

日污水流量序列的分形特征研究

刘兴坡¹, 周玉文², 甘一萍³

(1. 北京工业大学 环境与能源工程学院, 北京 100022; 2. 北京工业大学 建筑工程学院, 北京 100022; 3. 北京市城市排水集团有限责任公司, 北京 100022)

摘要: 为定量描述污水流量的变化特性, 并获得污水管网非恒定流模拟精度要求的节点流量过程线, 结合某污水处理厂的日进水流量记录应用分形理论对污水流量序列的分形特征进行了研究。结果表明: 整个日流量序列存在分形特征, 而分时期流量序列的分形特征则尚需进一步证实; 对于整个流量序列, 随着滞时的增加则关联维数逐渐增大, 饱和时的关联维数为 1.046 6; 当滞时 $\tau = 1$ d 时, 分时期流量序列的关联维数比整个流量序列的关联维数大; 整个流量序列的盒维数为 1.797 3, 春、夏、秋和冬季流量序列的盒维数分别为 1.593 6、1.425 9、1.555 8 和 1.137 2, 即分时期流量序列的盒维数比整个流量序列的盒维数小。

关键词: 污水流量序列; 分形特征; 分形维数; 关联维数; 盒维数

中图分类号: X832 **文献标识码:** C **文章编号:** 1000-4602(2004)12-0053-03

Study on Fractal Characteristics of Daily Wastewater Flow Sequence

LIU Xing-po¹, ZHOU Yu-wen², GAN Yi-ping³

(1. School of Environmental and Energy Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 2. School of Architectural Engineering, Beijing University of Technology, Beijing 100022, China; 3. Beijing City Municipal Drainage Group Co. Ltd., Beijing 100022, China)

Abstract: In order to describe quantitatively the characteristics of wastewater flow variation, and acquire the node flow hydrographic as required for the analog precision of variable flow in sewer network, study was made on the fractal characteristics of wastewater flow sequence by using fractal theory according to daily influent flow record in a wastewater treatment plant. The result shows that the fractal characteristics exist in entire daily flow sequence, while the fractal characteristics of time-sharing flow sequence is to be confirmed. For the entire daily flow sequence, the associate dimension is increased along with the gradual increase of lag time. The associate dimension at saturation is 1.046 6; when lag time, τ is 1 d, the associate dimension of time-sharing flow sequence is larger than that of entire flow sequence. The box dimension of entire flow sequence is 1.797 3, the box dimension of flow sequence in spring, summer, autumn and winter is 1.593 9, 1.425 9, 1.555 8, and 1.137 2, that is, the box dimension of time-sharing flow sequence is smaller than that of entire flow sequence.

Key words: wastewater flow sequence; fractal characteristics; fractal dimension; associate dimension; box dimension

基金项目: 北京市教委科技发展计划项目(0500479200201)

建立和应用排水管网管理模型的前提之一是获得节点流量过程线。节点流量的变化过程一般以等间距的时间序列来表示,但各种排水管网对入流序列采样间隔的要求不同,雨水管网一般要求入流过程的时间间隔 $< 5 \text{ min}^{[1]}$,而污水管网特别是室内污水管道则需要更小的时间步长^[2],实际上很难达到这样的精度。解决该问题的途径之一是建立不同时间尺度流量变化的联系,从而从一种时间尺度的流量及其变化特性去认识和推知另一种时间尺度的流量及其变化特性^[3]。为此,引入分形理论对污水流量过程进行了研究。

应用分形理论进行污水流量序列建模的潜在意义在于:①分形维数可以表征污水流量变化过程的不规则程度(若存在分形的话),可为刻画污水流量变化过程提供定量指标。②如果存在分形,那么就可以建立整个序列流量变化与每个时间尺度内流量变化之间的某种相似关系(如自相似、自仿射等),从而可以得到更小时间尺度上的流量变化特征,这对于提高节点流量过程线的时间精度以及污水管网系统非恒定流模拟计算的精度均是有利的。

1 分形维数的计算方法

实际存在的分形基本上为统计意义上的分形。为了考察一个事物是否存在局部和整体的相似性,只要检测该事物是否存在“无标度区域”即可,方法为:以尺度 r 将事物划分成 $N(r)$ 个相似的部分,对变化的 r 作对数曲线,如存在明显的直线段则该段的 r 范围即是无标度区域。

对于复杂的分形,原则上要用多种维数来表征,但实际中常应用较容易计算的维数。最便于直接测量的维数是关联维数(D_2),它只依赖于少量的试验数据,可以比较容易地得到结果^[4]。此外,还可以用计盒法计算盒维数。

2 实例研究

污水厂可视为污水管网末梢的特殊节点,故采用某污水厂的日进厂流量进行研究。该厂服务人口为 10 万人,服务面积约 148 hm^2 ,设计规模为 $4 \times 10^4 \text{ m}^3/\text{d}$,主要收集住宅生活污水。图 1 是该厂 2002 年 1 月 1 日—2003 年 8 月 31 日的日进水流量记录。

2.1 关联维数的计算

2.1.1 整个日流量序列的分形特征

首先将整个实测流量序列作为一个时间序列进

行研究,结果见图 2。

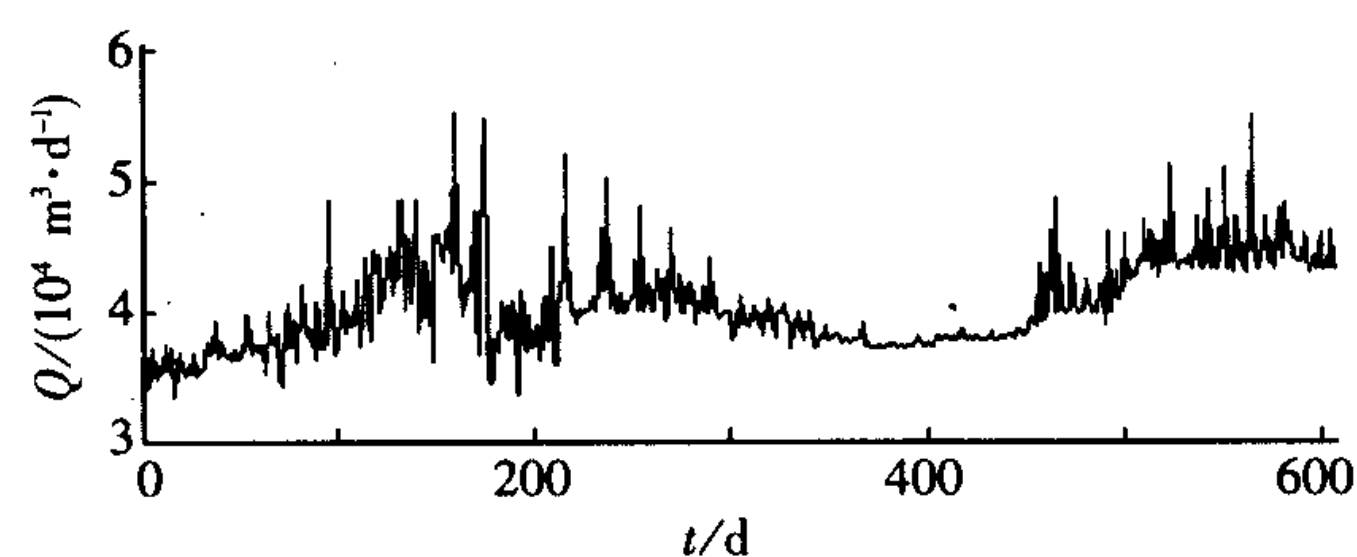


图 1 污水流量记录

Fig. 1 daily sewage flow records of a wastewater plant

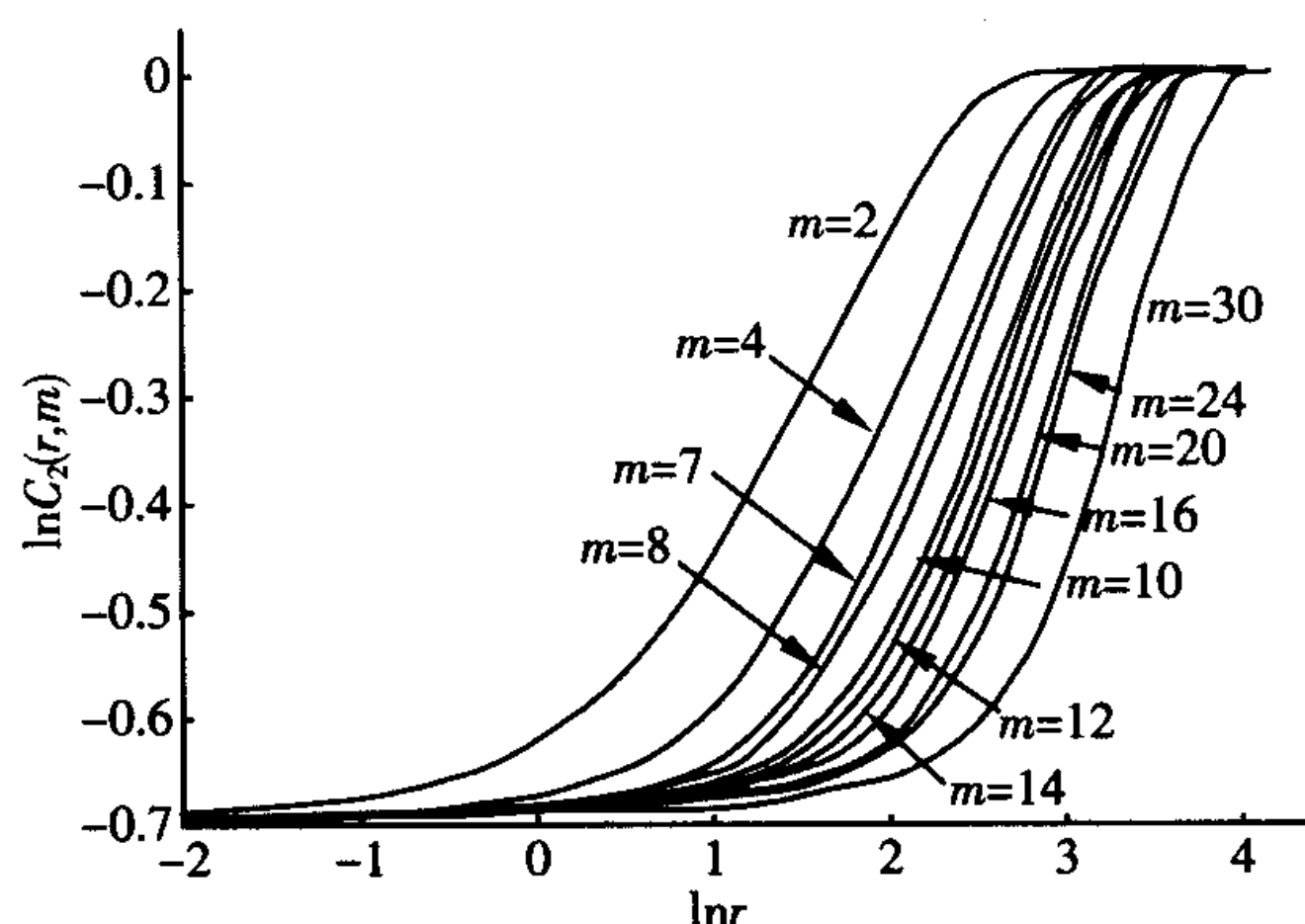


图 2 不同 m 时 $\ln C_2(r, m)$ 与 $\ln r$ 的关系

Fig. 2 The relation between $\ln C_2(r, m)$ and $\ln r$ with different embedding dimension

由图 2 可知, $\ln C_2(r, m) - \ln r$ 曲线上存在明显的直线段。当相空间嵌入维数(m)较小时直线的斜率也较小,彼此之间的间隔较大;随着 m 值的增加则这些直线的斜率逐渐增大,其间隔变小,逐渐靠拢;当 $m \geq 8$ 时各条直线密集且相互间趋于平行,斜率不再随着 m 值的增加而发生较大的变化,即 D_2 不再随 m 的增加而变化,表现出无标度区的存在,这就初步证实了分形特性的存在。通过直线拟合,得到饱和时的关联维数为 0.488 7。

为保证数据之间的独立性,进一步对滞时 $\tau = 2\Delta t$ ($\Delta t = 1 \text{ d}$)、 $\tau = 4\Delta t$ 、 $\tau = 8\Delta t$ 三种情况进行了研究,结果发现,在不同的滞时下污水流量序列的嵌入维数均能达到饱和,这进一步支持了该污水流量序列存在分形特征的结论,且随着 τ 的增大,流量序列的 D_2 也逐渐增大(见表 1)。

表 1 污水流量序列关联维数与滞时的关系

Tab. 1 The relation between the correlation dimension of sewage flow series and delay time

项目	$\tau = \Delta t$	$\tau = 2\Delta t$	$\tau = 4\Delta t$	$\tau = 8\Delta t$
D_2	0.488 7	0.508 8	0.749 9	1.046 6

综上所述,该污水流量序列不仅存在分形特征,而且污水流量变化的差异不太明显,作为一个序列进行整体研究是可行的。

2.1.2 分时期日流量序列的分形特征

从严格的统计意义上讲,同一时期流量过程的结构才具有自相似性^[5]。为此,将流量序列分成春(3月—5月)、夏(6月—8月)、秋(9月—11月)、冬(12月—2月)4个时段,进一步探求了分时段流量过程的分形特征。结果表明,当 $\tau = 1$ d时春、夏和秋季流量序列的 $\ln C_2(r, m) - \ln r$ 曲线上均存在明显的直线部分, m 也能够达到饱和,存在无标度区。相对而言,冬季流量序列的直线部分较短,尚需进一步研究。

研究中也发现,当 $\tau = \Delta t$ 时夏季流量序列的关联维数(0.911 6)最大,然后依次为冬、秋和春季(分别为0.828 9、0.824 2、0.578 7);当 $\tau = 2$ d时,夏季流量序列的分形维数达到了1.561 3,比 $\tau = 1$ d有较大增长。因此, $\tau = 1$ d时的关联维数还不能作为最终结果,进行多个滞时的分析颇有必要。此外,在等滞时的情况下分时段流量序列的关联维数($\tau = 1$ d时)比整个流量序列的关联维数要大。

2.2 盒维数的计算

2.2.1 整个流量序列的盒维数

首先将所有实测流量作为一个时间序列来研究,并对原始流量序列进行归一化处理,然后选择若干个标度 r 值,计算测度 $N(r)$,结果见表2。

表2 尺度为 r 时的 $N(r)$ 计算结果

Tab.2 The results of scale r and $N(r)$

r	1/607	1/303	1/151	1/75
$N(r)$	10 529	3 163	868	249

利用最小二乘回归方法拟合 $\ln N(r) - \ln r$ 直线的斜率,得到整个流量序列的盒维数为1.797 3。

2.2.2 分时期的盒维数

同理计算春、夏、秋和冬季4个时期的盒维数。结果表明,各个时期的 $\ln N(r) - \ln r$ 均能成一直线,表明存在分形特征。分时期流量序列的盒维数计算

结果见表3。

表3 分时期流量序列的盒维数

Tab.3 The boxdimension of the flow series in different periods

项目	春季	夏季	秋季	冬季
盒维数	1.593 6	1.425 9	1.555 8	1.137 2

3 结论

- ① 整个日污水流量序列存在分形特征,分时期流量序列的分形特征尚需进行更多滞时的分析。
- ② 对于整个流量序列,随着滞时的增加则关联维数逐渐增大,饱和时的关联维数为1.046 6。
- ③ 等滞时情况下($\tau = 1$ d),分时期流量序列的关联维数比整个流量序列的关联维数大。
- ④ 整个流量序列的盒维数为1.797 3,春、夏、秋和冬季流量序列的盒维数值分别为1.593 6、1.425 9、1.555 8和1.137 2,即分时期流量序列的盒维数比整个流量序列的盒维数要小。

参考文献:

- [1] Greene R G, Cruise J F. Urban watershed modeling using geographic information system [J]. Journal of Water Resources Planning and Management, 1995, 121(34): 318 - 325.
- [2] Butler D, Graham N J D. Modeling dry weather wastewater flow in sewer networks [J]. Journal of Environmental Engineering Division, 1995, 121(2): 161 - 173.
- [3] 丁晶,王文圣,金菊良. 论水文学中的尺度分析 [J]. 四川大学学报(工程科学版), 2003, 35(3): 9 - 13.
- [4] 黄润生. 混沌及其应用(第2版) [M]. 武汉: 武汉大学出版社, 2000.
- [5] 傅军, 丁晶. 嘉陵江流域形态及流量过程分维研究 [J]. 成都科技大学学报, 1995, (1): 74 - 80.

电话: 13521091202

E-mail: liuxpv@sohu.com

收稿日期: 2004 - 07 - 31

保护自然 保护水源 人类共同的责任