

权全,初宇星,钟德钰,2020.黄河源区重力波势能值计算及其与降水量关系的分析[J].气象与减灾研究,43(3):203-209.
Quan Quan, Chu YuXing, Zhong Deyu, 2020. Calculation of potential energy of gravity wave in the source region of the Yellow River and analysis of its relationship with precipitation[J]. Meteorology and Disaster Reduction Research,43(3):203-209.

黄河源区重力波势能值计算及其与降水量关系的分析

权 全^{1,2}, 初宇星¹, 钟德钰²

1. 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
2. 青海大学 三江源生态与高原农牧业国家重点实验室, 青海 西宁 810016

摘要: 本文基于 1960—2016 年的降水量数据分析了黄河源区降水量的分布特征, 并利用 COSMIC 掩星数据计算得到 2008 年黄河源区的重力波势能值(Potential Energy, E_p), 分析其变化特征, 进而运用小波相干分析法探究黄河源区重力波势能值与降水量的相关性。结果表明: 1) 黄河源区多年平均降水量受海拔高度影响显著。2) 对不同月份每一不同高程下的 E_p 值进行分析, 得到 2008 年黄河源区重力波势能值随海拔高程及季节的变化趋势。3) 在 2008 年黄河源区呈现出: 冬夏两季降水量存在较大差异, 而重力波势能值同样存在明显的季节性差异, 且与逐月平均降水量具有负相关的趋势。此现象是由于山坡地形的动力抬升作用影响和重力波对湿润气流的拖曳作用影响在不同时段占优。4) 黄河源区重力波和降水有着显著相关性, 降水对于重力波有着很好的响应。

关键词: 重力波, 六阶巴特沃斯滤波器, 小波相干, 黄河源区

中图分类号: P228 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-9033(2020)03-0203-07

doi: 10.12013/qxyjzyj2020-028

Calculation of Potential Energy of Gravity Wave and Its Relationship with Precipitation in the Source Region of the Yellow River

Quan Quan^{1,2}, Chu YuXing¹, Zhong Deyu²

1. State Key Laboratory Base of Eco-hydraulic Engineering in Arid Area, Xi'an University of Technology, Xi'an 710048, China
2. State Key Laboratory of Plateau Ecology and Agriculture, Qinghai University, Xining 810016, China

Abstract: Based on the precipitation data from 1960 to 2016, this paper analyzes the distribution characteristics of precipitation in the source area of the Yellow River, and calculates the potential energy (EP) of gravity wave in the source area of the Yellow River in 2008 by using cosmic occultation data, analyzes its variation characteristics, and then uses the wavelet coherence analysis method to explore the correlation between the potential energy of gravity wave and precipitation in the source area of the Yellow River. The results show that: 1) the precipitation in the source region of the Yellow River is significantly affected by altitude. 2) By analyzing the EP value of each elevation in different months, the variation trend of the potential energy value of gravity wave with elevation and season in the source area of the Yellow River in 2008 is obtained. 3) In 2008, the source region of the Yellow River showed a large difference in precipitation in winter and summer, while the potential energy value of gravity wave also had a significant seasonal difference, and had a negative correlation with the monthly average precipitation. This phe-

收稿日期: 2020-06-09; 修订日期: 2020-08-13.

基金项目: 2017 年国家重点研发项目(编号: 2017YFC0403600)

作者简介: 权 全, 博士, 副教授, 主要从事生态水文学及全球水循环模拟, E-mail: 329685471@qq.com.

nomenon is due to the influence of the dynamic uplift of the hillside terrain and the drag effect of the gravity wave on the moist air flow. 4) There is a significant correlation between gravity wave and precipitation in the source area of the Yellow River, and precipitation has a good response to gravity wave.

Key words: gravity wave; sixth order Butterworth filter; wavelet coherence; source area of Yellow River

0 引言

众所周知,降水要在充分必要的条件下产生。自 20 世纪以来,越来越多的国内外学者都致力于对气候变化响应敏感带降水的研究(李锐等,2020)。在影响降水的因子中,地形因素是不可忽视的重要因子。地形对降水的影响主要包括:地形重力波、迎风坡动力抬升、背风坡拖曳、地形云的播撒效应、以及地形上游阻滞对对流的触发等。目前地形对降水影响的研究主要集中在迎风坡的动力抬升和背风坡拖曳方面,很难将湿润气流遇到山坡地形到饱和降水的全过程中将地形的影响量化出来。所以,地形的量化对研究降水的驱动具有重要价值。前人研究表明,重力波为存在于大气中,是一种振荡,且在稳定大气结构中传播,受空气重力和热压力共同作用产生回复力,重力波能够很好地反映地形在降水过程中的影响。重力波的参数化一直是研究的关键,艾凯等(2016)和井宇等(2019)运用中尺度 WRF 模型进行敏感性分析完成地形重力波的参数化,具有一定的适用性。杨遵勋(2018)运用无线电技术和探空仪,结合 Lomb-Scargle 谱分析和矢量曲线成功提取出平流层重力波。王宇虹(2016)在 GRAPES_Meso 模式中通过次网格模拟方案模拟了青藏高原的地形重力波拖曳特征。近十年来,随着空间科学和火箭技术的迅速发展,卫星观测在各个领域得到了广泛应用,随着 2006 年 COSMIC 卫星成功发射,我国已经建立了一个较为完整的气象电离层气候观测系统。由于其观测数据在平流层有更好的数据精度、垂直分辨率以及数据密度,COSMIC 卫星数据更加适用于重力波的研究,也出现了许多利用掩星数据反演的方法提取重力波,目前常用的掩星数据反演提取重力波的方法:第一种是去除纬向波数为 0—6 的大尺度行星波法。这种方法以网格为基本单位,其理论依据是默认卫星测量到的温度数据包含背景温度、行星波成分、重力波成分,去掉除重力波成分外的其他数值的剩余数值即可代表重力波活动强度(于道成和徐晓华,2019)。缺点是其得到的某些残差不能准确表示重力波的数值大小和活动强度,往往需要对残差进行进一步的修正(金双根等,

2020);第二种方法是滤波器法,即运用多种滤波器测量垂直结构,残差视为温度扰动(徐桂荣等,2016)。此方法的一个明显缺点是它不能完整的过滤掉垂直波长范围在 3—10 km 内的行星波(王一洲等,2019)。因此,这两种方法的提取结果都存在一定误差。

文中选取 2008 年 1—12 月 CDAAC 提供的 COSMIC 近实时数据产品下的 Level 2 数据资料,选择滤波器的方法用于提取黄河源区的重力波势能值,并开展黄河源区降水与重力波的相关分析。目的在于探究重力波和降水之间存在的内在联系,以期对黄河源区重力波参数化研究以及降水驱动力分析提供参考。

1 研究区域介绍

1.1 黄河源区概况

研究区域($32^{\circ}12'—35^{\circ}48'N$, $95^{\circ}50'—103^{\circ}28'E$)位于青藏高原的东北部,总面积为 $121\,972\text{ km}^2$,约占黄河全流域总面积的 15%,河流长度约为 1 553 km,径流来源主要为夏秋两季的源区降水,年平均径流量为 $2.05 \times 10^{10}\text{ m}^3$,约占黄河径流总量的 35%,有着黄河“水塔”之称(王亚迪,2020)。该地区气候寒冷,属半干旱半湿润气候,暖季短冷季长,具有青藏高原气候系统明显特征(Hu Y et al, 2011)。该地区海拔由西南向东北递减,最高海拔位于阿尼玛卿雪山,为 6 253 m,最低海拔为 2 448 m,位于源区北部附近。该地区由于平均海拔较高,气候恶劣寒冷,人口稀疏,区域水文受人类活动的影响有限,主要受气候变化影响。图 1 位研究区域位置及雨量站分布。分析可知,茶卡、兴海、贵南、同德和同仁雨量站分布于源区北部,平均海拔为 3 068 m;河南、郎木寺、若尔盖、红原、久治和班玛雨量站分布于源区东部,平均海拔为 3 492 m;其余雨量站分布于源区西部,平均海拔为 4 137 m。

2 数据来源与研究方法

2.1 数据来源

COSMIC (Constellation Observation System for Meteorology Inosphere and Climate) 是气象电

离层气候观测系统,由美国跟台湾联合发射。6 颗卫星在初始高度为 512 km 且相互非常接近的轨道上运行,每颗卫星每天能够发生的掩星事件次数大概为 3 000 个,平均每天能够获得的大气温度剖线约 2 000 个。紧密相连的 COSMIC 卫星探测群极大提高了中尺度大气过程的研究,例如重力波、锋面和热带气旋。文中在水平上采用最小二乘法拟合滤除温度扰动,利用六阶巴特沃斯带通滤波器对得到的残差进行滤波,进而提取研究区域的重力波参数并进行分析。掩星数据来源 <https://cdaac-www.cosmic.ucar.edu/> 网站。1960—2016 年黄河源区逐日降水量资料来源于中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>),并对原始资料进行插值整理,得到新的序列降水量数据。

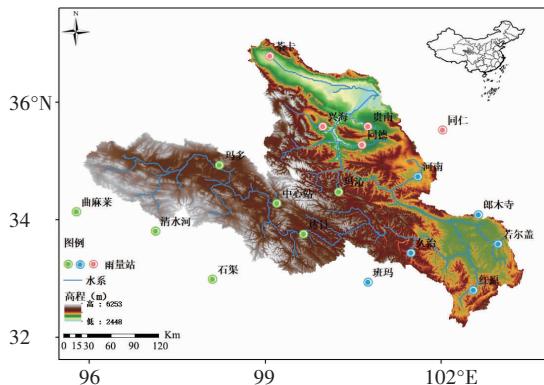


图 1 研究区域和雨量站分布

Fig. 1 Study area and rainfall station distribution

2.2 研究方法

2.2.1 重力波势能值计算方法

1) 背景温度廓线的获取方法

第一步消除卫星数据的相位误差。卫星数据可在网站上获取,在下载前要对研究区域进行空间和时间进行选取,由于卫星视场的不同会引起相位误差,故采用最小采样距离来避免,计算式为

$$\Delta x_{min} = 70 + 30 \cdot \cos(2\varphi) \quad (1)$$

其中, Δx_{min} 为最小水平采样距离; φ 为纬度。

第二步提取温度廓线。将下载好的黄河源区($25^{\circ}\text{--}40^{\circ}\text{N}, 70^{\circ}\text{--}100^{\circ}\text{E}$)的数据整理并得到若干条温度廓线,并把每一条廓线进行垂向插值。文中采用的方法是在干温假设条件下获取温度剖线,因在干温假设条件下获取的温度廓线能够代表大部分高度的实际大气温度,但在 5 km 以下的范围内,由于干温假设条件获取的温度廓线与实际的大气温度差异很大,故选择插值高程为 10—50 km,插值间隔为

0.2 km。

第三步清洗廓线。在数据收集的过程中,无法避免的会受到外界噪声影响,故需要清洗第二步得到的网格温度廓线,以此消除噪声影响。文中采用基于正态分布的清洗廓线方法,孙正宇(2020)和郭增冰等(2020)利用基于正态分布的滑动平均滤波法,有效抑制了过高或过低的噪声,曲线平滑度也得到了提升。基于正态分布的清洗廓线方法其理论基础是正态分布在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 之外的事件发生概率不到 0.3%, 清洗廓线即除去在 $(\mu - 3\sigma, \mu + 3\sigma)$ 之外的温度廓线,称之为 3σ 原则。对每一条高程廓线按 3σ 原则进行清洗,去除不满足 3σ 原则的所有廓线。对文中网格温度廓线,即将高程处于 10—50 km 的温度廓线进行清洗,将超出 $[-10^{\circ}\text{C}, 10^{\circ}\text{C}]$ 的温度廓线剔除。

第四步背景温度廓线的获取。对清洗后的廓线数据求平均,得到一条平均温度廓线,对该平均温度廓线进行窗口长度为 l 的滑动平均,确定滑动窗口的长度 l 的计算式为(胡芳凝等,2019)

$$W_c = \frac{f_c}{f_s} = \frac{1}{0.32 + 2.21l} \quad (2)$$

其中, W_c 为分频值; f_c 为滤波截止频率; f_s 为采样频率。选取窗口长度为 4 km, 对平均温度廓线进行滑动平均,进一步得到该网格的背景温度廓线 T_B 。

2) 温度扰动计算方法及滤波方法

背景温度廓线获取后,进一步计算温度扰动 T' 。对于滤波后重力波引起的温度扰动 T' ,采用垂直滑动窗法进行求解,即认为实测的大气温度由两部分构成,一部分是稳定的背景温度 T_B ,另一部分是由重力波引起的温度扰动 T' ,采用大气实测温度 T 减去背景温度 T_B ,得到温度扰动 T' ,即

$$T' = T - T_B \quad (3)$$

采用这种求温度扰动的方法在理论上已经证实可行,如梁晨(2014)和徐晓华等(2016)均采用这种计算温度扰动的方法并最终成功提取出重力波势能值,说明该方法在理论操作上可行。

值得注意的是,求得的温度扰动 T' 虽然已经去除水平行星波,但其垂直尺度上仍然含有长波行星波的各种噪音和外界影响,故必须对求得的 T' 进行垂直方向的滤波才能得到可靠的温度扰动。文中采取六阶巴特沃斯带通滤波器的方法进行滤波。考虑到 CDAAC 所能测得的重力波垂直波长不大于 10 km,并且在 40 km 处的垂直分辨率大于 1 km,因此选用的带通滤波器波长范围在 3—10 km。

3) 重力波势能值的计算

由上述获取的背景温度和滤波后的温度扰动 T' 计算重力波势能值, 计算式为

$$E_p = \frac{1}{2} \left(\frac{g}{N} \right)^2 \left(\frac{T'}{T_B} \right)^2 \quad (4)$$

其中, $g = 9.8 \text{ m/s}^2$; T_B 为经过平均后的背景温度廓线; N 为浮力频率; T' 为滤波后重力波引起的温度扰动。

浮力频率由平均后的背景温度求得, 计算式为

$$N^2(z) = \frac{g}{T_B} \left(\frac{\partial T_B}{\partial z} + \frac{g}{c_p} \right) \quad (5)$$

其中, $c_p = 1.005 \times 10^3 \text{ J/(kg} \cdot \text{k)}$; z 为高度, 单位为 m 。

2.2.2 小波相干

小波相干谱可以用来衡量两个时间序列在时频空间的局部相关性的紧密程度。即使交叉小波功率谱处于低能区, 二者在小波相干谱中的紧密程度也可能非常显著(段鹏硕等, 2014)。定义两个时间序列 X 和 Y 的小波相干谱为

$$R_n^2(S) = \frac{|S(S^{-1}W_n^{XY}(S))|^2}{S(|S^{-1}W_n^X(S)|^2) \times S(|S^{-1}W_n^Y(S)|^2)} \quad (6)$$

其中, S 为平滑器。其定义为

$$S(W) = S_{\text{scale}} \{S_{\text{time}} [W_n(S)]\} \quad (7)$$

其中, S_{scale} 表示小波坐标尺度平滑; S_{time} 表示时间尺度平滑。

Morlet 小波平滑器有

$$S_{\text{scale}}(W) |_S = (W_n(S) \times c_1^{\frac{2S-t^2}{2}}) |_S \quad (8)$$

$$S_{\text{time}}(W) |_S = (W_n(S) \times c_2 \parallel (0.6S)) |_S \quad (9)$$

其中, c_1, c_2 表示标准化常数; \parallel 表示矩形函数。

3 结果分析

3.1 黄河源降水量特征分析

图 2 给出了黄河源区 1960—2016 年降水量与海拔的关系。分析可知, 在源区北部, 平均海拔为 3 068 m, 对应的年平均降水量为 379 mm; 在源区东部, 平均海拔为 3 492 m, 对应的年平均降水量为 682 mm; 而在源区西部, 平均海拔为 4 137 m, 对应的年平均降水量为 478 mm。表明源区降水量从北部向东部随海拔升高而增加, 自东向西随海拔升高而降低, 可见源区降水量与海拔和地形存在着密切的联系, 源区降水量受海拔高度影响显著(蓝永超等, 2016)。Attaullah 和 Shuanggen (2018) 提出在

海拔 17—24 km 处重力波势能值(E_p)大多与地形波有关。因此文中选取 2008 年黄河源区的降水量和 17—24 km 处重力波势能值(E_p)进行研究。

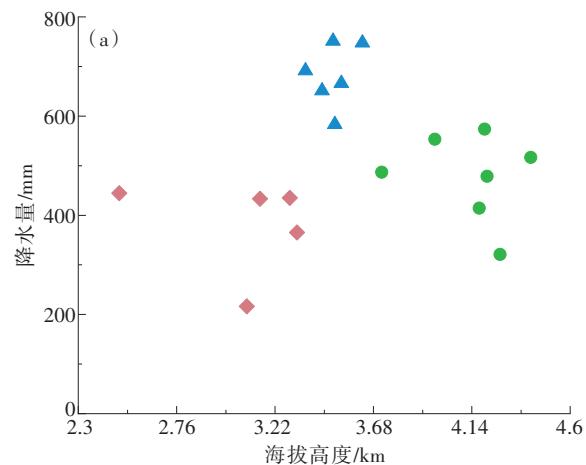


图 2 黄河源区 1960—2016 年降水量与海拔的关系

Fig. 2 The relationship between precipitation and altitude in the source region of the Yellow River from 1960 to 2016

图 3 给出了 2008 年黄河源区逐月平均降水量。分析可知, 黄河源区各月的降水量均较小, 全年降水不断且降水量最小值事件发生在 12 月, 为 0.69 mm; 最大值事件发生在 7 月, 为 105.22 mm。降水量的大小存在明显的季节性差异, 冬季降水较少, 冬季月平均降水量为 7 mm 左右, 夏季月平均降水量达到 85 mm, 冬、夏降水存在较大差异。

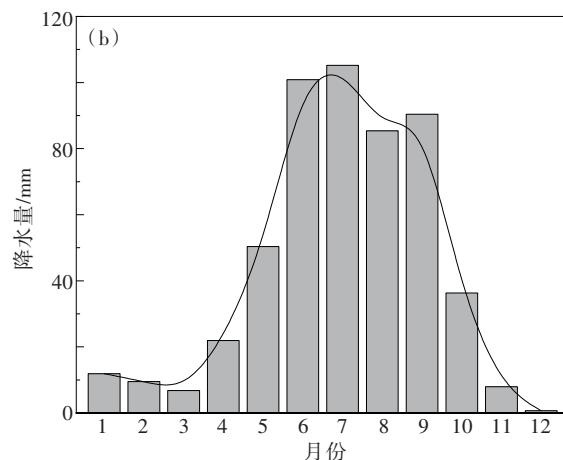


图 3 2008 年黄河源区逐月平均降水量

Fig. 3 The monthly average precipitation in the source region of the Yellow River in 2008

3.2 黄河源区重力波势能值分析

在月尺度上, 对 10—50 km 高度的每条温度廓

线进行分辨率 0.2 km 的垂直插值,删除超过 $[-10^\circ\text{C}, 10^\circ\text{C}]$ 的温度廓线,对处理后的温度廓线进行平均,得到黄河源区的背景温度廓线 T_B ,用原始温度廓线减去背景温度廓线,得到温度扰动廓线 T' ,再通过二次拟合去除趋势,采用六阶巴特沃斯滤波器滤除重力波以外的其他波,代入式(4)计算重力波势能。因为 $17\text{--}24\text{ km}$ 高度的重力波大多数与山地波有关,所以在计算黄河源区重力波廓线时,选取每条廓线中高程为 $17\text{--}24\text{ km}$ 的部分,再去除重力波势能值中过大或小于0的值,在 $17\text{--}24\text{ km}$ 高程处对重力波势能值进行平均,得到黄河源区重力波势能值的月变化(图4)。分析可知:黄河源区各月的重力波势能值在不断变化,且始终不为0,表明黄河源区全年受到重力波的持续影响。不同月份的重力波势能值不同,存在明显的季节性差异,冬季的重力波势能值高,夏季低。分析还可知,重力波势能最大值为 9.34 J/kg ,最小值为 1.71 J/kg ,这与曾炫云(2018)和周梦君(2018)的研究结果一致,说明本文提出的利用COSMIC掩星数据提取重力波势能值的改进方法真实有效,得到的重力波势能值结果较为准确。

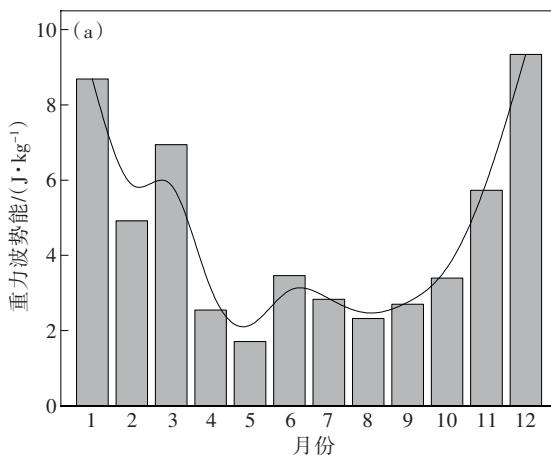


图4 2008年黄河源区重力波势能值的月变化

Fig. 4 The monthly variation of potential energy value of gravity wave in the source region of the Yellow River in 2008

图5给出了2008年1—12月重力波势能值随海拔高度的变化。分析可知,秋冬季节的势能值总体相对较高,春夏季节则要偏低。2—12月重力波势能值随海拔高度呈减小—增大—减小—增大趋势,1月呈增大—减小—减小趋势,总体在3 km和5 km处达到峰值。

目前已有的两种利用掩星数据提取重力波势能

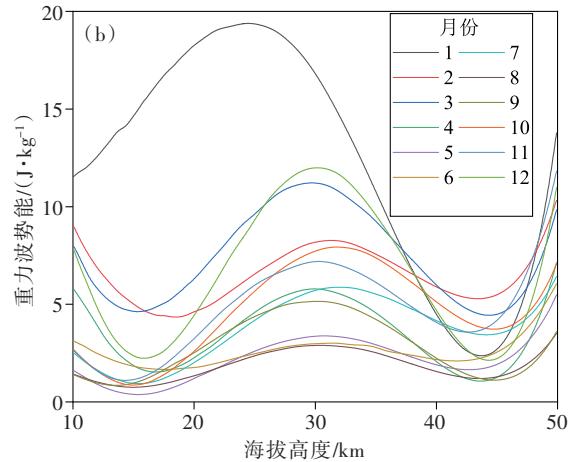


图5 2008年1—12月重力波势能值随海拔高度的变化

Fig. 5 The variation of potential energy value of gravity wave with altitude from January to December in 2008

值的方法都存在着一定的不足,如程胡华等(2012)等利用十阶高通滤波器对小于临界值的信号进行滤波得到扰动场,以此估算重力波参数,但此方法无法精确计算出重力波势能值。McDonald(2012)将全球温度测量分割为网格,利用最小二乘法拟合的方法获取各高度上0—6波数的幅度,再减去行星波成分来求得重力波势能值,此方法得到的残差往往都是负值,需要对残差进行进一步的修正。文中提出的在水平尺度上利用最小二乘法以及滑动平均的方法滤除水平尺度行星波引起的温度扰动,对得到的残差采用六阶巴特沃斯带通滤波器滤波,既解决了去除纬向波数为0—6的大尺度行星波法在垂直尺度上需要对残差进一步修正的问题,也弥补了滤波器法不能完整的过滤掉垂直波长在3—10 km内行星波的不足。

3.3 小波相干分析

为了在频域内获得降水对于重力波的响应,文中基于小波相干谱对降水和重力波的相关性进行分析。图6给出了黄河源区2008年降水量与重力波势能值的小波相干谱。图中细实线是边缘效应的影响锥,粗实线包围的区域表示通过了 $\alpha = 0.05$ 的显著性水平检验,箭头的方向表示两个时间序列之间的相位关系,箭头由左指向右表示降水与重力波同相位变化,反之则为反相位变化(段鹏硕等,2014)。谱图右侧的色标表示相关系数。分析小波相干谱可知,降水量和重力波势能值具有长时间跨度的显著相关特征,在0—7 m周期,两个序列在全年呈现出

较强的相关性。3—5 m 周期的箭头基本指向正右方, 降水与重力波势能值同相位, 两者具有较强的正相关关系外; 其余周期的箭头方向大多呈正左方趋势, 表明降水与重力波势能值呈反相位关系, 且 5—12 m 周期的相关性整体高于 0—2 m 周期。

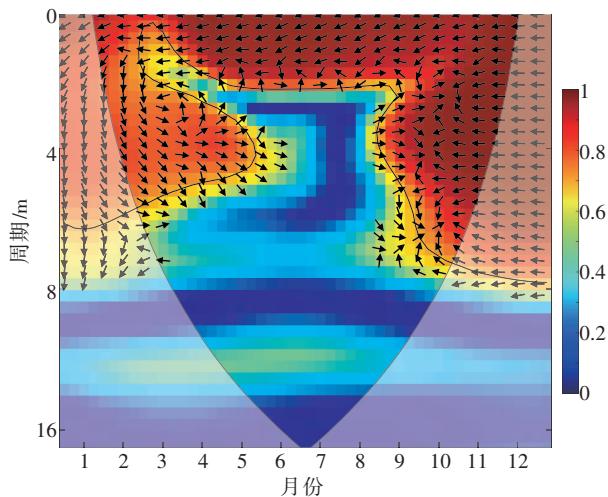


图 6 黄河源区 2008 年降水量与重力波势能值的小波相干谱

Fig. 6 Wavelet coherence spectrum of precipitation and potential energy value of gravity wave

3.4 降水对重力波的响应分析

降水量和重力波势能值在数值变化上具有相反的趋势, 符合重力波势能值大时降水量小, 降水量大时重力波势能值小的情况。钟水新等(2014)认为山坡地形对湿润气流的影响十分复杂, 除了动力抬升作用, 地形重力波对湿润气流也有拖曳作用。黄河源区重力波势能值与降水量的负相关趋势正是山坡地形抬升和重力波拖曳的共同作用导致的。冬季重力波的拖曳作用大于山坡动力抬升作用, 由于拖曳作用占优, 阻碍湿润气流的上升, 上升的海拔不够高, 温度不够低, 无法形成降水; 夏季山坡动力抬升作用大于重力波拖曳作用, 山坡地形的动力抬升作用占优, 湿润气流得以上升, 海拔增加, 温度降低, 湿润气流达到降水条件, 从而夏季降水量大。因此, 黄河源区重力波势能值冬季高夏季低, 逐月平均降水量冬季少夏季多, 且二者在数值上具有负相关关系。

4 结 论

文中利用 1960—2016 年黄河源区降水量资料和 COSMC 掩星数据, 计算了 2008 年黄河源区各月

重力波势能值, 并运用小波相干分析的方法探究 2008 年黄河源区降水对于重力波的响应。得到:

1) 黄河源区降水量从北部向东部随海拔升高而增加, 自东向西随海拔升高而降低。降水量呈冬季少、夏季多的趋势, 冬季月平均降水量在 7 mm 左右, 夏季月平均降水量达到 85 mm, 冬夏季节降水存在较大差异。

2) 2008 年黄河源区各月的重力波势能值不同, 存在明显的季节性差异, 呈冬季高、夏季低的趋势。重力波势能值随海拔高度总体呈减小—增大—减小—增大趋势。

3) 小波相干分析发现, 在 0—2 m 和 5—12 m 周期区间, 黄河源区重力波和降水呈显著的负相关关系, 而在 3—5 m 周期区间呈正相关关系。这主要是由于山坡地形的动力抬升和重力波对湿润气流的拖曳作用在不同时段的主导作用不同导致的。

参 考 文 献 (References)

- 艾凯, 郑益群, 陈浩伟, 2016. WRF 模式中地形重力波参数化方案及不同拖曳力应用试验[C]. 北京: 第 33 届中国气象学会年会//青藏高原与复杂山地天气气候论文集. Ai K, Zheng Y Q, Chen H W, 2016. Terrain gravity wave parameterization scheme and application test of different drag forces in WRF model[C]. Beijing: 33rd annual meeting of China Meteorological Society//Qinghai Tibet Plateau and complex mountain climate.(in Chinese)
- Attaullah K, Shuanggen J, 2018. Gravity wave activities in Tibet observed by COSMIC GPS radio occultation[J]. Geodesy and Geodynamics, 9(6):504-511.
- 程胡华, 钟中, 岑瑾, 等, 2012. 估算大气重力波参数的垂直扰动廓线获取新方法[J]. 物理学报, 61(18):532-540. Cheng H H, Zhong Z, Cen J, et al, 2012. A new method for obtaining vertical disturbance profiles for estimating atmospheric gravity wave parameters[J]. Acta Physica Sinica, 61(18):532-540. (in Chinese)
- 段鹏硕, 刘根友, 柳林涛, 等, 2014. 地球动力学扁率与南极涛动年际变化的小波相干分析[J]. 科学通报, 59(30):2947-2955. Duan P S, Liu G Y, Liu L T, et al, 2014. Wavelet coherence analysis of interannual variability of geodynamic oblateness and Antarctic oscillation[J]. Chinese Sci Bull, 59(30):2947-2955. (in Chinese)
- 郭增冰, 臧珂, 胡勤丰, 2020. 采用滑动平均低通滤波的脉振高频信号注入法在表贴式永磁同步电机无位置传感器控制中的应用[J]. 微电机, 53(4):45-50. Guo Z B, Zang K, Hu Q F, 2020. Application of pulse vibration high frequency signal injection method with moving average low-pass filter in sensorless control of surface mounted permanent magnet synchronous motor [J]. Micromotor, 53(4): 45-50. (in Chinese)
- 胡芳凝, 王忠, 刘超群, 2019. 快速滑动平均滤波在 PPG 信号去噪中

- 的应用[J]. 物联网技术,9(6):41-43. Hu F N, Wang Z, Liu C Q, 2019. Application of fast moving average filtering in PPG signal denoising[J]. IoT Technol, 9(6): 41-43.(in Chinese)
- Hu Y, Maskey S, Uhlenbrook S, et al, 2011. Streamflow trends and climate linkages in the source region of the Yellow River, China[J]. Hydrol Process, 25(22): 3399-3411.
- 井宇,徐娟娟,杜莉丽,等,2019.地形重力波拖曳参数化方案在一次陕西极端性暴雨天气过程中的应用[J].陕西气象,5:16-22.
- Jing Y, Xu J J, Du L L, et al, 2019. Application of terrain gravity wave drag parameterization scheme in an extreme rain-storm process in Shaanxi[J]. Shanxi Meteor Quart, 5:16-22.(in Chinese)
- 金双根,高超,李君海,2020.利用FY-3C气象卫星GNSS掩星估计全球重力波变化与分析[J].南京信息工程大学学报(自然科学版),12(1):57-67. Jin S G, Gao C, Li J H, 2020. Estimation and analysis of global gravity wave variation using FY-3c meteorological satellite GNSS occultation[J]. J Nanjing Univ Inf Sci Technol(Nat Sci Edi), 12(1):57-67.(in Chinese)
- 蓝永超,朱云通,刘根生,等,2016.黄河源区气候变化的季节特征与区域差异研究[J].冰川冻土,38(3):741-749. Lan Y C, Zhu Y T, Liu G S, et al, 2016. Seasonal characteristics and regional differences of climate change in the source region of the Yellow River [J]. J Glaciol Geocryol, 38(3):741-749.(in Chinese)
- 梁晨,2014.基于COSMIC卫星观测的全球平流层大气重力波的初步研究[D].合肥:中国科学技术大学. Liang C, 2014. Preliminary study on global stratospheric atmospheric gravity waves based on COSMIC satellite observation[D]. Hefei: University of science and technology of China(in Chinese)
- 李锐,郭义瑄,郭长城,等,2020.近60年天津海岸带地区降水与气温的演变规律[J].天津师范大学学报(自然科学版),40(5):44-53. Li R, Guo Y F, Guo C C, et al, 2020. Evolution of precipitation and temperature in coastal zone of Tianjin in recent 60 years [J]. J Tianjin Normal Univ (Nat Sci Edi), 40(5):44-53. (in Chinese)
- Mcdonald A J, 2012. Gravity wave occurrence statistics derived from paired COSMIC/FORMOSAT3 observations[J]. J Geophys Res Atmos, 117(D15):15106-15102.
- 孙正宇,张禹,2020.一种基于正态分布的滑动平均滤波法[J].机械工程师,8:52-54. Sun Z Y, Zhang Y, 2020. A moving average filtering method based on normal distribution[J]. Mechanical Engineer, 8:52-54.(in Chinese)
- 王亚迪,2020.变化环境下黄河源区水文气象要素特征分析及径流变化驱动研究[D]. 西安:西安理工大学. Wang Y D, 2020. Characteristic analysis of hydrometeorological elements in the source area of the Yellow River under changing environment and the driving force of runoff change [D]. Xi'an: Xi'an University of science and technology.(in Chinese)
- 王宇虹,2016.次网格地形重力波参数化方案在青藏高原的应用及数值模拟研究[D]. 北京:中国气象科学研究院. Wang Y Y, 2016. Application and numerical simulation of subgrid terrain gravity wave parameterization scheme in Qinghai Tibet Plateau [D]. Beijing: Chinese Academy of Meteorological Sciences. (in Chinese)
- 王一洲,黄莹莹,李汇军,等,2019.基于COSMIC的平流层重力波参数分析[J].空间科学学报,39(3):326-341. Wang Y Z, Huang Y Y, Li H J, et al, 2019. Analysis of stratospheric gravity wave parameters based on cosmic[J]. Acta Space Sciences, 39(3):326-341.(in Chinese)
- 徐晓华,郭金城,罗佳,2016.利用COSMIC RO数据分析青藏高原平流层重力波活动特征[J].地球物理学报,59(4):1199-1210. Xu X H, Guo J C, Luo J, 2016. Analysis of stratospheric gravity wave activity characteristics of Qinghai Tibet Plateau using COSMIC ro data [J]. Acta Geophys, 59(4):1199-1210.(in Chinese)
- 杨遵勋,2018.低平流层惯性重力波的无线电探空仪观测研究[D]. 武汉:武汉大学. Yang Z X, 2018. Radiosonde observation of inertial gravity waves in the lower stratosphere[D]. Wuhan: Wuhan University.(in Chinese)
- 于道成,徐晓华,2019.利用GPS掩星资料反演大气重力波势能值的方法[J].测绘地理信息,44(6):35-38. Yu D C, Xu X H, 2019. Inversion of atmospheric gravity wave potential energy using GPS occultation data [J]. J Geomatics, 44(6):35-38.(in Chinese)
- 曾炫云,2018.基于COSMIC无线电掩星观测的中高层大气重力波特性研究[D]. 合肥:中国科学技术大学. Zeng X Y, 2018. Study on the characteristics of gravity waves in the middle and upper atmosphere based on COSMIC radio occultation observation[D]. Hefei: University of Science and Technology of China. (in Chinese)
- 钟水新,陈子通,戴光丰,等,2014.地形重力波拖曳参数化对热带气旋强度和路径预报影响的研究[J]. 大气科学,38(2):273-284. Zhong S X, Chen Z T, Dai G F, et al, 2014. Study on the influence of terrain gravity wave drag parameterization on tropical cyclone intensity and path prediction [J]. Chinese J Atmos Sci, 38 (02): 273-284(in Chinese)
- 周梦君,2018.平流层全球重力波活动的COSMIC观测研究[D]. 武汉:武汉大学. Zhou M J, 2018. COSMIC observation of global gravity wave activity in the stratosphere[D]. Wuhan : Wuhan University.(in Chinese)