

秦岭南北地区光合有效辐射时空变化及突变特征

蒋 冲^{1,3}, 朱 枫³, 杨 陈³, 王 飞^{1,2}, 穆兴民^{1,2}, 李 锐^{1,2}

(1. 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100; 2. 中国科学院水利部水土保持研究所, 杨凌 712100;
3. 北京师范大学全球变化与地球系统科学研究院地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875)

摘 要:基于秦岭南北地区47个气象站1960-2011年的逐日气象数据,通过Angstrom方程和Penman-Monteith公式计算了各站点的光合有效辐射(PAR),并借助Spline空间插值、Pettitt突变点检验和相关分析等手段对PAR的空间分布、时空演变、突变特征及其可能成因进行了分析。结果表明:①秦岭南北地区PAR的时间和空间分布特征明显,在空间上呈北高南低的分布格局;在季节分布上,夏季、春季、秋季、冬季依次减小。②52年间,该地区年PAR整体呈显著下降趋势,下降速率由南向北,由东向西递减;时间变化方面,春季PAR呈现不显著的上升趋势,其余季节均呈下降趋势,夏季减小最快,其次为冬季,秋季最小。③该地区89%的站点年PAR存在突变,突变站点中的85%发生于1979-1983年间;夏季89%的站点发生突变,突变站点中的90%发生于1979-1983年间;冬季68%的站点发生突变,但突变时间同步性和一致性较差;春季和秋季突变现象不甚明显。④气候变化(风速下降)、城市化进程加快以及工业生产导致的气溶胶增多是导致PAR显著下降的主要原因,而火山爆发引发的气溶胶增加则是PAR波动的主要原因。

关 键 词:光合有效辐射(PAR);空间分布;趋势;突变点;秦岭南北地区

doi: 10.11820/dlkxjz.2013.03.013

1 引言

太阳辐射是植被生长所需的重要能量来源,其中波长介于400~700 nm之间能够被植被通过光合作用利用的这部分太阳辐射,称为光合有效辐射(Photosynthetically Active Radiation, PAR)(董泰锋等, 2011; 夏朝宗等, 2004)。作为影响植被生长发育的重要因子,PAR是陆地生态系统碳循环、植被生产力计算与生态系统—大气间CO₂交换等生态模型的关键变量(Cao et al, 2005)。Monteith等(1972, 1977)的研究认为,在非胁迫条件下植被的净初级生产力NPP(Net Primary Production)与PAR呈明显的线性关系,因此PAR的时空变化直接影响着NPP的时空变异。在气候变化的背景下,分析PAR的时空变化特征对于进一步研究PAR如何影响生态系统光合作用过程具有重要意义(Graham et al, 2003)。前人对PAR的研究工作主要集中于PAR的

估算方法,而对于PAR时空变化规律的研究相对较少。白建辉等(2004)、张运林等(2002)、刘新安等(2002)、张宪洲等(1997)分别就内蒙古、太湖地区、辽宁、青藏高原等地区的PAR的变化特征进行了分析并建立了适用于当地的PAR计算公式。Hu等(2007)比较分析了全国不同地区PAR的变异特征,对PAR的时空变化特征做了较为详细的分析。但上述研究大多局限在站点尺度,较少涉及到区域尺度的PAR时空分布格局和变化趋势,对其突变特征及影响因素的研究较少,对重要地理界线南北差异、气候过渡区域和生态环境敏感区关注相对不足,因此,对地方政府农业生产布局、生态环境建设等工作的参考价值也受到一定限制。

秦岭地处暖温带与北亚热带过渡区,是中国气候上的南北分界线,本区动(植)物资源极为丰富,也是南水北调中线工程水源地,在地理和生态等相关学科研究中具有极其重要的地位。关于这一地区

收稿日期:2012-07; 修订日期:2012-11.

基金项目:国家自然科学基金项目(41171420);黄土高原土壤侵蚀与旱地农业国家重点实验室基金项目(10502-Z12-9);中荷联合主题研究项目(GJHZ1018)。

作者简介:蒋冲(1987-),男,黑龙江哈尔滨人,硕士研究生,主要研究方向为气候变化与生态水文。E-mail: cba8702@126.com

通讯作者:王飞(1971-),男,陕西户县人,副研究员,从事水土保持环境效应评价、气候变化研究。E-mail: wafe@ms.iswc.ac.cn

生态系统多样性、水土保持等相关研究已经逐渐成为本领域的热点问题(白晶, 2011),但对秦岭南北气候演变特别是PAR的研究相对较少。已经开展的研究也大多局限于气温、降水和径流等常规水文气象要素的单因子分析(宋春英等, 2011; 张立伟等, 2011),研究区域也大多局限于陕西境内的秦岭山脉(关中—陕南一带)(白晶, 2011; 宋春英等, 2011; 张立伟等, 2011),研究深度不够,覆盖面有限。因此,本文在前人工作基础上,采用秦岭南北地区47个站点1960-2011年的气象数据,通过气候学计算方法,借助Spline空间插值、Pettitt突变点检验等手段对PAR空间分布、时空演变、突变特征进行分析,为进一步分析PAR的变化对秦岭南北陆地生态系统生产力的影响提供参考。

2 数据与方法

2.1 研究区概况

秦岭南北地区主要包括秦岭北坡及其以北的暖温带、秦岭南坡及其以南的北亚热带、秦岭以南的巴山、巫山谷地及江汉平原西北部(周旗等, 2011)(图1)。该区地处暖温带与北亚热带过渡区,是中国气候上的南北分界线。年均气温12~17℃,≥10℃年积温3700~4900℃,无霜期200~250天,年均降水量600~1200 mm,降水变率大,季节分配不均,汛期6-9月的降雨量占全年的60%左右。本区植物资源极为丰富,地带性植被为常绿—落叶阔叶混交林,植被垂直地带分布显著。

2.2 数据来源

气象数据来源于中国气象科学数据共享服务

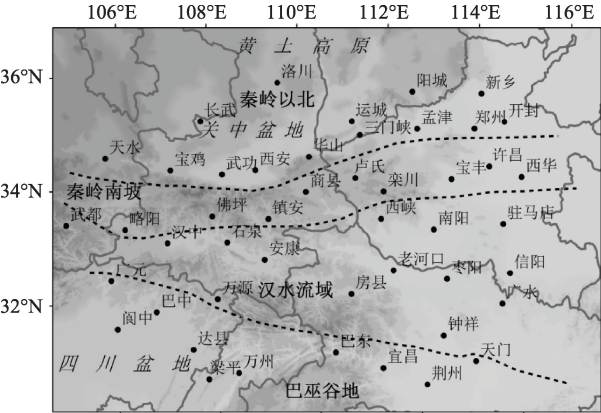


图1 研究区范围及气象观测站点分布

Fig. 1 Location of the study area and meteorological stations

网(<http://cdc.cma.gov.cn/>),选用秦岭南北要素较为完备的47个国家气象观测基准站1960-2011年间逐日气候资料。对极少数站点由于观测中断造成的数据缺失,应用线性回归法进行插补。按照12月至次年2月为冬季、3-5月为春季、6-8月为夏季和9-11月为秋季的标准,通过算术平均法建立年、季节PAR的变化序列。为进行不同纬度和地域单元PAR变化的比较,本文自北向南将研究区分为4个亚区域:①秦岭北坡及其以北的暖温带地区(以下简称“秦岭以北”);②秦岭南坡,包括伏牛山及其以东平原(因大部分区域属秦岭南坡山地,简称“秦岭南坡”);③秦岭以南的汉水谷地、巴山、沮水谷地及淮河上游北亚热带地区(因大部分区域属汉水流域,简称“汉水流域”);④巴山南麓、巫山谷地及江汉平原西北部(简称“巴巫谷地”)(图1)(周旗等, 2011)。

2.3 研究方法

2.3.1 PAR计算方法

PAR的计算方法分为基于遥感反演和基于地面观测数据模拟两大类(林忠辉等, 2002; Van et al, 2005),本文采用传统的气候学方法,利用PAR与太阳总辐射、太阳总辐射与日照时数的经验公式来计算PAR。

首先,根据Angstrom(埃斯屈朗)方程阐述的太阳总辐射与日照时数关系,结合逐日日照时数实测资料,计算所有气象站点的逐日太阳总辐射(林忠辉等, 2002; Van et al, 2005):

$$\frac{Q}{Q'} = a + b \frac{n}{N} \tag{1}$$

式中:Q为太阳总辐射;Q'为天文辐射;n为观测日照时数;N为可能日照时数;a,b为经验系数。世界粮农组织(FAO)推荐值为a=0.18,b=0.55,但这一参考值并不一定适用于本文的研究区域,因此在本研究中a,b采用朱旭东等(2010)根据全国740个气象站1961-2007年逐日日照时数和122个辐射站1961-2000年逐日太阳总辐射和日照时数数据分区拟合华北区(a=0.1904,b=0.5103)和华中区(a=0.1519,b=0.5739)的结果。天文辐射(Q')采用世界粮农组织(FAO)1998年修正的Penman-Monteith公式计算(Allen et al, 1998)。

$$Q' = \frac{24(60)}{\pi} G_{sc} d_r [\omega_s \sin(\phi) \sin(\delta) + \cos(\phi) \cos(\delta) \sin(\omega_s)] \tag{2}$$

式中： Q' 为天文辐射 [$\text{MJm}^{-2}\text{d}^{-1}$]; G_{sc} 为太阳常数 [$0.082 \text{ MJm}^{-2}\text{m}^{-1}$]; d_r 为日地相对距离; W_s 为日落时角 (rad); φ 为纬度(rad); δ 为太阳倾角(rad),各参数具体算法见参考文献(Allen et al, 1998)。

然后,基于光合有效系数($\eta=\text{PAR}/Q$)与晴空指数(Q/Q')的经验关系,对其进行估算(何洪林等, 2004; 于贵瑞等, 2004)。

$$\eta=c+d\ln\frac{Q}{Q'}$$

(3)

式中: η 为光合有效系数; c, d 为待定系数。 c, d 采用朱旭东等(2010)根据中国生态系统研究网络(Chinese Ecosystem Research Network, CERN)36个台站 PAR 与太阳总辐射观测数据(2004-2007年)分区拟合华北区($c=0.3767, d=-0.0381$)和华中区($c=0.3712, d=-0.0412$)的结果。另外, PAR 可以分别以辐射通量密度(Wm^{-2})和光量子通量密度($\mu\text{mol m}^{-2}\text{s}^{-1}$)来度量,两者之间存在一个量子转换系数,一般取值 $4.57 \mu\text{mol J}^{-1}$ (朱旭东等, 2010),本文统计分析结果均以光量子通量密度来表示($\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)。

2.3.2 Spline插值法

为了反映 PAR 的空间差异,利用 Spline 插值法将通过站点计算得到的 PAR 进行空间插值,插值时考虑经度、纬度和高程 3 个因素的影响。Spline 插值法能够通过实测样点拟合出连续光滑的表面,其优点是样条函数易操作,计算量小,不需要对空间方差的结构做预先估计,也不需要做统计假设(Hutchinson et al, 1994)。为了验证该方法是否适用于研究区,在研究区选取 23 个气象站(17 个插值站, 6 个验证站)对 IDW 法、Kriging 法和 Spline 法做了验证,研究表明 IDW 法($R=0.971, P<0.01$)、Kriging 法($R=0.972, P<0.01$)和 Spline 法($R=0.977, P<0.01$)与计算值都有较强的相关性。其中 Spline 法与计算值相关性最强,但是与实测值相比有一定误差;通过线性回归方程修正后最大误差为 5%,平均绝对误差为 2%,误差较小。Spline 法的具体原理见参考文献(Hutchinson et al, 1994)。

2.3.3 非参数变点检验方法

Pettitt 变点检测方法是基于非参数检测一个序列的变点,计算较简便,可以明确变化的时间,能够较好地识别序列分布的突变点,在变点检测方法中应用较多且物理意义明确,具体算法见参考文献(Pettitt et al, 1979)。 PAR 的气候倾向率用下式进行估计:

$$Y_i=a_0+a_1t_i$$

(4)

式中: Y_i 为 PAR ; t_i 为年份(1960-2011); a_1 为线性趋势项(即每年的气候倾向率); a_0 为常数。

3 结果与分析

3.1 PAR 空间分布

秦岭南北地区 PAR 呈现北高南低的空间分布格局,年和季节 PAR 空间分布如图 2,统计结果见表 1。研究区多年平均 PAR 为 $22.48 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$,各亚区按 PAR 大小排序依次为:秦岭以北($24.40 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>秦岭南坡($22.72 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>汉水流域($21.94 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>巴巫谷地($20.87 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)。本区 PAR 最高值位于华山($26.49 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$),最低值位于四川盆地广元($19.04 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$),极差达 $7.45 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 。由北向南各站点 PAR 最高值排序为:华山($26.49 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>西华($23.88 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>信阳($23.23 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>广水($23.03 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$);最低值排序为:西安($22.55 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>略阳($20.15 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>万源($19.65 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>阆中($18.72 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)。各季节按 PAR 大小排序为夏季($31.11 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>春季($26.79 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>秋季($18.25 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)>冬季($14.10 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$)。春季、秋季和冬季的 PAR 空间分布规律与年际结果基本一致,也是北部高、南部低,不同的是夏季 PAR 秦岭南坡最低($30.57 \text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$),排序为:秦岭以北>汉水流域>巴巫谷地>秦岭南坡。

表 1 1960–2011 年秦岭南北地区年和季节平均 PAR
Tab. 1 Annual and seasonal PAR in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960–2011

| 季节 | 秦岭 北坡 | 秦岭 南坡 | 汉水 流域 | 巴巫 谷地 | 秦岭 南北 |
|----|----------|----------|----------|----------|----------|
| 春季 | 30.00 | 27.51 | 25.82 | 23.82 | 26.79 |
| 夏季 | 32.54 | 30.57 | 30.67 | 30.66 | 31.11 |
| 秋季 | 19.76 | 18.17 | 17.72 | 17.34 | 18.25 |
| 冬季 | 16.08 | 14.73 | 13.61 | 11.97 | 14.10 |
| 年度 | 24.40 | 22.72 | 21.94 | 20.87 | 22.48 |

注:单位为 $\text{mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$

3.2 PAR 时空变化

3.2.1 PAR 年际变化

1960-2011 年间秦岭南北地区 PAR 呈显著下降趋势,研究区和各亚区年 PAR 变化倾向率(单位为

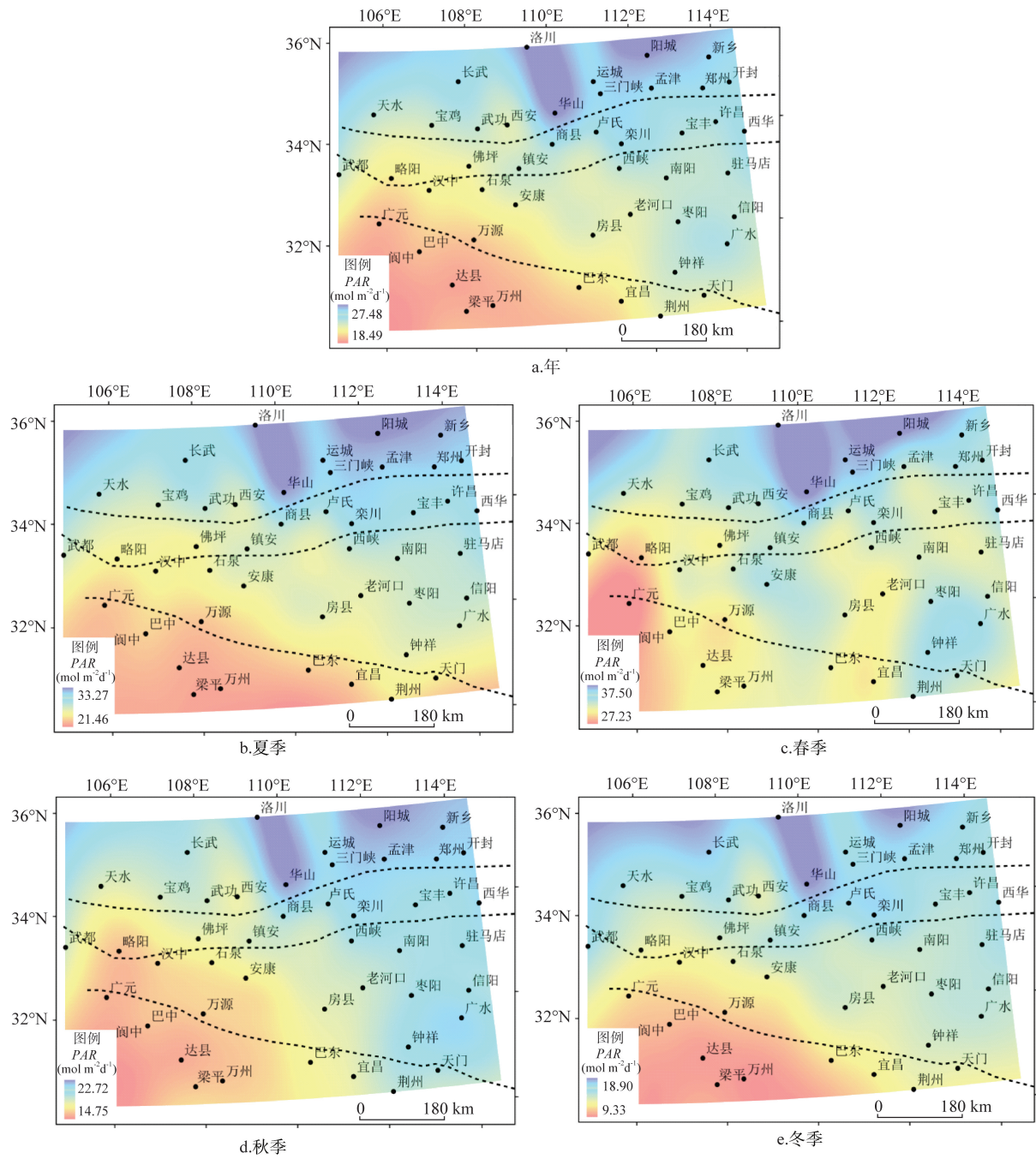


图2 1960-2011年秦岭南北地区年(a)和季节(b-e)平均 PAR 空间分布
Fig. 2 Spatial distribution of annual (a) and seasonal (b-e) PAR
in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960-2011

天,下同)排序为:巴巫谷地($-0.53\text{ mol}/10\text{a}$, $P<0.001$)>汉水流域($-0.44\text{ mol}/10\text{a}$, $P<0.01$)=秦岭南北($-0.44\text{ mol}/10\text{a}$, $P<0.01$)>秦岭南坡($-0.42\text{ mol}/10\text{a}$, $P<0.01$)>秦岭以北($-0.36\text{ mol}/10\text{a}$, $P<0.01$),由南向北下降速率递减。

各季节变化趋势如图3,研究区整体在春季呈现不显著的上升趋势,其余季节按 PAR 下降速率大小排序依次为:夏季>冬季>秋季。春季(图3a), PAR

整体上微弱上升($0.03\text{ mol}/10\text{a}$, $P>0.1$),秦岭以北地区的 PAR 始终高于秦岭以南的各个区域。全区于1964年达到最高水平($23.70\text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$),2006年达到最低水平($29.55\text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$),极差和变异系数分别为 $5.85\text{ mol m}^{-2}\text{d}^{-1}$ 和0.06,年际间变动并不十分剧烈,各亚区变化趋势基本相同,到达最大和最小值的时间点大体一致,体现出较好的同步性变化特点;夏季(图3b), PAR 整体减小速率为 $-1.12\text{ mol}/$

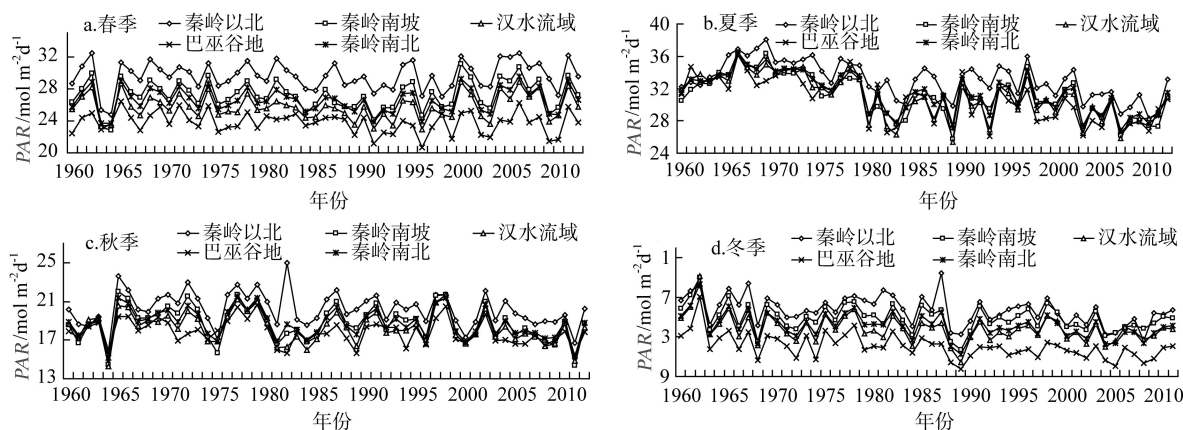


图3 1960-2011年秦岭南北地区逐季平均PAR的年际变化

Fig. 3 Change trend of seasonal PAR in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960-2011

10a, 全区于1966年达到最高水平($36.46 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 2007年达到最低水平($26.84 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 极差和变异系数分别为 $9.62 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 和 0.08; 秋季(图3c), PAR整体倾向率为 $-0.25 \text{ mol}/10\text{a}$, 全区于1979年达到最高水平($20.61 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 2011年达到最低水平($15.50 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 极差和变异系数分别为 $5.11 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 和 0.07; 冬季(图3d), PAR整体显著下降($-0.41 \text{ mol}/10\text{a}$, $P < 0.01$), 全区于1962年达到最高水平($18.36 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 1989年达到最低水平($11.27 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 极差和变异系数分别为 $7.09 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$ 和 0.09。值得注意的是, 4个季节52年间PAR极大值都集中在秦岭以北地区, 极大值和极小值除冬季外均分别出现于1960s-1970s和2000s, 年际震荡趋势并不明显, 变异系数基本稳定在0.1以下水平。

3.2.2 PAR年代际变化

PAR的年代际变化特征见表2。年PAR各亚区变化趋势较为一致, 1960s-1970s为正距平, 说明前20年PAR相对偏高, 1970s距平值最大, 各子区排序依次为巴巫谷地($0.90 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) > 汉水流域($0.87 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) > 秦岭南坡($0.84 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$) > 秦岭以北($0.73 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 说明其是52年间PAR最大的10年; 1980s-2000s为负距平, 2000s距平值最大, 表明其是PAR最小的12年。

各季节PAR年代际变化规律不尽相同, 春季全区在1960s和1980s-1990s为负距平, 1970s和2000s为正距平, 其中1990s负距平最大, 2000s正距平最大; 夏季, 各亚区年代际变化规律较为一致, 1960s-1970s以及1990s PAR偏高, 其中1960s最高($2.83 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$), 1980s和2000s PAR偏低, 以2000s

最低; 秋季, 1960s-1990s均为正距平, 2000s为负距平, 其中以秦岭以北最大($-0.58 \text{ mol m}^{-2} \text{d}^{-1}$); 冬季PAR变化规律与年度基本一致, 前20年偏高, 1980s-2000s偏低, 同样以2000s最低。

3.2.3 PAR变化的空间差异

年和季节PAR变化趋势及空间分布见图4。年PAR有89%(42个)的站点下降, 且绝大部分达到0.01及以上显著水平, 各亚区下降站点所占比例排序为: 巴巫谷地(100%) > 汉水流域(93%) > 秦岭以北(86%) > 秦岭南坡(78%)。下降速率较大的站点由北向南依次为: 郑州($-0.91 \text{ mol}/10\text{a}$)、宝丰($-1.02 \text{ mol}/10\text{a}$)、信阳($-0.91 \text{ mol}/10\text{a}$)和天门($-0.81 \text{ mol}/10\text{a}$), 只有华山($0.11 \text{ mol}/10\text{a}$)、镇安($0.23 \text{ mol}/10\text{a}$)等5个站上升。

季节PAR变化方面, 春季PAR上升和下降的站点各占约50%, 各亚区倾向率依次为: 秦岭以北($0.12 \text{ mol}/10\text{a}$)、秦岭南坡($0.11 \text{ mol}/10\text{a}$)、汉水流域($0.10 \text{ mol}/10\text{a}$)和巴巫谷地($-0.21 \text{ mol}/10\text{a}$), PAR增加的站点集中于中西部部分地区; 夏季所有站点PAR减小, 各亚区倾向率排序依次为: 巴巫谷地($-1.32 \text{ mol}/10\text{a}$) > 汉水流域($-1.21 \text{ mol}/10\text{a}$) > 秦岭南坡($-1.12 \text{ mol}/10\text{a}$) > 秦岭以北($-0.91 \text{ mol}/10\text{a}$), 下降趋势均达到0.01以上显著水平, 秦岭以南区域下降趋势更为明显; 秋季79%的站点PAR下降, 各亚区减小速率排序为: 秦岭南坡($-0.29 \text{ mol}/10\text{a}$) > 秦岭以北($-0.21 \text{ mol}/10\text{a}$) = 巴巫谷地($-0.21 \text{ mol}/10\text{a}$) > 汉水流域($-0.19 \text{ mol}/10\text{a}$), 但均未达到显著水平, PAR增加的站点分布于中西部地区, 减少较大的站点位于东部地区; 冬季89%的站点PAR减小, 且大部分达到显著水平, 各亚区倾向率排序依次为: 巴巫谷地

表 2 1960s–2000s 秦岭南北地区季节和年均 *PAR* 的年代际距平/(mol m⁻²d⁻¹)

Tab. 2 Inter-decadal anomaly of the seasonal and annual *PAR*/(mol m⁻²d⁻¹)

in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960s–2000s

| 季节 | 年代 | 秦岭北坡 | 秦岭南坡 | 汉水流域 | 巴巫谷地 | 秦岭南北 |
|----|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 春季 | 1960s | −0.52 | −0.37 | 0.15 | 0.43 | −0.08 |
| | 1970s | −0.16 | 0.00 | 0.06 | 0.18 | 0.02 |
| | 1980s | −0.53 | −0.81 | −0.58 | 0.22 | −0.43 |
| | 1990s | −1.69 | −1.89 | −1.93 | −1.00 | −1.63 |
| | 2000s | 0.49 | 0.73 | 0.87 | 0.00 | 0.53 |
| 夏季 | 1960s | 2.36 | 3.20 | 3.10 | 2.65 | 2.83 |
| | 1970s | 2.47 | 2.59 | 2.64 | 2.48 | 2.54 |
| | 1980s | −0.57 | −1.39 | −1.87 | −1.36 | −1.30 |
| | 1990s | 2.64 | 2.44 | 1.75 | 1.72 | 2.14 |
| | 2000s | −1.74 | −1.70 | −1.80 | −2.40 | −1.91 |
| 秋季 | 1960s | 0.22 | 0.69 | 0.89 | 0.97 | 0.70 |
| | 1970s | 1.39 | 1.56 | 1.50 | 1.23 | 1.42 |
| | 1980s | 0.72 | 0.14 | −0.21 | −0.21 | 0.11 |
| | 1990s | 1.32 | 1.88 | 1.34 | 1.02 | 1.39 |
| | 2000s | −0.58 | −0.57 | −0.25 | −0.21 | −0.40 |
| 冬季 | 1960s | 0.57 | 1.00 | 1.29 | 1.16 | 1.01 |
| | 1970s | −0.06 | 0.42 | 0.45 | 0.50 | 0.33 |
| | 1980s | −0.09 | −0.23 | −0.35 | −0.09 | −0.19 |
| | 1990s | −0.43 | 0.29 | 0.14 | −0.27 | −0.07 |
| | 2000s | −1.68 | −0.60 | −0.45 | −0.79 | −0.88 |
| 年度 | 1960s | 0.55 | 0.78 | 1.10 | 1.10 | 0.88 |
| | 1970s | 0.73 | 0.84 | 0.87 | 0.90 | 0.83 |
| | 1980s | −0.18 | −0.76 | −0.96 | −0.53 | −0.61 |
| | 1990s | −0.17 | −0.05 | −0.32 | −0.51 | −0.26 |
| | 2000s | −0.93 | −0.81 | −0.69 | −0.96 | −0.85 |

(−0.52 mol/10a)>秦岭以北(−0.48 mol/10a)>汉水流域(−0.43 mol/10a)>秦岭南坡(−0.32mol/10a), 秦岭以南区域下降趋势更为明显。

3.3 *PAR* 突变特征分析

各站点 Pettitt 变点检测分析结果见图 5。年 *PAR* 89%的站点检测到 0.05 及以上显著水平的突变, 85%的突变集中发生于 1979-1983 年间, 其它突变时间为 1971-1973 年, 各亚区突变时间较为一致; 春季的突变现象不明显, 只有 32%(15 个)的站点检测到统计意义上的突变, 10 个站发生于 1979-1983 年间, 空间分布上无明显规律; 夏季, 89%的站点发生突变, 其中 90%发生于 1979-1983 年间, 突变时间与年度相比一致性较好; 秋季突变点较少, 仅占站点总数的 28%, 多数发生于 1979-1983 年间, 但空间上零散分布, 无明显规律可言; 冬季 68%的站点发生突变, 但突变时间同步性和一致性较差, 规律不

明显。

3.4 *PAR* 空间分布及其时空变化的归因分析

天文辐射、云量、大气气溶胶、气候变化等都可能对 *PAR* 造成影响, 根据本研究所采用的 *PAR* 的估算公式, 影响 *PAR* 的因子主要为天文辐射, 而天文辐射又是根据可能日照时数和日照时数估算得到, 因此, 这一部分重点就可能对日照时数和天文辐射造成影响自然原因和人为原因的进行分析。

3.4.1 *PAR* 时空差异的地理成因

(1) 秦岭南北地区多年平均 *PAR* 空间分布呈北高南低格局, 由北向南顺次递减, 秦岭以北最高, 巴巫谷地最低, 四季 *PAR* 排序为: 夏季>春季>秋季>冬季。这一空间分布格局与气候学规律相一致, 日照时数的多少受到纬度和海拔的共同影响。首先, 纬度低的地区正午太阳高度角大, 太阳辐射经过大气的的路程短, 被大气削弱得少, 到达地面的太阳辐

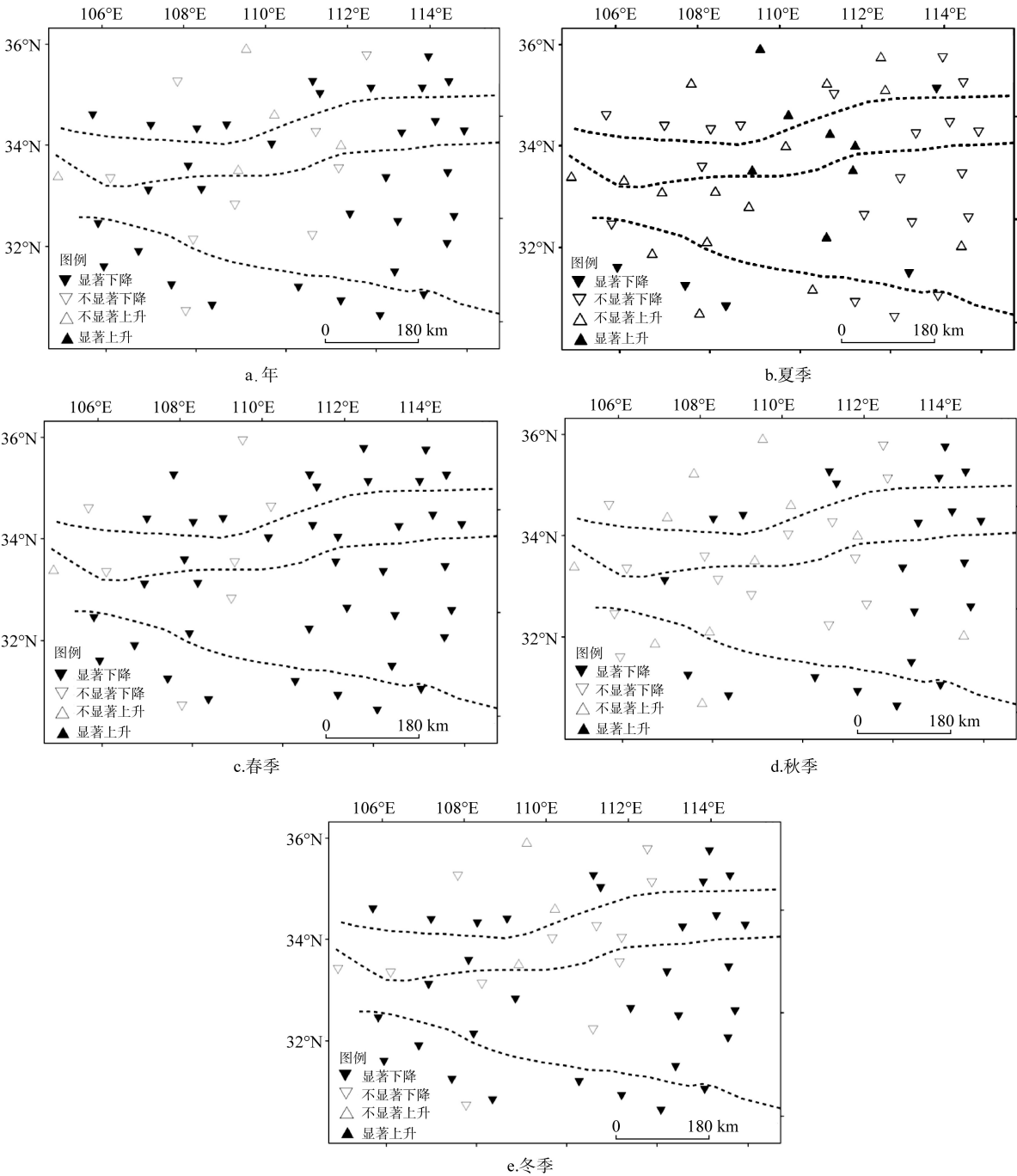


图4 1960-2011年秦岭南北地区年(a)和季节(b-e)平均 *PAR* 变化趋势的空间分布
Fig. 4 Distribution of annual (a) and seasonal (b-e) *PAR* variations
in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960-2011

射就强,反之则较弱;其次,海拔高的地区空气稀薄,大气对太阳辐射的削弱作用小,到达地面的太阳辐射强,反之则较弱。秦岭以北地处黄土高原,海拔较高,*PAR* 相对较大,而秦岭以南特别是秦岭与大巴山和米仓山之间的汉江谷地 *PAR* 较少;四川盆地一带海拔较低,阴雨天多,云量大,同时该区由于燃烧当地出产的高硫煤导致的大气污染日趋严

重,在夏季副热带高压控制下大气层结构稳定,气溶胶不易扩散,造成该区成为本区乃至全国的最低值(朱旭东等, 2010)。*PAR* 年际变化的东西部差异主要与东西部经济发达程度有关,东部人口密度大、经济较发达,空气污染严重,大气气溶胶浓度增速超过西部,因此总体上东部 *PAR* 年际变化率大于西部,下降速度较西部快(朱旭东等, 2010)。

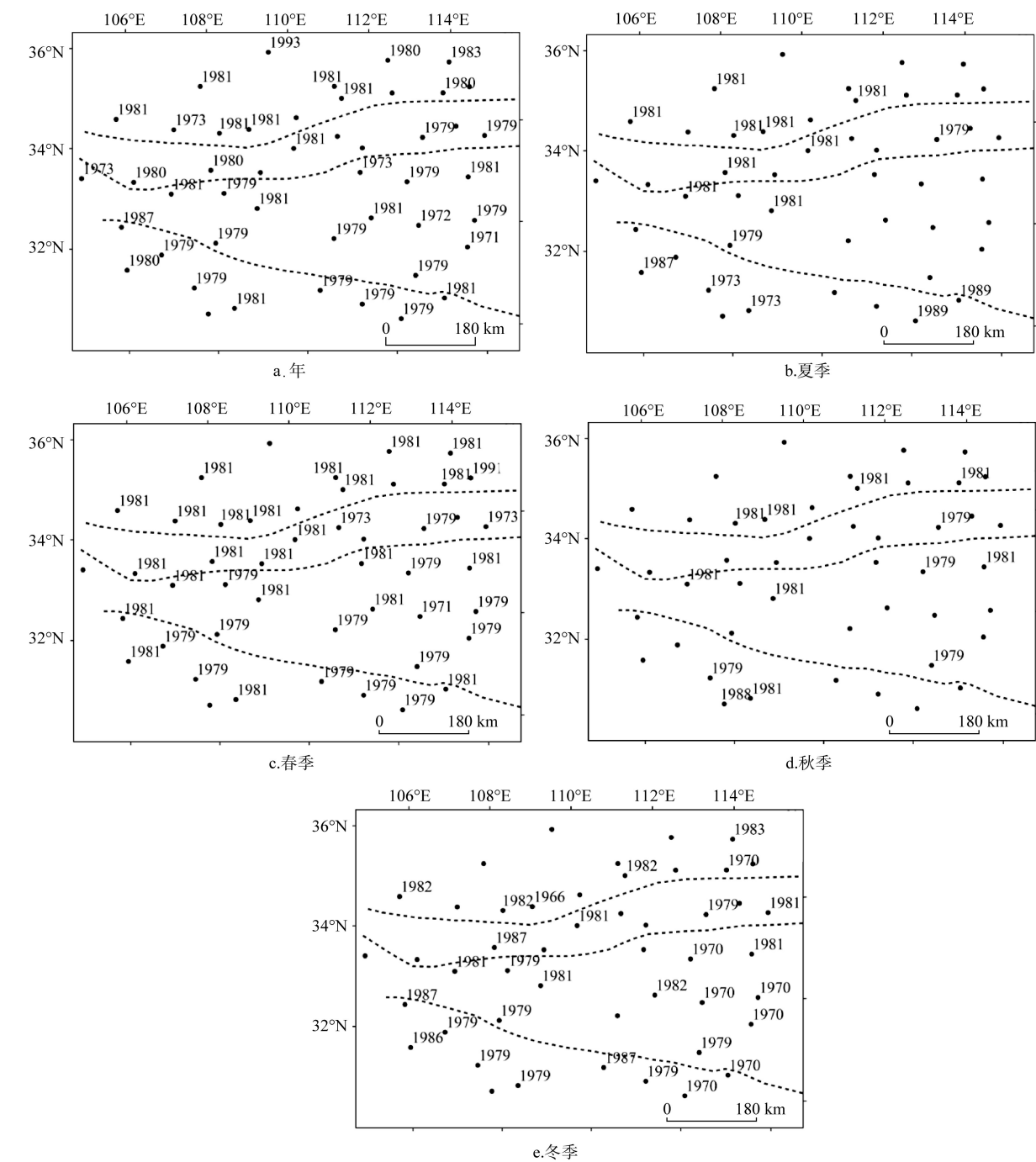


图5 1960-2011年秦岭南北地区年(a)和季节(b-e)平均PAR突变点的空间分布
Fig. 5 Spatial distribution of abrupt changes in annual(a) and seasonal(b-e) PAR in the northern and southern regions of Qinling Mountains during 1960-2011

3.4.2 PAR时空变化归因分析

(1) 天文辐射变化的影响

PAR是天文辐射和光合有效系数的乘积,天文辐射的变化必然导致PAR发生相应变化,Lean等(1997)的研究表明,在太阳11年的变化周期内,太阳常数的变化率仅为0.1%。因此,天文辐射的变化对PAR的变化影响非常小。

(2) 云量变化的影响

云量是影响太阳短波辐射达到地表的重要因素,云量的增加必然导致PAR降低。根据杜川利等(2012)的研究结果,过去60年华山站(高山站)云量持续减少,日照时数持续增加。而对于西安站(平原站)而言,虽然云量也是下降的,但日照时数不升反降。林忠辉等(2002)、曾昭美等(1993)的研究表

明,过去几十年中国大部分地区云量呈减少趋势,因此云量的变化并不能解释 *PAR* 的显著下降现象,云量变化也并不是导致秦岭南北地区 *PAR* 变化的主要因素。

(3) 气候变化的影响

将部分站点的 *PAR* 与可能影响其变化的各气候要素进行相关分析,主要包括降水、气温、风速和相对湿度等,以期找到 *PAR* 变化的气候学成因(见表3)。绝大部分站点 *PAR* 与风速正相关,风速减小则 *PAR* 减少;可能的解释是,由于风速减小,空气中的水汽和其他污染物扩散较慢,导致近地表气溶胶浓度增大,空气透明度降低。特别是在日出后和日落前,太阳高度角较低,太阳光线穿过大气的距离较长,太阳光线衰减严重,从而造成 *PAR* 大幅减少(贾金明等, 2007); *PAR* 与降水负相关,降水多的年份 *PAR* 小,降水少的年份 *PAR* 大。*PAR* 与相对湿度负相关,相对湿度较大不仅有利于形成云雾,还会导致大气透明度减小,两者都会导致 *PAR* 减少。但是,白晶(2011)、宋春英等(2011)、张立伟等(2011)的研究表明,近50年来秦岭南北地区降水和相对湿度均表现出不显著的下降趋势,而 *PAR* 却显著下降,因此降水和相对湿度并不是影响 *PAR* 变化的主要原因。

(4) 城市化进程的影响

前文分析显示,多数站点年尺度和季节尺度的 *PAR* 突变现象集中出现在1979-1983年间,且1960s-1970s *PAR* 稳定在较高水平,而1980s-2000s

特别是2000s *PAR* 持续偏低,这一现象可能受到城镇化进程加快的影响。我国主要城市于20世纪70年代末至80年代中期陆续开始改革开放,城市化进程加快(贾金明等, 2007),城镇建设规模逐渐扩大,观测站周围建筑物增多,障碍物高度角增大,日照计能记录到的日出时间偏晚,记录到的日落时间偏早(贾金明等, 2007)。贾金明等(2007)根据河南省濮阳市的观测记录推算,由上述原因导致的平均每天被遮挡的日照时数约为10.4 min,年累计日照时数减少63.3 h之多,约占1960s和1990s年平均日照时数差值的10.2%,而日照的减少也必然会导致 *PAR* 估算结果的减少。

(5) 大气气溶胶增加的影响

大气中的气溶胶主要来源于火山喷发和人类工业生产废弃物排放。近50年的火山喷发主要包括1963年Agung火山、1974年的Fuego火山、1982年的El-Chichon火山和1991年的Pinatubo火山,这几次喷发都与 *PAR* 有一定关联(图6)。本文检测到的突变点就有一部分出现于火山爆发后的1~2年内(图6)。1991年Pinatubo火山爆发后的3个月时间里,低纬度地区气溶胶达到峰值,北半球中纬度地区气溶胶在1992年5-6月达到峰值,这些气溶胶直接导致太阳总辐射降低(Minnis et al, 1993; Stowe et al, 1992),秦岭南北地区 *PAR* 在1991年后连续3年处于相对低值(图6)。但是,火山喷发只是偶然事件,近半个世纪以来特别是改革开放以来工业化的飞速发展所

表3 秦岭南北各站点 *PAR* 与不同气象因子的相关系数
Tab.3 Correlation coefficients between *PAR* and meteorological factors
in the northern and southern regions of Qinling Mountains

| 站 点 | 平均气温 | 相对湿度 | 降水量 | 平均风速 | 站 点 | 平均气温 | 相对湿度 | 降水量 | 平均风速 |
|-----|---------|----------|----------|---------|-----|----------|----------|----------|---------|
| 安 康 | 0.526** | -0.613** | -0.363** | 0.381** | 三门峡 | 0.211 | -0.610** | -0.382** | 0.522** |
| 宝 丰 | -0.003 | -0.499** | -0.252 | 0.707** | 商 县 | 0.413** | -0.609** | -0.408** | 0.335* |
| 房 县 | 0.413** | -0.381** | -0.299* | 0.313* | 石 泉 | 0.570** | -0.659** | -0.513** | 0.428** |
| 佛 坪 | -0.192 | -0.600** | -0.404** | 0.403** | 天 水 | -0.003 | -0.266 | -0.395** | 0.476** |
| 汉 中 | -0.078 | -0.150 | -0.118 | 0.048 | 万 源 | 0.392** | -0.567** | -0.367** | 0.228 |
| 华 山 | 0.477** | -0.606** | -0.517** | 0.194 | 武 都 | 0.628** | -0.338* | -0.563** | 0.394** |
| 老河口 | -0.264 | -0.100 | -0.273 | -0.222 | 西 峡 | 0.456** | -0.443** | -0.259 | 0.331* |
| 卢 氏 | 0.332* | -0.226 | -0.397** | 0.156 | 枣 阳 | -0.249 | -0.160 | -0.152 | 0.748** |
| 栾 川 | 0.466** | -0.310* | -0.253 | 0.122 | 镇 安 | 0.109 | -0.489** | -0.438** | 0.429** |
| 略 阳 | 0.353* | -0.587** | -0.376** | 0.359* | 郑 州 | -0.441** | 0.019 | -0.344* | 0.613** |
| 孟 津 | 0.087 | -0.105 | -0.006 | 0.326* | 钟 祥 | -0.292* | 0.024 | -0.191 | 0.739** |
| 南 阳 | -0.029 | -0.234 | -0.221 | 0.701** | | | | | |

注:“**”表示相关关系达到0.01显著水平,“*”表示相关关系达到0.05显著水平。

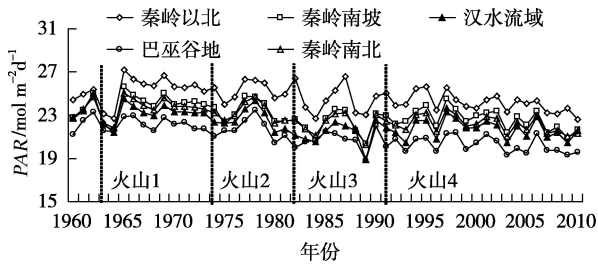


图6 秦岭南北地区年 PAR 变化趋势与火山活动的关系

Fig. 6 Change trend of annual and seasonal PAR in different sub-regions of Qinling Mountains

导致的气溶胶增多才是 PAR 显著下降的主要原因,而火山爆发引发的气溶胶增加则是 PAR 波动的主要原因。

4 结论

(1) 秦岭南北地区 PAR 呈现北高南低的空间分布格局,按 PAR 大小排序依次为:秦岭以北>秦岭南坡>汉水流域>巴巫谷地,各季节按 PAR 大小排序为:夏季>春季>秋季>冬季。春季、秋季和冬季的 PAR 空间分布规律与年度结论基本一致,夏季 PAR 排序为:秦岭南坡>汉水流域>巴巫谷地>秦岭南坡。

(2) 1960-2011年间秦岭南北地区 PAR 显著下降,由南向北,由东向西下降速率递减。除春季呈现出不显著的上升趋势外,其余季节均下降,按下下降速率排序依次为:夏季>冬季>秋季。各亚区 PAR 极大值和极小值除冬季外均分别出现于1960s~1970s和2000s,年际震荡趋势并不剧烈。年 PAR 89%的站点下降;春季 PAR 上升和下降的站点各占约50%,上升的站点集中于中西部部分地区;夏季全区所有站点减小,秦岭以南区域下降尤为明显;秋季79%的站点下降,增加的站点分布于中西部地区;冬季全区 PAR 显著下降,秦岭以南区域下降趋势尤为明显。

(3) 年 PAR 89%的站点检测到0.05及以上显著水平的突变,85%的突变集中发生于1979-1983年间,各子区突变时间较为一致;夏季,89%的站点检测到突变,其中90%发生于1979-1983年间,与年度突变一致性较好;冬季68%的站点发生突变,但突变时间同步性和一致性较差,规律不明显。春季和秋季的突变现象不明显,空间分布上无明显规律可言。

(4) 气候变化(风速下降)、城市化进程加快以及

工业生产废弃物排放导致的气溶胶增多是 PAR 显著下降的主要原因,而火山爆发引发的气溶胶增加则是 PAR 波动的主要原因。

参考文献(References)

- Allen R G, Pereira L S, Rae D, et al. 1998. Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO.
- Angstrom A. 1924. A Solar and terrestrial radiation. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 50(1): 121-125.
- Bai J. 2011. Climate change and driving force of human activities in the north and south region of Qinling Mountain [D]. Xi'an, China: Shaanxi Normal University. [白晶. 2011. 秦岭南北气候变化特征及人为驱动力差异分析 [D]. 西安: 陕西师范大学.]
- Bai J H, Wang G C. 2004. The calculating method of photosynthetically active radiation in the Inner Mongolia grassland. Research of Environmental Sciences, 17(6): 15-18. [白建辉, 王庚辰. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法. 环境科学研究, 17(6): 15-18.]
- Cao M K, Prince S D, Tao B, et al. 2005. Regional pattern and interannual variations in global terrestrial carbon uptake in response to changes in climate and atmospheric CO_2 . Tellus Series B-Chemical and Physical Meteorology, 57 (3): 210-217.
- Dong T F, Meng J H, Wu B F, et al. 2011. Overview on the estimation of photosynthetically active radiation. Progress in Geography, 30(9): 1125-1134. [董泰锋, 蒙继华, 吴炳方, 等. 2011. 光合有效辐射(PAR)估算的研究进展. 地理科学进展, 30(9): 1125-1134.]
- Du C L, Yu X, Li X M, et al. 2012. Analysis on cloudiness change in Qinling Mountain region and its possible reason in past 60 years. Plateau Meteorology, 31(5): 446-455. [杜川利, 余兴, 李兴敏, 等. 2012. 过去60年中国秦岭地区云量变化及原因分析. 高原气象, 31(5): 446-455.]
- Graham E A, Mulkey S S. 2003. Cloud cover limits net CO_2 uptake and growth of a rainforest tree during tropical rainy seasons. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 10(2): 572-576.
- He H L. 2004. Study on spatialization of solar radiation in China [D]. Beijing, China: Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS. [何洪林. 2004. 中国陆地区域太阳辐射要素空间化研究 [D]. 北京: 中国科学院地理科学与资源研究所.]
- Hu B, Wang Y, Liu G. 2007. Spatiotemporal characteristics of photosynthetically active radiation in China. Journal of Geophysical Research, 12(6): 12-19.

- Hutchinson M F, Gessler P E. 1994. Splines is more than just a smooth interpolator. *Geoderma*, 62(1): 45-67.
- Jia J M, Wu J H, Xu Q Z, et al. 2007. Features of sunshine duration variation and its cause analysis. *Meteorological Science and Technology*, 35(5): 655-660. [贾金明, 吴建河, 徐巧真, 等. 2007. 河南日照变化特征及成因分析. *气象科技*, 35(5): 655-660.]
- Lean J. 1997. The sun's variable radiation and its relevance for earth. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 35(1): 33-67.
- Li X W, Li W L, Zhou X J. 1998. Analysis of the solar radiation variation of China in recent 30 years. *Journal of Applied Meteorological Science*, 9(1): 24-31. [李晓文, 李维亮, 周秀骥. 1998. 中国近30年太阳辐射状况研究. *应用气象学报*, 9(1): 24-31.]
- Lin Z H, Mo X G, Li H X. 2002. Comparison of three spatial interpolation methods for climate Variables in China. *Acta Geographica Sinica*, 57(1): 47-56. [林忠辉, 莫兴国, 李宏轩. 2002. 中国陆地区域气象要素的空间插值. *地理学报*, 57(1): 47-56.]
- Liu X A, Fan L S, Wang Y H, et al. 2002. The calculation methods and distributive character of solar radiation in Liaoning Province. *Resources Science*, 24(1): 82-87. [刘新安, 范辽生, 王艳华, 等. 2002. 辽宁省太阳辐射的计算方法及其分布特征. *资源科学*, 24(1): 82-87.]
- Minnis P, Harrison E F, Stowe L L, et al. 1993. Radiative climate forcing by the Mount Pinatubo Eruption. *Science*, 259: 1411-1415.
- Monteith J L. 1972. Solar-radiation and productivity in tropical ecosystems. *Journal of Applied Ecology*, 9(3): 747-766.
- Monteith J L. 1977. Climate and efficiency of crop production in Britain. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*, 28(8): 277-294.
- Pettitt A N. 1979. A non-parametric approach to the change point problem. *Applied Statistics*, 28(2): 126-135.
- Song C Y, Yan J P, Zhang L W. 2011. Temporal and spatial trends of drought and flood in the south and north of the Qinling Mountains in Shaanxi Province. *Arid Zone Research*, 28(6): 944-949. [宋春英, 延军平, 张立伟. 2011. 陕西秦岭南北旱涝灾害时空变化趋势分析. *干旱区研究*, 28(6): 944-949.]
- Stowe L L, Carey R M, Pell P P. 1992. Monitoring the Mt. Pinatubo aerosol layer with NOAA/11 AVHRR data. *Geophysical Research Letter*, 19(2): 159-162.
- Van P, Sanchez A G. 2005. Mapping PAR using MODIS atmosphere products. *Remote Sensing of Environment*, 94(4): 554-563.
- Xia C Z, Xiong L Y, Zhuang D F, et al. 2004. MODIS-based approach to estimate terrestrial gross photosynthesis. *Progress in Geography*, 23(4): 10-18. [夏朝宗, 熊利亚, 庄大方, 等. 2004. 基于MODIS的陆地植被光合过程参数反演研究. *地理科学进展*, 23(4): 10-18.]
- Yu G R, He H L, Liu X A, et al. 2004. Atlas for spatialized information of terrestrial ecosystem in China: Volume of climatological elements. Beijing, China: China Meteorological Press. [于贵瑞, 何洪林, 刘新安, 等. 2004. 中国陆地生态系统空间化信息研究图集: 气候要素分卷. 北京: 气象出版社.]
- Zeng Z M, Yan Z W. 1993. An analysis of cloudiness in China during 1950-1988. *Scientia Atmospherica Sinica*, 17(6): 688-696. [曾昭美, 严中伟. 1993. 近40年中国云量变化的分析. *大气科学*, 17(6): 688-696.]
- Zhang L W, Yan J P, Geng H J. 2011. The shifts of annual average temperature and precipitation belts in the south and north region of Qinling Mountains, Shaanxi Province. *Journal of Shaanxi Normal University: Natural Science Edition*, 39(6): 81-85. [张立伟, 延军平, 耿慧娟. 2011. 陕西秦岭南北年均气温及降水量带的移动. *陕西师范大学学报: 自然科学版*, 39(6): 81-85.]
- Zhang X Z, Zhang Y G, Zhou Y H. 1997. Climatological estimation of photosynthetically active quantum value on Qinghai-Xizang Plateau from April to October. *Acta Geographical Sinica*, 52(4): 361-365. [张宪洲, 张谊光, 周允华. 1997. 青藏高原4月-10月光合有效量子值的气候学计算. *地理学报*, 52(4): 361-365.]
- Zhang Y L, Qin B Q. 2002. The basic characteristic and climatological calculation of the photosynthetically available radiation in Taihu Region. *Acta Energiae Solaris Sinica*, 23(1): 118-123. [张运林, 秦伯强. 2002. 太湖地区光合有效辐射(PAR)的基本特征及其气候学计算. *太阳能学报*, 23(1): 118-123.]
- Zhou Q, Bian J J, Zheng J Y. 2011. Variation of air temperature and thermal resources in the northern and southern regions of the Qinling Mountains from 1951 to 2009. *Acta Geographica Sinica*, 66(9): 1211-1218. [周旗, 卞娟娟, 郑景云. 2011. 秦岭南北1951-2009年的气温与热量资源变化. *地理学报*, 66(9): 1211-1218.]
- Zhu X D, He H L, Liu M, et al. 2010. Spatio-temporal variation characteristics of photosynthetically active radiation in China in recent 50 Years. *Acta Geographica Sinica*, 65(3): 270-280. [朱旭东, 何洪林, 刘敏, 等. 2010. 近50年中国光合有效辐射的时空变化特征. *地理学报*, 65(3): 270-280.]

Distribution and change of Photosynthetically Active Radiation (PAR) in the northern and southern regions of Qinling Mountains, China

JIANG Chong^{1,3}, ZHU Feng³, YANG Chen³, WANG Fei^{1,2}, MU Xingmin^{1,2}, LI Rui^{1,2}

(1. College of Resources and Environment, Northwest A & F University, Yangling 712100, China;

2. Institute of Soil and Water Conservation, CAS and Ministry of Water Resources, Yangling 712100, China;

3. State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875, China)

Abstract: Based on 52-year (1960-2011) daily data from 47 meteorological stations in the northern and southern regions of Qinling Mountains, the annual and seasonal Photosynthetically Active Radiations (PAR) were calculated with equations of Angstrom and FAO Penman-Monteith. The spatial distribution, change trends and their causes were analyzed and detected with spatial analysis method of spline interpolation, Pettitt abrupt change point detection method and correlation analysis between *PAR* and relative factors. The results were as followed: (1) the *PAR* became weaker from north part to south part, i.e. from northern region of Qinling Mountains (NQ), to southern region of Qinling Mountains (SQ), to Han River Basin (HB) and to Valleys of Ba and Wu Mountain Areas (VBW). *PAR* in summer was the highest, followed by spring, autumn and winter. The distribution of *PAR* in spring, autumn and winter showed the same spatial pattern as annual *PAR*, but in summer, *PAR* in NQ is also the highest, then HB and VBW, and SQ being the lowest one. (2) *PAR* declined significantly in past 52a, the declining rates became smaller from south and east part to north and west part of this region. Except for an insignificant increase in spring, *PAR* decreased in other seasons, and the rate in summer was fastest, followed by that in winter and autumn. The maximum and minimum *PAR* appeared in 1960s-1970s and 2000s respectively in spring, summer and autumn. There were almost half of stations showing an increase of *PAR* mainly in west and central parts, and the other half stations showing decrease in spring. *PAR* of 79% of stations decreased in autumn, and the increasing stations were also located in west and central parts. *PAR* in summer and winter declined in most stations, and the decreasing rate was bigger in south part of Qinling Mountains than in north part. (3) 89% of stations had abrupt change points of yearly and summer *PAR*, and about 85% and 90% of them happened between 1979 and 1983, respectively. There were no obvious abrupt change points in spring or autumn. (4) Climate change (wind speed declining), fast urbanization and more aerosol emission from industrial production were the main reasons for the continuous decline of *PAR*, and the aerosol emitted from volcanoes was the main reason for fluctuation of *PAR*.

Key words: Photosynthetically Active Radiation(PAR); spatial distribution; change trend; abrupt change point; the northern and southern regions of the Qinling Mountains