

周连童. 欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的时空变化特征 [J]. 大气科学学报, 2010, 33 (3): 299-306

Zhou Lian-tong Characteristics of temporal and spatial variations of sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia [J]. Trans Atmos Sci, 2010, 33 (3): 299-306

欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的时空变化特征

周连童

(中国科学院 大气物理研究所 季风系统研究中心, 北京 100190)

摘要: 利用 1958—2002 年 ERA-40 再分析感热通量资料进行 EOF 分析, 结果显示, 无论春季还是夏季, 欧亚大陆干旱半干旱区感热通量都有 3 个主模态。第 1 模态都表示空间分布的一致性, 20 世纪 70 年代中后期开始, 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量明显增强, 而夏季却明显减弱。第 2、3 模态表示了空间分布的不一致性, 且存在年际、年代际变化特征。小波分析结果表明, 欧亚大陆春、夏季感热通量存在明显的年际、年代际变化特征, 且年代际变化信号强于年际变化信号。

关键词: ERA-40 再分析资料; 感热通量; EOF 分析; Morlet 小波

中图分类号: P468 **文献标识码:** A **文章编号:** 1674-7097 (2010) 03-0299-08

Characteristics of Temporal and Spatial Variations of Sensible Heat Flux in the Arid and Semi-arid Region of Eurasia

ZHOU Lian-tong

(Center for Monsoon System Research, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

Abstract: Based on the ERA-40 reanalysis data of sensible heat flux during 1958—2002, the characteristics of temporal and spatial variations of summer and spring sensible heat flux in Eurasia (including Middle Asia, Mongolia and Northwest China) are analyzed by use of EOF and Morlet wavelets analysis methods. The results show that there are three principal spatial patterns of sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia in spring or summer. The first pattern shows the space consistency of sensible heat flux in the region of Eurasia, in which the sensible heat flux obviously increases in spring, but markedly decreases in summer from the middle and late of 1970s. The second and third patterns show spatial heterogeneity of sensible heat flux in the region of Eurasia with interannual and interdecadal variabilities. Besides, the Morlet wavelets results show that the sensible heat flux are dominated by interannual and interdecadal variabilities in spring and summer, and the signal of interdecadal variability is more significant than that of interannual variability.

Key words: ERA-40 reanalysis data; sensible heat flux; EOF analysis; Morlet wavelets

0 引言

20 世纪 90 年代, 在世界气候研究计划 (WCRP) 之下制定了全球能量和水分循环试验计划

(Global Energy and Water Cycle Experiment, 简称 GEWEX), 全球能量和水分循环试验计划的主要任务是观测、了解、模拟大气—陆地—海表的水分、热量交换和循环及其对气候的影响。这个试验的实施

收稿日期: 2009-11-24; 改回日期: 2010-03-25

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40905027; 40730952), 中国科学院知识创新工程重要方向项目 (KZCX2-YW-220); 国家重点基础研究发展规划项目 (2009CB421405); 中国科学院大气物理研究所青年人才领域前沿项目 (AP07414)

作者简介: 周连童 (1974—), 男, 北京人, 博士, 副研究员, 研究方向为气候年代际变化及其机理, zlt@mail.iap.ac.cn

对提高全球热量、水分循环、降水和蒸发的认识具有重要作用;通过该试验可提高气候的数值预测水平,并为合理利用水资源提供科学依据。而干旱半干旱区能量则是这一试验计划重要的研究内容之一。这是当今我国地球系统研究的前沿科学问题。此项目的研究将促进我国关于地球系统的研究,也有利于地学的学科交叉和学科新生长点的培养。

国内外很多学者对于陆面过程的研究取得很多进展。Chamey^[1]最早利用 GCM 研究陆面过程的敏感性,开创性地提出了生物—地球物理反馈机制。土壤湿度对于气候变化也有着显著的响应^[2-3],表面粗糙度以及植被也对气候变化有着显著的响应^[4-6]。但是对于欧亚大陆干旱半干旱区的气候变化的问题关注还较少^[7-8]。在 2005 年的 IPCC 报告中很少有关于欧亚大陆干旱半干旱区气候变化对全球变化的潜在响应的讨论^[9]。而要研究陆面过程对气候的影响,从宏观上看首先是地气温差和感热通量。因此,本研究将分析欧亚大陆感热通量的时空变化特征。近几年对于我国西北干旱半干旱区的陆面过程的研究取得了一些进展,范丽军等^[10]通过分析敦煌观测试验资料,指出西北干旱区的地面感热主要取决于地气温差。Wei 等^[11]、周连童和黄荣辉^[12]分析西北地区春季地温差自 20 世纪 70 年代后期开始增强。Zhou^[13]、Zhou 等^[14]、周连童和黄荣辉^[15]利用观测资料进一步计算并分析了西北地区感热通量的年代际变化,认为西北地区春季感热通量从 20 世纪 70 年代后期开始明显增强,从而影响局地及周边地区的环流异常和降水异常^[15-17]。此外,高荣等^[18]利用数值模式模拟了西北地区感热异

常影响局地及周围的大气环流异常。周德刚等^[19]分析了西北地区下垫面参数的特征。但是,由于之前的研究都是利用观测台站资料计算的结果,所以会受到资料不全的限制,对于整个欧亚大陆的干旱半干旱区而言,还缺乏许多台站资料,因此,有必要利用再分析资料去分析整个欧亚大陆感热通量的变化特征。布和朝鲁等^[20]利用 NCEP/NCAR 再分析资料研究了夏季欧亚大陆的陆面感热通量分布,指出夏季我国干旱半干旱区在整个欧亚大陆上是陆面感热通量最强的区域之一。周长春等^[21]利用再分析资料分析了中亚地区感热异常对我国西北地区降水的影响。Zhou 和 Huang^[22]、周连童^[23]的研究结果表明,相比 NCEP/NCAR 再分析资料,ERA-40 再分析感热通量资料与观测资料计算得到的感热更加接近,因此,本文将利用 ERA-40 再分析资料^[24-25]分析欧亚大陆感热通量的时空变化特征。

1 欧亚大陆感热通量的气候平均值

图 1a 和 1b 分别表示春、夏季欧亚大陆感热通量气候平均值(1958—2002 年平均)。在春季(图 1a),我国西北地区和华北地区以及蒙古国南部都出现很强的感热通量中心,且在河套以西地区的感热通量数值达到 70 W/m^2 以上。西亚、中亚部分地区也出现很强的感热中心。在夏季(图 1b),我国西北地区和蒙古国南部以及中亚地区都出现很强的感热通量中心,最大感热通量数值达到 90 W/m^2 以上。

综上所述,无论春、夏季,ERA-40 再分析资料都可以在我国西北干旱区显示出很强的感热通量中

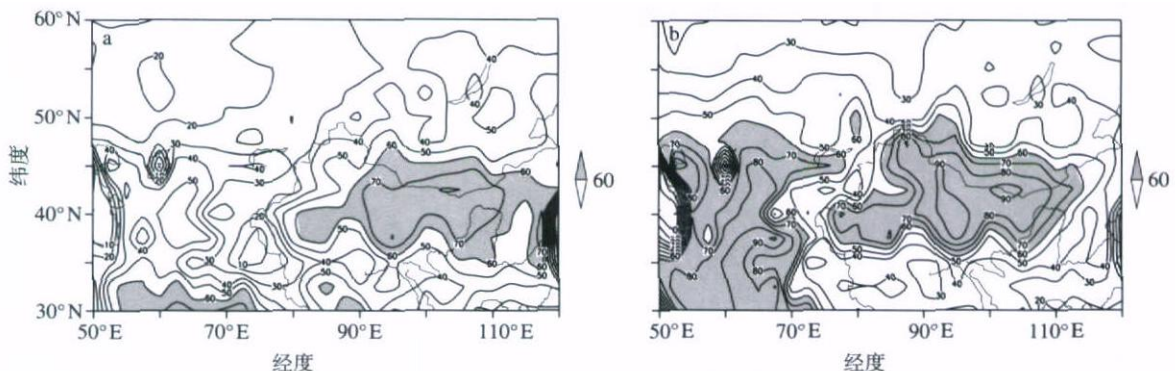


图 1 欧亚大陆春季(3—5月;a)、夏季(6—8月;b)感热通量的气候平均值(取 1958—2002 年平均作为气候平均值;阴影区大于 60 W/m^2 ;单位: W/m^2)

Fig 1 The climatological mean of (a) spring(MAM) and (b) summer(JJA) sensible heat fluxes in Eurasia(The climatological mean is based on the period of 1958—2002; the areas more than 60 W/m^2 are shaded; units: W/m^2)

心。中亚地区在夏季也显示出很强的感热通量中心。也就是说欧亚大陆干旱半干旱区是很强的感热中心之一,因此,欧亚大陆可以称为“热垫”。

2 欧亚大陆春、夏季感热通量的逐年变化特征

为了研究欧亚大陆大尺度范围的感热通量异常,本研究选取中亚、蒙古国和我国西北干旱半干旱区感热通量最强的区域(55~110 E, 35~50 N)作为研究对象。

图 2a 和 2b 分别为 1958—2002 年 55~110 E, 35~50 N 区域平均的春、夏季感热通量距平逐年变化。从 20 世纪 70 年代中期开始,欧亚大陆春季感热通量距平大部分年份高于平均值,这说明此区域春季感热通量开始增强,但是从 90 年代后期开始,感热通量有减弱的趋势(图 2a)。但是在夏季(图 2b),从 20 世纪 60 年代后期开始,欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量减弱,大部份年份的感热通量距平低于平均值,特别是从 80 年代后期开始,夏季感热通量持续减少。

综上所述,欧亚大陆春、夏季感热都存在着明显的年代际变化特征,春季感热通量从 20 世纪 70 年代后期开始增强,而夏季感热通量从 20 世纪 80 年代开始明显减弱。

3 欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的时空变化特征

本节采用经验正交函数(EOF)分解方法分析欧

亚大陆(包括中亚、蒙古国南部和我国西北地区)干旱半干旱区(55~110 E, 35~50 N)春、夏季感热通量的时空变化特征。EOF 分析又称为主分量分析或主成份分析,用来研究气象场主导的时空变化型^[26]。EOF 分析可以表示主要的几个时空变化型,最大可能地解释原始数据的方差变化。

3.1 春季感热通量的时空变化特征

图 3a 和 3b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区春季(3—5 月)感热通量的 EOF 第 1 模态及其时间系数(第 1 模态的方差贡献占 17.25%)。EOF 第 1 模态(图 3a)表明,我国西北地区和中亚地区为正值,只有咸海和里海的海表为负值,即欧亚大陆感热通量变化基本一致,且我国西北地区和中亚地区分别是很强的感热中心。第 1 模态时间系数的变化(图 3b)与图 2a 所示的春季感热通量距平变化基本一致,从 20 世纪 70 年代中期开始,时间系数大部分为正值,即欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量从 20 世纪 70 年代中期开始增强,90 年代后期开始出现减弱趋势。

图 4a 和 4b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 第 2 模态及其时间系数(第 2 模态的方差贡献占 9.68%)。我国西北地区出现感热通量负信号,中亚地区出现感热通量正信号,EOF 的第 2 模态呈现出东西反相的变化特征(图 4a),即我国西北区春季感热通量增强(减弱),而中亚地区春季感热通量减弱(增强)。从时间系数的变化中可以看出,春季感热通量存在着明显的 3~5 a 年际变化特征(图 4b)。

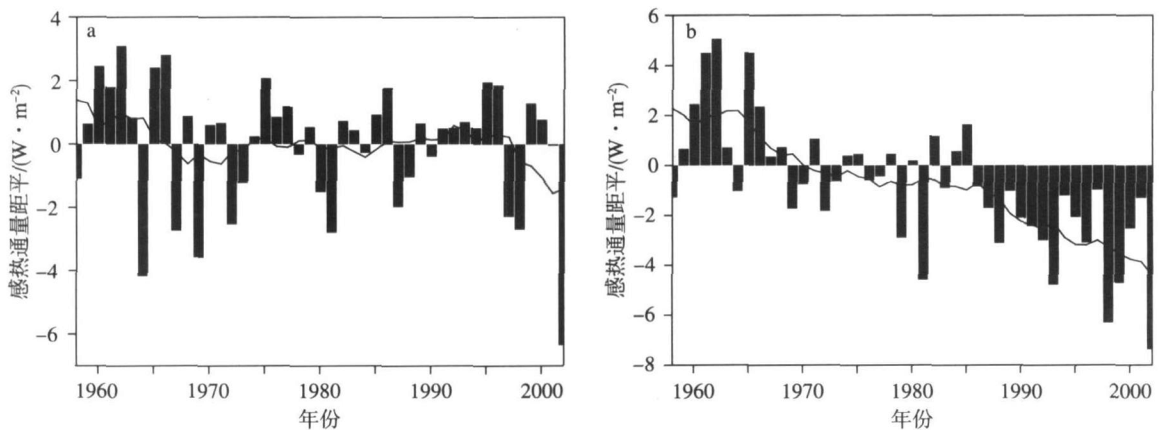


图 2 春季(a)、夏季(b)感热通量距平(55~110 E, 35~50 N 平均)的逐年变化(取 1958—2002 年平均值作为气候值;实线为 9 a 平滑曲线;单位:W/m²)

Fig 2 The time series of (a) spring and (b) summer sensible heat flux anomalies averaged over 35—50 N, 55—110 E (The climatological mean is based on the period of 1958—2002; the curves are 9-yr running means; units: W/m²)

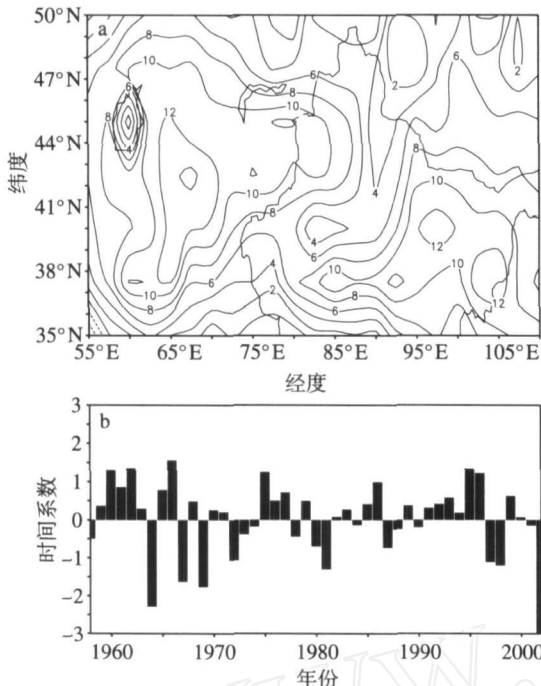


图 3 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 第 1 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 3 (a) The first EOF mode and (b) its time coefficient of spring sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

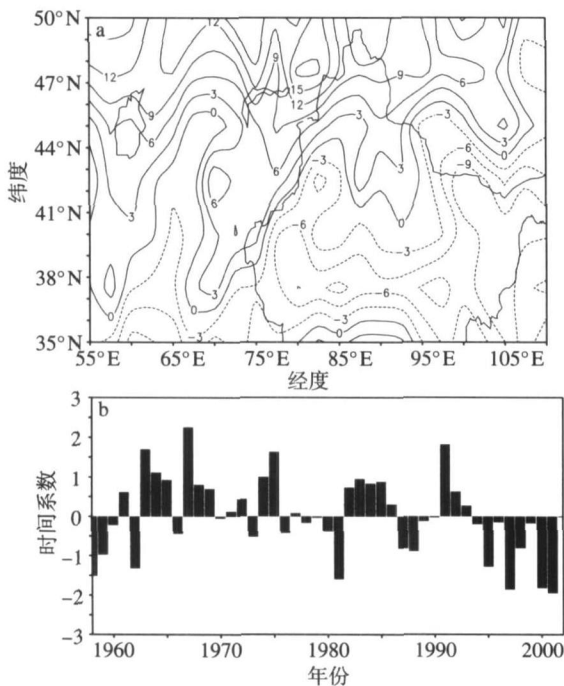


图 4 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 第 2 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 4 (a) The second EOF mode and (b) its time coefficient of spring sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

图 5a 和 5b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 第 3 模态及其时间系数 (第 3 模态的方差贡献占 8.70%), EOF 的第 3 模态呈现出欧亚大陆从东到西的正、负、正、负的空间分布 (图 5a), 即我国西北地区和中亚地区分别存在东西反相的变化特征。从时间系数可以发现, 从 20 世纪 80 年代后期开始春季感热通量异常明显转变为负信号, 这说明春季感热第 3 模态存在明显的年代际变化特征 (图 5b)。

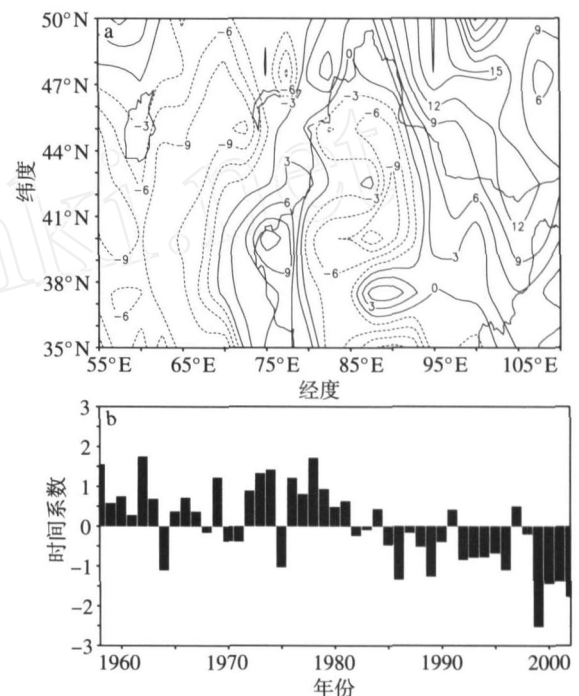


图 5 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 第 3 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 5 (a) The third EOF mode and (b) its time coefficient of spring sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

综上所述, 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量存在着 3 种空间模态分布, 第 1 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量空间分布的一致性; 第 2 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区感热通量呈现东西反相变化特征; 第 3 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区感热通量从东至西呈现出正、负、正、负的空间分布。第 2、3 模态表示了欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的空间分布不一致性。此外, 第 1、3 模态显示了春季感热通量明显的年代际变化特征, 而第 2 模态春季感热通量的年际变化特征更加明显。

3.2 夏季感热通量的时空变化特征

图 6a 和 6b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 第 1 模态及其时间系数 (第 1 模

态的方差贡献占 14.96%)。EOF第 1 模态表明,我国西北地区和 中亚地区均为负值(图 6a),即其空间分布呈现出我国西北地区与中亚地区感热通量变化基本一致;从图 6b 可以看到,时间系数从 20 世纪 70 年代后期开始跃变为正值,即欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量从 20 世纪 70 年代中期开始减弱。这与欧亚大陆春季感热通量的变化趋势相反。

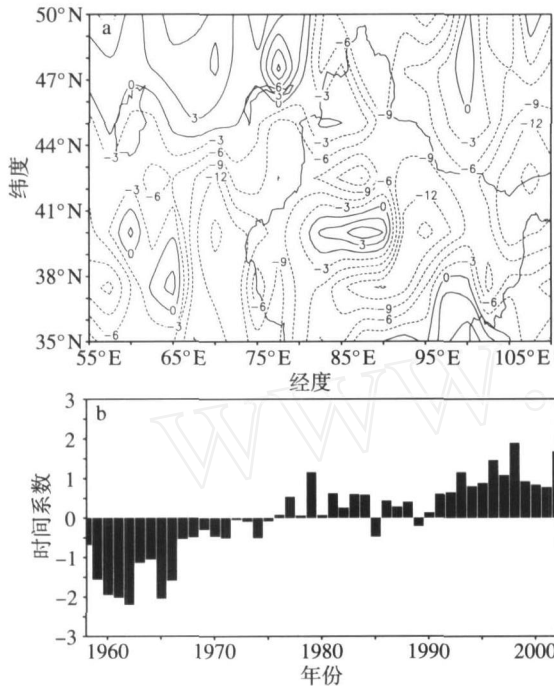


图 6 欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 第 1 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 6 (a) The first EOF mode and (b) its time coefficient of summer sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

图 7a 和 7b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量距平的 EOF 第 2 模态及其时间系数(第 2 模态的方差贡献占 12.73%), EOF 的第 2 模态表明,我国西北地区和蒙古国南部地区是负值,中亚地区是正值(图 7a),即第 2 模态呈现出东西反相的变化特征,我国西北区和蒙古国南部地区夏季感热通量增强(减弱),而中亚地区夏季感热通量减弱(增强)。图 7b 表明,时间系数在 20 世纪 60 年代大部分为负值,而 70 年代到 80 年代中后期为正值,但从 80 年代中后期开始转变为负值。第 2 模态显示出欧亚大陆夏季感热存在着 10 a 左右的年代际变化特征。

图 8a 和 8b 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 第 3 模态及其时间系数(第 3 模态的方差贡献占 8.28%), EOF 的第 3 模态表明,我

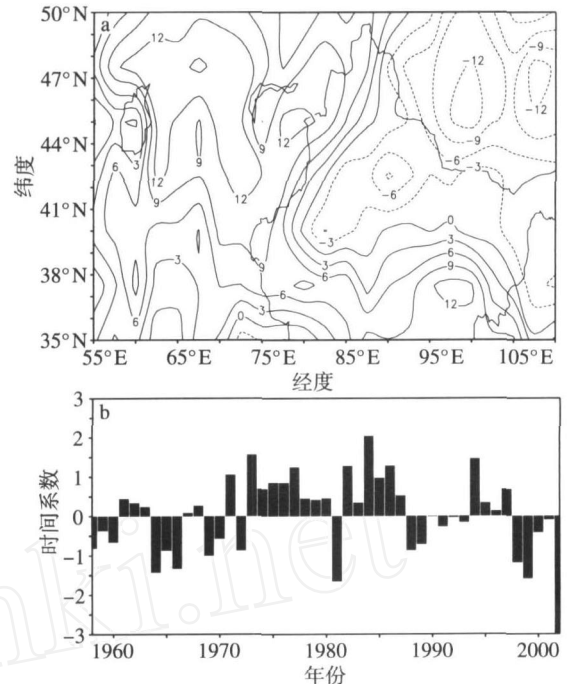


图 7 欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 第 2 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 7 (a) The second EOF mode and (b) its time coefficient of summer sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

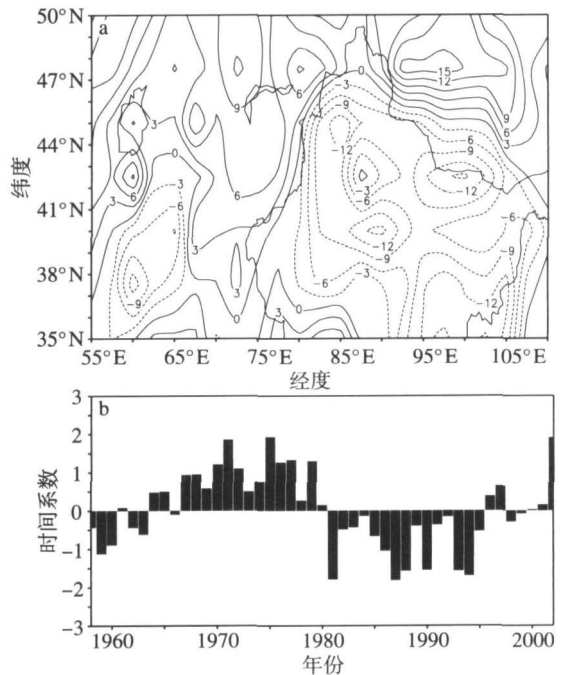


图 8 欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 第 3 模态 (a) 及其时间系数 (b)

Fig 8 (a) The third EOF mode and (b) its time coefficient of summer sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia

国西北地区为负值,而中亚地区为正值(图 8a),即第 3 模态也呈现出我国西北干旱半干旱区与中亚地区出现东西反相的变化特征。从图 8b 可以看到,时间系数从 20 世纪 80 年代开始跃变为负值,说明第 3 模态显示出欧亚大陆夏季感热存在非常明显的年代际变化。

综上所述,欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量存在着 3 种空间模态分布,第 1 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量空间分布的一致性;第 2、3 模态均表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量出现东西反相的变化特征;第 2、3 模态表示出欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的空间分布不一致性;第 1、2 和 3 模态均有很明显的年代际变化特征。

4 欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的周期分析

4.1 春季感热通量的周期分析

为了更清楚地分析欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的周期变化,利用 Morlet 小波方法^[27]对 EOF 第 1、2、3 模态的时间系数作 Global 波谱分析。图 9a-c 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区春季感热第 1、2、3 模态时间系数的 Global 波谱。从图 9a 可以发现,欧亚大陆干旱半干旱区的春季感热通量的第 1 模态存在着 4、16 和 33 a 的周期,其值均通过 95% 的信度检验,最显著的是 16 a 左右的周期。从图 9b 可以发现,第 2 模态时间系数的 Global 波谱数值通过 95% 的信度检验的有 4、8、22 和 50 a 的周期,最显著的是 22 a 的周期。从图 9c 可以发现,第 3 模态时间系数的 Global 波谱分布存在着 3、16、33 和 50 a 周期,且均通过 95% 的信度检验,最显著的是 50 a 的周期,但本研究的数据总共才 45 a,所以 50 a 的周期变化是不存在的。因此,33 a 的周期变化是最显著的。

从上述 Morlet 小波 Global 波谱分析结果可以发现,春季 3 个模态的时间系数均存在 4 a 左右和 10 a 以上的周期变化,表明欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量存在着年际和年代际变化特征,且年代际变化的信号强于年际变化的信号。

4.2 夏季感热通量的周期分析

图 10 a-c 分别表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热第 1、2 和 3 模态时间系数的 Global 波谱。从图 10 a 可以发现,欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量第 1 模态存在着 3、16、33 和 50 a 的周期,它们均

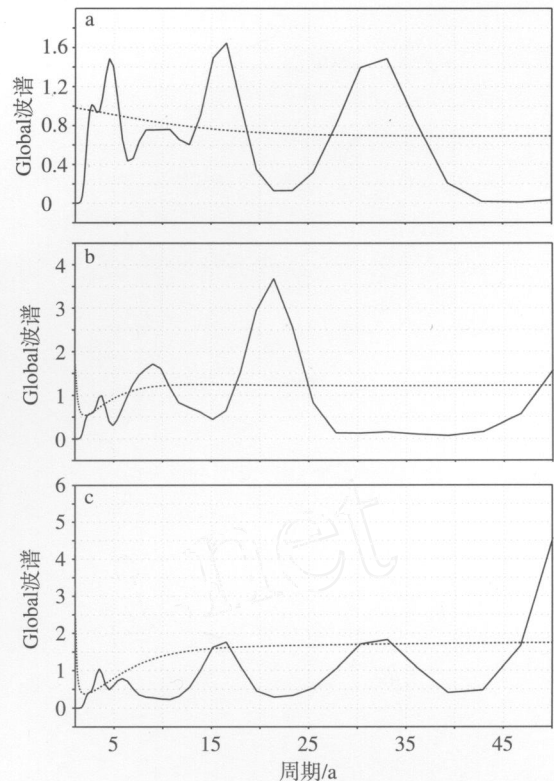


图 9 欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量的 EOF 分析的第 1(a)、第 2(b) 和第 3(c) 模态时间系数的 Global 波谱(实线表示 Global 波谱,虚线表示通过 95% 信度检验)

Fig 9 The Global spectrum of the Morlet wavelets from (a) the first, (b) second and (c) third EOF time coefficients of spring sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia (The solid line indicates the Global spectrum, and the dash line above 95% confidence level)

通过 95% 的信度检验。但由于数据的时间尺度只有 45 a,所以 16 a 左右的周期变化较合理。由图 10b 可发现,欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量第 2 模态通过 95% 的信度检验的有 3、11 和 33 a 的周期变化,最显著的是 33 a 的周期。由图 10c 可以发现,欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量第 3 模态存在着 3、6 和 33 a 的周期,均通过 95% 的信度检验,最显著的周期是 33 a。

从上述 Morlet 小波 Global 波谱分析结果可以发现,欧亚大陆夏季感热通量的 3 个模态时间系数均存在 3 a 左右和 10 a 以上的周期,表明欧亚大陆干旱半干旱区的夏季感热通量也存在着年际和年代际变化特征,且其年代际变化的信号也强于年际变化的信号。

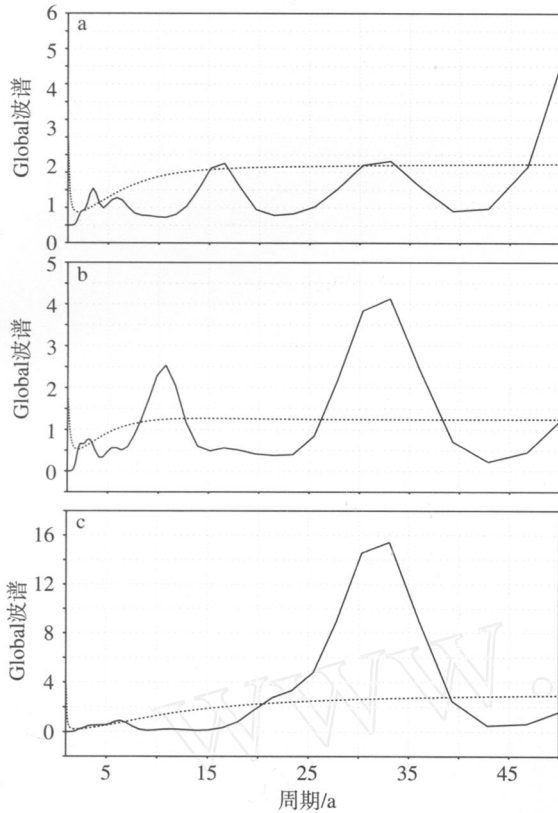


图 10 欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量的 EOF 分析的第 1(a)、第 2(b)和第 3(c)模态时间系数的 Global 波谱 (实线表示 Global 波谱,虚线表示通过 95% 信度检验)

Fig 10 The Global spectrum of the Morlet wavelets from (a) the first, (b) second and (c) third EOF time coefficients of summer sensible heat flux in the arid and semi-arid region of Eurasia (The solid line indicates the Global spectrum, and the dash line above 95% confidence level)

5 结论

利用 1958—2002 年 ERA-40 再分析资料,分析了欧亚大陆春、夏季感热通量的时空变化特征及周期变化,结果如下:

(1)感热通量气候分布表明,欧亚大陆(包括中亚、蒙古国南部和我国西北干旱半干旱区)是强感热通量中心之一,可称之为欧亚大陆的“热垫”。

(2)欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量存在着 3 种空间模态。第 1 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区春季感热通量空间分布的一致性,且在 20 世纪 70 年代后期出现增强的变化趋势。第 2 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的东西反相变化特征。第 3 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区感热通量

从东至西的正、负、正、负分布。第 2、3 模态表示出欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的空间分布不一致性,且第 1、3 模态的感热通量显示出明显的年代际变化特征,第 2 模态的年度变化更明显。

(3)欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量也存在着 3 种空间模态分布,第 1 模态表示欧亚大陆干旱半干旱区夏季感热通量空间分布的一致性,且在 20 世纪 70 年代后期出现减弱的变化趋势;第 2、3 模态均表示欧亚大陆干旱区夏季感热通量的东西振荡特征;第 2、3 模态表示出欧亚大陆干旱半干旱区感热通量的空间分布不一致性;第 1、2 和 3 模态有很明显的年代际变化特征。

(4)Morlet 小波 Global 波谱分析结果显示,春季、夏季欧亚大陆感热通量主要存在 4 a 左右和 10 a 以上的周期变化,即存在年际和年代际变化特征,且年代际变化信号强于年际变化信号。

参考文献:

- [1] Charey J G Dynamics of deserts and drought in the Sahe1[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 1975, 101 (428): 193-292
- [2] Miyakoda K, Strickler R F. Cumulative results of extended forecast experiment III Precipitation [J]. Mon Wea Rev, 1981, 109 (4): 830-842.
- [3] Shukla J, Mintz Y. Influence of land surface evaporation on the earth's climate [J]. Science, 215 (4539): 1498-1501.
- [4] 周德刚, 黄荣辉, 黄刚. 近几十年来长江上游气候和植被覆盖的变化 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (3): 377-385.
- [5] Sud Y C, Smith W E. The influence of surface roughness of deserts on the July circulation—A numerical study [J]. Bound Layer Meteor, 1985, 33 (1): 15-49.
- [6] Sud Y C, Smith W E. Influence of local surface processes on the India monsoon—A numerical study [J]. J Climate Appl Meteor, 1985, 24 (10): 1015-1036.
- [7] Piliřosova O V, Eserkepova I B, Dolgih S A. Regional climate change scenarios under global warming in Kazakhstan [J]. Climatic Change, 1997, 36: 23-40.
- [8] Lioubintseva E, Cole R, Adams J M, et al. Impacts of climate and land-cover changes in arid lands of Central Asia [J]. Journal of Arid Environments, 2005, 62: 285-308.
- [9] Intergovernmental Panel on Climate Change. Special report on climate change in the past/Government Review [R/OL]. 2005 [2009-10-08]. <http://www.ipcc.ch/>.
- [10] 范丽军, 韦志刚, 董文杰. 西北干旱区地气温差的时空特征分析 [J]. 高原气象, 2004, 23: 360-367.
- [11] Wei Zhigang, Fan Lijun, Huang Ronghui, et al. The correlation analysis between the spring ($T_s - T_a$) in the arid region in northwest China and Chinese summer rainfall [C] // International workshop on the air-land interaction in arid and semi-arid areas and its impact on climate (IWALD), Dunhuang-City, Gansu

- Province, China, 17-21 August, 2002. 2002: 182-185.
- [12] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区春季地气温差的年代际变化特征及其对华北夏季降水年代际变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 2006, 11 (1): 1-13.
- [13] Zhou Liantong. Difference in the interdecadal variability of spring and summer sensible heat fluxes over Northwest China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2009, 2 (2): 119-123.
- [14] Zhou Liantong, Wu Renguang, Huang Ronghui. Variability of surface sensible heat flux over Northwest China [J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2010, 3 (2) (待发表).
- [15] 周连童, 黄荣辉. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. 大气科学, 2008, 32 (6): 1276-1288.
- [16] Zhou Liantong, Huang Ronghui. The interdecadal variability of summer rainfall in Northwest China and its possible causes [J]. Int J Climatol, 2010, 30: 549-557, doi: 10. 1002/joc. 1923.
- [17] 周连童. 华北地区夏季降水的年际变化特征 [J]. 大气科学学报, 2009, 32 (3): 412-423.
- [18] 高荣, 董文杰, 韦志刚. 西北干旱区感热异常对中国夏季降水影响的模拟 [J]. 高原气象, 2008, 27 (2): 320-324.
- [19] 周德刚, 黄刚, 马耀明. 我国西北典型戈壁下垫面夏季热力输送特征研究 [J]. 大气科学学报, 2010, (待发表).
- [20] 布和朝鲁, 纪立人, 崔茂常. 夏季我国干旱、半干旱区陆面过程能量平衡及其局地大气环流 [J]. 气候与环境研究, 2002, 7: 61-73.
- [21] 周长春, 高晓清, 陈文, 等. 中亚感热异常对我国西北温度、降水的影响 [J]. 高原气象, 2009, 28 (2): 395-401.
- [22] Zhou Liantong, Huang Ronghui. An assessment of the quality of surface sensible heat flux derived from reanalysis data through comparison with station observations in Northwest China [J]. Adv Atmos Sci, 2010, 27 (3): 500-512, doi: 10. 1007/s00376-009-9081-8.
- [23] 周连童. 比较 NCEP/NCAR 和 ERA-40 再分析资料与观测资料计算得到的感热资料的差异 [J]. 气候与环境研究, 2009, 14 (1): 9-20.
- [24] Gibson J K, Kallberg P, Uppala S, et al. ERA-40 description [R] // ECMWF reanalysis project report series 1, ECMWF, Reading, 1997: 66. [Available from ECMWF, Reading RG2 AX, United Kingdom.]
- [25] Uppala S. ECMWF reanalysis, 1957—2001, ERA-40 [R] // ERA-40 project report series 3 workshop on reanalysis 2002: 1-10.
- [26] Jolliffe I T. Principal component analysis [M]. Aberdeen: Springer-Verlag, 1986: 290.
- [27] Torrence C, Webster P J. Interdecadal changes in the ENSO-Monsoon System [J]. J Climate, 1999, 12: 2679-2690.

(责任编辑:倪东鸿)