

利用传递熵对 Lorenz 系统和 Walker 环流信息传输方向的分析*

张志森¹⁾ 龚志强^{2)†} 支蓉²⁾

1) (兰州大学大气科学学院, 兰州 730000)

2) (国家气候中心, 北京 100081)

(2012年12月7日收到; 2013年2月20日收到修改稿)

基于传递熵方法, 分析 Lorenz 系统 x, y, z 三个分量之间的信息传输方向, 并应用温差与垂直速度的再分析资料对 Walker 环流进行分析. 研究表明: 1) 对于 Lorenz 系统而言, x 与 y 分量之间, y 是信息源, x 是信息汇; y 与 z 之间, y 是信息源, z 是信息汇; x 与 z 分量之间的信息传递方向依赖于控制参数 r ; 且净信息传输的方向不随初值不同而改变; 2) 在西太平洋地区, 温差对垂直速度的净信息输送占主导地位, 而赤道东太平洋地区则为垂直速度对温差的净信息输送占主导地位, 这与 Walker 环流物理机制是一致的, 且海陆热力差异对温差与垂直速度之间的信息输送影响较大; 3) 冬季是温差与垂直速度之间的信息输送最强季节, 夏季和秋季次之, 春季最弱, 这可能是存在春季预报障碍的原因之一. 以上结果表明, 传递熵在气象领域有广阔的应用前景, 是测量动力学系统信息传递方向的一种有效方法和工具.

关键词: 传递熵, 信息传输, Lorenz 系统, Walker 环流

PACS: 92.60.Wc, 92.70.Gt

DOI: 10.7498/aps.62.129203

1 引言

气候系统是一个包含非线性动力和热力过程且具有强迫耗散特征的复杂巨系统. 在外强迫的作用下, 其内部会发生一系列复杂的物理化学变化和非线性相互作用. 气象工作者对气候系统非线性和复杂性的研究已经取得了丰硕成果^[1-12], 但是由于气候系统的复杂性, 气候预测仍面临巨大的困难. 不同要素场间包括不同气候现象以及气候系统之间存在着作用和反馈作用的复杂关系, 如何测量不同要素场间的信息流向, 是一个热点也是一个难点. 传统的方法是通过超前和滞后的相关分析方法进行分析, 但相关分析方法本身并不是联系的本质体现, 因此结合非线性方法研究新的可能途径迫在眉睫.

度量事物不确定性的指标称之为“熵”, 它源于热力学, 最早由 Clausius 提出, 热力学熵 S 用以度量热量转变为功的本领. 1866 年 Boltzmann 建立了空气的动力学理论, 宣告统计热力学诞生, 他定义了 Boltzmann 熵. 1948 年信息论创始人 Shannon 将 Boltzmann 熵概念引入通信领域并称之为信息熵 (information entropy 或者 Shannon entropy), 作为随机事件的不确定性或者信息量的度量. 1959 年 Kullback^[13] 在此基础上提出 Kullback 熵 (Kullback entropy), 在 Kullback 熵定义里引入条件概率的概念, 便可以得到互信息熵 (corresponding Kullback entropy), 作为相互交换信息多少的度量, 亦可称为交换熵. 2000 年, Schreiber^[14] 在前人基础上提出了传递熵 (transfer entropy, TE), 它不但可以量化出两系统间的信息交换强度, 更可以计算出信息的流向. 除了物理通信领域的广泛应用外, 传递熵以及相关

* 国家自然科学基金 (批准号: 41175067, 41205040)、国家重点基础研究发展计划 (批准号: 2013CB430204, 2012CB955902) 和公益性行业专项 (批准号: GYHY201106016) 资助的课题.

† 通讯作者. E-mail: gzq0929@126.com

熵理论已经被应用在化学、生物、医学、金融等众多领域中。

传递熵在地球科学、大气科学领域中也得到了广泛应用。气候变化领域中, Verdes^[15] 通过应用传递熵进行研究指出 CO₂ 对全球温度增加具有更大的贡献; Liang 和 Kleeman^[16] 基于传递熵理论从理论上推导了动力学系统各分量之间的信息流向, Andrew 和 John^[17] 在他们的基础上进行发展并在气候模式中加以应用; Kleeman^[18] 在集合预报中引入传递熵的概念, 通过寻找对预报对象有关键影响的因子提高预测精度; Materassi 等^[19] 通过应用传递熵研究地球飞行器在地球磁场中与之耦合的问题, 找到有关键作用的要素及其作用尺度。

Lorenz 系统^[20] 作为源于大气动力学方程组的一个动力学系统, 各个分量具有比较明确的物理意义。无外强迫时, Lorenz 系统在 x - y 平面上运动轨迹的概率密度函数为大小相等的双峰结构^[21]。Sikka 和 Gadgil^[22] 和 Christiansen^[23] 的研究表明, 实际大气中许多天气气候的变化也表现为双峰结构, 如季风的活跃和萧条期、大尺度季风降水强弱及与之有关的热带辐合带 (ITCZ) 强弱和位置分布、大气平流层中气候变化等。Walker 环流作为赤道太平洋上东西向的一个环流, 人们对其研究也很充分。20 世纪 20 年代英国的 Walker^[24-26] 首先发现了位于赤道东、西太平洋的涛动现象 (简称南方涛动), 南方涛动所形成的环流被 Bjerknes^[27] 称为 Walker 环流。之后以 Rasmusson 和 Carpenter^[28] 为代表的研究指出了 Walker 环流与 El Niño/La Niña 事件的关系。人们认识到^[29]: Walker 环流是一种热力性环流, 它完全是由于热带太平洋东西两侧海洋热力场发生显著差异的热力强迫而形成的。本文基于传递熵分析 Lorenz 系统中信息传输方向并应用温差与垂直速度的资料对 Walker 环流进行分析, 指出了传递熵作为一个非线性方法探索气象领域未知动力学机制的潜在价值。

2 资料和方法

2.1 资料

本文使用的资料主要是美国环境预报中心 (National Centers for Environmental Prediction, NCEP) 和国家大气研究中心 (National Center for Atmospheric Research, NCAR) 提供的月平均再分

析资料, 变量为垂直速度和气温, 资料的水平分辨率为 $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, 时间长度为 1948—2011 年。

2.2 传递熵的定义

对于两个系统, $I: \{i_n, n=1, N\}$ 和 $J: \{j_n, n=1, N\}$, i_n 和 j_n 分别表示 I 和 J 系统在 n 时刻的状态, 两者之间存在某种联系, J 对 I 的信息传输量可以用传递熵^[14] 来表征:

$$T_{J \rightarrow I} = \sum p(i_{n+1}, i_n^{(k)}, j_n^{(l)}) \log \frac{p(i_{n+1} | i_n^{(k)}, j_n^{(l)})}{p(i_{n+1} | i_n^{(k)})}, \quad (1)$$

单位为 bit, 其中 $i_n^{(k)} = (i_n, \dots, i_{n-k+1})$, $j_n^{(l)} = (j_n, \dots, j_{n-l+1})$, $p(\cdot)$ 为状态发生的概率。一般情况下, $T_{J \rightarrow I} \neq T_{I \rightarrow J}$, 当 $T_{J \rightarrow I} > T_{I \rightarrow J}$ 时, 表示 J 对 I 有净信息传输, 即 J 是信息源, I 是信息汇, 或者在 J 和 I 相互作用过程中, J 为驱动因子, I 为响应因子; 反之则相反。当 $T_{J \rightarrow I} = T_{I \rightarrow J} \neq 0$ 时, 表示 I 和 J 的相互信息传输处于平衡状态。因此, 传递熵与交换熵的差别在于交换熵只能表征 I 与 J 之间有信息传输, 但是不能区分源汇, 而传递熵能够区分出源汇, 即传递熵能够表征出净信息传输的方向。

3 Lorenz 系统的传递熵特征

3.1 Lorenz 系统

Lorenz 系统的一般形式为

$$\begin{aligned} \frac{dx}{dt} &= -\delta(x-y), \\ \frac{dy}{dt} &= -xz + rx - y, \\ \frac{dz}{dt} &= xy - bz, \end{aligned} \quad (2)$$

其中 x, y, z 分别代表对流速度、上升流与下降流的温差、垂直方向温度分布的非线性强度; δ, r, b 分别为普朗特数、瑞利数、外形比。Lorenz 系统是一个耗散系统, 耗散系统代表整体上的不稳定性, 若再加上局部不稳定性, 就构成了出现混沌的基础。考虑到物理背景, 取 $\delta = 10.0, b = 8/3, 0 \leq r < \infty$, 令系统 (2) 左端为零, 得 Lorenz 系统的定常解

$$\begin{cases} x = 0, \\ y = 0, \\ z = 0, \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} x = \sqrt{b(r-1)}, \\ y = \sqrt{b(r-1)}, \\ z = r-1, \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} x = -\sqrt{b(r-1)}, \\ y = -\sqrt{b(r-1)}, \\ z = r-1, \end{cases} \quad (5)$$

显然, 当 $r \leq 1$ 时系统只有一组实根, 即 $x = y = z = 0$, 意味着无对流状态; 当 $r > 1$ 时系统 (2) 有三组实根. 经稳定性分析, 当 $1 < r < 24.74$ 时, 系统有两个对称稳定的平衡态解 ((4) 与 (5) 式), 此时 (3) 式是不稳定的解. 数值计算表明, 几乎任意选取的初值最终都趋于上述两个稳定的平衡态之一. 当 $r > 24.74$ 时, 在整个相空间内不存在任何稳定的平衡态, 这就是所谓的混沌状态. 该状态仍然存在着一一定的时空结构, 即存在不同尺度的周期特征.

3.2 控制参数 r 变化对 Lorenz 系统传递熵的影响

由于当 $r > 24.74$ 时, 系统将进入混沌状态, 但本文基于传递熵方法对 Lorenz 系统内部信息传输的讨论都建立在系统最终将进入混沌状态的基础上的, 因此本文讨论的控制参数范围为 $25.0 \leq r \leq 50.0$.

图 1 给出了 Lorenz 系统初值取 (1.0, 1.0, 1.0) 时三个变量之间传递熵随控制参数变化. 从图中可以看出, 两两之间的传递熵不存在某个方向的值为零的情况, 即任意一个分量向另外两个分量均有信息传输. 图 1 中, 当 $25.0 \leq r \leq 50.0$ 时, 均有 $T_{y \rightarrow x} > T_{x \rightarrow y}$, 表示信息是从 y 向 x 传输的, 即 y 是信息源, x 是信息汇, y 驱动 x ; y 与 z 分量结果类似, 当 $25.0 \leq r \leq 50.0$ 时, 恒有 $T_{y \rightarrow z} > T_{z \rightarrow y}$, y 是信息源, z 是信息汇, y 驱动 z . 即对于 Lorenz 系统而言, 当 $25.0 \leq r \leq 50.0$ 时, y 分量是信息源, x 和 z 分量是信息汇. $T_{y \rightarrow x} - T_{x \rightarrow y}$ 随 r 的变化是相对稳定的, 而 $T_{y \rightarrow z} - T_{z \rightarrow y}$ 随 r 的变化是有逐渐减小的趋势, 且 $T_{y \rightarrow x} - T_{x \rightarrow y}$ 比 $T_{y \rightarrow z} - T_{z \rightarrow y}$ 大得多, 即从 y 向 x 的净信息传输是相对恒定的, 从 y 向 z 的净信息传输是逐渐减少的, 且从 y 向 x 的净信息输送占据着主要地位. 而 x 与 z 分量之间, 当 $25.0 \leq r \leq 27.5$ 时, 有 x 对 z 的净信息输送, 当 $42.5 \leq r \leq 50.0$ 时, 有 z 对 x 的净信息输送, 但是都比较微弱, 而当

$27.5 < r < 42.5$ 时, $T_{z \rightarrow x} - T_{x \rightarrow z}$ 在 0 左右变化, 即此时已经无法甄别净信息是从 x 向 z 传输还是从 z 向 x 传输, 说明 x 与 z 分量之间的信息传输十分依赖于控制参数 r , 即动力学参数的改变有可能信息传输的方向.

联系 Lorenz 系统的 x, y, z 三个分量的实际物理意义 [20,30], 可以推断出上升流与下降流的温差驱动了对流速度以及垂直方向温度分布的非线性强度, 而对流速度与垂直方向温度分布的非线性强度之间的驱动方向还依赖于控制参数. 这与实际情况也是一致的, 因此基本可以认定, 传递熵可以应用在气象领域进行信息传输方向的判定, 这对于解决气象领域未知的动力学机制是有一定帮助的.

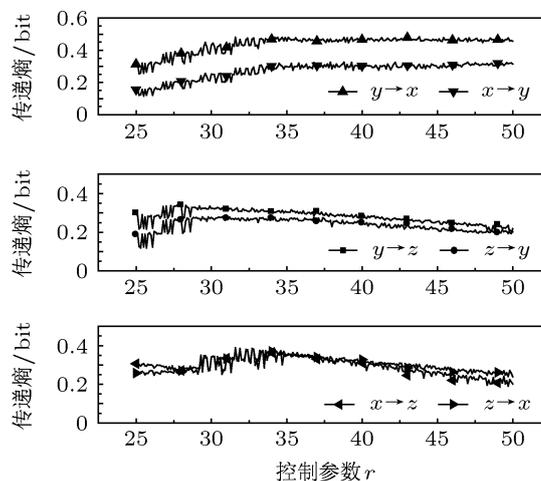


图 1 初值取 (1.0, 1.0, 1.0) 时传递熵随控制参数 r 的变化

3.3 初值对 Lorenz 系统传递熵的影响

相关研究表明, Lorenz 系统具有初值敏感性、短期可预测性、长期不可预测性以及相空间遍历性. 由于混沌系统对初值极其敏感, 随着时间的演化, 初值的微小差异会逐渐被放大, 直至引起系统未来状态的显著不同, 甚至得到完全相反的结果. 因而考察不同初值条件下传递熵随控制参数的变化如图 2. 对比图 2 (a)—(d), 可以发现, 虽然不同初值条件下传递熵的值有微小的差异, 但是没有改变 $T_{y \rightarrow x} - T_{x \rightarrow y}$, $T_{y \rightarrow z} - T_{z \rightarrow y}$, $T_{x \rightarrow z} - T_{z \rightarrow x}$ 的符号, 且传递熵随控制参数 r 的变化趋势也未发生改变, 即没有改变信息传递的方向, 这说明信息传递是系统动力学机制的体现, 与系统的初始状态的不同没有关系, 在动力学机制或者参数没有改变的情况下, 是不能改变信息传递方向的.

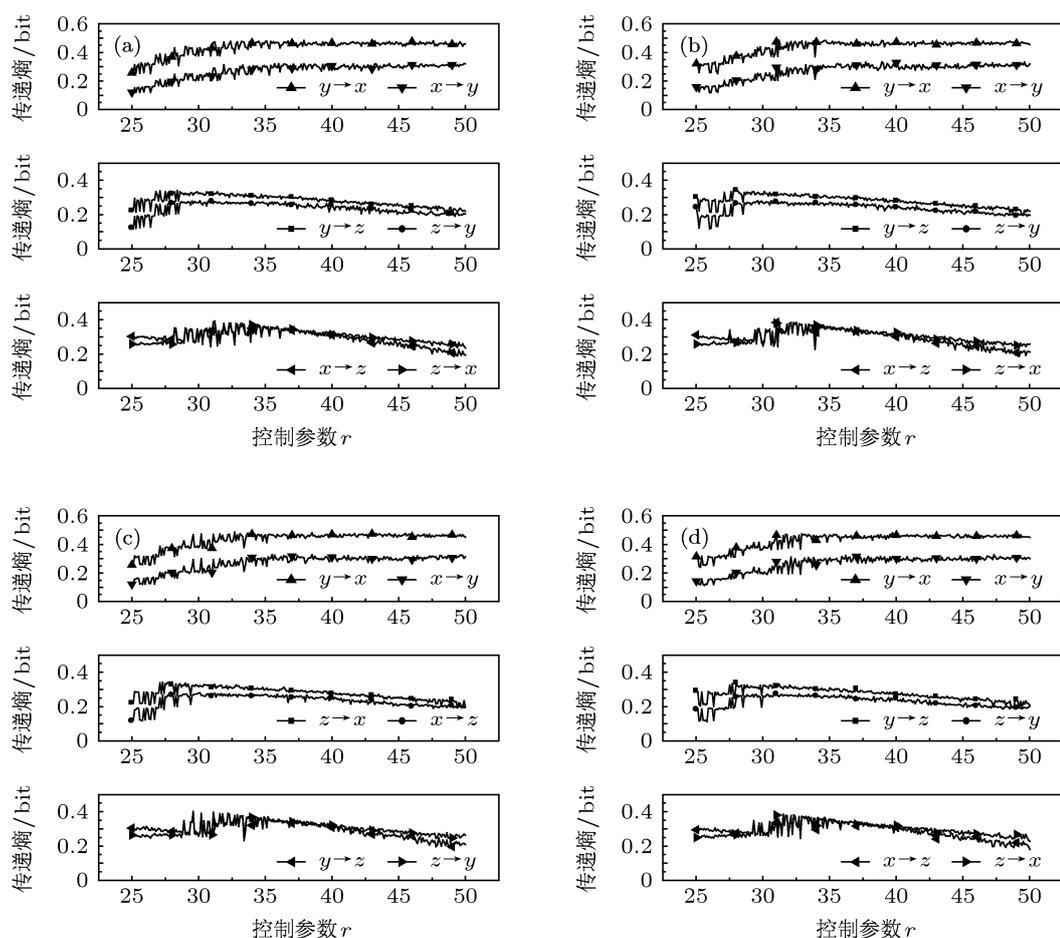


图2 不同初值条件下 Lorenz 系统传递熵随控制参数 r 的变化 (a) (0.5, 0.5, 0.5); (b) (5.0, 5.0, 14.0); (c) (7.0, 7.0, 25.0); (d) (8.0, 8.0, 26.0)

3.4 样本长度对 Lorenz 系统传递熵的影响

从传递熵的定义中不难发现, 传递熵的计算精度依赖于所选时间序列的长度. 但是 Lorenz 系统

传递熵随时间序列长度 L 的变化 (图 3) 指出, 虽然传递熵的值因 L 选取的不同有较大不同, 但是 $T_{y \rightarrow x} - T_{x \rightarrow y}$, $T_{y \rightarrow z} - T_{z \rightarrow y}$, $T_{x \rightarrow z} - T_{z \rightarrow x}$ 的符号仍然没有改变, 这说明传递熵在不同样本长度条件下结果是稳定可靠的, 适用于气象领域数据较短的资料.

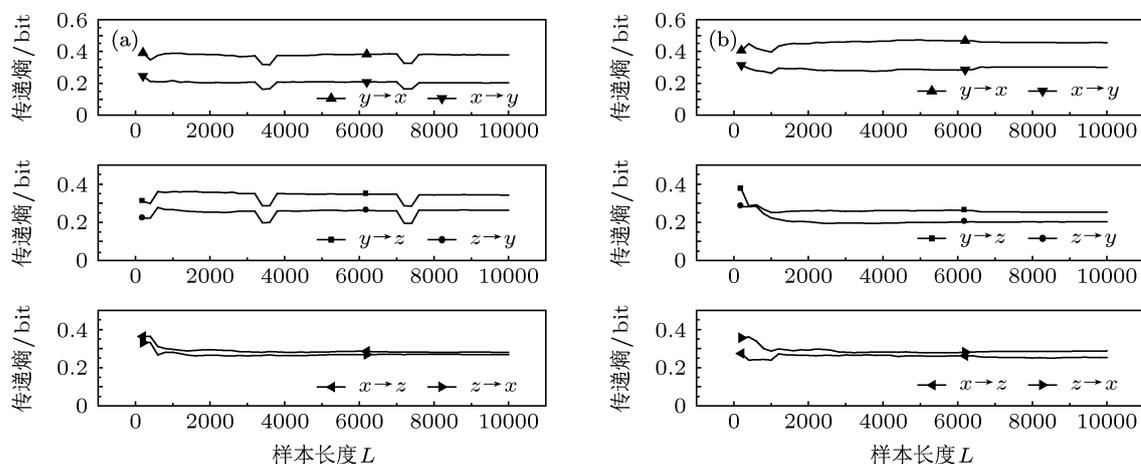


图3 初值取 (1.0, 1.0, 1.0) 时 Lorenz 系统传递熵随样本长度 L 的变化 (a) $r = 28.0$; (b) $r = 45.0$

需要说明的是, 针对 Lorenz 系统, 在初始状态下选定初值, 系统并不是立刻进入混沌状态, 需要随着时间演化逐步进入. 因此, 针对 Lorenz 系统时间序列的选取, 需要将初始的演化期 (或称为暂态) 剔除. 不同控制参数下 Lorenz 系统时间序列 (图略) 显示: 不同控制参数情况下演化期的长短是不一致的, r 越大演化期越短. 为保证所选时间序列均在混沌状态内, 将初始的 10000 步数据剔除 (步长 0.01), 在之后的序列中选取长度为 L 的时间序列参与运算.

4 在气象领域实际数据中的验证: Walker 环流的传递熵特征

前面的研究证实, 在源于大气动力学方程组的 Lorenz 系统中, 能够用传递熵判断出 x, y, z 分量之间的信息传输方向, 即能够用传递熵判断系统内部的相互作用方向. 但是实际数据与理想化的 Lorenz 系统有一定差别, 有必要在实际数据中进行验证.

热带太平洋海表温度呈现“西高东低”的模式,

正常情况下, 热带西太平洋海表温度高, 上空存在一个低气压并对应一支上升气流, 而热带东太平洋海表温度低, 上空存在一个高气压并对应一个下沉气流, 在高层为偏西风, 地面为偏东风, 形成一个闭合环流圈, 即为 Walker 环流. ENSO 作为最强的年际信号, 相关研究^[31-34]表明, 其通过 Walker 环流影响中国地区的气候. 可以利用 NCEP 提供的温度和垂直速度资料基于传递熵方法对其进行验证, 证实传递熵方法在实际资料中的适用性, 为进一步研究 ENSO 信号对中国地区气候的影响机制奠定理论基础.

4.1 基于传递熵对 Walker 环流的验证

图 4 反映了 850 与 700 hPa 之间温差 (850 与 700 hPa 的温度差值, 下文的处理方式相同) 与垂直速度 (850 与 700 hPa 的平均垂直速度, 下文的处理方式相同) 的传递熵分布. 在温差对垂直速度的传递熵分布 (图 4(a)) 中, 陆地上空有极值中心且强度不弱, 西北太平洋上空也有一个极值中心; 而在垂直

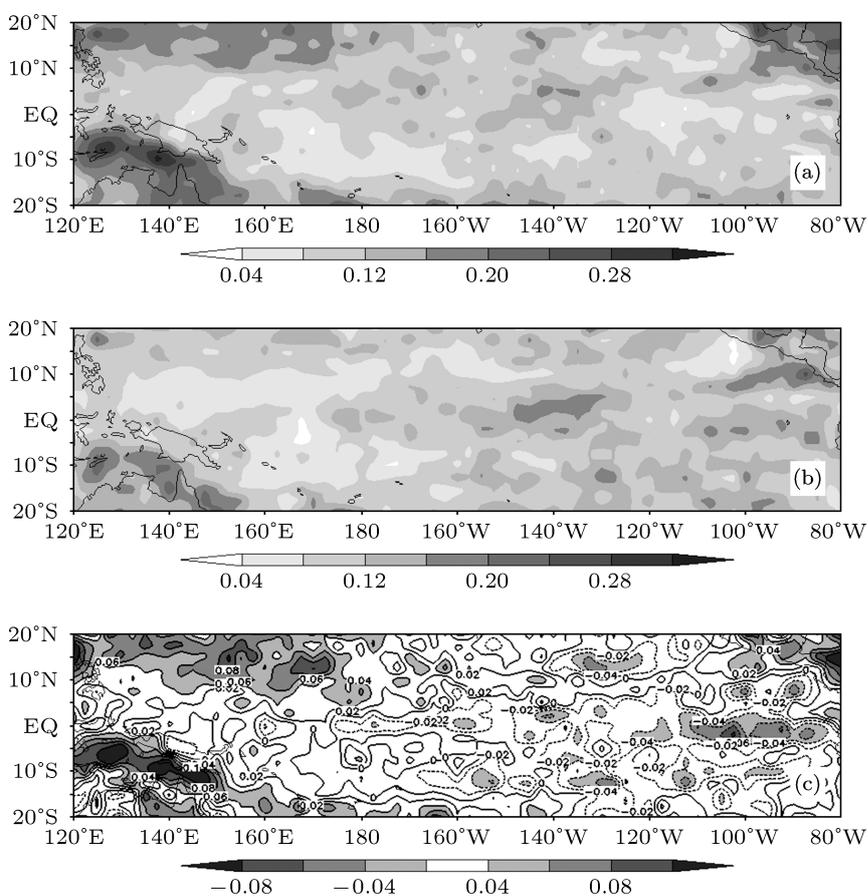


图 4 850 与 700 hPa 之间温差与垂直速度的传递熵 (a) 温差对垂直速度的传递熵; (b) 垂直速度对温差的传递熵; (c) 温差对垂直速度的与垂直速度对温差的传递熵之差 (单位: bit)

速度对温差的传递熵分布(图 4(b))中,陆地上空也有极值中心,但是强度比图 4(a)中对应的偏弱,海洋上的极值则在赤道东太平洋上空.温差对垂直速度的传递熵与垂直速度对温差的传递熵之差的分布(图 4(c))显示:陆地上空有温差对垂直速度的净信息输送正极值区;海洋上,西北太平洋地区有温差对垂直速度的净信息输送正极值区,强度比陆地上空的稍弱,赤道中东太平洋地区有温差对垂直速度的净信息输送负极值区,中心在赤道东太平洋.图 4 中,澳大利亚大陆上空的高值区说明海陆热力差异对温差与垂直速度之间的传递熵分布有较大影响.由于陆地不易储存热量,陆地上空温差变化

比海洋上空大,温差对垂直速度的信息输送占据着主导作用.

700 与 600 hPa 之间温差与垂直速度的传递熵和 600 与 500 hPa 之间温差与垂直速度的传递熵如图 5 和图 6 所示.越到高层传递熵越弱,可能是因为温差与垂直速度的传递熵受海洋热力作用影响比较大,越到高层,热力作用的影响越来越小.另外,越到高层传递熵分布的高值中心的位置也发生了变化.图 5(c)中,西北太平洋的正高值中心消失,赤道外中太平洋的高值区域还存在,赤道东太平洋的负高值中心则移到赤道中太平洋,图 6(c)与图 7(c)的分布特征类似.

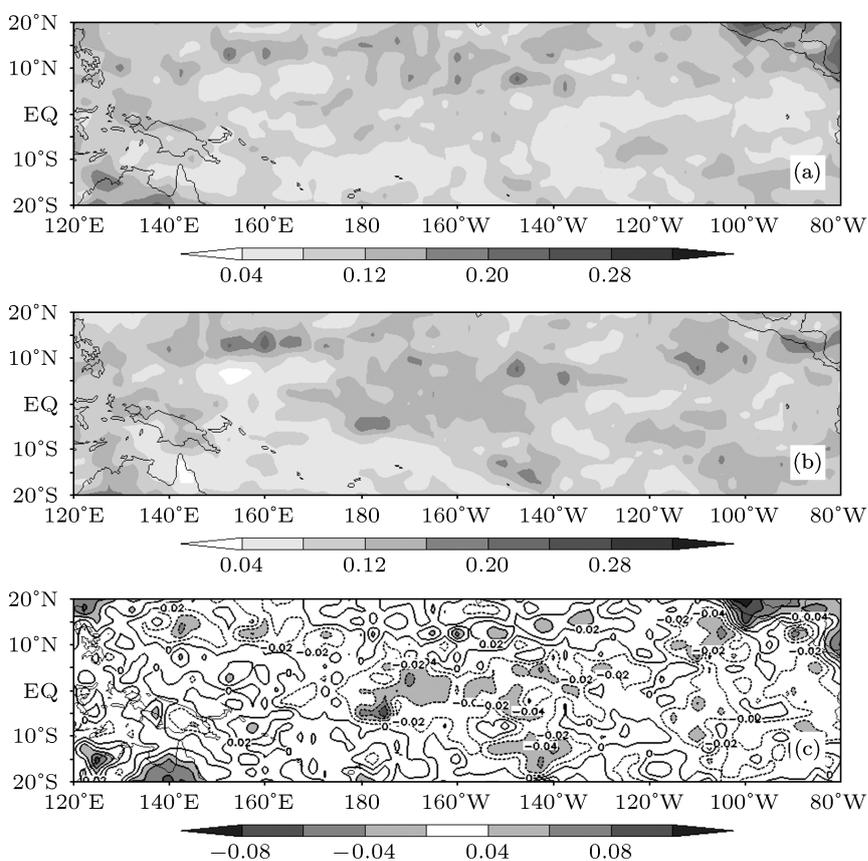


图 5 同图 4, 但为 700 与 600 hPa 之间

图 7(a) 为 1981—2010 年气候态下的 Walker 环流, 60°E—140°E 为上升支, 180—90°W 为下沉支. 图 7(b) 为依据传递熵分析得到的 Walker 环流机制图. 在热带西太平洋地区, 温差向垂直速度传输信息, 在热带东太平洋地区, 垂直速度向温差传输信息, 给出了 Walker 环流的信息传递图像, 是对 Walker 环流的一种新的理解. 同时这与传统观点也是一致的: 即 Walker 环流是一种热力性环流, 它完全是由于热带太平洋东西两侧海洋热力场发生显

著差异的热力强迫而形成的^[27]. 由于热带西太平洋海表温度高, 由于海洋的加热作用影响上空空气, 空气热胀冷缩的热力作用, 驱动空气上升, 而热带东太平洋海表温度低, 上空空气温度低, 密度大, 从西太平洋上空吹过来的空气下沉, 到达海面向西太平洋运动, 形成一个环流. 热带海洋亦是信息源(图略), 海洋的信息通过热力作用传输给大气, 进而影响大气环流. 因此, 从信息角度对 Walker 环流的认识与传统观点是一致的.

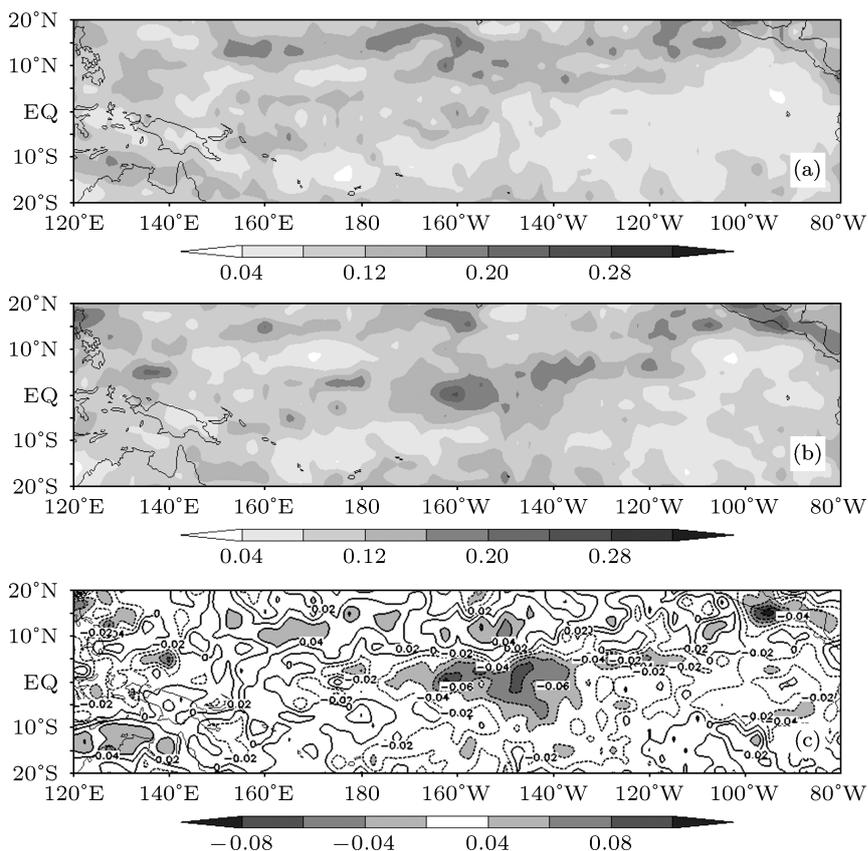


图6 同图4, 但为600与500 hPa之间

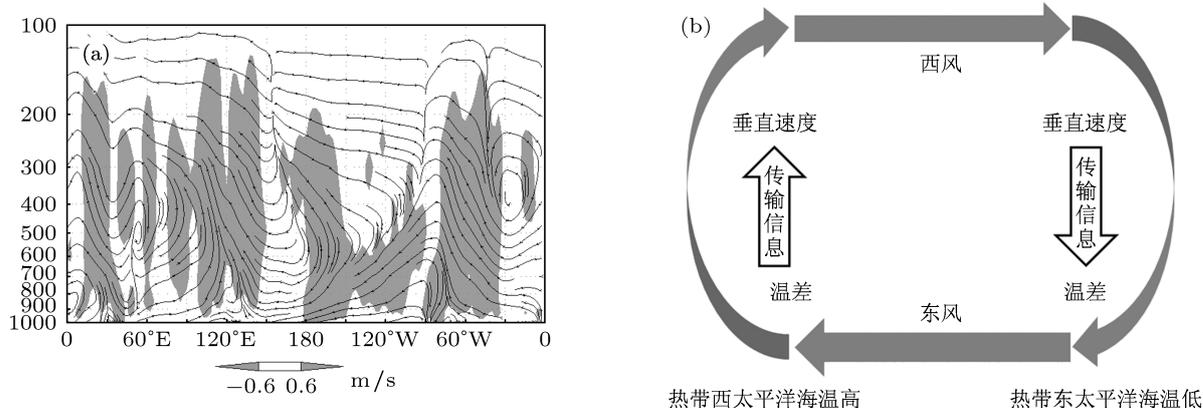


图7 (a) 1981—2010年气候态下的Walker环流(垂直速度 $\times 30$); (b) 基于传递熵分析得到的Walker环流机制图

4.2 不同季节下对 Walker 环流的验证

季节不同, Walker 环流的模态存在显著差异, 对中国地区气候的影响也各不相同^[35]. 针对850与700 hPa之间的温差与垂直速度的传递熵分布, 分析不同季节下的差异.

不同季节下温差对垂直速度的传递熵和垂直速度对温差的传递熵分布差别明显. 冬季(图8(c)), 从120°E的西北太平洋到150°W的赤道太平洋地区均以负值区为主, 负值中心在5°N, 120°W和5°S,

160°W附近, 正值区分布在5°N—15°N, 160°E—120°W区域内, 即冬季是垂直速度向温差的信息输送占据主导地位, 海洋的热力作用起着主要作用. 夏季(图9(c)), 中东太平洋均以负值区为主, 没有明显的负值中心, 西太平洋地区以正值区为主, 10°S, 170°E和5°S, 135°E附近有正值中心, 但是值较小, 春季(图略)与冬季类似, 但是值比冬季要小, 且区域特征比冬季要弱; 秋季(图略)与夏季类似, 同样值偏小, 区域特征偏弱.

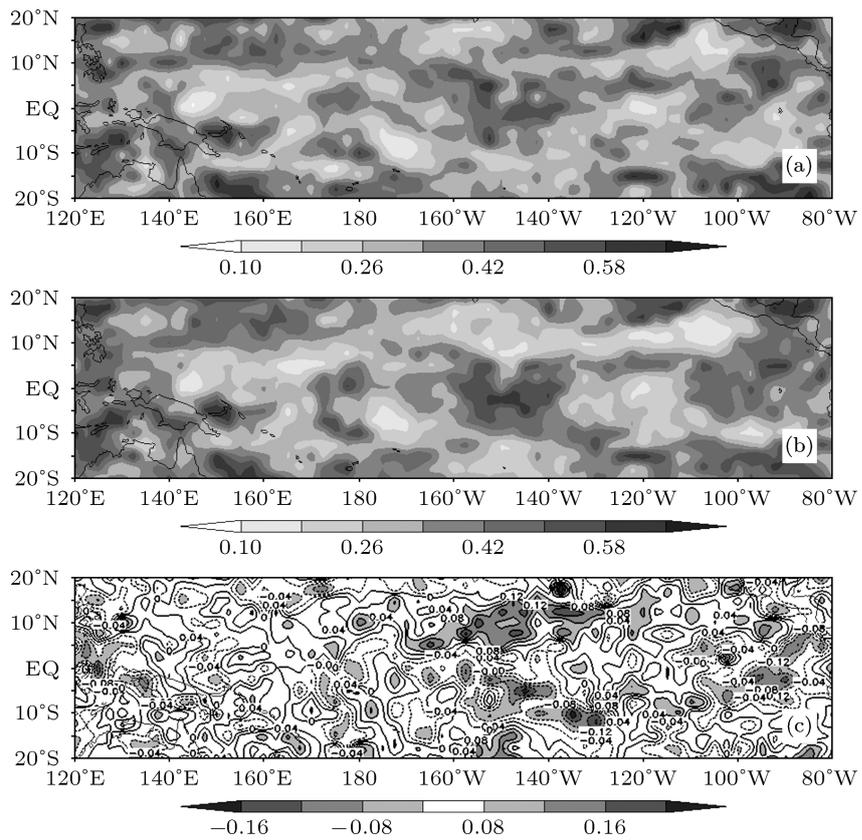


图 8 850 与 700 hPa 之间冬季温差与垂直速度传递熵 (a) 温差对垂直速度的传递熵; (b) 垂直速度对温差的传递熵; (c) 温差对垂直速度的与垂直速度对温差的传递熵之差 (单位: bit)

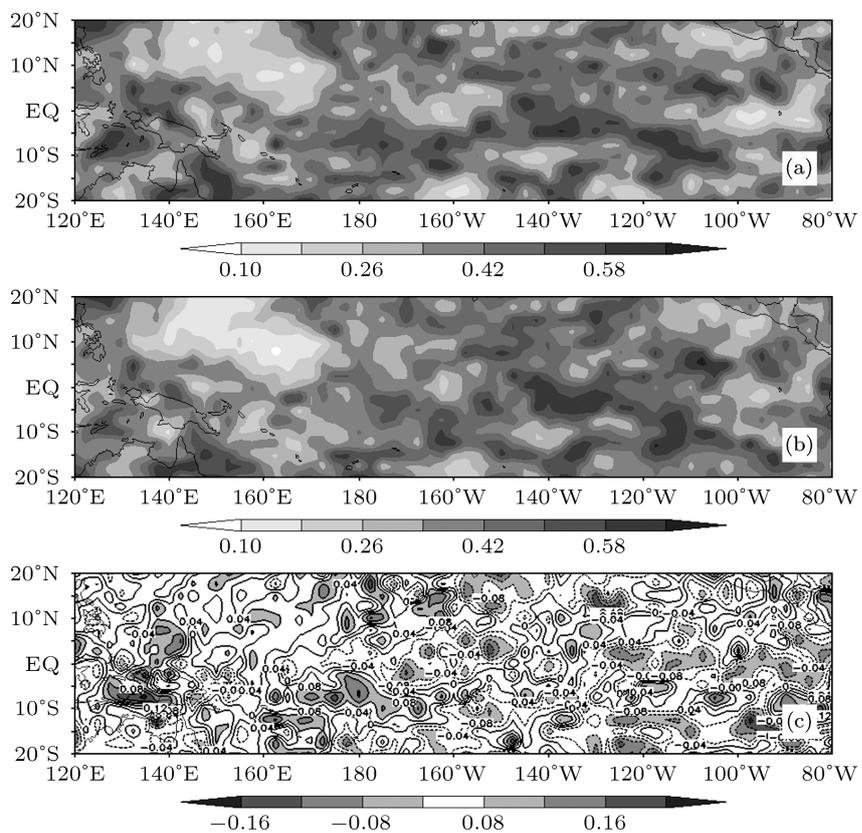


图 9 同图 8, 但为夏季

通过以上分析可以发现: 冬季是垂直速度对温差的净信息输送最强的季节, 夏季是温差对垂直速度的净信息输送最强的季节, 应该在冬季和夏季对相关区域的相关要素加强监测. 总体来说, 冬季是温差与垂直速度之间的信息输送最强季节, 夏季和秋季次之, 春季最弱, 这可能是存在春季预报障碍的原因之一.

5 结论

本文将传递熵作为测量动力学系统信息传递方向的一个工具, 分析 Lorenz 系统 x, y, z 三个分量之间的信息传递方向, 并应用在温差与垂直速度的实际资料中对 Walker 环流进行分析. 研究结果如下:

1) 对于 Lorenz 系统而言, x 与 y 分量之间, 存在着从 y 向 x 的净信息传输, 即 y 是信息源, x 是信息汇, y 驱动 x ; y 与 z 之间, 存在着从 y 向 z 的净信息传输, 即 y 是信息源, z 是信息汇, y 驱动 z ; 且 y 向 x 的净信息传输占据着主导地位, 且随控制参数的变化相对稳定. x 与 z 分量之间的信息传递方向依赖于控制参数 r ; z 与 x 之间, 当 $25.0 \leq r \leq 27.5$ 时, x 是信息源, z 是信息汇, 当 $42.5 \leq r \leq 50.0$ 时, z 是信息源, x 是信息汇;

2) Lorenz 系统 x, y, z 之间的净信息传输方向不

随初值不同而变化, 说明传递熵能够反映动力学系统的基本动力学结构特征, 只有动力学结构或者动力学参数改变的情况, 信息传输方向才会改变;

3) 传递熵方法在数据样本长度较短时也能取得较稳定的结果, 说明传递熵能够应用在气象领域资料长度较短的情况;

4) 在西太平洋地区, 温差对垂直速度的净信息输送占主导地位, 而赤道东太平洋地区则为垂直速度对温差的净信息输送占主导地位, 这是从信息角度对 Walker 环流的认识, 与传统观点中, Walker 环流是由于热带太平洋东西两侧海洋热力差异形成的, 是一致的; 另外, 海陆热力差异对温差与垂直速度之间的信息输送影响较大;

5) 冬季是垂直速度向温差的净信息输送最强的季节, 夏季是温差向垂直速度的净信息输送最强的季节; 冬季是温差与垂直速度之间的信息输送最强季节, 夏季和秋季次之, 春季最弱, 这可能是存在春季预报障碍的原因之一.

以上结论表明, 传递熵能够有效分析出未知动力学系统的基本动力学结构特征. 针对 Walker 环流分析揭示出低层大气在海洋对大气相互作用过程中的重要作用, 以及春季预报障碍存在可能原因之一. 传递熵以及相关的信息理论将对月预测和季节预测提供有力的理论支撑.

- [1] Chou J F 1997 *Bull. Chin. Acad. Sci.* **5** 325 (in Chinese) [丑纪范 1997 中国科学院院刊 **5** 325]
- [2] Feng G L, Dong W J 2003 *Chin. Phys.* **13** 413
- [3] Feng G L, Gong Z Q, Dong W J, Li J P 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 5494 (in Chinese) [封国林, 龚志强, 董文杰, 李建平 2005 物理学报 **54** 5494]
- [4] Feng G L, Dong W J, Gong Z Q, Hou W, Wan S Q, Zhi R 2006 *Non-linear Theories and Methods on Spatial-Temporal Distribution of the Observational Data* (Beijing: Metrological Press) p86 (in Chinese) [封国林, 董文杰, 龚志强, 侯威, 万仕全, 支蓉 2006 观测数据非线性时空分布理论和方法 (北京: 气象出版社) 第 86 页]
- [5] Feng G L, Gao X Q, Dong W J, Li J P 2008 *Chaos Soliton. Fract.* **37** 487
- [6] Feng G L, Gong Z Q, Zhi R, Zhang D Q 2008 *Chin. Phys. B* **17** 2745
- [7] Li J P, Gao L 2006 *J. Atmos. Sci.* **30** 834 (in Chinese) [李建平, 高丽 2006 大气科学 **30** 834]
- [8] Li J P, Wang X L 2003 *Adv. Atmos. Sci.* **20** 661
- [9] Li J P, Chou J F 1997 *Acta Meteor. Sin.* **11** 57
- [10] Li J P, Zeng Q C, Chou J F 2000 *Sci. China E* **30** 550 (in Chinese) [李建平, 曾庆存, 丑纪范 2000 中国科学 (E 辑) **30** 550]
- [11] Dai X G, Wang P, Chou J F 2004 *Proc. Nat. Sci.* **14** 73
- [12] Gong Z Q, Zhou L, Zhi R, Feng G L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 5351 (in Chinese) [龚志强, 周磊, 支蓉, 封国林 2008 物理学报 **57** 5351]
- [13] Kullback S 1959 *Information Theory and Statistics* (New York: Wiley) p126
- [14] Schreiber T 2000 *Phys. Rev. Lett.* **85** 461
- [15] Verdes P F 2005 *Phys. Rev. E* **72** 026222
- [16] Liang X S, Kleeman R 2005 *Phys. Rev. Lett.* **95** 244101
- [17] Andrew J M, John H 2007 *Proc. Natl. Acad. Sci.* **104** 9558
- [18] Kleeman R 2007 *J. Atmos. Sci.* **64** 1005
- [19] Materassi M, Wernik A, Yordanova E 2007 *NPG* **14** 153
- [20] Lorenz E N 1963 *J. Atmos.* **20** 130
- [21] Li A B, Zhang L F, Xiang J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 119202 (in Chinese) [黎爱兵, 张立凤, 项杰 2012 物理学报 **61** 119202]
- [22] Sikka D R, Gadgil S 1980 *Mon. Wea. Rev.* **108** 1840
- [23] Christiansen B 2003 *J. Clim.* **16** 3681
- [24] Walker G T 1923 *Mem. Indian Meteor. Dept.* **24** 75
- [25] Walker G T 1924 *Mem. Indian Meteor. Dept.* **24** 275
- [26] Walker G T, Bliss E W 1932 *V. Mem. Roy Met. Soc.* **4** 53
- [27] Bjerknes J 1969 *Mon. Wea. Rev.* **97** 163
- [28] Rasmusson E M, Carpenter T H 1982 *Mon. Wea. Rev.* **110** 354
- [29] Bo Y Q, Wu H B 2008 *Science and Technology Innovation Herald* **31** 5 (in Chinese) [薄燕青, 吴洪宝 2008 科技创新导报 **31** 5]
- [30] Lorenz E N 1976 *Quart. Res.* **6** 495

- [31] Li C H, Wang D X, Liang J Y 2006 *Chin. Sci. Bull.* **51** 596 (in Chinese) [李春晖, 王东晓, 梁建茵 2006 科学通报 **51** 596]
 [32] Zhang Q Y, Wang Y 2006 *Clim. Environ. Res.* **11** 487 (in Chinese) [张庆云, 王媛 2006 气候与环境研究 **11** 487]
 [33] Xu W C, Ma J S, Wang W 2005 *Scientia Meteorol. Sin.* **25** 212 (in Chinese) [许武成, 马劲松, 王文 2005 气象科学 **25** 212]
 [34] Chan J C L 1985 *Mon. Wea. Rev.* **113** 599
 [35] Ge X Y, Zhou X Q, Jiang S C 2002 *J. Tropical Meteorol.* **18** 182 (in Chinese) [葛旭阳, 周霞琼, 蒋尚城 2002 热带气象学报 **18** 182]

Analysis of the direction of information transfer of Lorenz system and Walker circulation with transfer entropy*

Zhang Zhi-Sen¹⁾ Gong Zhi-Qiang^{2)†} Zhi Rong²⁾

1) (Department of Atmospheric and Sciences, Lanzhou University, Lanzhou 730000, China)

2) (National Climate Center, Beijing 100081, China)

(Received 7 December 2012; revised manuscript received 20 February 2013)

Abstract

By the transfer entropy method, in this article we analyze the transfer of information between x , y , z component of Lorenz system and Walker circulation with temperature difference and vertical velocity. It is found that y is the information source and x is the information sink between x and y component of Lorenz system, also y is the information source and z is the information sink between x and z component. But the direction of information transfer depends on the control parameter r between x and z component, even if the direction of information transfer between x , y and z component of Lorenz system does not vary when the initial value changes. In western Pacific, the information transfers from the temperature difference to the vertical velocity, while the information transfers from the vertical velocity to the temperature difference in the eastern equatorial Pacific, which is consistent with the physical mechanism of Walker circulation. And land-sea thermal plays an important role in the information transfer between temperature difference and vertical velocity. In winter, the information transfer between temperature difference and vertical velocity is strongest, in summer and autumn it is weaker, and in spring it is weakest, which may be the reasons of spring predictability barrier. These results suggest that transfer entropy is proved to be an effective method and tool of measuring the transfer direction of the kinetic system information, and has broad application prospects in the field of meteorology.

Keywords: transfer entropy, information transfer, Lorenz system, walker circulation

PACS: 92.60.Wc, 92.70.Gt

DOI: 10.7498/aps.62.129203

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 41175067, 41205040), the National Basic Research Program of China (Grant Nos. 2013CB430204, 2012CB955902), and the Special Scientific Research Fund of Public Welfare Profession of China (Grant No. GYHY201106016).

† Corresponding author. E-mail: gzq0929@126.com