

青藏高原地面加热及上空环流场与 东侧旱涝预测的关系*

李跃清

(中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610072)

摘 要 应用奇异值分解 (SVD) 技术研究了青藏高原地面加热场与高原上空 100 hPa 高度场及其东侧川渝地区夏季降水场的时空联系和旱涝预测的关系。结果表明: 地面加热场与高度场的第一模态代表了两场间的主要耦合特征, 具有高度的时空相关; 前期青藏高原地面加热场通过影响后期高原上空 100 hPa 高度场, 导致未来高原东侧川渝地区夏季降水异常; 加热场—高度场—降水场之间的这种非同步关系, 反映了川渝地区旱涝灾害的影响因子和物理成因; 前期高原地面加热场与前期 100 hPa 高度场 SVD 第一模态的变化, 是高原东侧地区未来夏季旱涝异常的预测信号。并由此提出了一种基于 SVD 技术的旱涝预测思路。

关键词: 青藏高原; 大气环流; 旱涝; 奇异值分解

1 引言

青藏高原对于大气环流和天气气候的热力动力作用, 一直是青藏高原气象学研究的重点和难点, 国内外气象工作者已进行了大量有重要价值的工作^[1,2]。叶笃正等^[3]早在 20 世纪 50 年代, 就指出夏季青藏高原是一个巨大的热源, 并从模拟实验分析了高原夏季加热作用对东亚大气环流尤其是南亚高压的重要影响^[4]。莱特尔和丁一汇^[5]指出高原积雪对行星尺度环流有重要作用, 冬季高原多雪, 未来南亚高压出现迟且强度弱。徐国昌等^[6]研究了青藏高原雪盖对我国大气环流和降水异常的影响。这些研究加深了高原热力作用与环流及早涝关系的认识。

四川盆地和重庆市 (简称川渝地区) 紧邻青藏高原东侧, 高原及其上空环流对其有着重要而特殊的影响。郑世京等^[1]分析了高原温度异常与东亚副热带环流及四川盛夏旱涝的关系。最近, 李跃清^[7]指出前期青藏高原上空南亚高压活动区域 100 hPa 高度场与未来夏季高原东侧地区降水场具有密切的时空耦合关系, 高度场与降水场的这种非同步联系, 是高原东侧地区夏季旱涝异常的一种预测信号。但是, 青藏高原加热场和上空环流场与川渝地区旱涝异常的整体时空特征及耦合联系还不很清楚, 前期高原上

2001-02-28 收到, 2001-09-30 收到再改稿

* 国家重点基础研究发展规划项目 G1998040900 第一部分、四川省科技厅重点科技项目 2000-03-21 及国家“九五”科技攻关项目 96-908-05-05 专题共同资助

1) 郑世京、陈效孟, 青藏高原温度的异常与东亚副热带环流及四川旱涝的关系, 全国汛期长期天气预报会议文集, 1983, 210.

空高度场变化如何更好地应用于高原东侧旱涝预测也需深入分析。因此,应用有效的方法进一步研究高原加热与上空环流对川渝地区气候异常的重要影响,建立旱涝预测新途径是非常必要的。

我们应用高原地面加热场强度距平指数^[8],通过 SVD 技术,深入研究了青藏高原地面加热场与其上空 100 hPa 环流场的时空耦合图像,并在环流场与高原东侧旱涝异常时空联系^[7]的基础上,综合分析了高原地面加热场—高原上空环流场—高原东侧旱涝的耦合联系及影响机理,提出了一种基于 SVD 技术的川渝地区夏季旱涝预测思路。

2 资料与方法

应用 1958~1995 年共 38 年逐月高原地面加热场强度距平指数^[8]、国家气象中心 1956~1996 年共 41 年北半球 $10^\circ \times 10^\circ$ 经纬度 100 hPa 月平均高度场和 1961~1994 年共 34 年川渝地区具有代表性的成都、宜宾、广元、遂宁、达川、重庆和酉阳等 21 站月总降水量资料。

根据李栋梁等^[8]提出的青藏高原热源表征方法,对青藏高原 60 个站地—气温差资料计算的高原地面加热场强度,经 EOF 分解,选取信息载荷量最大的玉树和日喀则作为代表站,计算了两站地面加热场强度的月平均距平指数,用以代表青藏高原地面加热场强度。具体计算公式如下:

$$\Delta(B-H)_p = A + B(T_s - T_a)_日 + C(T_s - T_a)_玉 - M,$$

其中, $\Delta(B-H)_p$ 为高原地面加热场强度距平指数,单位为 kW h m^{-2} , $(T_s - T_a)_日$ 和 $(T_s - T_a)_玉$ 分别为日喀则和玉树月平均地面 (0 cm) 温度与百叶箱温度之差, M 为日喀则和玉树两站地面加热场强度气候平均值, A 、 B 、 C 为系数 (参阅文献 [9])。由此得到 1958~1995 年共 38 年逐月高原地面加热场强度距平指数。

奇异值分解 (SVD, Singular Value Decomposition) 方法的主要原理是:分析两个要素场之间的相关,即最大限度地从两个要素场分离出多个相互独立的耦合模态,揭示出两个气象场所存在的时域相关性的空间联系,这种耦合的空间分布型能最大限度地解释两场的交叉协方差^[9,10]。其主要优点是,在气象场的时空分布耦合信号的诊断分析中具有普适性^[10],在分析两个不同要素场之间的联系时比自然正交函数、典型相关方法更为有效,是研究两个要素场序列间时空关系的一个有力工具^[11]。

这里,在前期青藏高原上空 100 hPa 高度场与 6~8 月高原东侧地区降水场 SVD 分析^[7]的基础上,我们以青藏高原上空夏半年南亚高压主要活动地区 ($40 \sim 100^\circ\text{E}$, $20 \sim 40^\circ\text{N}$) 的 100 hPa 高度场为左场 $X(t)$,青藏高原地面加热场强度距平为右场 $Y(t)$ 进行了 SVD 分解。由于右场高原地面加热场强度距平是代表整个高原平均情况的一个单时间序列指标^[8],不是由空间格点构成的场时间序列。因此,对左、右场构造如下:

$$X_{s \times n}(t) = \begin{bmatrix} X_{11} & X_{12} & \cdots & X_{1n} \\ X_{21} & X_{22} & \cdots & X_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ X_{s1} & X_{s2} & \cdots & X_{sn} \end{bmatrix}, \quad Y_{m \times n}(t) = \begin{bmatrix} Y_{11} & Y_{12} & \cdots & Y_{1n} \\ Y_{21} & Y_{22} & \cdots & Y_{2n} \\ \cdots & \cdots & \cdots & \cdots \\ Y_{m1} & Y_{m2} & \cdots & Y_{mn} \end{bmatrix}$$

其中, s 为空间格点, m 为月份, n 为左右场时间序列长度 (年份)。需要指出的是,

将右场高原地面加热场强度距平的月份时间点作为通常 SVD 分析的空间点, 年份时间点为 SVD 分析的时间点, 这种变换还有利于反映不同月份加热场的不同持续作用^[12]。

3 结果分析

一般 SVD 分解中, 某个模态对总体协方差阵的贡献越大, 对应模态相关系数越大, 则表示其耦合关系越密切。下面以协方差贡献大于 50% 和相关系数大于 0.51 (对应 0.001 的信度) 为判别标准。

3.1 高度场与降水场的 SVD 分析

由文献 [7] SVD 分析可知: 青藏高原上空 100 hPa 高度场与高原东侧地区降水场具有密切的时空相关, 第一模态代表了两场相关的基本特征。尤其是前期 10~12 月、1~4 月 100 hPa 高度场与后期夏季高原东侧地区降水场的第一模态协方差贡献率分别达到 66.1%、83.4%, 相关系数分别达 0.60、0.67。表明: 青藏高原上空 100 hPa 高度场与高原东侧川渝地区夏季降水场具有整体一致的耦合关系, 特别是前期 1~4 月青藏高原上空 100 hPa 高度场对高原东侧川渝地区夏季降水场有明显的非同步作用。

前期 1~4 月 100 hPa 高度场与后期夏季高原东侧地区降水场 SVD 第一模态的空间分布 (见文献 [7] 图 1) 为: 高度场在整个高原上空区域都是正值区, 最大区域位于 (55~95°E, 25~40°N), 这正是未来夏季南亚高压中心活动的主要范围。降水场除东南角一片负值区外, 其余地区都为正值区, 其大值区位于 (104~107°E, 30~32°N), 中心在四川北部。这里, 我们再次给出前期 1~4 月青藏高原上空 100 hPa 高度场与高原东侧川渝地区夏季降水场 SVD 第一模态的时间系数 (图 1)。由此看到: 两场第一模态的时间系数变化趋势非常一致, 相关达 0.67, 具有明显的非同步联系。前期 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场异常偏高 (低), 未来夏季高原东侧大部地区降水偏多 (少)。并且, 1961~1994 年间, 青藏高原东侧地区 1994、1978、1972、1975、1969、1970、1976 年的严重干旱都发生在时间系数的负位相中, 而 1993、1987、1981、1984、1973、1965、1989 年的严重洪涝都发生在正位相中^[7]。因此, 前期 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场与未来夏季高原东侧降水场 SVD 得到的第一模态高度场的时间系数 T_{h1} 具有指示意义, 是一个有用的预测信号。但如何在夏季之前单独提取高度场的这一变化是一个

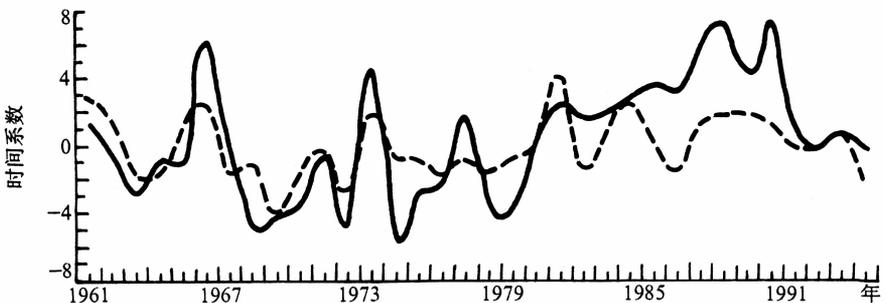


图 1 由 SVD 得到的左场 1~4 月青藏高原上空 100 hPa 高度场与右场 6~8 月高原东侧地区降水场第一模态的时间系数 T_{h1} (实线) 和 T_{p1} (虚线) (引自文献 [7] 图 2)

关键问题，下面我们将具体讨论。

3.2 加热场和高度场的 SVD 分析

为了在夏季之前单独提取高度场中对高原东侧夏季降水场有预测意义的高度场变化，我们设想，通过 SVD 分析得到前期或同期高原地面加热场与 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场的耦合关系，如果由此得到的高度场的第一模态变化与 1~4 月高度场与未来夏季降水场 SVD 得到的高度场的第一模态^[7]基本类似，那么，我们就可以以前者代替后者，从而实现提前获得 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场中作为预测信号的高度场变化。

以青藏高原上空 21 个空间格点的 1~4 月平均 100 hPa 高度场为左场，以月份构成空间格点的高原地面加热场强度距平为右场，左右场时间序列长度为 1958~1995 年或 1959~1996 年共 38 年，进行的 SVD 分析得到：前一年 1~10 月，1~11 月青藏高原地面加热强度场与未来 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场具有最密切的时空相关，两场第一模态方差贡献大，分别占 75.1% 和 74.5%，相关系数都达到 0.62。表明前期高原加热场能够反映出后期 1~4 月 100 hPa 环流场的变化信息，并且第一模态代表了两场相关的基本特征。下面，为了深入分析高原加热场—100 hPa 环流—高原东侧降水的联系，寻找夏季旱涝预测的前兆信号，我们主要分析前期 1960~1993 年 34 年 1~10 月青藏高原地面加热强度场与后期 1961~1994 年 34 年 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场的非同步 SVD 结果。

后期 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场的空间分布型第一模态（图 2）表明：高度场上，高原上空整个区域都为正值区，在（60~90°E，25~40°N）高原西部一带是低值区，（40~60°E，25~35°N）伊朗一带是高值区。而前期高原地面加热场由月份构成的空间分布型第一模态，1~3 月为正值，4~10 月为负值，大小分别为 0.62、0.09、0.21、-0.14、-0.28、-0.32、-0.19、-0.40、-0.38、-0.13，其中 1 月、8 月、9 月、6 月数值最大。要指出的是，图 2 与前期 1~4 月 100 hPa 高度场与后期 6~8 月高原东侧地区降水场 SVD 第一模态的空间分布^[7]相比较，其区域符号一致，分布基本相似。

图 3 进一步表明：两场第一模态的时间系数呈反位相变化，相关达 -0.62，具有明显的非同步联系，前期 1~10 月高原地面加热场时间系数处于正（负）位相，未来

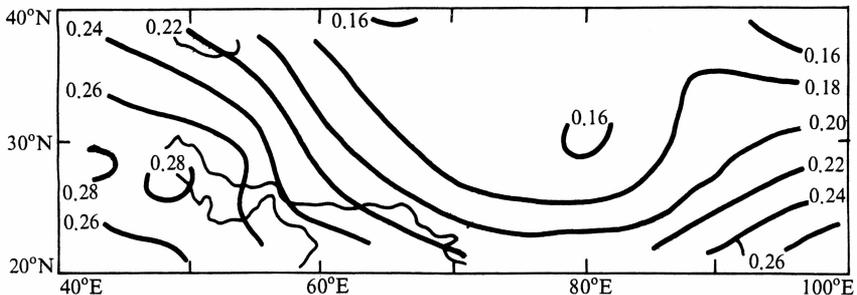


图 2 由 1960~1993 年 1~10 月青藏高原地面加热强度场与 1961~1994 年 1~4 月高原上空 100 hPa 高度场 SVD 得到的左场 100 hPa 高度场第一模态的空间结构

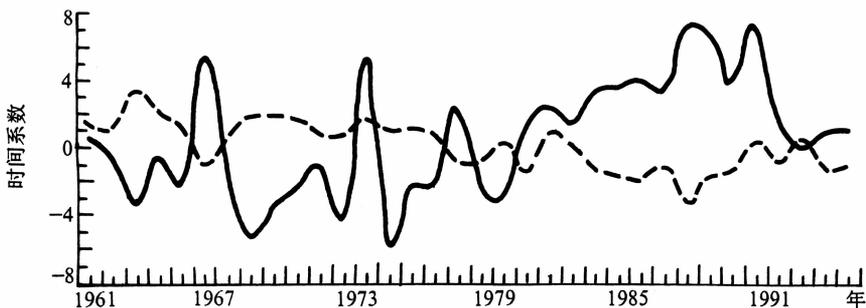


图3 由SVD得到的右场1960~1993年1~10月青藏高原地面加热强度场与左场1961~1994年1~4月高原上空100 hPa高度场第一模态的时间系数 T_{12} (虚线)、 T_{11} (实线)

1~4月高原上空100 hPa高度场时间系数则处于负(正)位相。而且,1961~1994年青藏高原东侧川渝地区夏季重大旱涝异常事件大多有清晰的反映,强度也拟合得较好,1994、1978、1972、1975、1969、1970、1976年的严重干旱基本都发生在高度场(加热场)时间系数的负(正)位相中,1993、1987、1981、1984、1973、1965、1989年的严重洪涝基本都发生在其正(负)位相中。这表明前期1~10月青藏高原地面加热场强度1~3月偏强(弱),4~10月偏弱(强),未来第二年1~4月高原上空100 hPa高度场异常偏低(高),则夏季高原东侧川渝地区大部降水偏少(多)^[7],具有指示意义。

由图1、3对比看到:前期1~4月青藏高原上空100 hPa高度场和后期夏季高原东侧川渝地区降水场SVD得到的1~4月100 hPa高度场的第一模态时间系数 T_{11} 与前期1~10月高原地面加热场和后期1~4月高原上空100 hPa高度场SVD得到的1~4月100 hPa高度场的第一模态时间系数 T_{12} 变化非常一致,这反映了高原热源与川渝地区旱涝的内在物理联系和影响机理。由于青藏高原加热场直接与川渝地区降水场的SVD分解时空相关不明显,这可能说明高原加热是通过大气环流这个中介而影响旱涝的,高原地面加热场—100 hPa高度场—川渝地区旱涝之间的这种非同步关系,具有明显的物理基础。

3.3 预测信号提取及应用思路

由以上分析可知,前期1~10月高原地面加热场和后期1~4月高原上空100 hPa高度场SVD分析与前期1~4月高原上空100 hPa高度场和后期6~8月高原东侧地区降水场SVD分析得到的1~4月100 hPa高度场第一模态的空间分布基本相似,并且它们对应的1~4月100 hPa高度场第一模态的时间系数 T_{12} 和 T_{11} 也是一致的(图4)。这种等价性表明前期高原地面热源的持续变化,引起高原上空100 hPa高度场的异常变化,而高度场的这种变化正是引起未来夏季川渝地区旱涝异常的主要因素。因此,通过高原地面加热场与高原上空100 hPa高度场SVD分解,我们已成功地在夏季之前单独提取了前期1~4月高原上空100 hPa高度场与未来夏季高原东侧降水场SVD的1~4月高度场第一模态时间系数 T_{11} ,在此基础上可做出川渝地区夏季降水异常预测。

下面,进一步说明这种基于SVD技术提取预测信号的应用价值。对比分析得到(表略):1~4月100 hPa高度场与高原东侧川渝地区夏季6~8月降水场SVD第一模

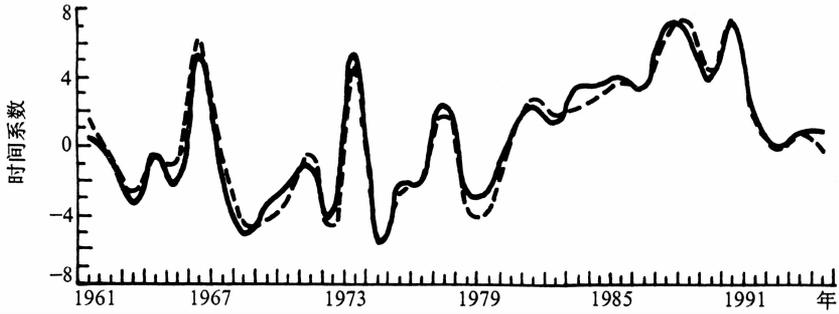


图4 由1~4月100 hPa高度场与川渝地区夏季降水场SVD和1~10月高原地面加热场与1~4月100 hPa高度场SVD分别得到的1~4月100 hPa高度场的第一模态时间系数 T_{h1} (虚线)、 T_{h2} (实线)

态时间系数 T_{h1} 和 T_r 在34年中有28年同号,占82%;1~10月高原地面加热场与1~4月100 hPa高度场SVD第一模态时间系数 T_1 和 T_{h2} 在34年中有29年异号,占85%; T_r 与川渝地区6~8月平均降水距平 R 在34年中有28年同号,占82%; T_{h1} 与 R 有26年同号,占76%; T_{h2} 与 R 有25年同号,占74%; T_1 与 T_r 有23年同号,占69%; T_{h2} 与 T_{h1} 有33年同号,占97%; T_{h2} 与 T_r 有27年同号,占80%。由于 T_r 与 R 和 T_r 与 T_{h1} 符号基本一致,而 T_{h1} 与 T_{h2} 符号大小也都非常接近。所以,我们可从前期高原加热场与前期100 hPa高度场耦合联系中提取预测信号,由此预测未来川渝地区夏季降水。具体思路是:每预报年5月应用已知资料,对前一年1~10月高原地面加热场与预报年前期1~4月高原上空100 hPa高度场作SVD分解,得到高度场第一模态时间系数 T_{h2} ,然后遵照如下推断法则:如 T_{h2} 为正(负),则 T_{h1} 也为正(负),那么未来6~8月 T_r 为正(负),则预测高原东侧川渝地区夏季6~8月降水 R 大部偏多(少)。还可通过建立物理统计关系,根据 T_{h2} 得出 T_{h1} 、 T_r 的值,做出川渝地区夏季降水的定量分布预报。

以上表明:青藏高原地面加热场与其上空100 hPa高度场及高原东侧川渝地区降水场时空相关显著,时间间隔长,物理意义明确,根据前期青藏高原地面加热场的变化,通过SVD分析可得到后期高原上空100 hPa高度场与加热场对应的耦合变化,这种变化对未来川渝地区6~8月降水有直接的重要作用。因此,前期高原地面加热场与其上空100 hPa高度场的非同步耦合变化是高原东侧川渝地区夏季降水异常的重要预测信号,而SVD分析技术则是提取这种预测信号的一种途径。

4 结论

(1) 青藏高原地面加热场与其上空100 hPa高度场具有显著相关,其SVD分解的第一模态表明两场间整体一致的耦合关系,代表了加热场与高度场之间的最主要相关特征。

(2) 前期高原地面加热场通过持续影响后期青藏高原上空100 hPa高度场,导致未来高原东侧川渝地区夏季降水异常,加热场—高度场—降水场之间的这种非同步联系,反映了川渝地区旱涝灾害发生的物理本质及内在原因。

(3) 青藏高原地面加热场强度前期 1~3 月偏弱(强), 4~10 月偏强(弱), 则后期高原上空 100 hPa 高度场偏高(低), 未来高原东侧川渝地区夏季降水偏多(少), 易于发生洪涝(干旱)。

(4) 由于前期青藏高原地面加热场与高原上空 100hPa 高度场及后期高原东侧川渝地区降水场的联系, 时空相关显著, 时间间隔长, 物理意义明确, 具有很好的指示意义。因此, 前期高原地面加热场与 100 hPa 高度场 SVD 第一模态的变化, 是未来高原东侧川渝地区夏季旱涝异常的一种预测信号。

(5) SVD 技术不仅是一种要素场时空分布耦合信号的诊断分析工具, 而且也可作为一种提取预报对象场前兆预测信号的有效途径。

另外, 由于本文所用高原地面加热场强度指数仅考虑了地—气温差的影响, 反映高原热源有一定局限性, 并且高原地面热源影响上空环流场的具体物理过程还有待深入分析。应用 SVD 技术, 通过前期其他因子场广泛提取气候异常更多的预测信号也是非常必要的。

致谢: 李栋梁研究员提供了青藏高原地面加热场资料, 审稿专家及刘富明研究员对本文的修改提出了很好意见, 特此致谢。

参 考 文 献

- 1 叶笃正、高由禧, 青藏高原气象学, 北京: 科学出版社, 1979, 1~211.
- 2 章基嘉等, 青藏高原气象学进展, 北京: 科学出版社, 1988, 1~268.
- 3 叶笃正等, 青藏高原及其附近的流场结构和对流层大气的热量平衡, 气象学报, 1957, **28**, 108~120.
- 4 叶笃正等, 青藏高原加热作用对夏季东亚大气环流的初步模拟实验, 中国科学, 1974, 301~320.
- 5 E. R. 莱特尔、丁一汇, 青藏高原在影响行星环流反馈机制中的作用, 大气科学, 1980, **4** (4), 300~309.
- 6 徐国昌等, 青藏高原雪盖对我国环流和降水的影响, 应用气象学报, 1994, **5** (2), 116~124.
- 7 李跃清, 青藏高原上空环流变化与其东侧旱涝异常分析, 大气科学, 2000, **24** (4), 470~476.
- 8 李栋梁、陈丽萍, 青藏高原地面加热场强度与东亚环流及西北初夏旱的关系, 应用气象学报, 1990, **1** (4): 383~391.
- 9 Wallace, J. M., C. Smith, and C. S. Bretheron, Singular value decomposition of winter time sea surface temperature and 500 hPa height anomalies, *J. Climate*, 1992, **5**, 561~576.
- 10 丁裕国、江志红, SVD 方法在气象诊断分析中的普适性, 气象学报, 1995, **54** (3), 365~371.
- 11 孙照渤、章基嘉、J. M. 华莱士, 冬季北大西洋地区海表温度与 500 百帕高度奇异值分解, 南京气象学院学报, 1991, **14** (3), 287~293.
- 12 李跃清、童文林, 东亚冬季风异常与 ENSO 事件及其预测意义, 成都气象学院学报, 1999, **14** (1), 14~19.

Surface Heating in the Tibetan Plateau and General Circulation over It and Their Relations with the Prediction of Drought – Flood at Its Eastern Side

Li Yueqing

(*Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610072*)

Abstract Using Singular Value Decomposition (SVD) technique, the relationships between surface heating field in the Tibetan Plateau and 100 hPa height field and summer rainfall in Sichuan Province and Chongqing Municipality (SPCM) at its eastern side and the prediction of drought—flood are studied. The result shows that the first modes derived from SVD indicate the key coupled characteristics of the heating and the height fields with closely time-space correlation. The previous surface heating field in the Tibetan Plateau, by influencing 100 hPa height field over it, results in the anomalies of summer rainfall in SPCM at its eastern side. This asynchronous connection between heating and height and rainfall fields indicates the influence factors and physical reasons for drought-flood disaster in SPCM. The variation of the first modes derived from SVD with the previous surface heating field in the Tibetan Plateau and 100 hPa height field is a strong signal for the prediction of summer drought-flood anomalies in SPCM at the eastern side of the Tibetan Plateau. Thereby, it is put forward that a train of thought for prediction of drought – flood based on SVD technique.

Key words: Tibetan Plateau; atmospheric circulation; drought-flood; singular value decomposition