

代刊,金荣花,胡婷. 2013. 基于自组织神经网络算法的华北区域夏季天气气候学特征. 气象, 39(7):801-812.

基于自组织神经网络算法的华北区域 夏季天气气候学特征^{*1}

代 刊¹ 金荣花¹ 胡 婷²

1 国家气象中心, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

提 要: 对华北区域的天气气候学研究, 有助于理解该区域大气环流场与地面要素场之间的相互联系。利用自组织神经网络算法(SOMs), 基于 1958—2002 年夏季 ERA-40 日平均海平面气压距平场(MSLPA), 对华北区域的海平面气压场进行分型, 研究其天气气候特征。36 种典型地面环流形势被识别出来, 包括强北高南低、强西高东低槽、强西北低东南高和强东部高压西伸 4 种极端类型, 以及它们之间的过渡型。天气型的空间特征分析表明二维自组织图上天气型的对称性体现了华北区域天气气候的一般性特征, 而非对称性则体现其独特性。天气型演变特征分析表明高、低压系统越强, 或以高压系统活动为主时, 华北地区的天气形势相对稳定, 反之则转变较快。年际变化分析指示出其中 6 种天气型出现较明显的年际线性变化趋势。最后, 分析天气型相应的降水分布特征, 表明区域内不同地区的降水来自不同天气型的影响, 地面环流场的细小差别将会造成地面强降水中心位置的较大不同, 且地形的影响将进一步放大该差别。上述分析结果采用更完整和更高时间分辨率的资料, 定量地研究华北区域夏季的天气分型特征, 拓展其天气气候学研究。研究成果可用于发展客观化的数值模式典型天气过程识别技术, 以及作为区域气候情景分析的基础。

关键词: 天气气候学, 天气型, 降水分布, 自组织神经网络, 华北区域

中图分类号: P466

文献标志码: A

doi: 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.07.001

Using Self-Organizing Maps to Investigate Summer Synoptic Climatology in North China Area

DAI Kan¹ JIN Ronghua¹ HU Ting²

1 National Meteorological Centre, Beijing 100081

2 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Analysis of the synoptic climatology over the North China Area promotes a better understanding of the relationships between atmospheric circulation and surface elements. Therefore, investigation on synoptic climatology features is conducted based on the classified synoptic types of North China using the summer ERA-40 MSLP data from 1958 to 2002 which are treated by self-organizing maps (SOMs) algorithm. 36 different synoptic patterns are identified, which can be divided into 4 kinds of extreme types such as strong north-high-and-south-low, strong west-high-and-east-trough, strong northwest-low-and-southeast-high and westward-extension-of-strong-eastern-high, as well as transitional types between them. Study of spatial characteristics indicates that the symmetry of synoptic types in 2D self-organizing maps reflects the general characteristics of synoptic climatology over the North China Area, whereas the asymmetry represents the unique features. Study of temporal characteristics shows that synoptic situation of the study area is relatively more stable with stronger high and low systems, or with dominant high system, and vice

* 国家科技支撑计划项目(2009BAC51B03)和青年科学基金项目(41005031)共同资助

2013 年 1 月 24 日收稿; 2013 年 5 月 26 日收修定稿

第一作者: 代刊, 主要从事天气预报、天气诊断分析方向的研究. Email: daikan1998@163.com

versa. By referring to the interannual analysis, it is apparent that 6 patterns are dominated by remarkable linear trends. Finally, analysis is performed on precipitation distribution characteristics of the corresponding synoptic patterns. It shows that the rainfall in different parts of North China is contributed by distinct synoptic types, and slight changes in surface circulation can produce drastically different locations of precipitation center, while the topographic effect will further amplify the difference. This study uses a more comprehensive dataset and higher temporal resolution data than most of the past studies to quantitatively investigate the summer synoptic types in North China, resulting in the expansion of synoptic climatology research over the study area. Therefore, results here can be applied to develop the identification technology of the typical weather process in numerical weather predication, and to be the basis of regional climate scenarios research.

Key words: synoptic climatology, synoptic patterns, precipitation distributions, self-organizing maps, the North China Area

引 言

众多环境灾害,如洪涝、高温、干旱、空气质量、酸雨、水质甚至疾病等,都与大气环流过程有密切关系,因此确定大气环流过程与地面环境之间的关系一直是气象或环境工作者重要研究方向(Yarnal, 1988)。Barry 等(1973)将其定义为天气气候学,历史可以追溯到 19 世纪晚期(Abercromby, 1883)。天气气候学通常采用的途径是首先将大气状态根据空间分布形态或气团的性质进行分型,再将这些不同的天气型与地面要素(如温度、降水或风等)联系起来,以研究不同天气型对地面环境的影响。可以看到,天气分型作为数据降维技术,是天气气候学研究的重要手段(Yarnal, 1988)。

天气分型方法总体上可以划分为主观和客观两类。主观方法有悠久的历史(Lamb, 1950),至今仍广泛使用(Yarnal et al, 1993; Comrie, 1994; Zelenka, 1997; 周功铤等, 2006; 王宏等, 2008)。由于主观方法主要依靠人的经验进行分类,尽管非常有效,但也有工作量大、结果不能重复以及无法定量使用等缺陷(Yarnal et al, 2001)。由于上述缺点,促使客观分型方法在 20 世纪 70 和 80 年代大量涌现,至今主流方法可以归类为三种,即基于相关分析、基于特征向量及基于神经网络。基于相关分析方法由 Lund(1963)引入,以其简单直观而被广泛使用,但 Yarnal(1988)指出基于相关分析方法的参数选择,如分型区域、数据时空分辨率和相关系数的阈值等,带有很大的主观性,且对分型结果有较大的影响。20 世纪 90 年代,随着个人电脑的计算能力不

断提高,使运行基于特征向量的分型算法不再困难,且由于其数学简洁性和统计稳健性而受到欢迎(Huth, 1996),但该方法采用主成分分析或 EOF 分解,使得分型结果的物理意义有时难以解释(Yarnal, 1988)。基于自组织神经网络算法(SOMs)的天气分型是近年出现的新方法。Hewitson 等(2002)指出传统的分型方法没有考虑大气过程的连续性,而近年出现的统计降尺度方法则没有反映环流的分型特征。SOMs 能较好地平衡两者的关系,此外还具有非线性、有效性、稳健性及高分辨率等特点。鉴于 SOMs 的上述优点,其应用越来越广泛,如 Cassano 等(2002)采用 SOMs 研究了阿拉斯加巴罗的极端天气事件与天气型之间的关系;Cassano 等(2006a; 2006b)利用 SOMs 对极区的大气环流进行分型以研究该区域天气型的气候变化特征;Nishiyama 等(2007)使用 SOMs 识别引发日本雨季暴雨的典型天气型;Reusch 等(2005)比较了基于 SOMs 和特征向量的两种分型方法,结果表明 SOMs 能够得到更稳定及合理的天气型;Seefeldt 等(2008)利用 SOMs 识别南极罗斯冰架的低空风场类型;Skific 等(2009)采用 SOMs 提取 60°N 以北的大气环流特征类型。国内气象工作者对 SOMs 的应用也开始,如陈豫英等(2008)结合 SOMs 建立风预报模型;王彦磊等(2008)采用 SOMs 建立副热带高压(以下简称副高)指数预测模型。

华北夏季受冷锋、暖锋、河套倒槽、台风倒槽、黄河气旋、蒙古气旋、副高及回流等天气系统的影响(陶诗言等, 1980)。已经有众多工作以预报经验或相关方法为基础,来研究该区域的天气气候特征,如章基嘉等(1984)进行了 500 hPa 候平均环流的分型

试验;刘景涛等(2004)将形成我国北方特强沙尘暴的天气系统划分成 4 种类型;臧传花等(2007)统计了 5 种天气型下的用电负荷;张守保等(2008)给出华北回流的两种主要天气型。可以看到,至今对华北地区夏季天气过程的分型研究有限,系统性地分析天气型的空间分布和时间演变特征还没有。本文将利用 SOMs 首先对 1958—2002 年华北地区夏季地面气压场进行分型,然后进一步分析各种天气型的频率分布及时间演变,最后讨论对应的地面降水分布特征。

1 方法和数据

SOMs 是一种无监督式神经网络算法,由 Kohonen(1984)首先提出。Hewitson 等(2002)较全面地介绍了 SOMs 在天气气候学分析中的应用。SOMs 的主要功能并不是聚类,而是通过学习过程把二维自组织图节点(即表示天气型的变量场)放置到输入数据空间中(即天气样本),以表现输入数据的一般状态及其拓扑结构。SOMs 算法的详细描述参考 Kohonen(2001)。如图 1 所给出的示意图,基于 SOMs 算法的天气分型可以分为 3 个阶段。

(1)前处理阶段,首先根据关注的地面要素(本文主要关注降水)选择研究范围,应足够大以包括主要的影响天气系统,但不能太大使得天气型种类过多。本文选取的纬度为 $30^{\circ}\sim 45^{\circ}\text{N}$,经度为 $107.5^{\circ}\sim 122.5^{\circ}\text{E}$ 。其次,选择用于表示天气型的变量(如 500 hPa 高度场、海平面气压场),该变量与所关注地面要素的联系更紧密,经试验本文选择海平面气压距平场。采用欧洲中期天气预报中心 $2.5^{\circ}\times 2.5^{\circ}$

空间分辨率的 ERA-40 再分析资料(Uppala et al, 2005)的日平均海平面气压场(MSLP)用于天气分型(研究区域内有 $7\times 7=49$ 个格点),时间段为 1958—2002 年的夏季 6、7 和 8 月,共 $n=45\times 92=4140$ 个样本。相对于气压场的强度,环流形势更依赖于气压场梯度,因此本文所有计算都使用 MSLP 距平(MSLPA),其由每日 MSLP 减去当日区域平均得到。最后将每日 7×7 格点的 MSLPA 变量矩阵转变为 $m=49$ 格点的一维向量,再将所有样本叠加得到 4140×49 的输入矩阵。

(2)训练阶段,首先需要设置二维自组织图的排列拓扑类型和节点数量。拓扑类型取六边形(如图 1 所示)。节点数量的设置原则是既不能过大而使节点之间差异很小,也不能过小而使天气型过于宽泛。依据研究目的,参考 Hewitson 等(2002)的工作,以及进行多种组合的试验,本文选取 $6\times 6=36$ 个节点更能反映华北区域的天气型分布特征。二维自组织图中每个节点是 49 格点的一维向量,代表一种天气型,其初始值为随机数。将输入矩阵的每行乘以权重向量(取所有格点权重相同为 1)得到输入向量,然后计算输入向量与所有节点的欧氏距离,取距离最小的节点为赢取节点(如图 1 中深色节点)。得到赢取节点之后,根据输入向量更新该节点及其临近节点的值。这里需要设置两个参数:临域半径 R 和学习效率 a 。 R 决定需要更新的临域范围,随训练步数的增加而减少,取 $R=6\sim 1$ 。 a 决定临近节点的权重,取 $0.05\sim 0$ 。重复上述训练步骤 $200\times 4140=828000$ 步。

(3)后处理阶段,将经过训练的二维自组织图的每个节点从一维向量变回 7×7 的矩阵,即得到天气

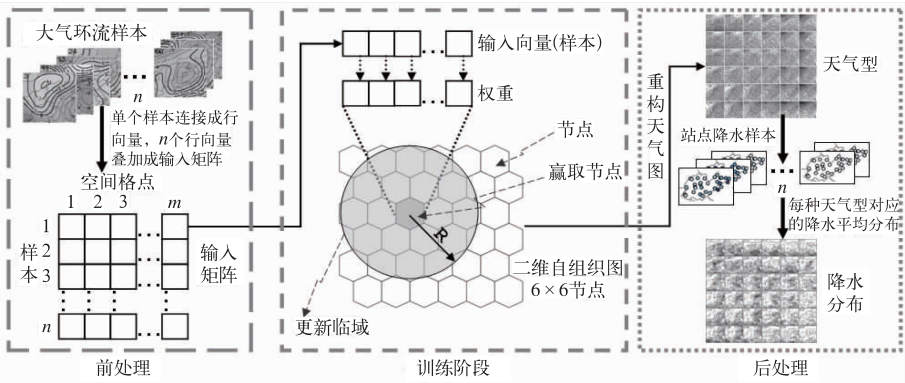


图 1 自组织神经网络算法示意图
(包括前处理、训练及后处理阶段)

Fig. 1 A schematic depicting the implementation of the self-organizing map
(Including the pre-processing, training, and post-processing phases)

型。计算每个 MSLPA 样本与所有节点的欧氏距离,取距离最小的节点即为该样本对应的天气型。最后计算具有相同天气型的样本所对应的降水平均。这里使用的降水资料为陈德亮提供的中国 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 日降水格点资料。

2 分型结果分析

2.1 主要天气型特征分析

图 2 显示利用自组织神经网络算法得到的华北区域 MSLPA 的二维自组织图,图中每张 MSLPA 分布为一个节点,表示一种天气型。可以看到,图 2 的一个显著特征是每个节点与临近节点的 MSLPA 分布相似,这反映了 SOMs 算法的连续性特征。节点与临近节点之间的相似度可进一步通过 Sammon 非线性映射图(Sammon, 1969)来分析。如图 3, Sammon 非线性映射图反映了节点之间的拓扑关系:在二维自组织图的上半部分,尤其是右上角,临近节点之间的距离相对较小,表明天气型之间的相似程度较高,如节点(5, 1)和(6, 1)距离最近,相似度也最高;而下半部分的节点之间距离相对较大,表明天气型之间的差别较明显,如节点(2, 5)和(3, 5),主要差异在于华北西部高压区以及中东部地面低压的位置和强度;节点(4, 4)和(5, 4),主要差别在于华北区域中部的弱低压以及东北部的气旋系统强度。

图 2 中各节点之间的主要差别在于 MSLPA 高、低压中心的位置和强度。在二维自组织图的四角上节点间的差别最大,其余节点可以看成是这 4 个节点之间的过渡型。四角节点上的天气型代表了华北区域四种截然不同地面环流形势:左上角节点(1, 1)表示了强北高南低型,而右下角节点(6, 6)则表示强西北低东南高型;右上角节点(6, 1)高压主体位于海上,并向陆地伸展,表示强东部高压西伸型;左下角节点(1, 6)的高压主体则位于华北地区西部,负距平区则位于东部,呈强西高东低槽型。

进一步分析四角节点之间天气系统的位置及强度的演变特征:(1)对于图 2 上半部分,从左至右华北地区北部高压向东向南偏移,而下半部分则西部高压沿低压区南侧向东偏移;(2)对于图 2 左半部分,自上而下高压区沿低压区西侧向南偏移,而右半部分则沿低压区东侧向南偏移;(3)二维自组织图的

外围以高压中心的偏移为主,而向内逐渐演变成以低压区(或中心)活动为主;(4)四角上节点的高、低压中心强度最强,尤其是左上角节点(1, 1)和右下角节点(6, 6),两者高压中心的正距平都达到 4 hPa 以上,而节点(6, 6)的低压中心负距平达到 -6 hPa 以下;(5)进一步分析节点(1, 1)和(6, 6)对应的 MSLPA 样本(图略),表明节点(1, 1)的天气型对应北部较强地面高压,或南部江淮气旋、台风低压活动,而节点(6, 6)对应华北南部以及黄海地面高压,或北方较强气旋的活动;(6)MSLP 的梯度大小与高、低压中心强度分布一致,二维自组织图外围节点的气压梯度较强,尤其是节点(1, 1)和(6, 6)上的气压梯度最强,由外至内气压梯度逐渐减小,如节点(3, 3)、(4, 3)、(3, 4)和(4, 4),区域内以低压活动为主,高压区分布在区域边缘且强度较弱;(7)二维自组织图中天气型都没有较完整的高压中心,而部分节点有完整的低压中心,这反映华北区域高、低压中心的活动特点,即高压中心以偏北、偏西或偏东移动为主,主体控制整个华北区域的情况较少,而低压活动可出现在华北的中心区域,如节点(2, 4)和(3, 4);(8)对于低压中心在二维自组织图中的分布,如节点(1, 4)、(2, 4)、(3, 4)和(4, 4),自左向右低压中心略向东北偏移,且强度减弱。

从上面分析可以看到,二维自组织图上的天气型分布呈现对称及非对称的特点。对称性表现华北区域天气型分布的一般性,而非对称性则体现其独特性,如:节点(1, 1)为北高南低分布,而节点(6, 6)为南高北低分布,二者呈现对称性;节点(1, 1)的高压中心位于蒙古中东部,而(6, 6)的高压中心位于洋面上,另外(6, 6)的北方低压中心距平值低于(1, 1)的南方低压中心,这体现了二者的非对称性。

基于二维自组织图的连续性,在假设样本序列中连续两个样本的天气型变化不大的条件下,可以追踪天气型的演变特征(Hewitson et al, 2002)。样本序列中的每个样本都对应二维自组织图中的某个节点,如对于某样本 X_i ,对应节点 Y_i ,同样对于 X_i 的前一时刻 X_{i-1} 和后一时刻 X_{i+1} ,分别对应节点 Y_{i-1} 和 Y_{i+1} 。节点 Y_{i-1} 、 Y_{i+1} 与 Y_i 之间的关系有下列情况: $Y_{i+1} = Y_i$,表明天气型变化不大,处于停滞状态; $Y_{i+1} \neq Y_i$,天气型向邻近节点演变,这时可以计算天气型在二维自组织图上的演变方向;同样 $Y_{i-1} \neq Y_i$ 时,可以向前一时刻追溯天气型来源。对二维自组织图中每个节点所对应的所有样本计算其

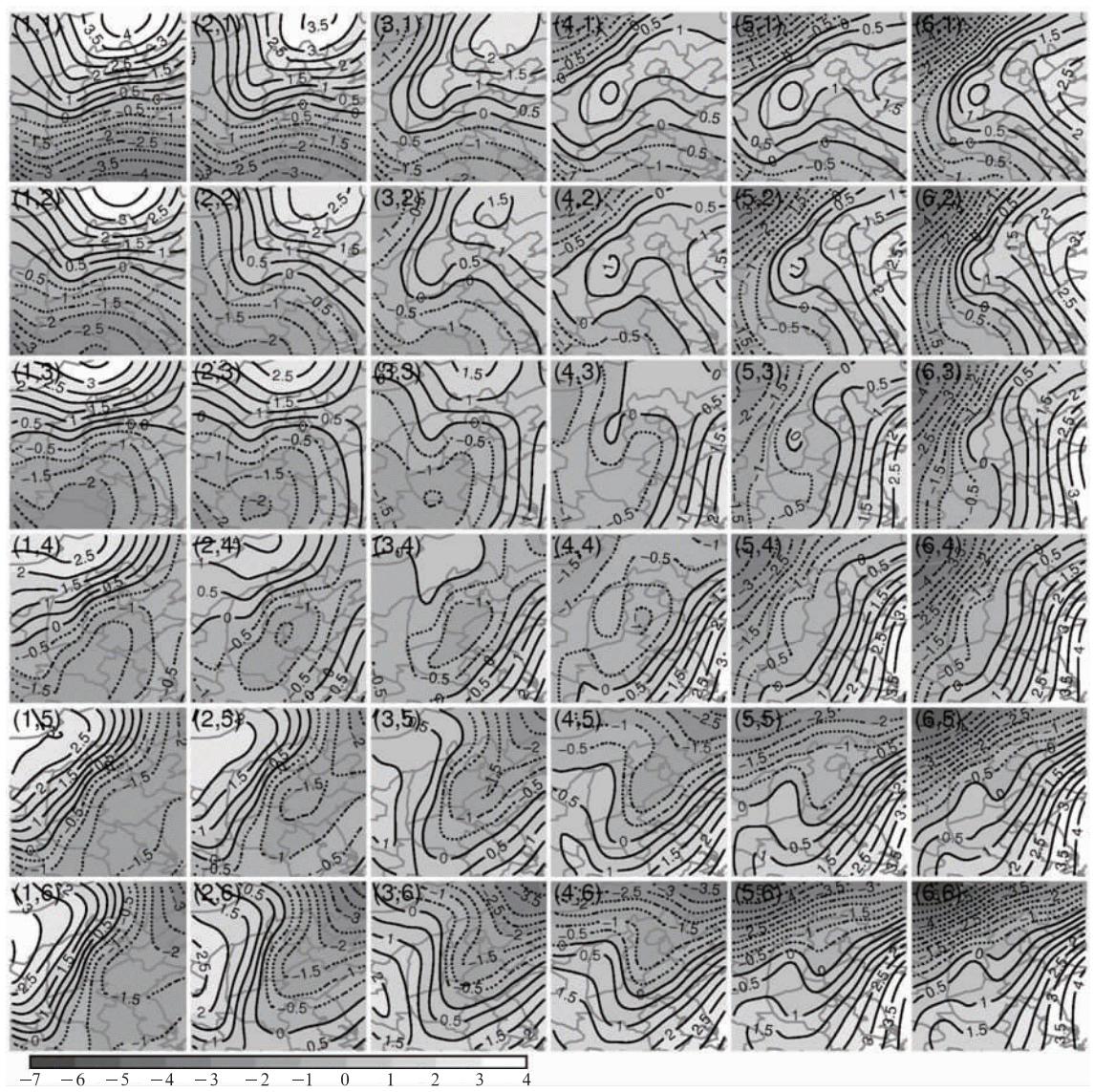


图 2 利用 1958—2002 年夏季(6、7 和 8 月)ERA40 海平面气压距平资料得到的二维自组织图
[图中每个节点表示一种天气类型,左上角标记节点的坐标,等值线间隔为 0.5 hPa,实线(虚线)表示正(负)距平]

Fig. 2 Master self-organizing maps of MSLP anomalies (unit: hPa) based on summer
ERA-40 MSLP data from 1958 to 2002

(In this figure, each node represents a single synoptic type and its coordinate is labeled at the upper left corner.
Anomaly MSLP contour interval is 0.5 hPa. Solid contours represent positive MSLP anomalies,
whereas dashed contours represent negative MSLP anomalies)

停滞,演变及来源方向,最后统计节点的停滞频率,以及东、东北、北、西北、西、西南、南和东南 8 个方向上的演变和来源频率。

图 4 给出华北区域各天气型的停滞频率,结果显示:节点(1, 1)的停滞频率最高,达到 41.5%,表明北高南低型最稳定,其次是节点(6, 6)为 38.7%;除(1, 1)和(6, 6)外,其余节点的停滞频率都小于 30%,自组织图由外至内,停滞频率有减少的趋势;

节点(3, 3)和(5, 4)的停滞频率最低,分别为 5.5%和 5.2%。上述分析表明,高、低压系统越强,或以高压系统活动为主时,华北地区的天气形势相对稳定,一般可持续数天;而高、低压系统强度较弱,或以低压中心活动为主时,该区域天气形势转变较快。

天气型随时间的演变最终构成该区域的天气气候特征。图 5a 和 5b 分别显示二维自组织图中各节点上天气型向后演变和向前回溯的方向频率。图 5a

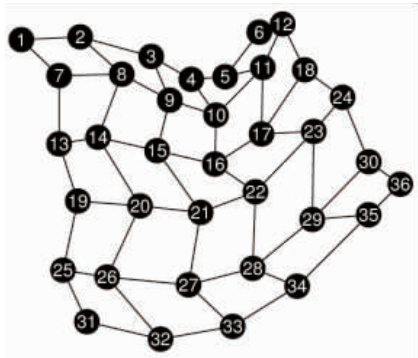


图 3 二维自组织图的 Sammon 非线性映射图
(图中标记出节点的序号)

Fig. 3 Sammon map for the self-organization maps with the four corner nodes labeled

中虚线描述了 9 种典型的天气型演变路径(箭头表示演变的方向):路径 1 从节点(1, 1)向右至(4, 1),再向下至(4, 3),对应内蒙古东部高压东移南下入海,强度减弱,体现了北路冷空气的移动路径;路径 2 从节点(1, 5)向上至(1, 2),然后右转至(4, 2),而后向下至(4, 3),对应高压中心从西北地区东部或内蒙古中西部出发,沿西路影响华北地区,与路径 1 相比,其高压强度略偏弱,印证了西路冷空气较北路偏弱;路径 3 从节点(6, 1)至(5, 1),再向下至

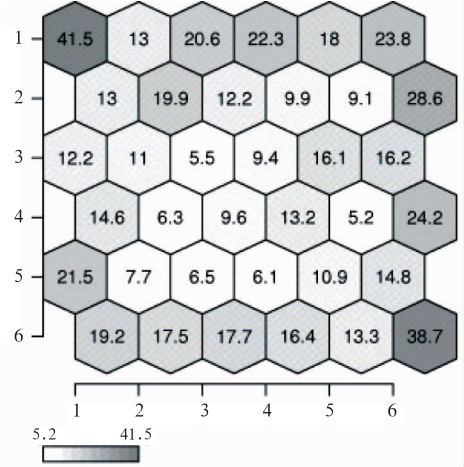


图 4 二维自组织图中节点的停滞频率(单位: %)
(坐标轴上数字对应于图 2 的节点坐标)

Fig. 4 The stagnation frequencies (unit: %) of nodes in self-organization maps
(Numbers along the axes correspond to the node numbers given in parenthesis in Fig. 2)

(5, 3),后向左至(4, 3),对应东部黄海高压西伸,然后南落东退;路径 4 从(3, 5)至(2, 4)至(3, 3),对应低压向南移动;路径 5 从节点(6, 1)向下至(6, 4),对应高压中心向南移动,西北低压区东移;路径 6 与 5 相对,由节点(6, 6)至(6, 3),对应高压中心

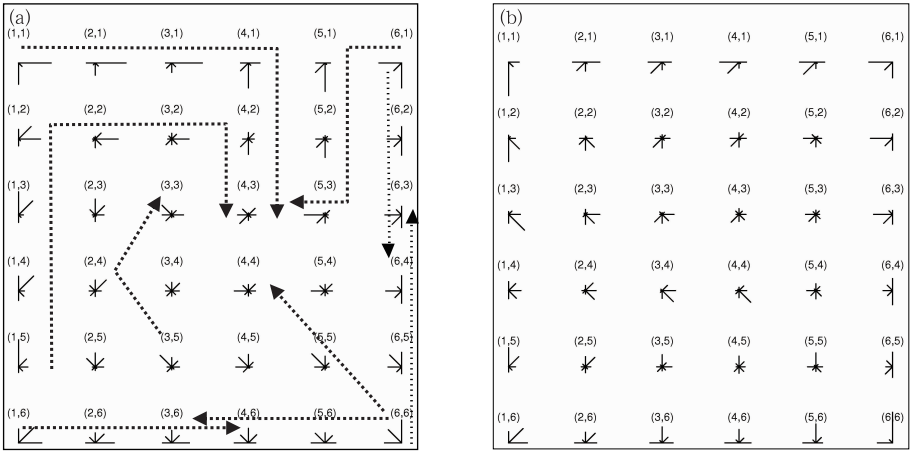


图 5 二维自组织图中各节点天气型 8 个方向上的演变频率
(a)为向后一个时刻演变,(b)为向前一个时刻回溯

[图中节点上线段长度表示频率大小,而指向表示演变方向,(a)中带箭头的点线为显著演变路径]

Fig. 5 Proportional frequencies of synoptic type trajectories in eight directions in self-organization maps

(a) forward trajectories, (b) backward trajectories

(The length of line segment is the magnitude of proportional frequency, and the orientation is the direction of trajectory; The dotted lines with arrow are typical trajectories of synoptic types)

向北移动,而低压受高压中心阻挡向南扩展;路径 7 从节点(6, 6)经(5, 5)至(4, 4),对应华北中部的地面低槽加深,并形成低压中心;路径 8 从节点(6, 6)向左至(3, 6),对应华北区域西北低压东移,并向南伸展;路径 9 则从节点(1, 6)向右至(4, 6),对应华北地区东部低压区北收,而西部地面高压沿西路南下。

通过图 5b,可以确定各节点天气型的主要演变来源,如:对于节点(1, 1)和(1, 2),其天气型主要由南侧的节点演变而来;节点(6, 6)主要由北侧的节点演变而来,也有相当比例来自于西侧节点;对于内部节点,(2, 5)至(5, 5)主要来源是北侧节点,而(4, 4)、(3, 4)、(2, 4)和(2, 3)主要来自东南象限,(3, 2)、(4, 2)、(5, 2)和(5, 3)则主要来自西南象限。

2.2 天气型的频率分布特征

图 6 给出图 2 中各节点天气型在 1952—2002 年夏季和 6、7、8 月分别的出现频率(即节点对应的样本数除以总样本量)。首先分析整个夏季频率分布特征。Schuenmann 等(2009)在假定样本映射到二维自组织图节点的概率为二项式分布时,指出节点天气型出现概率等同于映射平均概率的 95% 信度区间用下面公式计算:

$$p \pm 1.96 \left[\frac{p(1 + p)}{n} \right]^{1/2} \tag{1}$$

式中, p 为样本映射到某个节点的映射概率, n 为总样本量。由上式计算得到的区间为 2.27% ~ 3.29%,即若节点的出现频率落在该区间之外,则相对于期望值 2.78%,明显偏多(大于 3.29%)或偏少

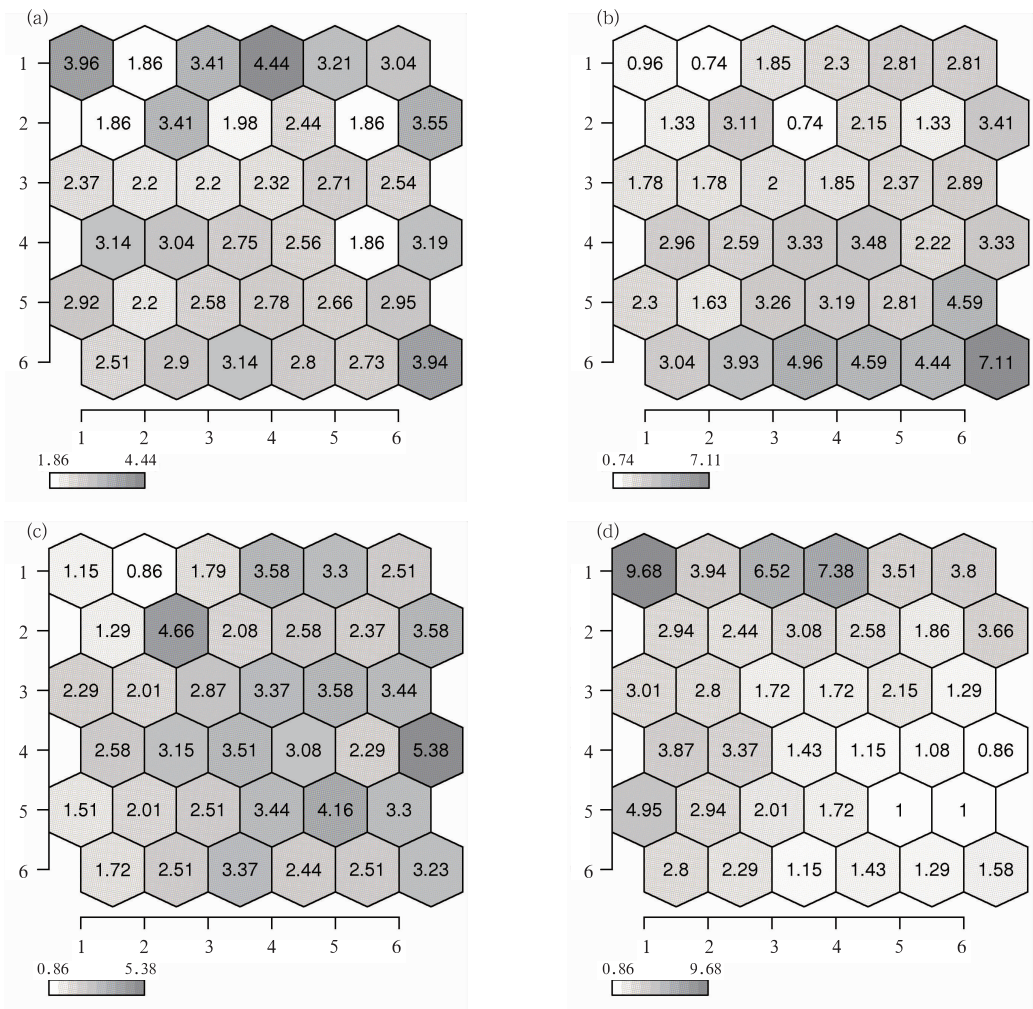


图 6 各节点上天气型的发生频率(单位: %): (a) 整个夏季, (b) 6 月, (c) 7 月, (d) 8 月

Fig. 6 Node frequencies (unit: %) for (a) whole summer, (b) June, (c) July, and (d) August

(小于 2.27%)。

对于整个夏季(图 6a),总体上二维自组织图中节点出现频率较为平均,有 61.1%的节点落在 95%的信度区间内,表明这些节点上天气型的出现频率与期望值的差别不大。有 22.2%节点的出现频率大于 3.29%,表现出明显高于期望值的频率特征。其中节点(4, 1)、(1, 1)和(6, 6),分别达到了 4.44%、3.96%和 3.94%。

对于 6、7 和 8 月分别的出现频率(图 6b、6c 和 6d),则各节点的出现频率呈现出明显的不均匀分布特征,如落在 95%的信度区间外的节点数分别达到了 91.7%、61.1%和 75%。进一步分析发现,该不均匀分布呈现出规律的演变特征,即 6—8 月的出现频率高值区由自组织图的右下区转移到左上区:(1)6 月,节点出现频率的高值区分布在右下区,其中节点(6, 6)的出现频率达到 7.11%,表明该月海平面气压场以北低南高为主,气旋活动主要偏北;(2)7 月,频率的高值区分布在右下区与左上区之间的过渡带上,且相对较均匀,对比图 2 表明该月份地面气压梯度较小,华北区域内多气旋活动;(3)8 月,高值区已经转移到左上区,海平面气压场以北高南低型为主,这时华北区域南部多温带气旋或热带气旋活动。

以上给出了二维自组织图上频率的空间分布特征,进一步分析其时间分布特征。如图 7 所示,给出各节点上天气型发生频数的年际变化曲线及趋势分析。总体来看,自组织图中外围节点的变化趋势较为明显,而中间过渡天气型的年际变化较平稳。如节点(6, 3)、(6, 4)和(6, 5),趋势直线的斜率分别为 -0.08 、 -0.07 和 -0.07 ,表明这 3 种由西低东高向南高北低过渡的天气型的发生频率呈现较显著下降趋势。另外节点(4, 1)、(1, 4)和(1, 5)的趋势直线斜率分别为 0.07 、 0.05 和 0.05 ,表现出明显的上升趋势。此外,一些年际变化趋势不明显的天气型也呈现出阶段性的变化特征,如节点(6, 1)和(6, 6),在 20 世纪 80 年代频数显著偏多。

2.3 天气型相应的降水分布特征

基于前述的主要天气型,可以计算得到二维自组织图上各节点的平均降水量距平分布(如图 8)。正如 Schuenmann 等(2009)指出,引发降水的物理过程涉及大气对流层各垂直层次上天气系统之间复杂的相互作用。尽管这些相互作用很重要,但总能

在地面环流场上得到一定的反映。因此,每种降水的分布类型都能够从地面环流场上得到较好的解释。图 8 显示出地面环流场和降水之间的密切关系:即正的降水距平主要分布在冷暖空气交汇的地方,以及地面低槽、低压倒槽顶部或地面气旋附近。这些地方存在相应的垂直上升速度,有利于降水的发生。如节点(1, 1)向右至(6, 1),随着北方地面高压的逐渐南压,位于高压前侧锋面上降水区也南移;节点(3, 3),降水正距平高值区位于河北北部,相应的地面气压场上低压倒槽顶部也位于河北北部;节点(2, 3)与(3, 3)接近,所不同的是河南东北部和山东西南部存在降水正距平高值区,从地面环流场可以看到节点(2, 3)较(3, 3)的低压中心强度更强,因此可以判断这部分主要来自于地面气旋降水。

图 9 给出了二维自组织图中各节点的区域平均降水量,可以看到降水量呈现从右下角至左上角逐渐递增的趋势。降水量最少的节点主要分布在自组织图的右下角,(6, 6)、(6, 5)、(6, 4)、(5, 6)和(4, 6)的区域平均降水量都小于 $3.2 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。图 8 显示在这些节点上,天气型的降水效率很低,即没有降水正距平高值中心。从地面气压场来看,节点的天气型以北低南高,或西北低东南高为主。这时北方冷空气活动较弱,华北区域以偏西风为主,冷暖空气交绥弱,因此天气型的降水效率低。

区域平均降水量较高的节点主要分布在自组织图的左上部分,如节点(3, 1)、(2, 1)、(1, 2)、(1, 1)和(3, 5),都大于 $4.45 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 。图 8 表明,降水量较高的天气型都具有降水效率高的正距平中心:如节点(1, 1),有两条较明显的降水正距平高值带,一条分布在山西东部至陕西中部,另一条分布在江苏和山东半岛沿海;节点(1, 2)的降水距平高值中心分布在山西的中东部及河北的西南部,中心值达到 $6 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 以上。

进一步分析表明,降水正距平中心的位置与地面锋面位置、高低压中心位置及强度密切相关。地面环流场的细微差别,将会造成强降水中心位置的较大差异,如节点(1, 1)和(1, 2):地面气压场的主要差别表现在节点(1, 2)的低压中心强度偏弱且位置略偏北;降水距平场上节点(1, 1)呈现出两条强降水带,一条是由高压西侧冷空气南下与暖空气交绥引发,而沿海的降水带是由偏东风或较强近海气旋造成;(1, 2)则呈现单个强降水中心,位于低压倒

槽顶部锋区附近,而沿海以东南风为主,因此降水较弱。另外地形的影响将加大降水中心位置的差别,如节点(4,3)和(3,3):节点(3,3)系统强度较强且位置略偏西,降水主要分布在低压倒槽的顶部,即河北北部;而节点(4,3)系统较弱且位置略偏东,地形作用更明显,降水主要分布在河北西部的太行山脉迎风坡上。

区域内不同地区的降水来自不同天气型的影响:

(1)西部强降水主要由节点(1,1)、(2,1)及(2,2)造成,这3种天气型以北高南低型为主,冷暖空气交绥位置偏西;(2)南部的强降水主要由节点(3,1)、(4,1)、(5,1)和(6,1)造成,天气型表现为地面高压南移,锋面偏南;(3)中部强降水主要来自于节点(1,2)、(2,2)、(6,2)、(4,3)、(5,3)和(5,4)等,以低压倒槽降水为主要特征;(4)东北部强降水包括节点(1,3)、(2,3)、(3,4)、(3,5)和(3,6)等,

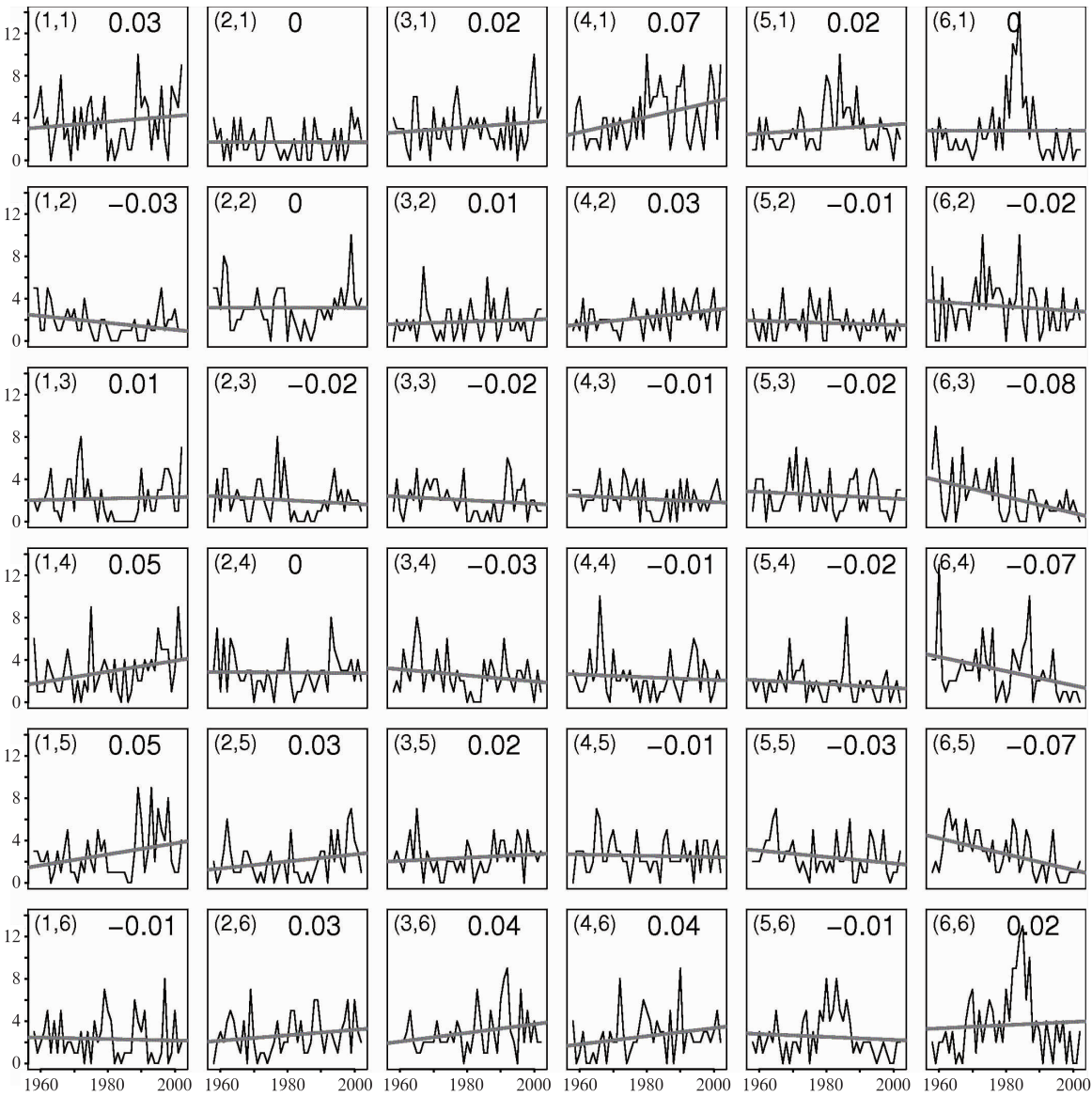


图 7 各节点上天气型发生频数的年际变化曲线及趋势分析

(图的横坐标为年份,纵坐标为发生频数;细实线为年际变化曲线,粗实线为趋势直线;
图中左上角标出节点坐标,右上角为趋势直线的斜率)

Fig. 7 Annual frequency and trend analysis at every node

(Figure's X-axis is year, and Y-axis is frequency; Thin solid line is the annual curve, and thick solid line is trend line;
Node coordinates are labeled at the upper left corner, and trend slopes are labeled at the upper right corner)

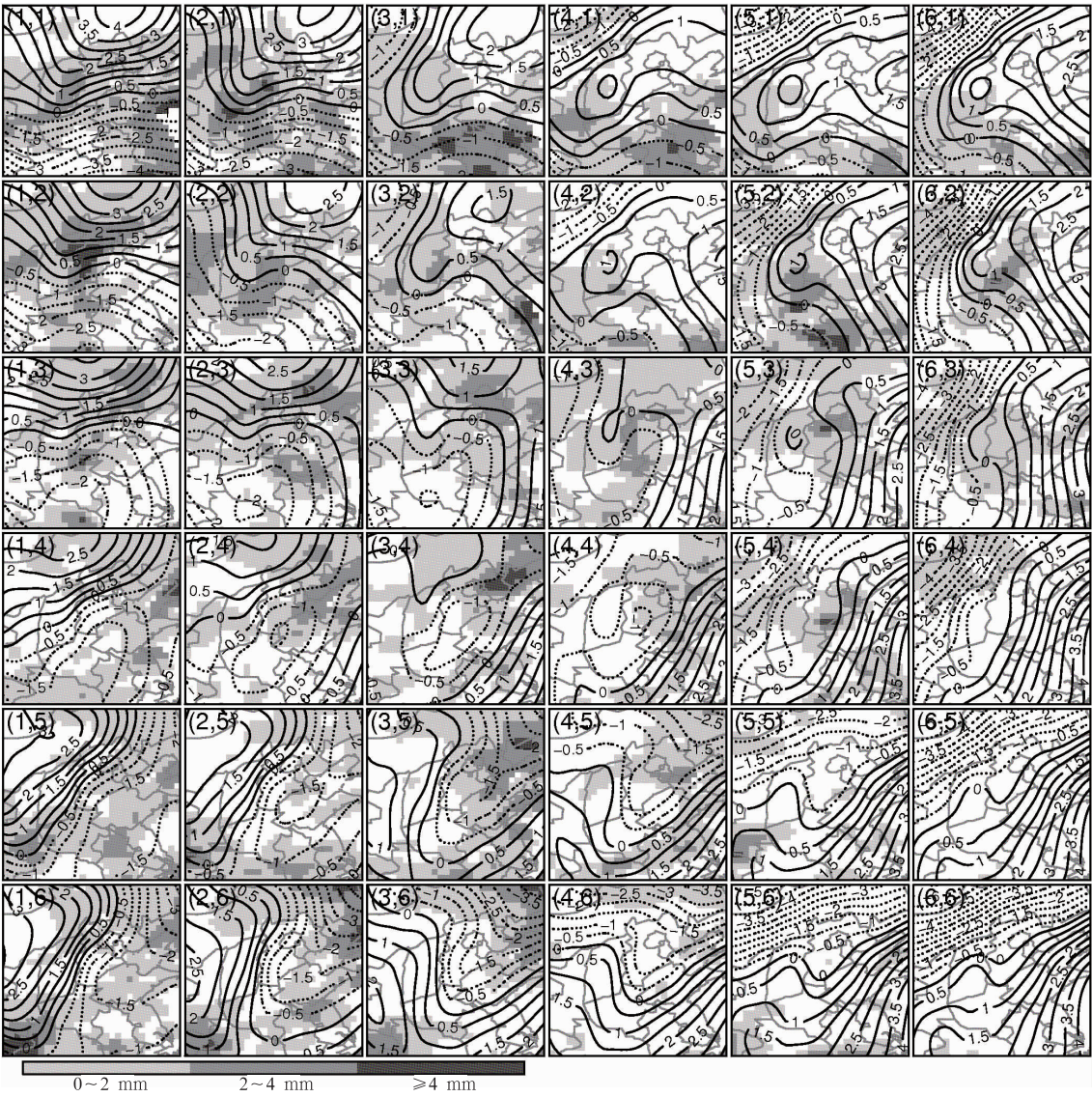


图 8 节点平均降水距平和海平面气压距平叠加

[图中海平面气压距平等值线间隔为 0.5 hPa,实线(虚线)表示正(负)距平;阴影表示降水正距平]

Fig. 8 Node-averaged precipitation anomaly and node MSLP anomalies

(MSLP anomalies contour interval is 0.5 hPa; Solid contours represent positive MSLP anomalies, whereas dashed contours represent negative MSLP anomalies; Shaded contours represent positive precipitation anomalies)

天气型表现为地面高压偏北而倒槽北伸,或我国东北地区存在的低槽;(5)东南部沿海强降水包括节点(1, 1)、(2, 1)、(3, 1)等,由具有沿海偏东风的天气型引发。

将节点的区域平均降水量乘上其出现频数,可以得到各天气型对区域降水的总贡献。如图 10,总体上,平均降水量较大(小)的节点对区域总降水量的贡献较大(小),但并非一一对应关系。降水贡献

量 600 mm 以上的天气型依次有节点(4, 1)、(1, 1)、(3, 1)和(2, 2),其中(4, 1)贡献量达到 777 mm,为最高,这与其高的出现频率有关。对比图 8,表明贡献量大的天气型以北高南低型为主,强降水主要分布在西部、中部及南部。此外,自组织图左下区的降水贡献量也较高,多个节点达到 500 mm 以上,天气型以西高东低型或东北低槽型为主,降水主要分布在区域的西南部和东北部。

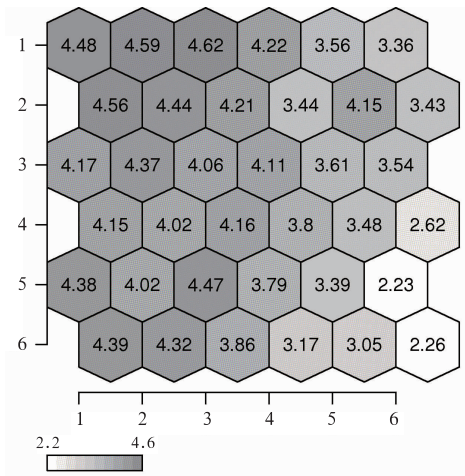


图 9 二维自组织图中节点的区域平均降水量(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

Fig. 9 The regional averaged daily precipitation (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

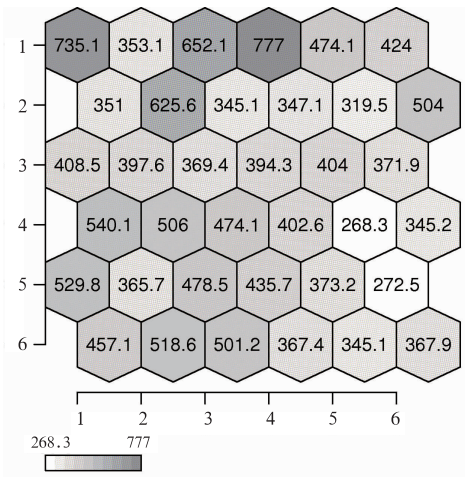


图 10 二维自组织图中节点的降水贡献(单位: mm)

Fig. 10 Average contribution of node to precipitation (unit: mm)

3 结论与讨论

华北区域的天气气候学研究还较初步,特别是针对大气环流场与地面降水要素之间关系的研究还不够系统。天气分型是天气气候学研究的重要手段。采用自组织神经网络算法(SOMs),基于1958—2002年夏季ERA-40日平均海平面气压距平场,对华北区域的地面环流进行分型,研究其天气气候特征。下面为得到的主要结果:

(1)利用SOMs将华北区域海平面气压距平场划分成36种典型天气型,包括强北高南低、强西高东低槽、强西北低东南高和强东部高压西伸4种极端类型,以及它们之间的过渡型。

(2)二维自组织图上天气型的对称性体现了华北区域天气气候的一般性特征,而非对称性则体现其独特性。

(3)天气型演变特征分析表明,高、低压系统越强,或以高压系统活动为主时,华北地区的天气形势相对稳定;中部弱倒槽型和中部弱低压型的停滞频率最低,表明高、低压系统强度较弱,或以低压中心活动为主时,该区域天气形势转变较快。

(4)天气型的频率分析显示,中部偏北高压型、强北高南低型和强西北低东南高3种天气型的出现频率最高;此外,3种由西低东高向北低南高过渡的天气型呈显著的下降趋势,而两种西北高东南低和一种中部偏北高压型呈现较明显的上升趋势。

(5)地面环流场与降水之间存在密切的关系。北低南高或西北低东南高为主的天气型降水效率最低,而北高南低或西高东低型的降水效率较高。降水正距平高值区主要分布在地面锋面、低槽、低压倒槽顶部或地面气旋附近。地面环流场的细小差别将会造成地面强降水中心位置的较大不同,且地形的影响将放大该差别。

上述分析结果采用更完整数据(45年再分析数据)及更高的时间分辨率(日平均),拓展了华北区域夏季的天气气候学研究。结果表明,由于高、低压中心位置和强度的细小偏移将会造成强降水分布的较大差别,因此在更高时空分辨率上研究华北区域的天气气候学很重要。如何应用上述华北区域夏季天气分型特征将是下一步研究的方向。天气分型是相似预报的基础,有了定量化的分型数据集,可以发展客观化的数值模式典型天气过程识别技术(Gutierrez et al, 2005)以及降尺度技术(韩佳芮等, 2011),以及针对不同天气类型的数值模式检验(张国华等, 2011)。此外,天气分型特征也能够为区域的气候情景分析提供基础(Penlap et al, 2004)。

参考文献

陈豫英,刘还珠,陈楠,等. 2008. 基于聚类天气分型的KNN方法在风预报中的应用. 应用气象学报, 19(5): 564-572.
韩佳芮,严中伟,矫梅燕,等. 2011. 以用户为导向的交互式预报系统及应用研究. 气象, 37(6): 649-658.
刘景涛,钱正安,姜学恭. 2004. 中国北方特强沙尘暴的天气系统分型

- 研究. 高原气象, 23(4): 540-547.
- 陶诗言, 等. 1980. 中国之暴雨. 北京: 科学出版社, 225.
- 王宏, 林长城, 隋平, 等. 2008. 福州天气形势分型与大气污染物相关分析. 气象与环境学报, 24(6): 7-11.
- 王彦磊, 滕军, 张韧, 等. 2008. 自组织网络与广义回归网络耦合的副热带高压指数预测. 热带气象学报, 24(5): 475-482.
- 臧传花, 赵敏芬, 卢兆民. 2007. 基于天气分型的夏季逐时用电负荷预报. 气象, 33(11): 107-111.
- 张国华, 张江涛, 张南, 等. 2011. 基于河北区域天气分型的多模式降水检验评估. 气象, 37(8): 968-976.
- 章基嘉, 孙照渤, 陈松军. 1984. 应用 K 均值聚类法对东亚各自然天气季节 500 毫巴候平均环流的分型试验. 气象学报, 42(3): 311-319.
- 张守保, 张迎新, 杜青文, 等. 2008. 华北平原回流天气综合形势特征分析. 气象科技, 36(1): 25-30.
- 周功铤, 叶子祥, 余贞寿. 2006. 浙南梅汛期大暴雨天气分型及诊断分析. 气象, 32(5): 67-73.
- Abercromby R. 1883. On certain types of British weather. Quart J Roy Meteor Soc, 9: 1-25.
- Barry R G, Perry A H. 1973. Synoptic climatology: Methods and applications. London: Methuen & Co Ltd, 555.
- Cassano E N, Lynch A H, Cassano J J, et al. 2002. Classification of synoptic patterns in the western Arctic associated with extreme events at Barrow, Alaska, USA. Climate Research, 30(2): 83-97.
- Cassano J J, Uotila P, Lynch A H. 2006a. Changes in synoptic weather patterns in the polar regions in the twentieth and twenty-first centuries, Part 1: Arctic. Int J Climatol, 26(8): 1027-1049.
- Cassano J J, Uotila P, Lynch A H. 2006b. Changes in synoptic weather patterns in the polar regions in the twentieth and twenty-first centuries, Part 2: Antarctic. Int J Climatol, 26(9): 1181-1199.
- Comrie A C. 1994. A synoptic climatology of rural ozone pollution at three forest sites in Pennsylvania. Atmos Environ, 28(9): 1601-1614.
- Gutierrez J M, Cano R, Cofino A S, et al. 2005. Analysis and downscaling multi-model seasonal forecasts in Peru using self-organizing maps. Tellus A, 57A: 435-447.
- Hewitson B C, Crane R G. 2002. Self-organizing maps: Applications to synoptic climatology. Climate Res, 22(1): 13-26.
- Huth R. 1996. Properties of the circulation classification scheme based on the rotated principal component Analysis. Meteorol Atmos Phys, 59(3-4): 217-233.
- Kohonen T. 1984. Self-organization and associative memory, 3rd edn. Berlin: Springer Verlag, 312.
- Kohonen T. 2001. Self-organizing maps. 3rd ed. Berlin: Springer Verlag, 501.
- Lamb H H. 1950. Types and spells of weather around the year in the British Isles: Annual trends, seasonal structure of the year. Quart J Roy Meteor Soc, 76(330): 393-429.
- Lund I A. 1963. Map-pattern classification by statistical method. J Appl Meteor. 2(1): 56-65.
- Nishiyama K, Endo S, Jinno K, et al. 2007. Identification of typical synoptic patterns causing heavy rainfall in the rainy season in Japan by a Self-Organizing Map. Atmos Res, 83(2-4): 185-200.
- Penlap E K, Christoph M, Hans von S F, et al. 2004. Downscaling of GCM scenarios to assess precipitation changes in the little rainy season (March—June) in Cameroon. Climate Res, 26(2): 85-96.
- Reusch D B, Alley R B, Hewitson B C. 2005. Relative performance of self-organizing maps and principal component analysis in pattern extraction from synthetic climatological data. Polar Geogr, 29(3): 227-251.
- Sammon J. 1969. A nonlinear mapping for data structure analysis. IEEE Trans Comput, 18(5): 401-409.
- Schuenemann K C, Cassano J J, Finnis J. 2009. Synoptic forcing of precipitation over Greenland: Climatology for 1961—99. J Hydrometeorol, 10(1): 60-78.
- Seefeldt M W, Cassano J J. 2008. An analysis of low-level jets in the Greater Ross Ice Region based on numerical simulations. Mon Wea Rev, 136(11): 4188-4205.
- Skific N, Francis J A, Cassano J J. 2009. Attribution of projected changes in atmospheric moisture transport in the Arctic: A self-organizing map perspective. J Climate, 22(15): 4135-4153.
- Uppala S M, Kallberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 Re-Analysis. Quart J Roy Meteor Soc, 131(612): 2961-3012.
- Yarnal B. 1988. Synoptic climatology in environmental analysis: A primer. London and Florida: Belhaven Press, 195.
- Yarnal B, Comrie A C, Frakes B, et al. 2001. Developments and prospects in synoptic climatology. Int J Climatol, 21(15): 1923-1950.
- Yarnal B, Draves J D. 1993. A synoptic climatology of stream flow and acidity. Climate Res, 2(3): 193-202.
- Zelenka M P. 1997. An analysis of the meteorological parameters affecting ambient concentrations of acid aerosols in Uniontown, Pennsylvania. Atmos Environ, 31(6): 869-878.