带来不便。

5 结论

本研究以杨凌地区2 kW 光伏日光温室为例,详细介绍了光伏发电系统的设备组成,并对系统在冬季1月份的发电效果进行了初步分析,得出以下结论:

1)根据光伏系统发电量监测软件1月份的记录结果,14 d有完整数据记录的发电总量为114.273 kW·h,发电时间为184.83 h,说明非晶硅电池组件的发电功率为0.309 kW。晴天日发电量最大值可达9.544 kW·h,可满足光伏日光温室中卷帘机、电动开窗以及照明系统等设备的用电需求。

2)无论典型晴天还是阴天,光伏发电系统产生的电能均与太阳辐射呈显著线性正相关关系。其中晴天光伏发电系统的发电量与太阳总辐射的相关关系回归方程为 $y=0.444x-0.01$,相关系数 $R^2=0.997$,这为光伏日光温室发电量的设计提供了理论计算公式。

【参考文献】

- [1] Bernal-Agustin J L, Dufo-Lopez R. Economical and environmental analysis of grid connected photovoltaic systems in Spain [J]. Renewable Energy, 2006, 31(8): 1107-1128.
- [2] Seng L Y, Lalchand G, Lin G M S. Economical, environmental and technical analysis of building integrated photovoltaic systems in Malaysia [J]. Energy Policy, 2008, 36(6): 2130-2142.
- [3] 杨金焕,于化丛,葛亮. 太阳能光伏发电应用技术 [M]. 北京:电子工业出版社,2009.
Yang J H, Yu H C, Ge L. Solar photovoltaic power generation technology [M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2009. (in Chinese)
- [4] Al-Shamiry F M S, Ahmad D, Sharif A R M, et al. Design and development of a photovoltaic power system for tropical greenhouse cooling [J]. American Journal of Applied Sciences, 2007, 4(6): 386-389.
- [5] Nayak S, Tiwari G N. Theoretical performance assessment of an integrated photovoltaic and earth air heat exchanger greenhouse using energy and exergy analysis methods [J]. Energy and Buildings, 2009, 41(8): 888-896.
- [6] Yano A, Tsuchiya K, Nishi K, et al. Development of a greenhouse side-ventilation controller driven by photovoltaic energy [J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(4): 633-641.
- [7] Yano A, Furue A, Kadowaki M, et al. Electrical energy generated by photovoltaic modules mounted inside the roof of a north-south oriented greenhouse [J]. Biosystems Engineering, 2009, 103(2): 228-238.
- [8] Sonneveld P J, Swinkels G L A M, Campen J, et al. Performance results of a solar greenhouse combining electrical and thermal energy production [J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(1): 48-57.
- [9] Sonneveld P J, Swinkels G L A M, Bot G P A, et al. Feasibility study for combining cooling and high grade energy production in a solar greenhouse [J]. Biosystems Engineering, 2010, 105(1): 51-58.
- [10] 袁明利, 罗小林. 温室供电系统研究 [J]. 农机化研究, 2012, 34(3): 233-236.

Yuan M L,Luo X L. The research of power supply system for greenhouse [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2012,34(3):233-236. (in Chinese)

[11] 鲍顺淑,杨其长,闻 婧,等. 太阳能光伏发电系统在植物工厂中的应用初探 [J]. 中国农业科技导报,2008,10(5):71-74.

Bao S S,Yang Q C,Wen J,et al. Preliminary exploration of photovoltaic power generating system in plant factory [J]. Journal of Agricultural Science and Technology,2008,10(5):71-74. (in Chinese)

[12] 魏晓明,周长吉,丁小明,等. 光伏发电温室的现状及技术前景研究 [C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集. 重庆:西南大学出版社,2011:279-284.

Wei X M,Zhou C J,Ding X M,et al. Photovoltaic greenhouse technology on the current situation and prospects [C]//Academic Essays of Chinese Academy of Agricultural Engineering in 2011. Chongqing: Southwest University Press, 2011: 279-284. (in Chinese)

(上接第 170 页)

[19] Ma Y,Sun H Y,Zhao G L,et al. Isolation and characterization of genomic retrotransposon sequences from octoploid strawberry (*Fragaria*×*ananassa* Duch.) [J]. Plant Cell Reports, 2008,27:499-507.

[20] Jiang B,Wu Z M,Lou Q F,et al. Genetic diversity of Ty1-copia retrotransposons in a wild species of *Cucumis*(*C. hystrix*) [J]. Scientia Horticulturae,2010,127:46-53.

[21] Jiang B,Lou Q F,Wu Z M,et al. Retrotransposon-and micro-satellite sequence-associated genomic changes in early generations of a newly synthesized allotetraploid *Cucumis*×*hytivus* Chen & Kirkbride [J]. Plant Molecular Biology,2011,77(3):225-233.

[22] 肖 栋,侯喜林,马景蕃,等. 不结球白菜 Ty1-copia 逆转座子序列的克隆及表达 [J]. 西北植物学报,2009,29(4):643-649.

Xiao D,Hou X L,Ma J F,et al. Cloning and expression analysis of Ty1-copia-like retrotransposons in *Brassica campestris* ssp. *chinensis* [J]. Acta Bot Boreal Occident Sin,2009,29(4):643-649. (in Chinese)

[23] Shi Y,Yamamoto T,Hayashi T. Characterization of copia-like retrotransposons in pear [J]. J Jpn Soc Hort Sci,2002,71:723-729.

[24] Kim H,Yamamoto M,Hosaka F,et al. Molecular characterization of novel Ty1-copia-like retrotransposons in pear (*Pyrus pyrifolia*) [J]. Tree Genetics & Genomes,2011,7:845-856.

[25] Fonseca S,Hackler L,Zvara Á,et al. Monitoring gene expression along pear fruit development,ripening and senescence using cDNA microarrays [J]. Plant Science,2004,167:457-469.

[26] Voytas D F,Cummings M P,Konieczny A,et al. Copia-like retrotransposons are ubiquitous among plants [J]. Proc Natl Acad Sci,1992,89:7124-7128.

[27] Ellis T H N,Poyser S J,Knox M R,et al. Polymorphism of insertion sites of Ty1-copia class retrotransposons and its use for linkage and diversity analysis in pea [J]. Molecular Genetics and Genomics,1998,260:9-19.

[28] Liu Y J,Du Y M,Xu L F,et al. A suppression subtractive hybridization library construction for red skin mutant of ‘Zaosu’ pear and MYBR gene analysis [J]. New Zealand Journal of Crop and Horticultural Science,2012,40(2):87-101.

[29] Casacuberta J M,Santiago N. Plant LTR-rotrotransposons and MITES:Control of transposition and impact on the evolution of plant genes and genomes [J]. Gene,2003,311(5):1-11.

[30] Pouteau S,Huttner E,Grandbastien M A,et al. Specific expression of the tobacco Tnt1 retrotransposon in protoplasts [J]. EMBO,1991,10(7):1911-1918.

[31] Flavell A J,Smith D,Kumar A. Extreme heterogeneity of Ty1-copia group retrotransposons in plants [J]. Molecular Genetics and Genomics,1992,231:233-242.

[32] Beguiristain T,Grandbastien M A,Puigdomènech P,et al. Three Tnt1 subfamilies show different stress-associated patterns of expression in tobacco, consequences for retrotransposon control and evolution in plants [J]. Plant Phvsiol,2001,127:212-221.