

DOI:10.19322/j.cnki.issn.1006-4710.2018.04.001

基于多源数据集估算缺资料地区地表净辐射及其时空变化特征

张晓龙, 沈冰, 黄领梅, 权全, 莫淑红, 梁晓燕

(西安理工大学 省部共建西北旱区生态水利国家重点实验室, 陕西 西安 710048)

摘要: 本文以黄河源区为例, 利用 ITPCAS 气象要素驱动数据集和 GLASS 地表反照率数据集, 基于 Penman-Monteith 公式估算缺资料地区 1979—2015 年逐日地表净辐射(R_n), 用 GIS 空间分析技术与 Mann-Kendall 趋势分析方法揭示其时间动态特征与空间演变规律。结果表明: 1) 对比 ITPCAS 气象要素驱动数据集和气象站数据估算的 R_n , 其相关系数均在 0.98 以上, 均方根误差处于 1.29~1.77 之间; 2) 黄河源区年和四季 R_n 均呈下降趋势, 每 10 年均降幅为 $-0.067 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$, 秋季降幅最小, 春、冬降幅最大; 黄河源区 R_n 年内呈单峰型, 最大值出现在 5 月 ($14.31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), 最小值出现在 12 月 ($3.34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); 3) 年和各季节 R_n 值及变化趋势的空间分布相似; 年平均 R_n 的大部分地区 (91.6%) 呈下降趋势, 其中冬季 R_n 下降最明显, 秋季 R_n 下降最不明显; 4) 黄河源区 R_n 在 4 000~4 500 m 的区域内最大, 而在 4 500 m 以上最小; 除了秋季 R_n 在 3 500~4 000 m 区域外, 其余季节在所有 DEM 分区中皆呈现下降趋势。

关键词: 缺资料地区; 多源数据集; 地表净辐射; 时空变化; Mann-Kendall 趋势分析; 黄河源区

中图分类号: P467; K903

文献标志码: A

文章编号: 1006-4710(2018)04-0379-09

Estimation of surface net radiation and its temporal and spatial variations in ungauged region based on multi-source data sets

ZHANG Xiaolong, SHEN Bing, HUANG Lingmei,

QUAN Quan, MO Shuhong, LIANG Xiaoyan

(State Key Laboratory of Eco-hydraulics in Northwest Arid Region of China,

Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China)

Abstract: By using ITPCAS Meteorological Forcing Dataset and GLASS surface albedo dataset, Penman-Monteith formula was used to estimate daily surface net radiation (R_n) in ungauged region during 1979—2015, the source region of the Yellow River is taken as a case study. GIS spatial analysis technology and Mann-Kendall trend analysis method are used to reveal regional R_n spatiotemporal dynamic characteristics. The results show that 1) By comparing R_n estimated by ITPCAS Forcing Dataset with R_n estimated by weather station data, the correlation coefficients of all sites are above 0.98, with the values of root mean square error between 1.29 ~ 1.77; 2) Annual/seasonal R_n values decline visibly with a fluctuant process in the source region of the Yellow River, with the changing rate of the annual R_n reaching $0.067 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ every 10 years. The maximum downtrend ($-0.075 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ every 10 years) is in spring and winter, while the minimum downtrend ($-0.039 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ every 10 years) is in autumn. Regional mean monthly R_n has a single peak with the maximum value ($14.31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in May and the minimum value ($3.34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$) in December; 3) The spatial distribution of R_n value and annual/seasonal variation trend is similar. The annual mean R_n in the most areas (91.6%) displays a downward trend. In the seasonal scale, the decline of R_n is most obvious in winter, while in autumn it is least obvious; 4) The maximum values of R_n are in the 4 000~4 500 m area, and the minimum values are in a region of more than 4 500 m. Except the region of 3 500~4 000 m in autumn, the rest areas in all seasons show a downward

收稿日期: 2018-06-14

基金项目: 国家重点研发计划资助项目(2017YFC0403605); 国家自然科学基金资助项目(51509202, 51679185)

作者简介: 张晓龙, 男, 博士生, 研究方向为生态水文学、干旱区水文。E-mail: zhangzhangyanhe@hotmail.com

通讯作者: 沈冰, 男, 博士, 教授, 博导, 研究方向为水文学及水资源演变。E-mail: shenbing@xaut.edu.cn

trend.

Key words: ungauged region; multi-source data sets; surface net radiation; spatiotemporal change; Mann-Kendall trend analysis; source region of the Yellow River

地表净辐射(R_n)是影响陆-气能量交换和再分配过程的重要参数^[1-2],是气候变化的重要驱动力,被广泛应用于气候监测、天气预报和农业气象研究,是当前全球气候变化研究领域的热点之一^[3]。同时, R_n 也是构建各类生态模式的重要参数之一^[4-5],尤其是在生态系统的蒸散过程中起到非常重要的作用^[6]。在全球气候变化的背景下,研究 R_n 时空变化特征,对于了解过去和当前的气候状态以及对未来的气候变化、蒸散发的估算、植物生长发育过程、生态系统生物量的形成与累积等研究具有重要意义。目前获取地表净辐射的方法主要是将地面实测数据按照某种规则进行空间插值,或通过经验统计方法建立基于地面辐射实测数据和气象资料估算地表辐射收支的经验-统计模型,通过反演得到一定范围内地表净辐射^[2, 7-8]。这两种方法虽然在点尺度上估算精度较高,但由于气象站数量有限且分布不均,地表覆被类型复杂,实时气象参数(如气溶胶,云的含量等)难以获取,因此不能满足大范围净辐射估算的需求^[12-13]。遥感反演法应是区域由点及面较佳的技术手段。近年来,MODIS数据、Landsat系列数据等被广泛应用于地表辐射收支的研究中^[9-11]。

我国气象系统仅有50个地表净辐射观测台站,且均建于1993年以后。由于站点少,资料序列短,开展的相应研究也较少。青藏高原生态环境脆弱,被称为气候的“放大器”^[12-13],但常规气象观测台站分布稀少且

极不均匀,为缺资料地区空间范围上净辐射估算带来极大阻碍,远满足不了科研和业务的需求。当前主流遥感反演产品使用地面站点较少,特别是在中国寒区、旱区^[18],数据精度还存在一定误差。利用地面气象站数据对遥感产品进行数据融合得到的再分析常规气象要素的驱动数据集不仅可以满足空间分布的要求,而且在数据精度上也可以大大提高,为进一步研究提供极大的便利。地表反照率决定了太阳辐射能量被地表反射与吸收的比例,是气候系统的重要驱动因子之一^[13]。地表反照率的分布与土地利用类型、植被状况、水分状况、积雪、地形等因素密切相关,在时间和空间上呈现高度异质性。因此,本文以黄河源区为例,利用ITPCAS气象要素驱动数据集和GLASS地表反照率数据集,取用联合国粮农组织(FAO)1998年推荐用于计算参考作物蒸散发Penman-Monteith公式估算缺资料地区长时间序列逐日 R_n ,在再分析数据集估算精度验证的基础上,用GIS空间分析技术与Mann-Kendall趋势分析方法揭示其时间动态特征与空间演变规律,为进一步研究该地区气候变化及陆地生态系统蒸散的影响提供技术支撑和理论依据。

1 研究区概况

研究区为龙羊峡水库以上的黄河源区,位于 $32.2^{\circ}\sim 37.1^{\circ}\text{N}$, $95.9^{\circ}\sim 103.4^{\circ}\text{E}$ 之间,属于青藏高原东部(见图1)。

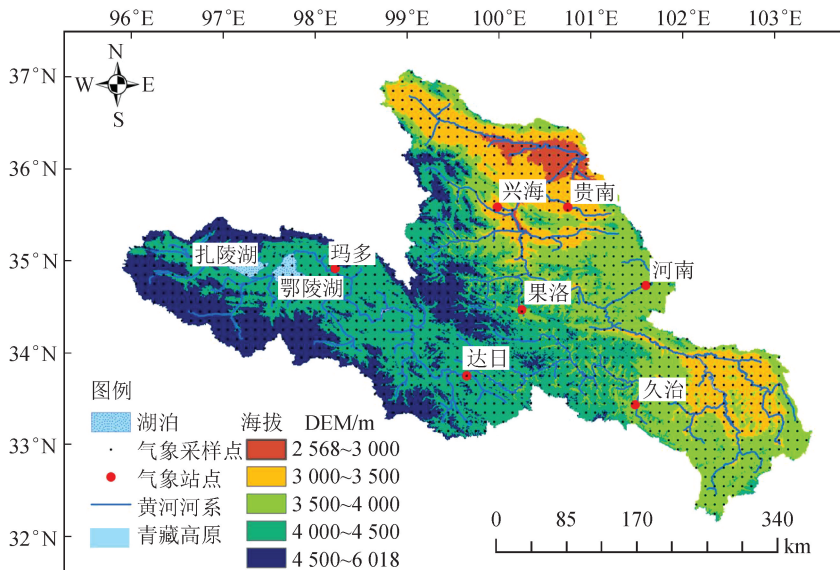


图1 研究区概况及气象站点分布

Fig. 1 General situation of the study area and distribution of meteorological stations

黄河源区总体为西北高, 东南低, 阿尼玛卿山为最高点, 龙羊峡为最低处, 海拔在 2 508~6 253 m 之间, 有冰川、盆地、高山和峡谷等地貌。黄河源区属大陆性高原气候, 干湿交替、冷热分明, 气压低, 温差大, 辐射强, 光热条件较为丰富。受印度洋季风影响, 降水集中在 6~9 月^[5], 年平均降水 234.6~839.2 mm, 空间分布不均^[12]。黄河源区 3/4 的面积分布着高寒植被, 其中高寒草甸和高寒草原面积最大。黄河源区为多年冻土和季节性冻土的过渡区域, 多年冻土分布下界平均气温在 $-2.5^{\circ}\text{C} \sim -3.5^{\circ}\text{C}$ 范围内。由于气候变暖, 黄河源区近年来冻土发生显著退化。

2 数据来源与方法

2.1 数据来源及预处理

再分析气象数据集使用由中国科学院青藏高原研究所开发的 ITPCAS(中国区域高时空分辨率地面气象要素)驱动数据集(<http://westdc.westgis.ac.cn/>)^[13]。该数据集以 GEWEX-SRB 辐射资料、Princeton 再分析资料、TRMM 降水数据以及 GLDAS 数据为背景场, 并融合中国气象观测数据制作而成。气象要素包括降水量、温度、比湿、风速、大气压力、向下短波和向下长波辐射等, 时间分辨率为 3 h, 空间分辨率为 0.1° 。该数据集在黄河源区数据采样点 1 421 个, 可满足黄河源区气象要素空间分布的要求(见图 1)。本研究中所涉及的日尺度参数是通过 3 h 时段参数计算得到。为了分析 R_n 的时空变化特性, 利用 ArcGIS 软件 CUBIC 重采样技术将 0.1° 数据集生成空间分辨率为 1 km 的数据集。气象站数据源自国家气象科学数据共享服务平台(<http://data.cma.cn/>)。黄河源区再分析数据集数据采样点和气象台站点分布见图 1。

地表反照率使用全球陆表参量 GLASS 数据产品, 取值范围 $0 \sim 1$, 被用于计算短波净辐射, 来源与北京师范大学(<http://glass-product.bnu.edu.cn/>)。该产品 2000—2012 年反照率数据是基于 MODIS 数据利用 AB(Angular Bin)算法开发的, 其空间分辨率为 1 km, 时间分辨率为 8 天。Liu 等利用地面实测数据和 MODIS 地表反照率数据 MOD43 对 GLASS 反照率数据产品进行对比验证, 结果显示两者具有很好的一致性, 均方根误差小于 0.05 ^[14], 所以该数据集可以直接使用。因数据源的时间限制, 本研究计算得到 2000—2012 年白天地表反照率每一日的多年平均值, 然后线性插值得到年内每天的反照率数据集。

DEM 数据源自地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)中 90 m 分辨率 SRTM 产品。为了确保数据空间尺度的一致性, 将 90 m DEM 数据利用 ArcGIS 软件重采样生成 1 km 分辨率的数据。

2.2 地表净辐射估算方法

本研究采用 FAO 推荐的标准方法^[15], 由净短波辐射 R_{ns} 和净长波辐射 R_{nl} 之差得到 $R_n(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$:

$$R_n = R_{ns} - R_{nl} \quad (1)$$

$$R_{ns} = (1 - \alpha)R_s \quad (2)$$

$$R_{nl} = \sigma \left[\frac{T_{\max,k}^4 + T_{\min,k}^4}{2} \right] (0.34 - 0.14 \sqrt{e_a}) \cdot (1.35 \frac{R_s}{R_{so}} - 0.35) \quad (3)$$

$$R_{so} = (0.75 + 2z \times 10^{-5})R_a \quad (4)$$

$$R_s = (a_s + b_s \frac{n}{N})R_a \quad (5)$$

$$R_a = \frac{1440}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\varphi) \sin(\delta) + \cos(\varphi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \quad (6)$$

式中: α 为地表反照率; R_s 和 R_{so} 为向下短波辐射和净空向下短波辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); R_a 为地外辐射 ($\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$), n 为日照时数, N 为可照时数, z 为海拔高度 (m); $T_{\max,k}$ 和 $T_{\min,k}$ 分别为日最大、最小绝对温度 (K); σ 为 Stefan-Boltzman 常数 ($4.903 \times 10^{-9} \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$); e_a 为实际水汽压 (kPa); $a_s = 0.25$, $a_s + b_s = 0.75$; G_{sc} 为日辐射常数 ($0.082 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{min}^{-1}$), d_r 为日地距离, ω_s 为日落时角, φ 为太阳时角, δ 为太阳赤纬角。

需要指出的是, 基于中国区域高时空分辨率地面气象要素驱动数据集估算 R_{n_ITP} 时, R_s 直接采用驱动数据集数据。而基于气象台数据估算 R_{n_m} 时, R_s 采用式(5)计算得到。

2.3 地表净辐射时空变化分析方法

采用 Mann-Kendall 趋势分析方法对多站点和区域平均长时间序列的 R_n 进行时间趋势变化检验和突变分析。基于秩的 Mann-Kendall 趋势分析方法是一种非参数统计检验法, 与传统参数方法相比, 样本可不遵从特定分布, 亦不受个别异常值干扰, 可较客观地反映样本序列变化趋势, 该方法被广泛应用于序列突变分析和趋势检验。

利用线性回归分析可得到每个栅格的 R_n 在一定时间序列的变化趋势和强度^[6]。本文通过 IDL 程序得到每个栅格多年变化趋势 b , 进而得到黄河源区 R_n 年际变化率空间分布图。计算公式为:

$$b = \frac{n \times \sum_{i=1}^n (i \times x_i) - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n x_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (7)$$

式中: b 为变化趋势,如果 $b < 0$ 则表示减少趋势,反之 $b > 0$ 则表示增加趋势; n 为时间长度; i 为年序号; x_i 为第 i 年的栅格值。

3 结果与分析

3.1 再分析数据集精度检验

黄河源区处于高寒区域,气象站点稀少,且分布极不均匀。所以使用气象站点进行空间插值的结果并不能较为真实地反应研究区实际情况。

本研究使用 ITPCAS 驱动数据集估算黄河源区 R_n 的时空变化。将再分析数据集代入式(1)~(6)得到的1979—2015年逐日 R_{n_ITP} 与气象站数据代入式(1)~(6)得到的对应的逐日 R_{n_m} 。

为了定量评价 R_n 的估算结果精度,将7个典型气象站的气象数据估算的 R_{n_m} 与对应的1 km气象要素数据集计算的 R_{n_ITP} 进行对比分析, R_{n_ITP} 与 R_{n_m} 的散点图见图2。虚线为散点的拟合直线,对角线为1:1等值线。

从图2可以看出整体上 R_{n_ITP} 与 R_{n_m} 的相关系数 R 为0.98,其显著性在 $P < 0.01$ 范围内显著,表明散点分布有一定的稳定性,二者有显著的相关性。大部分的点分布在1:1等值线上方,表明 R_{n_ITP} 较 R_{n_m} 略微偏大。

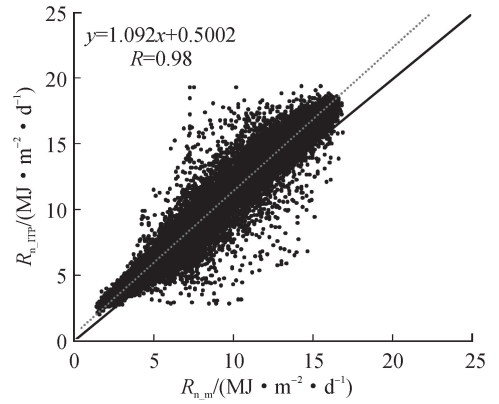


图2 R_{n_ITP} 与 R_{n_m} 的散点图

Fig. 2 Scatter plots of R_{n_ITP} values and R_{n_m} values

对逐日 R_n 的估算精度进行检验的评价指标为:均方根误差(RMSE)、相关系数(R)和误差,在各站点上计算结果见表1,其中区站号为国家气象站统一编号, N 为样本数。从表1中可知, R_{n_ITP} 与 R_{n_m} 的相关系数在0.98以上,且均通过显著性检验($P < 0.01$),各站点RMSE在1.29~1.77之间,值得注意的是, R_{n_ITP} 均比 R_{n_m} 偏大12%~19%,主要原因可能是在气象数据估算 R_s 时外辐射到达地表的比例参数选用默认值($a_s = 0.25$ 和 $b_s = 0.50$)导致ITPCAS驱动数据集中 R_s 比气象站基于日照时数计算的 R_s 偏高,也可能是气象采样点和气象站并不完全重合,存在着坡度、海拔和坡向等差异。综上,通过该数据集估算的 R_n 可以较好的反映区域变化规律,该再分析数据集在黄河源区有较好的适用性。

表1 再分析数据集估算 R_n 的结果验证

Tab. 1 Accuracy assessment result of R_n estimated by ITPCAS forcing data

区站号	站名	$R_{n_m}/$ (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)	$R_{n_ITP}/$ (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)	误差/ (MJ · m ⁻² · d ⁻¹)	RMSE	R	N
52 943	兴海	7.99	9.08	1.09	1.35	0.99	13 514
52 955	贵南	8.56	9.79	1.23	1.60	0.98	13 514
56 033	玛多	8.52	9.83	1.32	1.65	0.98	13 514
56 043	果洛	8.57	10.02	1.46	1.70	0.99	13 514
56 046	达日	8.21	9.23	1.02	1.29	0.99	13 514
56 065	河南	8.65	9.86	1.21	1.52	0.98	13 514
56 067	久治	8.27	8.84	1.57	1.77	0.99	13 514

3.2 黄河源区地表净辐射的变化特征

3.2.1 地表净辐射时间变化特征

精度检验后将 ITPCAS 驱动数据集和 GLASS 地表反照率数据集代入公式,得到1979—2015年黄河源区逐日 R_n 。对逐日数据进行处理,得到各

月、季、年 R_n 数据。季节采用国内常用的气象季节划分法,即上年12月至当年2月为冬季、3月至5月为春季、6月至8月为秋季。各月 R_n 为月内每日平均得到,各季节 R_n 为相应月份 R_n 的平均值,年平均 R_n 为逐月数据平均得到。

图3为1979—2015年黄河源区年、春季、夏季、秋季、冬季平均 R_n 变化曲线。1979—2015年黄河源区年、春季、夏季、秋季、冬季多年平均 R_n 分别为9.63、12.11、13.70、7.68和5.02 $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;其最大值分别为10.00(1997年)、12.80(1980年)、14.59(1994年)、8.07(1997年)和5.38(1983年) $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;最小值分别为9.12(2009年)、11.42(1989年)、12.63(2009年)、7.24(1988年)和4.76(2009年) $\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

利用Mann-Kendall趋势分析方法得到黄河源区年、四季 R_n 的变化趋势和统计值,见表2。从表2可知,黄河源区年、四季 R_n 均呈下降趋势,每10年变化幅度为 $-0.067 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;春、冬季变化幅度最大,每10年变化幅度为 $-0.075 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;秋季变化幅度最小,每10年变化幅度为 $-0.039 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$;夏、秋季没有通过显著性检验。通过Mann-Kendall非参数检验分析研究区年、春季、夏季、秋季、冬季 R_n 突变点,得到结果:年 R_n 和冬季 R_n 序列存在突变点,分别为2004年和2003年左右;而其他季节 R_n 突变点不明显。这可能与当地气候变化和人类活动有关。2000年以后黄河源区呈现“变暖变湿”的趋势,云量上升,降雨/雪增加,温度也增加,植被NDVI也呈上升趋势。另外三江源自然保护区于2000年成立,实施了一系列的生态保护与建设工程,青海省也实施了人工增雨、治理草原鼠害、退耕/牧还草和生态移民等“综合性”工程(2004年)。这些都可能是年 R_n 和冬季 R_n 序列在2004年

和2003年左右存在突变的原因。

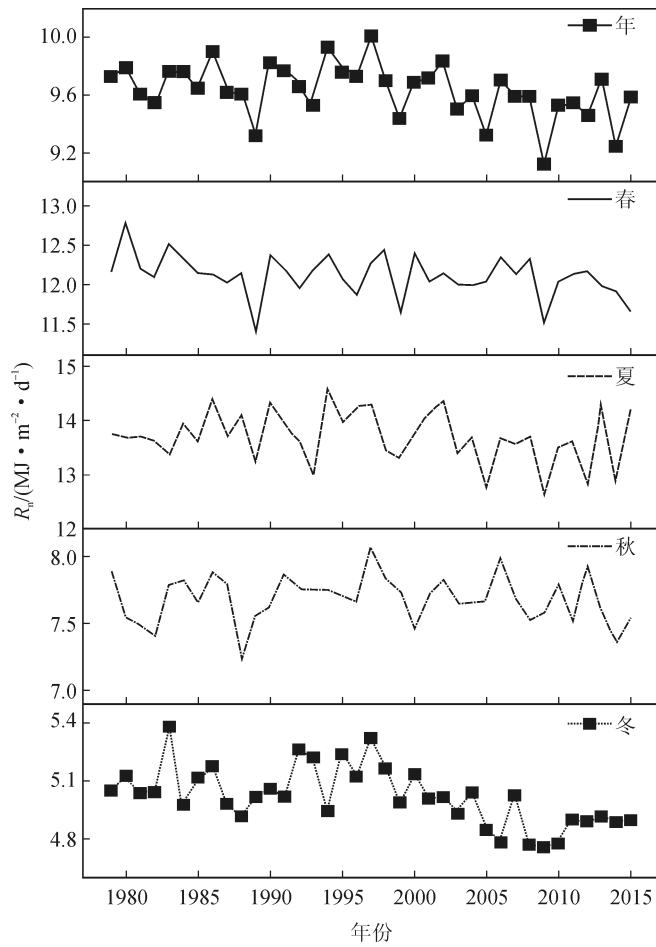


图3 1979—2015年研究区年、春季、夏季、秋季、冬季平均 R_n 变化曲线

Fig. 3 Curves of annual and seasonal mean R_n during 1979—2015 in study area

表2 1979—2015年研究区年、春季、夏季、秋季、冬季 R_n 变化趋势统计表

Tab. 2 Statistics of trends of annual and seasonal mean R_n during 1979—2015 in study area

时间序列	起始年份	终止年份	样本数量	Test Z	显著性	每10年变化幅度/ $(\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$
年 R_n	1979	2015	37	-2.68	**	-0.067
春季 R_n	1979	2015	37	-2.31	*	-0.075
夏季 R_n	1979	2015	37	-1.14		-0.074
秋季 R_n	1979	2015	37	-1.03		-0.039
冬季 R_n	1979	2015	37	-3.60	***	-0.075

注:*** 通过显著性水平为0.001的检验; ** 通过显著性水平为0.01的检验; * 通过显著性水平为0.05的检验。

图4为黄河源区内各月平均 R_n 的变化趋势,可知,区域平均 R_n 在年内呈单峰型,1~4月上升迅速,5月达到最大值($14.31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),9月份以后 R_n 开始快速下降,12月份最小($3.34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。通过最大、最小值误差线可知,1979—2015年 R_n 变化幅度夏季大于冬季,其中7月份 R_n 变化幅度最大,变化范围为 $11.79 \sim 15.86 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$ 。

3.2.2 地表净辐射空间变化特征

对1979—2015年黄河源区逐栅格计算得到区域上年、春、夏、秋、冬季 R_n 和其变化幅度的空间分布及分类面积统计,结果见图5。

从图中可知,年和各季节 R_n 的空间分布相似,即不同季节对 R_n 的空间分布影响不大,最大值分布在扎陵、鄂陵湖及龙羊峡等大面积水域附近,最小值

分布在中部的阿尼玛卿山附近和共和盆地附近。年和各季节 R_n 的变化趋势的空间分布也相似,研究区 R_n 以下降趋势为主,主要分布在研究区西部山区、龙羊峡南部及共和盆地附近。研究区 R_n 上升趋势主要分布在中部的阿尼玛卿山附近和研究区东部的零星区域,年、春、夏、秋、冬季 R_n 上升趋势分别占流域的 8.4%、15.8%、4.6%、44.1% 和 0.0%。

3.2.3 海拔对地表净辐射的影响

R_n 的空间分布与海拔分布呈现一定的统计规律。将 DEM 数据重采样到 1 km 栅格,然后将该 DEM 分成 5 类对多年平均的年、春、夏、秋、冬季 R_n 和其变化比例的进行统计分析,见表 3。从表 3 中可知, R_n 在 4 000~4 500 m 的区域内最大,而在 4 500 m 以上最小,这是因为 4 500 m 以上区域存在积雪和冰川,地表反照率高,从而 R_n 较小。

表 3 基于 DEM 分类的年、春、夏、秋、冬季 R_n 和其变化幅度的统计结果

Tab. 3 Statistics of annual and seasonal mean R_n and its variation based on DEM classification

DEM 分类	面积比例	$R_n / (\text{MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1})$					每 10 年 R_n 变化比例/%				
		年	春季	夏季	秋季	冬季	年	春季	夏季	秋季	冬季
3 000 m 以下	2.6%	9.36	11.82	13.70	7.34	4.59	-0.66	-0.21	-0.66	-0.52	-2.01
3 000~3 500 m	16.0%	9.39	11.95	13.29	7.47	4.85	-0.78	-0.67	-0.79	-0.31	-1.72
3 500~4 000 m	26.1%	9.73	12.37	13.30	7.88	5.36	-0.57	-0.68	-0.61	0.12	-1.27
4 000~4 500 m	37.4%	9.82	12.32	13.92	7.96	5.07	-0.79	-0.80	-0.84	-0.13	-1.64
4 500 m 以上	17.9%	0.92	1.13	1.40	0.70	0.46	-0.96	-0.83	-1.07	-0.31	-1.84

4 讨论

R_n 的时空变化改变了区域地表天气和气候系统的多样性、地表蒸散的速率及不同区域生态系统的结构和功能。刘新安等^[1]对几种推算地表净辐射的方法进行了评价;陈征等^[3]、叶晶等^[16]利用遥感资料推算了个别地区的地表净辐射,高扬子等^[2]计算了全国 699 个站点的地表净辐射,并分析了各分量的空间分布特征,对中国地表净辐射做了较为系统的分析。

有研究表明,1980 年以来全球 R_n 具有普遍的下陷趋势^[17],国内近 50 年来站点平均 R_n 在年、季节均呈现较明显的下降趋势,每 10 年均降幅为 0.74 W/m^2 ($0.064 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)^[2],本研究得到与此结论一致。

R_n 的变化幅度中除了秋季在 3 500~4 000 m 区域内呈 0.12% 的上升趋势外,其余皆呈现下降趋势,年、春季和夏季 R_n 下降幅度最明显的区域为 4 500 m 以上区域,秋季和冬季下降幅度最明显的区域为 3 000 m 以下区域。

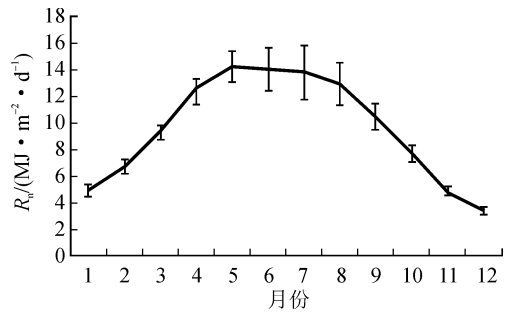


图 4 研究区 R_n 年内变化

Fig. 4 Changes of monthly mean R_n in study area (The bars indicate the maximum and minimum monthly mean values)

影响特定区域 R_n 时空变化特征的因素主要有天文辐射、云、气溶胶、温度、土壤湿度和土壤植被等^[2]。

有研究表明,云量不是造成中国区域短波辐射下降的主要因素,大气中持续增多的气溶胶是主导因素^[18]。大气气溶胶主要来自于化石燃料的燃烧、工业生产等人为活动及火山爆发等自然现象。

自上世纪 80 年代以来,随着经济快速发展,化石燃料的大量燃烧造成大气气溶胶的快速增加,这可能是区域乃至全球 R_n 持续下降的主要原因。

有研究表明,青藏高原积雪变化具有确定的长期增加的趋势^[19],从而导致的青藏高原冬季净辐射的显著降低,另外近年来由于环境污染和气候变化等原因导致冬季的雾霾天气偏低,这也可能造成冬季 R_n 显著下降的原因之一。

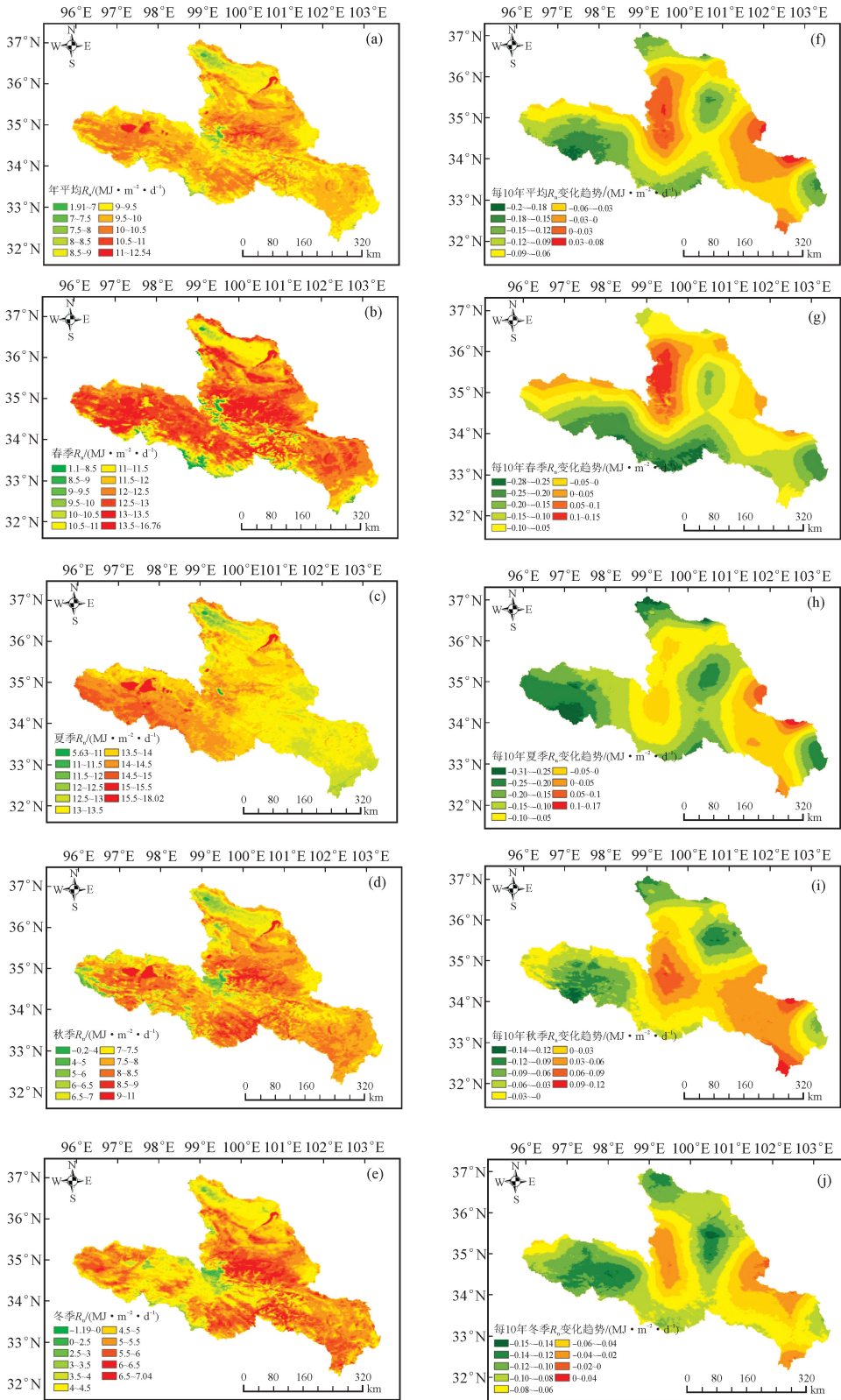


图5 1979—2015年研究区年和四季平均 R_n 以及对应的每10年 R_n 变化幅度的空间分布

Fig. 5 Distribution of mean R_n values and its change rates every 10 years during 1979—2015 in study area

5 结 论

本文以黄河源区为例,利用 ITPCAS 气象要素驱动数据集和 GLASS 地表反照率数据集,基于 FAO1998 年推荐的 Penman-Monteith 公式估算缺资料地区长时间序列逐日 R_n ,在再分析数据集估算精度验证的基础上,用 GIS 空间分析技术与 Mann-Kendall 趋势分析方法揭示其时间动态特征与空间演变规律。本文得到以下主要结论。

1) 各站点 $R_{n,ITPCAS}$ 与 $R_{n,m}$ 的相关系数均在 0.98 以上,且均通过显著性检验 ($P < 0.01$),各站点 RMSE 在 1.29~1.77 之间,表明 ITPCAS 气象要素驱动数据集在黄河源区有较好的适用性,通过该数据集估算的 R_n 可以较好地反映区域变化规律,该数据集可用于中国西北高寒山区缺资料地区。

2) 在 1979—2015 年期间年、春、夏、秋、冬季区域平均 R_n 的每 10 年下降幅度分别为 -0.067 、 -0.075 、 -0.074 、 -0.039 和 $-0.075 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$,其中夏、秋季 R_n 趋势没有通过显著性检验;年 R_n 的变化趋势在 2004 年左右存在突变点,冬季 R_n 的变化趋势在 2003 年左右存在突变点,其他季节突变点不明显;区域平均 R_n 在年内呈单峰型,1~4 月上升迅速,5 月达到最大值($14.31 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$),9 月份以后 R_n 开始快速下降,12 月份最小($3.34 \text{ MJ} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{d}^{-1}$)。

3) 年和各季节 R_n 值及变化趋势的空间分布相似;年和各季节 R_n 值最大值分布在扎陵、鄂陵湖及龙羊峡等大面积水域附近,最小值分布在中部的阿尼玛卿山附近和共和盆地附近;研究区 91.6% 的面积的平均 R_n 呈下降趋势,在季节尺度中,冬季 R_n 下降最明显,几乎 100% 的区域处于下降趋势之中;秋季 R_n 下降最不明显(约 55.9%)。

4) 地形对 R_n 的空间分布产生一定的影响, R_n 在 4 000~4 500 m 的区域内最大,而在 4 500 m 以上最小; R_n 的变化幅度中除了秋季在 3 500~4 000 m 区域内呈 0.12% 的上升趋势外,其余皆呈现下降趋势;年、春季和夏季 R_n 下降幅度最明显的区域为 4 500 m 以上区域,秋季和冬季下降幅度最明显的区域为 3 000 m 以下区域。

本文对长时间序列的逐日逐栅格 R_n 进行计算,并进行时空趋势变化分析,为无资料地区今后开展地表辐射研究、气候变化预测、生态系统蒸散发过程和机理研究具有重要意义。由于缺少实测的 R_n 观测数据,在计算精度上存在一定的不确定性。另外本文未定量分析造成黄河源区 R_n 下降的主要驱动因子, R_n 的影响过程与机理需在今后研究工作中进

一步探讨。

参考文献:

- [1] 刘新安,于贵瑞,何洪林,等. 中国地表净辐射推算方法的研究 [J]. 自然资源学报, 2006, 21(1): 139-145.
LIU Xin'an, YU Guirui, HE Honglin, et al. Research on the calculating of surface net radiation in China [J]. Journal of Natural Resources, 2006, 21(1): 139-145.
- [2] 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.
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.
- [3] 陈征,胡德勇,蒋卫国,等. 基于 GLASS 数据估算中国地表净辐射及其空间分布分析 [J]. 地理研究, 2016, 35(1): 25-36.
CHEN Zheng, HU Deyong, JIANG Weiguo, et al. Land surface radiation budget parameterization and spatial analysis over China using GLASS data [J]. Geographical Research, 2016, 35(1), 25-36.
- [4] ALADOS I, FOYO-MORENO I, OLMO F J, et al. Relationship between net radiation and solar radiation for semi-arid shrub-land [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2003, 116(3/4): 221-227.
- [5] WANG Kaicun, LIANG Shunlin. An improved method for estimating global evapotranspiration based on satellite determination of surface net radiation, vegetation index, temperature, and soil moisture [J]. Journal of Hydrometeorology, 2008, 9(4): 712-727.
- [6] LLASAT M C, SNYDER R I. Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 1998, 91(3/4): 209-221.
- [7] 武荣盛,马耀明. 青藏高原不同地区辐射特征对比分析 [J]. 高原气象, 2010, 29(2): 251-259.
WU Rongsheng, MA Yaoming. Comparative analyses on radiation characteristics in different areas over the Tibetan Plateau [J]. Plateau Meteorology, 2010, 29(2): 251-259.
- [8] OZGOREN M, BILGILI M, SAHIN B. Estimation of global solar radiation using ANN over Turkey [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(5): 5043-5051.
- [9] HOU Jiangtao, JIA Gensuo, ZHAO Tianbao, et al. Satellite-based estimation of daily average net radiation under clear-sky conditions [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2014, 31(3): 705-720.
- [10] FAUSTO M A, MACHADO N G, NOGUEIRA J DE

- S, et al. Net radiation estimated by remote sensing in Cerrado areas in the Upper Paraguay River Basin [J]. *Journal of Applied Remote Sensing*, 2014, 8 (1): 083541.
- [11] BISHT G, Bras R L. Estimation of net radiation from the MODIS data under all sky conditions Southern Great Plains case study [J]. *Remote Sensing of Environment*, 2010, 114(7): 1522-1534.
- [12] 蓝永超, 鲁承阳, 喇承芳, 等. 黄河源区气候向暖湿转变的观测事实及其水文响应 [J]. *冰川冻土*, 2013, 35(4): 920-928.
- LAN Yongchao, LU Chengyang, LA Chengfang, et al. The fact of climate shift to warm-humid in the source regions of the Yellow River and its hydrologic response [J]. *Journal of Glaciology and Geocryology*, 2013, 35(4): 920-928.
- [13] ZHANG Xiaotong, LIANG Shunlin, WANG Kai-chun, et al. Analysis of global land surface shortwave broadband albedo from multiple data sources [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 2010, 3(3): 296-305.
- [14] LIU Qiang, WANG Lizhao, QU Ying, et al. Preliminary evaluation of the long-term GLASS albedo product [J]. *International Journal of Digital Earth*, 2013, 6(S1): 69-95.
- [15] ALLEN R G, PEREIRA L S, RAES D, et al. Crop evapotranspiration-guidelines for computing crop water requirements [M]. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, 1998, 300, 6541.
- [16] 叶晶, 刘辉志, 李万彪, 等. 利用 MODIS 数据直接估算晴空区干旱与半干旱地表净辐射通量 [J]. *北京大学学报(自然科学版)*, 2010, 46(6): 942-950.
- YE Jing, LIU Huizhi, LI Wanbiao, et al. Estimation of the net radiation over arid and semiarid areas only using MODIS data for clear sky days [J]. *Acta Scientiarum Naturalium Universitatis Pekinensis*, 2010, 46 (6): 942-950.
- [17] JIMENEZ-MUNOZ J C, SOBRINO J A, MATTAR C. Recent trends in solar energy and net radiation at global scale [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 228(1): 59-65.
- [18] LIANG F, XIA X. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961-2000 [J]. *Annales Geophysicae*, 2005, 23 (7): 2425-2432.
- [19] 李培基. 青藏高原积雪对全球变暖的响应 [J]. *地理学报*, 1996, 51(3): 260-265.
- LI Peiji. Response of Tibetan snow cover to global warming [J]. *Acta Geographica Sinica*, 1996, 51(3): 260-265.

(责任编辑 王绪迪)