

## 南方避雨栽培下番茄茎流时间序列的小波分析

郑海龙 (高安市水利电力勘测设计室, 江西宜春 330800)

**摘要** 对2013—2015年避雨栽培番茄的试验数据进行收集和整理, 探讨番茄茎流时间变化规律, 采用Morlet小波对南方地区避雨栽培番茄日茎流量变化时间序列进行了小波分析, 揭示了避雨番茄茎流日变化时间尺度的复杂结构, 分析了不同时间尺度下茎流序列变化的周期和突变点, 由此得出存在的不同序列中的主要周期。结果表明: 南方避雨栽培番茄日茎流量变化受天气的因素制约较大, 尤其受气温的影响较大; 平均茎流在一天内均存在09:00、13:30、17:00左右的时间尺度的交替, 有明显的周期特征。小波分析的时频局部化特性可展示茎流时间序列的精细结构, 为分析其他作物茎流时间尺度变化特征提供了参考。

**关键词** 番茄茎流; 时间序列; 小波分析; Merlot函数

**中图分类号** S641.2 **文献标识码** A **文章编号** 0517-6611(2018)16-0189-03

## Wavelet Analysis on Stem Flow Time Series of Tomato under Southern Shelter Cultivation

ZHENG Hai-long (Gao'an Water Conservancy and Electric Survey and Design Office, Yichun, Jiangxi 330800)

**Abstract** Based on the data of tomato under shelter cultivation from 2013 to 2015, the change law of tomato stem flow time was explored, and the wavelet analysis on stem flow time series of tomato under southern shelter cultivation was carried out through Merlot wavelet to reveal the complex structure of daily variation time scale of tomato stem flow. Period and mutation point of stem flow time series of tomato under different time scale were analyzed to get main period existing in different series. The results showed as followed: the stem flow variation of tomato under southern shelter cultivation was limited by weather largely, especially the temperature. The average stem flow had time scales alternate at 09:00, 13:30 and 17:00 in a day, which showed an obvious cycle characteristics. The time-frequency localization of wavelet analysis can show the fine structure of stem flow time series, which can provide reference for analysis on variation characteristics of stem flow time series of the other crops.

**Key words** Tomato stem flow; Time series; Wavelet analysis; Merlot function

茎流是指作物进行蒸腾作用时体内引起的上升液流, 与蒸腾之间存在着必然联系<sup>[1-3]</sup>。研究番茄茎流量序列波动过程可以基本确定植物蒸腾失水量, 从而用以预报、模拟水文变量。番茄茎流表现出相似特征, 随着日照变化而表现出周期变化和非线性过程<sup>[4]</sup>。有学者研究参考作物腾发量时间序列具有长程相关性以及其分形特征<sup>[5]</sup>。而对水文系统时间尺度的研究多局限于分析气温、降雨、径流等时间序列的主周期及变化趋势和分析预报序列的变化规律<sup>[6-9]</sup>, 但有关番茄茎流时间序列分析特征鲜见相关报道。

小波分析是一种信号的时间-尺度分析方法, 研究不同尺度(周期)随时间的演变情况, 具有多分辨率分析和对信号的自适应性的特点<sup>[10]</sup>。笔者采用Morlet小波对南方地区近几年番茄平均茎流量时间序列进行分析, 得到了南方地区近年来番茄茎流量在不同时间尺度上的变化特性, 并运用小波方差图确定了主要的振荡周期, 探讨了其与区域温度的关系, 以期作为作物栽培提供理论依据。

## 1 资料与方法

**1.1 基础数据** 试验时间为2013—2015年每年的4—7月, 在河海大学节水园区(118°50'E, 31°57'N)进行, 试验期间用露天自动气象站观测并自动记录气温、风速、相对湿度、太阳辐射、降雨量及水面蒸发等指标<sup>[11]</sup>。试验共设4个处理, 每天从07:00开始, 每隔1h对每个处理进行试验, 测量其茎流量。为了提高试验的准确性, 最终所取数据为所有天数同时段茎流量的平均值。所选系列的数据经检验分析具有一定的可靠性, 适合参考茎流速率计算分析, 且具有一定的代

表性。

**1.2 研究方法** 小波分析是近年来数字领域发展起来的应用比较广泛的分析方法, 小波变换基于仿射群的平移和伸缩的不变性, 将时间序列分解为多分辨率的时、频的分析, 它可以有效地获取一个错综复杂的时间序列的调整规律, 精确地诊断出环境变化的内在结构, 快速地监测时间序列在不同尺度上的变化规律<sup>[12-13]</sup>。小波函数可定义为: 设 $\varphi(t)$ 为一平方可积函数, 即 $\varphi(t) \in L^2R$ , 若其傅立叶变换 $\psi(\omega)$ 满足容许条件:

$$C_\varphi = \int_{-\infty}^{\infty} \frac{|\psi(\omega)|^2}{\omega} d\omega < \infty \quad (1)$$

则 $\varphi(t)$ 为一个基本小波或小波母函数, 将 $\varphi(t)$ 进行伸缩和平移, 得到连续小波 $\varphi_{a,\tau}(t)$ :

$$\varphi_{a,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{a}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right), a, \tau \in R, a > 0 \quad (2)$$

对于任意函数 $f(t) \in L^2(R)$ 的连续小波变换为:

$$W_f(a, \tau) = \langle f(t), \varphi_{a,\tau}(t) \rangle = \frac{1}{\sqrt{a}} \int_{-\infty}^{\infty} f(t) \varphi\left(\frac{t-\tau}{a}\right) dt \quad (3)$$

式中,  $a$  是尺度因子;  $\tau$  为平移因子;  $W_f(a, \tau)$  为小波系数。

利用Morlet函数对番茄茎流量的时间序列进行连续小波变换, 其小波函数形式如下:

$$\varphi(t) = e^{-t^2/2} \cos(5t) \quad (4)$$

为了获得各序列中对番茄茎流量时间序列变化起主要作用的周期, 采用如下计算公式进行小波方差检验:

$$V(a) = \int_{-\infty}^{+\infty} |W_f(a, b)|^2 db \quad (5)$$

式中,  $V(a)$  为小波方差;  $W_f(a, b)$  为小波系数。

通过小波变换系数的分析, 可辨别番茄茎流量序列中多时间尺度的演变和突变特性。为了削弱小波分析中诊断的

边界效应,应对数据资料进行伸展。该研究将采取对称延伸法,即在资料的数据两侧进行对称延伸,当小波变换完成后再去掉两端的延伸资料数据的小波变换系数,只需保留原始资料数据序列时间内的小波系数。主要利用 Matlab 软件的 Wavelet Toolbox 进行数据的处理和计算。

## 2 结果与分析

**2.1 番茄全生育期茎流量的变化趋势** 各处理试验期内各时间段的平均茎流数据的分布如图 1 所示。试验期内不同时间段所有系列番茄全生育期的平均茎流分布如图 2 所示。通过各试验处理,试验区的平均茎流量为 97.7 g/h,一般在 75~130 g/h 变化。将各时段的平均茎流量序列进行距平处理(表 1)。可以发现,一天时间的早晨到晚上,番茄作物平均茎流量在上午基本呈上升趋势,13:00—14:00 达到最大值,而在下午的时间段则基本呈下降趋势。

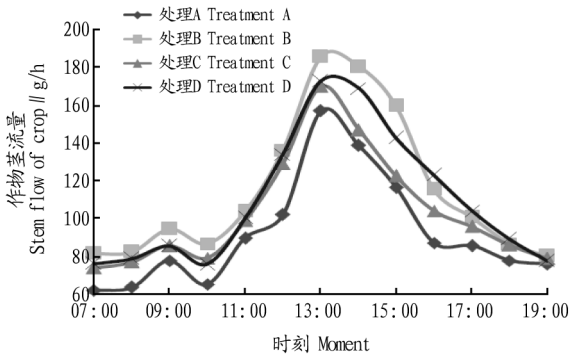


图 1 不同时间段各处理下番茄全生育期的平均茎流量

Fig.1 The average stem flow of each tomato processing under the whole growth period in different time

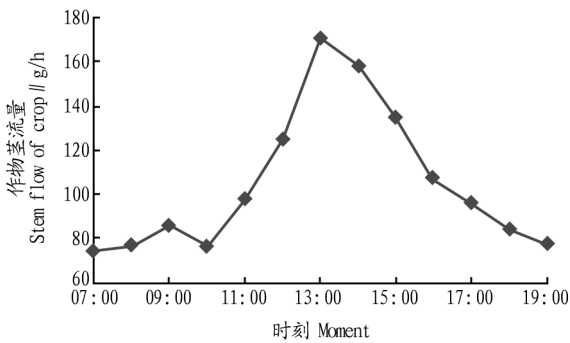


图 2 试验期内不同时间段所有系列番茄全生育期的平均茎流量

Fig.2 The average stem flow of each tomato processing under the whole growth period in different time

**2.2 茎流量时间序列变化的小波分析** 利用 Morlet 小波变换对茎流量变化做时间尺度分析<sup>[14]</sup>。图 3 显示了试验期南方地区避雨大棚内每天各时段番茄平均茎流量在不同时间尺度上的周期变化和振荡情况,其信号的强弱可通过小波系数的大小来反映,在图中通过灰度图来表示。灰度越大,表示茎流量小于正常情况,即茎流量偏少;反之灰度越小,则表示茎流量大于正常情况,即茎流量偏大;小波系数为 0 时则代表突变点。不同时间尺度所对应的茎流量结构不同,并且存在多重时间周期尺度上的嵌套复杂结构现象。由图 3 可知,存在 9 h 左右长时间的振荡周期及 2~4 h 的较短振荡

周期。

表 1 不同时间段各处理下番茄全生育期平均茎流量距平

Table 1 The average stem flow of each tomato processing under the whole growth period anomalies in different time

时刻 Moment	平均茎流量 Average stem flow // g/h	距平 Departure g/h	距平百分比 Percent of departure // %
07:00	74.975	-22.725	-23.326
08:00	77.250	-22.450	-22.979
09:00	85.675	-14.025	-14.355
10:00	76.500	-23.200	-23.746
11:00	97.975	-1.725	-1.766
12:00	125.175	25.475	26.075
13:00	171.150	73.450	75.179
14:00	158.500	60.800	62.231
15:00	135.225	37.525	38.408
16:00	107.250	9.550	9.775
17:00	96.375	-1.325	-1.356
18:00	84.675	-13.025	-13.332
19:00	77.900	-19.800	-20.266

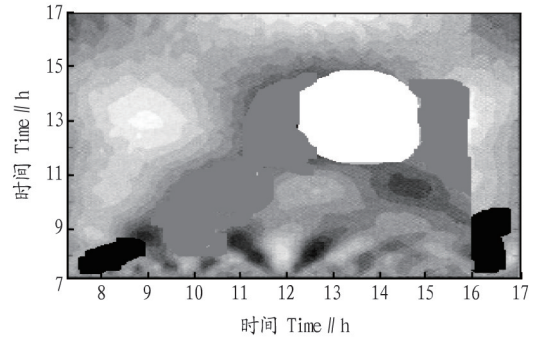


图 3 南方地区避雨栽培番茄日茎流量 Morlet 小波变化系数

Fig.3 Morlet wavelet coefficients of tomato daily stem flow of rain cultivation in the southern region

茎流量在整个周期的较长时间尺度经历了由少到多最终又变为少的循环交替过程(图 4)。在 11:00 以前茎流量偏少,11:00—16:00 平均茎流量偏多,16:00 以后茎流量又偏少。而茎流量在更小的时间尺度也会有一些偏多和偏少的期循环交替。对应于 08:00—10:00 的时间尺度,茎流量也经历了由多到少的变化。

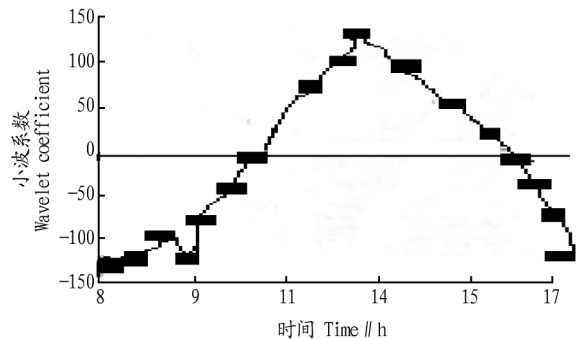


图 4 白昼时尺度的茎流小波系数变化

Fig.4 Variations of stem flow wavelet coefficients on daytime scales

**2.3 茎流的小波方差图** 小波方差图是时间序列下小波方差随尺度  $a$  的变化过程。由式(5)可知,小波方差图能反映信号波动随尺度  $a$  的分布情况。因此,小波方差图可用来确定信号的主周期,且通过小波方差图可以查找一个时间序列中起主要作用的尺度。由图 5 可知,茎流序列在 09:00、13:30、17:00 左右尺度的小波方差极值表现较为显著,说明南方避雨番茄日茎流量变化过程存在 09:00、13:30、17:00 时间附近的主要周期,这 3 个周期的波动决定着番茄茎流速率在一天时间内的变化特征。

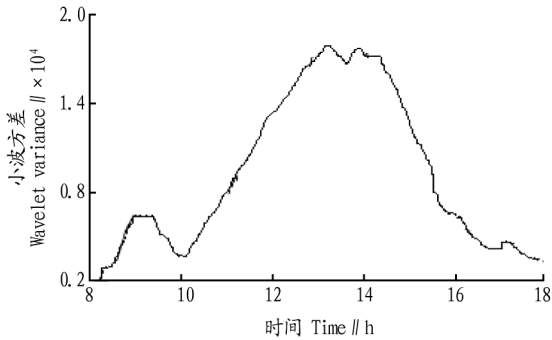


图 5 南方地区避雨栽培番茄日茎流量变化的的小波方差

Fig.5 Morlet wavelet variance of tomato daily stem flow of rain cultivation in the southern region

**3 结论** 小波分析具有时频局部化特性,可以用来描述茎流时间序列的精细结构特征,为分析其时间尺度变化及分布情况提供一种新途径。利用 Morlet 小波变换对南方地区避雨栽培番茄日茎流变化做时间尺度分析。结果显示,日茎流量在 09:00、13:30、17:00 左右存在着显著的周期变化。

(上接第 188 页)

小沿河水生态修复工程对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的修复能力  $\geq 3.7 \text{ mg/L}$ ;对氨氮的修复能力  $\geq 0.36 \text{ mg/L}$ ;对总磷的修复能力  $\geq 0.121 \text{ mg/L}$ 。如用去除率来表示,则小沿河水生态修复工程对  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的修复能力  $\geq 41.57\%$ ;对氨氮的修复能力  $\geq 79.49\%$ ;对总磷的修复能力  $\geq 71.18\%$ 。

(2)小沿河水生态修复工程对水质有显著提升作用。根据对 2012 年入湖口和取水口水质监测资料对比分析可以发现,单项指标  $\text{COD}_{\text{Mn}}$  的水质类别可由原来的 IV 类提升为 III 类;单项指标氨氮的水质级别可由原来的 III 类提升为 I 类;单项指标总磷的水质级别可由原来的 III 类提升为 II 类;综合水质类别由原来的 IV 类提升为 III 类。

#### 参考文献

[1] 颜雷,田庶慧.水生态环境修复研究综述[J].水利科技与经济,2011,17(9):73-75.  
 [2] 叶建锋,操家顺.生态修复技术在保护水库水源地中的应用[J].环境科学与技术,2004,27(2):61-63.  
 [3] 鲁巍,郑燕秋,张韵.太阳能水生态修复系统在水库水质保障体系中的应用研究[J].给水排水,2012,38(S2):73-75.  
 [4] 王文林,殷小海,卫臻,等.太阳能曝气技术治理城市重污染河道试验研

究[J].中国给水排水,2008,24(17):44-48.  
 [5] 陈江,汪雨,王东洲,等.水动力循环复氧控藻技术在城市景观水体富营养化治理中的应用研究[J].安徽农业科学,2013,41(10):4439-4441.  
 [6] 关小侠,李钢,李家振,等.太阳能水生态修复系统在水源地保护工程中的应用[J].中国资源综合利用,2014,30(4):45-47.  
 [7] 宋旭,蔡继杰,丁学锋,等.富营养化水体的物理-生态修复技术发展综述[J].农业环境科学学报,2007,26(S1):465-468.  
 [8] 李文朝.富营养水体中常绿水生植被组建及净化效果研究[J].中国环境科学,1997,17(1):53-57.  
 [9] 陈煜权.河道型水源地水体原位生态净化工程研究:以小沿河为例[J].浙江水利科技,2012(4):15-17.  
 [10] 张建春,彭补拙.河岸带研究及其退化生态系统的恢复与重建[J].生态学报,2003,23(1):56-63.  
 [11] 游灏.五种沉水植物对富营养化水体的生态适应性研究[D].南京:南京农业大学,2006.  
 [12] 张宇,王圣瑞,李重祥,等.沉水植物对富营养化水体的修复作用及其研究展望[J].内蒙古草业,2009,21(1):17-21.  
 [13] TAGUCHI K, NAKATA K. Evaluation of biological water purification functions of inland lakes using an aquatic ecosystem model [J]. Ecological modelling, 2009, 220(18): 2255-2271.  
 [14] 刘足根,张萌,李雄清,等.沉水-挺水植物镶嵌组合的水体氮磷去除效果研究[J].长江流域资源与环境,2015,24(S1):171-181.  
 [15] 张萌,曹特,过龙根,等.武汉东湖水生植被重建及水质改善试验研究[J].环境科学与技术,2010,33(6):154-159.  
 [16] 马井泉,周怀东,董哲仁.水生植物对氮和磷去除效果的试验研究[J].中国水利水电科学研究院学报,2005,3(2):130-134.

#### 参考文献

[1] 张鲁鲁,蔡焕杰.温室膜下滴灌甜瓜茎流变化规律研究[J].吉林水利,2011(5):18-21.  
 [2] 庞鸿宾.节水农业工程技术[M].郑州:河南科学技术出版社,2000.  
 [3] 李国臣,于海业,马成林,等.作物茎流变化规律的分析及其在作物水分亏缺诊断中的应用[J].吉林大学学报(工学版),2004,34(4):573-577.  
 [4] BUNDE A, HAVLIN S, KOSCIELNY-BUNDE E, et al. Long term persistence in the atmosphere: Global laws and tests of climate models[J]. Physica A, 2001, 302(1/2/3/4): 255-267.  
 [5] 谢先红,崔远来,周玉桃.参考作物腾发量时间序列的长程相关性和多重分形分布[J].水利学报,2008,39(12):1327-1333.  
 [6] 张艳艳,钟德钰,吴保生.黄河流域流量的多时间尺度现象[J].水科学进展,2012,23(3):302-309.  
 [7] LABAT D, RONCHAIL J, GUYOT J L. Recent advances in wavelet analyses; Part 2. Amazon, Parana, Orinoco and Congo discharges time scale variability [J]. Journal of hydrology, 2005, 314: 289-311.  
 [8] COULIBALY P, BURN D H. Wavelet analysis of variability in annual Canadian streamflows [J]. Water resources research, 2004, 40(3): 1-14.  
 [9] LABAT D. Recent advances in wavelet analyses; Part 1. A review of concepts [J]. Journal of hydrology, 2005, 314: 275-288.  
 [10] 高成. Matlab 小波分析与应用 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2007.  
 [11] 邵光成,蓝晶晶,仝道斌,等.灌排方案对避雨番茄需水特性与产量的影响[J].排灌机械工程学报,2013,31(1):75-80.  
 [12] 黄磊,张志山,吴攀.沙坡头地区多年降水量时间序列的小波分析[J].兰州大学学报(自然科学版),2010,46(5):63-66.  
 [13] 邵晓梅,许月卿,严昌荣.黄河流域降水序列变化的小波分析[J].北京大学学报(自然科学版),2006,42(4):503-509.  
 [14] 关履泰.小波方法与应用 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2007.