氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

基于CERES观测数据的全球行星反照率时空变化特征分析

吕明珠 宋雁 李喜佳 瞿瑛

Spatiotemporal Characteristics Analysis of Global Planetary Albedo Using Clouds and the Earth's Radiant Energy System Data

L Mingzhu SONG Yan LI Xijia QU Ying

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20103

您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

基于和数据分析中国北方典型地区气溶胶单次散射反照率的变化趋势

Analysis of the Change Trend of Aerosol Single-Scattering Albedo in the Areas of Northern China Based on AERONET and OMI Data

气候与环境研究. 2019, 24(5): 537 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18006

2000~2016年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化

Spatial-Temporal Distribution and Variation of Land Surface Albedo over the Tibetan Plateau during 2000-2016

气候与环境研究. 2018, 23(3): 355 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113

基于1982~2013年NDVI数据的新疆30年植被状况季节与年际趋势分析

Interannual and Seasonal Trend Analysis of Vegetation Condition in Xinjiang Based on 1982-2013 NDVI Data

气候与环境研究. 2018, 23(1): 26 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.16116

长江中下游地区近年暴雨变化特征研究

Variation Characteristics of Rainstorms in Middle-Lower Reaches of the Yangtze River in Recent 60 Years

气候与环境研究. 2019, 24(6): 755 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19075

基于资料的中国西南地区云水含量和粒子有效半径分布及变化特征

Distribution and Variation of Cloud Water Content and Particle EffecticeRadius in Southwest China Based on CERES Data

气候与环境研究. 2019, 24(3): 383 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18071

基于多元数据分析的我国PM2.5浓度及其主控因子的时空分布特征研究

Spatiotemporal Distribution Characteristics of PM2.5 Concentration and Its Main Control Factors in China Based on Multivariate Data Analysis

气候与环境研究. 2018, 23(5): 596 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18013

关注微信公众号，获得更多资讯信息

吕明珠, 宋雁, 李喜佳, 等. 2021. 基于 CERES 观测数据的全球行星反照率时空变化特征分析 [J]. 气候与环境研究, 26(5): 509−518. LÜ Mingzhu, SONG Yan, LI Xijia, et al. 2021. Spatiotemporal Characteristics Analysis of Global Planetary Albedo Using Clouds and the Earth's Radiant Energy System Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (5): 509−518. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20103

基于 CERES 观测数据的全球行星反照率时空变化特征分析

吕明珠[1] 宋雁[1] 李喜佳[2] 瞿瑛[1]

1 东北师范大学地理科学学院，长春 130024
2 吉林建筑大学测绘与勘查工程学院，长春 130118

摘 要 为了理解行星反照率时空变化规律及成因，基于 CERES 数据对全球行星反照率的大气（主要为云与气溶胶等）和地表贡献进行了分解，通过 Theil-Sen+Mann-Kendall 方法得到了 2001～2018 年全球行星反照率及其大气和地表贡献的时空变化趋势，并基于回归分析方法对典型区域的变化趋势进行了初步解释。研究结果表明：1）在中低纬度区域行星反照率的大气贡献占主导地位，而在高纬度区域地表贡献相对升高，呈现纬向差异大于经向变化的模式；2）全球行星反照率呈现−0.0002/a（$p<0.05$）的变化趋势，地表贡献和大气贡献呈现−0.00015/a（$p<0.05$）与−0.00004/a（$p<0.05$）的变化趋势；3）大气贡献在火地岛西南洋面等区域呈现显著的增长趋势，而在南极洲东部等区域呈现显著的降低趋势；地表贡献在北冰洋等区域呈现显著的降低趋势，而在南极洲东部等区域呈现显著的升高趋势，并且可以基于云覆盖、积雪覆盖和 NDVI 等参量的变化有效解释典型区域的行星反照率变化。

关键词 行星反照率 大气和地表贡献分解 趋势分析 CERES 数据
文章编号 1006-9585(2021)05-0509-10 **中图分类号** TP79 **文献标识码** A
doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20103

Spatiotemporal Characteristics Analysis of Global Planetary Albedo Using Clouds and the Earth's Radiant Energy System Data

LÜ Mingzhu[1], SONG Yan[1], LI Xijia[2], and QU Ying[1]

1 *School of Geographical Sciences*, *Northeast Normal University*, *Changchun* 130024
2 *School of Geomatics and Prospecting Engineering*, *Jilin Jianzhu University*, *Changchun* 130118

Abstract Planetary albedo is defined as the ratio of the reflected and incident shortwave solar radiation at the top of the atmosphere, and it is also a critical parameter for the surface energy budget and global climate change. To improve our understanding of the spatiotemporal characteristics of the global planetary albedo, this work decomposed the atmospheric and surface contributions of the global planetary albedo using the Clouds and the Earth's Radiant Energy System data, derived the global planetary albedo trends from 2001 to 2018 using the Theil-Sen+Mann-Kendall method, and explored the driving factors of the planetary albedo in typical regions by the correlation analysis method. Results showed that: 1) In

收稿日期 2020-08-08；**网络预出版日期** 2021-03-10
作者简介 吕明珠，女，1995 年出生，硕士研究生，主要从事行星反照率时空变化分析研究。E-mail: lumz533@nenu.edu.cn
通讯作者 瞿瑛，E-mail: quy100@nenu.edu.cn
资助项目 国家自然科学基金项目 41971287、41601349，吉林省科技发展计划项目 20180520220JH、20180623058TC，中央高校基本科研业务费项目 2412019FZ003
Funded by National Natural Science Foundation of China (Grants 41971287 and 41601349), Science and Technology Development Program of Jilin Province (Grants 20180520220JH and 20180623058TC), Fundamental Research Funds for the Central Universities (Grant 2412019FZ003)

mid-low latitudes (<60°), the atmospheric contribution is the dominant factor to the planetary albedo (89.3%±5%), while in high latitudes (>60°), the surface contribution to the planetary albedo increases with latitude (29%±12%). The spatial distribution of the planetary albedo showed that the zonal variations of the planetary albedo were larger than the meridional variations. 2) A decreasing trend of −0.0002/a can be observed in the global planetary albedo from 2001 to 2018, and decreasing trends of −0.00015/a and −0.00004/a can be found in the surface and atmospheric contribution to the planetary albedo from 2001 to 2018, respectively. The decrease of the global planetary albedo can be largely explained by the decrease of the global cloud fraction. 3) For the atmospheric contribution to the planetary albedo, significant increasing trends can be found in regions of the Sahara Desert and other deserts, and significant decreasing trends can be found in the eastern Antarctic and other locations. For the surface contribution to the planetary albedo, significant increasing trends can be found in eastern Antarctica and other locations, and significant decreasing trends can be found in the Arctic Ocean and other locations. Moreover, the variation of the planetary albedo in typical regions can be effectively explained by the variation of the cloud fraction, snow cover, and the normalized difference vegetation index.

Keywords Planetary albedo, Decomposition of atmospheric and surface contributions, Trend analysis, CERES data

1 引言

地球行星反照率定义为大气层顶反射与入射短波辐射（0.3～5 μm）的比值，反映了地球表面对太阳短波下行辐射的反射能力，是影响地表辐射能量平衡和全球气候变化的关键参量（Wielicki et al., 1995; Hall, 2004; Donohoe and Battisti, 2011）。卫星观测数据表明全球行星反照率均值约为 0.3，意味着到达地球表面的太阳辐射有 30% 会被反射回太空，而 70% 则会被地气系统吸收（Liang et al., 2019）。当平均太阳入射辐射通量为 340.25 W/m^2 时，行星反照率发生 0.01 的微小变化对应着 3.4 W/m^2 的辐射强迫变化，相当于二氧化碳（CO_2）倍增导致的辐射强迫效应（Wielicki et al., 2005），因此明确全球行星反照率时空变化特征及其主导驱动因子具有重要的研究意义。

行星反照率的时空变化受到大气和地表参量共同作用，因此需要通过对行星反照率的大气和地表贡献进行分解，明确不同地表和大气参量对行星反照率变化的影响和作用机制（Jian et al., 2018）。Qu and Hall（2005）研究发现在全球尺度上大气对行星反照率的贡献约为 75%，地表反照率变化对行星反照率的贡献被大气严重削弱，而在极地区域海冰覆盖变化对行星反照率的贡献要显著大于云量变化的贡献。在此基础上，Donohoe and Battisti（2011）对全球行星反照率的大气（云与气溶胶等）和地表贡献进行了分解，发现 88% 的全球行星反照率可以归因于大气贡献，且地表对行星反照率的贡献被大气削弱为原来的 1/3。Pistone et al.（2014）发现由于北极海冰覆盖面积的缩减，1979～2011 年北极地区行星反照率从 0.52 下降至 0.48，产生了+6.4±0.9 W/m^2 的辐射强迫。Jian et al.（2018）分析了行星反照率的变化与云特性（如云覆盖度、冰水路径和液态水路径）以及地表参数（如冰/雪覆盖度和归一化植被指数）的相关关系，结果表明云覆盖度主导了中低纬度地区行星反照率的变化率，而冰雪覆盖率（或地表反照率）主导了中高纬度地区的变化率，北极海冰与积雪覆盖面积的减少导致地表反照率快速降低，改变了北极地区的地表能量平衡。为了研究北极地区地表反照率对行星反照率的影响及大气在能量平衡中的调节作用，Sledd and L'Ecuyer（2019）对行星反照率的大气和地表贡献进行了分解，发现北极地区地表反照率与积雪和海冰覆盖度密切相关，而大气的削弱作用使得只有一半左右的地表反照率变化反映到行星反照率的变化上。Loeb et al.（2019）基于 2000～2018 年的云和地球辐射能量系统（Clouds and the Earth's Radiant Energy System, CERES）能量平衡与填补（Energy Balanced and Filled, EBAF）4.0 版数据进行行星反照率贡献分解，发现全球行星反照率变化的 81% 由大气贡献，6% 由地表贡献，剩余 13% 为大气与地表的共同作用。

近几十年来，在全球气候变化和人类活动的影响下，全球大气（云和气溶胶等）和地表参量（积雪覆盖、植被覆盖和土壤表面湿度等）正在发生着显著变化，使得行星反照率及其大气和地表贡献也在发生着变化（Song et al., 2018）。本文在以往研究（Jian et al., 2018; Loeb et al., 2018, 2019）的基础上，基于长时间序列卫星遥感观测数据对全球行星反照率进行了贡献分解及时空变化分析，并对典型

区域行星反照率时空变化规律进行探索性研究。在本研究中，首先基于长时间序列的行星反照率数据集对大气和地表的贡献进行了分解，然后使用 Theil-Sen 中值斜率算子和 Mann-Kendall 统计检验相结合的方法，获得了全球行星反照率及大气和地表贡献的年际变化趋势，最后基于相关分析方法对典型区域的行星反照率变化趋势进行了初步解释。

2　数据与方法

2.1　CERES 数据

CERES 是地球观测系统（Earth Observing System, EOS）的重要组成部分之一，提供了全球尺度大气层顶辐亮度、地表反射率和辐射通量的瞬时观测值，能够为地球辐射和云反馈系统变化监测研究提供高时效和准确性的观测数据（Wielicki et al., 1996）。在本研究中，使用 2001～2018 年 CERES EBAF 4.1 版（Kato et al., 2015; Loeb et al., 2018）的大气层顶与地表短波辐射通量数据对全球行星反照率贡献及其时空变化进行了分析。CERES EBAF 数据集包含了全球太阳短波辐射、大气层顶短波上行辐射、地表短波下行辐射、地表短波上行辐射和云辐射效应通量等月均值数据，数据的时间分辨率为 1 个月，空间分辨率为 1°（纬度）×1°（经度），可通过 CERES 数据服务中心网站（https://ceres.larc.nasa.gov.[2019-09-19]）获取。该数据集的大气层顶辐射通量数据是通过 CERES 传感器观测获得（Loeb et al., 2018），而地表辐射通量数据是通过云/气溶胶特性和大气温湿度廓线再分析资料计算获得（Kato et al., 2015）。

2.2　驱动因子分析数据

为了分析行星反照率时空变化与大气和地表参量之间的关系，本研究使用了 MERRA-2（Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications, Version 2）（Gelaro et al., 2017）气溶胶光学厚度（MERRA2_300.tavgM_2d_aer_Nx）和土壤表层湿度（MERRA2_300.tavgM_2d_lnd_Nx）数据，CERES 云覆盖度（CERES_EBAF 4.1）和冰雪覆盖度（CERES_SSF1deg 4A）数据以及 MODIS（Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer）归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index, NDVI）（MOD13C2）数据。其中 MERRA-2、CERES 与 MODIS 数据集的空间分辨率分别为 0.625°（纬度）×0.5°（经度）、1°（纬度）×1°（经度）和 0.05°（纬度）×0.05°（经度），时间分辨率均为 1 个月，可以通过美国宇航局戈达德地球科学数据与信息服务中心网站（https://disc.gsfc.nasa.gov.[2019-12-06]）获取。

2.3　行星反照率贡献分解方法

为了理解地球行星反照率的时空变化特征及其主导驱动因子，本研究使用了 Donohoe and Battisti（2011）的方法将行星反照率分解为地表和大气贡献两部分。该方法基于一个单层大气辐射传输辐射模型（如图 1 所示），假定地表和大气散射具有各向同性，则可以将大气层顶短波上行辐射通量表达为大气程反射与地气之间多次散射之和的形式：

$$\begin{aligned} F_{\mathrm{uTOA}} &= S\left[R+\alpha(1-R-A)^2+\alpha^2R(1-R-A)^2\right. \\ &\quad \left.+\alpha^3R^2(1-R-A)^2+\cdots\right] \\ &= SR+S\alpha(1-R-A)^2[1+(\alpha R)+(\alpha R)^2+\cdots] \\ &= SR+S\alpha\frac{(1-R-A)^2}{1-\alpha R}, \end{aligned} \tag{1}$$

其中, F_{uTOA} 为大气层顶短波上行辐射，S代表太阳短波下行辐射，R代表大气程反射率（path reflectance，即假设地表反照率为 0 时，纯粹由大气贡献的行星反照率），A代表大气吸收率，α代表地表反照率。同理可知地表短波下行辐射 F_{dSURF} 和短波上行辐射 F_{uSURF} 通量为

$$F_{\mathrm{dSURF}} = S\frac{(1-R-A)}{1-\alpha R}, \tag{2}$$

$$F_{\mathrm{uSURF}} = \alpha S\frac{(1-R-A)}{1-\alpha R} = \alpha F_{\mathrm{dSURF}}, \tag{3}$$

并可以进一步将行星反照率分解为大气贡献（$\alpha_{\mathrm{P,ATMOS}}$，纯粹的大气散射贡献）与地表贡献（$\alpha_{\mathrm{P,SURF}}$，地表与大气间多次反射贡献）两部分，

$$\alpha_{\mathrm{P,ATMOS}} = R, \tag{4}$$

$$\alpha_{\mathrm{P,SURF}} = \alpha\frac{(1-R-A)^2}{1-\alpha R}. \tag{5}$$

基于 CERES EBAF 数据集可以获得 F_{uSURF}、F_{dSURF}、S 和 F_{uTOA} 的月均值数据，基于公式（1）～（3）可以推导出α、R 和 A 分别为

$$\alpha = \frac{F_{\mathrm{uSURF}}}{F_{\mathrm{dSURF}}}, \tag{6}$$

$$\begin{aligned} R &= \frac{S\,F_{\mathrm{uTOA}}-\alpha F^2{}_{\mathrm{dSURF}}}{S^2-\alpha^2F^2{}_{\mathrm{dSURF}}} \\ &= \frac{S\,F_{\mathrm{uTOA}}-F_{\mathrm{uSURF}}\times F_{\mathrm{dSURF}}}{S^2-F^2{}_{\mathrm{uSURF}}}, \end{aligned} \tag{7}$$

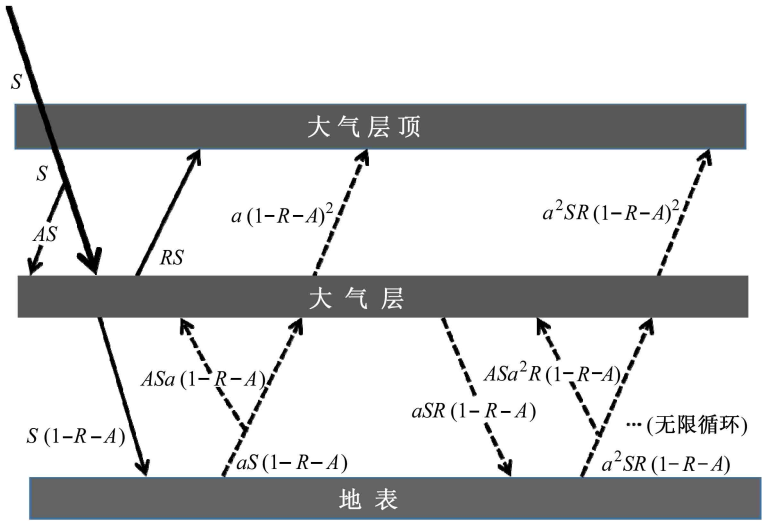

图 1 大气辐射传输模型示意图 [引自 Donohoe and Battisti（2011）]

Fig. 1 Schematic illustration representing the atmospheric radiative transfer model [Adapted from Donohoe and Battisti (2011)]

$$A=\frac{S-SR-F_{\mathrm{dSURF}}(1-\alpha R)}{S}=\frac{S-F_{\mathrm{uTOA}}+F_{\mathrm{uSURF}}-F_{\mathrm{dSURF}}}{S+F_{\mathrm{dSURF}}},\qquad(8)$$

将公式（6）~（8）计算结果代入到公式（4）~（5），即可得到行星反照率的大气和地表贡献。在本研究中，基于 2001～2018 年 CERES EBAF 数据将全球行星反照率分解为地表和大气贡献两部分，并进一步分析了其时空分布规律及主导驱动因子。

2.4 趋势分析方法

在本研究中，采用 Theil-Sen（Theil, 1992）中值斜率算子和 Mann-Kendall（Mann, 1945）统计检验相结合的方法分析了全球行星反照率及地表和大气贡献的时空变化趋势。Theil-Sen 中值斜率算子是一种适用于长时间序列数据趋势分析的方法，可以很好地避免噪声的干扰；而非参数的 Mann-Kendall 检验对序列分布无要求且对异常值不敏感，被广泛应用于检测环境数据、气候和水文数据的单调趋势（Pohlert, 2020）。其中 Thiel-Sen 中值斜率算子的计算方法为

$$\beta=\mathrm{Median}\left(\frac{x_j-x_i}{j-i}\right)\forall j>i,\qquad(9)$$

其中 x_i 和 x_j 分别代表时间序列 i 和 j 的观测值，当 $\beta>0$ 时，表明数据呈上升趋势；当 $\beta<0$ 时，数据呈下降趋势；当 $\beta=0$ 时，数据无变化趋势。

Mann-Kendall 统计检验方法对于序列 $X_t=(x_1,x_2,...,x_n)$，通过确定所有对偶值 $(x_i,x_j,j>i)$ 中 x_i 与 x_j 的大小关系 S 来评价时间变化趋势的显著性，

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}\mathrm{sgn}(x_j-x_i),\qquad(10)$$

$$\mathrm{sgn}(x_j-x_i)=\begin{cases}+1, & x_j-x_i>0,\\ 0, & x_j-x_i=0,\\ -1, & x_j-x_i<0,\end{cases}\qquad(11)$$

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S>0,\\ 0, & S=0,\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{VAR}(S)}}, & S<0,\end{cases}\qquad(12)$$

$$\mathrm{VAR}(S)=\frac{n(n-1)(2n+5)}{18},\qquad(13)$$

其中，n 是时间序列中数据量，在给定显著性水平 α 下采用双尾检验，当 $|Z|\leqslant Z_{1-a/2}$ 时，表明变化趋势不显著；$|Z|>Z_{1-a/2}$，表明变化趋势显著。在本研究中将落入 95% 置信区间（$p<0.05$）的趋势作为显著变化趋势。

在本研究中，基于 Thiel-Sen+Mann-Kendall 方法对行星反照率、地表和大气贡献的年均值和变化趋势的空间分布进行了分析，其中全球行星反照率年均值通过短波下行辐射与面积权重联合加权法计算（Zhang et al., 2019）：

$$\bar{\alpha}=\frac{\sum\alpha_i F_{\mathrm{d}i}S_{\mathrm{a}}}{\sum F_{\mathrm{d}i}S_{\mathrm{a}}},\qquad(14)$$

其中，$\bar{\alpha}$ 表示全球行星反照率/大气和地表贡献年均值，α_i 代表 CERES 行星反照率（地表和大气贡献）第 i 月的数据值，$F_{\mathrm{d}i}$ 和 S_{a} 分别代表对应月份的短

波下行辐射与所在像元面积权重。

2.5　相关分析方法

在行星反照率变化主导驱动因子分析中，根据行星反照率变化趋势显著性和驱动因素数据的可获得性选取了 10 个行星反照率变化显著的区域（如图 2 所示，分别标注为 A–J 区域）：非洲南部西风漂流带洋面、墨西哥以西洋面、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原地区、美国佛利里达州以东洋面、印度、亚马孙热带雨林、东西伯利亚泰加林区、哈萨克斯坦、中国东北地区热点区域与华东地区热点区域。本研究基于 Pearson 相关性，分析了这些典型区域行星反照率大气贡献与云覆盖度和气溶胶光学厚度的相关关系以及行星反照率地表贡献与积雪覆盖度、NDVI 和土壤湿度的相关关系，相关系数 r 的计算公式为

$$r=\frac{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})(Y_i-\overline{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(X_i-\overline{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Y_i-\overline{Y})^2}} \tag{15}$$

其中，n 代表样本数量，X_i与Y_i代表变量 X（积雪覆盖度、NDVI、土壤湿度、云覆盖度和气溶胶光学厚度等）与 Y（行星反照率地表贡献或大气贡献）样本观测值，$\overline{X}$与$\overline{Y}$代表变量 X 与 Y 的均值。

3　结果与分析

3.1　全球反照率及贡献多年均值空间分布

2001～2018 年全球行星反照率、地表反照率、大气贡献和地表贡献的多年均值空间分布情况如图 3 所示。从图中可以发现，由于极地冰雪具有较高的反照率（李喜佳，2019），行星与地表反照率在极地区域数值相对较高（0.8 左右），而反照率的经向差异要大于纬向变化（Donohoe and Battisti, 2011），地表反照率存在显著的海陆差异且与植被覆盖度具有明显的相关关系（如撒哈拉、沙特阿拉伯与澳大利亚中部等沙漠地区反照率高于同纬度地区）。

行星反照率、地表反照率、大气贡献与地表贡献的纬向变化趋势如图 4 所示。在中低纬度（<60°）地区，大气贡献占主导地位（89.3%±5%），大气将地表对行星反照率的贡献作用削减为原来的约 1/3 （Donohoe and Battisti, 2011）；而在高纬度（60°～90°）地区，地表对行星反照率的贡献显著提升（29%±12%），但大气贡献仍然略高于地表贡献，其中云是大气贡献的主要影响因素，并且能够有效地削减了约 50% 的地表贡献（Stephens et al., 2015）。在全球尺度上，云覆盖会削弱地表对行星反照率的贡献，使得只有约 1/3～1/2 的地表反照率变化反映到行星反照率的变化上（Sledd and L'Ecuyer, 2019）。

3.2　全球反照率及大气和地表贡献时空变化趋势

2001～2018 年全球行星反照率及大气和地表贡献的时间变化趋势如图 5 所示。从图中可以发现 2001～2018 年行星反照率呈现−0.00020/a（$p<0.05$）的显著降低趋势，而大气与地表贡献分别呈现−0.00015/a（$p<0.05$）与−0.00004/a（$p<0.05$）的降低趋势，其中大气贡献的变化占主导地位，而地表反照率变化的贡献在一定程度上被大气衰减作用削弱。云量是行星反照率与大气贡献主要影响因素，

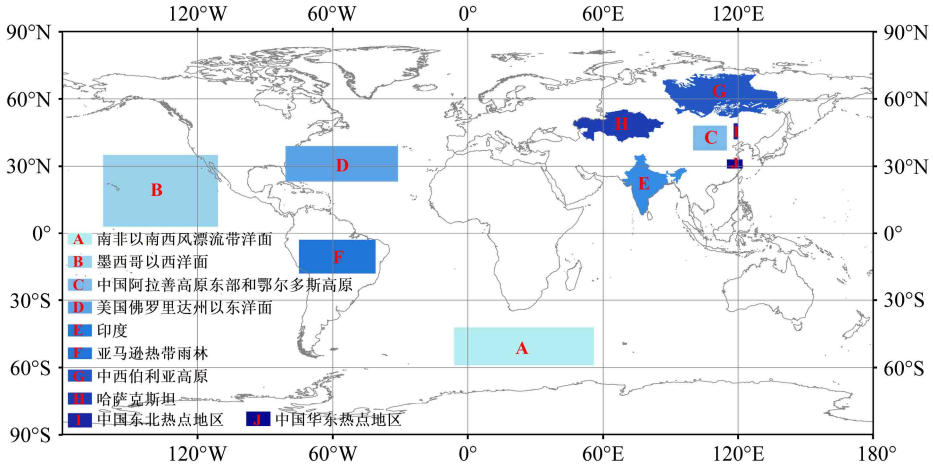

图 2　行星反照率大气贡献与地表贡献典型区域

Fig. 2　Spatial distribution of typical regions for the analysis of the atmospheric and surface contributions of the planetary albedo

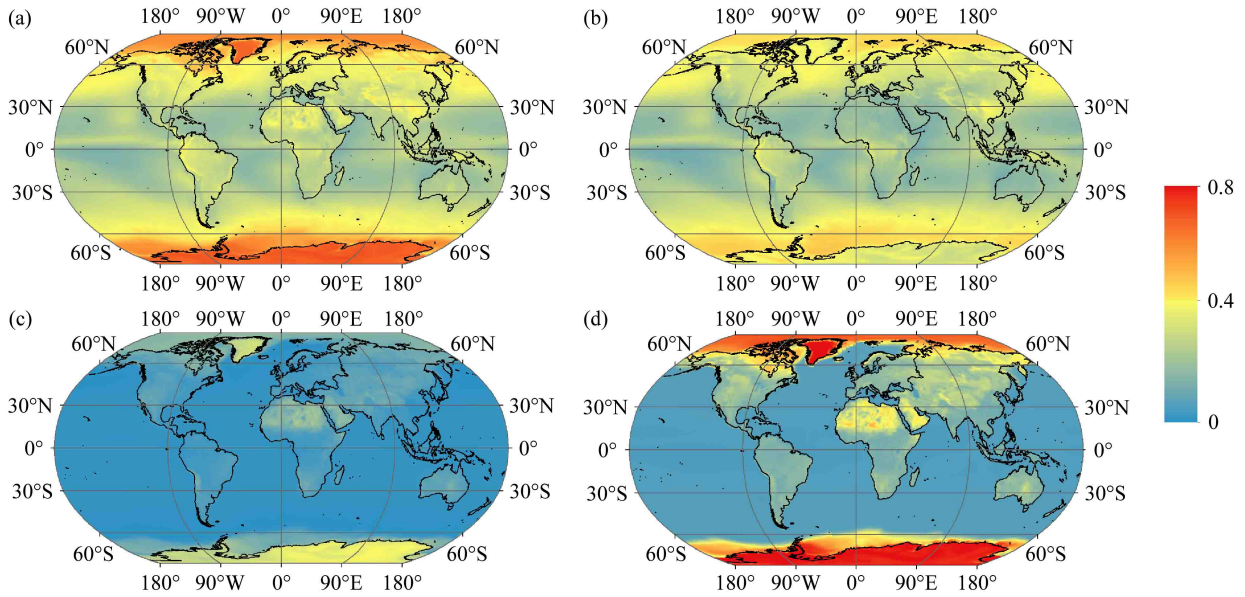

图 3 2001～2018 年全球（a）行星反照率、（b）大气对行星反照率的贡献、（c）地表对行星反照率的贡献、（d）地表反照率年均值空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the annual mean global (a) planetary albedo, (b) atmospheric and (c) surface contributions, and (d) surface albedo from 2001 to 2018

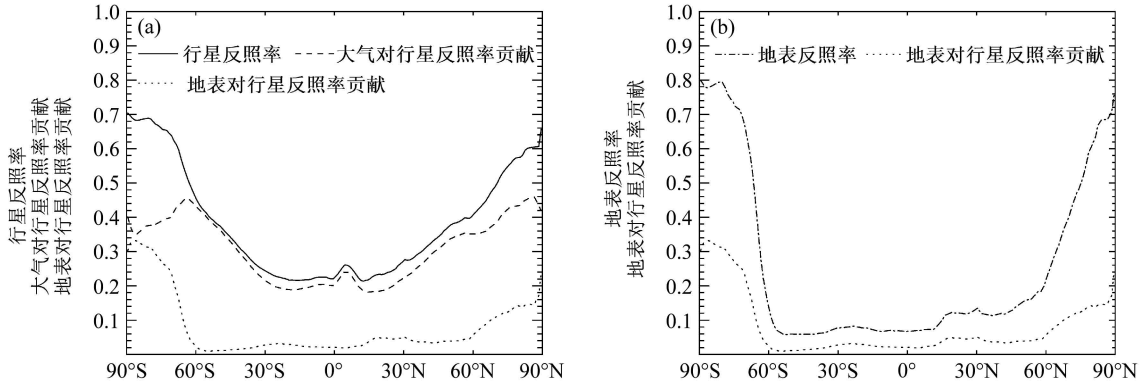

图 4 2001～2018 年（a）行星反照率、（b）地表反照率及地表和大气对行星反照率的贡献随纬度变化规律

Fig. 4 Zonal mean of (a) planetary albedo, (b) surface albedo, and surface and atmospheric contributions to the planetary albedo from 2001 to 2018

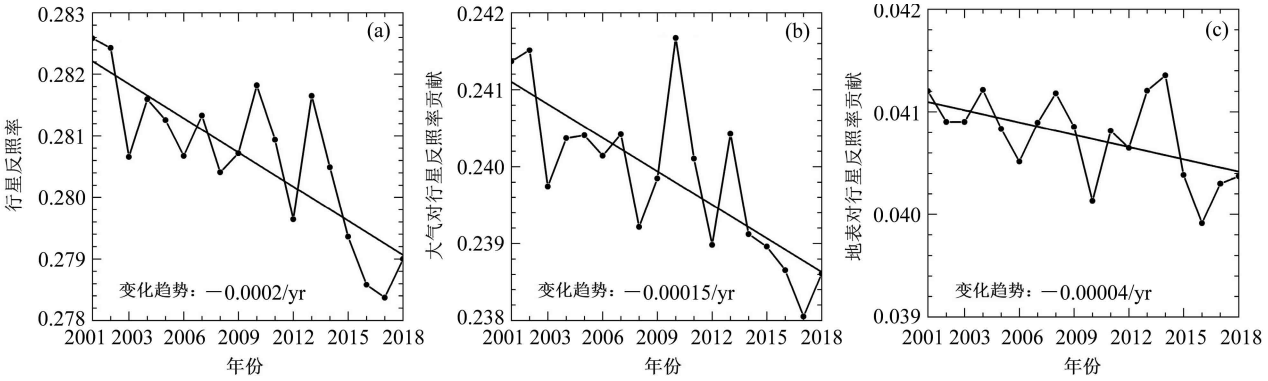

图 5 2001～2018 年全球（a）行星反照率及其（b）大气对行星反照率的贡献和（c）地表对行星反照率的贡献均值的时间变化趋势

Fig. 5 Temporal trends of global mean (a) planetary albedo and its (b) atmospheric contribution and (c) surface contribution to the planetary albedo from 2001 to 2018

Karlsson and Devasthale（2018）的研究表明多种长期气候数据（包含 ISCCP-HGM、ESA Cloud CCI V3、CLARA-A2 与 PATMOS-x）记录均显示全球总云量呈现降低趋势，其中基于 ISCCP-HGM 数据集的分析结果表明全球云量每十年下降 1.9%，基于 CLARA-A2 数据集的分析结果表明全球总云量每十年下降 0.5%，能够有效地解释全球行星反照率的降低趋势。

2001～2018 年全球行星反照率变化趋势的空间分布如图 6 所示。其中火地岛西南洋面、马达加斯加岛以南洋面、冰岛以南洋面、沙特阿拉伯希贾拉/内夫得沙漠和中国东北地区北部等地区呈现显著的上升趋势，南非以南西风漂流带洋面、美国佛罗里达州以东洋面、墨西哥以西洋面、喀拉海、鄂霍茨克海北部、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原、乌克兰和南极洲等地区呈现显著的下降趋势。

2001～2018 年全球行星反照率的大气和地表贡献变化趋势空间分布如图 7 所示。从图中可以发现大气对行星反照率的贡献在撒哈拉沙漠、沙特阿拉伯、火地岛西南洋面、巴伦支海和印度西部等地区呈现显著的增长趋势，而在南极洲东部、南非以南西风漂流带洋面、美国佛罗里达州以东洋面、墨西哥以西洋面、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原、亚马孙热带雨林西部和乌克兰等地区呈现显著的降低趋势。地表对行星反照率的贡献在北冰洋、波弗特海、格陵兰岛海岸带、中西伯利亚高原、中国西北地区、印度与巴基斯坦的接壤地区、撒哈拉沙漠和沙特阿拉伯等地区呈现显著的降低趋势，而在南极洲东部、哈萨克斯坦北部和巴西东部等地区呈现显著的升高趋势。

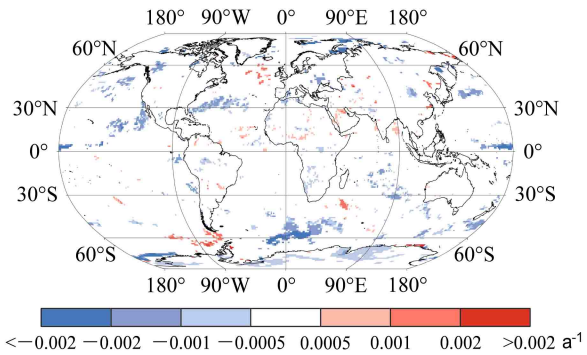

图 6　2001～2018 年全球行星反照率变化趋势空间分布（$p<0.05$）

Fig. 6　Spatial distribution of global planetary albedo trends from 2001 to 2018 ($p<0.05$)

3.3　典型区大气和地表贡献时空变化驱动因子分析

表 1 展示了典型区域大气（地表) 贡献与大气（地表）参量之间的相关关系，包括行星反照率大气贡献与云覆盖度和气溶胶光学厚度的相关关系以及行星反照率地表贡献与积雪覆盖度、NDVI 和土壤湿度的相关关系。研究结果表明云覆盖度变化能够解释大多数区域的大气贡献的变化，如南非以南风漂流带洋面（0.849）、墨西哥以西洋面（0.841）、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原（0.869）、美国佛罗里达州以东洋面（0.693）、印度（0.800）、亚马孙热带雨林地区（0.891）和中国华东热点区域（0.890）。而气溶胶光学厚度变化也能够解释部分区域的大气贡献变化，如墨西哥以西洋面（0.531）、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原地区（0.638）、美国佛罗里达州以东洋面（0.538）与亚马孙热带雨林（−0.621）等地区。

4　讨论

基于上述分析，可以发现行星反照率的大气贡献很大程度上取决于云量变化（Qu and Hall, 2005; Donohoe and Battisti, 2011; Sledd and L' Ecuyer, 2019），云覆盖度的增加能够有效减少到达地表的

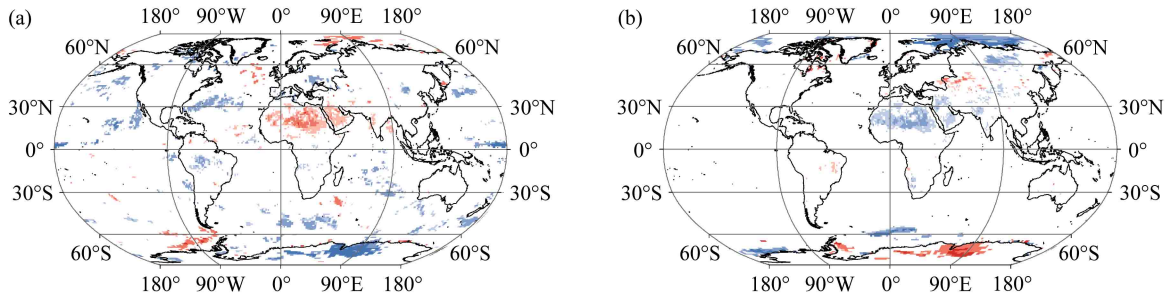

图 7　2001～2018 年全球（a）大气和（b）地表对行星反照率贡献变化趋势（单位：a^{-1}）空间分布（$p<0.05$）

Fig. 7　Spatial distributions of the global (a) atmospheric contribution and (b) surface contribution to planetary albedo trends (a^{-1}) from 2001 to 2018 ($p<0.05$)

表 1 典型区域的大气（地表）贡献与大气（地表）参量的相关系数

Table 1 Correlation coefficients between atmospheric/surface contributions and parameters in the typical regions

区域	行星反照率大气贡献		行星反照率地表贡献		
	云覆盖度	气溶胶光学厚度	积雪覆盖度	NDVI	土壤湿度
南非以南西风漂流带洋面	0.849**	–0.273	—	—	—
墨西哥以西洋面	0.841**	0.531*	—	—	—
中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原	0.869**	0.638**	—	—	—
美国佛罗里达州以东洋面	0.693**	0.538*	—	—	—
印度	0.800**	0.205	—	–0.884**	–0.523*
亚马逊热带雨林	0.891**	–0.621**	—	—	—
中西伯利亚高原	—	—	0.662**	–0.704**	0.210
哈萨克斯坦	—	—	0.843**	–0.668**	–0.372
中国东北地区热点区域	—	—	0.536*	-0.047	0.459
中国华东地区热点区域	0.890**	0.001	—	—	—

注：*代表95%置信水平，**代表99%置信水平。

短波辐射，同时增加长波下行辐射（Sledd and L' Ecuyer, 2019），在提高行星反照率的同时会削弱地表贡献的比例，与大气贡献变化呈现显著的正相关关系。冰雪覆盖度变化与中西伯利亚高原（0.662**）、哈萨克斯坦（0.843**）和中国东北地区热点区域（0.536*）的地表贡献变化存在显著的相关关系，而 NDVI 的变化可以很好地解释印度（−0.884**）、中西伯利亚高原（−0.704**）和哈萨克斯坦（−0.668**）等地区的地表贡献变化。地表贡献与积雪覆盖度呈现显著的正相关关系，而与 NDVI 呈现显著的负相关关系。这主要是由于冰雪反照率远高于其他地表覆盖类型的反照率，因此积雪覆盖度增加会导致地表贡献的显著升高（Li et al., 2018）；而植被在光合有效辐射波段具有较强的吸收能力，因此在植被生长季节地表反照率会随着 NDVI 的升高而下降（Bounoua et al., 2000）。

在印度地区，地表贡献呈现显著的下降趋势（–0.00032/a，$p<0.05$），这主要是受到该区域农业灌溉和施肥等土地利用管理措施导致农作物产量增加的影响（Chen et al., 2019）（在 2001～2018 年 NDVI 变化趋势为+0.00300/a，$p<0.05$）；中西伯利亚高原的气候类型为极端大陆性气候，具有同纬度最大的气温年较差，拥有极丰富的泰加林资源。在全球气候变化的影响下，中西伯利亚高原植被的增加趋势是该区域地表反照率变化的重要因素（Atlaskina et al., 2015）。2001～2018 年中西伯利亚泰加林的 NDVI 以+0.0014/a（$p<0.05$）趋势增长，在植被的积雪掩膜作用下（Abe et al., 2017），使得中东西伯利亚高原地区地表贡献呈现显著的下降趋势（−0.00047/a，$p<0.05$）。Jiang et al.（2017）的研究表明中亚大部分地区气温升高，降水减少，但是哈萨克丘陵地区冬季气温存在显著的下降趋势。苏联解体后，牧场废弃导致东哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦和塔吉克斯坦植被增加，而农田撂荒恢复为草原则导致了哈萨克斯坦北部地区植被绿度的降低（李秋苹, 2019）。因此在冰雪覆盖度增加与植被覆盖度降低的两个主要因素的共同作用下，哈萨克斯坦地区的地表贡献显著的上升趋势（+0.00081/a，$p<0.05$）。在中国的东北热点地区，近 20 年来行星反照率的地表贡献呈现上升趋势（+0.0012/a，$p<0.05$），这是中国东北地区积雪覆盖变化和草原退耕还草、森林采伐、森林火灾等引起的土地覆盖/利用变化的共同作用的结果，且与东北地区部分区域的积雪覆盖增加趋势存在较高的相关性（李喜佳, 2019; Li et al., 2020）。

行星反照率时空变化是全球气候变化和人类活动影响的一种重要表征形式，其变化与大气和地表关键参量的变化密切相关。通过大气和地表贡献分解，可以有效地明确不同区域大气和地表参量以何种程度在影响行星反照率的变化。现有研究结果表明云量变化是影响大气贡献的主导因素，而积雪和植被覆盖变化对于地表贡献来说是相对更为重要的影响因子。气溶胶和土壤表层湿度与大气和地表贡献存在一定的相关性，但是在大多数区域不是影响行星反照率时空变化的主导因子。除了本研究使用的大气和地表参量外，云类型、气溶胶类型、冰雪

类型/厚度/粒径和黑碳沉降等因素，也会对行星反照率产生一定程度的影响，有待进一步的探索和分析。

行星反照率的变化能够影响局地和全球尺度的气候，同时在一些区域可以通过反照率反馈作用，进一步增强和放大全球气候变化的影响。如在干旱/半干旱区域，降水量减少导致土壤表层湿度降低，使得地表反照率升高，进而影响局地水汽输入和云的形成（Zeng and Yoon, 2009）；在冰雪覆盖的极地区域，气候变暖导致冰雪融化和反照率降低，地表吸收的太阳辐射能量会形成正向反馈加速冰雪融化，从而放大气候变化对极地区域的影响（Curry et al., 1995; Déry and Brown, 2007）。

5　结论

本研究基于 CERES 数据对行星反照率的大气和地表贡献进行了分解，分析了 2001～2018 年大气和地表对行星反照率贡献的时空变化趋势，并探讨了典型区域大气和地表贡献与大气和地表参量的相关关系。研究结果表明：

（1）在中低纬区域（<60°），行星反照率的大气贡献占主导地位（89.3%±5%），而在高纬区域（>60°），地表对行星反照率的贡献增加（29%±12%），呈现纬向差异大于经向变化的分布模式。

（2）全球行星反照率呈现–0.00020/a（$p<0.05$）的变化趋势，而地表贡献和大气贡献分别呈现–0.00015/a（$p<0.05$）与–0.00004/a（$p<0.05$）的变化趋势。其中大气贡献的变化占主导地位，而地表反照率变化的贡献在一定程度上为大气衰减作用所削弱，全球云量的降低趋势能够很好地解释全球行星反照率的降低趋势。

（3）大气贡献在撒哈拉沙漠、沙特阿拉伯、火地岛西南洋面、巴伦支海和印度西部等地区呈现显著的增长趋势，而在南极洲东部、南非以南西风漂流带洋面、美国佛罗里达州以东洋面、墨西哥以西洋面、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原、亚马孙热带雨林西部和乌克兰等地区呈现显著的降低趋势。地表贡献在北冰洋、波弗特海、格陵兰岛海岸带、中西伯利亚高原、中国西北地区、印度与巴基斯坦的接壤地区、撒哈拉沙漠和沙特阿拉伯等地区呈现显著的降低趋势，而在南极洲东部、哈萨克斯坦北部和巴西东部等地区呈现显著的升高趋势。

（4）典型区域行星反照率大气和地表贡献的主导变化因子的结果表明，云量变化是影响大气贡献的主导因素（如南非以南西风漂流带洋面、墨西哥以西洋面、中国阿拉善高原东部和鄂尔多斯高原、美国佛罗里达州以东洋面、印度和亚马孙热带雨林等区域），而积雪和植被覆盖变化是影响地表贡献的主导因素（如印度、中西伯利亚高原和哈萨克斯坦等区域）。

致　谢　感谢美国宇航局 Langley 研究中心、全球建模与数据同化办公室和 MODIS 团队提供 CERES EBAF、MERRA-2 和 MODIS 等高质量分析数据集。

参考文献（References）

Abe M, Takata K, Kawamiya M, et al. 2017. Vegetation masking effect on future warming and snow albedo feedback in a boreal forest region of northern Eurasia according to MIROC-ESM [J]. J. Geophys. Res., 122(17): 9245−9261. doi:10.1002/2017JD026957

Atlaskina K, Berninger F, de Leeuw G. 2015. Satellite observations of changes in snow-covered land surface albedo during spring in the Northern Hemisphere [J]. The Cryosphere, 9(5): 1879−1893. doi:10.5194/tc-9-1879-2015

Bounoua L, Collatz G J, Los S O, et al. 2000. Sensitivity of climate to changes in NDVI [J]. J. Climate, 13(13): 2277−2292. doi:10.1175/1520-0442(2000)013<2277:SOCTCI>2.0.CO;2

Chen C, Park T, Wang X H, et al. 2019. China and India lead in greening of the world through land-use management [J]. Nature Sustainability, 2(2): 122−129. doi:10.1038/s41893-019-0220-7

Curry J A, Schramm J L, Ebert E E. 1995. Sea ice-albedo climate feedback mechanism [J]. J. Climate, 8(2): 240−247. doi:10.1175/1520-0442(1995)008<0240:SIACFM>2.0.CO;2

Déry S J, Brown R D. 2007. Recent Northern Hemisphere snow cover extent trends and implications for the snow-albedo feedback [J]. Geophys. Res. Lett., 34(22): L22504. doi:10.1029/2007GL031474

Donohoe A, Battisti D S. 2011. Atmospheric and surface contributions to planetary albedo [J]. J. Climate, 24(16): 4402−4418. doi:10.1175/2011JCLI3946.1

Gelaro R, McCarty W, Suárez M J, et al. 2017. The modern-era retrospective analysis for research and applications, version 2 (MERRA-2) [J]. J. Climate, 30(14): 5419−5454. doi:10.1175/JCLI-D-16-0758.1

Hall A. 2004. The role of surface albedo feedback in climate [J]. J. Climate, 17(7): 1550−1568. doi:10.1175/1520-0442(2004)017<1550:TROSAF>2.0.CO;2

Jian B D, Li J M, Wang G Y, et al. 2018. The impacts of atmospheric and surface parameters on long-term variations in the planetary albedo [J]. J. Climate, 31(21): 8705−8718. doi:10.1175/JCLI-D-17-0848.1

Jiang L L, Jiapaer G, Bao A M, et al. 2017. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. Science of the Total Environment, 599−600: 967−980. doi:10.1016/j.scitotenv.2017.05.012

Karlsson K G, Devasthale A. 2018. Inter-comparison and evaluation of the four longest satellite-derived cloud climate data records: CLARA-A2, ESA Cloud CCI V3, ISCCP-HGM, and PATMOS-x [J]. Remote Sensing, 10(10): 1567. doi:10.3390/rs10101567

Kato S, Loeb N G, Rutan D A, et al. 2015. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) data products for climate research [J]. J. Meteor. Soc. Japan, 93(6): 597−612. doi:10.2151/jmsj.2015-048

Li Q P, Ma M G, Wu X D, et al. 2018. Snow cover and vegetation-induced decrease in global albedo from 2002 to 2016 [J]. J. Geophys. Res., 123(1): 124−138. doi:10.1002/2017JD027010

李秋苹. 2019. 2002～2016 年全球地表反照率时空动态特征及影响因子分析 [D]. 西南大学硕士学位论文, 35. Li Qiuping. 2019. Temporal and spatial trend of global albedo and impact factors analysis from 2002 to 2016 [D]. M. S. thesis, Southwest University, 35.

李喜佳. 2019. 基于遥感观测的全球地表反照率时空变化研究 [D]. 东北师范大学博士学位论文, 73. Li Xijia. 2019. Spatiotemporal changes of global land surface albedo from remote sensing observations [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese), Northeast Normal University, 73.

Li X J, Zhang H Y, Qu Y. 2020. Land surface albedo variations in Sanjiang Plain from 1982 to 2015: Assessing with GLASS data [J]. Chinese Geographical Science, 30(5): 876−888. doi:10.1007/s11769-020-1152-x

Liang S L, Wang D D, He T, et al. 2019. Remote sensing of Earth's energy budget: Synthesis and review [J]. International Journal of Digital Earth, 12(7): 737−780. doi:10.1080/17538947.2019.1597189

Loeb N G, Doelling D R, Wang H L, et al. 2018. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES) Energy Balanced and Filled (EBAF) Top-of-Atmosphere (TOA) Edition-4.0 data product [J]. J. Climate, 31(2): 895−918. doi:10.1175/JCLI-D-17-0208.1

Loeb N G, Wang H L, Rose F G, et al. 2019. Decomposing shortwave top-of-atmosphere and surface radiative flux variations in terms of surface and atmospheric contributions [J]. J. Climate, 32(16): 5003−5019. doi:10.1175/JCLI-D-18-0826.1

Mann H B. 1945. Nonparametric tests against trend [J]. Econometrica, 13(3): 245−259. doi:10.2307/1907187

Pistone K, Eisenman I, Ramanathan V. 2014. Observational determination of albedo decrease caused by vanishing Arctic sea ice [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 111(9): 3322−3326. doi:10.1073/pnas.1318201111

Pohlert T. 2020. Non-parametric trend tests and change-point detection [EB/OL]. https://mran.microsoft.com/web/packages/trend/vignettes/trend.pdf.

Qu X, Hall A. 2005. Surface contribution to planetary albedo variability in cryosphere regions [J]. J. Climate, 18(24): 5239−5252. doi:10.1175/JCLI3555.1

Sledd A, L'Ecuyer T. 2019. How much do clouds mask the impacts of Arctic sea ice and snow cover variations? Different perspectives from observations and reanalyses [J]. Atmosphere, 10(1): 12. doi:10.3390/atmos10010012

Song Z, Liang S L, Wang D D, et al. 2018. Long-term record of top-of-atmosphere albedo over land generated from AVHRR data [J]. Remote Sensing of Environment, 211: 71−88. doi:10.1016/j.rse.2018.03.044

Stephens G L, O'Brien D, Webster P J, et al. 2015. The albedo of earth [J]. Rev. Geophys., 53(1): 141−163. doi:10.1002/2014RG000449

Theil H. 1992. A rank-invariant method of linear and polynomial regression analysis [M]//Raj B, Koerts J. Henri Theil's Contributions to Economics and Econometrics: Econometric Theory and Methodology. Dordrecht: Springer, 345 –381. doi:10.1007/978-94-011-2546-8_20

Wielicki B A, Cess R D, King M D, et al. 1995. Mission to planet Earth: Role of clouds and radiation in climate [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 76(11): 2125−2154. doi:10.1175/1520-0477(1995)076<2125:MTPERO>2.0.CO;2

Wielicki B A, Barkstrom B R, Harrison E F, et al. 1996. Clouds and the Earth's Radiant Energy System (CERES): An earth observing system experiment [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77(5): 853−868. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0853:CATERE>2.0.CO;2

Wielicki B A, Wong T, Loeb N, et al. 2005. Changes in Earth's albedo measured by satellite [J]. Science, 308(5723): 825−825. doi:10.1126/science.1106484

Zeng N, Yoon J. 2009. Expansion of the world's deserts due to vegetation-albedo feedback under global warming [J]. Geophys. Res. Lett., 36(17): L17401. doi:10.1029/2009GL039699

Zhang R D, Wang H L, Fu Q, et al. 2019. Unraveling driving forces explaining significant reduction in satellite-inferred Arctic surface albedo since the 1980s [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 116(48): 23947−23953. doi:10.1073/pnas.1915258116