

Analysis on Space-Time Field of Dry/Wet Change Since 1470-2008AD in Northwest China Based on REOF

Ze He^{1,2}, Yuanqing He², Shijin Wang¹, Juan Pang^{1,2,3}, Huijuan Xin^{1,2}, Jian Ma^{1,2}

¹State Key Laboratory of Cryospheric Science, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, CAS, Lanzhou Gansu

²University of Chinese Academy of Sciences, Beijing

³Lanzhou University of Technology, Lanzhou Gansu

Email: heze@lzb.ac.cn, yqhe@lzb.ac.cn

Received: Sep. 23rd, 2016; accepted: Oct. 7th, 2016; published: Oct. 14th, 2016

Copyright © 2016 by authors and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

Based on the historical record, the REOF method was used to decompose the dry/wet variation in northwest China from 1470 to 2008 into spatial functions and time functions; the spatial pattern of dry/wet differences was described by the first six major space feature vectors; Regional Dry-Wet Index (RDWI) by the corresponding time weighting coefficient was used to represent the time changes of spatial differences. Several important conclusions were found in this paper. First, distribution of dry/wet variation field in northwest China was the dividing line of 105°E. Southern Shaanxi is the wettest place and Yushu is the driest place in the west of 105°E. Secondly, 41 years were very dry in northwest China from 1470 to 2008, and there were 79 dry years, 285 normal years, 95 wet years, and 39 very wet years. Among them, extreme dry years are in 1484, 1528, 1586, 1640, 1759, 1877, 1878, 1928, 1900, 1915 and 1929; extreme wet years are in 1570, 1662, 1736, 1745, 1753, 1756, 1819, 1884, 1887, 1958 and 1964. Thirdly, after 11-point low-pass filter, RDWI data sequence shows that dry-wet decadal fluctuations' change characteristic is very complex, and there are eight climate change cycles. 1481-1497, 1527-1531, 1583-1588, 1628-1642, 1713-1722, 1874-1879, 1915-1931 years are the persistent dry periods. Last but not least, wavelet and power spectrum analysis shows that some periodicities existed in the last 500 years, such as the periods of around 64 - 90, 32 - 48 and 11 - 22 years. Among them, the detected 64-year periodicity and the not detected 200-year periodicity are different from the existing research.

Keywords

Dry/Wet Climate Change, Space-Time Field, Northwest China, Last 500 Years

中国西北地区1470~2008年干湿分异的时空场分解

何 则^{1,2}, 何元庆², 王世金¹, 庞 娟^{1,2,3}, 辛惠娟^{1,2}, 马 健^{1,2}

¹中国科学院西北生态环境资源研究院冰冻圈国家重点实验室, 甘肃 兰州

²中国科学院大学, 北京

³兰州理工大学, 甘肃 兰州

Email: heze@lzb.ac.cn, yqhe@lzb.ac.cn

收稿日期: 2016年9月23日; 录用日期: 2016年10月7日; 发布日期: 2016年10月14日

摘 要

基于历史文献记录, 运用REOF分析方法将西北地区1470~2008 AD干湿序列分解为空间函数和时间函数, 用前6个主要空间特征向量描述西北地区干湿变化的空间格局, 构建区域干湿指数(RDWI), 表征区域干湿变化的程度及差异。研究发现: 1) 西北地区降水量分布场大致以105°E为界呈现东湿西干的格局, 湿极出现在陕南, 而玉树则是旱极。2) 1470~2008年西北地区干旱年份有41年, 偏干79年, 正常年份有285年, 偏湿年份95年, 湿润年份39年。极端干旱年份有1484, 1528, 1586, 1640, 1759, 1877, 1878, 1928, 1900, 1915, 1929; 极端湿润年份有1570, 1662, 1736, 1745, 1753, 1756, 1819, 1884, 1887, 1958, 1964。3) RDWI数据序列11点低通滤波表明西北地区1470~2008年干湿年代际波动变化特征极为复杂, 主要存在8个干湿变化旋回。其中1481~1497, 1527~1531, 1583~1588, 1628~1642, 1713~1722, 1874~1879, 1915~1931年为连续干旱时段。4) 采用小波与连续功率谱分析发现西北地区1470~2008年间存在着64~90年、32~48和11~22年左右的3类周期变化规律。检测出的64年的周期以及未检测出200年的周期与已有研究不同。

关键词

气候干湿变化, 时空场, 西北地区, 近500年

1. 引言

降水重建是过去 2000 年气候变化研究的重点, 中国降水的时空差异极为明显, 降水的空间型极为复杂, 这客观上增加了中国降水重建的困难[1]。中国, 尤其是东部地区, 拥有丰富而翔实的历史文献记载, 可为降水变化研究提供大量的高分辨率代用资料。张德二等[2]曾运用旱涝史料构建了中国东部地区近 1000 年来的干湿变化序列, 讨论了中国东部 6 区域气候干湿变化特征。宋保平等[3]重建了近 510 年来中国东中部地区气候干湿变化序列。荣艳淑等[4]利用旱涝史料重建了华北地区近 500 年来的降水序列, 徐新创等[5]与薛积彬等[1]分别进行了省尺度上的案例研究, 张丕远等[6]则以历史旱涝发生频率构建降水演化系数模型。最近, 郝志新等[7]利用丰富的历史文献记载等高分辨率代用证据, 重建了过去 2000 年中国中东部(25°~40°N, 105°E 以东)及华北、江淮和江南地区的干湿变化序列, 在此基础上总结出中国东部的重大旱涝变化: 魏晋南北朝时期, 旱涝较多且旱的频次超过涝的; 到隋唐时期旱

涝频次减少,特别是江南地区;10世纪到11世纪,由涝多于旱转为旱多于涝;明代干旱较为突出,到清朝气候变得湿润。可见,充分利用史料记载对探索历史时期的旱涝分布特征及重建中国干湿序列趋势大有裨益[8]。

在中国西部地区,降水重建的研究的更多的是基于自然代用记录[9],这些代用记录包括冰芯[10]-[13]、树木年轮[14]-[16]、湖泊沉积[17]-[20]、黄土地层沉积[21]和洞穴石笋等[22][23]。中国西部地区因深居内陆腹地,历史文献的记录相对较少,基于文献资料重建历史时期气候变化的相关研究则略显滞后。鉴于上述,在中国气象局的支持下,把“西北极端干旱事件个例库及干旱指数数据集”项目列为2009年中国气象局气候变化专项。在该项目中,兰州干旱气象研究所组织西北四省(区)气象工作者,对《中国近500年旱涝分布图集》[24]中的西北地区12个站点的旱涝序列进行了修订和增补,并把终止年份,从1979年推后到2008,将西北地区近五百年各种旱涝信息进行研究、归纳和整理成《中国西北地区近500年旱涝分布图集》(下称《图集》)[25]。《图集》增加了陕西宝鸡、甘肃武都、宁夏盐池和固原、青海玉树、兴海和刚查共七个站点(图1)。这一图集的发表,对于研究历史时期西北地区旱涝灾害及干湿差异的时空规律与演变发生趋势具有深远的意义。本文基于《图集》整理订正的历史文献记录数据,运用REOF分析方法将西北地区1470~2008 AD干湿序列分解为空间函数和时间函数,用前6个主要空间特征向量描述西北地区干湿差异空间格局;并构建区域干湿指数(RDWI),表征区域干湿变化的程度及差异,分析了干湿变化的总体与阶段特征、周期性以及辨识了极端旱涝事件。

2. 资料来源与研究方法

2.1. 资料来源

旱涝等级资料来源于《中国西北地区近500年旱涝分布图集》(下称《图集》)。《图集》以编年的方式选用了西北各省区的地方志、明实录、清实录、清史稿、自然灾害历史资料以及建国以来的历年民政资料,以旱涝灾害为主线,逐年汇总了西北四省公元1470~2008年共539年的旱涝状况。旱涝记录中共有19个站点,每一站点代表在行政区划的一或两个地区(历史时期的一到两个府)的范围。旱涝等级按雨情、旱情及灾情出现的时间、范围、严重程度等记载,将历年来旱涝灾情程度分成5个等级,即1级为涝,2级为偏涝,3级为正常年份,4级为偏旱,5级为旱,具体信息详见《图集》。旱涝等级资料在一定程度上可视为地区干湿程度,即干湿指数(Drought/Wet Index, DWI)。为了凸显差异,将原数据进行距平处理,即2级为涝,1级为偏涝,0级为正常年份,-1级为偏旱,-2级为旱。

2.2. 研究方法

经验正交函数法(Empirical Orthogonal Function, EOF)由统计学家 K. Pearson 提出,它把地理空间中样本点的多个时次的时空观测数据矩阵进行分解,有效地分离出特征向量及对应的时间函数,并表示为相互正交的时间函数与空间函数乘积之和的形式。其优点是浓缩信息、截取主要成分、排除高频项随机干扰等,是气候研究中的主要方法之一。在过去几十年,中国学者利用该方法对中国降水时空变化特征做了大量研究[26]-[29]。应用 EOF 方法将西北区 1470~2008 年的干湿等级数据进行正交分解,得到特征向量及对应的时间系数。EOF 分解的特征向量能反映干湿变化的空间分布结构,特征向量所对应的时间系数代表了这一区域由特征向量所表征的分布型式的时间变化特征。特征向量的权重即时间系数的变化,则反映了不同年份对这种空间格局贡献的不同,揭示空间分布的变化特征与趋势。系数数值绝对值越大,表明这一时刻这类分布型式越典型。本文取前 6 个特征向量及其对应的时间系数参加旋转(REOF),从而使之不仅可以反映不同地域的变化,也可以反映不同地域的相关分布状况。关于 EOF 与 REOF 方法的原理与实现途径,可进一步参考《现代气候统计诊断与预测技术》[30],在此

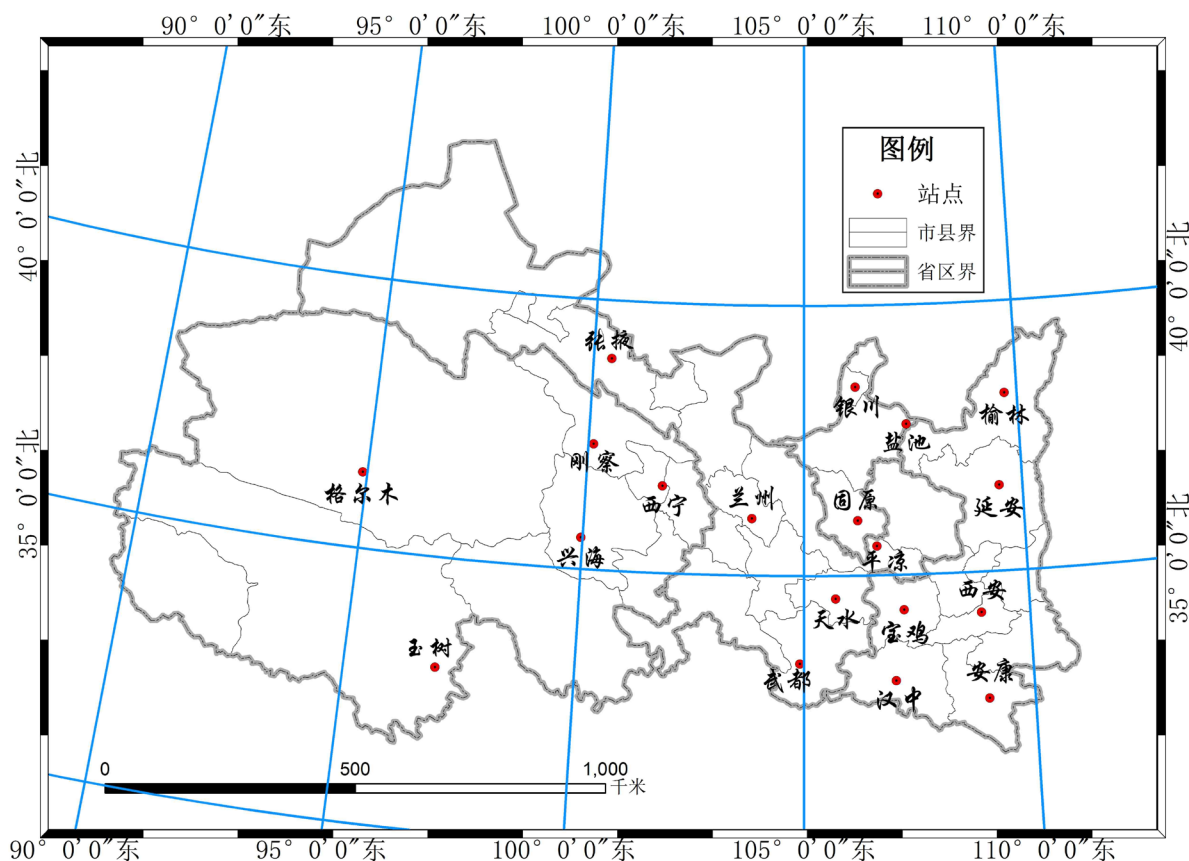


Figure 1. The study area and site distribution

图 1. 研究区范围及站点分布

不做赘述。

3. 结果分析

经计算，第六、七特征根之间并不存在显著性差别，故选用前六特征向量进行分析。前 6 个特征向量的累计方差贡献率为 67.1%，方差贡献率具体见表 1。为直观显示特征向量的空间分布情况，利用 ArcGIS 10.0 软件将特征向量值作为属性数据与空间数据链接后进行符号化，得到特征向量值的空间分布。

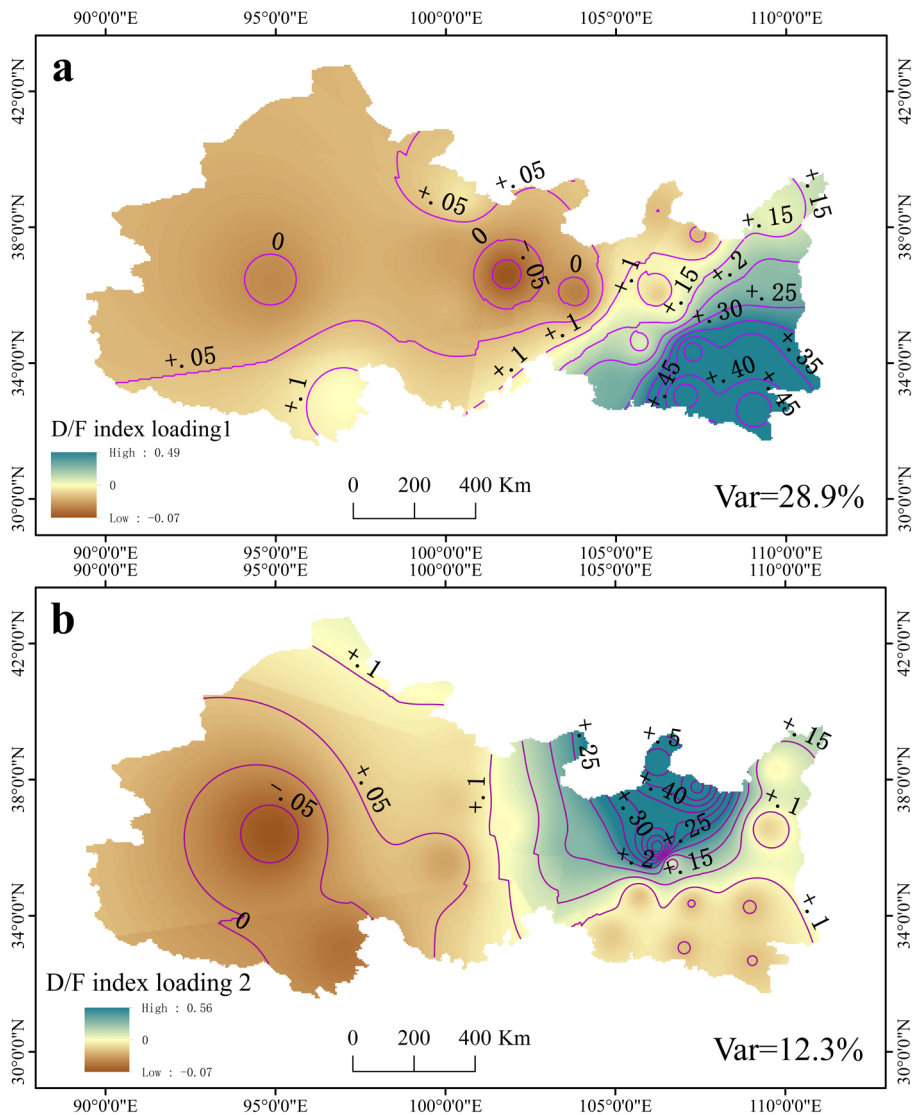
3.1. 干湿变化的空间分型特征

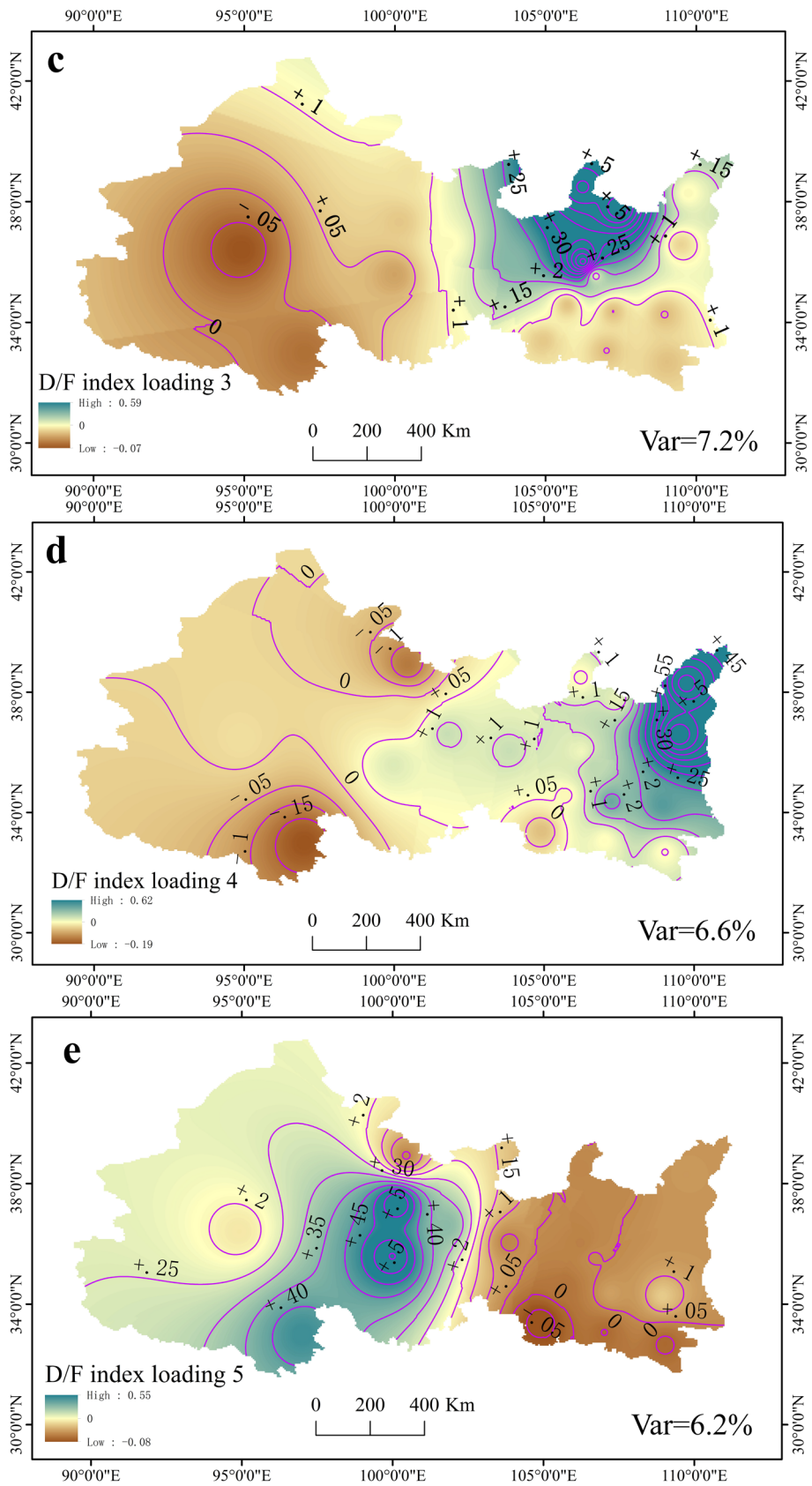
第 1 特征向量空间分布如图 2(a)所示，它的贡献率达 28.9%，远高于其它场的贡献率，是干湿变化的主要空间分布形式。特征向量的数值大小能反映干湿变化的程度，第一特征向量值的空间分布揭示干湿变化主要空间格局，其余特征向量值的空间分布则表示其他不同尺度变化的平均状态。从图 2(a)中可以看出，第 1 特征向量分为两个板块，反映了西北地区干湿变化的第一典型场，这种分布类型大致以 105°E 为界，以西为负值区，以东为正值区，表现为干湿分布场的东西相反性。特征向量极值中心表示干湿差异最大的区域， 105°E 以东的陕西及甘南地区极值中心在陕西省最南端的中间部位，反映出该区与其他区相比干湿变化最为显著，但整个陕南的干湿变化程度的波动程度也要比其他地区小。第 2 特征向量(图 2(b))的贡献率达 12.3%，也是一种比较典型的干湿变化的空间分布形式。第二典型场以宁夏为核心，辐射其周边地区形成了正的干湿场；负值则以格尔木站点为中心。第 3 特征向量(图 2(c))贡献率为 7.2%，其空间场基本与第二空间场类似，宁夏及其周边地区形成的正值降水场略有扩大。第 4 特征向量(图 2(d))贡献率为 6.6%，其

空间场的正值主要分布在陕西关中及陕北地区，负值则分布在张掖和玉树站点周边的较小空间范围内。第 5 特征向量(图 2(e))贡献率为 6.2%，其空间场的正值主要在青海东部的刚察、兴海以及玉树等区，负值则分布在 103°E 以东的陕西、宁夏及甘肃部分地区。第 6 特征向量(图 2(f))贡献率为 5.9%，其空间场正值中心分布于格尔木和张掖，而负值则分布在玉树站点及其周边。总体而言，西北地区干湿变化分布场的大致以 105°E 为界呈现东湿西干的格局特征，湿极出现在陕南，而玉树则是早极。

3.2. 干湿变化的阶段特征及原因探讨

前 6 特征向量对应的时间系数表明了基于前 6 特征向量的时间系数，构建区域干湿指数(RDWI)，表征区域干湿变化的程度及差异。对比前述干湿指数(DWI)，区域干湿指数的正值可表示偏湿状态，负值为偏干状态，其绝对值越大表示相对干湿程度越大：绝对值 0~1 为正常、1~2 为偏湿(干)及大于等于 2 为湿(干)。RDWI 计算公式为： $RDWI = (3.252*PCA1 + 2.676*PCA2 + 2.41*PCA3 + 1.822*PCA4 + 1.364*PCA5 + 1.225*PCA6)/12.749$ ，各主成分的系数即其对应特征值(表 1)。区域干湿指数计算结果如表 2 和表 3 所示。结果表明，西北地区整体干湿分布呈正态分布，干湿年数及占比具体见表 2。极端干旱年份有 1484，





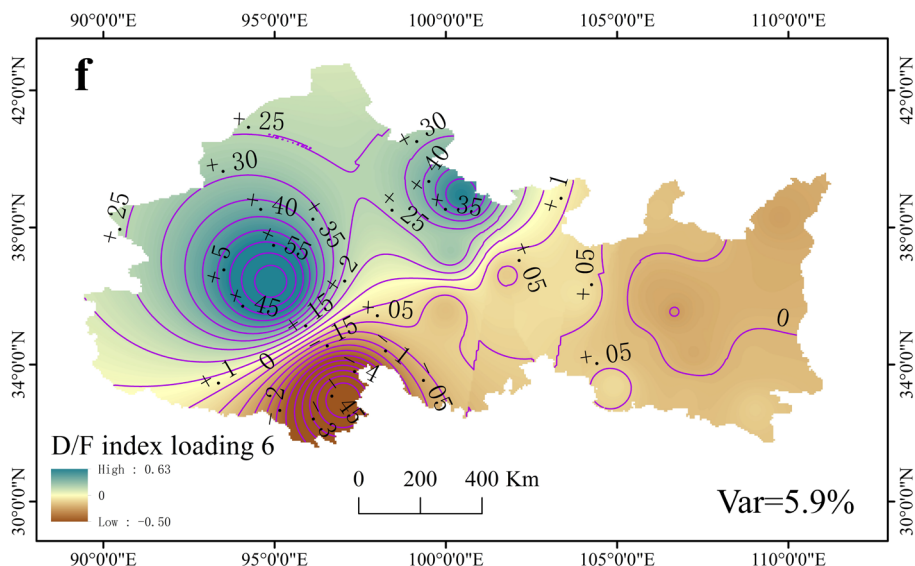


Figure 2. Spatial distribution of the six dry/wet index eigenvectors from 1470 to 2008 in the northwest China
图 2. 中国西北地区 1470~2008 年干湿变化 REOF 分解的前 6 特征向量空间分布图

Table 1. Variance contributions and their accumulations of the six eigenvectors

表 1. 前 6 项特征向量方差贡献率及累积方差贡献率

| 特征向量 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 |
|-----------|-------|-------|------|-------|-------|-------|
| 特征值 | 3.252 | 2.676 | 2.41 | 1.822 | 1.364 | 1.225 |
| 方差贡献率/% | 28.9 | 12.3 | 7.2 | 6.6 | 6.2 | 5.9 |
| 累计方差贡献率/% | 28.9 | 41.2 | 48.4 | 55 | 61.2 | 67.1 |

Table 2. Dry/wet year and percentage distribution from 1470 to 2008 in the northwest China

表 2. 西北地区 1470~2008 年干湿年数分布与占比情况

| | 干旱 | 偏干 | 正常 | 偏湿 | 湿润 |
|-------|------|-------|-------|-------|------|
| 年数 | 41 | 79 | 285 | 95 | 39 |
| 占比(%) | 7.61 | 14.66 | 52.88 | 17.63 | 7.24 |

Table 3. Extreme dry/wet year and continuous drought events from 1470 to 2008 in the northwest China

表 3. 西北地区 1470~2008 年极端干湿年份及连续干旱事件表

| 事件 | 年份/时间段 |
|------------|--|
| 极端干旱年 | 1484, 1528, 1586, 1640, 1720, 1759, 1877, 1878, 1878, 1900, 1915, 1928, 1929 |
| 极端湿润年 | 1570, 1613, 1662, 1735, 1745, 1753, 1756, 1819, 1884, 1887, 1958, 1964 |
| 年代尺度连续干旱事件 | 1481~1497, 1527~1531, 1583~1588, 1628~1642, 1713~1722, 1874~1879, 1915~1931 |
| 严重干旱事件 | 1876~1878, 1927~1929 |

1528, 1586, 1640, 1720, 1759, 1877, 1878, 1878, 1900, 1915, 1928 和 1929; 两次严重干旱事件发生在 1876~1878 和 1927~1929 年。极端湿润年份有 1570, 1613, 1662, 1735, 1745, 1753, 1756, 1819, 1884, 1887, 1958, 1964。低通滤波可过滤掉序列的高频随机信号, 有利于识别序列中的年代尺度的干湿波动信号。采用 11 点滑动对 RDWI 数据序列进行滤波, 如图 3 所示, 可见西北地区 1470~2008 年干湿年

代际波动变化特征极为复杂, 主要存在 8 个干湿变化旋回, 偏干年份有 63 年, 偏湿年份有 55 年。其中 1481~1497, 1527~1531, 1583~1588, 1628~1642, 1713~1722, 1874~1879, 1915~1931 年为连续干旱时段。

从不同特征向量空间分布特征及对应 PCA 序列的对比, 可以推测受西风影响地区和季风地区的多年代际变化往往存在相反的变化趋势。关于干湿波动的原因, Trouet 等[29]认为当北大西洋涛动(NAO)负异常时, 位于中纬度的亚速尔地区海温偏高, 进入欧洲南部的气团水汽充足。陈发虎等在 Trouet 等研究的基础上, 提出由于小冰期时西风带强度相对较大, 可以将欧洲南部充足的水汽气团带入亚洲内陆, 使得在频繁的冷空气南下时在亚洲内陆干旱地区形成较丰富的降水[31]。而杨保等[15]则认为, 在过去 300 年里的大部分时间里, 太平洋年代际涛动(PDO)、厄尔尼诺-南方涛动(ENSO)和大西洋年代际涛动(AMO)可能共同作用于亚洲夏季风北部地区, 一起影响与导致了西北地区的干湿波动。

3.3. 干湿序列的周期特征分析

小波分析是一种信号时间-尺度分析方法, 具有多分辨率分析和对信号的自适应性特点, 可以很好地解释研究要素动态变化的内在规律及其特征[28]。采用 Morlet 小波变换和功率谱分析西北地区 RDWI 序列的周期特征。结果显示(图 4), 西北地区 1470~2008 年间存在着 64~90 年、32~48 和 11~22 年左右的 3 类周期变化规律。其中, 64~90 世纪尺度的周期主要分布在 1590~1970 年间; 32~48 左右年代尺度的周期变化则 1570~1760 年间; 11~22 年左右的准周期表现的较不稳定, 多出现在 1590, 1760 和 1890 前后。与前人在陕西及周边地区[32]、青海树轮宽度指数[33]和古里雅冰芯积累量[34]的研究中出的 11 年、22 年、35 年的高频周期波动证据, 具有较好的一致性, 如表 4 所总结。但在柴达木东部的降水变化[35]及

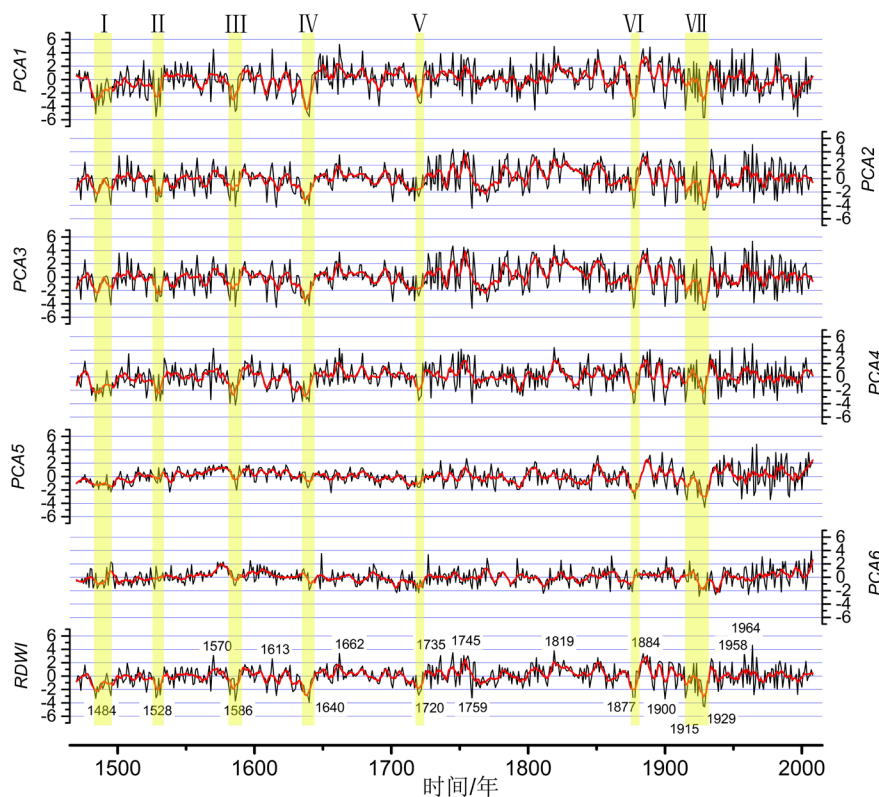


Figure 3. The sequence of time coefficient of six eigenvectors and regional dry/wet index in northwest China (1470~2008)

图 3. 西北地区 1470~2008 年干湿变化的前六特征向量对应时间系数及区域干湿指数序列

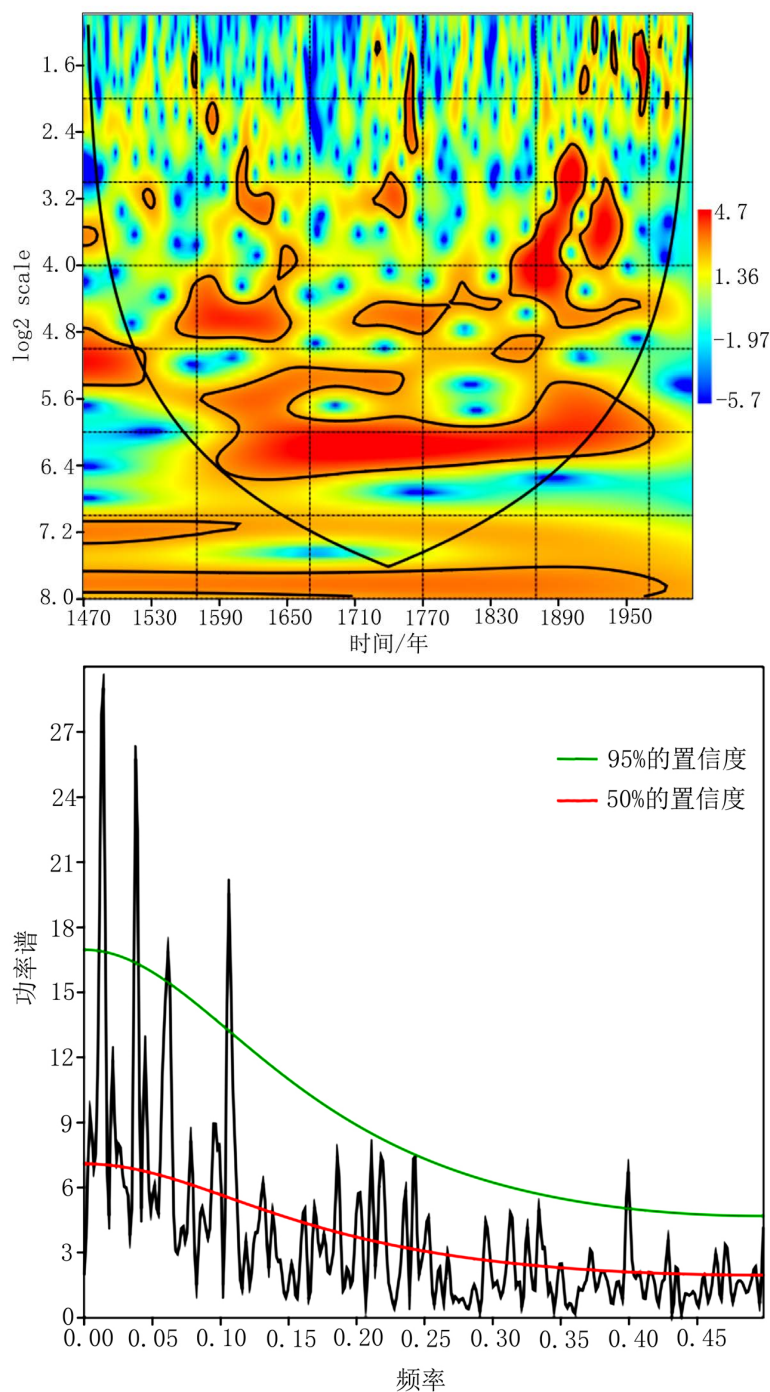


Figure 4. Wavelet cycle and power spectrum analysis of dry/wet change from 1470 to 2008 in the northwest region

图 4. 西北地西北地区 1470~2008 年干湿变化小波和功率谱周期分析

青海湖水位[36]、黑河出山口流量[37]等多个降水变化代用序列中都得到了证实的西北干旱区的降水变化的百年际的波动，本文的检测结果却没有通过 5% 的显著性检验，同时也检测出了前人未提出的 64 年的周期(图 4)。为此，又运用连续功率谱分析了该序列的周期，同样检测出了检测出了 64 年的周期，却未检测出 200 年的周期。

Table 4. Historical dry/wet cycle and precipitation change indifferent scale in the northwest region
表 4. 西北地区历史时期干湿与降水变化的世纪 - 年代尺度周期比对

| 地区及代用指标 | 长度/a | 代用资料 | 200a | 80a~100a | 64a | 35a | 22a | 11a | 资料来源 |
|---------------|------|------|------|----------|-----|-----|-----|-----|------------|
| 陕西及周边地区初夏干燥指数 | 500 | 树木年轮 | | | | | | √ | 刘洪滨等, 2002 |
| 柴达木东部降水变化 | 1437 | 树木年轮 | √ | √ | | | | | 邵雪梅等, 2006 |
| 青海湖水位 | 600 | 湖泊沉积 | √ | | | | | | 冯松等, 2000 |
| 古里雅冰芯积累量 | 2000 | 冰芯 | √ | | | | | √ | 姚檀栋等, 1996 |
| 青海树轮宽度指数 | 513 | 树木年轮 | | | | | √ | √ | 王振宇等, 2005 |
| 黑河出山口流量 | 1300 | 树木年轮 | √ | √ | | √ | √ | | 康兴成等, 2002 |
| 西北地区区域干湿指数 | 539 | 旱涝史料 | | √ | √ | √ | √ | √ | 本文 |

*√表示该周期被该作者检测到。

4. 结论

1) 应用 REOF 方法将西北区 1470~2008 年的干湿等级数据进行正交分解, 得到前六特征向量及对应的时间系数。总体而言, 西北地区降水量分布场的大致以 105°E 为界呈现东湿西干的格局特征, 湿极出现在陕南, 而玉树则是旱极。

2) 构建区域干湿指数(RDWI), 表征区域干湿变化的程度及差异。结果表明, 1470~2008 年西北地区干旱年份有 41 年, 偏干 79 年, 正常年份有 285 年, 偏湿年份 95 年, 湿润年份 39 年。极端干旱年份有 1484, 1528, 1586, 1640, 1759, 1877, 1878, 1928, 1900, 1915, 1929; 极端湿润年份有 1570, 1662, 1736, 1745, 1753, 1756, 1819, 1884, 1887, 1958, 1964。

3) RDWI 数据序列 11 点低通滤波表明西北地区 1470~2008 年干湿年代际波动变化特征极为复杂, 主要存在 8 个干湿变化旋回。其中, 1481~1497, 1527~1531, 1583~1588, 1628~1642, 1713~1722, 1874~1879, 1915~1931 年为连续干旱时段。

4) 采用小波与连续功率谱分析发现西北地区 1470~2008 年间存在着 64~90 年、32~48 和 11~22 年左右的 3 类周期变化规律。检测出了 64 年的周期以及未检测出 200 年的周期与已有研究不同, 具体原因有待进一步研究。

基金项目

国家自然科学基金项目(41503054, 41273010); 中科院重点部署项目(KJZD-EW-G03-04); 冰冻圈科学国家重点实验室自主课题(SKLCS-ZZ-2016); 中国科学院国家外国专家局创新团队国际合作伙伴计划。

参考文献 (References)

- [1] 丁一汇, 主编. 中国气候[M]. 北京: 科学出版社, 2013.
- [2] 张德二, 刘传志, 江剑民. 中国东部 6 区域近 1000 年干湿序列的重建和气候跃变分析[J]. 第四纪研究, 1997(1): 1-11.
- [3] 宋保平, 王张华, 乐群, 寇莹, 符蕴芳. 510 年来中国东中部地区气候干湿变化研究[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 21(1): 69-73.
- [4] 荣艳淑, 屠其璞. 华北地区 500 年滑动平均降水场序列重建[J]. 气象科技, 2004, 32(3): 163-167.
- [5] 徐新创, 葛全胜, 郑景云, 等. 湖北省近 500 年区域干湿序列重建及其比较分析[J]. 地理研究, 2010, 29(6): 1045-1055.
- [6] 张丕远, 葛全胜, 张时煌, 等. 2000 年来我国旱涝气候演化的阶段性和突变[J]. 第四纪研究, 1997, 17(1): 12-20.

- [7] Hao, Z.X., Zheng, J.Y., Zhang, X.Z., *et al.* (2016) Spatial Patterns of Precipitation Anomalies in Eastern China during Centennial Cold and Warm Periods of the Past 2000 Years. *International Journal of Climatology*, **36**, 467-475. <http://dx.doi.org/10.1002/joc.4367>
- [8] 薛积彬, 钟巍. 历史时期广东地区旱涝灾害与气候变化关系[J]. 地理与地理信息科学, 2005, 25(5): 75-79.
- [9] 梁有叶, 张德二. 我国西部地区过去 2000 年降水变化研究主要进展[J]. 气象科技, 2004, 32(3): 137-142.
- [10] 姚檀栋. 古里雅冰芯近 2000 年来气候环境变化研究[J]. 第四纪研究, 1997, 8(1): 52-61.
- [11] Sheng, W.K., Yao, T.D. and Li, Y.F. (1998) Dry and Wet Changes in Guliya Ice Cap Region Approached by pH and Electric Conductivity in Ice Core. *Journal of Glaciology and Geocryology*, **20**, 432-437.
- [12] 姚檀栋, 焦克勤, 杨学梅. 古里雅冰芯中过去 400a 降水变化研究[J]. 自然科学进展, 1999, 9(A12): 1161-1165.
- [13] Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E., Brecher, H., Davis, M., Leon, B., Les, D., *et al.* (2006) Abrupt Tropical Climate Change: Past and Present. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **103**, 10536-10543. <http://dx.doi.org/10.1073/pnas.0603900103>
- [14] Yang, B., Kang, S., Ljungqvist, F.C., He, M., Zhao, Y. and Qin, C. (2014) Drought Variability at the Northern Fringe of the Asian Summer Monsoon Region over the Past Millennia. *Climate Dynamics*, **43**, 845-859. <http://dx.doi.org/10.1007/s00382-013-1962-y>
- [15] 勾晓华, 陈发虎, 王亚军, 等. 利用树轮宽度重建近 280a 来祁连山东部地区的春季降水[J]. 冰川冻土, 2001, 23(3): 292-296.
- [16] Kang, S., Bräuning, A. and Ge, H. (2014) Tree-Ring Based Evidence of the Multi-Decadal Climatic Oscillation during the Past 200 Years in North-Central China. *Journal of Arid Environments*, **110**, 53-59. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jaridenv.2014.06.003>
- [17] 吴敬禄, 李世杰, 王苏民, 等. 若尔盖盆地兴措湖沉积记录揭示的近代气候与环境[J]. 湖泊科学, 2000, 12(4): 291-297.
- [18] 吴敬禄, Schleser, G.H., 王苏民, 等. 青藏高原东部兴措湖近 0.2ka 来的气候定量复原[J]. 中国科学(D 辑), 2001, 31(12): 1024-1030.
- [19] 张恩楼, 沈吉, 王苏民, 等. 青海湖近 900 年来气候环境演化的湖泊沉积记录[J]. 湖泊科学, 2002, 14(1): 32-38.
- [20] Chen, J., Chen, F., Zhang, E., Brooks, S.J., Zhou, A. and Zhang, J. (2009) A 1000-Year Chironomid-Based Salinity Reconstruction from Varved Sediments of Suga Lake, Qaidam Basin, Arid Northwest China, and Its Palaeoclimatic Significance. *Chinese Science Bulletin*, **54**, 3749-3759. <http://dx.doi.org/10.1007/s11434-009-0201-8>
- [21] 钟巍, 熊黑钢, 塔西甫拉提, 等. 南疆地区历史时期气候与环境演化[J]. 地理学报, 2001, 56(3): 345-352.
- [22] 李红春, 顾德隆, Paulsen, D., 等. 陕南石笋稳定同位素记录中的古气候和古季风信息[J]. 地震地质, 2000, 22(s1): 63-78.
- [23] Tan, L., Cai, Y., An, Z., Edwards, R.L., Cheng, H., Shen, C.C., *et al.* (2011) Centennial-to Decadal-Scale monsoon Precipitation Variability in the Semi-Humid Region, Northern China during the Last 1860 Years: Records from Stalagmites in Huangye Cave. *The Holocene*, **21**, 287-296. <http://dx.doi.org/10.1177/0959683610378880>
- [24] 中央气象局气象科学研究所. 中国近五百年旱涝分布图集[M]. 北京: 地图出版社, 1981.
- [25] 白虎志, 董安祥, 郑广芬, 等. 中国西北地区近 500 年旱涝分布图集: 1470-2008 [M]. 北京: 气象出版社, 2010.
- [26] 王绍武, 赵宗慈. 近五百年我国旱涝史料的分析[J]. 地理学报, 1979, 34(4): 329-341.
- [27] 邓爱军, 陶诗言, 陈烈庭. 我国汛期降水的 EOF 分析[J]. 大气科学, 1989, 13(3): 289-294.
- [28] 孙林海, 赵振国, 许力, 等. 中国东部季风区夏季雨型的划分及其环流成因分析[J]. 应用气象学报, 2005, 16(s1): 56-62.
- [29] Zhang, X.S., Wu, K.J., Wang, B., *et al.* (2013) The Low-Frequency Variance of the Ocean Surface Wave Field in the Area of the Antarctic Circumpolar Current. *Acta Oceanologica Sinica*, **32**, 15-21. <http://dx.doi.org/10.1007/s13131-013-0309-1>
- [30] 魏凤英. 现代气候统计诊断与预测技术[M]. 北京: 气象出版社, 2003: 105-113.
- [31] Schneider, T. (2001) Analysis of Incomplete Climate Data: Estimation of Mean Values and Covariance Matrices and Imputation of Missing Values. *American Meteorological Society*, **14**, 853-871. [http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442\(2001\)014<0853:aoicde>2.0.co;2](http://dx.doi.org/10.1175/1520-0442(2001)014<0853:aoicde>2.0.co;2)
- [32] Hammer, O., Harper, D.A.T. and Ryan, P.D. (2001) PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Palaeontologia Electronica*, **4**, 1-9.
- [33] 刘洪滨, 邵雪梅, 黄磊. 中国陕西关中及周边地区近 500 年来初夏干燥指数序列的重建[J]. 第四纪研究, 2002,

22(3): 220-229.

- [34] 王振宇, 李林, 汪青春, 等. 树轮记录的 500 年来青海地区夏半年降水变化特征[J]. 气候与环境研究, 2005, 10(2): 250-256.
- [35] 姚檀栋, 秦大河, 田立德, 等. 青藏高原 2Ka 来温度与降水变化——古里雅冰芯记录[J]. 中国科学(D 辑), 1996, 26(4): 348-353.
- [36] 邵雪梅, 梁尔源, 黄磊. 柴达木盆地东北部过去 1437a 的降水变化重建[J]. 气候变化研究进展, 2006, 2(3): 122-126.
- [37] 冯松, 汤懋苍, 周陆生. 青海湖近 600 年的水位变化[J]. 湖泊科学, 2000, 12(3): 205-210.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: ccrl@hanspub.org