

徐栋夫, 李栋梁, 王慧. 2014. 我国西南地区秋季干湿分类及主要类型异常年环流特征分析 [J]. 大气科学, 38 (2): 373–385, doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12216. Xu Dongfu, Li Dongliang, Wang Hui. 2014. Autumn dry-wet conditions and main types of atmospheric circulation in anomalous years in Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 38 (2): 373–385.

我国西南地区秋季干湿分类及主要类型 异常年环流特征分析

徐栋夫¹ 李栋梁^{1,2} 王 慧¹

¹ 南京信息工程大学气象灾害预报预警与协同创新中心, 气象灾害教育部重点实验室, 南京 210044

² 中国气象局成都高原气象研究所, 成都 610071

摘 要 本文使用我国西南地区 97 站 1960~2009 年逐日资料, 计算了考虑降水和气温的干湿指数, 分析了西南地区秋季及 9、10、11 月干湿指数的时空变化特征。采用相似方法, 构造了综合相似指数, 对历年干湿分布进行分类, 并给出了秋季各月各类干湿出现的概率。此外还使用再分析资料分月探讨了干湿分布主要类型异常年的大气环流特征。分析结果表明: 西南地区秋季存在显著的干旱化趋势, 且该地区干湿变化存在全区一致、东西相反和南北相反的特征。根据干湿变化主要模态的空间型, 利用综合相似指数可以将历年秋季干湿分为全区一致偏干型、全区一致偏湿型、东湿西干型、东干西湿型、南湿北干型、南干北湿型和非典型型, 共 7 类。全区干湿一致型出现的次数最多 (不低于 50%), 东西相反型次之 (约 25%), 南北相反型较少 (约 15%), 而出现非典型型次数极少 (不足 10%)。从季节内尺度来看, 全区偏干 (湿) 的持续性较差, 但 10 月份的东部偏湿区域则有较大几率 (不低于 50%) 在下个月扩展到整个区域。全区偏干型异常年, 东亚大槽偏弱或偏东, 冷空气南侵困难; 南海上空低层维持一个异常的气旋环流, 西南地区暖湿气流输送偏弱; 西太平洋副高偏强、西伸, 南亚高压面积偏大, 与西太副高重叠, 西南地区长期受高压控制。这种异常环流形势的维持, 使得该地区天气晴朗少雨, 气温偏高, 持续干旱。偏湿型异常年则基本呈相反的环流特征。而西南地区东、西部上空异常的垂直运动和东部低层的南、北风异常是造成东湿 (干) 西干 (湿) 型异常的重要原因。

关键词 干湿指数 相似方法 综合相似指数 干湿分布分类 环流特征

文章编号 1006-9895(2014)02-0373-13

中图分类号 P462

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2013.12216

Autumn Dry-Wet Conditions and Main Types of Atmospheric Circulation in Anomalous Years in Southwest China

XU Dongfu¹, LI Dongliang^{1,2} and Wang Hui¹

¹ Collaborative Innovation Center on forecast and Evaluation of Meteorological disasters, Key Laboratory of Meteorological Disaster of Ministry of Education, Nanjing University of Information Science & Technology, Nanjing 210044

² Institute of Plateau Meteorology, China Meteorological Administration, Chengdu 610071

Abstract Based on daily data from 97 stations in Southwest China (SWC) from 1960 to 2009, we calculated the dry-wet index, which considers precipitation and temperature, and studied the spatiotemporal variations of the autumn

收稿日期 2012-12-12, 2013-05-23 收修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划 (973) 项目 2013CB430202, 国家自然科学基金项目 41305080, 高原气象开放实验室基金课题 “西南地区 2009/2010 年干旱成因研究”, 高等学校博士学科点专项科研基金资助课题 (博导类) 20113228110003, 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (PAPD)

作者简介 徐栋夫, 1987 年出生, 男, 硕士研究生, 主要从事气候监测和气候诊断研究, E-mail: xudongfu_123@163.com

通讯作者 李栋梁, E-mail: lidl@nuist.edu.cn

dry-wet index. Using the similarity method, a composite similar index was introduced and the distribution of dry-wet conditions was classified according to this index. The main types of atmospheric circulation characteristics in anomalous years are discussed using the NCEP/NCAR reanalysis data. The results suggest that the drying trend is significant in SWC. There are three main modes of autumn dry-wet variations in SWC: consistent across the whole region, a dipole in the latitudinal direction, and a dipole in the longitudinal direction. The distribution of dry-wet conditions can be divided into seven types: the consistent dry (A-), the consistent wet (A+), eastern wet-western dry (B-), eastern dry-western wet (B+), southern wet-northern dry (C-), southern dry-northern wet (C+), and atypical (D). The A (including A- and A+) type is the most frequent (no less than 50%); the B (including B- and B+) type is second (about 25%); the C (including C- and C+) type is less frequent (about 15%); and the D type occurs few times (less than 10%). From October to November, the eastern wet areas have a good chance to expand and cover the whole area in the next month (no less than 50%). The A type is mainly affected by anomalies of the East Asia major trough, the circulation over the South China Sea, and the configuration between the western Pacific subtropical high and South Asia high. The B type anomaly correlates with the vertical movement anomalies in the western-eastern SWC and the wind anomalies in eastern SWC.

Keywords Dry-wet index, Similarity method, Composite similar index, Classification of dry-wet distribution, Atmospheric circulation characteristics

1 引言

我国是自然灾害频发的国家,灾害造成的损失十分严重,其中干旱最为常见,影响最大。以往我国的干旱主要集中在北方地区,而近几年至十几年,在全球变暖背景下北方旱情继续加重的同时,南方地区也出现了范围大、持续时间长的严重干旱,如 2006 年西南地区东部夏季干旱及 2009 至 2010 年整个西南地区发生的秋、冬、春连旱均造成了巨大的损失,带来了灾难性的影响,严重威胁到人民生活。

我国西南地区地形独特,气候变化敏感,影响该区域气候变化的因子也较为复杂。目前,关于西南地区气候变化的研究已经取得了一些有意义的结果。马振锋等(2006)指出,西南地区气候变化与全球变暖存在非同步性,其区域气候变化也具有非一致性,气候要素在高海拔地区比低海拔地区突变时间早。刘燕等(2002)将西南地区夏季降水进行了分区,发现各区降水变化存在显著的差异。杨绚和李栋梁(2008)利用降水量距平百分率对我国干旱气候分区,其中西南地区南部和北部分别被划分为两个不同的区,这也说明了该地区气候变化存在区域非一致性。刘晓冉等(2007, 2008)研究表明西南地区年降水和年平均气温存在全区一致变化和东西相反变化的特征。蒋兴文和李跃清(2010)分析了西南地区冬季降水和气温的时空演变特征及其影响因子,结果表明该地区冬季气温变化也存在全区一致和东西相反特征,且这些变化与东亚冬季风,西太平洋副热带高压及冷空气活动的

异常有关;而冬季降水主要表现为全区一致的变化特征,其变化与北半球环状模有关。关于西南地区旱涝成因的研究也取得了一些成果。彭京备等(2007)通过分析 2006 年夏季西南地区高温干旱的特征及成因,指出西太平洋副热带高压和大陆副热带高压的异常活动是这次干旱形成的主要原因。李永华等(2009)分析了 2006 年夏季西南地区东部干旱异常的大气环流,指出中高纬度环流及西太平洋副热带高压、西风带环流、南亚高压、低层流场、水汽输送以及垂直运动等持续异常可以导致该地区干旱,2006 年夏季属于副高控制性高温伏旱。李永华等(2011)研究指出高原主体东南部的热源变化与西南地区东部夏季降水关系密切,当夏季青藏高原大气热源偏强时,西太平洋副高和南亚高压脊线位置偏南,东亚夏季风偏弱,同时西南地区东部水汽输送增强,西南地区夏季降水容易偏多。张新主等(2011)从水汽输送、西风环流、副高等方面分析了西南地区 2009 年秋旱的大气环流特征。艾永智等(2012)研究表明,2009 年秋季孟加拉湾和南海上空分别出现的异常环流造成了向西南地区输送的水汽减少,导致该地区的干旱发生。黄荣辉等(2012)系统地分析了 2009 年秋至 2010 年春西南地区干旱的成因,他们的研究表明热带西太平洋、中印半岛、孟加拉湾和青藏高原东部大气环流的严重异常及中高纬度准定常行星波传播异常造成的北极涛动异常导致了西南地区持续性干旱的发生。

以往西南地区气候异常的研究主要侧重于夏季降水异常所引起的旱涝及其成因,对其他季节的

研究相对较少, 而且关于近年来西南地区干旱的研究大多以个例为主。事实表明, 高温所造成的蒸发对干旱形成、持续影响也是非常重要的, 因此在研究中考考虑降水和气温的干湿指标能更好地反映干湿状况。同时已有研究表明西南地区的气候变化是存在着区域非一致性的, 那么能否对其进行分类分别研究呢? 考虑到西南地区 2009 至 2010 年连旱从秋季开始, 且 2009 年秋季降水偏少程度和气温偏高程度都十分明显。因此本 49239+1.79 文计算考虑降水和气温的干湿指数, 进而分析西南地区秋季干湿时空变化特征。根据干湿变化的主要空间分布, 采用相似方法, 构造综合相似指数对西南地区历年干湿分布进行分类, 并探讨干湿分布主要类型异常年的大气环流特征。

2 资料与方法

从国家气象信息中心提供的全国 756 个测站资料中挑选出西南地区 (四川、云南、贵州、广西和重庆) 97 个气象站点, 站点分布在以往的工作中已给出 (徐栋夫等, 2013)。使用了其 1960~2009 年的日平均气温、日降水量资料。还使用了同期 NCEP/NCAR 的逐月再分析资料 (Kalnay et al., 1996)。本文中的秋季指的是 9~11 月。

考虑降水和蒸发的干湿指数 (徐栋夫等, 2013), 计算公式如下:

$$DWI = \frac{\Delta R}{\sigma R} - \frac{\Delta Pe}{\sigma Pe}, \quad (1)$$

其中 ΔR 、 ΔPe 分别是月降水量和月潜在蒸发量的距平 (气候平均值用 1960~2009 年, 50 a), σR 、 σPe 分别是月降水量和月潜在蒸发量的均方差。月潜在蒸发量采用 Thornthwaite 方法 (Thornthwaite, 1948), 使用改进的计算方案 (Sneyers, 1990)。Thornthwaite 方法在我国应用广泛, 许多学者利用了该方法来研究我国的干湿变化 (马柱国等, 2005; 刘晓云等, 2012)。

Thornthwaite 方法计算潜在蒸发量的公式如下:

$$Pe_j = \begin{cases} 0 & T_j \leq 1^\circ\text{C} \\ 1.6d(10T_j/I)^a \times 10 & 1 < T_j \leq 26.5^\circ\text{C} \\ a_1 + a_2T_j + a_3T_j^2 & T_j > 26.5^\circ\text{C} \end{cases}, \quad (2)$$

式 (2) 中, d 为每月的天数除以 30。 $I = \sum_{i=1}^{12} i$ 为月总加热指数, $i = (T_j/5)^{1.514}$ 为月平均加热指数。其中

T_j 为第 j 个月的月平均温度, 单位为 $^\circ\text{C}$ 。 $a_1 = -415.8547$, $a_2 = 32.2441$, $a_3 = -0.4325$, $a = 0.49239 + 1.792 \times 10^{-2} I - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 6.75 \times 10^{-7} I^3$ 。根据式 (1)、式 (2) 可得到各月干湿指数。取 9~11 月算术平均值代表秋季干湿指数。干湿指数 DWI 数值越大表示越湿润, 数值越小表示越干旱。

利用建立的西南地区 97 站 50 a 干湿指数序列, 分析了该地区秋季及 9、10、11 月干湿时空变化特征。并根据干湿变化主要模态的空间分布, 采用相似方法对西南地区近 50 a (1960~2009 年) 干湿分布进行分类, 给出了各类干湿出现的概率, 分月探讨了出现概率较大的几类干湿异常的大气环流特征。

3 西南地区秋季干湿的时空变化特征

秋季平均 (取 97 站算术平均) 干湿指数曲线呈现出明显的下降趋势, 表明秋季干旱化趋势显著, 见徐栋夫等 (2013) 图 2a。从 1990 年代末至 2009 年, 西南地区基本上均处于偏干的状态, 1998 年和 2009 年为近 50 a 来干旱程度最严重的两年。9、10、11 月干湿指数也均呈现出下降趋势, 而且在近 20 a 来基本上也是偏干的 (图 1, 图中 R 反映了干湿指数曲线与各自线性趋势线的相关关系)。9 月、10 月干湿变化与秋季干湿变化较为相似, 相关系数分别为 0.66、0.62; 而 11 月干湿变化则与秋季干湿变化有较大的差别。其中 9 月干湿变化波动幅度最大, 11 月次之, 10 月变化最小; 10 月干旱化趋势程度最大, 11 月次之, 9 月最小。总的来说, 西南地区秋季是存在干旱化趋势的。

为了研究西南地区秋季干湿时空变化特征和为干湿分类提供依据, 本文对其 97 站秋季及 9、10、11 月干湿指数进行了 EOF (Empirical Orthogonal Functions) 分析。各时段干湿指数的前 3 个模态均解释了总方差的 50% 以上。且前 3 模态满足 North 显著性检验 (North et al., 1982), 可以认为西南地区干湿变化主要存在这三个模态。

秋季干湿的时空变化特征在以往工作中已有研究 (徐栋夫等, 2013), 但为了在后面检验分类效果时便于进行对比, 这里给出了其 EOF 分析的前 3 载荷向量 (图 2)。

秋季干湿指数 EOF 分析 LV1 (第一载荷向量) 呈全区域一致变化, 即存在一致偏湿或偏干的异常特征, 该模态占总方差的 38%。南部地区的值明显

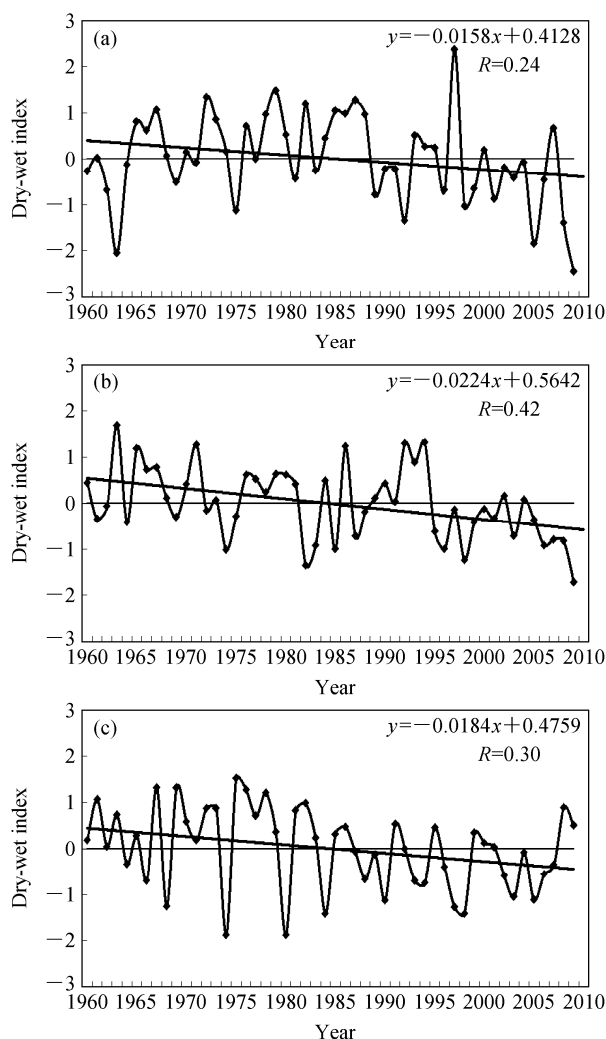


图1 西南地区 1960~2009 年干湿指数序列: (a) 9 月; (b) 10 月; (c) 11 月

Fig. 1 Dry-wet index series in Southwest China from 1960 to 2009: (a) September, (b) October, (c) November

比北部大,说明该地区旱涝异常较为活跃。PC1 (第一模态时间系数) 表现出明显的下降趋势 (图略), 1980 年代末以前大多为正 (偏湿), 以后基本为负 (偏干)。LV2 (第二载荷向量) 表现为纬向的偶极型空间分布, 零线在 105°E 左右, 西部为正值区域, 东部为负值区域, 该模态占总方差的 12%。PC2 (第二模态时间系数) 呈现出较为明显的上升趋势。该模态表明, 西南地区存在着东部变干、西部变湿的特征。LV3 (第三载荷向量) 表现为南、北部干湿相反变化的特征, 绝对值大值区分别在广西和川东、重庆一带, 该模态占总方差的 7%。PC3 (第三模态时间系数) 呈现下降趋势, 在 21 世纪初, 波动幅度变大。该模态表明西南地区南部变湿、北部变干, 且这种变化特征在近十年来是较为明显的。

秋季分月干湿变化情况与该季类似, 这里不再赘述。

4 近 50 年西南地区秋季干湿分布的分类及各类干湿出现的概率

通过以上分析可知, 西南地区秋季及 9、10、11 月干湿变化均存在全区一致, 东西相反及南北相反的特征。为了能更加细致地认识该地区干湿变化, 本文采用相似方法将近 50 a (1960~2009 年) 历年秋季及 9、10、11 月干湿分为了全区一致偏干型、全区一致偏湿型、东湿西干型、东干西湿型、南湿北干型、南干北湿型和非典型型, 共 7 类。采用该方法比起直接分析 EOF 的分量具有一定的优越性, 可以将 EOF 前三种 (或其中两种) 分量都较大的年份客观地进行分类 (该年只分为各类型干湿

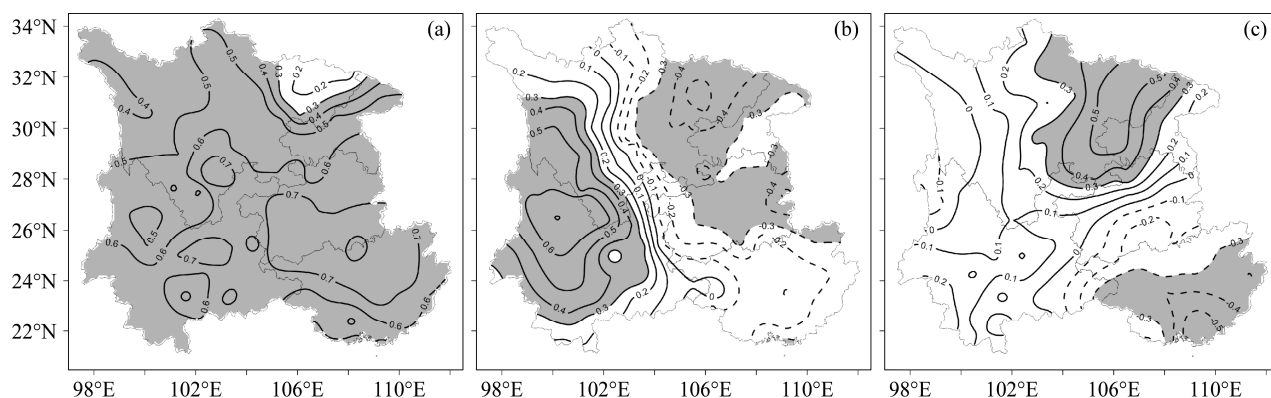


图2 西南地区 1960~2009 年秋季干湿指数 EOF 分析前 3 载荷向量: (a) 第一载荷向量; (b) 第二载荷向量; (c) 第三载荷向量。阴影区为载荷向量绝对值大于 0.3 (通过了 $\alpha = 0.05$ 显著性水平检验) 的区域, 实线为正值, 虚线为负值

Fig. 2 The loading vector of EOF modes of autumn dry-wet index in Southwest China from 1960 to 2009: (a) first loading vector; (b) second loading vector; (c) third loading vector. The absolute values in the shaded areas are more than 0.3 (represent $\alpha = 0.05$ significance level), the solid line is positive, the dashed line is negative

其中特征最为明显的一种); 且在合成分析, 这些年份仅参与其中一种类型异常年的合成, 可排除对其他类型异常年合成时的影响。

4.1 相似方法及综合相似指数

相似方法在天气预报业务中被广泛使用, 但将其应用到气候要素场上的分类并不多。相似方法中的相似判据较多, 对相似程度衡量的侧重点也不尽相同, 大致可以分为“形”相似和“值”相似判据。常用的“形”相似判据有相似系数、Pearson 相关系数等; 常用的“值”相似判据有绝对距离、欧氏距离、相对欧氏距离等。

为了能较为准确地分辨出干湿分布型, 需要一个考虑较为全面的综合相似指数。相似系数不仅能反映两个场之间“形”相似程度, 还能识别出两个场要素的符号相反或相同, 因此采用该系数作为综合相似指数中“形”的部分。相似系数公式如下:

$$S_{ij} = \frac{\sum_{k=1}^m x_{ik} x_{jk}}{\sqrt{\sum_{k=1}^m x_{ik}^2 \sum_{k=1}^m x_{jk}^2}}, \quad (3)$$

相似系数的值在-1 与 1 之间, $|S_{ij}|$ 越接近 1, 表示两个场, 即向量 $\mathbf{X}_i$ (场 x_{ik}) 与向量 $\mathbf{X}_j$ (场 x_{jk}) 越相似。由于选取的“值”相似判据的数量级应与所选的“形”相似判据数量级相同, 因此采用相对欧氏距离作为综合相似指数中“值”的部分。相对欧氏距离公式如下:

$$R_{E_{ij}} = \frac{E_{ij}}{E_{\max}}, \quad (4)$$

其中, E_{ij} 为欧氏距离, $E_{\max}$ 为样本最大欧氏距离。

$$E_{ij} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{ij} - x_{jk})^2}, \quad (5)$$

$$E_{\max} = \sqrt{\sum_{k=1}^m (x_{k\max} - x_{k\min})^2} \quad (k=1, 2, 3, \dots, m), \quad (6)$$

式(6)中 $x_{k\max}$ 和 $x_{k\min}$ 分别为样本空间点 k 上要素历史最大值和历史最小值。由式(4)可知, $0 \leq R_{E_{ij}} \leq 1$, 当 $R_{E_{ij}} = 0$ 时, 表示最为相似; 当 $R_{E_{ij}} = 1$ 时, 表示达到了历史上最不相似的情况。考虑到“形”值部分 $|S_{ij}| = 1$ 时, 表示向量 $\mathbf{X}_i$ 与 $\mathbf{X}_j$ 最为相似, 需要对相对欧氏距离 $R_{E_{ij}}$ 进行进一步处理。取距离系数 $I_{ij} = 1 - R_{E_{ij}}$, 作为综合相似指数“值”的部分。

“形”部分和“值”部分各取权重二分之一,

构成综合相似指数 C_{ij} :

$$C_{ij} = \begin{cases} \frac{1}{2}(S_{ij} + I_{ij}) & S_{ij} \geq 0 \\ -\frac{1}{2}(|S_{ij}| + I_{ij}) & S_{ij} < 0 \end{cases}, \quad (7)$$

该指数与阎惠芳等(2003)定义的指数类似, 但本文构造的综合相似指数能够识别出正相似和负相似。 C_{ij} 的取值范围为-1 至 1。 C_{ij} 越接近 1 (-1), 表示两个场越正(负)相似; C_{ij} 越接近 0, 表示越不相似。

4.2 西南地区干湿分布的分类

利用构造的综合相似指数可以客观地对近 50 a 西南地区干湿分类。以秋季干湿指数 EOF 分析的前 3 载荷向量 $\mathbf{X}_{1,i}$ (LV1)、 $\mathbf{X}_{2,i}$ (LV2)、 $\mathbf{X}_{3,i}$ (LV3) 为典型干湿类型, 历年干湿指数为 $X_{1,j}$ (第一年干湿指数, 以此类推)、 $X_{2,j}$ 、...、 $X_{50,j}$, 分别求出 X_i 与 X_j 的综合相似指数。求得的综合相似指数共三组序列, 每组序列 50 个值。其中, 第一组序列为 $X_{1,i}$ 分别与 $X_{1,j}$ 、 $X_{2,j}$ 、...、 $X_{50,j}$ 的综合相似指数 $C_{1,ijn}$ ($n=1, 2, \dots, 50$), 表示了历年干湿分布与第一类典型干湿类型 (LV1) 的相似程度; 第二组序列为 $X_{2,i}$ 分别与 $X_{1,j}$ 、 $X_{2,j}$ 、...、 $X_{50,j}$ 的综合相似指数 $C_{2,ijn}$ ($n=1, 2, \dots, 50$), 表示了历年干湿分布与第二类典型干湿类型 (LV2) 的相似程度; 第三组序列为 $X_{3,i}$ 分别与 $X_{1,j}$ 、 $X_{2,j}$ 、...、 $X_{50,j}$ 的综合相似指数 $C_{3,ijn}$ ($n=1, 2, \dots, 50$), 表示了历年干湿分布与第三类典型干湿类型 (LV3) 的相似程度。每一年对应有三个综合相似指数 $C_{1,ijn}$ 、 $C_{2,ijn}$ 、 $C_{3,ijn}$, 比较它们绝对值的大小, 从而进行分类。具体来说可以分为 7 类:

(1) 若 $C_{1,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系数绝对值大于 0.3 (通过了 $\alpha=0.01$ 显著性水平检验, 下同), $C_{1,ijn}$ 符号为负, 表示该年 (第 n 年, 下同) 为全区一致偏干型。

(2) 若 $C_{1,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系数绝对值大于 0.3, $C_{1,ijn}$ 符号为正, 表示该年为全区一致偏湿型。

(3) 若 $C_{2,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系数绝对值大于 0.3, $C_{2,ijn}$ 符号为负, 表示该年为东湿西干型。

(4) 若 $C_{2,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系数绝对值大于 0.3, $C_{2,ijn}$ 符号为正, 表示该年为东干西湿型。

(5) 若 $C_{3,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系

数绝对值大于 0.3, $C_{3,ijn}$ 符号为负, 表示该年为南湿北干型。

(6) 若 $C_{3,ijn}$ 的绝对值最大, 且对应的相似系数绝对值大于 0.3, $C_{3,ijn}$ 符号为正, 表示该年为南干北湿型。

(7) 若 $C_{1,ijn}$ 、 $C_{2,ijn}$ 、 $C_{3,ijn}$ 对应的相似系数绝对值均小于 0.3, 那么该年为非典型型。

前面分析提到 9、10、11 月干湿变化同样也存在全区一致, 东西相反及南北相反的特征, 且三个模态的空间分布与秋季干湿指数前 3 载荷向量十分相似。因此可以认为, 用秋季干湿指数前 3 载荷向量表示 9、10、11 月干湿变化主要模态的空间型是合理的。可以分别用历年 9、10、11 月干湿指数与秋季干湿指数前 3 载荷向量求综合相似指数 C_{ij} , 采用同样的方法对 9、10、11 月干湿进行分类。为了方便表示, 定义全区一致偏干为 A-型, 全区一致偏湿为 A+型; 东湿西干为 B-型, 东干西湿为 B+型; 南湿北干为 C-型, 南干北湿为 C+型; 非典型型为 D 型。各类干湿出现次数如表 1 所示。无论是从秋季, 还是分月来看, 出现 A (包括 A-和 A+) 型干湿的次数最多, 均不低于总数的 1/2; 除 10 月外, A+型出现的次数略多于 A-型。B (包括 B-和 B+) 型干湿出现的次数约为 A 型干湿的一半, C (包括 C-和 C+) 型干湿出现的次数则为 A 型干湿的 1/3 左右, D 型干湿出现的次数最少。这表明, 西南地区出现全区偏干 (湿) 的概率最大, 有时会出现东湿 (干) 西干 (湿) 和南湿 (干) 北干 (湿), 而极少出现非前面几种类型的情况。

表 1 西南地区 1960~2009 年秋季及 9、10、11 月各类型干湿发生的次数

Table 1 The occurrence numbers of various types of autumn, Sep, Oct, and Nov dry-wet condition in Southwest China from 1960 to 2009

时段	各类型干湿发生的次数						
	A-	A+	B-	B+	C-	C+	D
秋季	12	15	6	7	3	5	2
9 月	13	17	5	5	4	4	2
10 月	13	12	9	5	3	3	5
11 月	14	17	5	8	0	3	3

注: A-型为全区一致偏干, A+型为全区一致偏湿; B-型为东湿西干, B+型为东干西湿; C-型为南湿北干, C+型为南干北湿; D 型为非典型型

为了检验所使用的分类方法对干湿分类的效果, 选取各类干湿异常年进行合成分析。检验该方

法是否能体现出各类干湿型的自身特点, 是否能清晰分辨出各类干湿型。各类干湿异常年的挑选标准包括两点: 首先该年必须属于该类的干湿型; 其次该类型干湿对应的 EOF 分析模态的时间系数在这一年的绝对值必须要大于一个标准差。满足这两个条件的, 即选为异常年。以秋季为例, 如 2009 年秋季属于 A-型, A 型干湿对应 EOF 分析第一模态, 该模态时间系数 (标准化序列) 2009 年的值为 -2.34, 绝对值大于一个标准差, 选取 2009 年为 A-型干湿异常年。最终选取出的秋季各类干湿异常年如表 2 所示。从各类型干湿异常年的合成图 (图 3) 来看, 该方法能很好地表现出各类干湿型的特征: A- (+) 型异常年全区一致偏干 (湿), 且南部偏干 (湿) 程度明显大于北部地区, 这与 LV1 大值区对应一致。B 型干湿异常年东、西部干湿相反十分明显, 零线位置、走向均与 LV2 十分相似, 特征明显。C 型干湿异常年呈现出明显的南、北部干湿相反特征, 主要的大值区在广西和川东、重庆地区, 并且零线由贵州呈西南走向伸至云南南部, 这都与 LV3 的特征极为相似。D 型干湿出现次数极少 (仅 1960 和 1988 年), 从 D 型干湿合成图 (图 3g) 来看, 干湿区呈小区域零星分布, 没有明显的特点, 与其他干湿类型截然不同, 能够清晰地识别出来。此外, 还使用相同的方法选取了 9、10、11 月各类型异常年, 进行了合成分析, 也得到了类似的结果 (图略)。

总体来说, 利用综合相似指数 C_{ij} 的分类方法得到的各类干湿型特征显著, 各类型间区别明显。该方法对于西南地区干湿分布的分类是适用的, 且效果显著。

表 2 西南地区 1960~2009 年秋季各类干湿异常年
Table 2 The anomalous years of various types of autumn dry-wet condition in Southwest China from 1960 to 2009

干湿类型	异常年份
A-型	2009、1998、2005、1974、2003、1996、2006
A+型	1967、1976、1986、1978、1979、1965、1972、1973
B-型	1981、1994、1964、1962
B+型	1992、1980、1984、1989
C-型	2002、1987、1995
C+型	2004、1969、1963、1991

4.3 西南地区各类型干湿出现的概率

根据得到的西南地区干湿分类的结果, 可计算

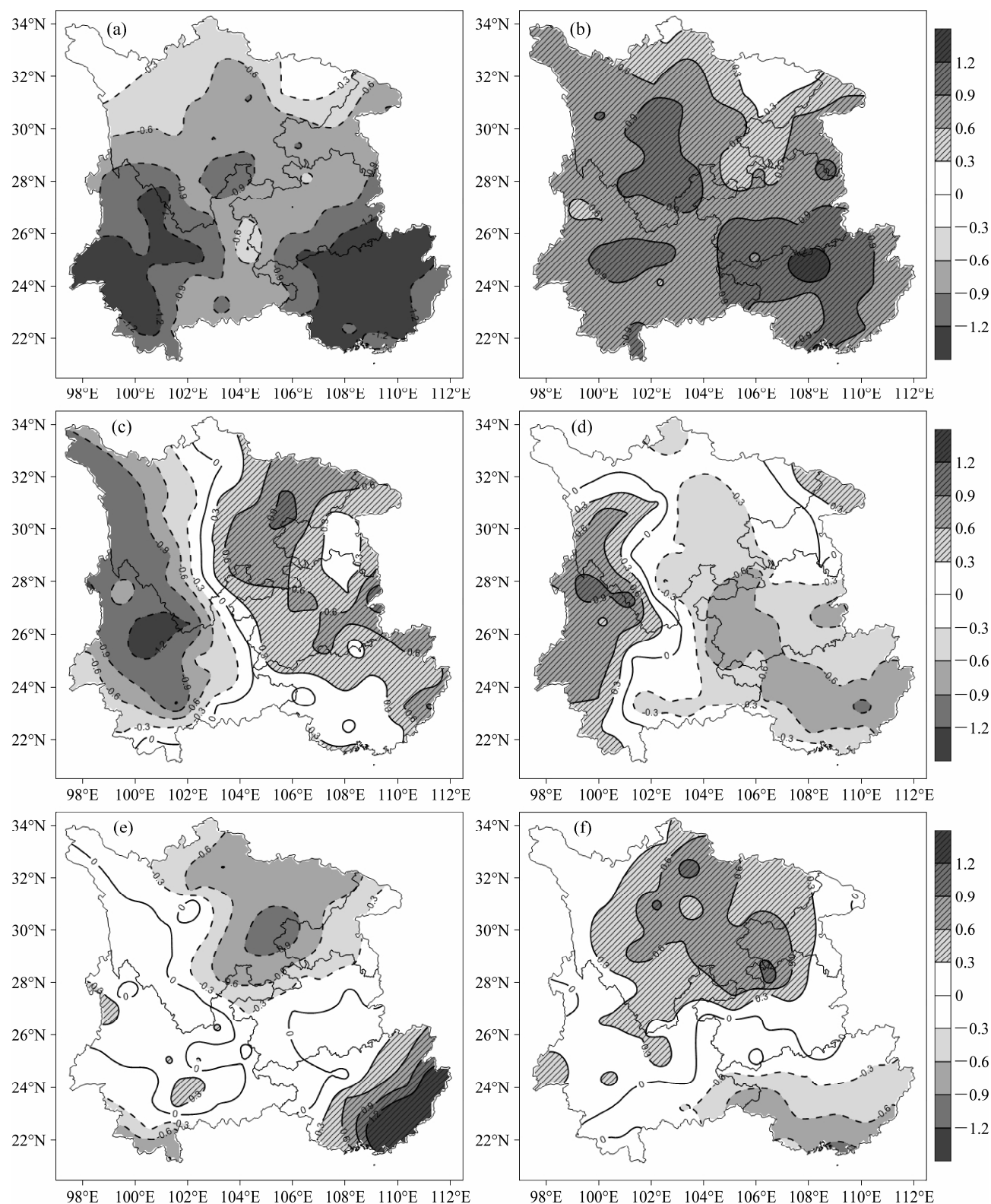


图3 西南地区1960~2009年秋季各类型干湿的干湿指数分布异常年合成：(a) A-型；(b) A+型；(c) B-型；(d) B+型；(e) C-型；(f) C+型；(g) D型。正值区域为斜杠阴影区，表明该区域偏湿；负值区为实体阴影区，表明该区域偏干

Fig. 3 Composite patterns of various types of autumn dry-wet condition in Southwest China from 1960 to 2009: (a) A- type; (b) A+ type; (c) B- type; (d) B+ type; (e) C- type; (f) C+ type; (g) D type. Forward slash shaded areas represent wet (positive value); solid shaded areas represent dry (negative value)

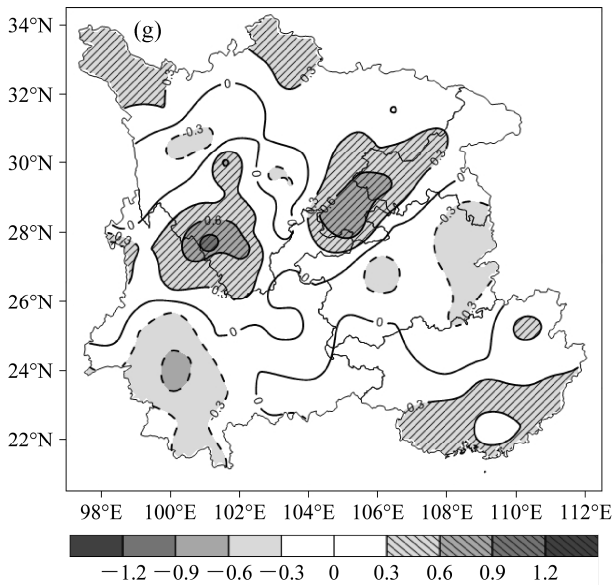


图 3 (续)
Fig. 3 (Continued)

出各类干湿型出现的概率(全区一致偏干为 A-型, 全区一致偏湿为 A+型; 东湿西干为 B-型, 东干西湿为 B+型; 南湿北干为 C-型, 南干北湿为 C+型; 非典型型为 D 型)。从表 1 可知, 西南地区出现 A 型干湿的概率最大, 均不低于 50%。除 10 月外, A+型出现的概率均大于 A-型。B 型干湿出现的概率约为 25%, C 型干湿出现的概率约为 15%, 而 D 型干湿出现的概率不到 10%。此外, 本文还给出了 9 月、10 月在已出现特定类型干湿时, 下个月出现各类型干湿的概率, 即干湿的持续与转换。如表 3、表 4 所示, 当 9 月已出现 A-型时, 接下来 10 月继续出现 A-型的概率为 38%(5/13); 而当 9 月已出现 A+型时, 10 月继续出现 A+型的概率为 35%(6/17)。当 9 月已出现 B-型时, 10 月出现 A+型和 B-型概率均为 40%(2/5); 而当 9 月已出现 B+型时, 10 月出现 A-型概率也为 40%(2/5)。当 10 月已出现 A-型时, 11 月出现 A-型和 A+型的概率均为 23%(3/13), 略大于其他类型出现的概率; 而当 10 月已出现 A+型时, 11 月出现 A+型的概率为 42%(5/12), 出现 A-型和 B+型的概率仅为 25%(3/12), 其他类型出现概率更小。当 10 月已出现 B-型时, 11 月出现 A+型概率超过 55%(5/9); 而当 10 月已出现 B+型时, 11 月出现 A-型概率为 40%(2/5)。

对于秋季来说, 西南地区最易出现全区偏干(湿)的情况。从季节内干湿转换来看, 全区偏干或偏湿型(A 型干湿)的持续性不是十分明显, 但

对于 B 型干湿, 10 月份的东部偏湿区域则有较大几率(不低于 50%)在下个月扩展到整个西南地区。

表 3 西南地区 9 月已出现特定类型干湿时, 下个月出现各类干湿的概率

Table 3 The probability of all kinds of dry-wet condition occurrence in Oct when particular type of dry-wet condition has happened in Sep

9 月干湿类型	10 月出现各类干湿的概率						
	A-	A+	B-	B+	C-	C+	D
A-	5/13	2/13	2/13	3/13	0/13	1/13	0/13
A+	4/17	6/17	2/17	2/17	1/17	0/17	2/17
B-	0/5	2/5	2/5	0/5	0/5	0/5	1/5
B+	2/5	1/5	1/5	0/5	0/5	1/5	0/5
C-	0/4	1/4	2/4	0/4	1/4	0/4	0/4
C+	1/4	0/4	0/4	0/4	0/4	1/4	2/4
D	1/2	0/2	0/2	0/2	1/2	0/2	0/2

表 4 西南地区 10 月已出现特定类型干湿时, 下个月出现各类干湿的概率

Table 4 The probability of all kinds of dry-wet condition occurs in Nov when particular type dry-wet condition has happened in Oct

10 月干湿类型	11 月出现各类干湿的概率						
	A-	A+	B-	B+	C-	C+	D
A-	3/13	3/13	2/13	2/13	0/13	1/13	2/13
A+	3/12	5/12	1/12	3/12	0/12	0/12	0/12
B-	1/9	5/9	1/9	1/9	0/9	0/9	1/9
B+	2/5	1/5	0/5	1/5	0/5	1/5	0/5
C-	1/3	1/3	1/3	0/3	0/3	0/3	0/3
C+	2/3	0/3	0/3	0/3	0/3	1/3	0/3
D	2/5	2/5	0/5	1/5	0/5	0/5	0/5

5 西南地区秋季干湿分布主要类型异常年的环流特征分析

干旱通常是某种异常的大气环流型持续发展和长期维持的结果。水汽输送、冷暖空气的交汇是西南地区秋季降水形成的重要原因, 且冷暖空气活动还能引起气温变化, 对干湿异常有重要影响。前面的分析表明 A 型干湿出现概率最大, B 型干湿出现概率仅低于 A 型, 且其东部的偏湿区域很可能扩展到整个西南地区, 这四类(A-、A+、B-、B+型)干湿异常影响重要。下面就分月讨论这四类干湿异常的环流特征。

9、10、11 月 A 型干湿出现次数的平均值约为 28 次(共 50 a), 为了突出异常年的特点, 选取 A-型、A+型异常年中异常程度最大(百分位前 30%)的各 4 年进行合成分析。各月异常年选取如

表 5 所示。

表 5 西南地区 1960~2009 年各月各类干湿异常年
Table 5 The anomalous years of various types of Sep, Oct, and Nov dry–wet condition in Southwest China from 1960 to 2009

干湿 类型	干湿异常年		
	9 月	10 月	11 月
A-型	2009、1963、2005、 2008	2009、1982、1974、 1998	1980、1974、1984、 1998
A+型	1997、1972、1979、 1987	1963、1965、1992、 1994	1975、1969、1976、 1978
B-型	1994、1971、1964	1981、1961、1964	1966、1962、1987
B+型	1995、1999、1990	1979、2006、1989	1983、1965、1992

在 A-型（全区偏干）异常年，9 月欧亚大陆中高纬上空 500 hPa 位势高度基本上为正距平，我国大部分地区处于正距平中心区，在日本东部海面上空有一负距平中心（图略）。这种距平分布形势对应东亚大槽减弱、位置偏东，不利于引导脊前槽后的冷空气向南侵入西南地区引起降温。西太平洋副高西伸，强度较强。东亚地区上空 100 hPa 为位势高度正距平中心，南亚高压强度偏强，面积偏大、位置偏东。在我国西南地区，南亚高压与西太平洋副高重叠，该地区受高压控制，天气晴朗少雨，气流下沉增温。西南地区秋季的水汽主要来自孟加拉湾和南海，它们在西南地区汇合成西南—东北向的水汽输送。在异常年低层 700 hPa 风场上，在南海和孟加拉湾上空有一异常的气旋性环流，导致从南海经中南半岛和从孟加拉湾输送至我国西南地区的水汽输送减弱。从整层的水汽输送上来看，整个西南水汽通道上的水汽输送都是明显减弱的，并且在西南地区有异常的水汽辐散。这种异常环流形势不利于冷暖空气在西南地区交汇，使得该地区降水偏少、气温偏高，造成了全区域偏干。10 月我国上空 100 hPa 为位势高度正距平，南亚高压强度偏强，面积偏大，其中心位于西南地区上空（图 4）。欧亚大陆中高纬 500 hPa 位势高度距平场呈现出正—负—负距平分布，距平中心分别位于乌拉尔山（+）、贝加尔湖（-）及北太平洋（-）附近。西太平洋副高强度明显偏强，并且在西南地区分裂出一个闭合小高压（5870 m 等位势高度线）。而南亚高压与分裂出的小高压重叠，西南地区受高压控制，天气晴朗少雨。东亚大槽位于两个负距平中心之间，强度偏弱；同时极区为正距平中心，极涡强度偏弱，不利于引导脊前槽后的冷空气向南侵入西南地区

引起降温。同时我国西南地区大部分区域上空存在异常的下沉运动，气温下沉增温，且不利于降水形成。对流层低层 700 hPa 风场上，南海上空维持着一个非常明显的异常气旋环流，西太平洋上空则出现异常的反气旋环流，导致来自南海的暖湿气流输送减弱。从整层的水汽输送来看，从南海输送至西南地区的水汽明显偏弱，同时西南地区为异常的水汽辐散区。11 月 500 hPa 位势高度场上，从极地、中高纬到低纬地区分别为正—负—正距平控制（图略）。其中中高纬地区有两个负距平中心，分别位于西西伯利亚和阿留申群岛附近；而低纬地区两个正距平中心则位于波斯湾和我国东部。这种形势的距平分布使得东亚大槽位置偏东，无法深入到我国南方地区，同时东亚大槽位于两个负距平中心之间，等高线曲率相对较小，西风环流相对常年较为平直，不利于冷空气侵入我国西南地区。西太副高强度也是偏强的，且南亚高压面积偏大，与西太副高重叠。低层 700 hPa 风场上，南海上空的异常气旋环流依然存在，暖湿气流输送偏弱。来自孟加拉湾和南海的整层水汽输送也是偏弱的。

从 9 月到 11 月，虽然具体的环流形势有所不同，但是关键系统的配置是一致的。东亚大槽偏弱或位置偏东，我国绝大部分地区为正高度距平，东亚大槽不能深入到我国南方地区，不利于冷空气南侵引起降温；西太平洋副高偏强、西伸，南亚高压面积偏大，位置偏东，与西太副高重叠，西南地区长期受高压控制，天气晴朗，气流下沉升温；南海上空低层一直维持着一个明显的异常气旋性环流，西南地区位于该异常气旋环流的西北侧，暖湿气流输送偏弱；西南地区水汽输送偏弱且有辐散。这种异常环流形势的持续，将不利于西南地区冷暖空气交汇，水汽条件较差，同时西南地区长期受高压控制，有异常下沉运动，天气晴朗少雨，气温偏高，使得该区域持续干旱。

A+型（全区偏湿）异常年环流特征基本上与 A-型相反。东亚大槽加深（9 月）或东亚大槽位于两个正距平中心之间，等高线曲率相对较大（10、11 月），经向环流度加强，且我国大部分地区为负高度距平，这都有利于引导冷空气南下；南海上空低层维持着一个异常反气旋环流，西南地区的水汽输送加强；整层水汽输送偏强，且有异常的水汽辐合；西太平洋副高整体略微偏弱（9 月西太副高虽然西伸，但是较为偏南，有利于其西北侧的暖

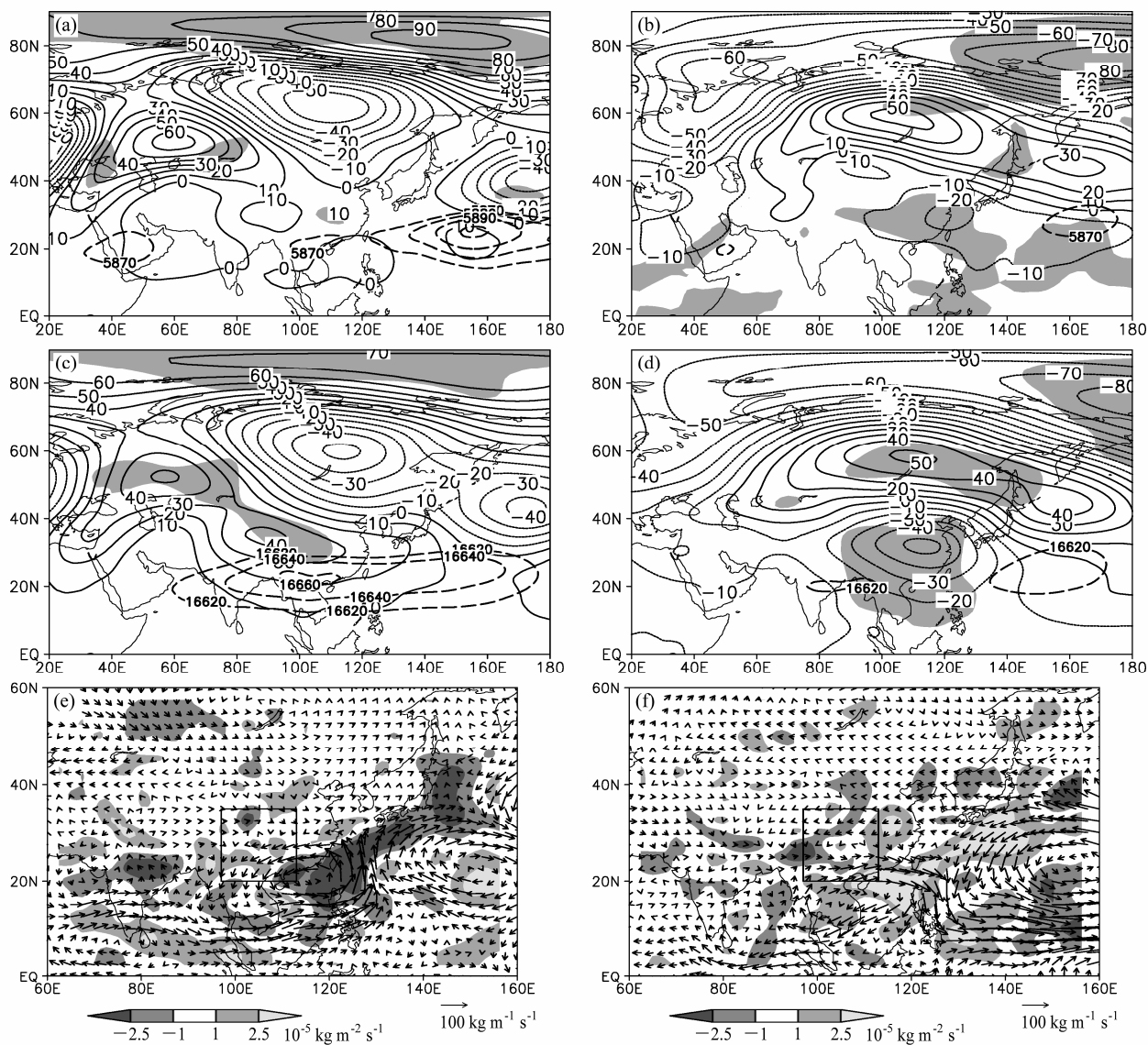


图4 西南地区1960~2009年异常年10月距平场:(a) A-型(全区偏干)和(b) A+型(全区偏湿)500 hPa位势高度距平场;(c) A-型和(d) A+型100 hPa位势高度距平场;(e) A-型和(f) A+型垂直积分的整层水汽通量距平场($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$),阴影为整层水汽通量散度距平场($10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$) (阴影区为通过 $\alpha=0.05$ 显著性水平检验的区域)

Fig. 4 The composite anomaly fields in October of anomalous years from 1960 to 2009: (a) A- type and (b) A+ type 500-hPa geopotential height anomalies; (c) A- type and (d) A+ type 100-hPa geopotential height anomalies; (e) A- type and (f) A+ type vertically integrated water vapour flux anomalies ($\text{kg m}^{-1} \text{s}^{-1}$), the shaded areas represent the anomalies of vertically integrated water vapour flux divergence ($10^{-5} \text{kg m}^{-2} \text{s}^{-1}$). In (a)–(d), the shaded areas represent $\alpha=0.05$ significance level

湿气流输送到我国西南地区), 南亚高压面积偏小, 与西太副高基本无重叠(或重叠区离西南地区较远), 西南地区受负位势高度距平控制。这种异常环流形势的维持, 将有利于冷空气南下引起降温, 冷暖空气在西南地区交汇, 降水偏多、全区偏湿。

9、10、11月B型干湿异常年出现的次数差异较大, 出现次数最多的有8次, 最少的只有3次。为了使合成分析时挑选的异常年次数相同, 选取B-型、B+型异常年中异常程度最大的各3年进行合成

分析。各月异常年选取如表5所示。从9月到11月, B-型(东湿西干)异常年(图5), 对流层中层500 hPa等压面上, 西南地区东部维持着异常的上升气流, 气流上升降温, 且有利于形成降水; 而西南地区西部则存在异常的下沉气流, 气流下沉升温不利于产生降水。对流层低层700 hPa等压面上, 西南地区东部有偏西南风异常, 暖湿气流输送偏强, 水汽充足, 有利于降水产生。这种异常的大气环流长期维持使得西南地区东部偏湿、西部偏干。

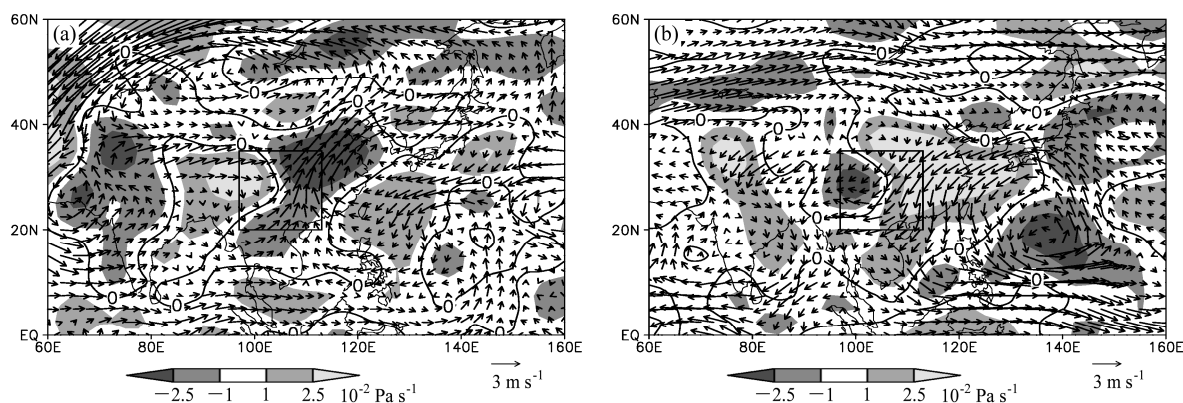


图5 西南地区1960~2009年异常年10月700 hPa风矢量距平场(m s^{-1})以及500 hPa垂直运动距平场(阴影, 0.01 Pa s^{-1}): (a) B-型(东湿西干); (b) B+型(东干西湿)。深色阴影为上升区, 浅色阴影为下沉区

Fig. 5 The composite anomalies of 700-hPa wind filed (m s^{-1}) and vertical motion anomalies (shaded areas, 0.01 Pa s^{-1}) in October of anomalous years from 1960 to 2009 in Southwest China: (a) B- type; (b) B+ type. Dark shaded areas represent ascending motion, shallow areas represent descending motion

B+型异常年呈相反的环境特征, 东部偏干、西部偏湿。

本文还选取秋季季节内全区一致型干湿持续典型年和干湿转换典型年, 对比分析了其环流异同特征, 发现典型年份各月环流形势与前面合成分析的基本一致, 干湿是否持续或者转换主要与南亚高压和副高的位置、强度变化以及南海上空低层流场变化(气旋环流或反气旋环流是否持续或出现)有关。以9月到10月为例, 选取9月、10月干湿异常年, 在其中找出干湿持续或转换的年份进行分析, 干湿异常年的选取详见4.2节。选取的A-型持续年: 2009年(9、10月均为A-型); A-型转换年: 1963年(9月A-型, 10月A+型)。

2009年, 全区偏干持续年。9月到10月, 南亚高压面积偏大, 强度偏强; 西太平洋副高西伸, 强度偏强, 南亚高压与西太副高在我国西南地区重叠, 西南地区受高压控制。在南海上空有异常的气旋性环流, 来自南海的暖湿气流输送减弱(图略)。西南地区长期受高压控制, 有异常下沉运动, 水汽条件较差, 天气晴朗少雨, 气温偏高, 使得该区域干旱持续。

1963年, 全区偏干型转换年。9月南亚高压面积偏大, 强度偏强, 西南地区100 hPa等压面上为正高度距平中心。但西太平洋副高强度略微偏强, 位置变化不大, 而东亚大槽位于两个负距平中心之间, 等高线曲率相对较小, 西风环流相对常年较为平直, 不利于冷空气侵入我国西南地区。南海上空低层未出现气旋性环流, 但来自孟加拉湾的暖湿气流偏少。这不利于冷暖空气在西南地区交汇,

使得西南地区9月偏干。10月南亚高压面积偏小, 强度偏弱。西太平洋副高强度偏弱, 西南地区上空100 hPa和500 hPa等压面上均为负距平中心。南海上空低层700 hPa上有异常的反气旋环流, 使得来自南海的暖湿气流偏强, 水汽输送偏多(图略)。这种异常环流形势将有利于冷空气南下引起降温, 冷空气在西南地区交汇, 降水偏多、全区偏湿。

对比全区偏干持续年与干湿转换年的环流形势, 可以发现, 若南亚高压面积偏大、强度偏强, 且西太平洋副高西伸, 同时南海低层上空有异常的气旋环流, 那么, 全区偏干将持续到下个月。若仅南亚高压面积偏大、强度偏强, 但西太平洋副高较常年变化不大, 且南海上空未出现异常的气旋性环流, 那么干湿将很可能发生转换。

6 结论与讨论

(1) 西南地区存在显著的干旱化趋势, 且这种干湿变化主要表现为3个类型(模态), 即干湿全区一致变化、东西相反变化和南北相反变化。其对应的时间系数表明, 西南地区秋季在1980年代末以前偏湿, 1990年代末以后明显偏干, 且东部、北部变干的程度相对较大。

(2) 采用相似方法, 构造了综合相似指数对干湿进行分类。根据干湿变化主要模态的空间型, 利用该指数将1960~2009历年秋季及9、10、11月干湿分布分为了全区一致偏干型(A-)、全区一致偏湿型(A+)、东湿西干型(B-)、东干西湿型(B+)、南湿北干型(C-)、南干北湿型(C+)和非典型型(D), 共7类。通过对分类结果的检验

表明, 该指数对西南地区干湿的分类效果较好。

(3) 分类结果表明, 全区干湿一致型出现的次数最多(不低于 50%), 东西相反型次之(约 25%), 南北相反型较少(约 15%), 而出现非典型型次数极少(不足 10%)。从给出的 9、10、11 月各类型干湿发生的概率来看, 全区偏干(湿)的持续性较差, 在下个月出现干湿类型转换的概率不确定。但 10 月份的东部偏湿区有较大几率(不低于 50%)在下个月扩展到整个区域。

(4) 全区偏干(湿)型和东湿(干)西干(湿)型异常的大气环流特征明显, 不同类型异常的环流形势可导致西南地区秋季干湿的持续或转型。全区偏干型异常年, 东亚大槽偏弱或偏东, 我国绝大部分地区为正位势高度距平, 冷空气南侵困难; 南海上空低层维持着一个异常的气旋环流, 西南地区暖湿气流输送偏弱; 整层水汽输送偏弱, 且有异常的水汽辐散; 西太平洋副高偏强、西伸, 南亚高压面积偏大, 与西太副高重叠, 西南地区长期受高压控制。这种异常环流形势的维持, 将不利于冷暖空气在西南地区交汇, 水汽条件较差, 天气晴朗少雨, 气温偏高, 使得该区域持续干旱。偏湿型异常年则基本呈相反的环流特征。东湿(干)西干(湿)型异常则和该地区东、西部上空异常的垂直运动和东部低层的南、北风异常有关。

(5) 西南地区气候独特, 影响系统较多。本文仅从大气环流的角度探讨了西南地区干湿异常的成因, 而对该地区干湿变化的深入认识, 特别是对干湿转换所对应的环流转换还需要从外强迫因子来进行分析。

参考文献 (References)

- 艾永智, 金少华, 郑建萌, 等. 2012. 南海、孟加拉湾不对称环流变化对 2009 年西南特大秋旱的影响 [J]. 热带气象学报, 28 (4): 594–602.
- Ai Yongzhi, Jin Shaohua, Zheng Jianmeng, et al. 2012. Asymmetric variation of the circulation over the South China Sea and the Bay of Bengal and its impacts on the serious drought in Southwest China in autumn of 2009 [J]. Journal of Tropical Meteorology (in Chinese), 28 (4): 594–602.
- 黄荣辉, 刘永, 王林, 等. 2012. 2009 年秋至 2010 年春我国西南地区严重干旱的成因分析 [J]. 大气科学, 36 (3): 443–457.
- Hang Ronghui, Liu Yong, Wang Lin, et al. 2012. Analyses of the causes of severe drought occurring in Southwest China from the fall of 2009 to the spring of 2010 [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 36 (3): 443–457.
- 蒋兴文, 李跃清. 2010. 西南地区冬季气候异常的时空变化特征及其影响因子 [J]. 地理学报, 65 (11): 1325–1335.
- Jiang Xingwen, Li Yueqing. 2010. The spatio-temporal variation of winter climate anomalies in southwestern China and the possible influencing factors [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 65 (11): 1325–1335.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 77 (3): 437–471.
- 李永华, 徐海明, 刘德. 2009. 2006 年夏季西南地区东部特大干旱及其大气环流异常 [J]. 气象学报, 67 (1): 122–132.
- Li Yonghua, Xu Haiming, Liu De. 2009. Features of the extremely severe drought in the east of Southwest China and anomalies of atmospheric circulation in summer 2006 [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 67 (1): 122–132.
- 李永华, 卢楚翰, 徐海明, 等. 2011. 夏季青藏高原大气热源与西南地区东部旱涝的关系 [J]. 大气科学, 35 (3): 422–434.
- Li Yonghua, Lu Chuhan, Xu Haiming, et al. 2011. Contemporaneous relationships between summer atmospheric heat source over the Tibetan Plateau and drought/flood in eastern Southwest China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 35 (3): 422–434.
- 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 2007. 我国西南地区 1960~2000 年降水资源变化的时空特征 [J]. 自然资源学报, 22 (5): 783–792.
- Liu Xiaoran, Li Guoping, Fan Guangzhou, et al. 2007. Spatial and temporal characteristics of precipitation resource in Southwest China during 1961–2000 [J]. Journal of Natural Resources (in Chinese), 22 (5): 783–792.
- 刘晓冉, 李国平, 范广洲, 等. 2008. 西南地区近 40 a 气温变化的时空特征分析 [J]. 气象科学, 28 (1): 30–36.
- Liu Xiaoran, Li Guoping, Fan Guangzhou, et al. 2008. Spatial and temporal characteristics of temperature changes in Southwest China during 1961–2000 [J]. Scientia Meteorologica Sinica (in Chinese), 28 (1): 30–36.
- 刘晓云, 李栋梁, 王劲松. 2012. 1960—2009 年中国区域干旱状况的时空变化特征 [J]. 中国沙漠, 32 (2): 473–483.
- Liu Xiaoyun, Li Dongliang, Wang Jinsong. 2012. Spatiotemporal characteristics of drought over China during 1961–2009 [J]. Journal of Desert Research (in Chinese), 32 (2): 473–483.
- 刘燕, 王谦谦, 程正泉. 2002. 我国西南地区夏季降水异常的区域特征 [J]. 南京气象学院学报, 25 (1): 105–110.
- Liu Yan, Wang Qianqian, Cheng Zhengquan. 2002. Regional features of summer rainfall anomaly over Southwest China [J]. Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese), 25 (1): 105–110.
- 马振锋, 彭骏, 高文良, 等. 2006. 近 40 年西南地区的气候变化事实 [J]. 高原气象, 25 (4): 633–642.
- Ma Zhenfeng, Peng Jun, Gao Wenliang, et al. 2006. Climate variation of Southwest China in recent 40 years [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 25 (4): 633–642.
- 马柱国, 黄刚, 甘文强, 等. 2005. 近代中国北方干湿变化趋势的多时段特征 [J]. 大气科学, 29 (5): 671–681.
- Ma Zhuguo, Huang Gang, Gan Wenqiang, et al. 2005. Multi-scale temporal characteristics of dryness/wetness over northern China during the last century [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 29 (5): 671–681.
- North G R, Moeng F J, Bell T J, et al. 1982. Sampling errors in the estimation of empirical orthogonal functions [J]. Mon. Wea. Rev., 110 (7): 699–706.
- 彭京备, 张庆云, 布和朝鲁. 2007. 2006 年川渝地区高温干旱特征及其成因分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (3): 464–474.
- Peng Jingbei, Zhang

- Qingyun, Bueh Cholaw. 2007. On the characteristics and possible causes of a severe drought and heat wave in the Sichuan–Chongqing region in 2006 [J]. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 12 (3): 464–474.
- Sneyers R. 1990. On the statistical analysis of series of observations [R]. Technical Note, 143. Geneva: WMO, 11.
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. *Geographical Review*, 38 (1): 55–94.
- 徐栋夫, 李栋梁, 曲巧娜, 等. 2013. 西南地区秋季干湿时空变化特征及其成因分析 [J]. *热带气象学报*, 29 (4): 570–580. Xu Dongfu, Li Dongliang, Qu Qiaona, et al. 2013. The spatio-temporal variation of autumn dry-wet condition in Southwest China and the analysis of its possible causes [J]. *Journal of Tropical Meteorology* (in Chinese), 29 (4): 570–580.
- 阎惠芳, 李社宗, 黄跃青, 等. 2003. 常用相似性判据的检验和综合相似系数的使用 [J]. *气象科技*, 31 (4): 211–215. Yan Huifang, Li Shezong, Huang Yueqing, et al. 2003. Tests for conventional similarity criteria and application of composite similar coefficient [J]. *Meteorological Science and Technology* (in Chinese), 31 (4): 211–215.
- 杨绚, 李栋梁. 2008. 中国干旱气候分区及其降水量变化特征 [J]. *干旱气象*, 26 (2): 17–24. Yang Xuan, Li Dongliang. 2008. Precipitation variation characteristics and arid climate division in China [J]. *Arid Meteorology* (in Chinese), 26 (2): 17–24.
- 张新主, 章新平, 关华德, 等. 2011. 我国西南地区 2009 年秋季特大旱灾大气环流特征分析 [J]. *热带地理*, 31 (1): 21–27. Zhang Xinzhu, Zhang Xinping, Guan Huade, et al. 2011. The atmospheric circulation features of the heavy drought in Southwest China in autumn 2009 [J]. *Tropical Geography* (in Chinese), 31 (1): 21–27.