

# 近50年中国地表净辐射的时空变化特征分析

高扬<sup>1,2</sup>, 何洪林<sup>2</sup>, 张黎<sup>2\*</sup>, 路倩倩<sup>2,3</sup>, 于贵瑞<sup>2</sup>, 张祖陆<sup>1</sup>

(1. 山东师范大学人口·资源与环境学院, 济南 250014;

2. 中国科学院地理科学与资源研究所 生态系统网络观测与模拟重点实验室, 北京 100101;

3. 中国科学院大学, 北京 100049)

**摘要:** 基于GIS空间分析技术与Mann-Kendall趋势分析方法, 对中国陆地区域699个气象站点1961-2010年逐年、季平均地表净辐射进行时空变化特征分析, 结果表明: (1) 参数拟合后的FAO Penman修正式对模拟站点逐日地表净辐射的总体精度较高, 均方根误差为 $27.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ , 相关系数为0.85, 平均相对误差为0.13; (2) 全国近50年站点平均地表净辐射在年、季均呈现出较明显的下降过程, 年均降幅为 $0.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ , 不同季节的下降幅度存在差异, 夏季降幅最大; (3) 逐站点分析显示全国大部分站点(59.8%)年均地表净辐射呈显著下降趋势(0.05), 东部趋势变化比西部明显, 夏季在地表净辐射年际变化中的贡献最大, 华北、华中、华南地区的站点在春夏秋冬均呈显著下降趋势。

**关键词:** 中国; 地表净辐射; 时空变化特征; Mann-Kendall趋势分析

**DOI:** 10.3724/SP.J.1047.2013.00001

## 1 引言

地表净辐射是地表通过短波、长波辐射过程得到的净能量, 它控制着进入大气的感热能和潜热能, 是驱动大气运动的主要能量来源, 在地气系统的相互作用中起着关键作用。同时, 地表净辐射也是构建各类生态模式的重要参数之一<sup>[1-2]</sup>, 尤其是在生态系统的蒸散过程中起到非常重要的作用<sup>[3]</sup>。在全球气候变化的背景下, 研究地表净辐射时空变化特征, 对于气候变化预测<sup>[4]</sup>、蒸散的估算、植物生长发育过程、生态系统生物量的形成与累积等<sup>[5]</sup>研究具有重要意义。

已有研究表明, 1980年以来全球地表净辐射具有普遍的下降趋势<sup>[6]</sup>, 地表净辐射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, 由于中国的气候类型及生态系统类型复杂多样, 研究中国区域地表净辐射的空间变异特征及随时间的变化速率, 对区域内植物生长、气候变暖及人类活动影响

等具有重要意义。由于我国地表净辐射观测台站数目较少、资料序列短, 开展的相应研究也较少, 以往的研究主要集中在地表净辐射计算方法的理论探讨, 以及利用遥感方法推算个别地区、短时间序列的地表净辐射, 对地表净辐射的时空变化规律的研究较缺乏。翁笃鸣等<sup>[7]</sup>、王可丽等<sup>[8]</sup>对利用总辐射及大气顶净辐射推算地表净辐射的方法做了探讨, 刘新安等<sup>[9]</sup>、任鸿瑞等<sup>[10]</sup>对几种推算地表净辐射的方法进行了评价; 杜建飞等<sup>[11]</sup>、马耀明等<sup>[12]</sup>、叶晶等<sup>[13]</sup>、张杰等<sup>[14]</sup>利用遥感资料推算了个别地区的地表净辐射, 翁笃鸣等<sup>[15]</sup>计算了全国223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。但这些研究都是个别站点或地区的短时间序列研究, 还未有针对中国地表净辐射时空变化特征的分析。随着地表净辐射计算方法的不断改进、地表净辐射观测数据的不断积累、GIS空间分析技术的发展与广泛应用, 为地表净辐射时空变化特征分析提供了坚实的基础。

**收稿日期:** 2012-10-15; **修回日期:** 2012-11-22.

**基金项目:** 中国科学院战略性先导科技专项(XDA05050600); 国家科技部环保公益性行业科研专项(gyh5031103)。

**作者简介:** 高扬(1987-), 女, 山东莱阳人, 硕士研究生, 研究方向为生态遥感。E-mail: gy250013@163.com

**\* 通讯作者:** 张黎(1982-), 女, 博士, 助理研究员, 现从事陆地生态系统碳氮循环模拟及模型数据融合研究。

E-mail: li.zhang@igsnnr.ac.cn

本文利用全国气象站地表净辐射观测数据及其他气象数据,在对模拟逐日地表净辐射的 FAO Penman 修正式进行参数拟合及模型精度验证的基础上,通过气候学计算生成全国范围各站点长时间序列的地表净辐射数据,利用 GIS 空间分析技术与 Mann-Kendall 趋势分析方法,对地表净辐射进行时空变化特征分析,揭示地表净辐射的时间动态特征与空间演变规律,进一步分析地表净辐射的变化为我国气候变化及陆地生态系统蒸散的影响奠定基础。

## 2 数据与方法

利用全国 53 个气象辐射站点 1993–2010 年逐日地表净辐射数据拟合 FAO Penman 修正式的经验参数,对参数拟合后的模型精度进行验证,将模型运用至全国 699 个气象站点,利用各站点 1961–2010 年逐日日照时数、平均气温、平均水汽压等实测数据模拟得到各站点逐日地表净辐射,对逐日数据进行处理,得到各站点年、季地表净辐射数据。

### 2.1 研究数据

本文使用的基础数据包括中国气象局提供的全国 53 个站点 1993–2010 年逐日地表净辐射数据和全国 699 个站点 1961–2010 年逐日日照时数、平均气温、平均水汽压数据,53 个站点空间分布图(如图 1 所示)。

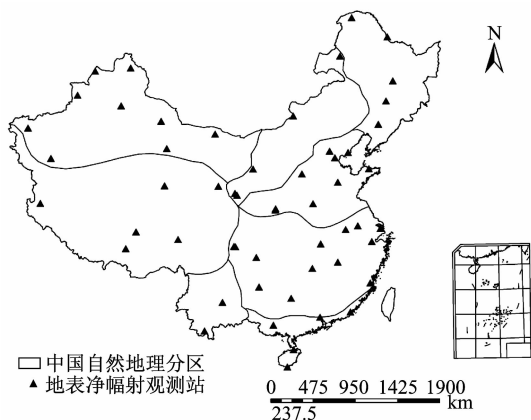


图 1 地表净辐射观测站点空间分布图

Fig. 1 The spatial distribution of surface net radiation observation sites

在拟合参数之前,参考 Feng(2004)<sup>[16]</sup>对日照时数、平均气温、平均水汽压逐日数据进行了严格

的质量控制,保证了输入数据的精度。逐日数据异常值的具体处理方法为:对数据进行极值检查,逐日平均气温值必须介于 $-89.4^{\circ}\text{C}$ 和 $93.9^{\circ}\text{C}$ 之间,对于不满足条件的平均气温数据按线性插补的原则进行插值处理;逐日日照时数必须介于 0 和最大日照时数之间,对于不满足条件的日照时数数据也按照线性插补的原则进行插值处理,最大日照时数的计算公式为:

$$H = \frac{24}{\pi} \times \cos^{-1}(-\tan\varphi \tan\delta) \quad 0 \leq H \leq 24 \quad (1)$$

其中, $H$ 为该站点该天的最大可能日照时数, $\delta$ 为该天太阳入射角, $\delta=0.409\sin(0.0172J-1.39)$ , $J$ 为儒略日, $\varphi$ 为站点纬度。

### 2.2 地表净辐射计算方法

目前计算地表净辐射的方法主要分为三类:一种是利用辐射传输模型分项计算地表辐射平衡方程的各分量,包括下行短波辐射、上行短波辐射、下行长波辐射、上行长波辐射;另一种是利用地表净辐射与常规气象要素之间的相互关系,建立根据常规气象资料估算地表净辐射的经验方法;还有一种是随着卫星观测技术的提高,逐渐发展了利用卫星资料估算地表净辐射的方法<sup>[17]</sup>。

本文计算站点逐日地表净辐射所用模型取自参考作物蒸散量的计算方法——FAO Penman 修正式,刘新安(2006)在中国地表净辐射推算方法的对比研究中指出,FAO Penman 修正式是一种计算地表净辐射精度较高的方法。彭曼公式被公认为是目前世界上应用最普遍、精度最高的公式之一<sup>[18–21]</sup>,由于彭曼公式中经验系数的差别,因此存在各种彭曼修正式<sup>[22–23]</sup>,联合国粮食及农业组织(FAO)在 1979 年推荐的彭曼公式——FAO Penman 修正式在世界范围内应用广泛<sup>[24]</sup>。FAO Penman 修正式包括辐射项和动力项两部分,其中,辐射项中的重要部分即为地表净辐射,修正式中地表净辐射的计算模型如下:

$$R_n = 0.75Ra(a_s + b_s \frac{n}{N}) - \sigma T_k^4 (0.56 - 0.079 \sqrt{e_a})(0.1 + 0.9 \frac{n}{N}) \quad (2)$$

其中, $R_n$ 为地表净辐射( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), $Ra$ 为天文辐射( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ), $\sigma$ 为斯蒂芬-波尔兹曼常数( $5.675 \times 10^{-8} \text{W}\cdot\text{K}^{-4}\cdot\text{m}^{-2}$ ), $T_k$ 为平均气温(K), $e_a$ 为实际水汽

压(hPa),  $n$  为实际日照时数(h),  $N$  为可照时数(h),  $a_s, b_s$  为经验常数;天文辐射( $R_a$ )及可照时数( $N$ )根据站点纬度和日序计算求得<sup>[25]</sup>。

对站点逐日地表净辐射的模拟结果进行检验的评价指标为:均方根误差(RMSE)、相关系数( $r$ )和平均相对误差(MAPE),其计算公式如下:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (R_{in} - R_{im})^2} \quad (3)$$

$$r = \frac{\sum_{i=1}^n (R_{in} - \bar{R}_{in})(R_{im} - \bar{R}_{im})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{in} - \bar{R}_{in})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (R_{im} - \bar{R}_{im})^2}} \quad (4)$$

$$MAPE = 100 \times \frac{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |R_{in} - R_{im}|}{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{imax}} \quad (5)$$

其中,  $R_{in}$  为第  $i$  个地表净辐射观测值,  $R_{im}$  为第  $i$  个地表净辐射计算值,  $R_{imax}$  为  $R_{in}$  对应月份的月最大净辐射观测值,  $n$  为数据个数。

将精度检验后的公式应用至其他气象站点,得到全国 699 个站点 1961-2010 年逐日地表净辐射,对逐日数据进行处理,得到各站点季节、年地表净辐射数据,建立 1961-2010 年全国地表净辐射年、四季(春、夏、秋、冬)尺度的时间序列。季节采用气象季节划分方法<sup>[26]</sup>,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 月为夏季、9 月至 11 月为秋季,各季节地表净辐射为相应月份地表净辐射的平均值,年值数据为逐月数据求平均而得,对异常值及缺失值的处理均参照中国气象局"中国辐射数据集"的相关处理方法。

### 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<sup>[27]</sup>,对多站点长时间序列地表净辐射数据进行时间趋势变化检验和分析;根据 699 个气象站点的空间分布,参考中国自然地理区划<sup>[28]</sup>,将全国划分为东北、华北、华中、华南、西北、西南、内蒙、青藏 8 大区,分析地表净辐射在空间上的变化特征。

基于秩的 Mann-Kendall 趋势分析是一种非参数统计检验方法,与传统参数方法相比,非参数统计检验方法的优点在于样本不需要遵循一定的分布,且较少受到异常值的干扰,计算比较简便。因此,该方法在时间趋势分析中得到了广泛应用,是

国际气象组织(WMO)推荐应用于环境数据时间序列趋势分析的方法<sup>[29]</sup>。其统计检验方法如下:

$$Z = \begin{cases} \frac{s-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & (S > 0) \\ 0 & (S = 0) \\ \frac{S-1}{\sqrt{\text{Var}(s)}} & (S < 0) \end{cases} \quad (6)$$

$$S = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \text{sign}(x_j - x_i) \quad (7)$$

$$\text{sign}(\theta) = \begin{cases} 1 & (\theta > 0) \\ 0 & (\theta = 0) \\ -1 & (\theta < 0) \end{cases} \quad (8)$$

其中,  $Z$  为标准化后的检验统计量,  $S$  为检验统计量,  $x_i, x_j$  为序列数据,  $n$  为序列的数据个数;当  $n \geq 8$  时,检验统计量  $S$  近似为正态分布,其均值和方差如下:

$$E(S) = 0 \quad (9)$$

$$\text{Var}(S) = \frac{n(n-1)(2n+5) - \sum_{p=1}^q t_p(t_p-1)(2t_p+5)}{18} \quad (10)$$

其中,  $q$  为等值数组的个数,  $t_p$  为第  $p$  个等值数组的数据个数,  $n$  为序列的数据个数。

标准化后的检验统计量  $Z$  均值为 0, 方差为 1。若  $|Z| > Z_{1-\alpha/2}$ , 则趋势不显著的原假设被拒绝, 结论是存在明显趋势变化。  $Z_{1-\alpha/2}$  为  $\alpha$  置信水平下, 标准正态函数分布表所对应的值, 本文取  $\alpha=0.05$ 。

Mann-Kendall 趋势分析方法中趋势变化的斜率( $\beta$ )通过式(11)确定:

$$\beta = \text{Median} \left[ \frac{x_j - x_i}{j - i} \right] \quad (11)$$

其中,  $x_i, x_j$  为序列数据, 当  $\beta > 0$  时, 表示有上升趋势; 当  $\beta < 0$  时, 表示有下降趋势。

## 3 地表净辐射模拟结果与分析

### 3.1 模型参数拟合及精度验证

基于 53 个气象辐射站点 1993-2010 年逐日地表净辐射数据, 采用麦夸特法(Levenberg-Marquardt)和通用全局优化法对 FAO Penman 修正式进行拟合, 得到参数  $a_s=0.13, b_s=0.65$ , 与相关文献<sup>[9, 30]</sup>的参数取值( $a_s=0.18, b_s=0.55$ )基本一致。

对逐日地表净辐射的观测值与模拟值进行对

比分析,得到均方根误差(RMSE)为  $27.9\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ , 相关系数( $r$ )为 0.85,46.3%的数据在 0.1 的误差以内,79.9%的数据误差小于 0.2,平均相对误差(MAPE)为 0.13,总体精度较高。观测值与模拟值的散点图如图 2 所示。

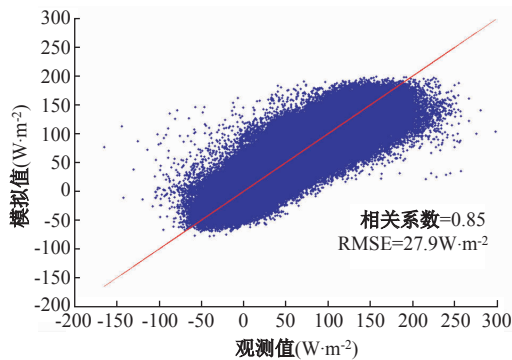


图 2 观测值与模拟值的散点图

Fig. 2 The scatter plots of observation and simulation values

由于采用的资料取样越多,时间尺度越长,对模式平滑作用越明显,会导致极端天气估算误差偏大<sup>[11]</sup>,个别站点出现过高估计及估计不足的现象,总体上本文精度优于国内外利用遥感手段研究地表净辐射的估算精度。

表 1 地表净辐射各级相对误差的累计频率(%)

Tab. 1 The cumulative frequency of relative error of surface net radiation

相对误差范围	$\leq 0.05$	$\leq 0.1$	$\leq 0.15$	$\leq 0.2$	$> 0.2$
累计频数	76 341	148 675	210 914	256 660	321 218
累计频率(%)	23.8	46.3	65.7	79.9	100.0

### 3.2 地表净辐射的年际变化特征

对 1961–2010 年中国陆地区域 699 个站点的地表净辐射年、季节数据进行运算,求出逐年、逐季节的平均地表净辐射,生成地表净辐射多年年际距平序列(图 1)。

1961–2010 年站点年均地表净辐射下降趋势明显(图 3(a)),平均降幅为  $0.74\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  ( $R^2=0.70$ ),近 50 年的下降幅度约占多年平均值的 7%。20 世纪 80 年代之前大部分地表净辐射在平均值之上,80 年代开始地表净辐射下降趋势加快,尽管 90 年代出现个别年份的波动上升,2000 年之后地表净辐射下降的速度和幅度均明显增大,尤其近几年(2007–2010 年)地表净辐射数值异常低,低于多年平均  $1.88\sim 2.60\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,近 50 年地表净辐射最高

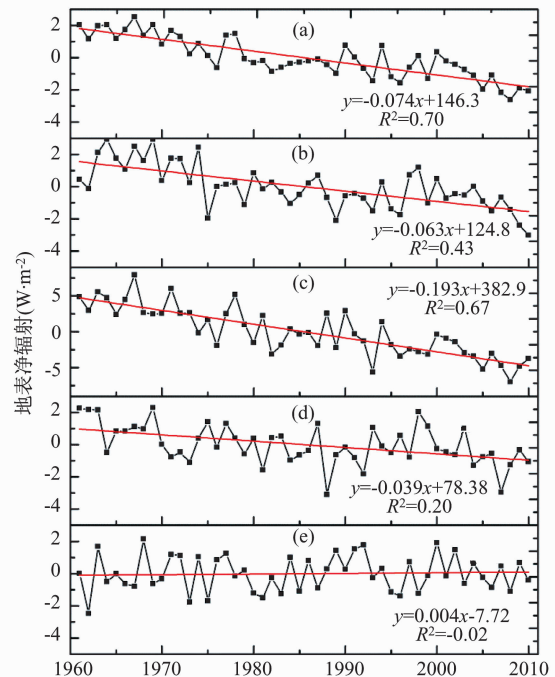


图 3 1961–2010 年全国站点年(a)、春季(b)、夏季(c)、秋季(d)、冬季(e)平均地表净辐射距平曲线

Fig. 3 The departure curves of annual (a) and seasonal (b–e) mean surface net radiation in the sites all over China from 1961 to 2010

值出现在 1967 年,高出多年平均  $2.53\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,最低值出现在 2008 年,低于多年平均  $2.60\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ 。

从站点季节平均地表净辐射多年年际距平序列(图 3(b)–(e))可知,四季中夏季平均地表净辐射下降趋势最为明显,降幅达到  $1.93\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  ( $R^2=0.67$ ),其次为春季和秋季,平均降幅分别为  $0.63\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ 、 $0.39\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,冬季有略微上升趋势。四季中春季和夏季平均地表净辐射距平变化曲线(图 3(b)、(c))与年平均曲线相似,均呈现出明显的波动下降趋势,且近几年的地表净辐射均异常低,其中夏季地表净辐射最低值也出现在 2008 年,低于平均值  $7.00\text{W}\cdot\text{m}^{-2}$ ,加之夏季地表净辐射的降幅最大,说明夏季地表净辐射波动在地表净辐射年际变化中的贡献最大。

总的来说,近 50 年站点年、季节平均地表净辐射呈现出较明显的下降趋势,20 世纪 80 年代之前下降较慢,之后下降趋势加快,近几年的地表净辐射尤其低;不同季节地表净辐射下降幅度不同,较之其他季节夏季降幅最大,夏季波动在地表净辐射的年际变化中贡献最大。

3.3 地表净辐射年际变化的区域差异

对 1961–2010 年全国 699 个站点年、季节平均地表净辐射采用 Mann-Kendall 趋势分析方法进行逐站点时间趋势变化分析(各站点观测序列长度 $\geq 20$ ),结果表明,中国近 50 年地表净辐射趋势变化呈现出明显的地区差异和季节差异。



图 4 1961–2010 年各站点年均地表净辐射变化趋势空间分布( $\alpha=0.05$ )

Fig. 4 Distribution of trends of annual mean surface net radiation in China from 1961 to 2010 ( $\alpha=0.05$ )

逐站点年均地表净辐射时间变化分析结果(图 4 和表 2)表明,近 50 年中国大部分站点(占总站点的 59.8%)年均地表净辐射呈现显著(0.05)下降趋势,只有小部分站点年均地表净辐射出现显著上升趋势(占总站点的 5.0%)。中国东半部绝大部分站点年均地表净辐射显著下降,具有显著下降趋势的站点在各区中的比例为:华北区(80.2%)、华中区(79.9%)、华南区(78.4%),平均降幅在  $0.98\sim 1.29\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ;西半部的西南区和青藏区年平均地表净辐射也存在显著下降趋势,但降幅较小,平均降幅分别为  $0.62\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$  和  $0.38$

表 2 年均地表净辐射变化趋势分区统计表( $\alpha=0.05$ )

Tab. 2 Zonal statistics of trends of annual mean surface net radiation

区域名称	站点 总数目	显著下降 站点数目	下降百分 比(%)	变化幅度 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )
西北区	76	17	22.4	0.06
内蒙古区	67	37	55.2	−0.43
东北区	84	44	52.4	−0.41
华北区	96	77	80.2	−0.98
华中区	194	155	79.9	−1.21
华南区	37	29	78.4	−1.29
西南区	41	22	53.7	−0.62
青藏区	104	37	35.6	−0.38

$\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ,西北区年平均地表净辐射具有显著上升趋势的站点(26.3%),多于具有显著下降趋势的站点(22.4%),表现出略微上升趋势,升幅为  $0.06\text{ W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ ;

表 3 春季平均地表净辐射变化趋势各区统计表( $\alpha=0.05$ )

Tab. 3 Zonal statistics of trends of mean surface net radiation in spring ( $\alpha=0.05$ )

区域 名称	站点 总数目	显著下降 站点数目	下降 百分比(%)	变化幅度 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )
西北区	86	23	26.7	−0.32
内蒙古区	67	34	50.7	−0.62
东北区	84	48	57.1	−0.61
华北区	96	49	51.0	−0.68
华中区	195	70	35.9	−0.61
华南区	37	21	56.8	−1.60
西南区	41	18	43.9	−0.91
青藏区	105	32	30.5	−0.34

表 4 夏季平均地表净辐射变化趋势各区统计表( $\alpha=0.05$ )

Tab. 4 Zonal statistics of trends of mean surface net radiation in summer ( $\alpha=0.05$ )

区域名称	站点 总数目	显著下降 站点数目	下降百 分比(%)	变化幅度 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )
西北区	76	19	25.0	−0.15
内蒙古区	77	40	51.9	−0.93
东北区	84	32	38.1	−0.88
华北区	96	85	88.5	−3.31
华中区	194	164	84.5	−3.46
华南区	37	17	45.9	−1.80
西南区	41	16	39.0	−1.02
青藏区	104	34	32.7	−0.60

表 5 秋季平均地表净辐射变化趋势各区统计表( $\alpha=0.05$ )

Tab. 5 Zonal statistics of trends of mean surface net radiation in autumn ( $\alpha=0.05$ )

区域名称	站点 总数目	显著下降 站点数目	下降百 分比(%)	变化幅度 ( $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot 10\text{a}^{-1}$ )
西北区	76	8	10.5	0.19
内蒙古区	67	12	17.9	−0.24
东北区	94	9	9.6	−0.11
华北区	96	31	32.3	−0.47
华中区	194	89	45.9	−0.65
华南区	37	25	67.6	−1.35
西南区	41	12	29.3	−0.42
青藏区	105	19	18.1	−0.25

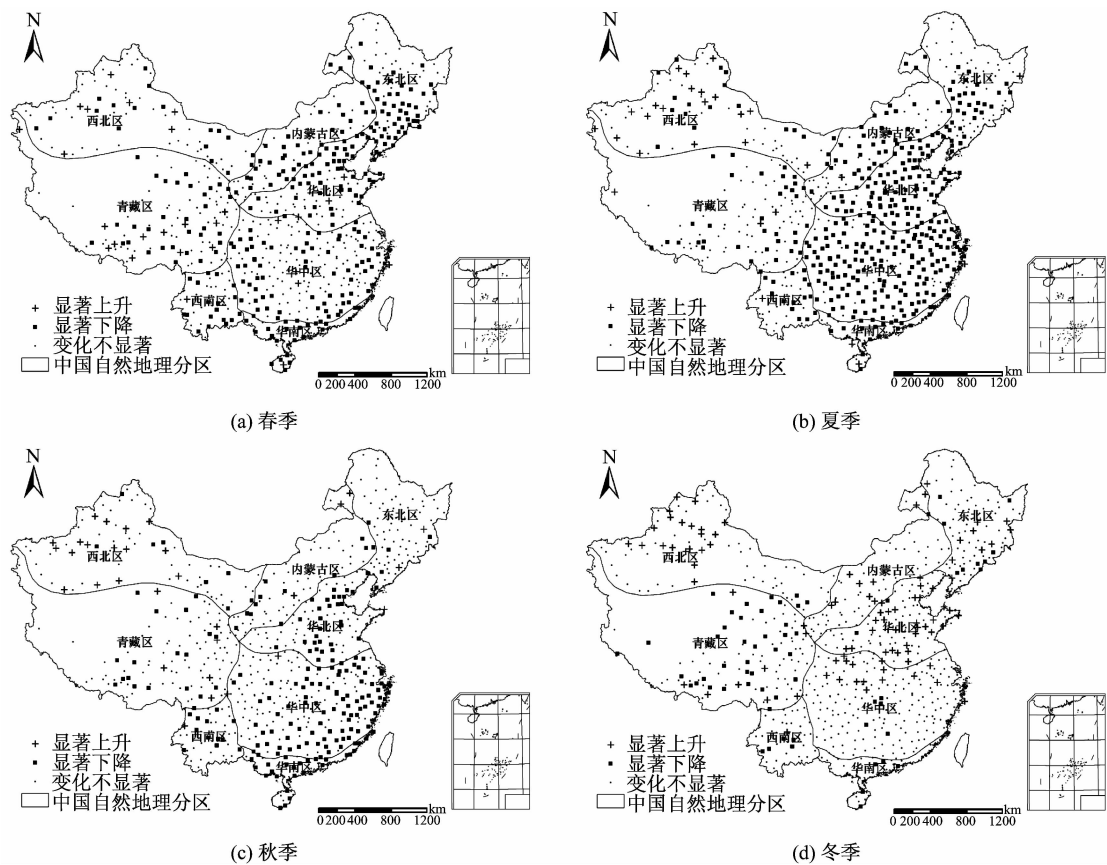


图 5 1961 - 2010 年各站点春季(a)、夏季(b)、秋季(c)、冬季(d)平均地表净辐射变化趋势空间分布( $\alpha=0.05$ )  
Fig. 5 Distribution of trends of mean surface net radiation in spring (a), summer (b), autumn (c) and winter (d) in China from 1961 to 2010 ( $\alpha=0.05$ )

表 6 冬季平均地表净辐射变化趋势各区统计表( $\alpha=0.05$ )  
Tab. 6 Zonal statistics of trends of mean surface net radiation in winter ( $\alpha=0.05$ )

区域名称	站点 总数目	显著下降 站点数目	下降百 分比(%)	变化幅度 ( $W \cdot m^{-2} \cdot 10a^{-1}$ )
西北区	76	3	3.9	0.39
内蒙古区	67	1	1.5	0.15
东北区	94	8	9.5	0.05
华北区	96	3	2.8	0.42
华中区	194	5	2.6	0.03
华南区	37	5	13.5	-0.26
西南区	41	5	12.2	-0.19
青藏区	105	34	32.4	-0.45

逐站点季节平均地表净辐射时间变化分析结果(图 5 和表 3 - 6)表明,地表净辐射时间趋势变化除了地区差异外,还有明显的季节差异。站点春季、夏季、秋季平均地表净辐射的变化趋势与年均地表净辐射的年际变化格局较为一致,有显著下降

趋势的站点比例和变化幅度随季节不同而发生变化,夏季大于春季和秋季。夏季,全区有一半以上的站点(57.4%)具有显著下降趋势,东半部绝大部分站点地表净辐射显著下降,特别是华北区和华中区,具有显著下降趋势的站点比例达到 80% 以上,区域平均降幅在  $3.0 W \cdot m^{-2} \cdot 10a^{-1}$  以上;西半部地表净辐射也呈现出下降趋势,其显著下降站点的比例和下降幅度不如东半部显著。从春季、秋季站点地表净辐射年际变化趋势的空间分布(图 5(a)、(c)和表 3、5)可以看出,二者与夏季地表净辐射年际变化趋势的空间分布总体格局基本一致,均呈现出东半部显著下降趋势的站点比例高于西半部、东半部下降幅度大于西半部的特点,二者相比春季较秋季更显著;冬季,具有显著下降趋势的站点集中分布于青藏区,该区站点平均下降幅度为  $0.45 W \cdot m^{-2} \cdot 10a^{-1}$ ,具有显著上升趋势的站点零散分布于华北、西北等各区中,其余大多数站点的冬季地表净辐射变化趋势不明显。

### 3.4 地表净辐射的变化分析

地表吸收的短波净辐射和长波净辐射共同构成了地表净辐射,而地表净辐射主要是由短波净辐射提供<sup>[31]</sup>,天文辐射、天空云状况、气溶胶等决定到达地表的太阳总辐射量,地表反照率决定地表反射的短波辐射量,因此,影响特定区域地表净辐射时间变化特征的因素,主要有天文辐射、云、气溶胶、土壤湿度、土地覆被等。

天文辐射是决定地表净辐射中短波净辐射项的基础要素,它的大小直接影响净辐射,最近几十年的卫星观测表明,在太阳 11 年的变化周期中,太阳常数的变化约为  $1.36 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,变率范围约  $0.1\%$ <sup>[32]</sup>,对地面观测值造成的影响微乎其微,可以忽略。研究表明,自 20 世纪 50 年代以来,全球地表短波辐射呈先“变暗”后“变亮”的现象,其主要影响因素为云和气溶胶<sup>[33-35]</sup>;Liang (2005)<sup>[36]</sup>的研究表明,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。大气气溶胶主要来自于化石燃料的燃烧等人为活动及火山爆发等自然现象,自 20 世纪 80 年代开始随着经济快速发展,化石燃料的大量燃烧造成大气气溶胶的快速增加,这可能是地表净辐射持续下降的主要原因;1974 年 Fuego、1982 年 El Chinchon 及 1991 年 Pinatubo 的火山爆发引起大气气溶胶的增加则是造成地表净辐射波动变化的主要因素,这两种因素的共同作用造成近 50 年各站点地表净辐射呈现出持续的波动下降过程。

地表净辐射年际变化呈现出明显的地区差异,主要与东西部的人口、经济发展水平有关,由于 80 年代以来东半部随着经济快速发展人口急剧增加,空气污染程度加重,大气气溶胶浓度显著增加<sup>[37]</sup>,导致地表净辐射表现出东部显著下降站点比重和幅度均超过西部的特点。气溶胶的辐射强迫具有春夏季大于秋冬季的特点<sup>[38]</sup>,这也是春夏季地表净辐射波动在地表净辐射的年际变化中贡献比秋冬季大的主要原因;冬季地表反照率对高原地表净辐射具有决定性作用<sup>[39]</sup>,青藏高原积雪变化具有确定的长期增加的趋势<sup>[40]</sup>,由高原积雪的增加趋势而导致的青藏高原各站点冬季净辐射的显著降低具有充分的理论和事实依据。

## 4 结论

全国范围气象站点的长期观测数据,对 FAO

Penman 修正式进行了参数拟合及精度验证,模型精度验证的结果优于叶晶等<sup>[12-15]</sup>利用遥感数据估算净辐射的精度,表明利用 FAO Penman 修正式模拟地表净辐射具有较大的优势,与刘新安等<sup>[10]</sup>的研究结论相一致;不同于其他研究者对个别站点或地区地表净辐射的短时间序列研究,及翁笃鸣对青藏高原地表净辐射的研究,本文模拟了中国陆地区域 699 个站点 1961–2010 年逐年/季节平均地表净辐射数据,结合 GIS 空间分析技术与 Mann-Kendall 趋势分析方法,对近 50 年年/季节站点平均地表净辐射进行时空变化特征分析,使大区域尺度地表净辐射的研究成为一种可能,这是对全球地表净辐射的时空变化分析有益的验证和补充,对于理解区域尺度上气候系统、生态系统的变化反馈机制具有重要的意义;本文的主要结论如下:

(1)FAO Penman 修正式对模拟站点逐日地表净辐射的效果较好,利用 53 个站点 18 年逐日地表净辐射数据进行参数拟合得到参数  $a_s=0.13$ ,  $b_s=0.65$ ,精度验证结果:均方根误差为  $27.9 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,相关系数达到 0.85,平均相对误差为 0.13,总体精度较高。

(2)全国近 50 年站点平均地表净辐射在年、季节均呈现出较明显的下降趋势,呈现出 80 年代之前下降较慢、之后下降趋势加快的特点,年均降幅为  $0.74 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ ;不同季节的地表净辐射下降幅度存在差异,其中,夏季下降幅度最大,年均降幅达到  $1.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot 10\text{a}^{-1}$ 。

(3)近 50 年全国逐站点地表净辐射时间变化分析表明,大部分站点年均地表净辐射呈显著下降趋势,总体上东部地区地表净辐射的趋势变化比西部地区明显,显著下降的站点比例和变化幅度均超过西部;地表净辐射的年际变化特征随季节的不同而出现区域差异,在同一地区不同季节的年际变化特征也存在差异,华北、华中、华南地区的站点在春夏秋冬均呈显著下降趋势,对于大部分地区,夏季地表净辐射的变化趋势对年均地表净辐射的年际变化贡献最大。

本文对地表净辐射长时间序列数据进行 GIS 时空趋势变化分析,在站点层面上分析了近 50 年中国陆地区域地表净辐射的时空变化特征,实现了中国区域地表净辐射较为综合的研究,对于大区域尺度气候变化预测、生态系统蒸散过程与机理研究具有重要意义。由于采用地表净辐射及气象数据



对模型参数进行拟合,观测数据本身的误差使得趋势分析结果存在一定的不确定性;另一方面,鉴于影响地表净辐射的因素繁多,且气溶胶、云状况等影响因素的长时间序列资料较难获取,地表净辐射的影响过程与机理尚需进一步探讨。

#### 参考文献:

- [1] 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.
- [2] Wang K C, Liang S L. 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.
- [3] Llasat M C, Snyder R L. Data error effects on net radiation and evapotranspiration estimation [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 1998, 91(3-4): 209-221.
- [4] 王可丽. 青藏高原地区云对地表净辐射的影响[J]. *高原气象*, 1996, 15(3): 269-275.
- [5] 刘允芬,李家永. 亚热带红壤丘陵区水稻田净全辐射初探[J]. *中国生态农业学报*, 2000, 8(1): 5-9.
- [6] Jimenez-Munoz J C, Sobrino J A, Mattar C. Recent trends in solar exergy and net radiation at global scale [J]. *Ecological Modelling*, 2012, 228(1): 59-65.
- [7] 翁笃鸣,高建芸. 青藏高原地表净辐射的气候学研究[J]. *南京气象学院学报*, 1993, 16(4): 464-470.
- [8] 王可丽,钟强. 青藏高原地区大气顶净辐射与地表净辐射的关系[J]. *气象学报*, 1995, 53(1): 101-107.
- [9] 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.
- [10] 任鸿瑞,罗毅,谢贤群. 几种常用净辐射计算方法在黄淮海平原应用的评价[J]. *农业工程学报*, 2006, 22(5): 140-146.
- [11] 杜建飞,陈渭民,吴鹏飞,等. 由GMS资料估算我国东部地区夏季地表净辐射[J]. *南京气象学院学报*, 2004, 27(5): 674-680.
- [12] 马耀明,王介民. 黑河实验区地表净辐射区域分布及季节变化[J]. *大气科学*, 1997, 21(6): 743-749.
- [13] 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): 40-49.
- [14] 张杰,杨兴国,杨启国,等. 利用MODIS资料估算西北雨养农业区地表净辐射[J]. *干旱气象*, 2004, 22(2): 32-37.
- [15] 翁笃鸣,孙治安,史兵. 中国地表净辐射的气候学研究[J]. *南京气象学院学报*, 1988, 11(2): 132-142.
- [16] Feng S, Hu S Q, Qian W H. Quality control of daily meteorological data in China, 1951-2000: a new dataset [J]. *International Journal of Climatology*, 2004, 24(7): 853-870.
- [17] 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.
- [18] Allen R G, Pereira L S, Raes D, *et al.* Crop evapotranspiration [M]. *FAO Irrigation and Drainage Paper* 24, Rome, 1998.
- [19] 康绍忠,刘晓明,熊运章. 土壤-植物-大气连续体水分传输理论及其应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1994.
- [20] 李临颖. 冬小麦农田日蒸散量的计算[J]. *应用气象学报*, 1992, 3(2): 248-253.
- [21] 裴步祥. 蒸发和蒸散的测定与研究[M]. 北京: 气象出版社, 1989.
- [22] 王菱,陈沈斌,侯光良. 利用彭曼公式计算潜在蒸发的高度订正方法[J]. *气象学报*, 1998, 46(3): 381-383.
- [23] 张懿. 干旱地区蒸发力计算的讨论[J]. *中国农业气象*, 1991, 12(1): 22-25.
- [24] Frère M, Popov G F. Agrometeorological crop monitoring and forecasting [M]. *FAO Plant Production and Protection Paper* 17, Rome, 1979.
- [25] 童成立,张文菊,汤阳,等. 逐日太阳辐射的模拟计算[J]. *中国农业气象*, 2005, 26(3): 165-169.
- [26] 任国玉,郭军,徐铭志. 近50年中国地面气候变化基本特征[J]. *气象学报*, 2005, 63(6): 942-956.
- [27] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术(2版)[M]. 北京: 气象出版社, 2007.
- [28] 赵济,陈传康. 中国地理[M]. 北京: 高等教育出版社, 1999.
- [29] Yu P S, Yang T C, Wu C K. Impact of climate change on water resources in southern Taiwan [J]. *Journal of Hydrology*, 2002, 260(1-4): 161-175.
- [30] 毛飞,张光智,徐祥德. 参考作物蒸散量的多种计算方法及其结果的比较[J]. *应用气象学报*, 2000, 11(增刊1): 128-136.
- [31] 王介民,高峰. 关于地表反照率遥感反演的几个问题[J]. *遥感技术与应用*, 2004, 19(5): 295-300.
- [32] Lean J. The sun's variable radiation and it's relevance to the earth [J]. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 1997, 35(1): 33-67.
- [33] Wild M. Enlightening global dimming and brightening



- [J]. Bulletin of the American Meteorological Society, 2012, 93(1): 27–37.
- [34] Stanhill G, Cohen S. Global dimming: a review of the evidence for a widespread and significant reduction in global radiation with discussion of its probable causes and possible agricultural consequences [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2001, 107(4): 255–278.
- [35] Liepert B, Tegen I. Multidecadal solar radiation trends in the United States and Germany and direct tropospheric aerosol forcing [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2002, 107(D12):4153–4167.
- [36] Liang F, Xia X A. Long-term trends in solar radiation and the associated climatic factors over China for 1961–2000 [J]. Annales Geophysicae, 2005, 23(7): 2425–2432.
- [37] Luo Y F, Lu D R, Zhou X J, *et al.* Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years [J]. Journal of Geophysical Research-Atmospheres, 2001, 106(D13): 14501–14513.
- [38] 周秀骥, 李维亮, 罗云峰. 中国地区大气气溶胶辐射强迫及区域气候效应的数值模拟[J]. 大气科学, 1998, 22(4): 418–427.
- [39] 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.
- [40] 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.

## Spatio-temporal Variation Characteristics of Surface Net Radiation in China over the Past 50 Years

GAO Yangzi<sup>1,2</sup>, HE Honglin<sup>2</sup>, ZHANG Li<sup>2</sup>, LU Qianqian<sup>2,3</sup>, YU Guirui<sup>2</sup> and ZHANG Zulu<sup>1</sup>

(1. College of Population, Resource and Environment, Shandong Normal University, Jinan 250014, China;

2. Key Laboratory of Ecosystem Network Observation and Modeling, Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

3. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

**Abstract:** Surface net radiation is the sum of incident downward and upward shortwave and longwave radiation. Changes of surface net radiation control the Earth's climate, the hydrological cycle, and plant productivity. In this paper we focused on the spatio-temporal variation analysis of surface net radiation over China at site-scale. We estimated the parameters of the FAO Penman model using daily surface net radiation of 53 radiation sites during 1993–2010 over China, and then we calculated mean annual/seasonal surface net radiation data in 699 weather sites from 1961–2010, based on the model and long-term measurement data of these stations. Furthermore, we analyzed the spatio-temporal variation characteristics of mean annual/seasonal surface net radiation of 699 sites in China in recent 50 years, by means of Mann-Kendall trend analysis method and GIS spatial analysis technique. We concluded that: 1) Parameterization of the FAO Penman model shows that the model has a relatively high simulation accuracy with RMSE  $27.9 \text{ W/m}^2$ , the coefficient of correlation 0.85, and the mean relative error 13%; 2) Mean annual/seasonal surface net radiation over China declines visibly with a fluctuant process with the changing rate reaching  $0.74 \text{ W/m}^2$  every 10 years. The amplitudes of changes vary with the seasons with the maximum downward ( $1.93 \text{ W/m}^2$  every 10 years) in summer; 3) The analysis at each site shows that mean annual surface net radiation declines significantly ( $\alpha=0.05$ ) in most sites (59.8%). The changing trend of the eastern part is more obvious than that in the western part and summer plays the most important role in the interannual variability of surface net radiation. Northern China, Central China and Southern China are decreasing regions in spring, summer and autumn, while the Qinghai-Tibet Plateau turns to be a noticeable

decreasing zone in winter. We speculated the much heavier aerosol loading in eastern part of China should be the primary cause for the decrease in surface net radiation and the volcano aerosols contribute to the oscillation in the trend. The increasing trend of snow on the Qinghai-Tibet Plateau should account for the decreasing trend of surface net radiation in winter. The quantitative spatio-temporal analysis of surface net radiation will be vital for the climate change and terrestrial ecosystem evapotranspiration research.

**Key words:** China; surface net radiation; spatio-temporal variation characteristics; Mann-Kendall trend analysis

## 新书推介

近日,科学出版社出了一本地球信息科学基础与应用类的新书:《滑坡遥感》。该书是作者王治华研究员 30 余年滑坡遥感探索与实践积累的总结。

近年来,国内外地质灾害频发,灾损严重,将现代空间信息技术应用于滑坡和地质环境调查是减灾防灾工作的迫切需要。王治华研究员自 20 世纪 80 年代初涉遥感领域,90 年代涉入 GIS 领域,将该技术应用于灾害与环境调查研究。先后完成了我国大渡河铜街子、雅砻江二滩、长江三峡、金沙江溪落渡、白鹤滩、乌东德等巨型水电站坝址及库区,进藏交通线、西藏帕里河等区域的滑坡、泥石流、地质环境及土地覆盖遥感调查,研究了我国水土流失最严重的黄河中游的小流域的产沙模型。1999 年提出“数字滑坡”概念及技术方法,并将其应用于 20 余项大规模滑坡及区域地质环境遥感调查中,形成了从理论、技术方法到应用模型的“滑坡遥感系统”。

《滑坡遥感》全书分为五章,系统介绍了滑坡遥感的理论、方法技术和应用,包括基本滑坡地学知识、遥感及空间定位的基础理论及数字滑坡概念;从定性、定位、定量的角度分析、识别、获取滑坡及地质环境信息,形成数字滑坡技术和个体滑坡数据库技术。

本书通过大量滑坡、泥石流调查应用的实例,说明数字滑坡技术的具体操作;并以两种不同类型的滑坡模型实例,介绍了数字滑坡模型研究及应用。本书可供遥感应用、环境工程、地质工程、防灾减灾工程等领域的工程技术人员、科研和教学人员、研究生参考使用。