氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

基于MODIS数据地表反照率时空变化特征及影响因子研究

高婷 沈润平 李磊 王宇琦 黄安奇

Spatial and Temporal Variations of Land Surface Albedo and Its Influencing Factors Based on MODIS Data

GAO Ting SHEN Runping LI Lei WANG Yuqi HUANG Anqi

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20160

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

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CERES观测数据的全球行星反照率时空变化特征分析

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

气候与环境研究. 2021, 26(5): 509 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20103

1958～2018年永定河流域蒸发皿蒸发量的变化特征及其影响因子分析

Variation Characteristics of Pan Evaporation and the Influencing Factors in the Yongding River Basin during 19582018

气候与环境研究. 2021, 26(3): 323 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.20108

1961～2013年中国蒸发皿蒸发量时空分布特征及其影响因素

Temporal and Spatial Distribution Characteristics and Influencing Factors of Pan Evaporation in China from 1961 to 2013

气候与环境研究. 2020, 25(5): 483 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19130

淮河流域风场垂直结构特征分析

Analysis of the Vertical Structure of Wind Fields in Huaihe River Valley

气候与环境研究. 2019, 24(3): 333 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2018.18010

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

关注微信公众号，获得更多资讯信息

高婷, 沈润平, 李磊, 等. 2021. 基于 MODIS 数据地表反照率时空变化特征及影响因子研究 [J]. 气候与环境研究, 26(6): 648−662. GAO Ting, SHEN Runping, LI Lei, et al. 2021. Spatial and Temporal Variations of Land Surface Albedo and Its Influencing Factors Based on MODIS Data [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (6): 648−662. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20160

基于 MODIS 数据地表反照率时空变化特征及影响因子研究

高婷 沈润平 李磊 王宇琦 黄安奇

南京信息工程大学地理科学学院，南京 210044

摘 要 地表反照率表征地球表面对太阳辐射的反射能力，是影响地表辐射能量收支平衡的关键参数。本文以淮河流域为例，利用 MODIS（MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）数据，采用网格趋势分析、异常变化分析、相关分析和灰色关联度分析等方法，分析了淮河流域 2005～2015 年地表反照率的时空变化规律，以及土地利用类型、地形因子、地表参数和气候等影响因子。结果表明：淮河流域年平均地表反照率整体呈“北高南低、东高西低”的空间分布规律，变化在 0.043～0.223，平均值为 0.145。低值区主要集中于水体密集和山区丘陵地带，且标准差相对较小；高值区主要集中于流域中部及东部平原地带，且标准差较大。61.5% 的区域地表反照率呈增加趋势，且存在季节性差异，夏季平均地表反照率最大，春季次之，秋季最小，冬季则由于降雪覆盖和农田利用的影响波动幅度较大。淮河流域地表反照率与归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）、地表温度、气温和降水在大部分区域呈正相关，面积占比分别达到 90.23%、82.32%、85.41% 和 93.70%。灰色关联度分析表明，不同土地利用类型（水体除外）下年均地表反照率受各因子影响排序为：NDVI>气温>地表温度>降水，空间变化受各因子影响排序为：NDVI>降水>地表温度>气温>高程。

关键词 MODIS 数据 地表反照率 时空变化 影响因子 淮河流域

文章编号 1006-9585(2021)06-0648-15 **中图分类号** P422.1^{+}5 **文献标识码** A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2021.20160

Spatial and Temporal Variations of Land Surface Albedo and Its Influencing Factors Based on MODIS Data

GAO Ting, SHEN Runping, LI Lei, WANG Yuqi, and HUANG Anqi

School of Geographical Science, *Nanjing University of Information Science and Technology*, *Nanjing* 210044

Abstract The surface albedo represents the ability of the earth's surface to reflect solar radiation and is a key parameter that affects the balance of surface radiation energy. Based on moderate resolution imaging spectroradiometer (MODIS) data, spatial and temporal variations of the land surface albedo and the influence of the types of land use, terrain, land surface parameters, and climate factors in the Huaihe River basin from 2005 to 2015 were analyzed using grid trend, abnormal change, correlation, and gray correlation analyses. The results show that the annual average land surface albedo of the Huaihe River basin displayed a spatial distribution pattern of "high in the north and east, low in the south and

收稿日期 2020-12-21；**网络预出版日期** 2021-06-17

作者简介 高婷，女，1996 年出生，硕士研究生，主要从事环境遥感方面的研究。E-mail: 844307355@qq.com

通讯作者 沈润平，E-mail: rpshen@nuist.edu.cn

资助项目 国家重点研发计划项目 2018YFC1506602，国家自然科学基金重点项目 91437220

Funded by National Key Research and Development Program of China (Grant 2018YFC1506602)，National Natural Science Foundation of China (Grant 91437220)

west", varying from 0.043–0.223 with an average of 0.145. Low-value areas were mainly concentrated in regions where water is densely distributed, mountainous and hilly areas, and with a small standard deviation. High-value areas were mainly concentrated in the central and eastern plain of the basin with a relatively large standard deviation. The land surface albedo showed an increasing trend with seasonal differences in 61.5% of the area. The largest was in summer, followed by spring, and finally by autumn. In winter, the fluctuation range is larger owing to the impact of snow cover and farmland use mode. The land surface albedo positively correlated with the NDVI(Normalized Difference Vegetation Index), LST(Land Surface Temperature), air temperature, and precipitation in most areas of Huaihe River Basin, accounting for 90.23%, 82.32%, 85.41%, and 93.70%, respectively. Under different types of land use (except water), the order of the annual average gray correlation degree between the land surface albedo and the influencing factors are as follows: NDVI>air temperature>LST>precipitation, and the order of the spatial gray correlation degree is: NDVI> precipitation >LST> air temperature> elevation.

Keywords　MODIS data, Land surface albedo, Spatial and temporal variation, Influencing factor, Huaihe River basin

1　引言

地表反照率是指地表物体在单位时间、单位面积上向各个方向反射的太阳总辐射能量与到达该物体表面的总辐射能量之比（王介民和高峰, 2004），是制约陆面辐射能量收支的关键因子，并通过控制地面—大气的能量平衡显著影响气候变化（He et al., 2015; Meng, 2020）。近年来，为深入探索近地表温度、土壤湿度等地表环境参数变化机制，揭示气候系统变化机理，地表反照率研究日益受到重视。不同区域气候类型不同，土地利用类型多样，地表反照率的时空分布差异较大，且存在明显的季节性差异，徐震宇等（2020）研究发现 2003～2017 年中国区域年平均地表反照率呈现缓慢下降趋势，且整体随海拔和纬度的增加而增加；Atlaskina et al.（2015）对春季北半球积雪区域地表反照率进行了研究，发现其受积雪覆盖率的影响较大；赵之重等（2014）研究发现三江源地区地表反照率在空间上呈西高东低的分布特征，且探讨了其与气候因子的相关关系。地表反照率变化受到多种因素共同作用，且具有显著的空间差异性，如刘辉志等（2008）对半干旱区不同下垫面地表反照率进行研究并发现其在生长期受植被指数的影响较大；陈爱军等（2018）研究发现青藏高原地表反照率减小与冰川消融和积雪减少密切相关，高原植被覆盖改善也是一个重要因素；姚济敏等（2013）对多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比研究发现其随太阳高度角的增大而减小，且受降雨的影响较大。可见地表反照率变化是太阳高度角、下垫面状况和气象条件等多种因子共同作用的结果（曹晓云等, 2019; 孙琳婵等, 2020）。

由于地表要素具有强烈的地带和区域差异，结合区域条件开展研究，有利于促进对地—气相互作用过程及其气候变化的内在机制深刻认识，为气候和陆面过程模拟提供更加精确的参数（Li et al., 2020），以往研究较多关注干旱和半干旱区域，以及生态环境敏感和脆弱地带，且缺乏对影响因子较为系统的比较分析，本文以我国南北气候过渡地带，以农业耕地为主的淮河流域为例，利用 2005～2015 年 MODIS（MODerate resolution Imaging Spectroradiometer）地表反照率数据，研究了地表反照率的时空变化特征及影响因子，并引入网格趋势分析、异常变化分析、相关分析以及灰色关联度等分析法比较了不同因子的作用。

2　数据与方法

2.1　研究区域

淮河流域地处我国东部，位于（30°55′N～36°36′N，111°55′E～121°25′E），跨越山东、安徽、江苏、河南等 4 个省区（图 1a），占地约 27×10^4 km^2，以淮河为界，南北方分别为北亚热带区和暖温带区，流域水资源充足，土地利用类型多样，为了使研究结果更加精确，本文对 2005 年与 2015 年土地利用类型图进行对比分析，选取土地利用类型未发生变化的区域为研究对象（图 1b），面积占比达到 98.5%，其中耕地面积占比大，达到 71.05%，主要种植大豆、小麦、水稻等，是我国不可或缺的商品粮棉油基地，淮河以北主要为旱地，以南主要为水田，林地主要位于流域西部以及西南部山区地带，城市居民用地分散在流域内。

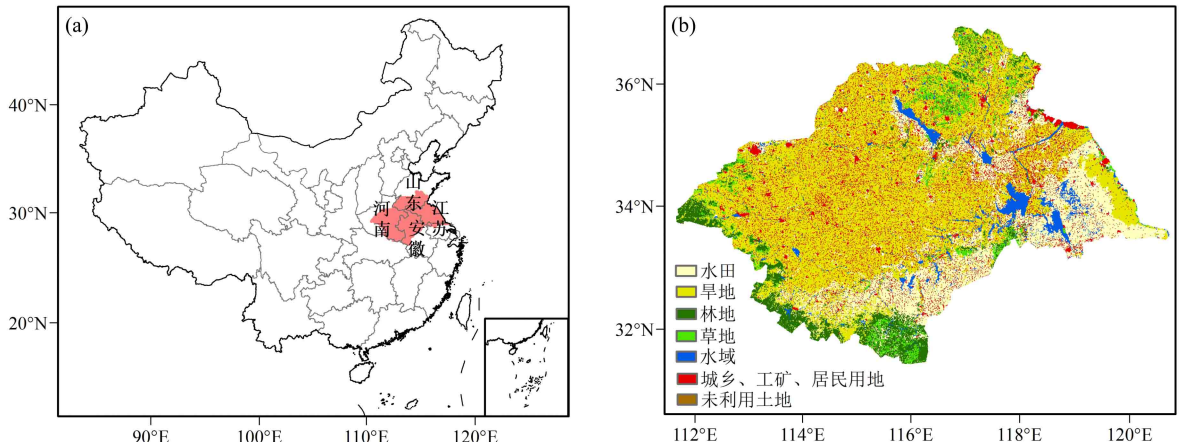

图 1 （a）淮河流域位置；（b）2005～2015 年淮河流域土地利用未变化区域土地类型分布

Fig. 1 (a) Location map of the Huaihe River basin; (b) distribution map of land types in the Huaihe River basin's unchanging areas from 2005 to 2015

2.2 研究数据

2.2.1 遥感数据

MODIS 地表反照率产品 MCD43 采用半经验的线性 RossThick-LiSparse-R 核驱动的双向反射分布函数 BRDF（Bidirectional Reflectance Distribution Function）模型，利用 16 d 期间经过大气校正后的 Terra 和 Aqua 双星 MODIS 数据每隔 8 d 反演一次地表 BRDF 参数，反演时，如果高质量多角度晴空观测总数不少于 7 个，首先尝试全反演，若效果不佳，则改用当量反演。如果高质量多角度晴空观测总数不足 7 个但不少于 3 个，直接采用当量反演。所谓的当量反演，就是利用已有的高质量多角度晴空观测数据对先验的（a priori）BRDF 参数进行修正，获得与实际地表状态相符的 BRDF 参数。如果当量反演效果不佳，或者高质量多角度晴空观测总数不足 3 个，则没有反演结果，赋以填充值（陈爱军等, 2020）。然后，对 BRDF 积分获得地表黑空反照率 BSA（Black-Sky Albedo）和白空反照率 WSA（White-Sky Albedo）。MCD43 有 500 m、1 km 和 0. 05°气候网格等 3 种空间分辨率（分别编号 A、B、C），提供 4 种产品（分别编号 1、2、3 和 4），分别为地表 BRDF 模型参数、地表 BRDF 参数反演质量、地表反照率和 BRDF 校正后的天底反射率 NBAR（Nadir BRDF Adjusted Reflectance）。其中，空间分辨率为 500 m 和 1 km 的 MODIS 地表反照率产品采用正弦投影，空间分辨率为 0.05°气候网格的产品则采用等经纬度投影（陈爱军等, 2020）。

本研究选用 MODIS 气候网格产品 MCD43B3 数据集，包含了 MODIS 1～7 波段、可见光（0.3～0.7 μm）、近红外（0.7～5.0 μm）、短波（0.3～5.0 μm）波段的白空反照率 WSA 和黑空反照率 BSA 数据，空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 8 d。太阳天顶角数据来自 MODIS 地表反照率质量信息产品 MCD43A2 数据集，空间分辨率为 500 m，时间分辨率为每天，包含 7 个部分，其中 BRDF_当地正午反照率（BRDF_Albedo_LocalSolorNoon）部分包含反演区域的正午太阳天顶角（徐震宇等, 2020），为保持与地表反照率数据时空分辨率一致，本研究对太阳天顶角数据进行预处理，得到空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 8 d 的该数据。

植被指数数据来自 MODIS 的 MOD13A2 产品，包含的植被指数有归一化植被指数（Normalized Difference Vegetation Index，NDVI）与增强植被指数（Enhanced Vegetation Index，EVI）两个植被指数图层（Tian et al., 2014）。空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 16 d。利用其归一化植被指数数据研究地表反照率对于植被覆被变化的响应。地表温度数据来自 MODIS 的 MOD11A2 产品，研究利用该地表温度（Land Surface Temperature，LST）数据分析其对地表反照率变化的影响。空间分辨率为 1 km，时间分辨率为 8 d。

以上研究所用遥感数据均来源于美国国家航空航天局网站（https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov[2020-08-03]）。

2.2.2 地面观测辐射数据

地面观测辐射数据来自国家气象信息中心提供

的中国气象辐射基本要素日值数据集，时间范围为 2006～2015 年，该数据集包含了辐射基本要素的每日观测数据，主要包括总辐射日曝辐量、净全辐射日曝辐量、散射辐射日曝辐量、水平直接辐射日曝辐量、反射辐射日曝辐量和垂直面直接辐射日曝辐量等。数据提取自辐射基础气象资料建设项目归档的“更正后的辐射月报数据文件（R 文件）基础资料集”，数据经过质量检测与质量控制，所有要素数据均标注了质量控制码（张俊兵, 2019）。

本文通过筛选得到了全国范围内可提供有效反射辐射日曝辐量的站点，共计 17 个，其中在本研究区范围内的是郑州站点（34°43′N，113°39′E），位于淮河流域西北部城镇与耕地的交界地带。本文首先对 2006～2015 年郑州站的地面观测结果进行筛选，根据上行太阳短波总辐射不高于下行太阳短波总辐射的原则，同时根据数据质量标志，去除明显有误的数据，以反射辐射与总辐射之比计算日平均地表反照率（孟文童, 2018），并经过预处理，得到了时间分辨率为 8 d 的地面观测值。通过双线性内插算法，将 MODIS 地表反照率数据通过经纬度信息插值到观测站点，计算观测站点的 MODIS 地表反照率值，并与观测值进行对比验证，以表明 MODIS 地表反照率数据在淮河流域的精度及可靠性。

2.2.3　其他辅助数据

气象数据来源于欧洲中期天气预报中心（European Centre for Medium-Range Weather Forecasting, ECMWF）提供的第五代再分析资料 ERA5（https://cds.climate.copernicus.eu/[2020-09-10]）。研究选用 2005～2015 年逐月 2 m 气温及降水数据，空间分辨率为 0.25°（经、纬度），为了与地表反照率数据的分辨率保持一致，利用双线性内插将这两种数据重采样至 1 km 分辨率，通过地表反照率与气温和降水数据的相关性分布来揭示地表反照率对于气候因子的响应。

土地利用数据来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn[2020-09-17]）的中国土地利用现状遥感监测数据集，对 2005 年和 2015 年进行比较分析，得到土地利用类型未变化的区域（图 1），用来分析土地利用对地表反照率的影响，空间分辨率为 1 km，包括 6 个一级类型和 25 个二级类型（刘亲亲等, 2019）。

数字高程模型（Digital Elevation Model，DEM）数据空间分辨率为 90 m，用于分析地形因子对地表反照率的影响。该数据同样来源于中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn[2020-07-20]）。

2.3　研究方法

2.3.1　地表反照率计算

MCD43B3 产品提供的黑空反照率与白空反照率分别表示太阳辐射完全直射和完全漫射条件下的反照率（Román et al., 2010），研究需对 MCD43B3 产品的短波（0.3～5.0 μm）黑空反照率和白空反照率进行线性加权，以此来计算研究区域的短波波段地表反照率（王开存等, 2004; 郑瑜晗等, 2020），计算公式如下：

$$\rho_0 = (1-s)\rho_{\mathrm{dir}} + s\rho_{\mathrm{dif}}, \tag{1}$$

其中，ρ_0为实际地表反照率，ρ_{dir}为黑空反照率（直射反照率），ρ_{dif}为白空反照率（散射反照率），s 为天空散射比因子，可根据 MCD43A2 产品提供的当地正午太阳天顶角，计算获得近似值（商荣等, 2015; 陈爱军等, 2020），经验公式如下：

$$s = 0.122 + 0.85\exp(-4.8\mu_0), \tag{2}$$

其中，μ_0为当地正午太阳天顶角的余弦值。

2.3.2　网格趋势分析法

本文采用一元线性回归法（Tang et al., 2020）逐网格分析地表反照率的空间变化，计算公式如下：

$$b = \frac{n\sum_{i=1}^{n}(ia_i) - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)\sum_{i=1}^{n} a_i}{n\sum_{i=1}^{n} i^2 - \left(\sum_{i=1}^{n} i\right)^2}, \tag{3}$$

其中，b 为线性倾向率，n 为年份数，i 为不同的年份（i=1, 2, 3, …, 11），a_i为第 i 年的年均反照率。b 值的正负表明了地表反照率的变化呈增加或减小，且 b 的绝对值越大表明地表反照率的变化速度越快。之后，使用 t 检验法来确定逐像元变化趋势的显著性以及可靠度。

2.3.3　异常变化分析

本文计算了 2005～2015 年各年及四季平均地表反照率的标准差，标准差可用来定量表示该值的年均变化率以及异常变化状况，可以通过该值在空间分布上的大小来确定区域地表反照率异常变化的情况（除多, 2016），其计算公式为

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(a_i-\bar{a})^2}, \tag{4}$$

其中，σ 为标准差，n 为年份数，i 为不同的年份（i=1, 2, 3, …, 11），a_i为第 i 年的年均地表反照率，$\bar{a}$为多年平均地表反照率。

2.3.4 相关分析法

为了研究各因子对地表反照率的影响，计算各因子及地表反照率多年月均空间分布，进一步计算 NDVI、LST、气候因子（气温、降水）与地表反照率的相关性，通过相关系数大小来反映两个因子的相关性高低，计算公式如下：

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2}}, \tag{5}$$

其中，x、y 为两个因子，R_{xy}为两因子的相关系数，n 为年份数，i 为不同的年份（i=1, 2, 3, …, 11），x_i和y_i分别为第 i 年的两因子值，$\bar{x}$和$\bar{y}$分别为两因子样本的平均值。

2.3.5 灰色关联度分析法

尽管地表反照率受多个影响因子影响，且与各因子之间存在不同程度的相关性，相关系数只能表明地表反照率与各影响因子之间的共变，很难精确地度量地表反照率与各影响因子相关程度的客观大小（唐柄哲等, 2016）。灰色关联度方法可以有效的克服因子间的相互影响，进行因子作用大小比较排序，本文引入本方法进行分析，以客观反映出各影响因子对地表反照率作用的主次关系（唐柄哲等, 2016），步骤如下：

第一步：变量的无量纲化。在对每组数据进行对比时，由于其计量单位不同，导致其在量纲和数量级上不能统一，从而会对比较结果产生影响。因此，对原始数据做无量纲化处理是计算关联度时较为主要的一个步骤。本研究遵循建立灰色关联序合理性的基本原则选用了均值化变换和极小化变换方法（唐柄哲等, 2016）。

第二步：计算关联系数。设经过数据处理后的参考数列为

$$\{\boldsymbol{x}_0(t)\} = \{x_{01}, x_{02}, \cdots, x_{0n}\}. \tag{6}$$

与参考数列作关联程度比较的 m 个数列（常称为比较数列）为

$$\{\boldsymbol{x}_1(t), \boldsymbol{x}_2(t), \cdots, \boldsymbol{x}_m(t)\} = \begin{Bmatrix} x_{11} & x_{12} & \cdots & x_{1n} \\ x_{21} & x_{22} & \cdots & x_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ x_{m1} & x_{m2} & \cdots & x_{mn} \end{Bmatrix}, \tag{7}$$

其中，n 为数列的数据长度，即数据的个数。将第 k 个比较数列（k=1, 2, …, m）各期的值与参考数列相应期的差值的绝对值记为

$$\Delta_{ok}(t) = |x_0(t) - x_k(t)| \qquad t = 1, 2, \cdots, n. \tag{8}$$

分别记 $\Delta_{ok}(t)$ 中的最小数和最大数为 $\Delta(\min)$ 和 $\Delta(\max)$。于是，第 k 个比较数列与参考数列在 t 时期的关联系数可通过下式计算：

$$\zeta_{ok}(t) = \frac{\Delta(\min) + \rho\Delta(\max)}{\Delta_{ok}(t) + \rho\Delta(\max)} \tag{9}$$

其中，ρ 为分辨系数，通常 ρ 的取值范围为 (0, 1)，可根据特定情况进行取值。当 $\rho \leqslant 0.5463$ 时，分辨率最好，通常取 ρ=0.5（唐柄哲等, 2016）。

第三步：计算关联度。对各期关联系数求均，即可得到各比较数列与参考数列的关联度（唐柄哲等, 2016），公式为

$$r_{ok} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\zeta_{ok}(t), \tag{10}$$

其中，r_{ok}为第 k 个比较数列与参考数列的关联度。

第四步：关联度排序。若存在 m 个比较数列时，则存在 m 个对应的关联度。对其进行数值大小的排序，以获得关联序，可以表明对于同一个参考数列的每一个比较数列的优劣和主次关系。

3 结果分析

3.1 MODIS 地表反照率数据精度

利用实测站点与 MODIS 地表反照率值绘制散点图（图 2），可以看出，两者相关系数达到 0.69，均方根误差为 0.04，p<0.0001，表明基于 MODIS 反演的地表反照率数据与地面观测值具有高度显著的相关关系，由此可以看出，MODIS 地表反照率数据在淮河流域具有较高的精度及可靠性。

另外，目前已有部分研究对淮河流域周边地面观测站进行了 MODIS 地表反照率产品的精度验证，其中，吴宏伊等（2012）选取了 2004 年 8 个中国通量网的观测站点与 MODIS 地表反照率产品 MCD43B3 进行验证，其中禹城站（36°50′N，116°34′E）位于淮河流域北缘，地表覆盖为农田，

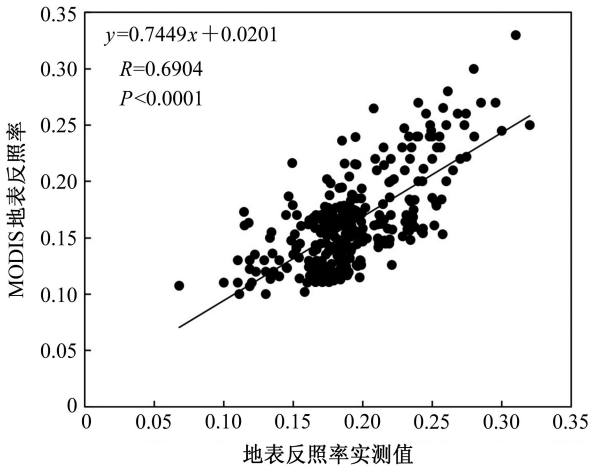

图 2　2006～2015 年郑州站点 MODIS 地表反照率与地面观测值对比散点图

Fig. 2　Scatter plot of the MODIS land surface albedo and the ground observation value at Zhengzhou station in 2006–2015

对比结果表明，禹城站 MODIS 地表反照率值与地面观测值相关系数达到 0.98，均方根误差为 0.04，MODIS 地表反照率数据在该区域具有较高的反演质量及精度。余予等（2009）利用 2007 年 10 月至 2008 年 9 月寿县气候观象台（32°30′N，116°46′E）分析了安徽寿县地区农田地表反照率的季节变化，这与本文通过 MODIS 地表反照率产品得出的结论具有很高的一致性。白昕欣等（2017）利用 2016 年 4～11 月江苏省农业科学院溧水试验基地（31°36′N，119°12′E）的观测数据研究了水稻田间尺度的地表反照率变化特征，表明在水稻生长期内地表反照率呈先升高后降低的趋势，与本文研究结论一致性较高，说明 MODIS 地表反照率数据具有较高的精度，可以揭示地物反照率的变化规律。

3.2　地表反照率空间分布及变化趋势

3.2.1　空间变化分布特征

2005～2015 年研究区 11 年平均地表反照率空间分布如图 3a，地表反照率平均值为 0.145，变化范围为 0.043～0.223，且存在“北高南低、东高西低”的空间分布格局。由于水体对短波辐射的强烈吸收作用，低值区主要集中于南四湖、骆马湖，洪泽湖、高邮湖等水体密集分布区，大多小于 0.1。流域西部、西南部为伏牛山、桐柏山、大别山等山区和丘陵地带，植被覆盖，粗糙度较大，地表反照率较低，在 0.1～0.14。地表反照率高值区主要集中于流域中部及东部平原地带，在 0.14～0.22，其中淮河以南地区主要为水田，地表反照率略小，在 0.14～0.15。年均地表反照率标准差（图 3b）较小的区域则主要分布在淮河流域的西部、西南部及东北部地区，标准差小于 0.01，该地区主要为山区和丘陵地带，土地利用类型和植被生物量年变化小。地表反照率标准差较大的区域集中于流域中部，是地表反照率年均变化较为剧烈的地区，主要以耕地和居民地为主，受人类活动的影响较大。

从不同季节 11 年平均地表反照率（图 4）可以看出，空间分布格局具有相似性，但存在季节性差异，春（3～5 月）、夏（6～8 月）、秋（9～11 月）、冬（12 月至翌年 2 月）四季平均地表反照率分别为 0.144、0.156、0.137 和 0.145。春季，流域东北部地区为地表反照率的高值区，部分超过 0.17，与该地区分布着中覆盖度和低覆盖度草地有关（图 4a）。夏季，随着作物生长季的到来，作物生长茂盛，多重叶层提供了多次透射、反射的机会，使得冠层近红外反射增强，且植被叶绿素含量较高，引起可见光绿波段的反射加强，因此地表反照率较大（图 4b）（余予等, 2009）。秋季，随着作物逐渐成熟，叶面和茎秆颜色变黄，反照率明显下降，且空间差异最小（图 4c），这与白昕欣等（2017）的研究结果相一致。冬季，地表反照率明显上升，与积雪和裸露土壤增加有关，且出现了四季中地表反照率的最大值和最小值（图 4d）。

从不同季节多年平均地表反照率标准差分析（图 5），冬季地表反照率年均变异最大，大部分区域标准差均在 0.03 以上，中部及东部平原地区标准差在 0.06 以上，这与该地区大多为农业耕作区，冬季土地农业利用方式变化较大有关。其次为夏季和秋季，春季变化最小，绝大多数地区在 0.02 以下。从四季地表反照率标准差空间分布可知，农田及城乡、工矿及居民用地等人为作用强烈的地区始终是地表反照率年均变化较为剧烈的地区。

3.2.2　变化趋势分析

从年均地表反照率的年变化速率（图 6）可以看出，大部分地区年均地表反照率都有所增加，面积占比 61.5%，其中，增加速率较快的区域位于山东省南部地区，增加速率大于 3.0×10^{-3} a^{-1}。而河南省东部及安徽省北部地区年均地表反照率呈减小趋势，减小速率约为 1.0×10^{-3} a^{-1}，减小速率大于 2.0×10^{-3} a^{-1} 的区域主要分布在流域的东南部地区。显著性检验（图 6b）表明，约有 19.2% 的地区地表反照率年变化达到了 0.1 显著性水平，其余地区

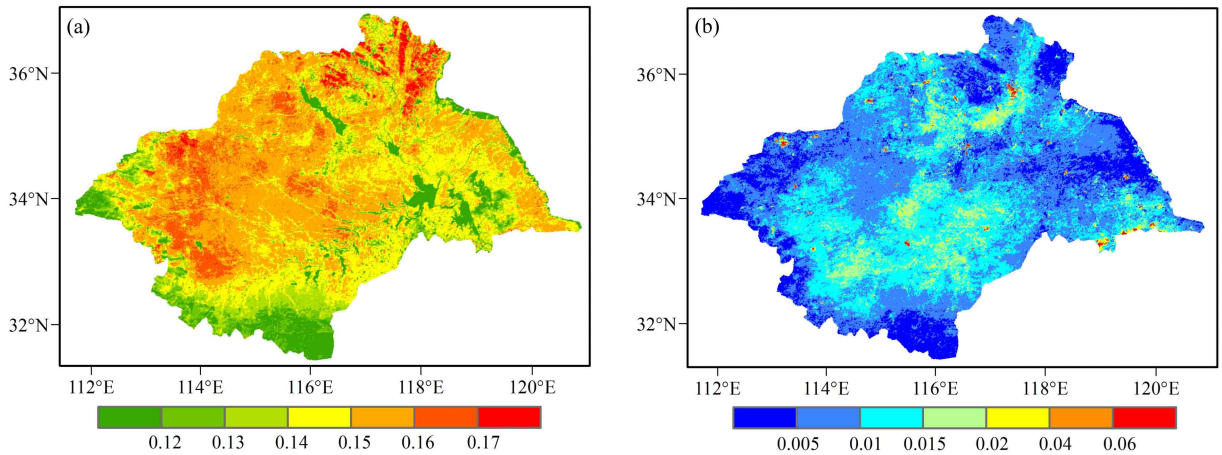

图 3 2005～2015 年淮河流域（a）多年平均地表反照率和（b）年均地表反照率标准差的空间分布

Fig. 3 Spatial distributions of the (a) multiyear average land surface albedo and (b) standard deviation of the annual average land surface albedo in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

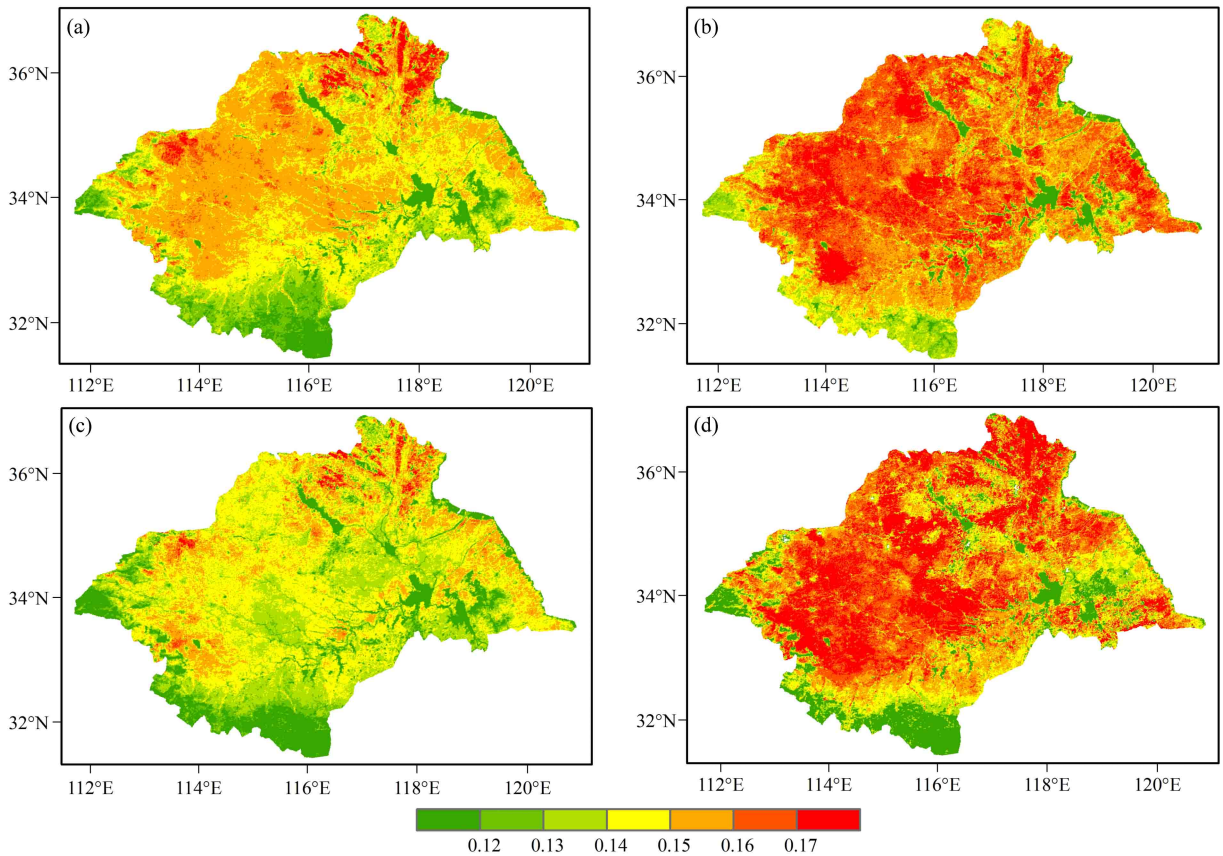

图 4 2005～2015 年淮河流域（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季多年平均地表反照率空间分布

Fig. 4 Spatial distributions of the multiyear average land surface albedo in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

地表反照率变化较为平缓，其中 16.3% 的地区呈显著增加趋势，主要集中在山东省南部地区。而流域东北及东南部分地区年均地表反照率年均变化速率为负，且通过 0.1 显著性水平检验，呈显著减小趋势，但仅占流域总面积的 2.9%。

3.3 地表反照率时间变化特征

3.3.1 月均变化特征

从图 7 可以看出，11 年整个流域月平均地表反照率变化介于 0.134～0.167，1 月最高，达 0.167，这与部分时间积雪覆盖有关，随着积雪消融，2 月

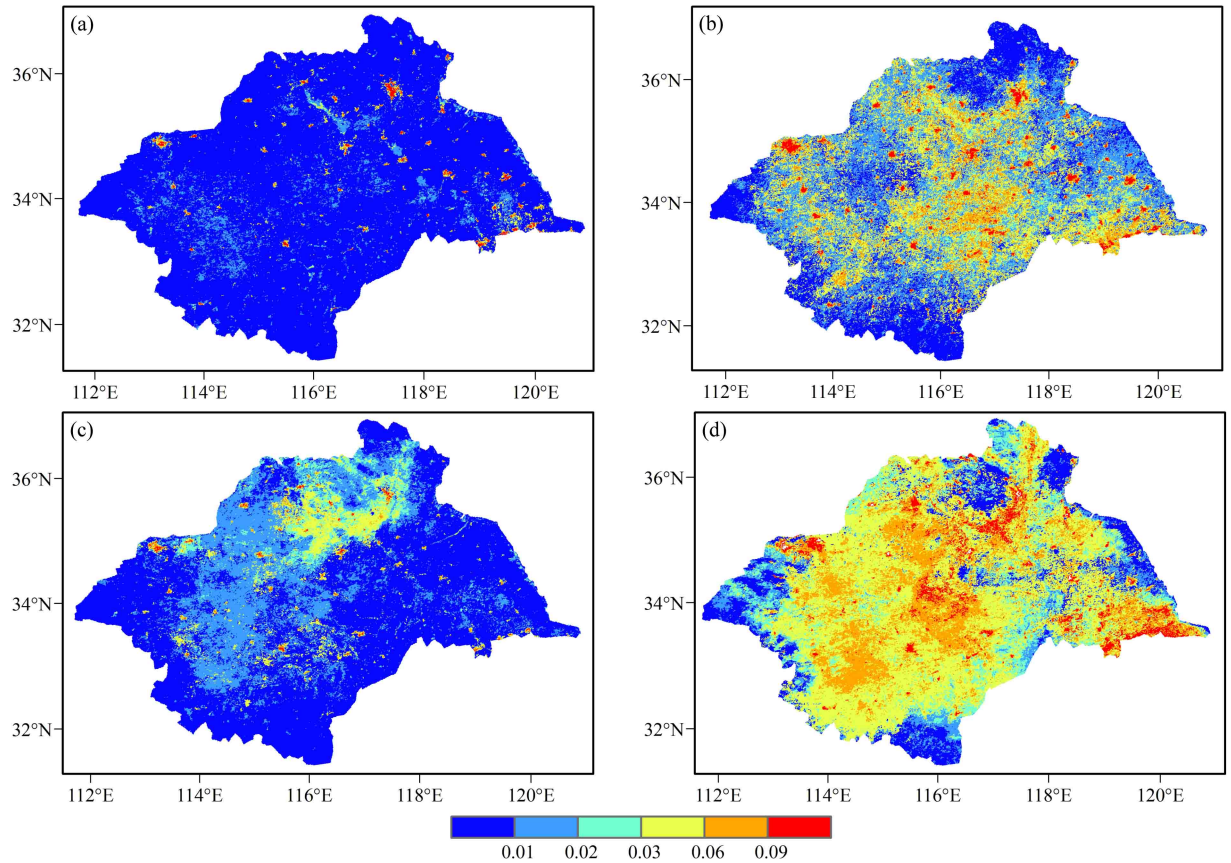

图 5　2005～2015 年淮河流域（a）春季、（b）夏季、（c）秋季、（d）冬季平均地表反照率标准差空间分布

Fig. 5　Spatial distributions of standard deviations of the land surface albedo in (a) spring, (b) summer, (c) autumn, and (d) winter in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

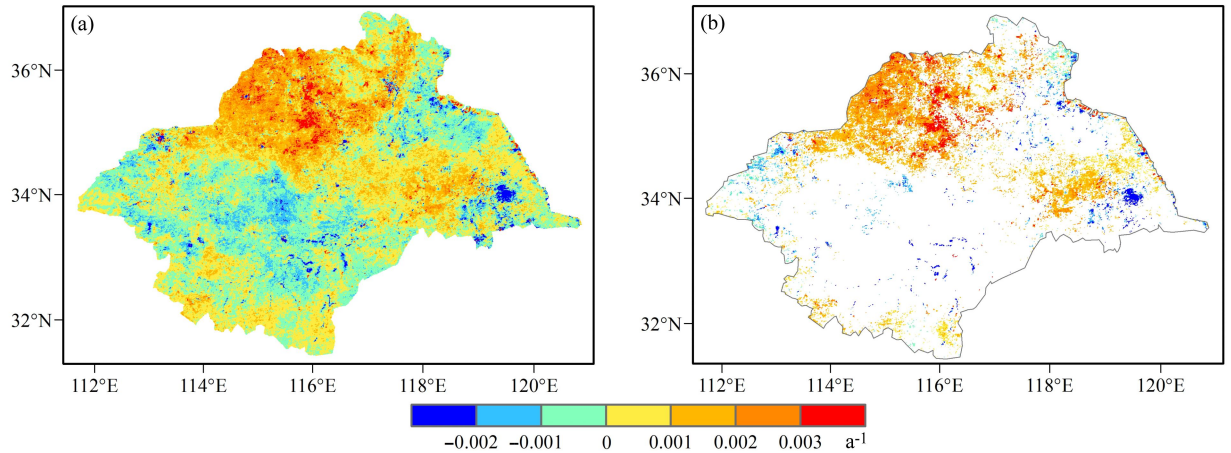

图 6　2005～2015 年淮河流域（a）年均地表反照率的年变化速率和（b）通过 0.1 显著性水平检验的年变化速率

Fig. 6　Spatial distributions of (a) the variation rate of the annual average land surface albedo and (b) the variation rate that is significant at the 0.1 level in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

地表反照率迅速减少，并在 3 月达到一个相对低值。由于本区域耕地占比达 71.05%，随着春季植被生长，特别是农田小麦生长，作物叶绿素含量增加，短波波段反照率有所增加且在 4 月达到一个小峰值。5 月则随着冬小麦的成熟，茎秆逐渐变黄和收获，地表反照率有所下降。6 月之后秋收作物进入生长期，由于作物生长的密度和高度逐渐增加，农田表层反射特性发生了很大的变化，且林地冠层的增加会导致对近红外的多次反射，进而使得近红外波段的反照率增加（刘亲亲等, 2019），因此，地表反

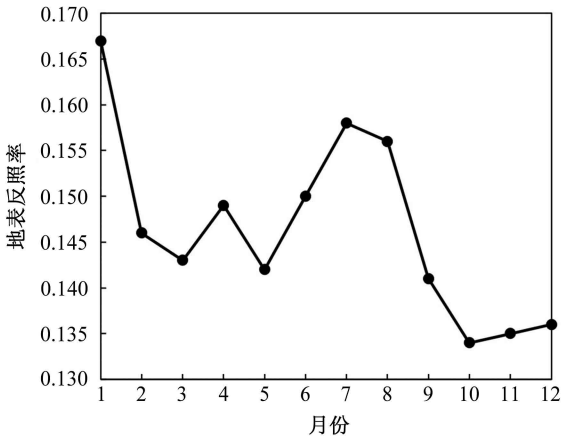

图7 2005～2015年平均淮河流域地表反照率月变化特征

Fig. 7 Monthly variation characteristics of the land surface albedo in the Huaihe River basin averaged from 2005 to 2015

照率在7～8月达到较高水平。秋季作物成熟期开始后，受植被颜色和太阳天顶角的共同作用，地表反照率快速回落，并在10月达到最低值0.134，可能是由于这一阶段将含水量相对较大且颜色较深的土壤翻耕出来所致。从淮河流域月均变化特征可以看出，淮河流域地表反照率的年内变化受作物生长的影响较大，在作物的生长期内，地表反照率呈先增大后减小的趋势，这与余予等（2009）的研究结论相一致。

3.3.2 季节及年均变化特征

从图8可以看出，2005～2015年淮河流域年均地表反照率呈波动增加趋势，年均变化在0.138～0.157（图8a），其中2006年、2008年和2012年较大，与这几年冬季降雪导致的冬季反照率较高有关。地表反照率变化还存在显著的季节性差异（图8b），夏季平均地表反照率最大，春季次之，秋季较小，冬季变化幅度则很大，在2006年、2008年和2012年为最大值，在2007年、2009～2010年和2015年则为各季最小值，这与不同年份降雪情况、冬季农田土地利用方式及冬季土壤含水量状况相关性较大（王鸽, 2010），其中，2008年冬季南方遭遇特大暴雪，则该年冬季地表反照率达到近11年的最大值0.183。

3.4 地表反照率变化影响因子分析

3.4.1 土地利用类型对地表反照率的影响

地表反照率的大小不但取决于反射地物的类型，而且与其物理特征和其表面状况密切相关，不同的土地利用类型，地表反照率具有明显差异（刘亲亲等, 2019）。研究区不同土地利用类型地表反照率大小顺序（图9）：耕地>城乡、工矿、居民用地>草地>林地>水体，它们的年平均值分别为0.149、0.148、0.139、0.126和0.110，这与王舒默等（2015）的研究结果相一致。其中，耕地和城乡、工矿、居民用地等土地利用类型因受人为扰动程度高，利用方式变化大，其地表反照率标准差也较大，而水域地表反照率年际变化波动较大主要是与气候变化引起的水体表面形态发生变化有关（冰面/水面），如冬季低温导致水面结冰使得反照率增加。

3.4.2 地形因子对地表反照率的影响

地形通过坡度和地表粗糙度等来影响地表反照率（陈淼, 2019）。研究区地形（图10）西高东低，西部、西南部以及东北部为山区和丘陵区，海拔较高，坡度较大，地表粗糙度较大。与年均地表反照率空间分布图（图3a）叠加分析表明，高程大于100 m的西部、西南部以及东北部地区，随着高程的升高，因坡度增加，地表粗糙度增大，对太阳辐

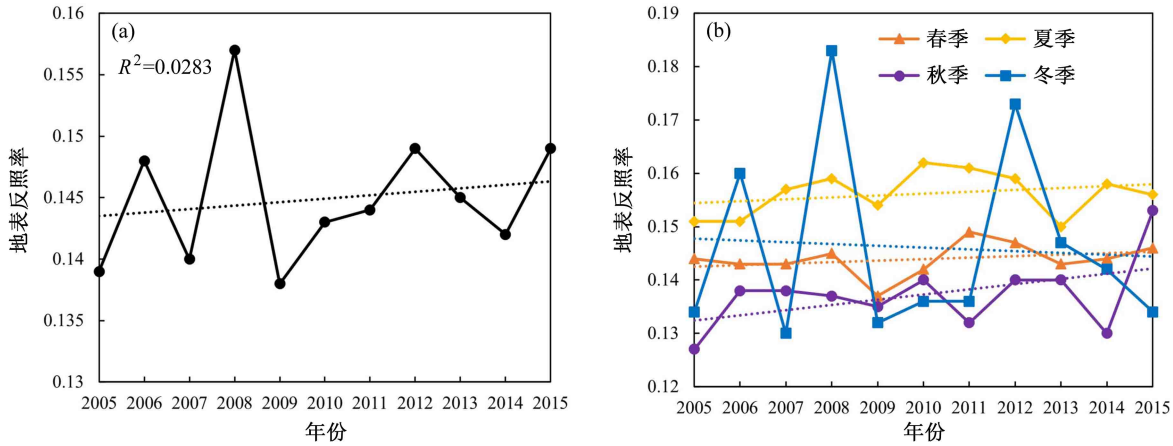

图8 2005～2015年淮河流域（a）年平均和（b）不同季节平均地表反照率变化

Fig. 8 (a) Annual and (b) seasonal variation of the land surface albedo in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

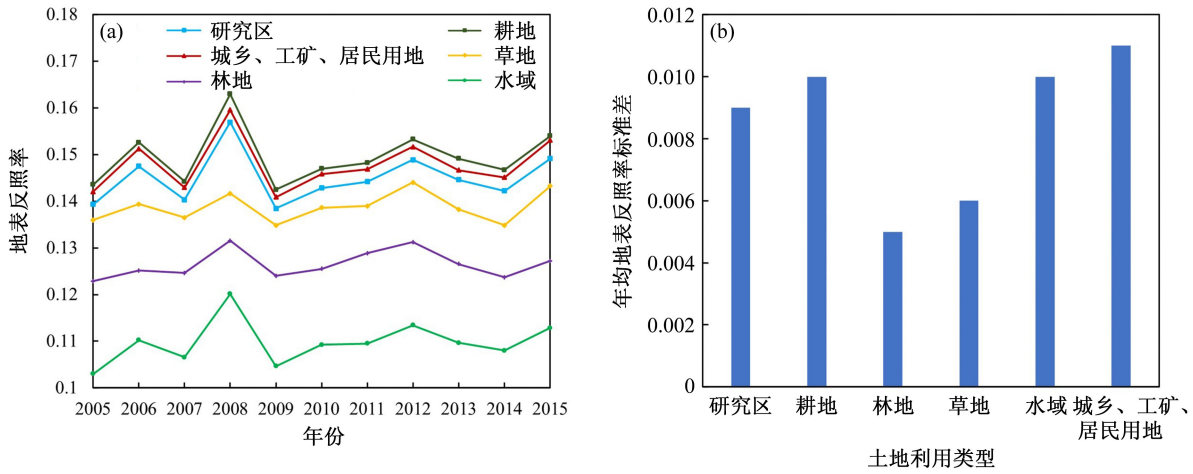

图 9　2005～2015 年淮河流域不同土地利用类型（a）年均地表反照率及（b）标准差

Fig. 9　(a) Annual average land surface albedo and (b) standard deviation of different types of land use in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

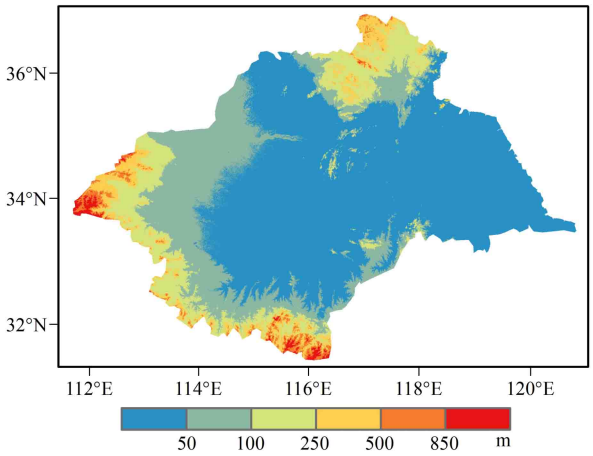

图 10　淮河流域高程空间分布

Fig. 10　Spatial distribution of elevation in the Huaihe River basin

射会产生多次反射，从而造成地表反照率减小（肖登攀等, 2011）。而高程小于 100 m 的地区，地形相对较为平坦，地表粗糙度变化不大，地表反照率受高程影响较小。

3.4.3　植被及地表温度等参数对地表反照率的影响

研究通过计算多年月均地表反照率与影响因子相关系数的空间分布来反映各因子对地表反照率的影响，由于积雪反照率很高，研究剔除了 1 月份数据，以减少积雪对分析的影响。NDVI 可以表征地表植被覆被状况（王舒默等, 2015），随着植被的生长和覆盖度的增加，一方面由于植被对可见光光能吸收，特别是利用蓝光和红光进行光合作用，导致反照率有所减少，另一方面在近红外波段反射率提高，导致地表反照率显著增加。NDVI 与地表反照率多年月均变化的相关系数可以看出（图 11a），地表反照率与 NDVI 呈正相关和负相关的区域分别占流域总面积的 90.23% 和 9.77%，且存在明显的空间差异性，其中呈正相关的大部分区域为耕地和林地，植被覆盖度较大；而流域东北部主要为中覆盖度及低覆盖度草地，随着 NDVI 的增加，原先高反照率的裸土被生长的草地所覆盖，导致卫星观测的地表反照率有所下降（刘亲亲等, 2019）。

地表反照率与地表温度多年月均变化的相关系数空间分布表明（图 11b），地表反照率与地表温度呈正相关和负相关的区域分别占流域总面积的 82.32% 和 17.68%，即淮河流域大部分地区地表反照率与地表温度在年内变化上呈正相关关系，这与地表温度上升，植被和土壤水分胁迫上升，含水量下降，导致地表反照率增加有关，且地表温度上升，植被生长加快，在近红外波段反射率提高，同样导致地表反照率显著增加；而对于流域东北部的草地区域，地表反照率与地表温度在年内变化上呈负相关，可能是由于地表反照率减少，则地表吸收的光辐射能量增加，地表温度增加，并且，随着地表温度的升高可以促进植被的光合作用，植被生长旺盛，且通过对可见光蓝光和红光波段太阳辐射的吸收，使得地表反照率减小（白昕欣等, 2017），从而导致地表温度与地表反照率表现为负相关关系。空间上地表反照率与地表参数 NDVI 及地表温度的正相关和负相关并存的现象，说明地表反照率与其关系的复杂性，并受到多种因子影响，是共同作用的结果，导致其相关系数的分布存在空间异质性。

3.4.4　气候因子对地表反照率的影响

多年月均地表反照率与气温的空间相关系数分

布表明（图 12a），淮河流域地表反照率与气温呈正相关和负相关的区域分别占流域总面积的 85.41% 和 14.59%，大部分地区的地表反照率与气温呈正相关，这可能是由于随着气温的升高，地表蒸散加强，土壤表层含水量减小，从而造成地表反照率增加；而流域东北部地区地表反照率与气温在年内变化上呈负相关，可能是由于随着气温的升高，地表温度上升，在淮河流域东北部有利于植被生长，通过光合作用促进对可见光波段太阳辐射的吸收，导致地表反照率下降（赵之重等, 2014），且通过植被对裸土的覆盖等使地表反照率减少。另外，地表吸收的光辐射能量增加，地表温度增加等原因，使得东北部区域气温与地表反照率表现出负相关。

而淮河流域地表反照率与降水呈正相关和负相关的区域分别占流域总面积的 93.70% 和 6.30%（图 12b），流域东北地区地表反照率与降水呈负相关，可能是由于该地区为草地，植被覆盖度小，裸露土壤较多，随着降雨的增加，土壤表层含水量增加，地表反照率减小；而大部分耕地及林地地区植被覆盖度较大，随着降雨增多，会促进森林及作物生长，使得近红外反射率增加，从而导致地表反照率的增加（赵之重等, 2014）。由于气温和降水等气候因子的共同作用会对植被生长和地表粗糙度产生影响，并使表层土壤湿度发生变化，从而引起

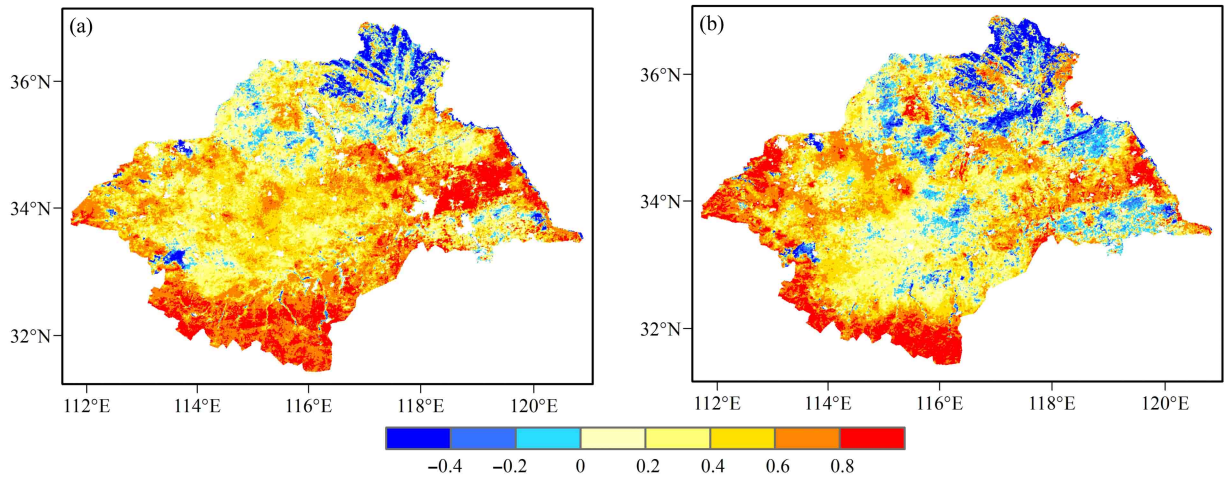

图 11 2005～2015 年淮河流域（a）地表反照率与 NDVI 和（b）地表反照率与地表温度的多年月均相关系数空间分布

Fig. 11 Spatial distribution of multiyear monthly average correlation coefficients between (a) land surface albedo and NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), (b) land surface albedo and land surface temperature in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

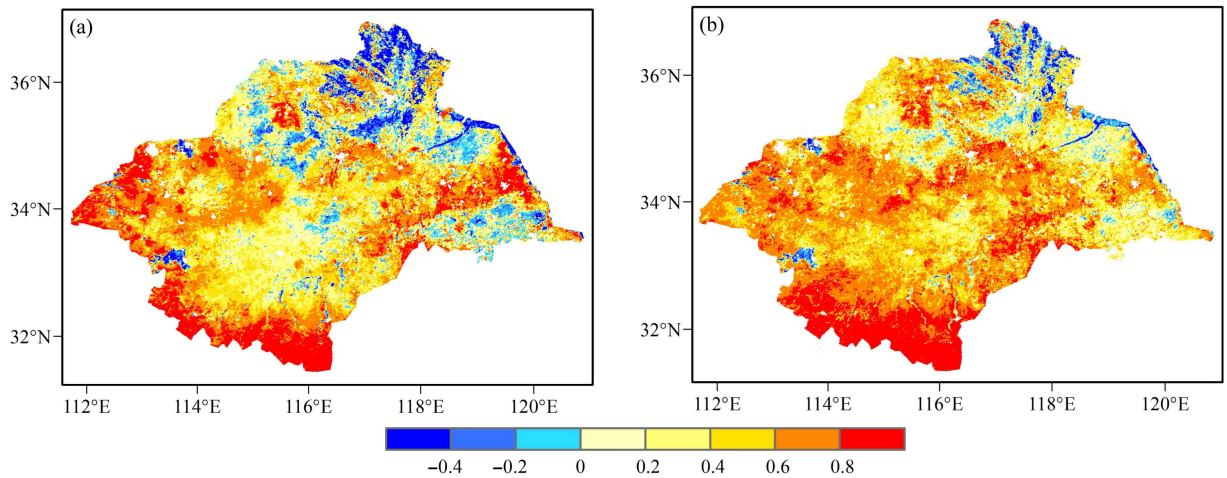

图 12 2005～2015 年淮河流域（a）地表反照率与气温和（b）地表反照率与降水量的多年月均相关系数空间分布

Fig. 12 Spatial distribution of multiyear monthly average correlation coefficients between (a) land surface albedo and air temperature, (b) land surface albedo and precipitation in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

地表反照率的变化（Tang et al., 2020），而植被对水热组合的响应不同，导致气候因子与地表反照率的相关系数在空间上存在正相关和负相关并存的现象（赵之重等, 2014）

3.4.5　地表反照率影响因子的灰色关联度分析

尽管地表反照率与各影响因子间存在不同程度的相关性，但各种因子之间相互作用，并不独立，研究引进灰色关联度分析可以客观量化各影响因子的影响程度，识别各因子对地表反照率变化的重要性。为了揭示淮河流域不同土地利用类型下地表反照率与各影响因子的相关性，研究区对耕地、林地、草地和城乡、工矿及居民用地等 4 种类型，采用灰色关联度方法，计算了 11 年年均地表反照率与 NDVI、地表温度、气温和降水等影响因子的灰色关联度，结果表明（表 1），整个研究区整体和不同土地利用类型下的灰色关联度排序基本一致，即为：NDVI>气温>地表温度>降水，表明在淮河流域地表反照率受 NDVI 的影响最大，气温和地表温度次之，降水最小，并且林地的地表反照率与 NDVI、地表温度及气温的关联度相差最小，可能是由于森林生态系统较为稳定，受各因子影响程度相差较小。

表 1　2005 ~ 2015 年淮河流域不同土地利用类型地表反照率与影响因子的年均灰色关联度

Table 1　Annual average gray correlation degree between the land surface albedo and influencing factors of different types of land use in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

土地利用类型	与地表反照率的灰色关联度			
	NDVI	地表温度	气温	降水
研究区	0.8058	0.7521	0.8030	0.7084
耕地	0.8156	0.7464	0.8049	0.7108
林地	0.7938	0.7654	0.7850	0.5679
草地	0.8189	0.7691	0.7857	0.6486
城乡、工矿、居民用地	—	0.7823	0.8454	0.7198

通过计算各影响因子和地表反照率的 11 年平均空间分布，研究淮河流域空间上地表反照率与影响因子的灰色关联度（表 2），结果表明各影响因子灰色关联度排序为 NDVI>降水>地表温度>气温>高程，说明空间上 NDVI 对地表反照率的影响最大，高程的影响较小，这与淮河流域绝大部分为平原地区，海拔高程相差较小有关。

表 2　2005 ~ 2015 年淮河流域不同土地类型地表反照率与影响因子的空间灰色关联度

Table 2　Spatial gray correlation degree between the land surface albedo and influencing factors of different types of land use in the Huaihe River basin from 2005 to 2015

影响因子	与地表反照率的空间灰色关联度
NDVI	0.8677
地表温度	0.7824
气温	0.6626
降水	0.7927
高程	0.4446

4　结论与讨论

本文利用 MODIS 地表反照率产品 MCD43B3 数据，在通过地面实测站点验证表明其在淮河流域具有较高精度及可靠性的基础上，采用网格趋势分析、异常变化分析、相关分析和灰色关联度分析等方法，分析了淮河流域 2005～2015 年地表反照率的时空变化特征及影响因子，主要结论如下：

（1）淮河流域多年平均地表反照率空间变化范围为 0.043～0.223，多年平均为 0.145，且存在“北高南低、东高西低”的空间分布格局。低值区主要集中于南四湖、骆马湖，洪泽湖、高邮湖等水体密集和西部、西南部山区和丘陵地带，且标准差相对较小；地表反照率高值区主要集中于流域中部及东部平原地带，且变化较大。61.5% 的区域地表反照率的年均变化呈增加趋势，其中 16.3% 的地区达到 0.1 显著性水平，呈显著增加趋势。

（2）2005～2015 年淮河流域年均地表反照率呈波动增加趋势，年均变化在 0.138～0.157，且存在显著的季节性差异，夏季平均地表反照率最大，春季次之，秋季最小，其中，夏和秋季平均地表反照率呈波动增加趋势，而冬季地表反照率呈减小趋势，且年均波动幅度最大。流域多年月平均地表反照率变化介于 0.134～0.167，随着作物生育期的过程先增加后减小，1 月最高，达 0.167，2 月迅速减少，然后回升，7 月达到小高峰，然后回落，在 10 月达到最低值。

（3）淮河流域地表反照率受多种影响因子的共同作用，地表反照率不仅受土地利用类型的影响，

还受气候、地形和 NDVI、地表温度等地表参数影响。在大部分区域地表反照率与 NDVI 和地表温度呈正相关，面积分别占 90.23% 和 82.32%。同样，地表反照率与气温和降水大部分区域呈正相关，面积分别为 85.41% 和 93.70%。研究区耕地和城乡、工矿、居民用地的年均地表反照率较大，草地和林地次之，水体最低。整体和在不同土地利用类型下（水体除外）地表反照率与各影响因子的年均灰色关联度排序相同，为 NDVI>气温>地表温度>降水，空间灰色关联度排序为 NDVI>降水>地表温度>气温>高程。

随着卫星遥感对地观测技术及地表反照率的反演模型技术的发展，遥感反演已经成为了地表反照率及相关研究的主要数据源，卫星遥感为监测全球或区域地表短波反照率的时空分布提供了条件，是获取区域乃至全球高时空分辨率地表反照率的一条重要途径，而这些全球高时空分辨率地表反照率产品中，遥感产品 MCD43 是准实时的业务化产品，可以在像元尺度（1 km）上估算整个研究区域的地表反照率, 准确反映地表反照率的时空异质性，为局地区域研究提供了研究可能。本文在利用长时间序列、高精度的 MODIS 卫星遥感数据研究淮河流域地表反照率时空变化的基础上，对其主要影响因子进行了分析，可促进对淮河流域地表反照率的认识，有利于了解流域生态和气候变化的内在机制和模拟研究，但地表反照率还受到多种因子的共同影响，如太阳高度角、大气因子、植被物理特性等，使得地表反照率与各影响因子的相关性存在时空异质性，还有待进一步的深入研究。另外，由于地表反照率是多种因素共同作用的结果，要进一步明确单因子与地表反照率在不同区间的相关性表现，及其他因子的效应，则有待因子控制和模拟试验，进一步分析其相互影响机理。且由于辐射数据地面观测站点有限，对于淮河流域 MODIS 地表反照率的验证与评估具有局限性，在今后的研究中，还需充分考虑遥感产品存在的混合像元、尺度效应，以及地表反照率产品空间分辨率与区域大小的对应等问题，以削弱遥感数据的不确定性。

致　谢　衷心感谢国家气象信息中心提供的中国气象辐射基本要素日值数据集对本论文的帮助。感谢南京信息工程大学高性能计算中心对本论文的数值计算提供的支持和帮助。

参考文献（References）

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

白昕欣, 黄萧霖, 秦孟晟, 等. 2017. 亚热带地区水稻田地表反照率变化特征 [J]. 中国生态农业学报, 25(11): 1707−1717. Bai Xinxin, Huang Xiaolin, Qin Mengsheng, et al. 2017. Characteristics of surface albedo in subtropical paddy rice fields [J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 25(11): 1707−1717. doi:10.13930/j.cnki.cjea.170276

曹晓云, 陈爱军, 肖建设, 等. 2019. 地表反照率与高原夏季风爆发关系分析 [J]. 气候与环境研究, 24(6): 785−794. Cao Xiaoyun, Chen Aijun, Xiao Jianshe, et al. 2019. Indicative significance of land surface albedo over the Tibetan Plateau to the onset of Plateau summer monsoon [J]. Climatic and Environmental Research, 24(6): 785−794. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2019.18153

陈爱军, 曹晓云, 韩琛惠, 等. 2018. 2000～2016 年青藏高原地表反照率时空分布及动态变化 [J]. 气候与环境研究, 23(3): 355−365. Chen Aijun, Cao Xiaoyun, Han Chenhui, et al. 2018. Spatial−temporal distribution and variation of land surface albedo over the Tibetan Plateau during 2000−2016 [J]. Climatic and Environmental Research, 23(3): 355−365. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17113

陈爱军, 孟文童, 胡慎慎, 等. 2020. 青藏高原 MODIS 地表反照率和 GLASS 地表反照率的对比分析 [J]. 大气科学学报, 43(5): 932−942. Chen Aijun, Meng Wentong, Hu Shenshen, et al. 2020. Comparative analysis on land surface albedo from MODIS and GLASS over the Tibetan Plateau [J]. Transactions of Atmospheric Sciences, 43(5): 932−942. doi:10.13878/j.cnki.dqkxxb.20171030001

陈淼. 2019. 地形对地表反照率影响的模拟研究 [J]. 农业灾害研究, 9(6): 111−114. Chen Miao. 2019. Simulation study on the influence of topography on surface albedo [J]. Journal of Agricultural Catastrophology, 9(6): 111−114. doi:10.19383/j.cnki.nyzhyj.2019.06.043

除多. 2016. 2000～2014 年西藏高原积雪覆盖时空变化 [J]. 高原山地气象研究, 36(1): 27−37. Chu Duo. 2016. Spatial−temporal variations of snow cover on the Tibet Autonomous Region from 2000 to 2014 using MODIS data [J]. Plateau and Mountain Meteorology Research, 36(1): 27−37. doi:10.3969/j.issn.1674-2184·2016.01.005

He T, Liang S L, Song D X. 2015. Analysis of global land surface albedo climatology and spatial−temporal variation during 1981−2010 from multiple satellite products [J]. J. Geophys. Res. :Atmos., 119(17): 10281−10298. doi:10.1002/2014JD021667

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

刘辉志, 涂钢, 董文杰. 2008. 半干旱区不同下垫面地表反照率变化特征 [J]. 科学通报, 53(10): 1220−1227. Liu Huizhi, Tu Gang, Dong Wenjie. 2008. The variation characteristics of surface albedo of different underlying surface in semi-arid region [J]. Chinese Science Bulletin, 53(10): 1220−1227. doi:10.3321/j.issn:0023-074X.2008.10.014

刘亲亲, 崔耀平, 刘素洁, 等. 2019. 中国不同土地利用类型分光辐射地表反照率研究 [J]. 遥感技术与应用, 34(1):46–56. Liu Qinqin, Cui Yaoping, Liu Sujie, et al. 2019. Study on surface albedo of spectral radiation of different land use types in China[J]. Remote Sensing Technology and Application, 25(6): 1034−1041.

Meng C L. 2020. Surface albedo assimilation and its impact on surface radiation budget in Beijing [J]. Advances in Meteorology, 2020: 8312451. doi:10.1155/2020/8312451

孟文童. 2018. 中国地区多源地表反照率数据的对比分析 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Meng Wentong. 2018. Comparative analysis of multi-source land surface albedo in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

Román M O, Schaaf C B, Lewis P, et al. 2010. Assessing the coupling between surface albedo derived from MODIS and the fraction of diffuse skylight over spatially-characterized landscapes [J]. Remote Sensing of Environment, 114(4): 738−760. doi:10.1016/j.rse.2009.11.014

商荣, 刘荣高, 刘洋. 2015. 基于背景知识的全球长时间序列反照率反演 [J]. 地球信息科学学报, 17(11): 1313−1322. Shang Rong, Liu Ronggao, Liu Yang. 2015. Generation of global long-term albedo product based on the background knowledge [J]. Journal of Geo-information Science, 17(11): 1313−1322. doi:10.3724/SP.J.1047.2015.01313

孙琳婵, 赵林, 李韧, 等. 2020. 青藏高原腹地多年冻土区地表反照率的季节变化及主要影响因子 [J]. 山地学报, 38(1): 9−18. Sun Linchan, Zhao Lin, Li Ren, et al. 2020. Seasonal changes and major influencing factors of surface albedo in the permafrost regions of the Qinghai−Tibet Plateau Hinterland, China [J]. Mountain Research, 38(1): 9−18. doi:10.16089/j.cnki.1008-2786.000486

唐柄哲, 何丙辉, 闫建梅. 2016. 川中丘陵区土地利用方式对土壤理化性质影响的灰色关联分析 [J]. 应用生态学报, 27(5): 1445−1452. Tang Bingzhe, He Binghui, Yan Jianmei. 2016. Gray correlation analysis of the impact of land use type on soil physical and chemical properties in the hilly area of central Sichuan, China [J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 27(5): 1445−1452. doi:10.13287/j.1001-9332.201605.019

Tang X Y, Cui Y P, Li N, et al. 2020. Human activities enhance radiation forcing through surface albedo associated with vegetation in Beijing [J]. Remote Sensing, 12(5): 837. doi:10.3390/rs12050837

Tian L, Zhang Y J, Zhu J T. 2014. Decreased surface albedo driven by denser vegetation on the Tibetan Plateau [J]. Environmental Research Letters, 9(10): 104001. doi:10.1088/1748-9326/9/10/104001

王鸽. 2010. 1982-2000 年中国区域地表反照率时空分布特征 [J]. 高原气象, 29(1): 146−151. Wang Ge. 2010. Distribution of surface albedo in China during 1982−2000 [J]. Plateau Meteorology, 29(1): 146−151.

王介民, 高峰. 2004. 关于地表反照率遥感反演的几个问题 [J]. 遥感技术与应用, 19(5): 295−300. Wang Jiemin, Gao Feng. 2004. Discussion on the problems on land surface albedo retrieval by remote sensing data [J]. Remote Sensing Technology and Application, 19(5): 295−300. doi:10.3969/j.issn.1004-0323.2004.05.001

王开存, 刘晶淼, 周秀骥, 等. 2004. 利用 MODIS 卫星资料反演中国地区晴空地表短波反照率及其特征分析 [J]. 大气科学, 28(6): 941−949. Wang Kaicun, Liu Jingmiao, Zhou Xiuji, et al. 2004. Retrieval of the surface albedo under clear sky over China and its characteristics analysis by using MODIS satellite date [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences, 28(6): 941−949. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2004.06.12

王舒默, 胡永红, 王式功, 等. 2015. 植被功能型差异对地表反照率时空分布的影响分析 [J]. 遥感技术与应用, 30(5): 932−938. Wang Shumo, Hu Yonghong, Wang Shigong, et al. 2015. Influence of the difference of plant functional types on surface albedo variation [J]. Remote Sensing Technology and Application, 30(5): 932−938. doi:10.11873/j.issn.1004-0323.2015.5.0932

吴宏伊, 童玲, 陈云坪. 2012. 基于中国通量网的 MODIS 短波反照率验证与分析 [J]. 遥感技术与应用, 27(5): 735−739. Wu Hongyi, Tong Ling, Chen Yunping. 2012. Evaluation of MODIS shortwave albedo products over ChinaFLUX sites [J]. Remote Sensing Technology and Application, 27(5): 735−739. doi:10.11873/J.ISSN.1004-0323.2012.5.735

肖登攀, 陶福禄, Moiwo J P. 2011. 全球变化下地表反照率研究进展 [J]. 地球科学进展, 26(11): 1217−1224. Xiao Dengpan, Tao Fulu, Moiwo J P. 2011. Research progress on surface albedo under global change [J]. Advances in Earth Science, 26(11): 1217−1224.

徐震宇, 邱新法, 李爽爽, 等. 2020. 基于 MODIS 的中国地表反照率特征分析 [J]. 干旱区资源与环境, 34(1): 99−105. Xu Zhenyu, Qiu Xinfa, Li Shuangshuang, et al. 2020. Analysis of surface albedo over China based on MODIS [J]. Journal of Arid Land Resources and Environment, 34(1): 99−105. doi:10.13448/j.cnki.jalre.2020.014

姚济敏, 谷良雷, 赵林, 等. 2013. 多年冻土区与季节冻土区地表反照率对比观测研究 [J]. 气象学报, 71(1): 176−184. Yao Jimin, Gu Lianglei, Zhao Lin, et al. 2013. Comparatively observational study of the surface albedo between the permafrost region and the seasonally frozen soil region [J]. Acta Meteorologica Sinica, 71(1): 176−184. doi:10.11676/qxxb2013.015

余予, 李扬云, 童应祥, 等. 2009. 寿县地区小麦和水稻田地表反照率

观测分析 [J]. 气候与环境研究, 14(6): 639−645. Yu Yu, Li Yangyun, Tong Yingxiang, et al. 2009. Observation and analysis of surface albedo of wheat and rice fields in Shouxian region [J]. Climatic and Environmental Research, 14(6): 639−645. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2009.06.07

张俊兵. 2019. CLDAS2.0 长序列辐射驱动数据研制与分析评估 [D]. 南京信息工程大学硕士学位论文. Zhang Junbing. 2019. Analysis of CLDAS2.0 long-sequence radiation forcing data [D]. M. S. thesis (in Chinese), Nanjing University of Information Science and Technology.

赵之重, 赵凯, 徐剑波, 等. 2014. 三江源地表反照率时空变化及其与气候因子的关系 [J]. 干旱区研究, 31(6): 1031−1038. Zhao Zhizhong, Zhao Kai, Xu Jianbo, et al. 2014. Spatial-temporal changes of surface albedo and its relationship with climate factors in the source of Three Rivers Region [J]. Arid Zone Research, 31(6): 1031−1038. doi:10.13866/j.azr.2014.06.08

郑瑜晗, 黄麟, 翟俊. 2020. 陆地表层覆盖变化对地表反照率影响的四国对比 [J]. 遥感学报, 24(7): 917−932. Zheng Yuhan, Huang Lin, Zhai Jun. 2020. Impacts of land cover changes on surface albedo in China, the United States, India and Brazil [J]. Journal of Remote Sensing, 24(7): 917−932.