

基于分段 Morlet 小波变换的植被物候遥感识别方法^①

刘 颖^{1,2}, 罗 泽², 朴英超²

¹(中国科学院大学, 北京 100049)

²(中国科学院 计算机网络信息中心, 北京 100190)

摘 要: 本文中作者提出分段 Morlet 小波变换的方法从遥感数据中识别出地表物候。地表物候是人类了解地球生态系统的必要参数, 也是动植物保护、农耕等活动的重要依据。研究发现已有的方法存在物候识别不准确、去除噪声效果差等缺陷, 而 Morlet 小波在周期识别、去除噪声方面表现非常好, 因此本文使用 Morlet 小波变换的方法处理青海湖流域 2003–2014 年的 NDVI 数据, 发现该方法存在变换后的曲线与原 NDVI 数据不贴合或物候周期偏移的情况。因此作者提出进一步的改进方法: 分段 Morlet 小波变换, 原理是根据 NDVI 最大值将每个 NDVI 周期划分成两段, 对左右两段分别进行 Morlet 小波变换并自动选取合适的参数, 使物候识别更加合理、准确。作者通过分段 Morlet 小波变换和最大斜率法提取青海湖流域 LSP 参数, 分析 LSP 参数的时间变化、空间变化、特别年份等, 揭示了青海湖流域物候变化的特点, 同时证明基于分段 Morlet 小波变换的植被物候遥感识别方法在准确性与高效性上都有所提高。

关键词: 地表物候; 遥感数据; Morlet 小波; 分段

引用格式: 刘颖, 罗泽, 朴英超. 基于分段 Morlet 小波变换的植被物候遥感识别方法. 计算机系统应用, 2017, 26(11): 226–232. <http://www.c-s-a.org.cn/1003-3254/6103.html>

Land Surface Phenology Remote Sensing Recognition Method Based on Segmented Morlet Wavelet Transform

LIU Ying^{1,2}, LUO Ze², PIAO Ying-Chao²

¹(University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

²(Computer Network Information Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: In this paper, the author proposes to identify Land Surface Phenology from remote sensing data by using segmented Morlet wavelet transform. Land Surface Phenology is a necessary parameter for human understanding the Earth's ecological system, and the essential basis for protecting animals and plants, farming and other activities. The author finds that there are some defects in the existing methods, such as inaccurate in identifying phenology, poor at removing noise, while Morlet wavelet performs very good in cycle identification and noise removal. Therefore, the Morlet wavelet transform is used to deal with NDVI of Qinghai Lake Basin from 2003 to 2014. Then it is found that there is a case where the transformed curve is not fit with the original NDVI or the phenological period is shifted. So the author proposes an improvement method: segmenting Morlet wavelet transform, which means to divide each NDVI cycle into two sections according to the NDVI maximum, and then use Morlet wavelet transform on two segments respectively, and finally select appropriate parameter automatically. With this method, the phenology identification will be more reasonable and accurate. The authors extract the LSP parameters of Qinghai Lake Basin by segmenting Morlet wavelet transform and maximum slope, analysis of LSP parameters on time, space, and special year scales, and reveal the characteristics of Land

① 基金项目: 国家自然科学基金 (61361126011)

收稿时间: 2017-03-14; 修改时间: 2017-03-31; 采用时间: 2017-04-07

Surface Phenology in the Qinghai Lake Basin. At the same time, it is proved that the Land Surface Phenology remote sensing recognition method based on segmented Morlet wavelet transform has improved both its accuracy and efficiency.

Key words: land surface phenology; remote sensing data; Morlet wavelet; segmentation

地表物候 (Land Surface Phenology, LSP) 是景观动态变化的一种度量标准, 反映了植被在气候条件和水文循环下的季度和年度变化^[1]. LSP 的三个主要参数为生长季开始日期 (Start Of Seasons, SOS), 生长季结束日期 (End Of Seasons, EOS) 和生长季长度 (Length Of Seasons, LOS). 随着卫星和传感器技术的发展, 大量覆盖面广、间隔时间短的遥感数据已经可以作为大尺度的 LSP 遥感识别的数据支持, 分析植被指数和物候时序的时空分异规律有助于深入研究植被动态变化, 对掌握 LSP 变化规律、预报农时、制订动植物保护策略等都具有重要意义.

目前最主流的三个植被物候遥感识别方法是: S-G 滤波法、A-G 拟合法和 D-L 拟合法. S-G 滤波法对于细节过分看重, 不能准确反映植被指数的周期性特征, 去除噪声的效果也不理想; A-G 拟合法和 D-L 拟合法虽然效果有所改善, 但是存在拟合得到的物候期长度不合理或位置偏移的情况; 这三种方法对于 NDVI 峰值、谷值和物候周期不明显的沙地都表现极差, 存在严重的误差^[2].

近几年来, 有许多研究是利用小波变换的方法对遥感影像进行处理, 如多时相遥感影像植被变化检测关键技术研究^[3], 基于小波变换的遥感图像去云方法研究^[4], 利用小波变换的高分辨率多光谱遥感图像多尺度分水岭分割^[5]等. 大量文献使用小波来验证地表物候识别结果中物候频率的准确性^[6,7], 小波变换还可以用来平滑和降噪^[8,9]. 因此作者使用 Morlet 小波变换方法处理青海湖流域 2003-2014 年的 NDVI 数据, 发现该方法也存在缺陷: 有时变换后的曲线与原 NDVI 数据不贴合; 有时物候周期向左或向右偏移; Morlet 小波左右对称的特点会导致得出的物候期也左右对称, 这与实际情况不符. 因此作者提出分段 Morlet 小波变换, 原理是: (1) 通过定位一个物候周期内 NDVI 最大值来确定物候周期的大致位置, 避免出现物候周期向左或向右偏移的现象; (2) 将一个物候周期按照 NDVI 最大值划分为左右两部分, 对两边进行对称操作, 使之成为完整

的物候期, 分别进行 Morlet 小波变换, 并自动选择适合各自的尺度参数, 使两侧变换后的曲线都能更贴合原 NDVI 数据, 避免出现左右对称而不符合原数据走势的现象.

1 研究数据与区域

1.1 研究数据

本研究使用了青海湖流域 2003-2014 年的 MODIS 数据产品 MYD13A1, 该数据是 MODIS 植被指数 (NDVI) 产品, 时空分辨率为 16 天 500 米, 这就意味着每个像素一年 23 个观测值. 还用到了 MODIS 数据产品 MCD12Q1, 是 MODIS 土地覆盖相关产品, 时空分辨率为 1 年 500 米. 作者使用 MCD12Q1 数据来判断青海湖流域各像素点的覆盖类型 (水, 草地, 森林等), 去除 MYD13A1 数据中表示水的像素点, 以免水体的 NDVI 值使结果不准确.

1.2 研究区域

青海湖流域地处青藏高原的东北部, 介于 $36^{\circ}15' - 38^{\circ}20'N$, $97^{\circ}51' - 101^{\circ}20'E$, 南北最大跨度约 283 千米, 东西最大跨度约 376 千米, 海拔 3194-5170 m, 总面积 29661 平方公里, 举世瞩目的青海湖位于流域东南最低处, 构成独立封闭的湖盆^[10].

青海湖流域地形以青海湖为圆形向四周逐渐升高, 并呈东南低, 西北高的椭圆形狭长分布. 草地类型的分布受地形地貌极具特色: 湖盆由东向西草地类型向更加耐寒旱发展; 以青海湖为中心, 随海拔升高依次为湖滨地带的温性草原类, 高寒草原, 高寒灌丛和高寒草甸^[11].

因此, 根据青海湖流域的草地类型分布与地形地貌变化特征, 本研究中对青海湖流域作如下区域划分, 区域 1 为沙地, 地表覆盖特殊, 故特别的单独处理; 区域 2、3、4、5 按照地势增高、纬度增大、植被类型向高寒型、耐寒旱变化的原则划分. 对于区域中包含的水体不做研究, 在数据处理时去掉类型为水体的像元. 区域划分如图 1 所示, 该图使用的是 MODIS 数据产品 MYD13A1 中的一张 NDVI 图像.

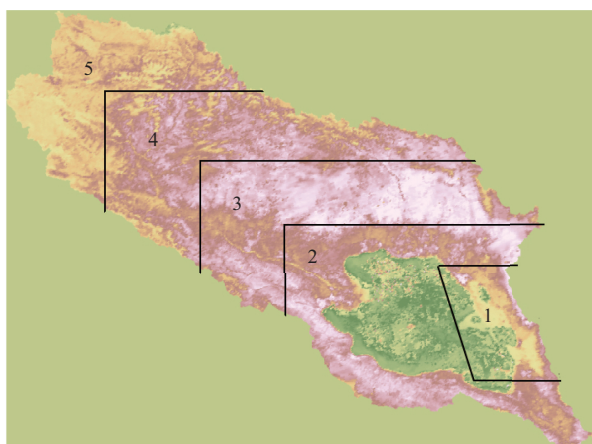


图1 青海湖流域的区域划分

2 研究方法

2.1 NDVI 最大值

青海湖流域的草地 NDVI 数据具有明显的周期变化,可以直接查找 NDVI 最大值;而沙地 NDVI 数据周期变化不太明显,数据中噪声也比较多,可能最大值出现在一年 23 个数据中的第 5 个,大概在一年中的 2、3 月份,显然实际情况中青海湖流域不可能出现 3 月份之前物候期上升,3 月份之后物候期下降的情况。因此,需要对 NDVI 最大值出现的时间划定一个范围,从而尽可能小的减少误差。

通过对青海湖流域 2003-2014 年间 26 万*12 个物候期(共 26 万个像素点,每个像素点 12 个物候期)进行分析与统计,发现 NDVI 最大值在 23 个点中出现的位置在 12, 13, 14, 15 居多,比例分别约为 16%, 41%, 33%, 8%, 而 NDVI 最大值出现在其他位置的情况所占比例非常小,可以忽略不计。因此,在查找 NDVI 最大值时,只在每个物候期的第 12, 13, 14, 15 这四个数据中查找,可以避免在沙地物候期识别时出现物候期偏移过大的情况。

2.2 分段

设某像素点一年(一个完整物候期)内的 NDVI 数据为 $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_{23}]$, 其中最大值为 x_i , $i \in [12, 15]$ 。最大值 x_i 将原始 NDVI 数据划分为左右两部分,为了使这两部分能够通过 Morlet 小波变换得到贴合原 NDVI 数据趋势的曲线,需要使它们都具有波峰波谷,各自都是一个完整的物候期,因此将这两部分数据都进行对称操作,设左侧部分对称操作后为 XL, 右侧数据对称操作后为 XR, 则有:

$$XL=[x_1, x_2, \dots, x_{i+1}, x_i, x_{i-1}, \dots, x_2, x_1]$$

$$XR=[x_{23}, x_{22}, \dots, x_{i+1}, x_i, x_{i+1}, \dots, x_{22}, x_{23}]$$

2.3 Morlet 小波变换

Morlet 小波振幅光滑且连续,波形更能反映 NDVI 时间序列的波动特征,图形如图 2。

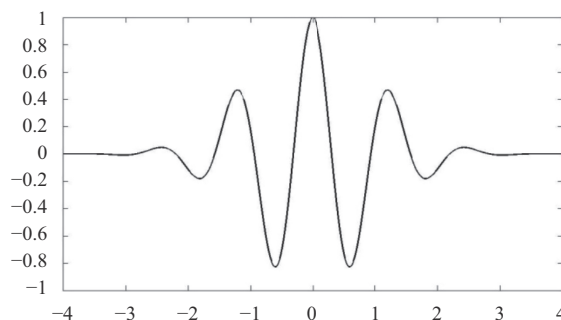


图2 Morlet 小波母函数图形

Morlet 小波母函数为:

$$\varphi(t) = \exp(-\frac{t^2}{k}) \exp(j\omega_0 t) \quad (1)$$

在小波变换的过程中,通过平移和拉伸(或压缩)母小波 φ 能够得到一组小波基函数 $\{\psi_{\lambda,\tau}(t)\}$:

$$\psi_{\lambda,\tau}(t) = \frac{1}{\sqrt{\lambda}} \varphi\left(\frac{t-\tau}{\lambda}\right), \lambda > 0, -\infty < \tau < +\infty \quad (2)$$

公式(2)中 λ 和 τ 分别代表小波母函数的尺度参数和位移参数。这两个参数分别决定了小波基函数的宽度和位置^[12]。设 $S(t)$ 为输入的时间序列, $\psi_{\lambda,\tau}(t)$ 为小波基函数,则连续小波变换公式如下:

$$WTS(\lambda, \tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} S(t) \psi_{\lambda,\tau}(t) dt \quad (3)$$

本文原始输入数据为离散的 NDVI 值,设为 $x_{n'}$, 则小波变换公式如下:

$$W_n(s) = \sum_{n'=0}^{N-1} x_{n'} y * \left[\frac{(n'-n)dt}{s} \right] \quad (4)$$

公式(4)中 s 和 n 分别代表尺度参数和位移参数,计算所得的结果是该尺度、位移下的小波系数,该系数能够反映原时间序列的周期性波动。

尺度参数越小越能反映原始信号的细节信息,反之能更好地提取波动的整体趋势,因此选择合适的尺度参数非常重要。在连续小波变换中,尺度参数与频率的关系为:

$$F_a = \frac{F_c}{S * f} \tag{5}$$

公式 (5) 中 F_c 为小波母函数的中心频率, 本文所采用的 Morlet 小波母函数的中心频率为 0.8125; f 为原始信号的采样周期, 由于原始信号是离散的点, 故采样周期为 1; S 为尺度参数; F_a 为该尺度参数下的伪频率, 也可称为拟频率, F_a 是“模拟” F_c 的意思. 当 F_a 接近物候周期的频率 (NDVI 数据的频率) 时, 则 F_a 同时具备了 Morlet 小波母函数与 NDVI 数据的特性, 反演效果就越好, 越能够在滤除噪声的同时反映原时间序列的周期性波动.

最大值 x_i 的位置 i 决定了左右两段数据的长度, 即 NDVI 数据的频率. 由上述方法可得 i 与尺度参数的关系如表 1 所示.

表 1 最大值位置与尺度参数的关系

i	XL 的长度	XL 的尺度参数	XR 的长度	XR 的尺度参数
12	23	19	23	19
13	25	20	21	17
14	27	22	19	15
15	19	24	17	14

2.4 平滑连接

设 XL 经 Morlet 小波变换后的数据为 M_XL , XR 经 Morlet 小波变换后的数据为 M_XR , 则有:

M_XL 的前 i 个数据 $M_XL(1:i)$;

M_XR 的后 $23-i$ 个数据 $M_XR(i+1:47-2i)$;

将二者以 x_i 为标准进行归一化处理, 使之平滑连接, 得到一组新的数据, 设为 M :

$M=[x_i/M_XL[i]*M_XL(1:i)$

$x_i/M_XR[24-i]*M_XR(25-i:47-2i)]$;

在 M 上使用最大斜率法获取这个物候期内的 LSP 参数.

2.5 最大斜率法提取 LSP

原时序经 Morlet 小波变换后输出结果为小波系数, 不再是 NDVI 值. 但是 Morlet 小波很好的保留了 NDVI 值大于 0 时的走势. 由于研究 LSP 主要是观察植被生长情况, 而植被的 NDVI 一定是大于 0 的, 因此取 Morlet 小波变换后结果大于 0 的部分进行物候提取是合理的.

由于小波变换保留了原始 NDVI 时序在大于 0 时的走势, 因此本研究中采用最大斜率法提取 LSP, 即曲线值大于 0 且上升最快时对应的时间作为 SOS, 曲线

值大于 0 且下降最快时对应的时间作为 EOS, 二者之间的时间段长度作为 LOS^[13].

3 性能分析

3.1 准确性

由于一个物候周期内 NDVI 曲线类似于正态分布, 在物候期的中部 NDVI 达到波峰, 开始和结束时 NDVI 处于波谷位置. 通过 NDVI 最大值将一个周期划分为两段并分别进行对称操作后得到的 XL 和 XR 也都可以认为是一个完整的物候期, 曲线类似于正态分布, 可以通过一个完整的 Morlet 小波变换得到. 这样进行两段划分可以达到很好的平滑降噪、反演物候的效果, 不再考虑三段或更多段的划分, 一是会增加运算, 二是不利于形成平滑曲线.

采用分段 Morlet 小波变换提取物候参数, 效果与不使用分段法相比有明显的提高. 图 3 为对某草地像素 NDVI 时序的处理结果对比图, 点线 (...) 为原始 NDVI 数据, 划线 (---) 为 Morlet 小波变换结果, 实线为分段 Morlet 小波变换结果. 可见分段 Morlet 小波变换效果更好, 特别是在图中最后一个物候期改善效果明显, 物候期不再偏右, 右半段小波曲线更贴合 NDVI 曲线.

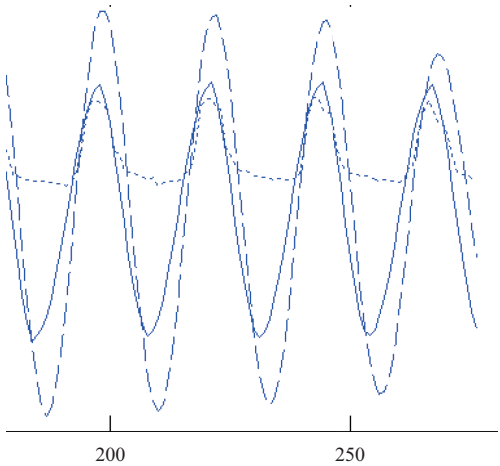


图 3 对某草地像素 NDVI 时序的处理结果

图 4 为对某沙地像素 NDVI 时序的处理结果对比图, 虚线为原始 NDVI 数据, 上面的实线为分段 Morlet 小波变换结果, 下面的实线为 Morlet 小波变换结果. 在第 0-23 个 NDVI 采样点理应有一个完整的物候期, 而 Morlet 小波变换没有识别出这个物候期; 由于分段 Morlet 小波变换规定了在每 23 个点中寻找 NDVI 最

大值以确定物候期的波峰位置,不会出现上述情况.所以,分段 Morlet 小波变换对于 NDVI 值在周期内变化平稳的沙地、干旱、半干旱地具有很好效果.

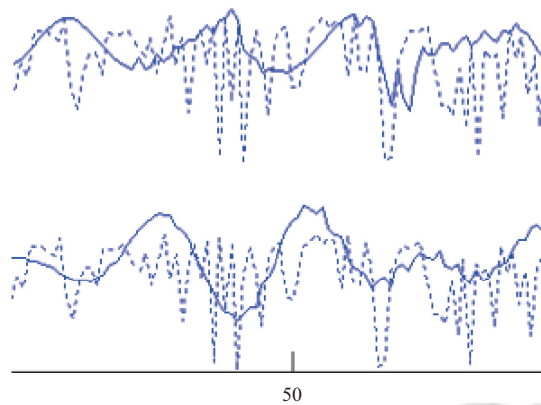


图4 对某沙地像素 NDVI 时序的处理结果

3.2 高效性

TimeSat 软件是一款用于物候提取的专业软件,集成了主流的三种方法: S-G 滤波法、A-G 拟合法和 D-L 拟合法. 使用该软件每次只能得到一年的 LSP, 需要约半小时, 则得到 12 年的 LSP 需要约 6、7 个小时.

使用本研究中的方法可以一次性得到全部 26 万个像素点 12 年的 LSP 参数, 花费约 13 小时. 这是因为分段 Morlet 小波变换对每一个物候周期拆分为两段分别进行变换, 且为了避免边界效应, 需要将一组数据复制扩展为三组, 取中间一组的变换结果, 这就导致在分段 Morlet 小波变换中的数据量为原始数据量的 6 倍, 所以会花费较多的时间.

综上, TimeSat 软件用时少, 但是拟合误差大, 自动性差, 每得到一年的 LSP 前都需要输入相关命令与参数. 本研究的分段 Morlet 小波变换方法用时长, 但误差小, 特别是对于 NDVI 走势较平稳沙地物候识别效果提高很多; 自动性强, 一次操作可以得到所有结果.

4 LSP 分析

首先得到 2003-2014 连续 12 年的 NDVI 数据, 则每个像元对应一个长度为 $23 \times 12 = 276$ 的 NDVI 时序. 对青海湖流域每个像元的 NDVI 时序进行分段 Morlet 小波变换, 使用最大斜率法提取物候参数, 最终得到每个像元每年的 SOS、EOS、LOS 作为 LSP 指标. 然后结合区域划分、采用区域平均法^[14]进行综合分析. 区

域平均法即将每个区域内各像元的 LSP 参数相加除以区域内像元个数, 求得各区域每年的 LSP 均值.

4.1 时间变化

对每个区域的 LSP 时序做一元线性回归处理, 得到各区域平均每年变化的情况 (斜率), 如表 2 所示.

表 2 不同区域 LSP 时序变化的线性趋势

时间段	区域	SOS	EOS	LOS
2003-2014	整体	-0.4821	-0.4187	0.0629
	1	-0.6285	-0.6426	-0.0134
	2	-0.7783	-0.7156	0.0624
	3	-0.8703	-0.7347	0.1358
	4	-0.6071	-0.4456	0.1624
	5	0.4748	0.4433	-0.0307

数值为正时, 对于 SOS、EOS 表示推迟, 对于 LOS 则表示延长. 可以看到 SOS 与 EOS 呈提早降临的趋势, 尤其是区域 2、3 提早的最多. 而 LOS 基本都呈延长的趋势, 稍有减短也在很小的范围 (-0.0134, -0.0307), 可以从 LOS 的延长得出结论: SOS 提前的程度大于 EOS 提前的程度, 青海湖流域的地表物候对全球性气候变暖做出了正面回应. 这与青海省气候相关研究是相符的, 有资料显示青藏高原各区域年平均气温整体持续上升^[15], 青海省极端气候变暖, 夏天日数、暖夜指数及暖昼指数明显增加^[16].

4.2 空间变化

对 12 年 (2003-2014) 的 LSP 求均值, 得到各区域的平均 LSP, 为更直观的展现不同区域间 LSP 的差别, 下面用折线图展示 (图 5), 纵轴单位为天, 对于 SOS 和 EOS 表示一年中的第几天, 对于 LOS 表示时长, 即持续天数.

图 5 中, SOS 与 EOS 折线相似, 即某区域 SOS 较早, 则相应的 EOS 也较早. 区域 1 到区域 5, 即青海湖流域由南向北, 由东到西, 物候期越来越提前. 尤其是西北部 (区域 3、4、5) 的 SOS、EOS 较东南部早, 早于整体平均水平.

区域 1 的 SOS 和 EOS 最迟, 区域 2 与区域 1 的地理位置最相似, 二者 LSP 出现差异的原因是区域 1 主要为沙地. 沙子的导热性能好, 往往吸热快, 散热也快, 导致沙地在天气回暖时能够更敏感的做出反应, 植物更早的返青; 而在天气变冷时也能使植物更快的出现枯黄现象.

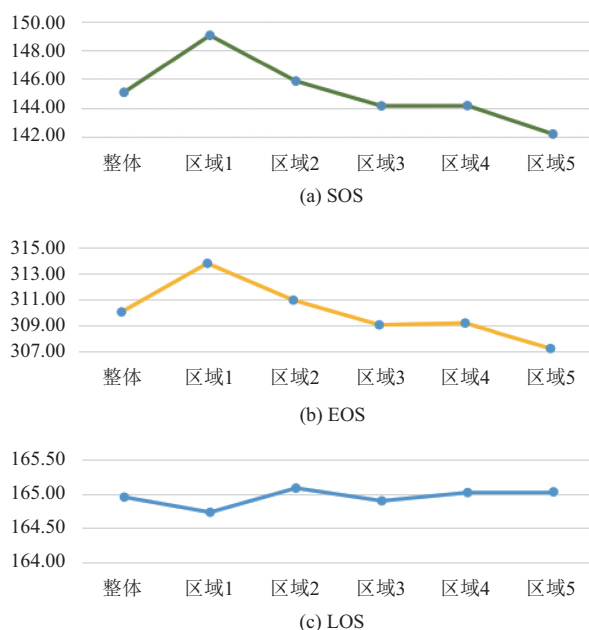


图5 各区域平均LSP

就 LOS 来说, 区域 1 明显比整体平均水平还要短, 可见沙地的导热性、缺水性给植物的生长带来了负面影响. 区域 2 的 LOS 比整体平均水平要长一些, 原因可能是区域 2 靠近青海湖, 大部分是湿地, 植物可以获得充足的水分. 同时该区域中有很多野生鸟类栖息, 也是牧民牲畜的活动场所, 这些动物的粪便为植物提供了丰富的养料. 其他 3 个区域的 LOS 相近, 基本大于整体平均水平.

综上所述, 区域 2 最适合动植物生存, 区域 3、4、5 略逊色, 区域 1 最不适合植被生长.

4.3 特别年份分析

计算得到整个青海湖流域的平均 SOS 为一年中的第 145.08 天, 约为 4 月下旬; 平均 EOS 为一年中的第 310.03 天, 约为 10 月中旬; 平均 LOS 为 164.95 天, 约为 5.5 个月.

2003-2014 年青海湖流域平均 LSP 随时间变化的折线图如图 6 所示, 虚线表示多 2003-2014 年的均值.

2003-2014 年期间, SOS 和 EOS 整体持提早趋势, 尤其是 2008-2011 年早于平均水平. 但是在 09 年, SOS 有略微推迟, 通过查阅资料发现青海省 2009 年 3 月下旬至 4 月上旬出现的罕见大雪灾^[17], 直接导致了 09 年青海湖流域物候期的推迟.

SOS 和 EOS 在 2008-2011 年都早于平均水平, 但是 2012 年 SOS 与 EOS 都明显大幅度推迟, 从早于平

均水平 4、5 天到晚于平均水平 1 天左右, 可以说变化巨大. 2012 年青海省气候^[18]显示, 1-3 月青海省南部地区降水量极大, 创下历史新高, 同时出现轻-重度雪灾, 5 月后多地区出现洪涝灾害且提前进入汛期, 恶劣气候导致 SOS 推迟, 植物长势受到负面影响. 2012 年全年青海省全省气温正常略高, 尤其是后期偏高, 其中青海省南部地区温度与常年同期相比高出 0.2-2.1 摄氏度. 这导致了 2012 年 EOS 的推迟, 植物进入枯黄期较晚.

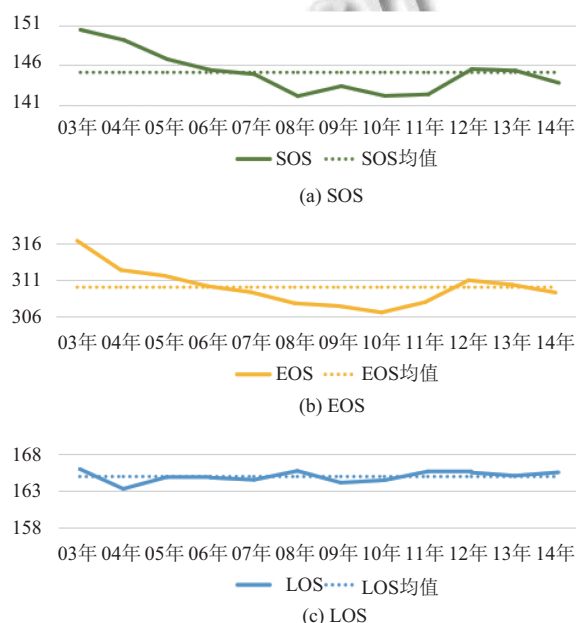


图6 2003-2014 年青海湖流域平均 LSP 折线图

从 LOS 来看, 除 2004 年外, 2003-2014 年间平均 LOS 较为平稳, 在均值 164.95 ± 1.5 的小范围内波动, 而 04 年的 LOS 较均值少了 1.69 天. 对比 SOS 和 EOS 发现, 04 年的 EOS 提前程度较 SOS 提前程度大, 致使 LOS 缩短. 青海省 2004 年秋季气候^[19]显示: 9 月上旬, 青海省部分地区持续阴雨天气, 过多的降水导致大面积农作物倒伏、霉烂; 9 月上旬末至中旬, 受高压脊前冷空气的影响, 大面积降温, 部分地区日最低温度达到 2°C 以下, 植物遭受冻害; 11 月中旬, 湟源县日月乡暴雪, 平均雪深 16 cm, 最深达 60 cm; 11 月下旬, 西宁、海东、海北等地出现小雪, 并伴有降温, 大部分地区日均气温下降 $3-6^{\circ}\text{C}$, 其中西宁地区 25 日与 22 日比较, 日均气温下降 12.1°C , 降温幅度较大. 因此, 2009 年秋冬季节的多雨、霜冻、降温等恶劣气候导致 EOS 提前, 植物提早进入枯黄期.

5 结语

本文提出分段 Morlet 小波变换的方法从遥感数据中提取物候参数, 首先确定 NDVI 最大值并将一个 NDVI 周期划分为两段, 然后对两段分别进行 Morlet 小波变换, 根据长度自动选取尺度参数, 再对两段变换结果进行归一化, 使二者连接为平滑的曲线, 使用最大斜率法提取物候参数。

研究表明分段 Morlet 小波变换的方法用于地表物候遥感识别时有较好的效果, 基本没有过度拟合的现象, 且对于周期变化不太明显的干旱、稀疏植被区域的物候周期的识别也有较好的效果。可以有效的改善物候周期向左或向右偏移的现象以及变换后的曲线成对称形式与原 NDVI 数据走势不贴合的现象。

本文以青海湖流域的 NDVI 数据作为实验数据, 研究了青海湖流域 LSP 的时间变化特点、空间变化特点, 对出现特别变化的年份做了单独分析, 并分析了 SOS、EOS 与温度、降水的相关性。研究认为青海湖流域的地表物候期整体都略有提前, 但生长季的长度呈延长趋势, 认为青海湖流域的地表物候整体上响应全球变暖的趋势。中部地区的生长季长度大于高海拔、高纬度区域和沙地区域, 认为青海湖流域的中部地区是最适合动植物生长、活动的范围。面对极端恶劣气候, LSP 会迅速做出反应, 比如青海省 09 年的特大雪灾导致青海湖流域 2010 年平均 SOS 推迟、平均 LOS 减短。

参考文献

- 1 Wang YQ, Zhao JJ, Zhang HY. Remote sensing of land surface dynamics along the Appalachian trail. Proc. of 2011 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium. Vancouver, BC, Canada. 2011. 815–817.
- 2 Verbesselt J, Hyndman R, Zeileis A, *et al.* Phenological change detection while accounting for abrupt and gradual trends in satellite image time series. Remote Sensing of Environment, 2010, 114(12): 2970–2980. [doi: 10.1016/j.rse.2010.08.003]
- 3 朴英超. 多时相遥感影像植被变化检测关键技术研究[博士学位论文]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- 4 张伟. 基于小波变换的遥感图像去云方法研究[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2013.
- 5 陈杰, 邓敏, 肖鹏峰, 等. 利用小波变换的高分辨率多光谱遥感图像多尺度分水岭分割. 遥感学报, 2011, 15(5): 908–926. [doi: 10.11834/jrs.2011280]
- 6 肖江涛. 基于 MODIS 植被指数的水稻物候提取与地面验证[硕士学位论文]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- 7 范德芹, 赵学胜, 朱文泉, 等. 植物物候遥感监测精度影响因素研究综述. 地理科学进展, 2016, 35(3): 304–319.
- 8 冯毅, 王香华. 小波变换降噪处理及其 Matlab 实现. 数据采集与处理, 2006, 21(S1): 37–39.
- 9 张仁辉, 杜民. 小波分析在信号去噪中的应用. 计算机仿真, 2005, 22(8): 69–72.
- 10 年奎, 张登山, 张有生, 等. 青海湖流域植物群落分布特点. 青海农林科技, 1997, (4): 9–12.
- 11 Zhao JJ, Wang YQ, Hashimoto H, *et al.* The variation of land surface phenology from 1982 to 2006 along the Appalachian trail. IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, 2013, 51(4): 2087–2095. [doi: 10.1109/TGRS.2012.2217149]
- 12 Gross D, Dubois G, Pekel JF, *et al.* Monitoring land cover changes in African protected areas in the 21st century. Ecological Informatics, 2013, 14: 31–37. [doi: 10.1016/j.ecoinf.2012.12.002]
- 13 Song XP, Huang CQ, Sexton JO, *et al.* Annual detection of forest cover loss using time series satellite measurements of percent tree cover. Remote Sensing, 2014, 6(9): 8878–8903. [doi: 10.3390/rs6098878]
- 14 丁潇, 王彩艳. 基于 MODIS 时序植被指数的区域物候信息提取. 测绘与空间地理信息, 2015, 38(10): 85–87, 91. [doi: 10.3969/j.issn.1672-5867.2015.10.027]
- 15 宋春桥, 柯灵红, 游松财, 等. 基于 TIMESAT 的 3 种时序 NDVI 拟合方法比较研究——以藏北草地为例. 遥感技术与应用, 2011, 26(2): 147–155. [doi: 10.11873/j.issn.1004-0323.2011.2.147]
- 16 申红艳, 马明亮, 王冀, 等. 青海省极端气温事件的气候变化特征研究. 冰川冻土, 2012, 34(6): 1371–1379.
- 17 刘彩红, 马占良, 王振宇. 2009 年青海省气候影响评价. 青海气象, 2010, (1): 53–59.
- 18 马占良, 戴升, 朱西德. 2012 年青海省气候公报. 青海气象, 2013, (1): 64–67, 69.
- 19 戴升, 白彦芳, 朱西德. 青海省 2004 年秋季气候 (9-11 月). 青海气象, 2005, (1): 71–72.