

# 滴灌条件下枣树耗水规律的研究

王文明<sup>1</sup>, 郑德明<sup>1</sup>, 姜益娟<sup>1</sup>, 刘君红<sup>2</sup>

(1. 塔里木大学 植物科学学院, 新疆 阿拉尔 84330; 2. 重庆市梁平县农业委员会, 重庆 405200)

**摘要:** 试验通过研究枣树的茎流来预测其耗水量, 为合理灌溉提供科学依据。利用植物茎流计在滴灌条件下测定枣树的茎流变化, 结果表明 2010 年 5 月 15 日的最大值出现在中午 12:00, 达到  $1\ 834.28\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ , 6 月 26 日的最大茎流速率在 13:00, 达到  $4\ 861.89\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ , 7 月 20 日最大值出现在 15:00, 达到  $6\ 385.88\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ , 8 月 10 日最大茎流出现在 16:00, 达到  $5\ 816.86\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ; 最小茎流都是出现在凌晨 4:00~8:00。5 月份的日平均累计流量比较小, 枣树在这个月的日平均耗水量反而最小, 到了 7、8 月份, 随着温度的升高和雨季的结束, 枣树耗水量明显增加, 8 月的日平均耗水累计量最高; 通过相关分析, 地表最高温度和最高气温对枣树的茎流量影响较大。研究得出: 土壤含水量是影响茎流的变化主要因素, 其它环境因子对茎流的影响也很重要。

**关键词:** 枣树; 茎流; 滴灌; 茎流计; 枣树耗水量

中图分类号: S665.1; S607+.1 文献标志码: A 文章编号: 1000-7601(2014)06-0038-05

## Research on water consumption rule of jujube tree under drop irrigation

WANG Wen-ming<sup>1</sup>, ZHENG De-ming<sup>1</sup>, JIANG Yi-juan<sup>1</sup>, LIU Jun-hong<sup>2</sup>

(1. College of Plant Science and Technology, Tarim University, Alare, Xinjiang 843300, China)

**Abstract:** The experiment was conducted by researching stem flow to forecast water consumption, to provide scientific evidence for reasonable irrigation. The change of stem flow of jujube tree was measured by using the stem flow meter under drip irrigation. The results shown that: The maximum value of stem flow was appeared at 12:00 PM, 15 May, 2010, the value was arrived  $1\ 834.28\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ; the maximum value of stem flow was appeared at 13:00 PM, 26 June, the value was arrived  $4\ 861.89\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ; the maximum value of stem flow was appeared at 16:00 PM, 10 August, the value was arrived  $5\ 816.868\ \text{g}\cdot\text{h}^{-1}$ ; the minimal value of stem flow was total appeared in early morning from 4:00 to 8:00 AM. The average daily cumulative stem flow was relatively small in May, also the average daily water consumption was minimal in this month. When came to the July and August, the water consumption of jujube tree was obviously increased with rising temperature and end of rainy season. The average daily cumulative water consumption was maximal in August. Through the correlation analysis, the maximal temperature at the land surface and maximal air temperature have the large effect on stem flow of jujube tree. The conclusion of this experiment was that the soil moisture content was the major factor to influence the stem flow, also the other environmental factor was very important too.

**Keywords:** jujube tree; stem flow; drop irrigation; stem flow meter; water consumption of jujube tree

水分从土壤进入植物根系, 然后通过导管将水由地下输送到植物体的各个器官, 最后通过叶片气孔蒸发到大气中, 形成一个完整的土壤-植物-大气联系体 (SPAC)<sup>[1]</sup>。植物体内的水分主要是通过蒸腾作用散失到大气中的, 植株水分代谢的一个重要生理指标是蒸腾作用, 蒸腾系数越大, 利用水的效

率越低。树木的液流量 99.8% 以上是由于蒸腾耗水<sup>[2]</sup>, 可以用液流量直接反映树木的耗水能力。解婷婷等<sup>[3]</sup>研究了不同灌溉量对沙漠植物梭梭水分生理特性的影响, 结果表明在灌溉每次每株 35 kg 和 2 415 kg 条件下, 其日变化曲线为单峰型, 且日变幅均比较陡峭, 在灌溉每次每株 14 kg 条件下,

收稿日期: 2014-04-11

基金项目: 新疆生产建设兵团科技支疆项目 (2009ZJ03)

作者简介: 王文明 (1982—), 男, 研究生, 研究方向为作物环境生理与营养生理。E-mail: zgmghg666@163.com。

通信作者: 郑德明 (1955—), 男, 教授, 研究方向为植物营养与土壤养分。E-mail: zdmzky@163.com。

日变化曲线的变幅较平缓,呈双峰型;郑睿等<sup>[4]</sup>的试验结果显示土壤含水量是影响液流的一个重要因素,灌水后植株液流日峰值和日液流量分别为灌水前的1.84倍和1.76倍,并随着土壤含水量的降低,液流速率的下降明显。闫业庆等<sup>[5]</sup>研究结果表明玉米茎流的变化是各环境因子综合作用的结果,单个环境因子与茎流变化具有非常明显的线性关系。有试验显示叶底珠的日茎流量随土壤含水量降低而降低,二者呈对数正相关<sup>[6]</sup>。新疆南部地区降水稀少,蒸发力强、水分奇缺是客观存在并难以改变的外部因素。植物长期生长在干旱、炎热的恶劣环境中,在形态结构及生理功能上形成了独特的适应特征,枣树作为一种耐旱植物,即可以调节当地的气候,又可以创造非常可观的经济效应,目前枣树种植面积在南疆正在形成一定规模。因此,通过研究干旱区植物耗水特性,探讨干旱区植物生理生态特性和植物对干旱环境的适应能力,对充分利用干旱地区的有限水资源,改造局部生态环境,促进区域经济的发展,防止沙漠扩大具有重要的现实和长远意义。

## 1 材料与方法

### 1.1 试验点概况

试验在新疆和田地区农十四师224团进行,当地属于干旱荒漠性气候,四季多风沙,每年浮尘天气220 d以上,年降水量35.0~48.5 mm,年蒸发量2 450~2 824 mm。地理位置: E79°17'02"~79°21'21", N37°14'18"~37°22'11"。地势由西南向东北倾斜,海拔1 304~1 379 m,坡度为1‰~2.5‰,地貌有冲积堆积和风堆积面貌,沙质土壤。

### 1.2 试验材料

试验选用224团主栽的骏枣,树龄为5 a的枣树,株距4 m,行距1.5 m,枣树直径9.5 cm,均采用滴灌,4月开始灌溉,8月底结束,每个月灌溉两次,每公顷灌水量为4 200 m<sup>3</sup>。

### 1.3 树干茎流测定

植物的单株耗水是各个尺度耗水研究中发展最成熟、技术最多的研究领域,国外有热脉冲、热平衡等技术<sup>[7-9]</sup>,国内的有植物茎液流速及蒸腾量动态测试仪<sup>[10]</sup>,对于单株植物耗水研究较为简便准确的手段是通过测定树干液流确定蒸腾量<sup>[11]</sup>。本研究采用英国Dynamax公司的茎流测定系统进行茎干液流的测定,在枣树树干的中间部位刮去粗糙表皮,用茎流计SGA100探头包裹,将探头接到数据采集器

上,从2010年5月持续不断地测量,15 min采集一次数据。茎流计测定原理是热平衡法:向茎部整体或茎干的一部分提供已知数量的恒定热源,在茎干内稳定流过一定数量茎流的条件下,茎干的温度会趋向于定值。在理想情况下,即不存在热损失时,提供的热量应等于被液流带走的热量。这构成了热平衡法测定茎流的基础。热平衡法要求一个稳定的状态,而且探头加热器要有持续的能量输入,因此被测树干部分必须和周围变化的环境绝缘。对于包裹式探头而言,加热及测温元件都紧贴在植物茎干的外表面,再用厚的隔热材料包裹,防止热量交换。

### 1.4 数据处理及计算

本试验采用Dynamax公司的自动数据采集器采集数据,采用Excel和SPSS17.0统计软件分析。

## 2 结果与分析

### 2.1 枣树茎流日变化规律

枣树的蒸腾耗水的日变化很有规律性,一般都是随着温度升高茎流量逐渐变大,5月15日的最大值出现在中午12:00,达到1 834.28 g·h<sup>-1</sup>,然后开始下降;6月26日的最大茎流速率在13:00,达到4 861.89 g·h<sup>-1</sup>,7月20日最大值出现在15:00,达到6 385.88 g·h<sup>-1</sup>,8月10日最大茎流出现在16:00,达到5 816.86 g·h<sup>-1</sup>(见图1),5月15日和6月26日的茎流日变化呈多峰曲线,而7月20日和8月10日的茎流日变化呈单峰曲线;随着时间的推移,茎流速率的最大出现时间也在往后延迟,以上茎流最大值都没有在一天中光照最强的14:00中午出现,而是或早或晚达到一天的最大茎流值,这可能是由于随着作物蒸腾的进行,土壤含水量下降,导致气孔开度减小,另一方面可能是由于中午叶面温度过高,呼吸作用加强,光合作用受抑,致使细胞间CO<sub>2</sub>浓度升高导致气孔开度减小<sup>[11]</sup>;最小茎流都是出现在凌晨4:00~8:00,这段时间的茎流非常小。产生的原因可能是由于沙漠地区环境特殊,夜间空气仍然很干燥,加上空气流动的影响,导致水分蒸腾散失,这也是夜间仍能保持一定量液流的重要原因<sup>[12]</sup>。

5月15日、6月26日、7月20日、8月10日这4天的日平均茎流速率以7月20日的值最大为2 201.27 g·h<sup>-1</sup>,5月15日的值最小为664.78 g·h<sup>-1</sup>(见图2),随着气温的升高和花期的来临,枣树在7月份对水分的需求很大,这个时期的枣树对水分最敏感,需要加大灌水的用量。

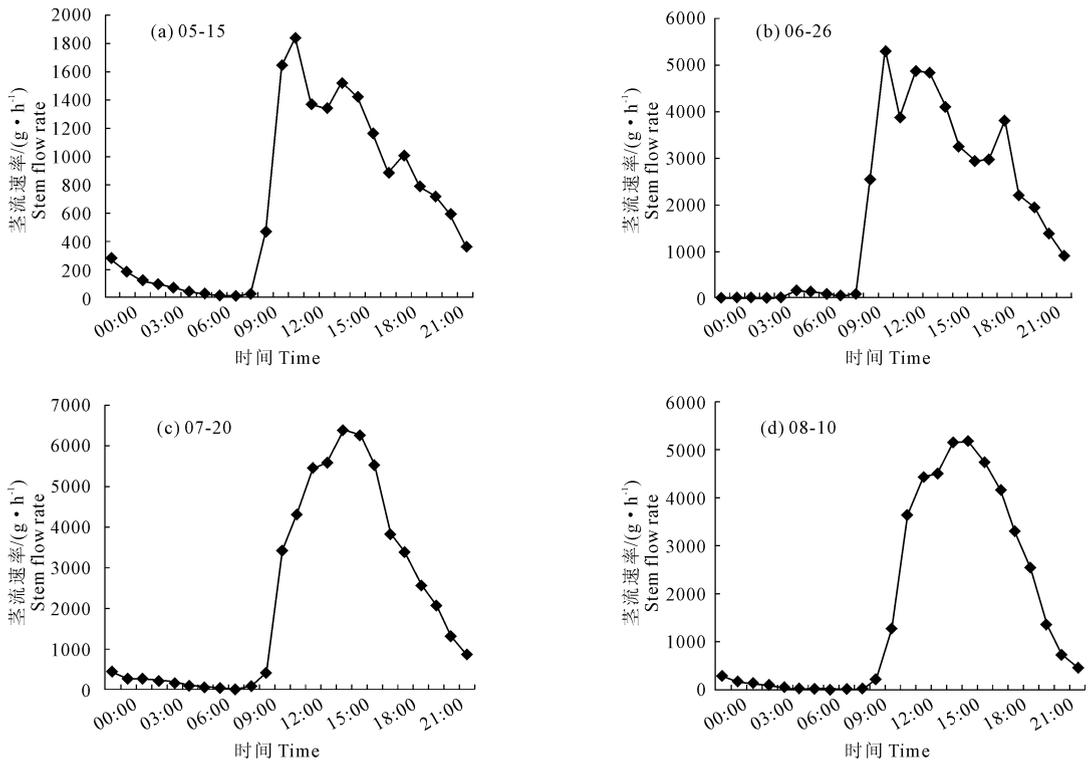


图 1 2010 年枣树茎流日变化曲线

Fig.1 The daily variation curve of stem flow of jujube tree in 2010

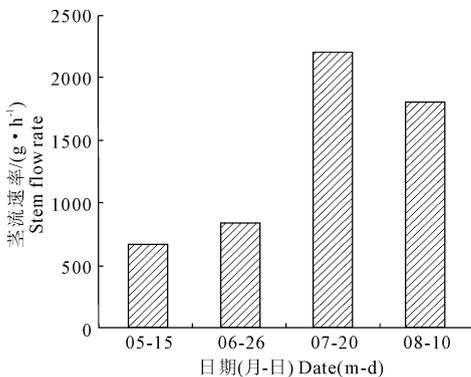


图 2 2010 年不同时间枣树茎流日平均速率变化

Fig.2 The average daily rate change of stem flow of jujube tree for different time in 2010

## 2.2 枣树茎流月变化规律

枣树从发芽到果实成熟所经历的时间较长,在不同的生长发育期对水分的需求差异巨大,也与当时的气候变化有密切关系。5月份的日平均累计流量比较小,到了6月份由于下雨的时间较长,枣树在这个月的日平均耗水量最小,赵自国<sup>[6]</sup>的研究结果也表明在阴雨天气条件下,茎流速率降低,茎流量减少。到了7、8月份,随着温度的升高和雨季的结束,枣树用水量明显增加,8月的日平均耗水累计量最高(见图3)。这可能是由于高温干燥的气候条件和

较为充分的水分供应是造成耗水量高的主要因素。在极端干旱的沙漠地带,有了较为充分的水分供应,植物的蒸腾耗水量十分巨大<sup>[10]</sup>。

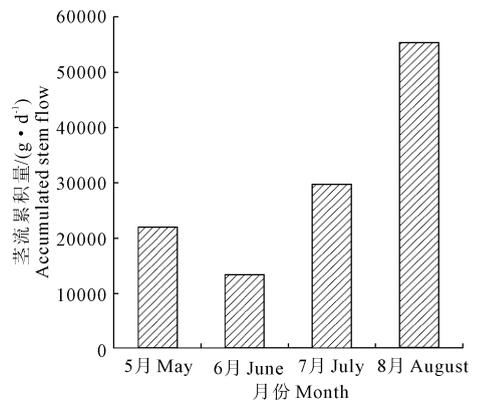


图 3 2010 年不同月份枣树茎流日平均累积流量变化曲线

Fig.3 The change curve of average daily cumulative stem flow of jujube tree in different month, 2010

## 2.3 环境因素对枣树茎流的影响

环境因素对枣树茎流的影响主要是气温和土壤温度两个重要因子,昼夜的最高温度和最低温度变化对枣树的气孔开放起到决定作用。枣树在昼夜温差较小的情况下,有利于枣树的水分运输,产生较大的茎流速率。随着气温升高,枣树的生理功能加强,气孔导度变大,蒸腾作用增强,树干的茎流量变大,

但温度过高引起气孔关闭,茎流速率下降。温度过低也容易导致气孔关闭。地表温度升高,有利于根系的呼吸作用,从而使根能更好地吸收水分,以满足枣树其它部位对水分的需求,但温度过高或过低,都容易造成酶的活性下降,从而使根的生理功能下降,影响水分的吸收,造成水分胁迫。5 月份地表最高温度与茎流量呈极显著负相关,说明这段时间茎流

量随着地表温度升高而下降;6 月份由于整个月份都处于下雨状态,4 个气象因子与茎流量都未达到显著相关;7 月份最高气温与茎流量达到显著正相关;8 月份最高气温与茎流量达到显著负相关(表 1,2);通过以上相关分析表明,枣树的茎流量在不同时期受外部环境因子的影响也不一样,主要是地表最高温度和最高气温对枣树的茎流量影响较大。

表 1 大气与地表温度/℃

Table 1 The atmosphere and land surface temperatures

日期 Date	5 月 May				6 月 June				7 月 July				8 月 August			
	大气温度 Atmosphere temperature		地表温度 Land surface temperature		大气温度 Atmosphere temperature		地表温度 Land surface temperature		大气温度 Atmosphere temperature		地表温度 Land surface temperature		大气温度 Atmosphere temperature		地表温度 Land surface temperature	
	最高 The highest	最低 The lowest	最高 The highest	最低 The lowest												
1	31.2	17.3	45.9	12.7	27.1	15.6	54.1	12.7	28.9	18.0	54.6	16.5	29.8	17.6	51.7	16.8
2	32.1	20.6	56.9	17.2	30.7	16.3	58.4	14.1	26.8	16.0	43.7	13.9	32.7	20.2	55.0	17.9
3	29.6	19.7	54.6	15.4	26.3	16.7	43.4	19.2					35.0	20.9	58.6	18.1
4	23.9	16.6	37.9	14.9	25.1	16.1	47.4	12.4					35.9	22.7	61.5	20.7
5	22.9	17.1	35.7	17.7					30.1	20.0	55.4	16.7	36.9	24.6	61.6	22.3
6									27.9	20.0	53.5	18.4	38.2	24.4	58.0	22.6
7									33.0	20.0	59.1	17.5	38.7	24.1	58.4	21.3
8									35.0	23.0	61.4	19.8	32.5	28.1	44.2	27.8
9	26.9	15.4	57.8	13.6					33.4	22.0	60.3	21.8	31.3	26.0	48.2	25.4
10	27.4	16.1	53.3	11.4					34.7	25.0	55.7	22.0	33.2	21.6	50.9	19.1
11	29.3	17.1	58.7	15.7					33.6	24.0	54.0	21.8	33.4	25.9	52.1	25.0
12	28.6	16.7	53.8	12.4					31.8	22.0	55.7	21.1	35.7	22.4	51.5	18.9
13	27.0	14.9	57.3	10.9					32.7	21.0	55.3	19.5	37.4	24.3	58.6	20.7
14	27.1	12.9	45.0	12.5					29.8	22.0	40.4	21.7	34.6	25.2	50.1	23.5
15	23.5	15.8	54.6	14.5	24.8	16.9	41.5	15.8	32.1	21.0	52.2	18.5	34.6	26.0	47.5	24.4
16	23.8	14.6	49.0	14.3					35.0	24	55.4	21.6	33.8	27.0	48.6	25.7
17	22.3	13.8	52.0	13.5					37.5	24.0	59.9	20.2	34.0	24.8	51.7	22.8
18	19.3	12.0	42.3	11.2					39.1	23.0	62.8	19.6	31.8	24.5	48.2	22.9
19	26.7	12.7	51.8	8.5					33.1	26.0	51.9	23.9	33.0	21.6	48.1	20.6
20	28.1	18.5	60.8	15.5					34.6	21.0	55.8	17.6	29.9	23.2	45.4	21.3
21			56.3	7.4	34.0	19.7	46.9	-19.2	29.9	21.0	40.3	21.4	31.9	18.2	50.4	15.9
22			611.6	11.4	34.6	19.7	62.8	27.0	28.4	19.0	50.6	19.1	31.4	19.0	50.9	16.9
23			58.1	19.0	35.6	22.4	61.5	18.4	29.6	18.0	53.4	17.2	33.4	19.4	53.6	16.0
24			57.4	15.4	35.7	18.5	59.0	16.1	32.8	21.0	57.5	19.9	30.9	21.1	43.8	19.6
25			50.3	14.8	31.5	19.1	50.0	17.0	31.8	22.0	50.1	21.1	27.8		43.8	21.9
26	29.9	13.8	53.4	10.8	30.9	18.1	56.1	16.1	35.6	25.0	60.9	24.1	30.1	21.0	49.6	18.6
27	27.8	18.7	53.9	17.8	29.1	19.4	53.7	18.7	33.7	27.0	54.0	24.2	30.8	22.7	47.3	22.3
28	18.8	10.7	28.4	10.7	30.4	16.6	57.0	14.9	33.3	19.0	55.3	18.5	31.4	22.8	47.4	20.7
29	18.6	9.9	28.5	10.8	32.1	17.8	60.6	16.5	29.2	17.0	49.8	17.3	32.9	19.4	49.1	17.9
30	23.4	10.8	49.9	8.5	28.9	22.7	48.0	20.9	30.0	23.0	50.7	19.5	32.6	21.8	50.6	20.0
31	27.0	13.1	53.9	9.8					24.7	17.0	27.2	19.3	33.0	20.6	51.2	16.5

表 2 茎流量与各气象因子的相关分析

Table 2 Correlation analysis for stem flow with each meteorological factor

月份(y-m) Month	最高气温 Maximum temperature	最低气温 Minimum temperature	地表最高温度 The surface max-temperature	地表最低温度 The surface min-temperature
2010-05	-0.40	-0.36	-0.80**	-0.17
2010-06	-0.24	-0.39	-0.40	-0.07
2010-07	0.52*	0.20	0.34	0.04
2010-08	-0.54*	-0.28	-0.35	-0.22

注: \*  $P < 0.05$ , \*\*  $P < 0.01$

对枣树的茎流量与气温极差和土壤温度极差进行回归分析,并拟合方程,5月份枣树的茎流量与气温极差呈显著相关,而6月份枣树的茎流量与土壤

温度极差呈显著相关,7月和8月枣树的茎流量与土壤温度极差呈极显著相关(表3)。

表 3 枣树的茎流量与气温极差和土壤温度极差曲线模拟

Table 3 The curve simulation for stem flow of jujube tree with air temperature range and soil temperature range

日期 Date	模拟曲线方程 Simulation curve equation	相关系数 R Correlation coefficient	显著性检验 F Significance testing F
2010-05	$Y = -44.5844937 - 0.0004072657476 X_1$	0.8026*	10.8614
2010-06	$Y = 2.585831622 + 2.5823921971 X_2$	0.8801*	9.0349
2010-07	$Y = 20.03213749 + 1.3798935390 X_2$	0.7318**	19.6028
2010-08	$Y = -5.90618143 + 2.3787940358 X_2$	0.8859**	51.0490

注:“\*”显著;“\*\*”极显著“Y”为茎流量,“ $X_1$ ”为气温极差,“ $X_2$ ”为地温极差。

Note: “\*” remarkable, “\*\*” extremely remarkable, “ $X_1$ ” air temperature range, “ $X_2$ ” ground temperature range.

### 3 讨论与结论

本试验是在特殊的沙漠气候条件下,利用包裹式茎流探头准确测定灌木液流,通过单株的耗水量,结合有关尺度扩展理论进一步完善由单木耗水至群体蒸腾耗水的尺度扩展<sup>[11]</sup>。灌溉对沙地的土壤含水量影响很明显<sup>[12]</sup>,通过单株茎流量来预测树木耗水量,可以评估目前的灌水量是否合理,为沙漠地区植物的灌溉和耗水提供参考。本试验地点位于塔克拉玛干沙漠边缘,在夜间有保持一定液流活动的现象,造成这种现象的原因是,在气候极度干燥的情况下,整个生长季枣树都是一个持续的高耗水过程,沙区植被蒸腾强烈,植物体往往处于过度失水状态,所以在夜间仍然存在液流活动,可以弥补植物体内的水分短缺,使白天过度蒸腾受损细胞的生理机能得到逐步恢复,增强了植物耐旱能力<sup>[13]</sup>。在沙漠极端干旱的条件下,枣树的耗水量比较大,如果没有合理的灌溉方法和灌水用量,不仅会影响枣树生长,也可能造成次生盐渍化的发生。

枣树的蒸腾耗水的日变化一般都是随着温度升高茎流量逐渐变大,最大茎流在一天中光照最强的14:00中午前后出现,最小茎流都是出现在凌晨

4:00—8:00,原因可能是由于沙漠腹地环境特殊,夜间空气仍然很干燥,还有空气流动的影响,也存在水分蒸腾散失,这也是夜间仍能保持一定量液流的重要原因<sup>[14]</sup>。

作物在开花至成熟期对温度、水分和光照要求较高,但是影响产量的最关键因素还是水分的供应<sup>[15]</sup>。本试验的结果表明,5月份的日平均累计流量比较小,到了6月份由于下雨的时间较长,气温没有上升到很高,枣树在这个月的日平均耗水量反而最小,到了7、8月份,随着温度的升高和雨季的结束,枣树用水量明显增加,8月的日平均耗水累计量最高。苏培玺在甘肃省河西走廊中部黑河中游对临泽小枣的研究表明枣树的最大需水量在7月份<sup>[16]</sup>。

5月份地表最高温度与茎流量呈极显著负相关,说明这段时间茎流量随着地表温度升高而下降;6月份由于整个月份都处于下雨状态,4个气象因子与茎流量都未达到显著相关;7月份最高气温与茎流量达到显著正相关;8月份最高气温与茎流量达到显著负相关;说明枣树的茎流量在不同时期受外部环境因子的影响也不一样,主要是地表最高温度和最高气温对枣树的茎流量影响较大。

(下转第 111 页)

- ganisms in slaughterhouse sludge-a survey[J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 1996, 33(2-3):245-256.
- [2] György F, Szilveszter B. Composting to recycle biowaste[M]. Sustainable Agriculture Reviews, 2010, (3):319-346.
- [3] Lu Dui'an, Yan Baixing, Wang Lixia, et al. Changes in phosphorus fractions and nitrogen forms during composting of pig manure with rice straw[J]. Journal of Integrative Agriculture, 2013, 12(10):1855-1864.
- [4] Wang X, Selvam A, Chm M, et al. Nitrogen conservation and acidity control during food wastes composting through struvite formation[J]. Bioresource Technology, 2013, 147:17-22.
- [5] 顾兵, 吕子文, 方海兰, 等. 绿化植物废弃物堆肥对城市绿地土壤的改良效果[J]. 土壤, 2009, 41(6):940-946.
- [6] 陈金海, 王红丽, 王磊, 等. 互花米草/羊粪混合堆肥还田对滨海盐碱土壤的改良效应: 实验室研究[J]. 农业环境科学学报, 2011, 30(3):513-521.
- [7] 张旭, 席北斗, 赵越, 等. 有机废弃物堆肥培肥土壤的氮矿化特性研究[J]. 环境科学, 2013, 34(6):2448-2455.
- [8] 罗佳, 蒋小芳, 孟琳, 等. 不同堆肥原料的有机无机复合肥对油菜生长及土壤供氮特性的影响[J]. 土壤学报, 2010, 47(1):97-106.
- [9] 蒋小芳, 罗佳, 黄启为, 等. 不同原料堆肥的有机无机复混肥对辣椒产量和土壤生物性状的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2008, 14(4):766-773.
- [10] Zaller J G, Köpke U. Effects of traditional and biodynamic farmyard manure amendment on yields, soil chemical, biochemical and biological properties in a long-term field experiment[J]. Biology and Fertility of Soils, 2004, 40(4):222-229.
- [11] Wortmann C S, Shmpro C A. The effects of manure application on soil aggregation[J]. Nutrient Cycling in Agroecosystems, 2008, 80(2):173-180.
- [12] Kopicic N, Domanovac M V, Kucic D, et al. Evaluation of laboratory-scale in-vessel co-composting of tobacco and apple waste[J]. Waste Management, 2014, 34(2):323-328.
- [13] Zhou Haibin, Ma Chuang, Gao Ding, et al. Application of a recyclable plastic bulking agent for sewage sludge composting[J]. Biore-source Technology, 2014, 152(6):329-336.
- [14] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 屠宰场羊废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(1):152-156.
- [15] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 不同处理条件下生猪屠宰场废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化研究[J]. 干旱地区农业研究, 2013, 31(2):100-105.
- [16] 张俊华, 刘希凤, 毕江涛, 等. 肉牛屠宰场废弃物堆肥基本性质及微生物区系变化研究[J]. 土壤通报, 2013, 44(3):703-708.
- [17] 鲁如坤. 土壤农业化学分析方法[M]. 北京: 中国农业科技出版社, 1999.
- [18] 中国科学院南京土壤研究所微生物室. 土壤微生物研究法[M]. 北京: 科学出版社, 1985.
- [19] 龚伟, 颜晓元, 王景燕. 长期施肥对土壤肥力的影响[J]. 土壤, 2011, 43(3):336-342.
- [20] 钦绳武, 顾益初, 朱兆良. 潮土肥力演变与施肥作用的长期定位试验初报[J]. 土壤学报, 1998, 35(3):367-375.
- [21] 陶磊, 褚贵新, 刘涛, 等. 有机肥替代部分化肥对长期连作棉田产量、土壤微生物数量及酶活性的影响[J]. 生态学报, 2014, 34(21):6137-6146.

(上接第42页)

#### 参考文献:

- [1] 阳园燕, 郭安红, 安顺清, 等. 土壤-植物-大气连续体 (SPAC) 系统中植物根系吸水模型研究进展[J]. 气象科学, 2004, 32(5):316-321.
- [2] 王沙生, 高荣孚, 吴贯明. 植物生理学[M]. 北京: 中国林业出版社, 1991, 192.
- [3] 解婷婷, 张希明, 梁少民, 等. 不同灌溉量对塔克拉玛干沙漠腹地梭梭水分生理特性的影响[J]. 应用生态学报, 2008, 19(4):711-716.
- [4] 郑睿, 康绍忠, 佟玲, 等. 不同天气条件下荒漠绿洲区酿酒葡萄植株耗水规律[J]. 农业工程学报, 2012, 28(20):99-106.
- [5] 闫业庆, 胡雅杰, 张旭, 等. 不同天气条件下玉米生长期蒸流变化特性及研究[J]. 中国农村水利水电, 2011, (10):1-6.
- [6] 赵自国, 夏江宝, 王荣荣, 等. 不同土壤水分条件下叶底珠 (*Securinega suffruticosa*) 蒸流特征[J]. 中国沙漠, 2013, 33(5):1385-1389.
- [7] 段爱旺. 一种可以直接测定蒸腾速率的仪器-茎流计[J]. 灌溉排水, 1996, 3(14):44-47.
- [8] 罗中岭. 热量法茎流测定技术的发展及应用[J]. 中国农业气象, 1997, 18(3):52-57.
- [9] 刘奉觉, 郑世错, 巨关升, 等. 树木蒸腾耗水测量技术的比较研究[J]. 林业科学, 1997, 33(2):119-125.
- [10] 丁筱玲, 赵立新, 张业民. 植物茎液流速及蒸腾量动态测试仪[J]. 农业工程学报, 2000, 16(3):46-49.
- [11] 马李一, 孙鹏森, 马履一. 油松、刺槐单木与林分水平耗水量的尺度转换[J]. 北京林业大学学报, 2001, 23(4):1-5.
- [12] 马兴祥, 魏育国, 蒋菊芳. 沙漠边缘新垦酿造葡萄园土壤贮水及作物耗水特性研究[J]. 干旱地区农业研究, 2006, 24(4):58-61.
- [13] 岳广阳, 张铜会, 赵哈林, 等. 科尔沁沙地黄柳和小叶锦鸡儿蒸流及蒸腾特征[J]. 生态学报, 2006, 26(10):3205-3213.
- [14] 刘德林, 刘贤超. GREENSPAN 茎流法对玉米蒸腾规律的研究[J]. 水土保持研究, 2006, 13(2):134-137.
- [15] 李宗美, 段金省, 黄斌, 等. 气候变化对陇东塬区农作物生长发育的影响与对策研究[J]. 干旱地区农业研究, 2008, 26(2):219-224.
- [16] 苏培玺, 解婷婷, 丁松爽. 荒漠绿洲区临泽小枣及枣农复合系统需水规律研究[J]. 中国生态农业学报, 2010, 18(2):334-341.