

武汉大学学报(信息科学版)

Geomatics and Information Science of Wuhan University

ISSN 1671-8860, CN 42-1676/TN

《武汉大学学报(信息科学版)》网络首发论文

题目: 青藏高原区域不同地表类型对应后向散射系数的时变分析
作者: 陈晓东, 郭金运, 孙明智, 朱广彬, 常晓涛
DOI: 10.13203/j.whugis20200688
收稿日期: 2020-12-21
网络首发日期: 2021-04-15
引用格式: 陈晓东, 郭金运, 孙明智, 朱广彬, 常晓涛. 青藏高原区域不同地表类型对应后向散射系数的时变分析. 武汉大学学报(信息科学版).
<https://doi.org/10.13203/j.whugis20200688>



网络首发: 在编辑部工作流程中, 稿件从录用到出版要经历录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿等阶段。录用定稿指内容已经确定, 且通过同行评议、主编终审同意刊用的稿件。排版定稿指录用定稿按照期刊特定版式(包括网络呈现版式)排版后的稿件, 可暂不确定出版年、卷、期和页码。整期汇编定稿指出版年、卷、期、页码均已确定的印刷或数字出版的整期汇编稿件。录用定稿网络首发稿件内容必须符合《出版管理条例》和《期刊出版管理规定》的有关规定; 学术研究成果具有创新性、科学性和先进性, 符合编辑部对刊文的录用要求, 不存在学术不端行为及其他侵权行为; 稿件内容应基本符合国家有关书刊编辑、出版的技术标准, 正确使用和统一规范语言文字、符号、数字、外文字母、法定计量单位及地图标注等。为确保录用定稿网络首发的严肃性, 录用定稿一经发布, 不得修改论文题目、作者、机构名称和学术内容, 只可基于编辑规范进行少量文字的修改。

出版确认: 纸质期刊编辑部通过与《中国学术期刊(光盘版)》电子杂志社有限公司签约, 在《中国学术期刊(网络版)》出版传播平台上创办与纸质期刊内容一致的网络版, 以单篇或整期出版形式, 在印刷出版之前刊发论文的录用定稿、排版定稿、整期汇编定稿。因为《中国学术期刊(网络版)》是国家新闻出版广电总局批准的网络连续型出版物(ISSN 2096-4188, CN 11-6037/Z), 所以签约期刊的网络版上网络首发论文视为正式出版。

DOI:10.13203/j.whugis20200688

引用格式：

陈晓东, 郭金运, 孙明智, 等. 青藏高原区域不同地表类型对应后向散射系数的时变分析[J]. 武汉大学学报·信息科学版. DOI: 10.13203/j.whugis20200688 (CHEN Xiaodong, GUO Jinyun, SUN Mingzhi, et al. Time-varying analysis of backscatter coefficient corresponding to different surface types in the Tibetan Plateau [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University. DOI: 10.13203/j.whugis20200688)

青藏高原区域不同地表类型对应后向散射系数的时变分析

陈晓东¹, 郭金运¹, 孙明智¹, 朱广彬², 常晓涛²

1 山东科技大学测绘科学与工程学院, 山东 青岛, 266590

2 自然资源部国土卫星遥感应用中心, 北京 100048

摘要：后向散射系数 (σ_0) 是卫星雷达高度计的观测量之一, 在地表状态监测、积雪冰层厚度反演、卫星测高定标与验证等过程中广泛应用。根据 Jason-2 测高卫星 Geophysical Data Record (GDR) 数据分离出青藏高原 Ku 波段的 σ_0 数据, 以 GlobeLand30 2020 版本地表数据作为分类基础, 通过经纬度数据对 σ_0 赋予地表属性, 获取不同种类地表特征对应 σ_0 数据在 2008 年 12 月到 2016 年 9 月期间的时变序列, 利用奇异谱分析原理提取识别出不同地表属性中 σ_0 的趋势和周期项信息, 并对周期项结果进行快速傅里叶变换分析。结果表明: 水体、湿地区域对应的 σ_0 数值较高, 冰川和永久积雪区域对应的 σ_0 数值较低。整个区域 σ_0 存在多种周期信号, 人造地表、裸地、灌木地区域类型的地表性质稳定, 区域对应的 σ_0 周期不显著。其余区域 σ_0 的变化具有显著的周年和半年周期, 且变化振幅不一致, 各个区域对应的 σ_0 趋势变化有所差异。

关键词：卫星测高; Jason-2; 后向散射系数; 青藏高原; 奇异谱分析

中图分类号：P237

文献标志码：A

卫星搭载测高计获取地球表面的后向散射系数 (σ_0)。在陆地上, σ_0 的值由地表的几何和电磁参数特征以及卫星系统参数信息决定^[1], σ_0 与反射表面的粗糙度、复介电常数和电磁波入射的角度有关^[2]。因此, σ_0 的空间特征和时间变化规律能够反映地表性质, 它同全球/区域气候变化影响下地表的物理和几何特征密切相关。Sigma0 最初用于建立波-风模型以计算波高和表面风速^[3-4]。除海洋表面以外, 卫星雷达高度计能够在陆地和冰层表面产生脉冲回波, 结果表明, σ_0 数据具有在全球和区域范围内监测陆地表面的强大能力^[5], 它的数值由地表性质决定, 对于不同的地表性质呈现不同的特征^[6-7]。地表土壤湿度、植被随气候季节不断变化并影响地表特征^[8-9], 因此 σ_0 时空变化受气候和地理特征变化的制约。利用地表 σ_0 的时空变化规律来掌握地物变化特征和区域气候变化规律具有重要意义。

近年来对地观测、信息处理等技术飞速发展, 地表覆盖遥感信息提取能力逐步增强, 多尺度地表覆盖数据产品不断

涌现, 其中中国研制的 GlobeLand30 覆盖全球陆域数据, 含水体、人造覆盖、耕地、森林等 10 个地表属性分类。GlobeLand30 被联合国有关机构评价为世界上首套高分辨率全要素全球地表覆盖数据产品和全球性的重要基础数据^[10]。

青藏高原是响应全球气候变化最敏感的地区之一^[11], 先前对于特定地表属性的后向散射系数时间序列变化的研究, 多数集中在单个或多个卫星雷达高度计的联合处理中, 未能够与精度更高的光谱影像联合应用。本文利用 GlobeLand30 数据集对地表属性界定的这一条件, 将青藏高原 Jason-2 Ku 波段的后向散射系数进行定性处理, 以 GlobeLand30 2020 地表分类数据为采样基础, 获取各个区域内后向散射系数的时变序列, 利用奇异谱分析 (Singular Spectrum Analysis, SSA) 分离出趋势项和周期项, 利用快速傅里叶变换 (Fast Fourier Transform, FFT) 对获取的周期项进行处理, 将不同地表特征的后向散射系数定量分析其变化特征, 为全球和区域性监测地面特征提供了一定的方法参考和研究方向支持, 同时有助于更好地了解各自区域不同地表变化的特点。

收稿日期：2020-12-21

项目资助：国家自然科学基金 (41774001); 国家测绘自主可控专项 (816-517)

第一作者：陈晓东, 硕士生, 主要从事卫星测高相关研究。ralking@163.com

通讯作者：郭金运, 博士, 教授, 博导。jinyunguo@126.com

1 研究区域数据及处理方法

1.1 青藏高原区域

本文研究区域为“世界屋脊”之称的青藏高原地区，地处北纬 26°~41°、东经 67°~105°，位于中国西南部，属亚洲内陆高原。该区域包含草地、湿地、裸地、冰川、积雪和湖泊等多种地理特征区域。由亚欧板块和印度洋板块挤压形成的青藏高原隆起^[12]，影响了高原及其邻近地区环境的演化，被誉为“全球气候变化的驱动机与放大器”^[13]。同时作为地球陆地生态系统的重要组成部分，被视为南极和北极之外的世界“第三极”^[14]，可作为研究气候变化的“试验田”。

1.2 sigma0 数据及其预处理

卫星雷达高度计向地球发送脉冲并接收来自地球表面的反向散射回波能量，并通过自动增益控制系统生成雷达回波波形。后向散射系数取决于反射的雷达脉冲功率，由地表回波散射产生，它主要由地表目标的特性、雷达扫过的足迹以及足迹内面散射量来决定。后向散射系数可以根据反射面回波的雷达波形进行计算获取^[1,15]。现存多种类型的卫星测高任务可供研究^[16]，其中 Jason-2 任务是继 Topex/Poseidon 和 Jason-1 测高任务之后的又一次测高任务，对于 Jason-2 搭载的 Poseidon 雷达高度计获取的测高数据具有多种应用^[17]，

而由高度计探测地表得到的后向散射系数具有监测地面信息的能力^[18]。sigma0 依赖于反射雷达的脉冲功率，可以从反射面回波的雷达波形中计算。雷达高度计的简化 sigma0 方程为：

$$\sigma_0 = \frac{P_r 64 \pi (1 + h/R_e)}{P_t G^2 \lambda^2 c \tau} h^3 L_{att} L_{atm} L_T \quad (1)$$

式中，G 是前视天线增益， P_r 是高度计天线接收功率，h 为卫星轨道高度， R_e 为地球半径， P_t 为天线发射功率， λ 为雷达波长，

c 为光速， τ 为脉冲宽度， L_{att} 为高度角损

耗， L_{atm} 为大气损耗， L_T 为温度有关的损

耗。雷达高度计接收的返回能量 P_r 取决于雷达系统、大气衰减和反射面的散射特性。

Jason-2 卫星于 2008 年 6 月 20 日发射^[19]，是美国宇航局/法国国家空间研究中心实施的 Jason-1 任务的后续，其轨道是圆形的非太阳同步轨道，高度为 1336km，轨道倾角为 66.038°，运行轨迹能够实现对整个青藏高原地区的完整覆盖。后向散射系数数据是从 AVISO/Altimetry (<ftp.aviso.altimetry.fr>) 卫星高度计任务的活动档案数据中心发布的 Jason-2 GDR 数据中提取的。该产品以 10d 为一个周期进行存储，每个周期包含最多 254 个 Pass 文件。首先，根据 AVISO 的数据编辑准则^[20]，从数据集中选取经过 ice-1 波形重定位^[21]得到的 20Hz sigma0 数据，提取筛选青藏高原内 (26°~41°N, 67°~105°E) Ku 波段的 sigma0 数据并平均得到时间序列。以 3σ 准则将序列各点处理，超过阈值的数据进行剔除，数据剔除率为 1.7%。应用奇异谱分析 (SSA) 的迭代插值法^[22-23]来填充缺失的数据。

利用奇异谱分析 (SSA)^[23-24]对时间序列进行分解和重构，选择窗口长度 $M=37$ 以获得该序列下的趋势项和周期项等信息。SSA 可以对序列信号的重构分量 (Reconstruction component, RC) 能够有效地表示原始序列的主要变化特征，为原始序列的单个周期分量生成一对具有相似特征值的 RC。从而达到对原始时序趋势提取、周期识别、数据平滑和消噪等目的。利用 ω -correlation 方法^[24-25]对各 RC 之间的相关性进行分析，将具有相同信号特征的 RC 进行分组，假设利用 SSA 得到的分量序列为 Y_i ，则任意两个重建时间序列的 ω -correlation 可以表示为

$$\rho_{i,j}^{\omega} = \frac{(Y^{(i)}, Y^{(j)})}{\|Y^{(i)}\|_{\omega} \|Y^{(j)}\|_{\omega}}, (1 \leq i, j \leq N) \quad (2)$$

其中 $\|Y^i\|_{\omega} = \sqrt{(Y^{(i)}, Y^{(i)})}$,

$$(Y^{(i)}, Y^{(j)}) = \sum_{k=1}^N \omega_k y_k^i y_k^j, \quad \omega_k \text{ 为权重系数,}$$

其定义为 $\omega_k = \min(k, M, N - k)$ 。 $\rho_{i,j}^{\omega}$ 的绝对值越接近于 1, 说明 i, j 对应部分的相关性越大, 该组信号归为同一组信号成分。

$$y = a_0 + b_0(t - t_0) + A_0 \sin\left[\frac{2\pi}{T}(t - t_0) + p_1\right] + A_1 \sin\left[\frac{4\pi}{T}(t - t_0) + p_2\right] \quad (3)$$

拟合得到的。其中, a_0 是偏差, b_0 是变化趋势项, t 是时间, t_0 是初始时间 (2008.9), T 为周期, 序列数据可能存在半年和周年周

振幅反映了 σ_0 时间序列的周期性变化的幅度。 σ_0 的变化周期与地表特征的周期性变化有关, 很有必要对 σ_0 的振幅特征进行分析。根据最小二乘谱分析方法^[26-27]对序列数据进行分析确定各项数据变化成分, σ_0 在周期下的振幅通过将数据观测值与式

期, A_0 、 A_1 是周年和半年变化的振幅, p_1 、 p_2 是初始相位。

1.3 GlobeLand30 数据及预处理

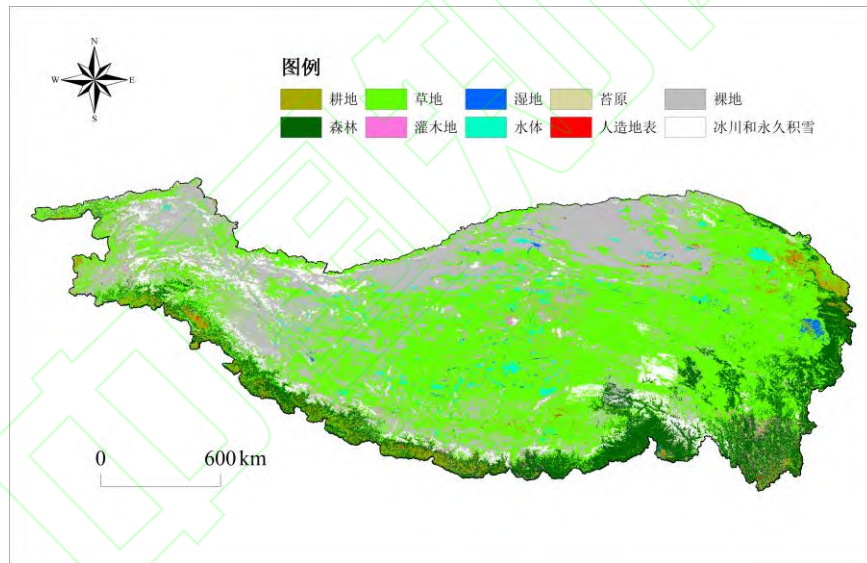


图 1 青藏高原区域地表类型分布

Fig.1 The distribution of land surface types in the Tibetan Plateau

本文使用的是最新发布的 GlobeLand30 2020 版数据 (www.globeland30.org), GlobeLand30 2020 版本数据研制所使用的分类影像主要是 30 米多光谱影像, 包括美国 Landsat 的 TM5、ETM+、OLI 多光谱影像和中国 HJ-1 多光谱影像^[28], 2020 版数据还使用了 16 米分辨率 GF-1 多光谱影像进行更高精度的补充处理。利用 ArcGIS 10.7 版本对 GlobeLand30 2020 数据进行裁剪处理

获取青藏高原区域的地表属性分布 (见图 1), 将 Jason-2 卫星每周期的经纬度数据导入到图幅中进行采样, 获取到以地表属性分类的后向散射系数数据集, 对分类后的各项数据进行处理, 得到不同地表属性下 σ_0 的时间序列。

2 结果与讨论

2.1 整体时变规律分析

获取整个青藏高原区域 2008.12—2016.9 期间 Jason-2 Ku 波段后向散射系数的时间序列（图 2（a）），整个序列存在明显的周期特征并且存在一定的规律性：整个区域 σ_0 变化以周年为主要周期，每年 1—2、6—7 月份，后向散射系数稳定在 10.2dB，而在 3—5、10—12 月份后向散射系数趋近于 11.4dB，这与青藏高原区域内的气候变化有关。

根据 SSA 原理，对插值完后的序列按照 2.2 节中介绍的 SSA 方法（窗口长度 $M=37$ ）进行分解和重构。数据中通常包含周年、半年、季度变化和噪声等一系列信号。前 30 阶重构成分进行 ω -correlation 分析，结果如图 2（b）所示，第 12 阶及其之后的 RC 之间不能很好的相互分离，这说明它们中噪声占较大部分。RC1 为单独存在的趋势项信息（图 2（c）），对于 RC2-RC11，将属于同一周期成分的重构序列进行合并，利用 FFT 谱分析探寻合并项中存在的周期特性（图 2（d）），通过对青藏高原区域

后向散射系数变化的趋势及频谱特征的分析我们获取到以下结果。

（1）整个区域的 σ_0 变化特征呈递增趋势，可能是由于气候对地表的影响，高原地表逐渐向暖湿化过渡，整个区域土壤湿度增加， σ_0 受土壤湿度影响^[29]，地表复介电常数增加进而导致区域后向散射增强。

（2）区域内的 σ_0 变化以周年为主要周期，半年和季度周期特征不显著。地表 σ_0 的变化特征与地面覆盖物的周期变化属性有关，青藏高原区域内植被、河流、积雪和冻土具有显著的周年周期，地表的 σ_0 受其影响，青藏高原区域内的周年周期显著。受高海拔、多山脉、植被覆盖面积少等地貌特征的影响，青藏高原生态区域多为高寒草地地区^[30]，地表特征受季节变化影响小，半年和季度周期振幅较小；青藏高原区域大部分高海拔地区生态环境稳定，但区域中仍存在随气候因素特征变化明显的区域，因此半年和季度项周期受该类区域变化主导，在不同时间段下的周期能量不同，需要对不同地表类型的时间序列做进一步分析。

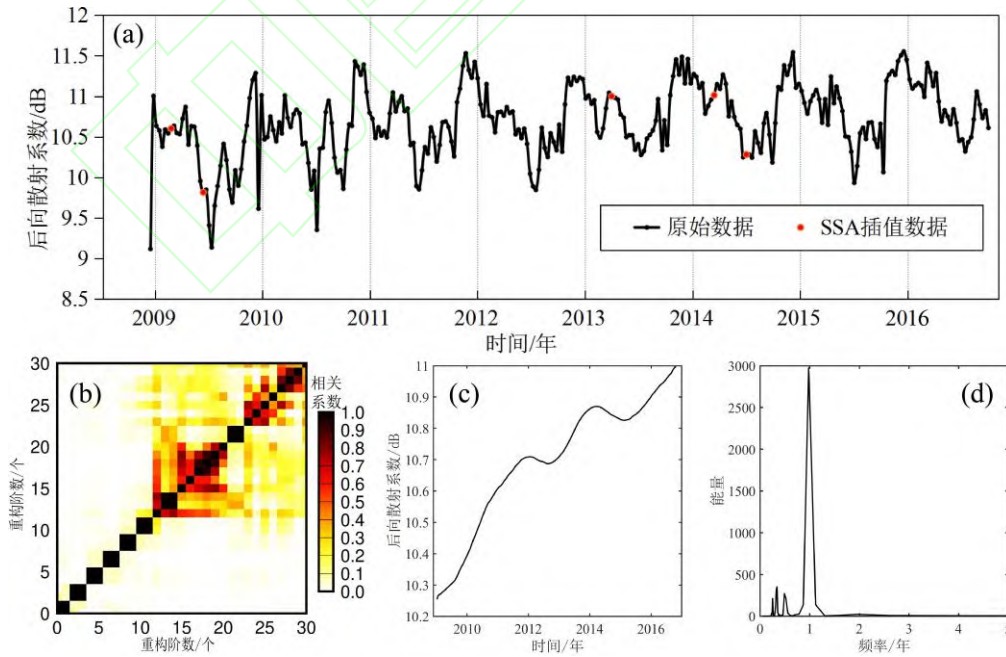


图 2 青藏高原区域内 Jason2-Ku 波段后向散射系数时变信息：(a) SSA 插值后后向散射系数时间序列；(b) 时间序列 SSA 前 30 阶重构成分的 ω -correlations；(c) SSA 分析提取到的时间序列的趋势；(d) SSA 分析提取到的时间序列的频谱特征。

势变化; (d) SSA 获取到周期项下 FFT 频谱分析图

Fig.2 Time-varying information of the backscatter coefficient in the Jason-2 Ku band under the Tibetan Plateau region: (a) SSA interpolated backscatter coefficient time series; (b) The ω -correlations of the first 30 reconstructed components of the time series with SSA; (c) Trend change of time series extracted by SSA analysis; (d) The periodic characteristics of the time series extracted by SSA and analyzed by FFT spectrum

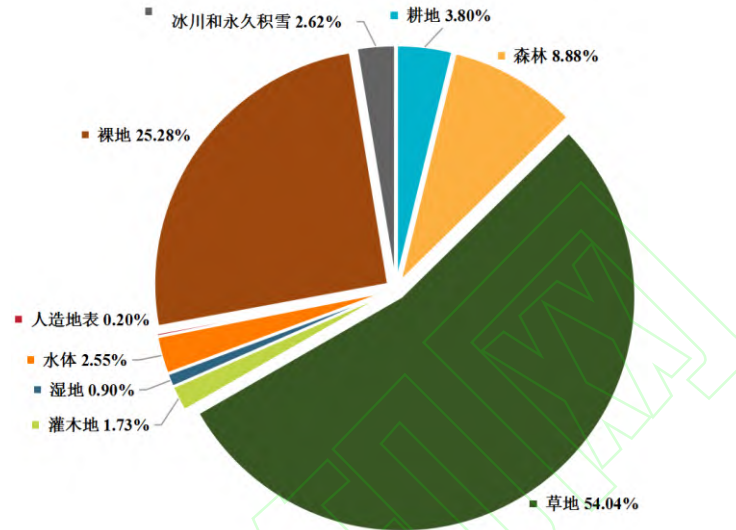


图 3 Jason-2 后向散射系数在青藏高原九项地表类型下占比

Fig.3 Proportion of Jason-2 backscatter coefficient in nine surface-types over the Tibetan Plateau

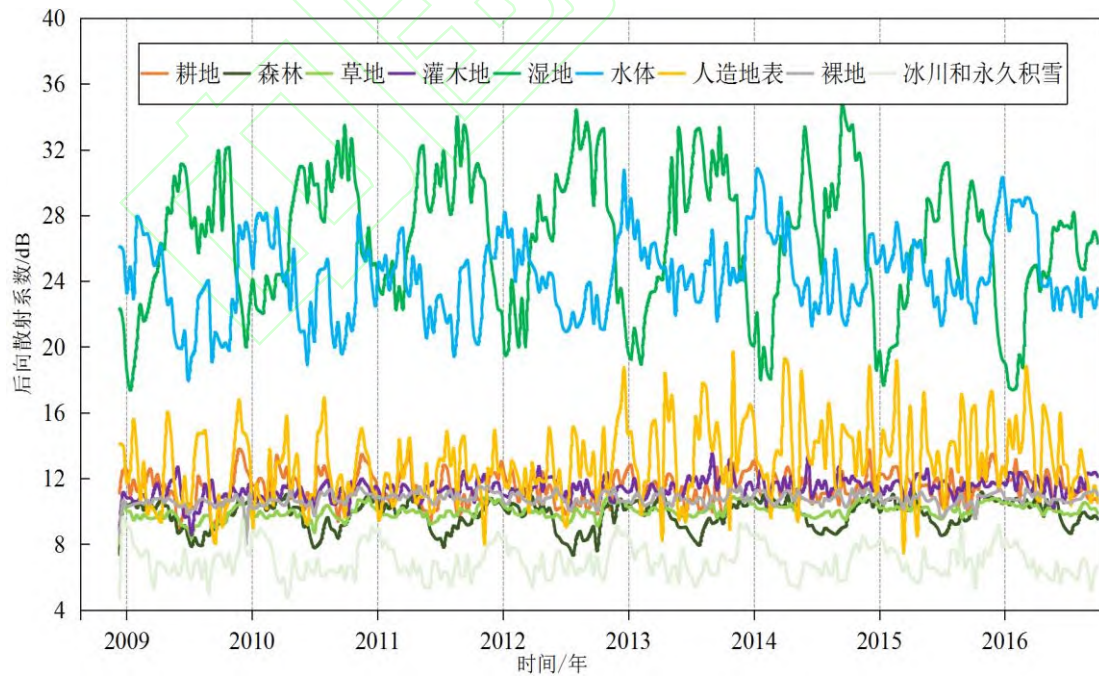


图 4 青藏高原区域内九种地表类型下 Jason-2 Ku 波段 sigma0 时间序列

Fig.4 Jason-2 Ku band sigma0's time series from nine surface-types in the Tibetan Plateau

2.2 不同地表类型下 σ_0 时变序列分析

获取并筛选青藏高原区域内的后向散射系数,对各个地表属性的数据占比进行统计:草地属性地表内的后向散射系数占比最多,裸地其次,人造地表占比最少(见图3)。根据青藏高原区域各个地表特征内的后向散射系数时间序列变化特征(见图4),对各个序列进行分析,我们能够获取到以下信息:

(1) 周期性特征明显。湿地、水体、森林、草地、雪地地表类型的后向散射系数呈现明显的周期特征,人造地表、耕地、灌木地、裸地的地表后向散射系数有较小的浮动变化,这是由于本身的地表性质稳定但仍受气候制约。青藏高原裸地多为荒漠地域,地表性质变化受气候变化影响最小,裸地区域的后向散射系数呈现的变化最为稳定。

(2) 森林、草地区域 σ_0 的时间序列相关性最高,两个区域地表性质的变化最为接近。除湿地外,其余地表属性下的后向散射系数同整体时变具有一致规律(见表1)。湿地地区独特的变化特征可以应用于区分湿地变化边界中去。因为 σ_0 对应的研究区多为草地区域(见图3),草地的变化同整体变化具有最高的相关性。

(3) 湿地、水体等区域具有较高的后向散射特征,积雪区域的后向散射系数最低,推测这是由于不同性质复介电常数的影响,同时积雪在不同季节的深度对后向散射也有一定的影响^[31-32]。

对各个属性下的后向散射系数进行统计。数据的标准差能够描述区域性质的稳定性,标准差越小,稳定性越高。本文计算了

后向散射系数的两种标准差属性。一是基于时变序列过程,以各个周期的序列数据进行处理获取时间序列下的序列标准差,代表的是整个时变过程的稳定性;二是基于各个地表属性下的所有数据求得的整体标准差,该项代表的是在各个地表属性下,整个时间阶段(2008.12—2016.10)地表后向散射系数的变化特征及其稳定性。振幅由式(3)进行拟合处理得到的。

(1) 在 σ_0 的时变过程中,标准差和序列振幅最小的区域为裸地,这是由地表状态决定的,受气候变化影响最小的区域,后向散射系数变化在时变过程中最为稳定。而湿地和水体区域受气温、降水等气候变化影响最大,不同地表类型对应的 σ_0 时间序列具有较高的振幅和标准差(见表2)。

(2) 从整体标准差的数据状态来看,最为稳定的区域是雪地区域,整体标准差在 6.52dB 内,稳定性最差的区域为水体和湿地,可能是季节的影响,冰川和永久积雪表面性质稳定,而水体表面会覆盖有冰雪的特征,导致整个区域散射系数变化复杂。

(3) 各个区域的周年、半年振幅也受气候主导。裸地、灌木地和人造地表的周年、半年周期振幅远小于含水量较多的湿地和水体区域,前者地表变化受气候变化影响较小。

表 1 不同地表属性下后向散射系数时间序列相关系数

Tab.1 Correlation coefficients of backscatter coefficient's time series for surface attributes

属性	整体区域	森林	草地	灌木地	冰川和永久积雪	裸地	人造地表	耕地	湿地	水体
整体区域	1.00	0.73	0.93	0.42	0.43	0.66	0.30	0.53	-0.38	0.64
森林	0.73	1.00	0.60	0.16	0.40	0.31	0.12	0.49	-0.58	0.57
草地	0.93	0.60	1.00	0.46	0.38	0.59	0.32	0.45	-0.26	0.50
灌木地	0.42	0.16	0.46	1.00	-0.07	0.31	0.20	0.04	0.08	0.16
冰川和永	0.43	0.40	0.38	-0.07	1.00	0.13	0.05	0.31	-0.50	0.45

久积雪										
裸地	0.66	0.31	0.59	0.31	0.13	1.00	0.04	0.14	0.01	0.17
人造地表	0.30	0.12	0.32	0.20	0.05	0.04	1.00	0.54	-0.09	0.24
耕地	0.53	0.49	0.45	0.04	0.31	0.14	0.54	1.00	-0.45	0.48
湿地	-0.38	-0.58	-0.26	0.08	-0.50	0.01	-0.09	-0.45	1.00	-0.66
水体	0.64	0.57	0.50	0.16	0.45	0.17	0.24	0.48	-0.66	1.00

表 2 各个地表属性下后向散射系数特征量统计（单位/dB）

Tab.2 Statistics of backscatter coefficient characteristic quantity under each surface attribute (dB)

属性	均值	序列标准差	整体标准差	周年振幅	半年振幅
青藏高原区域	10.68	0.44	9.42	0.34	0.16
耕地	11.37	0.96	10.82	0.64	0.01
林地	9.82	0.86	8.45	0.97	0.38
草地	9.99	0.43	8.55	0.32	0.15
灌木地	11.37	0.64	10.09	0.03	0.16
湿地	26.33	4.19	11.94	4.64	2.03
水体	24.42	2.48	12.37	2.47	0.64
人造地表	12.78	2.34	11.45	0.27	0.12
裸地	10.74	0.39	9.40	0.10	0.14
冰川和永久积雪	6.98	0.99	6.52	0.94	0.50

2.3 周期与趋势规律分析

因为所用的 GlobeLand30 2020 是地表固定属性，以此得到的后向散射系数变化代

表固定区域的变化特征，但地表性质不断变化的，将各个属性下的时间序列按照 3.1 节下的步骤进一步处理，探究相关变化规律。

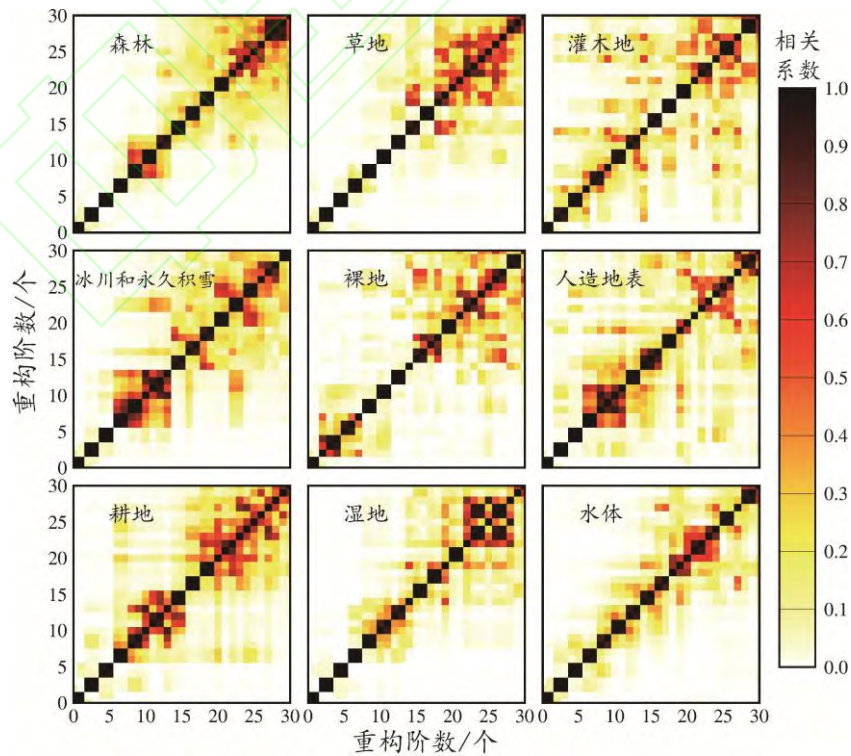


图 5 不同属性序列数据 SSA 前 30 阶重构成分的 ω -correlations

Fig.5 The ω -correlations of the first 30 reconstructed components of the differ attribute's time series with SSA

根据 SSA 分解各个属性下时间序列的情况（见图 5）得到以下结果：

（1）所有类型下的第一组 RC1 成分均为趋势项成分。通过对趋势项的分析我们能够把握整个区域后向散射系数变化浮动特征，从而把握整个区域变化规律。

（2）草地、森林和水体等受气候变化较大的区域存在 4~5 对分离较明显的 RC 特征成分，而在冰川和永久冻雪、耕地、人造

地表相对较少，在裸地只存在 RC1 一项趋势项成分，周期成分间不能较好的分离，存在较多的噪声，裸地地表稳定，周期性不显著。

图 6 展示了 SSA 对各个序列分离出的 RC1 成分，代表整个区域变化的趋势项，是整个区域不同属性的后向散射系数在 2008.12—2016.9 的变化趋势。

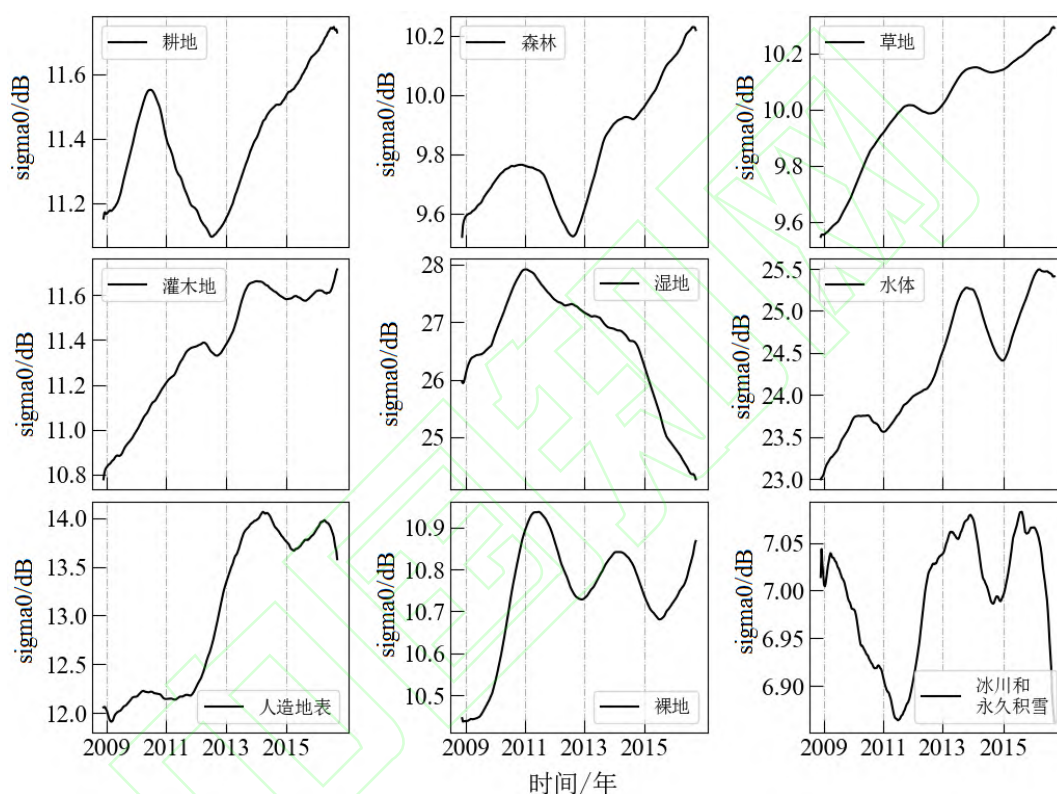


图 6 青藏高原下各个地表区域后向散射系数序列变化趋势

Fig.6 Variation trend term of backscatter coefficient series of various surface regions under the Tibetan Plateau

（1）整个青藏高原后向散射系数变化趋势以上升为主。除了湿地、冰川和永久积雪区域外，其余区域均有一定的上升趋势，这可能是由于气候变暖导致的地表水储量增多，整个区域复介电常数增加，后向散射系数上升。而湿地在 2011—2016 年呈下降趋势，这可能是湿地面积减少或者地表性质发生变化造成的。

（2）后向散射系数变化幅度因地表属性而异。森林、草地、灌木地、耕地区域在 2009—2016 年增加幅度在 0.8dB 左右，水体

和人造地表的变化趋势尤为明显，增加幅度超过了 2.0dB，湿地区域在 2011—2016 年减少幅度超过了 3.0dB，较为稳定的冰川和永久冻雪，整个时间序列下的波动范围仅保持在 0.15dB，说明该属性区域随时变的特征是稳定的。

利用 SSA 分析获取的 RC 周期项进行处理，由裸地区域分离出来的 RCs 之间的 ω -correlation 发现，除第一阶趋势项 RC1 外，其余周期项 RC 不能得到较好的分离，因此不对裸地区域的周期进行处理。利用 FFT

谱分析探寻 RC 中各个地表类型下 σ_0 存在的周期特性 (图 7)。

(1) 森林、草地、冰川和永久积雪、湿地、水体具有一致且强烈的年、半年和季度周期信号;

(2) 灌木地区周期能量较低, 推测是灌木区域较为稳定的地表属性决定的;

(3) 人造地表存在较强的季度信号, 这可能与人类活动相关, 也可能是周期信号和噪声未分离完全导致;

(4) 耕地地区年周期信号稳定, 半年周期不显著, 由于存在耕种过程, 因此区域的季度信号较为强烈。

后向散射系数随表面性质的变化而变化, 并且表面性质的变化受气候条件的限制。气候因素导致整个区域的 σ_0 呈现非线性趋势变化。

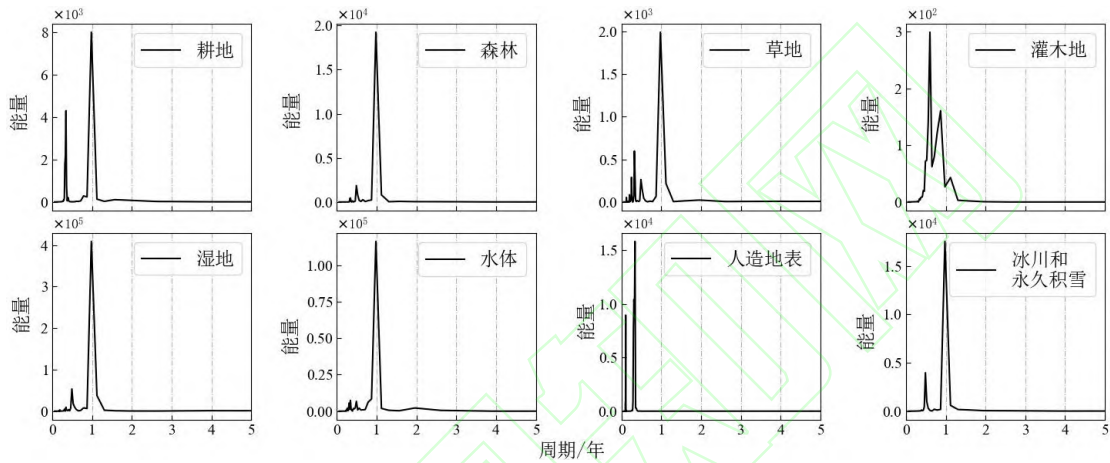


图 7 各个地表属性区域后向散射系数时变 FFT 周期图

Fig.7 FFT spectrum of time-varying periodic term of σ_0 for each surface attribute area

3 结论与展望

依据地表 GlobeLand30 分类的各项地表属性, 联合 Jason-2 搭载高度计获取的青藏高原区域 σ_0 数据进行处理, 在不同地表 σ_0 的时变特征是不同的。具体表现为:

(1) 青藏高原内的 σ_0 呈现明显的周期性变化特征。由 SSA 重构得到的 RCs 能够反映诸如趋势项、年和半年周期的特点。

(2) 根据 GlobeLand30 对青藏高原地表性质的划分, 不同地表性质下 σ_0 的数值、周期以及时序振幅有所区别, 受气候和地表因素影响, 呈现以下特征:

① 冰川和永久冻雪区域后向散射系数较小, 水体和湿地区域后向散射系数较大, 利用多源数据确定湿地季节性变化范围^[33]

的同时, 融合 σ_0 数据能够作为核验湿地范围的条件。积雪区域相较于水体, 地表的复介电常数较低, 地表粗糙程度高, 影响地表后向散射特征。

② 裸地区域的 σ_0 时变振幅明显小于随气候变化较为明显的湿地、草地、森林等区域, 且整个区域不存在明显的周期性。这是裸地区域地表性质稳定, 随气候变化地表特征变化较小。

③ 湿地区域的后向散射系数同其余林地、草地具有相反的变化特征, 可能是湿地所在区域多为高原东部的温带区域, 地表特征符合温带地区气候变化, 和高原气候变化特征相悖。

(3) 依据 SSA 分析分离获取时变序列获取到的趋势项, 我们发现整个青藏高原区域后向散射系数存在上升区域, 可能是全球变暖导致青藏高原内融水增加, 地表湿度增加造成的; 而湿地区域存在着减少趋势, 这

可能是湿地地区近些年来不断减少的结果^[34]。

GlobeLand30 数据。

Sigma0 与地面特性和气候变化密切相关。通过将数据与不同高度计的数据相结合,建立有关地表性质变化的后向散射模型和校准雷达测高数据并建立归一化标准^[35],或者按照统一标准将不同高度计数据联合应用^[36-37],对于提高对地观测的时间长度很有潜力^[38-39]。此外,GlobeLand30 V2020 数据的地表分类种类为 10 类,总体精度为 85.72%,具体规律可能存在部分误差^[40]。利用更高分类的 2020 年全球 30 m 地表覆盖精细产品 (GLC_FCS30)^[41]进行处理应该能够获取更细微地表类型间存在的差异。此外,协同散射计、光学遥感、SAR 等同其他对地观测仪器在不同时间对地联合观测进行处理^[42-43],我们才能更好地发展好对地观测技术,探索整个地球生态发展的总体趋势,方向和规律。

致谢:感谢法国 AVISO 提供 Jason-2 高度计 GDR 数据,感谢自然资源部提供的

参考文献

- [1] Fu L L, Cazenave A. Satellite Altimetry and Earth Sciences[M]. San Diego: Academic Press, 2001
- [2] Freilich M H, Vanhoff B A. The relationship between winds, surface roughness, and radar backscatter at low incidence angles from TRMM precipitation radar measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2003, 20(4): 549-562
- [3] Brown G S, Stanley H R, Roy N A. The wind-speed measurement capability of spaceborne radar altimeters[J]. in *IEEE Journal of Oceanic Engineering*, 1981, 6(2): 59-63
- [4] Chelton D B, McCabe P J. A review of satellite altimeter measurement of sea surface wind speed: With a proposed new algorithm[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1985, 90(C3): 4707-4720.
- [5] Frison P L, Mougin E. Use of ERS-1 wind scatterometer data over land surfaces[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1996, 34(2): 550-560
- [6] Remy F, Legresy B, Bleuzen S, et al. Dual-frequency Topex altimeter observations of Greenland[J]. *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, 1996, 10(11): 1507-1525
- [7] Ridley J, Strawbridge F, Card R, et al. Radar backscatter characteristics of a desert surface[J]. *Remote Sensing of Environment*, 1996, 57(2): 63-78
- [8] Wang J R, Engman E T, Mo T, et al. The effects of soil moisture, surface roughness, and vegetation on L-band emission and backscatter[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 1987, 25(6): 825-833
- [9] Méndez-Barroso L A, Vivoni E R, Watts C J, et al. Seasonal and interannual relations between precipitation, surface soil moisture and vegetation dynamics in the North American monsoon region[J]. *Journal of Hydrology*, 2009, 377(2): 59-70
- [10] Jun C, Ban Y F, Li S N. China: Open access to Earth land-cover map[J]. *Nature*, 2014, 514(7523): 434-434
- [11] Liu Xiaodong, Chen Baode. Climatic warming in the Tibetan Plateau during recent decades[J]. *International Journal of Climatology*, 2000, 20(14): 1729-1742
- [12] Dewey J F, Shackleton R M, Chengfa C, et al. The tectonic evolution of the Tibetan Plateau[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Mathematical and Physical Sciences*, 1988, 327(1594): 379-413
- [13] Pan Baotian, Li Jijun. Qinghai-Tibetan Plateau: A Driver and Amplifier of the Global Climatic Change——III The effects of the uplift of Qinghai-Tibetan Plateau on Climatic Changes[J]. *Journal of Lanzhou University*, 1996, 32(1): 108-115(潘保田,李吉均.青藏高原: 全球气候变化的驱动机与放大器——III 青藏高原隆起对气候变化的影响[J].兰州大学学报, 1996, 32(1): 108-115)
- [14] Kang Shichang, Xu Yanwei, You Qinglong, et al. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2010, 5(1): 015101
- [15] Guo Jinyun, Yang Lei, Liu Xin, et al. On temporal-spatial distribution of backscatter coefficients over China determined by TOPEX/Poseidon mission[J]. *Science China Earth Sciences*, 2012, 55(12): 2068-2083
- [16] Cheng Pengfei, Wen Hanjiang, Lin Huanling, et al. Research Situation and Future Development of Satellite Geodesy[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(1): 48-54(程鹏飞, 文汉江, 刘焕玲, 董杰. 卫星大地测量学的研究现状及发展趋势[J]. 武汉大学学报 信息科学版, 2019, 44(1): 48-54)
- [17] He Fei, Liu Zhaoifei, Yao Zhijun. Evaluation of the Monitoring Accuracy of Lake Water Level by the Jason-2 Altimeter Satellite[J]. *Journal of Geo-information Science*, 2020, 22(3): 494-504(何飞, 刘兆飞, 姚治君. Jason-2 测高卫星对湖泊水位的监测精度评价[J]. 地球信息科学学报,

- 2020,22(3):494-504)
- [18] Papa F, Legréy B, Rény F. Use of the Topex-Poseidon dual-frequency radar altimeter over land surfaces[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2003, 87(2-3): 136-147
- [19] Lambin J, Morrow R, Fu L L, et al. The ostm/jason-2 mission[J]. *Marine Geodesy*, 2010, 33(S1): 4-25
- [20] Picot N, Case K, Desai S, et al. AVISO and PODAAC user handbook. IGDR and GDR Jason products[R]. Jet Propulsion Laboratory, California Institute of Technology, Pasadena, CA, 2003
- [21] Martin T V, Zwally H J, Brenner A C, et al. Analysis and retracking of continental ice sheet radar altimeter waveforms[J]. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 1983, 88(C3): 1608-1616
- [22] Kondrashov D, Ghil M. Spatio-temporal filling of missing points in geophysical data sets. *Nonlinear Process Geophys*, 2006, 13(2): 151-159
- [23] Hassani H. Singular spectrum analysis: methodology and comparison[J]. *Journal of Data Science*, 2007, 5(2): 239-257
- [24] Guo Jinyun, Gao Wenzong, Yu Hongjuan, et al. Gravity Tides Extracted from Relative Gravimetric Data with Singular Spectrum Analysis[J]. *Chinese Journal of Geophysics*, 2018,61(10):3889-3902(郭金运,高文宗,于红娟,等.基于奇异谱分析的静态相对重力观测重力固体潮提取[J].地球物理学报, 2018, 61(10): 3889-3902)
- [25] Shen Yi, Guo Jinyun, Liu Xin, et al. Long-term prediction of polar motion using a combined SSA and ARMA model[J]. *Journal of Geodesy*, 2018, 92(3): 333-343
- [26] Guo Jinyun, Yang Lei, Liu Xin, et al. Decadal variation in surface characteristics over Xinjiang, Western China, from TAP altimetry backscatter coefficients: evidence of climate change[J]. *Terrestrial, Atmospheric & Oceanic Sciences*, 2013, 24(4): 565
- [27] Adodo F I, Remy F, Picard G. Seasonal variations of the backscattering coefficient measured by radar altimeters over the Antarctic Ice Sheet[J]. *The Cryosphere*, 2018,12(5):1767-1778
- [28] Chen Jin, Zhu Xiaolin, Vogelmann J E, et al. A simple and effective method for filling gaps in Landsat ETM+ SLC-off images[J]. *Remote sensing of environment*, 2011, 115(4): 1053-1064
- [29] Zhang Yuojing, Wang Junzhan, Bao Yansong. Soil Moisture Retrieval from Multi-resource Remotely Sensed Images Over a Wheat Area[J]. *Advances in Water Science*, 2010, 21(2): 222-228(张友静, 王军战, 鲍艳松. 多源遥感数据反演土壤水分方法[J].水科学进展, 2010, 21(2): 222-228)
- [30] Chen Huai, Ju Peijun, Zhang Jiang, et al. Attribution Analyses of Changes in Alpine Grasslands on the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2020, 65(22): 2406-2418(陈槐,鞠佩君,张江,等.青藏高原高寒草地生态系统变化的归因分析[J].科学通报, 2020, 65(22): 2406-2418)
- [31] Papa F, Legresy B, Mognard N M, et al. Estimating terrestrial snow depth with the TOPEX-Poseidon altimeter and radiometer[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2002, 40(10): 2162-2169
- [32] Haas C, Beckers J, King J, et al. Ice and snow thickness variability and change in the high Arctic Ocean observed by in situ measurements[J]. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(20): 10462-10469
- [33] Yang Lamei, Jia Yonghong. A Method for Determining the Natural Boundary of Seasonal Saltwater Lake Wetland with Multi-source Data[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2020, 45(3): 419-425 (杨腊梅, 贾永红. 利用多源数据确定季节性咸水湖湿地自然边界的方法[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2020, 45(3): 419-425)
- [34] Wang Genxu, Li Yuanshou, Wang Yibo, et al. Typical Alpine Wetland System Changes on the Tibet Plateau in Recent 40 Years[J]. *Acta Geographica Sinica Chinese Edition*, 2007,62(5):481-491(王根绪, 李元寿, 王一博, 陈玲, 等. 近 40 年来青藏高原典型高寒湿地系统的动态变化[J]. 地理学报, 2007, 62(5): 481-491)
- [35] Yang Le, Du Hejuan, Ma Hongzhang, et al. Use of

- the merged dual-frequency radar altimeter backscatter data over China land surface[C]. *2010 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, 2010: 1454-1457
- [36] Yang Le, Liu Qinhuo, Zhao Jing, et al. Global land surface backscatter at Ku-band using merged Jason1, Envisat, and Jason2 data sets[J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 53(2): 784-794
- [37] Yuan Jiajia, Guo Jinyun, Liu Xin, et al. Mean sea surface model over China seas and its adjacent ocean established with the 19-year moving average method from multi-satellite altimeter data[J]. *Continental Shelf Research*, 2020, 192: 104009
- [38] Li Dawei, Li Jiancheng, Jin Taoyong, HU Minzhang. Monitoring Global Sea Level Change from 1993 to 2011 Using TOPEX and Jason Altimeter Missions[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2012, 37(12): 1421-1424(李大伟, 李建成, 金涛勇, 胡敏章. 利用多代卫星测高资料监测 1993~2011 年全球海平面变化[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2012, 37(12): 1421-1424)
- [39] Hwang Cheinway, Cheng Yungsheng, Yang Wanhsin, et al. Lake level changes in the Tibetan Plateau from Cryosat-2, SARAL, ICESat, and Jason-2 altimeters[J]. *Terrestrial Atmospheric and Oceanic Sciences*, 2019, 30(1):1-18
- [40] Chen Fei, Chen Jun, Wu Hao, et al. A landscape shape index-based sampling approach for land cover accuracy assessment[J]. *Science China Earth Sciences*, 2016, 59(12): 2263-2274
- [41] Gong Peng, Wang Jie, Yu Le, et al. Finer resolution observation and monitoring of global land cover: First mapping results with Landsat TM and ETM+ data[J]. *International Journal of Remote Sensing*, 2013, 34(7): 2607-2654
- [42] Li Peng, Li Dahui, Li Zhenhong, et al. Wetland Classification Through Integration of GF-3 SAR and Sentinel-2B Multispectral Data over the Yellow River Delta[J]. *Geomatics and Information Science of Wuhan University*, 2019, 44(11): 1641-1649(李鹏, 黎达辉, 李振洪, 王厚杰. 黄河三角洲地区 GF-3 雷达数据与 Sentinel-2 多光谱数据湿地协同分类研究[J]. 武汉大学学报·信息科学版, 2019, 44(11): 1641-1649)
- [43] Young I R, Sanina E, Babanin A V. Calibration and cross validation of a global wind and wave database of altimeter, radiometer, and scatterometer measurements[J]. *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology*, 2017, 34(6): 1285-1306.

Time-varying analysis of backscatter coefficient corresponding to different surface types in the Tibetan Plateau

CHEN Xiaodong¹ GUO Jinyun¹ SUN Mingzhi¹ ZHU Guangbin² CHANG Xiaotao²

¹ College of Geodesy and Geomatics, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China

² Land Satellite Remote Sensing Application Center of MNR, Beijing 100048, China

Abstract: Backscatter coefficient (σ_0) is one of observations of satellite radar altimetry. It is related to the physical and geometric characteristics of land surface under the influence of global/regional climate change. σ_0 can be used for monitoring surface features under climate change, data calibration and verification of satellite altimeters, inversion of surface features (e.g. soil moisture, snow thickness, etc.) and other fields. GlobeLand30, as the global land cover information with the resolution of 30 m, was produced in China. The Geophysical Data Record (GDR) data of Jason-2 was used to extract and isolate the Ku-band σ_0 data of the Tibetan Plateau (TP). By using the GlobeLand30 2020 version as the basis for surface classification, the latitude and longitude paired σ_0 data give surface attributes, and then we obtain the

time-varying sequence of σ_0 under different types of surface features. The singular spectrum analysis (SSA) interpolation is used to fill in missing data. The σ_0 time change trend and period information of the entire TP and different surface attributes are extracted and identified with SSA, and the period results are analyzed by FFT. From the analysis of σ_0 under different surface attributes, its time-varying sequence has different characteristic results: (1) The σ_0 is higher in waters and wetland areas, and the σ_0 is lower in permanent snow and ice areas. (2) There are stable annual, semi-annual and quarterly signals for σ_0 in the TP. The surface properties of the artificial surfaces, bare land, and shrubland area are stable, and the annual σ_0 change is not significant. The changes of σ_0 in other regions have significant annual and semi-annual periods. The amplitude of the semi-annual and quarterly signal is varies with the nature of the surface. (3) The σ_0 changes in the TP show an increasing trend. It is caused by climate change on the TP and wet surface. The σ_0 data of forest, grassland, and shrubland have the increasing trend, the σ_0 of wetland has a trend of decreasing. Besides geophysics and ocean dynamics research, satellite radar altimeter is also feasible for monitoring land environment. The σ_0 obtained by altimeter is closely related to ground properties and climate change. The effects of different geographical attributes on σ_0 in the TP show different time-varying status: (1) the change cycle of σ_0 is mainly annual cycle, and different land surface states have different periodic attributes, which is related to the response state of different land surface to climate change; (2) The σ_0 value in water and wetland is significantly higher than other areas, which may be caused by the difference of surface complex dielectric constant.

Keywords: satellite altimetry; Jason-2; backscatter coefficient (σ_0); Tibetan Plateau; singular spectrum analysis(SSA)

First author: CHEN Xiaodong, master, specializes in satellite altimetry related research. E - mail: ralking@163.com

Corresponding author: GUO Jinyun, PhD, professor. E - mail: jinyunguo1@126.com

Foundation support: The National Natural Science Foundation of China(41774001); the Autonomous and Controllable Special Project for Surveying and Mapping of China (816-517).