

## 设施葡萄茎干液流变化特征及其影响因素研究

汤英, 徐利岗\*, 唐瑞 (宁夏水利科学研究院, 宁夏银川 750021)

**摘要** 以宁夏干旱区设施鲜食葡萄为研究对象, 利用插针式茎干液流量计和设施环境监测仪获取葡萄全生育期茎干液流和试验区空气温湿度、光照强度及土壤温湿度等实时数据, 开展不同地径和不同时间尺度葡萄茎干液流的变化特征以及环境因子对茎干液流的影响研究。结果表明: 不同地径设施葡萄各物候期的茎干液流日变化过程相似, 液流速率随着地径的增加而增大; 晴天葡萄茎干液流 06:00 左右启动, 液流速率 16:00 达到最大 (0.660 kg/h); 阴天次之 (0.409 kg/h), 雨天峰值最小 (0.272 kg/h)。夏季茎干液流速率高于秋季, 11:00 达到峰值 (0.493 kg/h), 秋季最高值出现在 16:00 (0.354 kg/h); 冬季最大值 0.061 kg/h, 分别为夏季和秋季最大值的 12.37% 和 17.23%。7 月份茎干液流量最大 (260.34 kg/h), 平均茎干液流速率 0.360 kg/h; 6 月次之, 累计液流量 227.93 kg, 11 月最小 (43.12 kg); 全生育期累计液流量 1 347.83 kg, 日均液流量 1.94~8.38 kg/d, 平均日液流量 5.94 kg/d。成熟期日液流量最大 (8.38 kg/d), 其次为变色期 (7.65 kg/d), 萌芽期最小 (1.94 kg/d)。茎干液流速率与空气温度、光照强度和土壤温度均呈极显著正相关 ( $P < 0.01$ ), 与空气湿度呈极显著负相关 ( $P < 0.01$ )。模拟的茎干液流速率系列综合误差为 3.57%, 日茎干液流量系列综合误差为 4.24%。

**关键词** 设施葡萄; 茎干液流; 蒸腾耗水; 气象因子; 宁夏干旱区

中图分类号 S274 文献标识码 A

文章编号 0517-6611(2023)24-0202-07

doi: 10.3969/j.issn.0517-6611.2023.24.045

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



### Study on the Change Characteristics of Stem Fluid Flow and Its Influencing Factors of Facilities Grape

TANG Ying, XU Li-gang, TANG Rui (Scientific Research Institute of the Water Conservancy of Ningxia, Ningxia, Yinchuan 750021)

**Abstract** Taking fresh facility grape in the arid area of Ningxia as the research object, needle stem flow meter and facility environment monitor were used to obtain the stem fluid flow of grape in the whole growth period and the air temperature and humidity, light intensity and soil temperature and humidity and other real-time data in the experimental area. The change characteristics of the stem fluid flow of grape with different ground diameter in different time scale and the effects of environmental factors on the stem fluid flow were studied. The results showed that the daily change process of stem fluid flow of facility grape with different ground diameter was similar, and the fluid flow rate increased with the increase of ground diameter. The stem fluid flow of grape in sunny days started at about 06:00, the fluid flow rate reached the maximum value (0.660 kg/h) at 16:00. In the cloudy days, the maximum value was 0.409 kg/h, the peak value in rainy days was the minimum (0.272 kg/h). The liquid flow rate in summer was higher than that in autumn, reaching the peak value (0.493 kg/h) at 11:00. The highest value in autumn appeared at 16:00, being 0.354 kg/h. The highest value in winter was 0.061 kg/h, which was 12.37% and 17.23% of the maximum value in summer and autumn. The stem fluid flow in July was the maximum (260.34 kg/h), average daily fluid flow rate was 0.36 kg/h, followed by that in June, the cumulative fluid flow was 227.93 kg and the cumulative fluid flow was the minimum 43.12 kg in November. The cumulative fluid flow in the whole growth period was 1 347.82 kg, the daily fluid flow was 1.94~8.38 kg/d, the average daily fluid flow was 5.94 kg/d. The daily fluid flow in mature stage was the maximum (8.38 kg/d), followed by that in the discoloration stage (7.65 kg/d), and that in germination stage was the minimum (1.94 kg/d). The stem flow rate was significantly positively correlated with air temperature, light intensity and soil temperature ( $P < 0.01$ ), and it had a significant negative correlation with the air humidity ( $P < 0.01$ ). The comprehensive error of the simulated stem fluid flow rate was 3.57%, the comprehensive error of the daily stem liquid flow was 4.24%.

**Key words** Facility grape; Stem fluid flow; Transpiration water consumption; Meteorological factors; Arid area of Ningxia

茎干液流是土壤-植物-大气连续体水流路径中的重要环节, 反映了植物体内的水分传输状况<sup>[1-2]</sup>, 并受太阳辐射、空气湿度、土壤水分、天气状况等影响<sup>[3-4]</sup>。通过测定茎干液流量有助于分析植物生理作用对环境因子的适应性和响应特征<sup>[5]</sup>, 对于准确估算植被蒸腾量及作物蒸散量有着重要意义<sup>[6]</sup>。近年来, 基于热扩散原理的茎干液流测定技术被应用于新疆南部矮化红枣树<sup>[7]</sup>及杏树<sup>[8]</sup>、猕猴桃<sup>[9]</sup>、油松树<sup>[10]</sup>、沙地人工杨树林<sup>[11]</sup>、黄河三角洲柽柳<sup>[12]</sup>、民勤绿洲荒漠过渡带<sup>[13]</sup>及准噶尔盆地南缘<sup>[14]</sup>原生梭梭树的蒸腾耗水规律及其影响因素研究。葡萄广泛分布于世界各地, 在我国多个省份均有分布。宁夏贺兰山东麓产区 (105°45'~106°47'E, 37°43'~39°23'N) 位于葡萄种植的黄金地带, 属中温带干旱区, 光照充足, 积温高, 昼夜温差大, 土壤透气性能极佳, 有机

质含量高。2020 年底, 宁夏葡萄树种植面积 3.28 万  $\text{hm}^2$ , 是宁夏支柱型优势特色农业产业。目前对葡萄的研究侧重于品种选育<sup>[15]</sup>、抗寒<sup>[16]</sup>、抗冻性<sup>[17]</sup>、水肥一体化技术<sup>[18]</sup>及灌溉制度优化<sup>[19]</sup>、水分胁迫的影响<sup>[20]</sup>等方面。针对葡萄蒸腾耗水, 王尚涛等<sup>[21]</sup>认为干旱绿洲区无核白葡萄树冠层日蒸腾量为 0.20~8.13 mm/d, 平均日蒸腾量为 3.32 mm/d。生长季中葡萄树液流速率日变化呈单峰型曲线, 日均耗水量为 2.76~10.00 kg, 胸径越大的葡萄树日均耗水量越大<sup>[22]</sup>, 葡萄树日均蒸散量为 7.13 mm/d, 土壤蒸发量为 1.01 mm/d, 日均冠层蒸腾量占日均蒸散量的 85.8%<sup>[23]</sup>。关于葡萄尤其是设施葡萄的蒸腾耗水变化规律及其影响因素方面报道较少。笔者以宁夏银川地区设施拱棚葡萄为研究对象, 采用插针式茎干液流量监测系统连续监测滴灌条件下设施葡萄全生命周期的茎干液流, 分析其变化特征及其与环境因子的关系, 旨在为设施葡萄的科学灌溉提供有益借鉴。

**基金项目** 宁夏自然科学基金项目 (2020AAC03481); 宁夏重点研发计划项目 (2021BBF02012, 2020BFH02014)。

**作者简介** 汤英 (1981—), 女, 四川成都人, 高级工程师, 从事农业水土工程研究。\* 通信作者, 博士, 从事水文学水资源研究。

**收稿日期** 2022-09-11

## 1 材料与方法

**1.1 研究区概况** 研究区地处西北干旱内陆地区 (106°42'E, 38°27'N, 海拔 1 115 m), 多年平均气温 8.8 °C, 年降雨量

195 mm, 平均蒸发量 1 864 mm, 年日照时数 2 800~3 100 h, 地下水一般埋藏在 1.0~3.0 m, 矿化度小于 1.0 g/L, 土壤为壤质砂土。试验区位于中国灌溉试验宁夏中心站试验基地设施拱棚种植区, 棚长 110 m, 棚宽 28 m, 棚高 9 m, 总面积 0.2 hm<sup>2</sup>, 拱棚顶部呈弧形, 上面覆盖塑料膜, 冬季覆盖棉被, 属于春秋棚。种植葡萄品种为维多利亚, 种植株行距 1.0 m×3.5 m, 选择长势良好、无病虫害的植株作为葡萄茎干液流试验典型样株。

**1.2 试验设置及设备安装** (1) 在试验区内选取 3 棵典型样株 (编号分别为 T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>), T<sub>1</sub> 地径为 6.0 cm, 株高 3.90 m; T<sub>2</sub> 地径为 9.1 cm, 株高 6.10 m; T<sub>3</sub> 地径为 11.5 cm, 株高 4.65 m。在距地面 10 cm 以上树干顺直段安装澳大利亚插针式茎干液流量计 SFM1 进行葡萄茎干液流监测, 探针长度 35 mm, 探头间距 15 mm。获取 2021 年 1 月 1 日—2022 年 2 月 28 日葡萄全生育期茎干液流数据, 数据步长为 60 min。

(2) 灌溉方式采用内镶式滴灌管滴灌, 一行 2 管, 滴头间距 30 cm, 滴头流量 2 L/h。整个生育期灌溉定额 2 700 m<sup>3</sup>/hm<sup>2</sup>, 共灌水 13 次, 灌水定额 12~20 m<sup>3</sup>/次。

(3) 安装国产 NBIOT 型五合一传感器, 实时监测空气温度、空气湿度、土壤温度、土壤湿度及光照强度等参数, 获取 2021 年 1 月 1 日—12 月 31 日逐日数据, 数据步长为 60 min。

**1.3 研究方法** 数据统计及分析使用 SPSS 软件和 Minitab 16.0 软件, 采用 Excel、Origin 2021 软件绘图。

## 2 结果与分析

**2.1 不同地径葡萄植株的茎干液流变化特征分析** 绘制不同地径典型样株 (T<sub>1</sub>、T<sub>2</sub>、T<sub>3</sub>) 的全生育期茎干液流及空气温度变化过程线 (图 1)。从图 1 可以看出, 不同地径葡萄各月茎干液流变化过程基本一致, 且与空气温度变化基本一致。T<sub>3</sub> (D=11.5 cm) 各生育阶段茎干液流均大于 T<sub>2</sub> (D=9.1 cm)、T<sub>1</sub> (D=6.0 cm), 结合样株生长情况认为这与植株冠幅及地径有显著关系。各物候期葡萄茎干液流日变化过程均呈多峰型特征, 特别是开花期、膨大期茎干液流速率变幅较大。此外, 葡萄在夜间 (21:00 至次日 06:00) 仍保持一定的液流蒸散且相对稳定, T<sub>3</sub> 样株开花期和成熟期夜间液流速率占日液流速率的 24.81% 和 18.05%, 变色期和二次膨大期夜间液流速率分别占 26.81% 和 29.15%, 说明设施葡萄茎干液流量昼夜差异大。同时, 还出现了午间茎干液流骤减现象, 其主要原因是由于午间气温较高, 植物为了保存体内的水分短暂关闭或减小叶片气孔开度, 降低植物体水分蒸腾, 以减少水分损耗<sup>[1]</sup>。夜间仍然有液流的产生, 是由于白天气孔开放, 树冠蒸腾, 形成了叶片-冠-根的水势差, 日落后气孔关闭, 但水势梯度并不立即消失, 由于水势差的存在, 仍会有部分水分在一段时间内被动地通过根部进入树干, 形成夜间补偿流<sup>[4]</sup>, 恢复植物体内的水分平衡<sup>[2]</sup>, 这与树种及其周围环境条件密切相关。

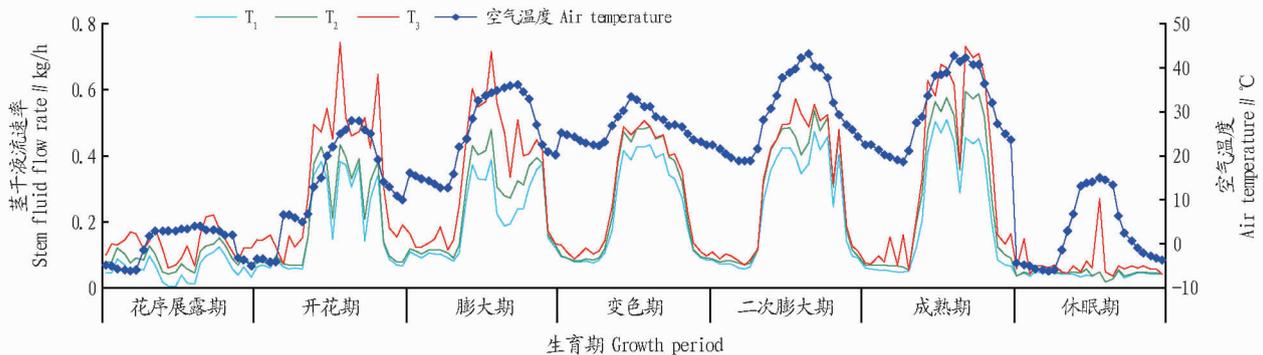


图 1 不同地径设施葡萄全生育期茎干液流速率的变化

Fig.1 The variation of stem fluid flow rate of facility grape with different ground diameter in the whole growth period

## 2.2 设施葡萄多时间尺度茎干液流变化特征

**2.2.1 不同天气及季节葡萄茎干液流日变化特征。** 为分析不同天气状况对葡萄茎干液流的影响, 以 T<sub>3</sub> (D=11.5 cm) 为例, 分别选择阴天 (6 月 6 日)、雨天 (6 月 16 日) 以及晴天 (6 月 27 日) 绘制典型样株累计液流量及液流速率的日变化图 (图 2)。从图 2 可以看出, 3 种天气条件下葡萄茎干液流速率及液流日累计量变化较为显著。晴天茎干液流速率及液流日累计量均最大, 阴天次之, 雨天最小。晴天茎干液流速率变化过程呈三峰型, 06:00 左右启动并迅速升高, 10:00 达到第 1 个峰值, 12:00 出现第 2 个峰值, 16:00 达到日最大值 (0.660 kg/h), 此后开始迅速下降; 阴天液流速率变化相对平缓, 日变化过程呈宽峰型, 峰值时段为 12:30—14:30, 最大

值 (0.409 kg/h) 启动时间与晴天基本一致; 雨天茎干液流速率变化过程呈单峰型, 14:00 达到日最大值 (0.272 kg/h), 日累计液流量最小。晴天液流速率日最大值出现的时刻较阴天和雨天滞后, 分析认为是由于晴天光照强烈, 蒸腾加剧, 因此水分更容易散失掉 (蒸发), 关闭部分气孔可以减少水分的散失, 蒸腾速率随之降低, 而 16:00 时气孔再次张开, 从而达到极值, 而阴天和雨天 14:00 左右设施内的光照强度最大, 因此蒸腾速率随之达到极值。

统计设施葡萄在春季 (3—5 月)、夏季 (6—8 月)、秋季 (9—10 月) 及冬季 (11 月—次年 2 月) 茎干液流速率日动态的平均值, 绘制变化曲线。从图 3 可以看出, 春季、夏季及秋季葡萄茎干液流的日变化趋势较为相似, 区别在于液流速率

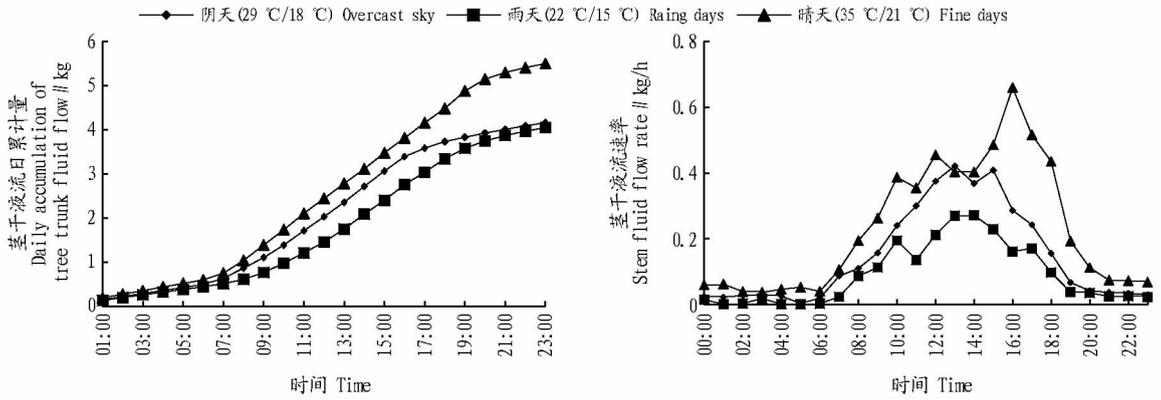


图2 不同天气条件下设施葡萄累计茎干液流量及茎干液流速率变化过程

Fig.2 The variation of accumulative stem fluid flow and stem fluid flow rate of facility grape under different weather conditions

峰值不同;冬季葡萄叶片全部脱落,处于休眠期,主要从茎秆蒸腾失水,液流速率较小且基本维持不变。从启动时间来看,春季07:00左右启动,夏季和秋季06:00左右启动;从全天各时段的液流速率整体来看,夏季各时段均大于秋季,秋季大于春季,冬季最小。从峰值来看,夏季茎干液流速率高于秋季,且高峰值持续时间较长(09:00—19:00),呈不显著的双峰型,11:00到达第1个峰值(0.493 kg/h),15:00小幅度降低(0.446 kg/h),之后达到第2次峰值(0.475 kg/h),19:00后迅速下降;秋季茎干液流日变化特征与夏季基本一致,高峰段持续时间(10:00—18:00)较夏季短,最高值出现

在16:00(0.354 kg/h),此后开始缓慢降低;春季茎干液流日变化与夏季相似,也呈宽峰型,峰值持续时间为11:00—18:00,最高值出现在16:00(0.260 kg/h);冬季液流速率较小且维持稳定,最大值为0.061 kg/h,仅为夏季最大值的12.37%、秋季最大值的17.23%、春季最大值的23.46%。因此,设施葡萄茎干液流速率峰值持续时间长,与设施拱棚的小气候条件有关,拱棚内温度及湿度相对稳定,光照强度则随着太阳的起落发生变化,这与陆地栽植的葡萄液流速率曲线呈单峰型变化<sup>[21-22]</sup>有所不同。

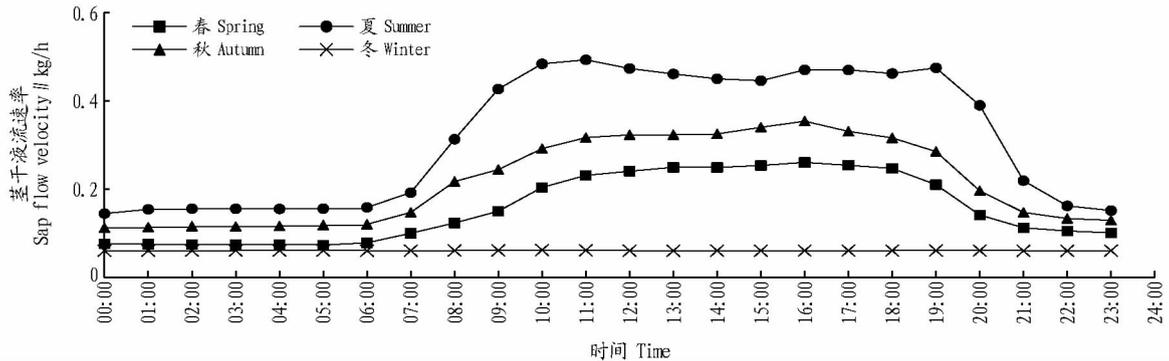


图3 不同季节设施葡萄茎干液流速率的日变化

Fig.3 Diurnal variation of stem fluid flow rate of facility grape in different seasons

**2.2.2 葡萄茎干液流量各月及不同生育阶段的变化特征。**绘制设施葡萄各月累计茎流量及月平均茎流速率的变化过程,见图4。从图4可以看出,7月份累计月茎流量最大(260.34 kg),月平均茎流速率为0.360 kg/h;6月次之,累计月茎流量为227.93 kg,月平均茎流速率为0.325 kg/h;5月份累计月茎流量为218.46 kg,月平均茎流速率为0.300 kg/h。11月份累计月茎流量最小(43.12 kg),月平均茎流速率为0.059 kg/h。统计葡萄各生育阶段累计液流量和日均液流量,见表1。从表1可以看出,设施葡萄全生育期累计液流量为1 347.83 kg,日均液流量为1.94~8.38 kg/d,全生育期平均5.94 kg/d。其中,成熟期的日均液流量最大(8.38 kg/d),其次为变色期(7.65 kg/d),萌芽期最小(1.94 kg/d)。秋季生长期累计液流量最大(266.96 kg);膨大期持续34 d,累计液流量

252.92 kg;成熟期持续11 d,累计液流量为92.22 kg。

**2.2.3 设施葡萄茎干液流年内变化过程。**绘制葡萄全年日累计茎干液流量变化过程线,见图5。设施葡萄生育期较露地葡萄提前,6—7月为其旺盛生长季,也是日累计茎干液流量及蒸腾耗水最大的时期。日累计茎干液流量最高值出现在7月28日(9.364 kg/d),8月份开始下降,并在8月6日有1个峰值(8.399 kg/d)。全生育期日均耗水量为5.94 kg/d,5—8月葡萄茎干液流量维持在较高水平,4月和10月相对较低;11月由于叶片的脱落,茎干液流量急剧减小并基本维持不变(0.59~0.61 kg/d)。

### 2.3 设施葡萄茎干液流速率与其影响因子的关系分析

**2.3.1 葡萄茎干液流速率与各影响因子间的相关性分析。**分析茎干液流速率与空气湿度、空气温度、土壤含水率、土壤

温度和光照强度之间的相关性(表2)。以7月1日为典型日,分别绘制设施葡萄典型茎干液流速率与气象要素及土壤温度的相关关系图(图6)。从表2可以看出,茎干液流速率与空气温度、土壤温度、土壤含水率、光照强度均呈极显著的正相关( $P<0.01$ ),相关系数分别为0.565、0.321、0.162和0.458;液流速率与空气湿度呈极显著负相关( $P<0.01$ ),相关系数为-0.541。这说明茎干液流与气象要素与土壤墒情呈极显著相关,环境要素对茎干液流的影响显著。从图6可以看出,光照强度、空气温度与茎干液流速率的变化过程基本相似,但存在一定的滞后效应,且当空气温度过高时葡萄出现关闭气孔现象,液流量瞬间降低;茎干液流与空气湿度呈负相关。

**2.3.2 设施葡萄茎干液流与其影响因素的回归分析。**依据茎

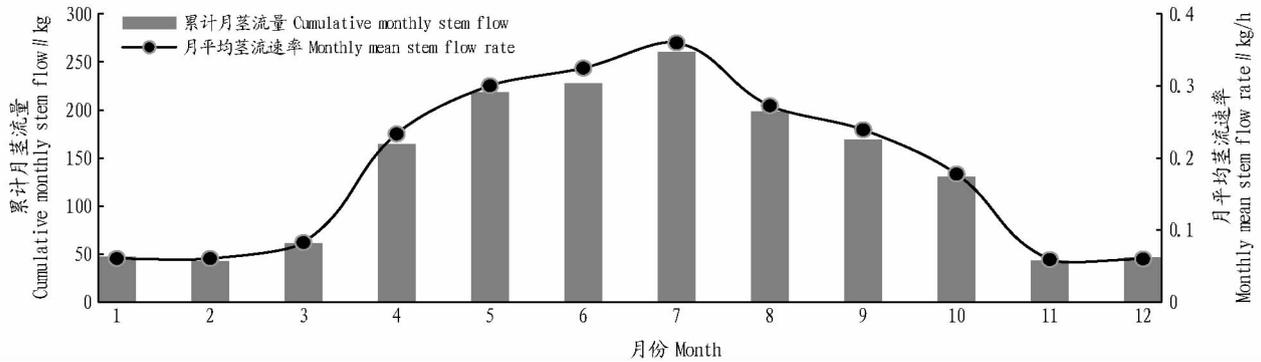


图4 设施葡萄各月累计茎干液流量及月平均茎流速率的变化

Fig.4 The changes of accumulative stem fluid flow and monthly mean stem fluid flow rate of facility grape in each month

表1 设施葡萄不同生育期累计液流量及日均液流量

Table 1 The accumulated liquid flow and daily average liquid flow of facility grape in different growth periods

生育阶段 Growth period	累计液流量 Accumulated liquid flow//kg	日均液流量 Daily average liquid flow kg/d
萌芽期 Germination stage (03-02—03-22)	40.72	1.94
花序展露期 Inflorescence expansion stage (03-23—05-02)	207.13	5.18
开花期 Florescence stage (05-03—05-10)	55.23	6.90
幼果期 Young fruit stage (05-11—05-20)	69.83	6.98
膨大期 Fruit expansion stage (05-21—06-23)	252.92	7.44
变色期 Color-changing stage (06-24—07-16)	175.85	7.65
成熟期 Maturation stage (07-17—07-27)	92.22	8.38
秋季生长期 Autumn growth stage (08-08—09-09)	266.96	6.36
秋季生长后期 Late autumn growth stage (09-10—11-18)	186.97	2.67
合计/平均 Total/average	1 347.83	5.94

干液流数据及相应时间段的气象与土壤墒情资料(空气温度、空气湿度、光照强度、土壤湿度)进行回归分析,结果见图7。从图7可以看出,茎干液流速率与光照强度、空气温度的关系均符合多项式关系,与空气湿度的关系符合指数关系。以光照强度( $x_1$ )、空气温度( $x_2$ )、空气湿度( $x_3$ )为自变量,以葡萄茎干液流( $y$ )为因变量,进行多元回归,获得拟合方程  $y = \frac{1}{1+e^{(12.459-0.45x_1+0.057x_2)}} (R^2=0.683)$ 。以7月15日和7月份实际数据作为验证系列,绘制实测值及模拟值的日变化过程及月变化过程(图8)。从图8可以看出,模拟方程模拟精度较好,其中茎干液流速率系列综合误差为3.57%,日茎干液流量系列综合误差为4.24%。

### 3 结论与讨论

以设施葡萄为研究对象,利用插针式茎干液流监测技术获取葡萄全生育期茎干液流实时数据,利用设施微环境监测仪获取相应时间的气象数据以及土壤温湿度,对不同地径和不同时间尺度的葡萄茎干液流变化特征以及各因素对茎干液流的影响进行研究,得出以下主要结论:

(1) 设施葡萄各物候期的茎干液流日变化过程均呈多峰型特征,在夜间(21:00至次日06:00)仍保持一定的液流蒸散且相对稳定, $T_3(D=11.5\text{ cm})$ 样株开花期和成熟期夜间液流速率占日液流速率的24.81%和18.05%,变色期和二次膨大期夜间液流速率分别占日液流速率的26.81%和29.15%,茎干液流量的昼夜差异大。

(2) 不同天气条件下葡萄茎干液流速率及日累计量变化较为显著,晴天茎干液流速率及液流日累计量均最大,阴天次之,雨天最小。晴天液流速率06:00左右启动并迅速升高,10:00达到第1个峰值,12:00出现第2个峰值,16:00达到日最大值(0.660 kg/h);阴天日变化曲线呈宽峰型,峰值时段为12:30—14:30,最大值为0.409 kg/h;雨天日变化曲线呈单峰型,14:00达到日最大值(0.272 kg/h)。晴天液流速率日最大值出现的时刻较阴天和雨天滞后,认为是由于晴天光照强烈,蒸腾加剧,叶片气孔关闭所致。

(3) 春季、夏季及秋季葡萄茎干液流的日变化过程及趋势相似,均呈现宽峰型特征,区别在于液流启动时间和液流速率峰值不同;冬季叶片全部脱落,液流速率较小且基本维

持不变。夏季茎干液流速率高于秋季,11:00 到达第 1 个峰值(0.493 kg/h),15:00 小幅降低,之后达到第 2 个峰值(0.475 kg/h);秋季最高值出现在 16:00(0.354 kg/h);春季

最高值出现在 16:00(0.260 kg/h);冬季液流速率最大值为 0.061 kg/h,是夏季最大值的 12.37%、为秋季最大值的 17.23%、为春季最大值的 23.46%。

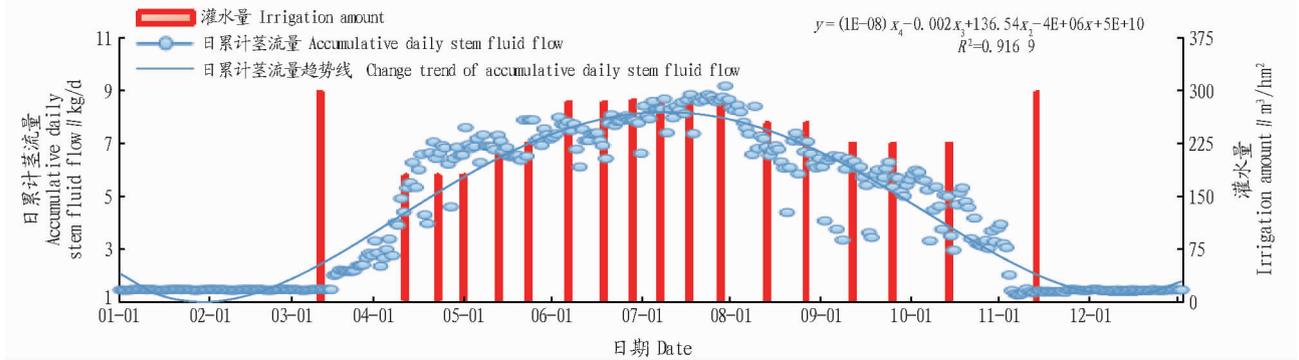


图 5 设施葡萄日累计茎干液流的年变化

Fig.5 Annual variation of accumulative daily stem fluid flow of facility grape

表 2 葡萄茎干液流速率与其影响因子的相关性

Table 2 The correlation between stem fluid flow rate of facility grape and its influencing factors

指标 Index	空气湿度 Air humidity	土壤温度 Soil temperature	土壤含水率 Soil moisture content	光照强度 Light intensity	液流速率 Stem flow rate	空气温度 Air temperature
空气湿度 Air humidity	1					
土壤温度 Soil temperature	-0.392**	1				
土壤含水率 Soil moisture content	0.254**	-0.084**	1			
光照强度 Light intensity	-0.537**	0.391**	-0.239**	1		
液流速率 Stem flow rate	-0.541**	0.321**	0.162**	0.458**	1	
空气温度 Air temperature	-0.655**	0.778**	-0.063**	0.636**	0.565**	1

注: \*\* 表示 0.01 水平上显著相关(双尾)。

Note: \*\* indicated significant correlation at 0.01 level(two-tailed test).

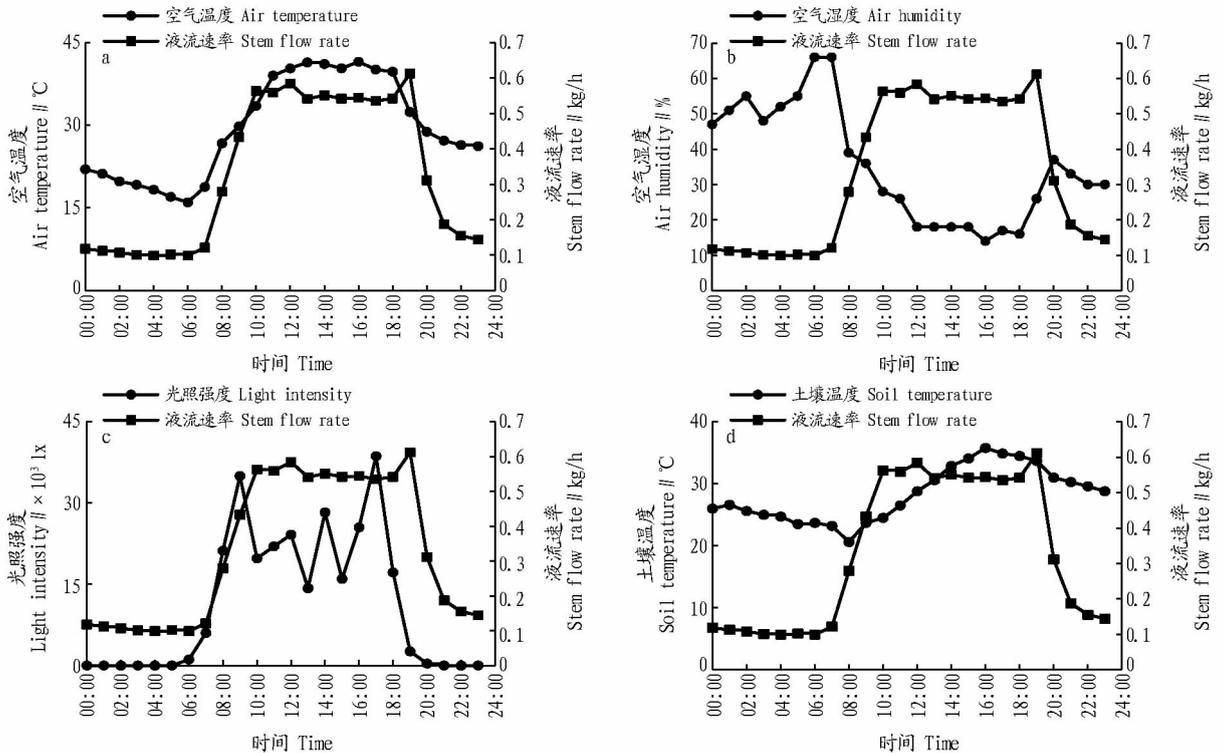


图 6 设施葡萄典型日茎干液流速率与气象要素及土壤温度的相关关系

Fig.6 The correlation between the daily stem fluid flow rate of facility grape and meteorological factors, soil temperature

(4)7 月份累计月茎流量最大(260.34 kg),月平均茎流 速率为 0.360 kg/h;6 月次之,累计月茎流量 227.93 kg,月平

均茎流速率为0.325 kg/h;11月累计月茎流量最小(43.12 kg),月平均茎流速率为0.059 kg/h。设施葡萄全生育期累计液流量为1 347.83 kg,日均液流量为1.94~8.38 kg/d,平均值5.94 kg/d。成熟期的日均液流量最大(8.38 kg/d),其次为变色期

(7.65 kg/d),而萌芽期最小(1.94 kg/d)。秋季生长期累计液流量最大(266.96 kg),膨大期累计液流量为 252.92 kg;成熟期持续 11 d,累计液流量92.22 kg。

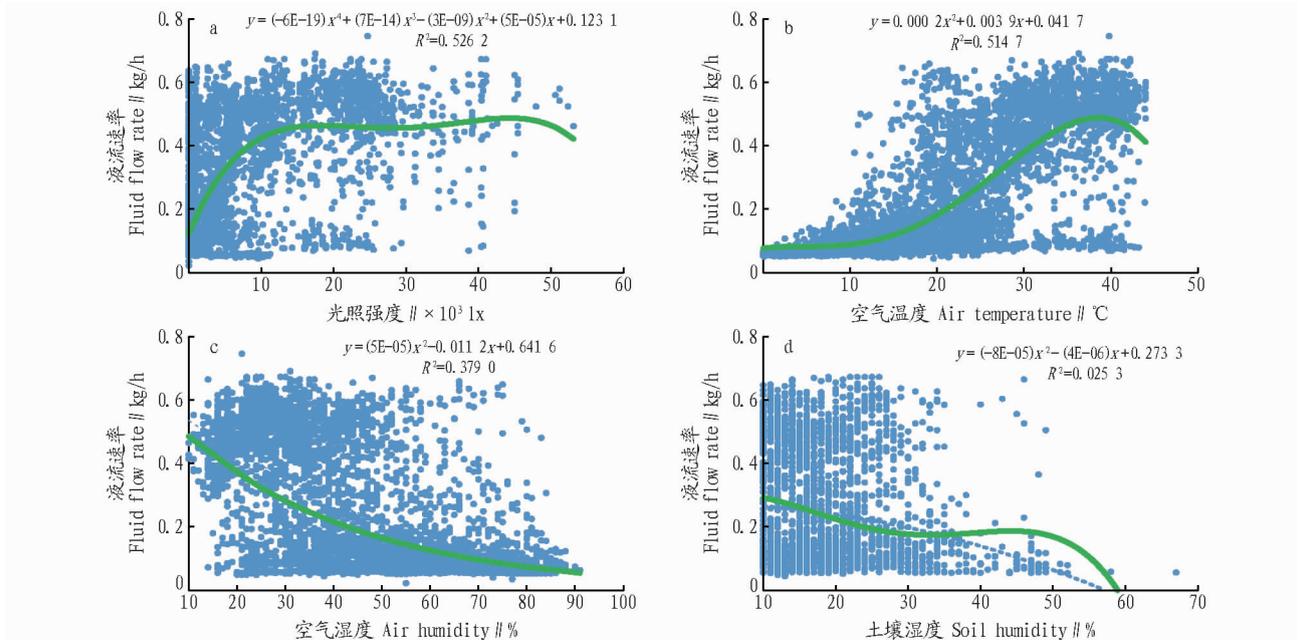


图 7 茎干液流速率与气象因素和土壤湿度的回归分析模拟

Fig.7 Regression analysis simulation of stem fluid flow rate and meteorological factors, soil humidity

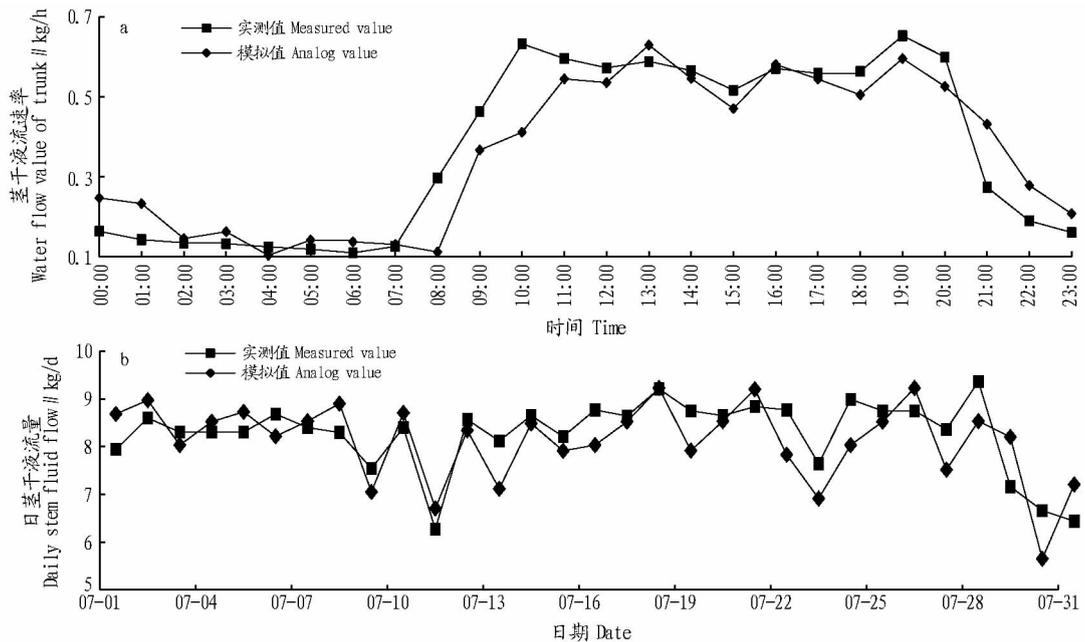


图 8 设施葡萄茎干液流的日变化和月变化过程

Fig.8 The diurnal and monthly variation of stem fluid flow in facility grape

(5)设施葡萄生育期较露地葡萄提前,6—7月为其旺盛生长期,也是日累计茎干液流量及蒸腾耗水最大的时期,最高值出现在7月28日(9.364 kg/d),8月份开始下降。5—8月葡萄茎干液流量维持在较高水平,4月和10月相对较低;11月由于叶片的脱落,茎干液流急剧减小并基本维持不变(0.59~0.61 kg/d)。

(6)茎干液流速率与空气温度、土壤温度、土壤含水率和光照强度均呈极显著的正相关( $P < 0.01$ ),与空气湿度呈极显著的负相关( $P < 0.01$ ),可见环境因子对茎干液流的影响显著。葡萄茎干液流( $y$ )与光照强度( $x_1$ )、空气温度( $x_2$ )、空气湿度( $x_3$ )符合指数模型  $y = \frac{1}{1 + e^{12.459 - 0.45x_1 + 0.057x_2}}$  ( $R^2 = 0.683$ ),

模拟方程的模拟精度较好,液流速率系列综合误差为3.57%,日液流量系列综合误差为4.24%。

茎干液流是植物体内由于蒸腾作用引起木质部内向上的液流,其测定已经成为研究不同环境条件下植物水分关系的一种有效手段,其变化特征很大程度决定了植株的蒸腾特征。叶片蒸腾也是水分在SPAC系统中不断循环迁移的动力。冠层蒸腾耗水是作物实际耗水的主要组成,约占蒸散耗水总量的66.4%<sup>[21]</sup>~85.8%<sup>[23]</sup>,直接影响植物的生理生化过程和形态结构,从而影响植物的生长、产量和品质<sup>[4]</sup>。摸清各类作物在不同条件下的茎干液流变化特征及其与环境因子的响应关系,并将其应用于大尺度下作物冠层蒸腾耗水量计算和实际耗水量的模拟都十分有意义。因此,探明茎干液流与土壤水分、土壤温度、气象要素和作物生理生态参量之间的关系,构建多参数系统模拟模型,推求近似区域或缺资料情况下同类作物蒸腾耗水,明确蒸腾耗水与蒸散发量的比值,并反向推求相关作物各生育阶段的作物参数,同时为开展作物的缺水诊断、优化灌溉制度并进行精确灌溉提供基础依据,这些或将成为国内外学者的研究热点。

### 参考文献

- [1] 张继澍.植物生理学[M].北京:高等教育出版社,1999.
- [2] BAKER J M, VAN, BAVEL C H M. Measurement of mass flow of water in the stems of herbaceous plants[J]. Plant, cell & environment, 1987, 10(9): 777-782.
- [3] 黄雅茹, 马迎宾, 辛智鸣, 等. 柽柳不同季节树干液流特征及其与土壤含水量及土壤温度的关系[J]. 西北林学院学报, 2021, 36(5): 1-10.
- [4] 徐利岗, 苗正伟, 杜历, 等. 干旱区枸杞树干液流变化特征及其影响因素[J]. 生态学报, 2016, 36(17): 5519-5527.

(上接第201页)

最佳平均日产气量为23.89 L, VS降解率为56.09%。

在进行最佳试验条件的验证时,考虑到实际应用的简便性,将干清猪粪半干法连续厌氧消化条件调整为HRT 19 d、搅拌间隔2 h、搅拌转速30 r/min,结果表明干清猪粪连续厌氧发酵的平均日产气量实际值为23.48 L, VS降解率56.47%,实测值与理论值基本一致。

### 3 结论

通过研究干清猪粪半干法连续厌氧发酵中HRT对平均日产气量和VS降解率的影响,并利用响应面分析法优化干清猪粪半干法连续厌氧发酵中的最优工艺条件,得到以下结论:

固定发酵温度、搅拌参数、发酵料液浓度等条件不变,研究当HRT为25、20、15、10 d时对干清猪粪半干法连续厌氧发酵的影响,发现在一定范围内HRT越长,降解效果越好;缩短HRT,日产气量会有所提高,但降解效果有所下降;若HRT过短时则会引起发酵系统酸化,形成病态池,因此在干清猪粪半干法连续厌氧发酵中HRT宜控制在20 d。

通过采用Design Expert 8.0.6的Box-Behnken中心组合设计原理,在发酵温度、料液浓度等其他因素一致条件下,研究HRT、搅拌间隔和搅拌转速3个因素对干清猪粪半干法连续厌氧发酵平均日产气量和VS降解率的影响,发现各因素对日产

- [5] 王睿照.树干液流的研究进展[J].辽宁林业科技, 2019(6): 44-46.
- [6] 赵春彦, 司建华, 冯起, 等. 树干液流研究进展与展望[J]. 西北林学院学报, 2015, 30(5): 98-105.
- [7] 刘毅, 金谦, 桂东伟, 等. 新疆南部矮化红枣树干液流特征及其对环境因子的响应[J]. 干旱区研究, 2019, 36(5): 1146-1152.
- [8] 麦合木提·图如普, 周伟权, 丁想, 等. 吐鲁番盆地杏树干液流变化特征及其对环境因子的响应[J]. 生态学杂志, 2021, 40(8): 2378-2387.
- [9] 吴佳伟, 李苇洁, 杨瑞, 等. 红阳猕猴桃生长发育期树干液流特征及其与环境因子的关系[J]. 果树学报, 2022, 39(3): 388-405.
- [10] 孙旭, 杨文慧, 焦磊, 等. 不同时间尺度北京蟒山油松树干液流对环境因子的响应[J]. 生态学报, 2022, 42(10): 4113-4123.
- [11] 武鹏飞, 刘云强, 李冬梅, 等. 环境因子对沙地人工杨树林树干液流的驱动影响[J]. 中国农业气象, 2021, 42(5): 402-411.
- [12] 任冉冉, 夏江宝, 张淑勇, 等. 黄河三角洲柽柳光合作用及树干液流对潜埋深的响应[J]. 自然资源学报, 2019, 34(12): 2615-2628.
- [13] 姚增旺, 褚建民, 吴利禄, 等. 民勤绿洲荒漠过渡带梭梭树干液流的时滞特征[J]. 应用生态学报, 2018, 29(7): 2339-2346.
- [14] 孙鹏飞, 周宏飞, 李彦, 等. 古尔班通古特沙漠原生梭梭树干液流及耗水量[J]. 生态学报, 2010, 30(24): 6901-6909.
- [15] 王海波, 刘凤之, 韩晓, 等. 葡萄需冷量和需热量估算模型及设施早熟栽培品种筛选[J]. 农业工程学报, 2017, 33(17): 187-193.
- [16] 杨洋, 张晓煜, 张磊, 等. 宁夏酿酒葡萄越冬期冻害时空分布特征[J]. 自然灾害学报, 2019, 28(6): 214-222.
- [17] JIN W M, DONG J, HU Y L, et al. Improved cold-resistant performance in transgenic grape (*Vitis vinifera* L.) overexpressing cold-inducible transcription factors AtDREB1b[J]. HortScience, 2009, 44(1): 35-39.
- [18] 付诗宁, 魏新光, 郑思宇, 等. 滴灌水肥一体化对温室葡萄生理特性及水肥利用效率的影响[J]. 农业工程学报, 2021, 37(23): 61-72.
- [19] 曹毅, 钟永红, 张赓, 等. 水肥耦合对设施葡萄产量、品质和水肥利用的影响[J]. 农机化研究, 2021, 43(9): 186-193.
- [20] 牛最荣, 赵霞, 张芮, 等. 水分胁迫对日光温室葡萄叶片生理变化及果实发育的影响[J]. 中国生态农业学报, 2020, 28(2): 265-271.
- [21] 王尚涛, 赵楠, 张扬, 等. 干旱绿洲农田无核白葡萄树蒸散发的分割研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(12): 1-6.
- [22] 白岩, 朱高峰, 张琨, 等. 基于树干液流及涡动相关技术的葡萄冠层蒸腾及蒸散发特征研究[J]. 生态学报, 2015, 35(23): 7821-7831.
- [23] 白岩, 朱高峰, 张琨, 等. 敦煌葡萄液流特征及耗水分析[J]. 中国沙漠, 2015, 35(1): 175-181.

气量和VS降解率的影响重要性排序均为HRT>搅拌间隔>搅拌转速,并通过模型寻优与验证,得到最优参数组合为HRT 19 d、搅拌间隔2 h、搅拌转速30 r/min,实际平均日产气量23.48 L, VS降解率56.47%,平均容积产气率2.35 L/(L·d)。

### 参考文献

- [1] 李丹妮.猪场粪污厌氧干发酵酸氨抑制规律研究[D].北京:中国农业科学院, 2021.
- [2] 郑盼.猪粪干式厌氧消化实验研究[D].昆明:云南师范大学, 2019.
- [3] 孔德望, 张克强, 房芳, 等. 猪粪厌氧发酵消化液回流体系微生物群落结构特征与产气关系研究[J]. 农业环境科学学报, 2018, 37(3): 559-566.
- [4] 许彩云, 靳红梅, 杜静, 等. 水力停留时间对猪粪厌氧发酵残留物中磺胺类抗生素分布的影响[J]. 农业环境科学学报, 2016, 35(11): 2187-2194.
- [5] 蔡连.以猪粪为原料的高温厌氧发酵产沼气工艺研究[D].南昌:南昌大学, 2014.
- [6] 王悦超, 雷中方.驯化接种对高固体浓度猪粪厌氧发酵的影响[J]. 复旦学报(自然科学版), 2012, 51(1): 118-124.
- [7] 庞小平, 牛明芬, 王赛月, 等. 北方玉米秸秆与猪粪混合厌氧发酵条件[J]. 生态学杂志, 2011, 30(1): 126-130.
- [8] 刘荣厚, 郝元元, 武丽娟. 温度条件对猪粪厌氧发酵沼气产气特性的影响[J]. 可再生能源, 2006, 24(5): 32-35.
- [9] 张靖雨, 汪邦稳, 夏小林, 等. 农村规模化畜禽养殖污染生态综合治理技术研究进展[J]. 安徽农业科学, 2020, 48(19): 9-14, 29.
- [10] 朱圣权.猪粪厌氧干发酵工艺研究及其效益分析[D].武汉:华中农业大学, 2009.
- [11] 沈其林, 单胜道, 周健勇, 等. 猪粪发酵沼液成分测定与分析[J]. 中国沼气, 2014, 32(3): 83-86.
- [12] 马媛, 邓功成, 赵洪, 等. 温度对猪粪发酵产沼气的产气特性的影响[J]. 广东农业科学, 2012, 39(18): 190-192.
- [13] 谭新, 方热军. 猪粪对环境的污染及其处理与利用技术[J]. 饲料工业, 2006, 27(21): 58-60.