0254-6124/2023/43(6)-1150-10 *Chin. J. Space Sci.* 空间科学学报

CUI Yuxiang, HUSI Letu, LI Tongwen, JI Dabin, ZHANG Hao, SHI Jiancheng. Spatio-temporal Changes in Surface Net Radiation in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2021 (in Chinese). *Chinese Journal of Space Science*, 2023, **43**(6): 1150–1159. DOI:10.11728/cjss2023.06.2023-0080

2000－2021 年青藏高原地区地表净辐射的时空变化*

崔玉祥[1] 胡斯勒图[1] 李同文[2]
姬大彬[1] 张 颢[1] 施建成[3]

1(中国科学院空天信息创新研究院 北京 100094)

2(中山大学测绘科学与技术学院 珠海 519080)

3(中国科学院国家空间科学中心 北京 100190)

摘 要 基于 CERES 卫星提供的 2000 年 3 月至 2022 年 2 月 SYN1 deg–Level 3 辐射数据，结合 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 EOF 分析等方法，分析了 22 年间青藏高原地表净辐射的时空变化规律。研究发现，在空间分布特征上，青藏高原地表净辐射总体呈现南高北低的分布特征，地表净辐射变化趋势具有高度一致性，但在青藏高原南部地表净辐射变化量级远高于青藏高原北部；在时间演化特征上，地表净辐射呈现准正弦振动，年周期变化明显，特别是 2016－2017 年出现突变，下降约 5.52 $W\cdot m^{-2}$，同期云覆盖度年平均值提高约 18.75%。

关键词 青藏高原，地表净辐射，时空变化，EOF 分析，Theil-Sen Median 趋势，Mann-Kendall 检验

中图分类号 P4

Spatio-temporal Changes in Surface Net Radiation in the Qinghai-Tibet Plateau from 2000 to 2021

CUI Yuxiang[1] HUSI Letu[1] LI Tongwen[2]
JI Dabin[1] ZHANG Hao[1] SHI Jiancheng[3]

1(*Aerospace Information Research Institute, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100094)

2(*School of Geospatial Engineering and Science, Sun Yat-sen University, Zhuhai* 519080)

3(*National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, Beijing* 100190)

* 国家自然科学基金项目（42025504）和第二次青藏高原综合科学考察研究项目（2019 QZKK0206）共同资助

2023-08-03 收到原稿，2023-11-01 收到修定稿

E-mail：cuiyuxiang23@mails.ucas.ac.cn

©The Author(s) 2023. This is an open access article under the CC-BY 4.0 License (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Abstract Based on the SYN1 deg-Level 3 radiation product from the CERES satellite spanning from March 2000 to February 2022, The Theil-Sen Median trend analysis, Mann-Kendall test, and EOF analysis were combined to investigate the spatiotemporal patterns of surface net radiation on the Qinghai-Tibet Plateau over the past 22 years. The study found that in terms of spatial distribution characteristics, the surface net radiation in the Qinghai-Tibet Plateau exhibits a general pattern of higher values in the southern region and lower values in the northern region. The variation trend of surface net radiation shows a high degree of consistency, but the fluctuation amplitude of it in the southern region of the Qinghai-Tibet Plateau is much higher than that in the northern region of the Qinghai-Tibet Plateau. Regarding to the temporal evolution, the surface net radiation displayed quasi-sinusoidal oscillations with a noticeable annual periodicity. Notably, there was a sudden decrease of approximately 5.52 $W \cdot m^{-2}$ in the period from 2016 to 2017. Concurrently, there was an increase of about 18.75% in the cloud area fraction during the same period.

Key words Qinghai-Tibet Plateau, Surface net radiation, Spatiotemporal change, EOF analysis, Theil-Sen Median trend, Mann-Kendall test

0 引言

地表净辐射是指地球表面的入射和出射辐射之间的差值,包括长波和短波辐射,是衡量地表辐射收支总量的一个重要参数。从地表能量平衡的角度看,地表净辐射可以转化为热通量,包括土壤热通量、感热通量和潜热通量等,地表净辐射是影响整个地气能量交换和再分配的重要参数[1]。同时,作为研究地气间相互作用的关键因素,地表净辐射是地表蒸散、大气热量和水循环的主要驱动力,其时空变化直接影响着水分和能量交换[2–5],用于气候监测、天气预报和农业气象等领域。

青藏高原地处亚洲大陆中心地带,平均海拔超过 4 km,是地球上海拔最高且地形复杂的高原之一,素有地球第三极之称[6]。青藏高原与大气圈、生物圈和水圈等圈层耦合作用,对高原及其周边地区气候格局、亚洲季风形成,乃至北半球大气环流、全球的气候变化和极端天气形成有巨大影响[7–9]。因此,分析研究青藏高原地区地表净辐射的时空变化具有重大意义。

对青藏高原地区地表净辐射的时空变化特征已有很多研究,并取得了一定成果[10–13]。Ciren 等[14] 采用青藏高原羊八井地区 2009—2010 年期间辐射观测数据,研究发现羊八井地区地表净辐射最高值出现在 6 月,最低值出现在 12 月。Li 等[15] 基于狮泉河地气交换综合观测站和狮泉河气象站辐射观测数据,研究了阿里地区净辐射通量的日循环、日变化、季节变化和年际变化特征。结果表明,阿里地区净辐射平均日变化峰值出现在 14:30 LT—15:00 LT,净辐射月均值最大值出现在 8 月,且近 20 年来净辐射的平均日变化峰值和月均值最大值出现时间延后现象。Zhao 等[16] 利用青藏高原羊八井观测站 2020—2021 年的太阳短波辐射数据和地气长波辐射数据,发现羊八井地区地表净辐射呈现显著的单峰月际变化特征,月平均值 6 月最高,12 月最低。以上研究为青藏高原地区地表净辐射的研究奠定了重要基础,但是大部分地表净辐射变化规律仅从时间或者空间一个维度分析,没有在时空维度综合考虑。另外,大多数研究只在站点位置或者某一局部区域进行研究,涉及青藏高原全域的较少。卫星遥感数据相较于地基站点数据,拥有大面积、长时序等显著优势,特别有利于大范围长时间序列的地表净辐射估算问题的研究[17,18]。

本文利用 CERES 获取青藏高原地区 2000 年 3 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日的逐日地表辐射各分量数据,计算地表净辐射数据,并结合经验正交函数分析法(Empirical Orthogonal Function, EOF)、Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 分析法,深入探究青藏高原净辐射通量的时空变化特征,以期为青藏高原地区地气间的能量交换和再分配探究以及长期气候变化研究等提供科学依据。

1 研究区域

青藏高原是世界上海拔最高、面积最大的高原，位于中国西南部。图 1 表明研究区[*]东部地势较低，西部地势较高，平均海拔超过 4000 m。总体而言，该地区地势高，大气稀薄，太阳辐射能量更容易到达地面，是全球辐射最强的地区之一。本文在基于站点数据验证 CERES 卫星数据有效性基础上，结合多种分析方法探究青藏高原地区地表净辐射的时空变化特征。

2 数据与方法

2.1 数据来源及预处理

研究采用的数据为 2000 年 3 月 1 日至 2022 年 2 月 28 日 CERES 的 SYN1 deg–Level 3 数据集[**]逐日地表辐射各分量数据——地表上行短波辐射、地表下行短波辐射、地表上行长波辐射、地表下行长波辐射，由公式 1 计算得到地表净辐射，空间分辨率为 1°×1°，数据单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$ 。

使用的地基站点数据来自于中国气象数据网站[***]，基于如表 1 所示的青藏高原地区所有地基站点（拉萨、西宁、那曲、昌都、玉树），获取 2015 年 12 月 31 日 18:00 LT 到 2016 年 12 月 31 日 17:00 LT 逐小时地表下行短波辐射，用于评估 CERES 辐射参数的数据质量，地表净辐射

$$R_n = R_{\mathrm{sd}} + R_{\mathrm{ld}} - R_{\mathrm{su}} - R_{\mathrm{lu}}. \tag{1}$$

式中，R_{sd}为地表下行短波辐射；R_{ld}为地表下行长波辐射；R_{su}为地表上行短波辐射；R_{lu}为地表上行长波辐射，单位为 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$。

2.2 有效性验证

卫星数据比地基站点观测数据空间覆盖能力强，更利于反映地表净辐射的时空分布和分配过程，但是地基站点的观测具有更高的精度。因此，利用 5 个地基站点数据对卫星数据进行精度验证，相关数据采用 2015－2016 年共 8784 h 地表下行辐射数据，以地基站点值为参考值，分别计算决定系数 R^2 和平均绝对误差 E（单位 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$），即

$$R^2 = \frac{\left[\sum_{i=1}^{N}\left(X_i-\overline{X}\right)\left(Y_i-\overline{Y}\right)\right]^2}{\sum_{i=1}^{N}\left(X_i-\overline{X}\right)^2\sum_{i=1}^{N}\left(Y_i-\overline{Y}\right)^2}, \tag{2}$$

$$E = \frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}\left|Y_i - X_i\right|. \tag{3}$$

其中，N为样本数量，X和$\overline{X}$分别为地基站点观测真值及其平均值；Y和$\overline{Y}$分别为 CERES 卫星数值及其平均值。图 2 给出了 CERES 卫星数据有效性验证结果，五个站点的 R^2 分别为 0.92, 0.87, 0.88, 0.85 和 0.87，同时，E分别为 44.41, 55.51, 45.03, 56.80 和 53.64 $\mathrm{W\cdot m^{-2}}$。上述结果表明，CERES 数据相对稳定且有效性较高，能够满足研究需求。

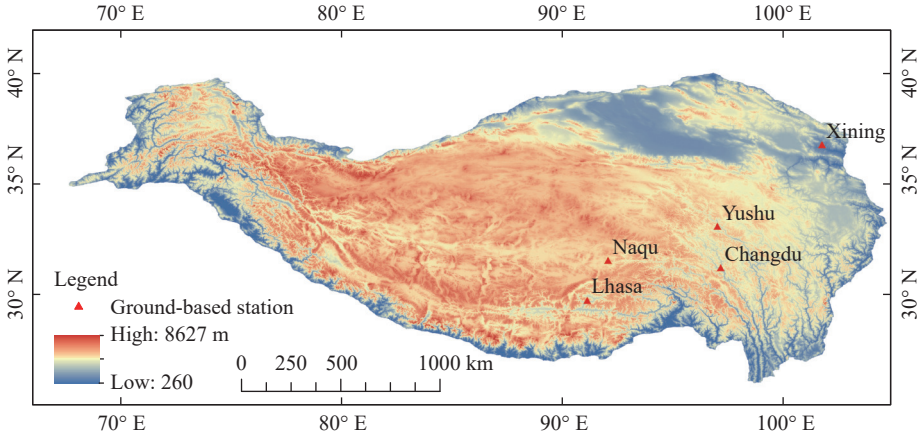


图 1 青藏高原地区高程及地基站点分布

Fig. 1 Elevation map of Qinghai-Tibet Plateau

[*] https://cstr.cn/18406.11.Geogra.tpdc.270099

[**] https://ceres.larc.nasa.gov/data/

[***] http://data.cma.cn/

表 1　青藏高原地区拉萨、西宁、那曲、昌都和玉树 5 个地基站点参数

Table 1　Parameters of five ground stations in Qinghai-Tibet Plateau region, including Lhasa, Xining, Naqu, Changdu and Yushu

地基站点名称	经度(E)/(°)	纬度(N) /(°)	海拔/m
拉萨(55591)	91.13	29.67	3648
西宁(58866)	101.75	36.72	2295
那曲(55299)	92.07	31.48	4507
昌都(56137)	97.17	31.15	3306
玉树(56029)	97.02	33.02	3681

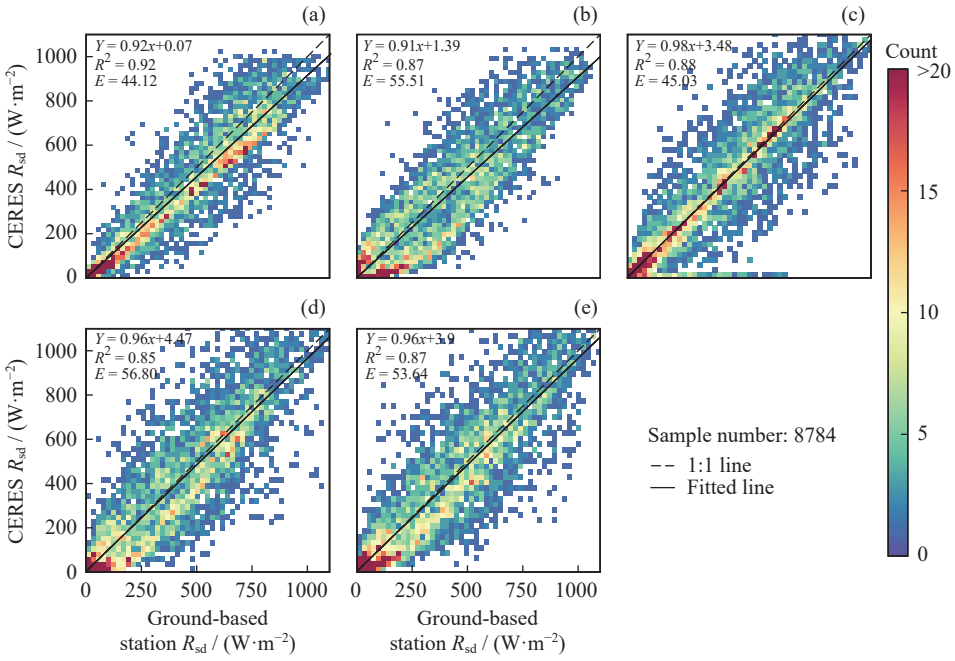


图 2　拉萨（a）、西宁（b）、那曲（c）、昌都（d）和玉树（e）站点 CERES 地表下行短波辐射和地基站点数据验证

Fig. 2　Validation of CERES surface downward shortwave radiation data with ground-based station data at sites in Lhasa (a), Xining (b), Naqu (c), Changdu (d) and Yushu (e)

2.3　研究方法

2.3.1　趋势分析法

Theil-Sen Median 趋势分析[19,20]，是一种稳健性强且不依赖参数的趋势计算方法，该算法摆脱了测量值服从正态分布的缺点，并且在缺失值和异常值影响下依然有效，因而在长时序数据趋势分析中得到了广泛应用。具体计算过程如下：

$$S = \mathrm{Median}\left(\frac{R_{nj} - R_{ni}}{j - i}\right). \tag{4}$$

式中，Median为中位数运算，R_{ni} 和 R_{nj} 分别代表第 i 和 j 年的地表净辐射，i 和 j 分别为第 i 和 j 年，且 $j > i$；S表征地表净辐射的变化趋势。当$S > 0$，表明该研究时段内地表净辐射有加强趋势；当$S = 0$，表明该研究时段内地表净辐射无变化趋势；当$S < 0$，则表明该研究时段内地表净辐射有减弱趋势。

2.3.2　Mann-Kendall 检验

Mann-Kendall 显著性检验法[21,22]，是一种不受异常值影响且操作简单的检验长时序变化趋势显著性的方法，已经在水文、气象等领域取得成功应用。本文采用该方法来检验地表净辐射变化的显著性。具体算法如下：

$$f_{ji}=\begin{cases}-1, & R_{nj}-R_{ni}<0;\\ 0, & R_{nj}-R_{ni}=0;\\ 1, & R_{nj}-R_{ni}>0.\end{cases} \tag{5}$$

$$S=\sum_{i=1}^{n-1}\sum_{j=i+1}^{n}f_{ji}. \tag{6}$$

$$S_{\mathrm{var}}=\frac{n\left(n-1\right)\left(2n+5\right)}{18}. \tag{7}$$

$$Z=\begin{cases}\dfrac{S-1}{\sqrt{\mathrm{var}\left(S\right)}}, & S>0;\\ 0, & S=0;\\ \dfrac{S+1}{\sqrt{\mathrm{var}\left(S\right)}}, & S<0.\end{cases} \tag{8}$$

式中, $1\leqslant i<j\leqslant n$, n 为时间序列长度; f_{ji}为$R_{nj}-R_{ni}$的差值函数; S_{var}为 S的方差, Z反映地表净辐射变化趋势的显著性。当$|Z|\geqslant 2.58$时, 表示地表净辐射变化趋势已通过显著性水平$\alpha=0.01$的显著性检验; 当$1.96<|Z|<2.58$时, 则说明地表净辐射变化趋势通过了显著性水平$\alpha=0.05$的显著性检验; 当$|Z|\leqslant 1.96$表示地表净辐射变化趋势未能通过显著性水平$\alpha=0.05$的显著性检验。

Theil-Sen Median 趋势分析对异常值不敏感, 可用于检测数据中是否存在某种趋势, 而 Mann-Kendall 显著性检验法可以验证被检验的时间序列的趋势性是否通过某置信度下的显著性检验。结合 Theil-Sen Median 趋势分析与 Mann-Kendall 显著性检测(见表 2[22]), 即可更有效反应地表净辐射的变化趋势。

2.3.3 EOF 分析

EOF 分析[23–25] 是一种常用的数据分析方法, 常用于对海气耦合系统、气象、气候等领域中的大规模环境数据进行降维、分解和重构。其不仅可以降低数据维度, 并且能尽可能地保留原始数据的空间和时间变化特征。特征向量所对应的空间样本可以展现其空间分布特点; 而主成分则表现时间变化, 揭示了随时间变化的不同空间模态的重要性权重。

对青藏高原地区 2000 年 3 月到 2022 年 2 月共 264 个月逐像素(共 299 个像素点)地表净辐射处理成地表净辐射距平值$\boldsymbol{X}_{m\times n}$, 基于 EOF 分析求解特征根及相应特征向量, 计算各空间模态的方差贡献率并进行 North 检验, 具体计算公式如下:

$$\boldsymbol{C}_{m\times m}=\frac{1}{n}\cdot\boldsymbol{X}_{m\times n}\times\boldsymbol{X}_{m\times n}^{\mathrm{T}}, \tag{9}$$

表 2 地表净辐射变化特征划分标准

Table 2 Criteria for classifying changes in surface net radiation

趋势(S)	显著水平(Z值)	趋势特征
$S>0$	$\|Z\|\geqslant 2.58$	显著增加
	$1.96<\|Z\|<2.58$	不显著增加
	$\|Z\|\leqslant 1.96$	稳定不变
$S=0$	$\|Z\|$	稳定不变
$S<0$	$\|Z\|\leqslant 1.96$	稳定不变
	$1.96<\|Z\|<2.58$	不显著减少
	$\|Z\|\geqslant 2.58$	显著减少

$$\boldsymbol{C}_{m\times m}\times\boldsymbol{V}_{m\times m}=\boldsymbol{V}_{m\times m}\times\boldsymbol{E}_{m\times m}, \tag{10}$$

$$\boldsymbol{E}_{m\times m}=\begin{bmatrix}\lambda_1 & 0 & \cdots & 0\\ 0 & \lambda_2 & \cdots & 0\\ \vdots & \vdots & & \vdots\\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_m\end{bmatrix}, \tag{11}$$

$$\boldsymbol{P}_{m\times n}=\boldsymbol{V}_{m\times m}^{\mathrm{T}}\times\boldsymbol{X}_{m\times n}, \tag{12}$$

$$A=\frac{\lambda_k}{\sum_{i=1}^{m}\lambda_i}\times 100\%, \tag{13}$$

$$R=\left[\lambda_i-\lambda_i\sqrt{\frac{2}{m}},\ \lambda_i+\lambda_i\sqrt{\frac{2}{m}}\right]. \tag{14}$$

式中, $n=264$, $m=299$, $\boldsymbol{X}_{m\times n}$为地表净辐射距平值; $\boldsymbol{C}_{m\times m}$为协方差矩阵; λ_1, $\lambda_2,\cdots,\lambda_m$为协方差矩阵$\boldsymbol{C}_{m\times m}$对应的特征根; $\boldsymbol{V}_{m\times m}$为特征向量; $\boldsymbol{E}_{m\times m}$为$m\times m$的对角矩阵, $\boldsymbol{P}_{m\times n}$为时间系数, A为方差贡献率, R为 North 检验容许的误差范围。

3 结果与讨论

3.1 年平均地表净辐射的分布特征

图 3 给出了青藏高原地区逐年平均地表净辐射空间分布, 从空间分布来看, 青藏高原年平均地表净辐射的空间分布特征首先表现为纬度水平条带特征, 即年平均地表净辐射沿纬度从南到北逐渐降低, 最高值出现在喜马拉雅山脉和横断山脉一线。其次, 从经度方向来看, 年平均地表净辐射从西向东大致呈现先减弱, 后增强, 再减弱, 再增强的高−低−高−低−高模式, 这主要与青藏高原的地势有关[26], 青藏高原西部有着平均海拔 6000 m 以上的喜马拉雅山脉, 唐古

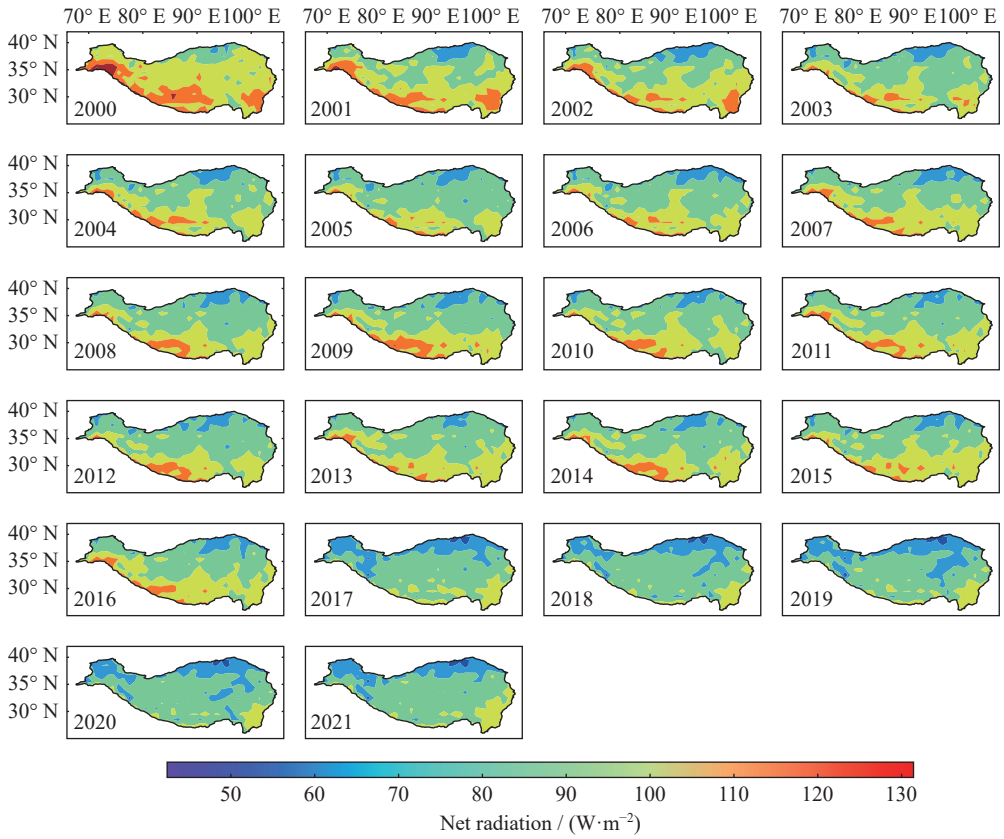


图 3 2000—2021 年青藏高原地区年平均地表净辐射空间分布

Fig. 3 Spatial distribution of surface net radiation in the Qinghai-Tibet Plateau region from 2000 to 2021

拉山脉横卧青藏高原中部, 而横断山脉盘亘于青藏高原东部。

从时间变化来看, 年平均地表净辐射 2000—2016 年大都在 100 $W\cdot m^{-2}$ 以上, 2017—2021 也大都在 90 $W\cdot m^{-2}$ 以上; 青藏高原中部地区 2000—2016 年处于 90～100 $W\cdot m^{-2}$ 之间, 2017—2021 处于 80～90 $W\cdot m^{-2}$ 之间, 最低值为塔里木盆地, 常年处于 50～60 $W\cdot m^{-2}$ 之间。其中, 值得注意的是, 青藏高原大部分地区在 2000—2016 年年平均地表净辐射基本保持平稳状态, 而在 2016—2017 年间发生突变, 2017—2021 年年平均地表净辐射也基本维持不变。

3.2 结合趋势分析法与 M-K 检验法的地表净辐射趋势分析

图 4 给出了 2000—2021 年青藏高原地区地表净辐射变化分布, 分析可知, 2000—2021 年青藏高原地表净辐射整体处于基本不变和不显著减少状态。其中, 帕米尔高原、昆仑山、藏北高原、柴达木盆地、藏东南等地区地表净辐射基本不变; 冈底斯山脉、唐古拉山脉、昆仑山脉、青海湖以及青藏高原中东部均呈

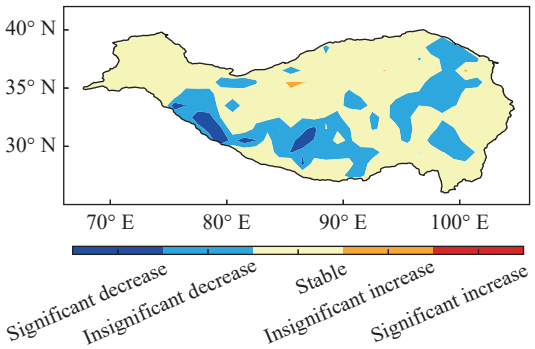


图 4 2000—2021 年青藏高原地区地表净辐射变化分布

Fig. 4 Distribution of surface net radiation changes in the Qinghai-Tibet Plateau region from 2000 to 2021

现不显著减少趋势; 喜马拉雅山脉附近显著减少; 藏北高原附近出现零星不显著增加区域。结合图 5 地表辐射各分量变化趋势, 可以看到喜马拉雅山脉附近地表下行辐射呈稳定不变或者不显著减少趋势, 而地表上行辐射却出现不显著增加, 甚至显著增加趋势, 因此, 此地地表净辐射呈显著减少和不显著减少状态。此外, 青藏高原地表上行长波辐射全域呈现基本

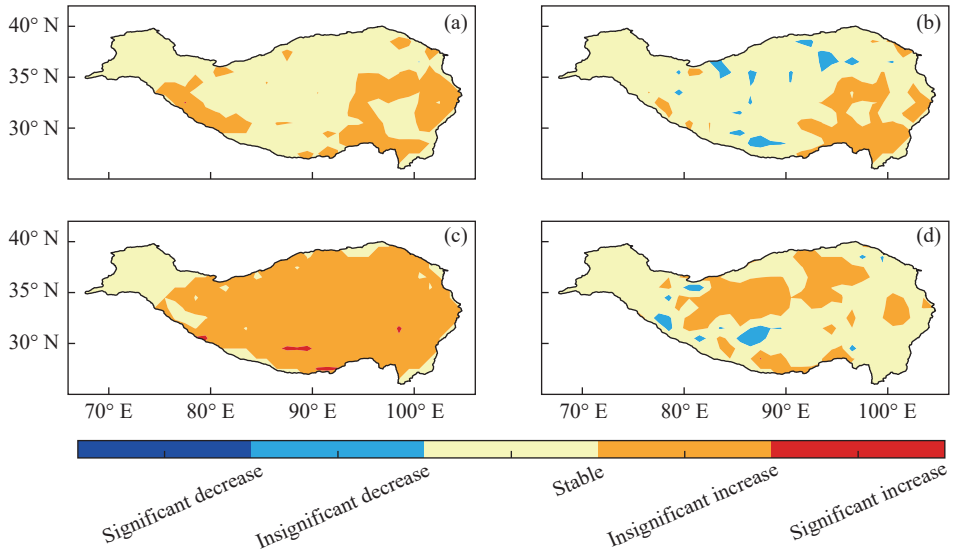


图 5 2000－2021 年青藏高原地区地表辐射各分量地表上行短波辐射（a）、地表下行短波辐射（b）、地表上行长波辐射（c）和地表下行长波辐射（d）变化分布

Fig. 5 Distribution of changes in surface radiation components in the Qinghai-Tibet Plateau region from 2000 to 2021, including surface upward shortwave radiation (a), surface downward shortwave radiation (b), surface upward longwave radiation (c), and surface downward longwave radiation (d)

不显著增加趋势，这在一定程度上表明了青藏高原大部分地区地表温度总体呈增长趋势，响应了全球变暖的气候特征，这与 Gu 等[6] 探究青藏高原地表辐射通量的气候特征结论高度吻合。

图 6 给出了 2000－2021 年青藏高原地区地表净辐射季节、年均变化趋势以及云覆盖面积分数变化趋势。由图 6 分析可知，从年内变化来看（见图 6 a），青藏高原地表净辐射有明显季节变化特征。2022 年来青藏高原地表净辐射均呈现出夏季>春季>秋季>冬季的规律。原因可能在于夏季青藏高原地区太阳高度角大，太阳总辐射相应较大，对地表净辐射的增量远大于因大气中水气含量较高以及云量相对较高对地表直接辐射而产生的减少量[27]。这也与 Gao 等[1] 关于青藏区地表净辐射各个季节总体趋势保持一致。

从图 6(b) 所示的年际变化来看，2000－2021 年青藏高原地表净辐射在 2016 年发生显著变化，突降约 6 $W\cdot m^{-2}$。表现为 2000－2016 年和 2017－2021 年，两个时间段内地表净辐射各季均值变动幅度不大，但是 2017 年各季节地表净辐射均明显低于 2016 年数值。如图 6(c) 所示，查阅资料后发现青藏高原地区 2000－2016 年云覆盖度年均值基本维持在 47.01%，而在 2017－2020 年，这一数据达到 55.87%，提升约 18.75%，地表净辐射与云覆盖分数突变一致性较强，进一步利用皮尔逊相关性检验发现：两者相关性系数为–0.90(p<0.001)，具有显著负相关性，猜测可能是云覆盖度增加会阻挡更多太阳辐射，使得地表收到的太阳辐射减少，最终导致地表净辐射下降。

3.3 EOF 方法地表净辐射通量变化分析

表 3 给出了前 5 个特征向量的特征根、方差贡献率以及特征根误差范围，从表 3 可以看出，第一空间模态贡献最大，为 75.55%，第二方差贡献急剧减少，仅为 7.58%，其后，方差贡献率均较小，前 2 个特征向量的累积方差贡献率已经达到 83.13%，并且都通过了 North 显著性检验，因此前 2 个特征向量基本可以反映青藏高原 2000－2021 年地表净辐射的分布类型。

第 1 模态特征向量的方差贡献率为 75.55%，远高于其他模态的方差贡献率，可以反映青藏高原地表净辐射分布最重要的典型场，代表区域分布的平均特征。从图 7(a) 所示的第一特征向量空间分布特征来分析，第 1 模态在青藏高原地区的空间系数全部为正值，这表明 2000－2022 年青藏高原地表净辐射变化趋势具有整体一致性，即青藏高原地区地表净辐射均呈现出普遍较强或者普遍较弱的特征。同时，第 1 模态系数大致呈以喀喇昆仑山脉为低值中心向四周扩

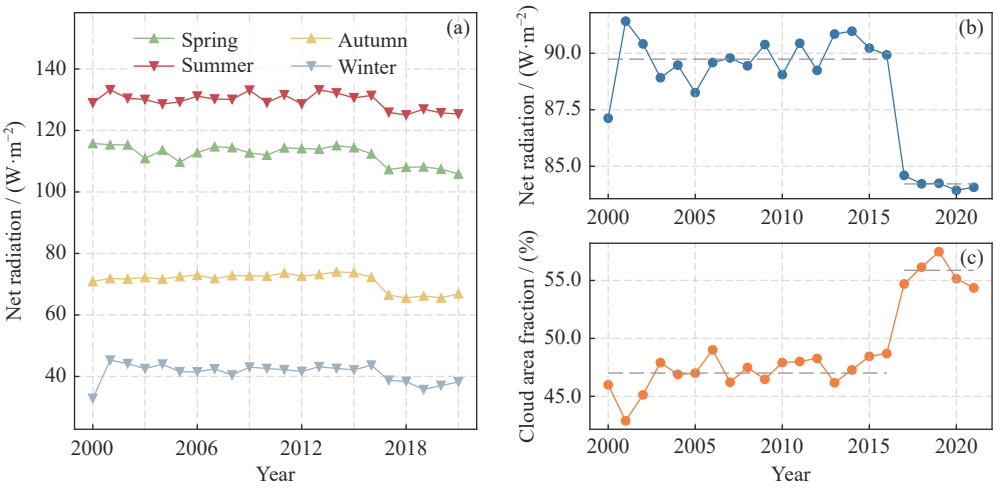


图 6 2000—2021 年青藏高原地区地表净辐射季节趋势（a）、地表净辐射年均变化趋势（b）和云覆盖面积分数变化趋势（c）

Fig. 6 Seasonal trends (a), annual changes (b), and trends in cloud area fraction (c) for surface net radiation in the Qinghai-Tibet Plateau region from 2000 to 2021

表 3 青藏高原地区地表净辐射时空场 EOF 分解前 5 个模态特征值与方差贡献率

Table 3 Characteristic values and variances contribution rate of the first five EOF modes for the spatial-temporal pattern of surface net radiation in the Qinghai-Tibet Plateau region

特征向量	特征根	方差贡献率/(%)	累积方差贡献率/(%)	特征根误差下限	特征根误差上限
1	591207.56	75.55	75.55	539749.55	642665.58
2	59337.21	7.58	83.13	54172.57	64501.85
3	34403.61	4.40	87.53	31409.16	37398.06
4	14341.27	1.83	89.36	13093.02	15589.52
5	11292.01	1.44	90.80	10309.16	12274.85

大的趋势，高值区位于喀喇昆仑山脉、喜马拉雅山脉东南部、巴颜克拉山脉、横断山脉附近，表明这些区域地表净辐射变化大。在图 7(b) 所示的第 1 模态时间系数中，110 个月为正值，154 个月为负值，第一时间系数均在零值上下周期浮动，且呈现准正弦振动，年周期变化明显，这主要是受到太阳高度角的周期变化影响。峰值主要出现在每年夏季的 7 月和 8 月，谷值出现在每年冬季的 2 月和 3 月，恰好与青藏高原夏冬季节气候特征吻合。

第 2 模态特征向量的方差贡献率为 7.58%，也属于青藏高原地区较为典型的地表净辐射表现形式。从图 7(c) 可以看出，这种分布格局大致以喀喇昆仑山脉和喜马拉雅山为高值中心向四周减小，青藏高原中部大范围为正值，而在兴都库什山脉、祁连山脉和喜马拉雅山脉南麓出现负值中心，大体呈现西南–东北反向分布模式。除喜马拉雅山脉外，特征向量值从西南向东北依次减小，反映出青藏高原地区地表净辐射变化也是从西南向东北依次递减。由图 7(d) 分析表明，第 2 模态对应的时间系数也有一定的年周期变化，这可能是地表综合作用的结果。其中，时间系数为负值有 123 个月，地表净辐射位相与图 7(c) 相反，空间分布呈现喀喇昆仑山脉和喜马拉雅山低值、而周围高值的情形，典型时间为 2004 年 8 月。时间系数为正的月份有 141 个月，呈中间高四周低分布，典型时间为 2002 年 12 月。

4 结论

青藏高原高原气候复杂且大气圈、生物圈和水圈等圈层耦合作用，导致其地表净辐射的时空分布和变

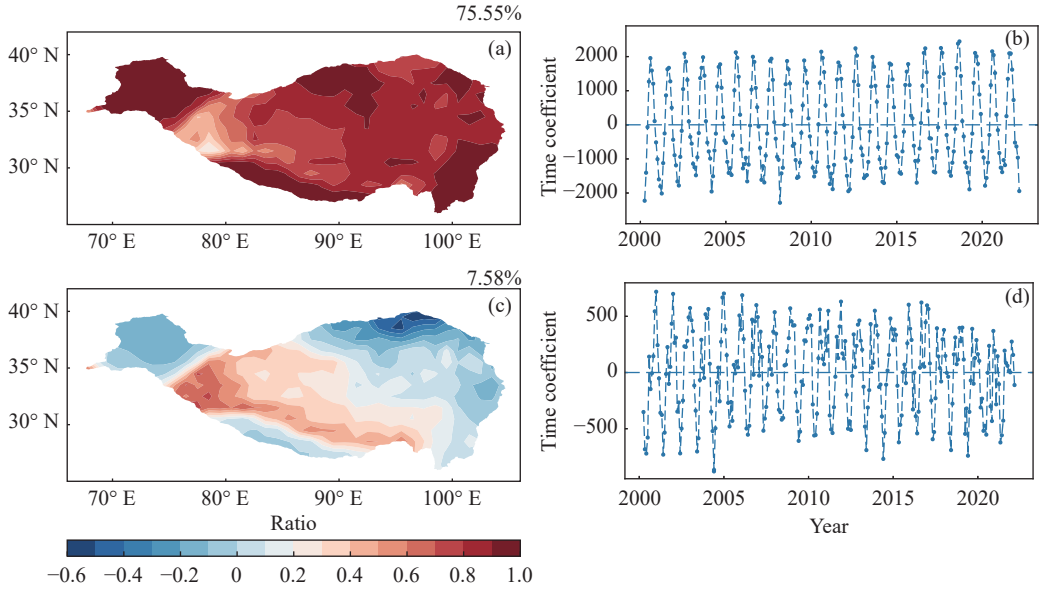


图 7 2000－2021 年青藏高原地区地表净辐射第 1 模态（a）特征向量分布及对应月时间分布（b），第 2 模态（c）特征向量分布及对应月时间分布（d）

Fig. 7 Distribution of the first mode (a) and corresponding monthly time distribution (b) of surface net radiation, distribution of the second mode (c) and corresponding monthly time distribution (d) in the Qinghai-Tibet Plateau region from 2000 to 2021

化复杂多样。基于 2000 年 3 月至 2022 年 2 月共 22 年的 CERES 卫星数据，采用 Theil-Sen Median 趋势分析、Mann-Kendall 检验以及 EOF 分析多种方法，分析 22 年间青藏高原地表辐射能量平衡的时空变化规律，得出结论如下。

（1）青藏高原地表净辐射通量总体呈现南高北低的分布特征，最高值在喜马拉雅山脉和横断山脉一线，最低值在柴达木盆地。其中，青藏高原大部分地区在 2000－2016 年地表净辐射通量明显更强，而 2017－2021 年地表净辐射通量明显降低。

（2）Theil-Sen Median 趋势分析和 Mann-Kendall 检验表明，青藏高原地表净辐射通量整体处于基本不变和不显著减少状态，但是喜马拉雅山脉附近地区的地表净辐射通量显著减少。其他年份地表净辐射通量大体处于平稳状态，2016－2017 年，出现近 6 $W \cdot m^{-2}$ 的突变，这可能是对云覆盖分数增加的响应。

（3）EOF 分解结果表明，青藏高原地表净辐射通量场主要有两种模态。第 1 模态方差贡献率为 75.55%，可以代表地表净辐射通量变化的总体空间特征，地表净辐射通量变化趋势具有高度一致性，青藏高原南部地表净辐射通量波动程度远高于其北部，对应的时间系数显示，年周期变化明显，第一峰值出现在 2018 年 8 月，第一谷值出现在 2001 年 3 月；第 2 模态大体呈现西南–东北反向分布模式，除喜马拉雅山脉外，特征向量值从西南向东北依次减小，其时间系数也有一定的年周期变化，这可能是地表综合作用的结果。

参考文献

[1] GAO Yangzi, HE Honglin, ZHANG Li, *et al*. Spatio-temporal variation characteristics of surface net radiation in China over the past 50 years[J]. *Journal of Geo-Information Science*, 2013, **15**(1): 1-10 (高扬子, 何洪林, 张黎, 等. 近 50 年中国地表净辐射的时空变化特征分析 [J]. 地球信息科学学报, 2013, **15**(1): 1-10)

[2] LETU H, NAKAJIMA T Y, WANG T X, *et al*. A new benchmark for surface radiation products over the East Asia-Pacific region retrieved from the *Himawari-8*/AHI next-generation geostationary satellite[J]. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 2022, **103**(3): E873-E888

[3] LIANG S L, WANG D D, HE T, *et al*. Remote sensing of earth's energy budget: synthesis and review[J]. *International Journal of Digital Earth*, 2019, **12**(7): 737-780

[4] TANG W B, XUE D J, LONG Z Y, *et al*. Near-real-time estimation of 1-km all-weather land surface temperature by integrating satellite passive microwave and thermal infrared observations[J]. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 2022, **19**: 7001305

[5] LIANG H, JIANG B, LIANG S L, *et al*. A global long-

term ocean surface daily/0.05° net radiation product from 1983–2020[J]. *Scientific Data*, 2022, **9**(1): 337

[6] GU Xingyue, MA Yaoming, MA Weiqiang, *et al*. Climatic characteristics of surface radiation flux over the Qinghai-Tibetan Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2018, **37**(6): 1458-1469 (谷星月, 马耀明, 马伟强, 等. 青藏高原地表辐射通量的气候特征分析 [J]. 高原气象, 2018, **37**(6): 1458-1469)

[7] CHEN L, YAN G J, WANG T X, *et al*. Estimation of surface shortwave radiation components under all sky conditions: modeling and sensitivity analysis[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2012, **123**: 457-469

[8] KANG S C, XU Y W, YOU Q L, *et al*. Review of climate and cryospheric change in the Tibetan Plateau[J]. *Environmental Research Letters*, 2010, **5**(1): 015101

[9] ZHANG Mingli, WANG Bin, WANG Dekai, *et al*. The effects of rainfall on the surface radiation of permafrost regions in Qinghai-Tibet Plateau: a case study in Beiluhe area[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2021, **43**(4): 1092-1101 (张明礼, 王斌, 王得楷, 等. 降雨对青藏高原多年冻土区地表辐射的影响——以北麓河地区为例 [J]. 冰川冻土, 2021, **43**(4): 1092-1101)

[10] CAI Hongze, WANG Kaicun. Updating global energy balance based on the latest observations and reanalyses[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2022, **67**(35): 4263-4280 (蔡鸿泽, 王开存. 基于最新观测和大气再分析估计全球能量平衡 [J]. 科学通报, 2022, **67**(35): 4263-4280)

[11] LIN C G, WU H P, OU T H, *et al*. A new perspective on solar dimming over the Tibetan Plateau[J]. *International Journal of Climatology*, 2019, **39**(1): 302-316

[12] WILD M, GILGEN H, ROESCH A, *et al*. From dimming to brightening: decadal changes in solar radiation at Earth's surface[J]. *Science*, 2005, **308**(5723): 847-850

[13] ZHANG Yanwu, FENG Qi, HUANG Jing, *et al*. Ground energy balance and microclimate characteristics in the oasis of lower reaches of Heihe River[J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2012, **28**(2): 191-198 (张艳武, 冯起, 黄静, 等. 黑河下游绿洲地表辐射平衡及小气候特征分析 [J]. 冰川冻土, 2012, **28**(2): 191-198)

[14] CIREN Nima, DANZENG Luobu, XUAN Yuejian, *et al*. Characteristic of seasonal variation of surface radiation balance at Yangbajing in Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Plateau Meteorology*, 2013, **32**(5): 1253-1260 (次仁尼玛, 单增罗布, 宣越健, 等. 青藏高原羊八井地区地表辐射的季节变化特征 [J]. 高原气象, 2013, **32**(5): 1253-1260)

[15] LI Ping, WANG Ge, WANG Shunjiu. Variation characteristics of total radiation and net radiation in Ali area in recent 30 years[J]. *Plateau and Mountain Meteorology Research*, 2022, **42**(4): 110-114 (李平, 王鸽, 王顺久. 阿里地区狮泉河近 30 年总辐射和净辐射的变化特征 [J]. 高原山地气象研究, 2022, **42**(4): 110-114)

[16] ZHAO Wenna, TSERING-NYIMA, WANG Yinan, *et al*. Study on the temporal variation of surface radiation at Yangbajing on the Qinghai-Tibet Plateau[J]. *Plateau Science Research*, 2022, **6**(4): 42-49 (赵文娜, 次仁尼玛, 王一楠, 等. 西藏羊八井地区地表辐射的时间变化特征研究 [J]. 高原科学研究, 2022, **6**(4): 42-49)

[17] MA Qianrong, YOU Qinglong, CAI Miao, *et al*. The cloud variation over China in recent 15 years based on CERES satellite data[J]. *Journal of Arid Meteorology*, 2018, **36**(6): 911-920 (马茜蓉, 游庆龙, 蔡淼, 等. 基于 CERES 卫星资料分析中国近 15 a 云量变化 [J]. 干旱气象, 2018, **36**(6): 911-920)

[18] ZHANG X T, LIANG S L, ZHOU G Q, *et al*. Generating Global Land Surface Satellite incident shortwave radiation and photosynthetically active radiation products from multiple satellite data[J]. *Remote Sensing of Environment*, 2014, **152**: 318-332

[19] SU Hongjun, XU Zhonglin. Temporal and spatial dynamics analysis of vegetation index in Xinjiang from 2000 to 2015[J]. *Hubei Agricultural Sciences*, 2022, **61**(10): 48-55,63 (苏红军, 许仲林. 2000—2015 年新疆植被指数的时空动态分析 [J]. 湖北农业科学, 2022, **61**(10): 48-55,63)

[20] ZHOU Rui, GAO Yuting, SHI Lirong, *et al*. Temporal and spatial characteristics of vegetation change and its driving factors in Minqin region in recent 22 years[J]. *Journal of Anhui Agricultural Sciences*, 2023, **51**(2): 68-74 (周蕊, 高钰婷, 石丽荣, 等. 近 22 年民勤地区植被变化的时空特征及其驱动因素 [J]. 安徽农业科学, 2023, **51**(2): 68-74)

[21] BAMBANG I, SARAVANAN S, REDDY N M, *et al*. An investigation of the changing patterns of rainfall in the Indravathi subbasin utilizing the Mann-Kendall and Sen's slope methods[J]. *IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, 2023, **1173**(1): 012036

[22] GAO H, JIN J X. Analysis of water yield changes from 1981 to 2018 using an improved Mann-Kendall test[J]. *Remote Sensing*, 2022, **14**(9): 2009

[23] MERINO A, SÁNCHEZ J L, GARCÍA-ORTEGA S, *et al*. Hailfalls in southwest Europe: EOF analysis for identifying synoptic pattern and their trends[J]. *Atmospheric Research*, 2019, **215**: 42-56

[24] TIAN X M, TANG C L, WU X, *et al*. The global spatial-temporal distribution and EOF analysis of AOD based on MODIS data during 2003–2021[J]. *Atmospheric Environment*, 2023, **302**: 119722

[25] SUN M D, KIM G, LEI K, *et al*. Evaluation of technology for the analysis and forecasting of precipitation using cyclostationary EOF and regression method[J]. *Atmosphere*, 2022, **13**(3): 500

[26] WENG Duming. Some major features of surface net radiation in the Qinghai-Xizang Plateau[J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology*, 1991, **14**(2): 151-159 (翁笃鸣. 青藏高原地表净辐射若干重要特征研究 [J]. 南京气象学院学报, 1991, **14**(2): 151-159)

[27] MA Yuejie, HUANG Jianping, LIU Yuzhi. Impact of clouds on radiative fluxes in summer over the Tibetan Plateau from Cloudsat data[J]. *Journal of Lanzhou University (Natural Sciences)*, 2011, **47**(5): 48-54 (马越界, 黄建平, 刘玉芝. 利用星载云雷达资料分析夏季青藏高原的云辐射强迫 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 2011, **47**(5): 48-54)