

DOI: 10.3876/j.issn.1000-1980.2020.06.005

时空多特征流域场景模式库构建方法

巫义锐 汪浩航 魏大保 冯 钧

(河海大学计算机与信息学院 江苏 南京 211100)

摘要: 通过构建流域时空场景表征水文事件,提出一种创新的时空多特征流域场景模式库构建方法。对水文原始数据进行事件化分割,去除场景要素数据的时空冗余;基于要素关联关系分析,以多类型方法构造场景要素的对应特征;通过特征选择算法,选取场景关键特征,实现场景初始化;以初始化场景为特征空间,通过聚类提取场景模式,完成场景模式库构建。试验结果表明,创新的时空多特征流域场景模式库构建方法能高效提取水文事件中关键的时空场景数据,挖掘场景模式,形成场景模式库,可以为小样本条件下的水文事件预测提供准确高效的结果。

关键词: 流域时空场景; 场景模式库; 多元时序; 特征提取; 时序聚类

中图分类号: TU122 文献标志码: A 文章编号: 1000-1980(2020)06-0514-07

Construction method of watershed scene pattern library via spatio-temporal multiple features

WU Yirui, WANG Haohang, WEI Dabao, FENG Jun

(College of Computer and Information, Hohai University, Nanjing 211100, China)

Abstract: By representing hydraulic events via constructing multiple features of the watershed spatio-temporal scene, this study proposed a construction method of watershed scene pattern library via the spatio-temporal multiple features. The original hydrological data was firstly divided into events to remove the spatio-temporal redundancy of scene element data. Based on the analysis of element association relation, the corresponding features of scene elements were constructed via multiple ways. Afterwards, key features of watershed scene were selected by the feature selection algorithm to realize the scene initialization. Finally, the initial scene was regarded as the feature space, where the cluster extraction of scene pattern and scene pattern library construction could be carried out. Experimental results show that the proposed method can not only extract the key spatio-temporal scene data of hydrological events, but also mine scene patterns to form a scene pattern library, thus providing accurate and efficient prediction results for the hydrological event with small dataset.

Key words: watershed spatio-temporal scene; scene pattern library; multivariate time series; feature extraction; time series clustering

如何提取水文数据间的非线性映射关系,准确高效地提供数据驱动模型的模拟结果,是人工智能技术在水文领域实例化的研究热点。然而,在实际应用中,原始水利数据的样本量往往不能满足人工智能模型的数据需求。因此,如何提高数据的精细化程度以扩充数据信息,提升人工智能模型的性能,成为智慧水利研究者关心的话题。

基于水文数据的时空本征特性,本文拟构建细粒度的时空场景,用以扩充数据信息。例如,水华管理主题中的污染因素复杂多样,包括氮、磷含量等,拟构建不同水华场景,重点监测该场景中导致水华发生的关键污染因素,总结数据特征,提取场景模式,提高水华预测的准确性。基于上述分析,本文将场景定义为表征流

基金项目: 国家重点研发计划(2018YFC0407901)

作者简介: 巫义锐(1989—),男,副教授,博士,主要从事智慧水利研究。E-mail: wuyirui@hhu.edu.cn

通信作者: 冯钧,教授。E-mail: fengjun@hhu.edu.cn

引用本文: 巫义锐,汪浩航,魏大保,等.时空多特征流域场景模式库构建方法[J].河海大学学报(自然科学版),2020,48(6):514-520.

WU Yirui, WANG Haohang, WEI Dabao, et al. Construction method of watershed scene pattern library via spatio-temporal multiple features [J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences) 2020, 48(6): 514-520.

域典型变化趋势的关键要素数据集。步骤如下: (a) 对原始数据进行事件化分割; (b) 通过水利数据间关联关系建模, 提取场景要素特征; (c) 基于特征选择方法, 提取关键特征以初始化场景; (d) 场景聚类以提取场景模式, 构建高效的场景模式库。

1 场景模式库相关工作

水利大数据多为时序数据, 本文通过时序分割、时序特征提取、时序聚类技术构建时空场景模式库。以下主要介绍这 3 项技术的相关工作。

a. 多元时间序列分割技术。该技术具有数据结构多变、各元数据之间关系错综复杂、计算量大等特点。多元时间序列分割方法可分为基于模糊聚类与基于动态规划的多元时间序列分割。Wang 等^[1]提出了基于 Gath-Geva 聚类算法的多元时间序列分割方法, 将数据时间信息作为额外的变量加以考虑, 并引入最小信息长度原则, 实现了精准的多时序分割。Guo 等^[2]利用动态规划算法, 提高分割断点的查询速度, 减少了多元时序分割计算的时间复杂度。Bankó 等^[3]基于阈值自回归模型, 实现了多变量时间序列的同步分割, 并将其应用于水文气象数据集。

b. 时序特征提取技术。该技术可分为基本统计方法和基于变换的特征提取技术。前者提取统计特征来表征原有时序数据, 常见的时域统计特征值有均值、方差、极值、过零点、边界点等^[4], 频域统计特征值包括功率谱、功率密度比、中值频率、平均功率频率等。后者则意图强调适合任务的特性部分, 可分为时频、线性、模型变换。时频变换包括快速傅立叶变换、短时傅立叶变换、倒谱系数等, 线性变换包括 PCA、线性判别式分析等。模型变换使用智能算法描述时间序列本征特征, 进而提取模型系数为特征向量。例如对于水文领域的平稳时间序列, 研究者常使用 ARMA 模型(自回归滑动平均模型)及滑动平均模型(MA)或组合-ARMA 模型等进行拟合^[5]。

c. 时序聚类技术。该技术可分为 3 类, 分别为基于原始数据、基于特征和基于模型的时间序列聚类算法。第一类方法直接将传统的聚类算法应用于时间序列数据。基于 K-means 聚类方法, Huang 等^[6]使用 DTW 距离度量方式对时间序列的平滑子空间进行聚类。第二类方法先从原始序列中提取具有代表性的特征, 再通过聚类算法对特征序列进行聚类分析。嵇敏等^[7]通过正交函数将高维时间序列转换到低维空间, 并结合函数度量实现模糊 C 均值聚类, 其中 C 指聚类中心个数。第三类方法可大致分为 2 种方法^[8]: 统计学习方法(如 ARMA)^[9]和人工神经网络方法(如 SOM)^[10]。该类方法能够挖掘时间序列数据的随机性以及潜在的数据规律, 但算法建模复杂, 计算量大。

2 场景模式库构建方法

构建场景模式库的技术路线如图 1 所示。首先通过多元时序分割技术, 从原始时序数据中提取出相关的多元时序数据, 并挖掘各元数据间的相关性, 形成场景要素数据。场景要素定义为组成场景的数据类型集合。由于多元时序场景数据难以计算, 使用混合特征提取技术提取时空特征, 实现信息降维和增强。最后, 对时空特征数据进行聚类, 构建场景模式库。

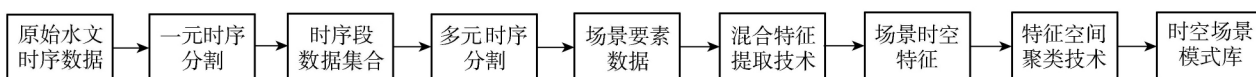


图 1 时空多特征流域场景模式库构建技术路线

Fig. 1 Technical route of watershed scene pattern library construction via spatio-temporal multiple features

2.1 多元时序异步分割技术

多元时序分割技术的目的是从原始时序数据中提取出相关事件的多元时序数据。如某站点发生了一次水质富营养化事件, 由于水质富营养化事件的复杂性, 各元数据变化会呈现异步发生规律。基于水利事件的异步特征, 该技术首先对各元数据进行一元时序分割, 获取具有事件特征各元分割数据; 而后使用距离度量公式依次度量各二元分割数据, 从中关联相似和相关的分割数据, 划分分割组; 最后合并具有交集的分割组, 获取多元时序异步分割数据。将多元时序序列定义为

$$X = (x_1, x_2, \dots, x_n) = \begin{bmatrix} x_{1,1} & \dots & x_{n,1} \\ \vdots & & \vdots \\ x_{1,m} & \dots & x_{n,m} \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: X ——某站点所测的多元时序数据; x_i ——第 i 个属性对应的时序数据。

2.1.1 一元时序分割

定义一元时序数据的分割结果如下:

$$S(x_i) = \{s_{i,k} \mid k \in [1, l(x_i)]\} \quad (2)$$

其中

$$s_{i,k} = \langle x_{i,l(k)-w/2}, x_{i,l(k)-w/2+1}, \dots, x_{i,l(k)+w/2} \rangle$$

式中: $S(x_i)$ ——第 i 个属性时序数据分割结果是一个分割段集合; $s_{i,k}$ ——第 i 个属性时序数据中的第 k 个分割段; $l(x_i)$ ——第 i 个属性时序数据分割数目; $l(k)$ ——第 k 时序段中间数据的位置; w ——时序分割段的长度。如算法一所示,采用极值点方式,提取一元时序分割段。该算法中, $\text{len}(x_i)$ 表示 x_i 所代表时序数据的长度。所提取特征点的值需为极值,且大于阈值。

算法一 一元时序分割。输入:一元时序数据 x_i 阈值: threshold; 输出: $S(x_i)$ 。步骤如下:

```
Result = {}
k = 1
for j = 1 to len(x_i) do
  if x_{i,j} > threshold and x_{i,j} > x_{i,j-1} and x_{i,j} > x_{i,j+1} do //寻找特征点
    l(k) = j
    Result.append(s_{i,k}) //存储含有特征点的分割段
    k++
  end if
end for
S(x_i) ← Result
[Result S(x_i)]
```

2.1.2 相似度量方式

时序数据之间度量方式主要分为2种:相关性和相似性^[11-12]。相关性一般采用皮尔逊相关系数公式,相似性则采用DTW距离度量公式。皮尔逊相关系数只能度量线性相关性,同时要求所输入的数据维度相同。DTW距离公式可以度量非等长的时序数据,但是只能度量正相关时序数据间的距离,在负相关数据上,其度量性能较差。本文所处理的水文时序数据存在负相关,且输入维度不同,因此提出将两者相结合的新度量方式:

$$DTWCorr(X, Y) = \frac{DTW[X - E(X), (-1)^t(Y - E(Y))]}{1 + |\rho(X - E(X), Y - E(Y))|}$$

其中

$$t = \begin{cases} 0 & \rho(X - E(X), Y - E(Y)) \geq 0 \\ 1 & \rho(X - E(X), Y - E(Y)) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中: $E(\cdot)$ ——期望函数; $\rho(\cdot)$ ——2个等长时序序列的相关性。

当输入数据呈正相关时,分子等价于直接使用DTW公式度量时序数据间的距离;当输入数据呈负相关时,在分子中,先将输入数据 Y 进行一次轴对称变换,将输入数据之间的负相关转变成正相关,然后使用DTW距离度量。在分母中,当输入数据越趋向于正相关和负相关时,分母的值就越大,距离值越小,相似性越大,分母加一的作用是防止分母出现为零的情况。

2.1.3 多元时序分割

如算法二所示,通过一元时序分割和改进的相似度量公式对多元时序数据进行分割。

算法二 基于改进相关度量方式的多元异步时序分割。输入:多元原始时间序列 X ; 输出:多元异步分割数据集 MultiSegSet 步骤如下:

```
SegSet = {}
第一步: for i = 1 to len(X) do //一元时序分割
  SegSet[i] = S(x_i)
end for
```

```

//利用度量公式获取相邻两元之间相似的分割数据集
第二步: for i=1 to len( X ) -1 do
    //分割数据集之间度量
    SegCorr [i] = Correlation( SegSet [i] ,SegSet [i+1 ] )
end for
//合并校正相邻两元的分割时序 ,组合成多元异步分割数据
第三步: for i=1 to len( X ) -1 do
    MultiseSet = MergeSeg( MultiSeg ,SegCorr [i ] )
end for
Return MultiSegSet
//挖掘两个分割数据集中的关联分割段
function Correlation( SegSet [i ] ,SegSet [j ] )
    Result = { }
    for x in SegSet [i ] do //遍历第一个分割数据集
        Min = inf; temp = null
        for y in SegSet [j ] do //遍历第二个分割数据集
            if Uion( x ,y ) ! = null and DTWCorr( x ,y ) do // 关联条件
                //挖掘相似距离最小的分割段
                Min = DTWCorr( x ,y )
                temp = y
            end if
        end for
        Result. append( <x ,y> ) //将关联的分割段保存
    end for
    return Result
//MX→<mx1 ,mx2 ,⋯ ,mxn> ,MY→<my1 ,my2>
function MergeSeg( MX ,MY ) //返回合并分割段
    Result = { }
    //threshold = 0.5 合并条件 ,保持上下连接性
    if Union( mxn ,my1 ) > threshold do
        Result. append( <mx1 ,mx2 ,⋯ ,mxn ,my2> ) //保存结果
    end if
    return Result

```

算法二中, $Correlation(\cdot)$ 函数功能为挖掘 2 个分割数据集中的关联分割段,其输入为 2 个一元时序分割集,输出是关联分割数据集。 $MergeSeg(\cdot)$ 函数合并具有相同分割段的关联分割段,最后得到多元时序分割数据,输入的第二个参数为已经进行多个关联分割数据集合并的结果,第二个参数为只含有 2 个分割数据集的关联分割段,其中 mx_i 和 my_j 为一元时序分割段,和 $s_{i,k}$ 结构是相同的,在这里为了方便叙述,因而使用新的符号进行代替。

2.2 混合特征提取技术

基于多元时序分割技术获取的不同场景,挖掘与构造场景数据特征^[13]。综合 2 种特征提取方式构建混合特征提取。首先,采用傅里叶变换方式,将数据从时域空间变换到频域空间;然后,利用统计方法从频域幅度值中提取特征。选取均值、标准差、最大值、最小值、过零点数这 5 个特征数值用于统计特征构建。

傅里叶变换可以将数值从时域空间转换到频域空间,由于所监测的水文数据为离散数据,同时计算机内运算使用的为离散数值,因而使用离散傅里叶变换。为了在科学计算和数字信号处理等领域使用计算机进行傅里叶变换,必须将函数定义在离散点上而非连续域内,且需满足有限性或者周期性条件,这种情况下,序列 $(x_n)_{n=0}^{N-1}$ 的离散傅里叶变换(DFT)为

$$X(r) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n e^{-i2\pi kn/N} \quad (9)$$

式中: $X(r)$ ——频率为 r 时的幅度值, 因此 $X = \langle X(1), X(2), \dots, X(N-1) \rangle$ 。直接将幅度值序列作为特征, 在计算过程中效率低下, 因而采用时序统计特征方法对幅度值序列进行特征提取。

2.3 基于 K -means 聚类方法的场景模式库构建技术

通过时序特征提取技术, 可以将各个站点各个时间区内的数据进行特征提取, 大大减少了冗余数据, 缩短数据的规模, 有利于数据进行聚类^[14], 挖掘其相似场景以及场景之间的相关性, 从而构建场景模式库, 由于目前提取的特征为数值本身特征, 而忽略数据的时空信息, 因而在聚类之前, 进行时空特征提取, 综合混合特征和时空特征, 使用传统 K -means 算法^[15] 对数据进行聚类, 构建时空场景模式库。

多特征时空场景模式库主要分为 3 个步骤: 第一步, 对样本中的场景数据进行混合特征提取; 第二步, 对场景数据进行时空特征提取; 第三步, 对特征数据进行归一化, 使用 K -means 聚类算法对特征数据进行聚类, 聚类后的特征数据所对应的场景数据为场景模式库。

算法三 基于多特征的 K -means 聚类算法。输入: 样本集 $\text{MultiSegSet} = \{ \text{MultiSeg}_1, \text{MultiSeg}_2, \dots, \text{MultiSeg}_m \}$ 和聚类簇数 k ; 输出: 簇划分。步骤如下:

```

//对样本数据提取混合特征
MultiMixFeatureSet = { MixFeature1, MixFeature2, ..., MixFeaturem }
//对样本数据提取时空特征
STFeatureSet = { STFeature1, STFeature2, ..., STFeaturem }
//合并混合特征和时空特征并归一化
FeatureSet = { Feature1, Feature2, ..., Featurem }
从 FeatureSet 中随机选择  $k$  个样本作为初始均值向量 ( $u_1, u_2, \dots, u_k$ )
repeat
  令  $C_i = \emptyset (1 \leq i \leq k)$ 
  for  $i = 1, 2, \dots, m$  do
    //计算样本 featurej 与各均值向量  $u_i (1 \leq i \leq k)$  的距离(欧氏距离):
     $d_{ij} = \| \text{feature}_j - u_i \|_2$ 
    根据距离最近的均值向量确定 featurej 的簇标记:  $\lambda_j = \text{argmin}_{i \in \{1, 2, \dots, k\}} d_{ji}$ 
    将样本  $x_j$  划入相应的簇:  $C_{\lambda_j} = C_{\lambda_j} \cup \{ \text{feature}_j \}$ 
  end for
  for  $i = 1, 2, \dots, k$  do
    计算新均值向量:  $u'_i = \frac{1}{\| C_i \|} = \sum_{f \in C_i} f$ 
    if  $u'_i \neq u_i$  then
      将当前均值向量  $u_i$  更新为  $u'_i$ 
    else
      保持当前均值向量不变
    end if
  end for
Until 当前均值向量均未更新
return  $S = \{ C_1, C_2, \dots, C_k \}$ 

```

3 水利数据集试验

3.1 试验说明

试验使用引江济太水量水质数据, 该数据包含 207 个水质测站所测的数据。每个站点水质监测的场景要素数据为: 水温、透明度、溶解氧(DO)、pH、电导率、化学需氧量(COD)、总磷(TP)、氨氮等, 其中某些湖泊站点包含叶绿素浓度、浮游植物等指标。选择 2008 年贡湖水厂所监测的总氮(TN)、总磷以及透明度数据进行试验。

先用一元时序分割技术对各个场景要素数据进行一元分割, 后使用滑动窗口对分割数据采样, 防止数据存在缺失和冗余情况发生, 再使用改进的相关度量方式度量各场景要素数据间关系, 最后合并具有相关关系

数据,实现多场景要素关联及多元时序分割。在本试验中,采用基于动态规划(MDS)的和基于 Gath-Geva 模糊聚类(MFS)的多元时序分割方法作对比试验。在基于动态规划的多元时序分割试验中,设置分割阶数为 7。在基于模糊聚类的多元时序分割试验中,设置聚类个数为 2。

3.2 试验结果

图 2 展示了人工分割多元时序的理想结果,其中 TN、TP 以及透明度数据的变化具有一定的滞后性。此外可发现分割段中的 TN 和 TP 具有一定相似性,透明度则和 TN 分割段成负相关关系。图 3 是本文使用的多元分割方法,可看到时序被分割成 6 段,且每段各元数据在不同时刻分割。该结果仍具有缺陷,例如在 TP 分割段中,第 4、5 和 6 段重合,与实际情况不符,该方法仍需要改进。图 4 是基于模糊分类的多元分割结果。分割段中各元数据都在同一时刻进行分割,但该方法将时序分割过多段数,存在分割段长度过小,如第 5、6、7 段,分割段过长,如第 8、9 段。同时无法发现分割段各元之间的明显关系。图 5 是基于动态规划的多元分割结果,主要分割成 6 段,其中某一段分割过小,在实际中舍去;从分割结果上看出,该方法依然存在基于模糊聚类的多元分割方法的缺陷。

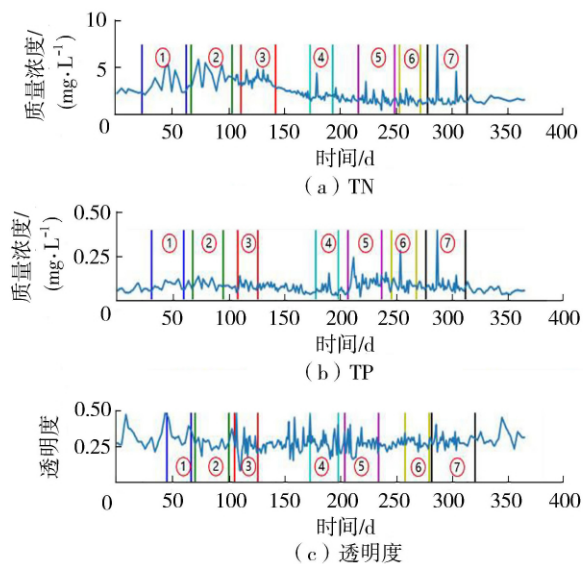


图 2 多元时序人工分割

Fig. 2 Experimental results of multivariate time series by manual segmentation method

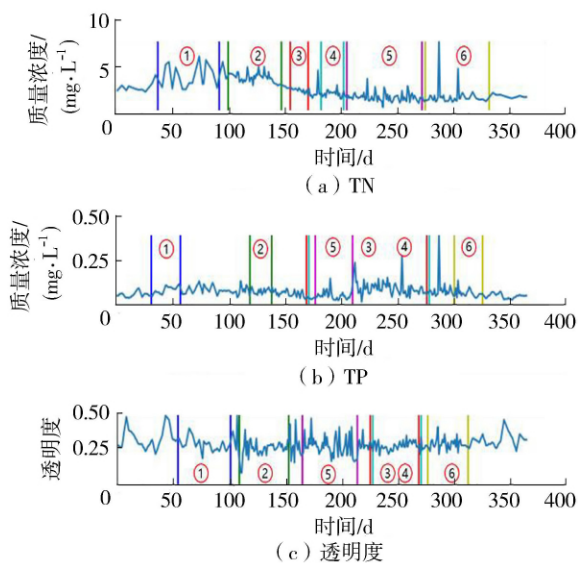


图 3 基于本文所提方法的多元时序分割

Fig. 3 Experimental results of multivariate time series by proposed method

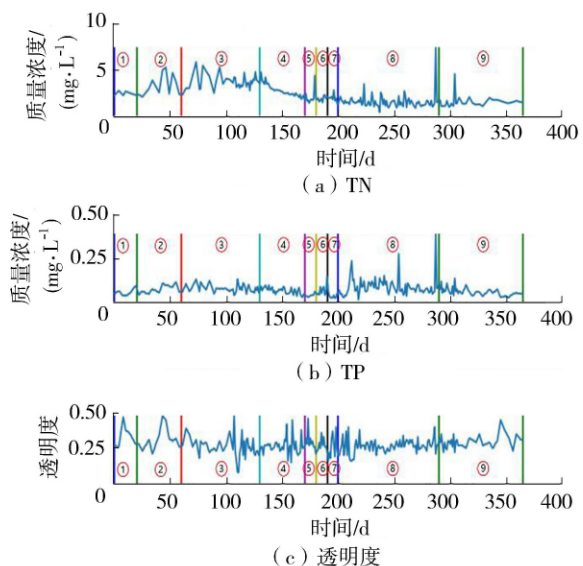


图 4 基于 Gath-Geva 模糊聚类的多元时序分割

Fig. 4 Experimental results of multivariate time series by MFS

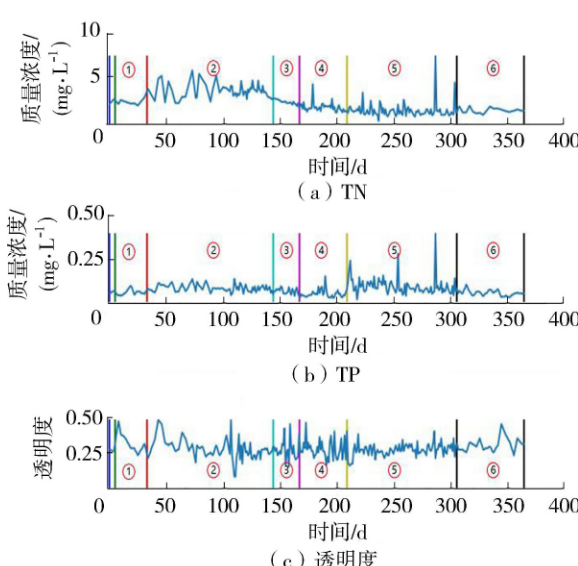


图 5 基于动态规划方法的多元时序分割

Fig. 5 Experimental results of multivariate time series by MDS

3.3 试验结果分析

本文进行了所提方法、基于动态规划以及基于 Gath-Geva 模糊聚类多元时序分割方法对比试验。本文采用人工分割时序段作为标准分割段,采用交并比(IoU)评估试验结果。由于各试验分割段数不同,因而采用平均值的方式反映整体分割效果,如表1所示。

由表1可知,本文方法在 TN 和透明度方面明显优于其他2种分割方法,在 TP 方面比 MFS 方法差。其主要原因在于多个多元时序分割段在 TP 场景要素上发生时序段重合,这与标准分割段相差较远,大大降低了试验分割效果。从整体上看,所列3种分割方法的性能均待提升。MFS 和 MDS 无法提供更加细粒度的分割时序段,其分割时序段过长,导致性能下降。同时,这两种方法都是同步分割,多元时序分割段的断点在同一时刻,与人工分割具有理念差异。本文所提方法在贡湖水厂2008年的3个场景数据上的分割效果优于其他2种方法,但仍需提高分割效果。

4 结 论

水利场景搭建是一个复杂的过程。通过分析太湖流域各站点数据以及引江济太工程调水数据,发现单时序分割技术具有其相应的局限性,进而利用多元时序分割技术对各站点数据进行关联分割,然后利用特征提取与选择技术构建时序水文特征,最后,从特征中挖掘出场景的规律。

参考文献:

- [1] WANG Nini, LIU Xiaodong, YIN Jianchuan. Improved Gath-Geva clustering for fuzzy segmentation of hydrometeorological time series[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2012, 26(1): 139-155.
- [2] GUO Hongyue, LIU Xiaodong, SONG Lixin. Dynamic programming approach for segmentation of multivariate time series[J]. Stochastic Environmental Research and Risk Assessment, 2015, 29(1): 265-273.
- [3] BANKÓ Z, DOBOS L, ABONYI J. Dynamic principal component analysis in multivariate time-series segmentation[J]. Conservation, Information, Evolution-Towards a Sustainable Engineering and Economy, 2011, 1: 11-24.
- [4] 林珠, 邢延. 数据挖掘中适用于分类的时序数据特征提取方法[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(10): 224-229. (LIN Zhu, XING Yan. Time series data feature extraction method suitable for classification in data mining[J]. Application of Computer System, 2012, 21(10): 224-229. (in Chinese))
- [5] 加玉涛, 罗志增. 肌电信号特征提取方法综述[J]. 电子器件, 2007(1): 326-330. (JIA Yutao, LUO Zhizeng. Review of feature extraction methods for EMG signals[J]. Electronic Device, 2007(1): 326-330. (in Chinese))
- [6] HUANG Xiaohui, YE Yunming, XIONG Liyan, et al. Time series K-means: a new K-means type smooth subspace clustering for time series data[J]. Information Sciences, 2016, 367/368: 1-13.
- [7] 嵇敏, 范玉涛, 谢福鼎. 一种基于正交函数系的时间序列聚类方法[J]. 系统科学与数学, 2016, 36(1): 53-60. (JI Min, FAN Yutao, XIE Fuding. A time series clustering method based on orthogonal function system[J]. System Science and Mathematics, 2016, 36(1): 53-60. (in Chinese))
- [8] KHANDELWAL I, ADHIKARI R, VERMA G. Time series forecasting using hybrid ARIMA and ANN models based on DWT decomposition[J]. Procedia Computer Science, 2015, 48: 173-179.
- [9] GUSTAVO J M, DIEGO S C, VIRGINIA L B, et al. Automatic design of interpretable fuzzy predicate systems for clustering using self-organizing maps[J]. Neurocomputing, 2015, 147: 47-59.
- [10] CHERIF A, CARDOT H, BONÉ R. SOM time series clustering and prediction with recurrent neural networks[J]. Neurocomputing, 2011, 74(11): 1936-1944.
- [11] 李海林, 郭崇慧. 时间序列数据挖掘中特征表示与相似性度量研究综述[J]. 计算机应用研究, 2013(5): 1285-1291. (LI Hailin, GUO Conghui. Survey of feature representations and similarity measurements in time series data mining[J]. Application Research of Computers, 2013(5): 1285-1291. (in Chinese))
- [12] 孟晓静, 万源. 自适应代价动态时间弯曲的多元时间序列相似性度量[J]. 统计与决策, 2020, 36(2): 25-29. (MENG Xiaojing, WAN Yuan. Multivariate time series similarity measurement based on adaptive cost dynamic time warping[J]. Statistics and Decision, 2020, 36(2): 25-29. (in Chinese))
- [13] 林珠, 邢延. 数据挖掘中适用于分类的时序数据特征提取方法[J]. 计算机系统应用, 2012, 21(10): 224-229. (LIN Zhu, XING Yan. Survey of feature extraction approaches for time series classification[J]. Computer Systems & Applications, 2012, 21(10): 224-229. (in Chinese))
- [14] 章永来, 周耀鉴. 聚类算法综述[J]. 计算机应用, 2019, 39(7): 1869-1882. (ZHANG Yonglai, ZHOU Yaojian. Survey of clustering algorithm[J]. Computer Application, 2019, 39(7): 1869-1882. (in Chinese))
- [15] 杨俊闯, 赵超. K-means 聚类算法研究综述[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(23): 7-14. (YANG Junchuang, ZHAO Chao. Survey of K-means clustering algorithm[J]. Computer Engineering and Application, 2019, 55(23): 7-14. (in Chinese))

(收稿日期: 2020-10-15 编辑: 张志琴)