

周玉淑, 李娜, 孙明生. 2014. 广义 Ertel-Rossby 不变量在北京“7.21”暴雨过程分析中的应用 [J]. 气候与环境研究, 19 (3): 303–310, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13010. Zhou Yushu, Li Na, Sun Mingsheng. 2014. Application of generalized Ertel–Rossby invariant to the heavy rainfall case on 21 Jul 2012 in Beijing [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 19 (3): 303–310.

广义 Ertel-Rossby 不变量在北京“7.21”暴雨过程分析中的应用

周玉淑¹ 李娜^{1,2} 孙明生^{3,4}

1 中国科学院大气物理研究所, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100040

3 北京军区空军气象中心, 北京 100061

4 中国气象科学研究院灾害天气国家重点实验室, 北京 100081

摘要 在绝热无摩擦大气中, 具有守恒性及可反演性的 Ertel 位涡 (PV) 在大尺度天气系统分析中有广泛应用。由于忽略了力管项的作用, PV 用于分析中小尺度天气系统演变时受到局限。从广义速度推导得到的广义 Ertel-Rossby 不变量 (GERI) 除了包含有 PV 的守恒性, 还包含了螺旋度效应及力管项的作用, 对于分析研究快变流型的中小尺度系统演变有一定优势。用 GERI 分析 2012 年 7 月 21 日北京地区的特大暴雨过程, 表明 GERI 在暴雨区有明显的异常出现, 其异常基本与暴雨出现时间同位相, 表明 GERI 的定义涵盖了螺旋度和 PV, 也包含了暴雨发生时的旋转斜压大气的力管项效应, 确实能体现暴雨过程中的流型快变的特点, 可以作为独立的变量来分析和揭示造成暴雨的低涡系统的动力结构, 为诊断和预报暴雨落区提供新的动力物理量。

关键词 广义 Ertel-Rossby 不变量 快变流 暴雨 动力结构

文章编号 1006-9585 (2014) 03-0303-08

中图分类号 P433

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2013.13010

Application of Generalized Ertel–Rossby Invariant to the Heavy Rainfall Case on 21 Jul 2012 in Beijing

ZHOU Yushu¹, LI Na^{1,2}, and SUN Mingsheng^{3,4}

1 Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100040

3 Meteorological Center, Air Force of Beijing Military Region, Beijing 100061

4 State Key Laboratory of Severe Weather, Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

Abstract For large-scale weather systems, Ertel potential vorticity (PV) is a very useful quantity because of its properties of material conservation and invertibility for an adiabatic frictionless flow. However, for meso- or small-scale systems, applications of PV are limited because the baroclinic solenoid term, which characterizes baroclinicity of the atmosphere, is removed in PV. An alternative invariant is the generalized Ertel–Rossby invariant (GERI), which is derived from generalized velocity. GERI not only keeps the property of conservation but also includes helicity and the baroclinic solenoidal term, making it more suitable for analyzing evolutions of meso- and small-scale weather systems. In this study,

收稿日期 2013-01-04 收到, 2013-03-13 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展计划项目 2014CB441402, 国家自然科学基金项目 41275065、41075044、41075079, 灾害天气国家重点实验室开放课题 2012lasw-B07LASW

作者简介 周玉淑, 女, 1971 年出生, 博士, 主要从事中尺度气象学研究。E-mail: zys@mail.iap.ac.cn

the authors apply GERI to analyze an extreme heavy rainfall case that occurred in Beijing on 21 Jul 2012. It is showed that GERI exhibits large anomalies, having nearly the same phase as the appearance of the heavy precipitation region. It is concluded that GERI makes it possible to characterize fast mode properties during heavy rainfall because of the important physical information it contains, i.e., helicity, PV, and the effect of the solenoidal term. Therefore, GERI can be used to analyze and reveal the dynamical structure of the lower vortex that induces heavy rainfall, and provides a new dynamical quantity for diagnosing and forecasting regions of heavy precipitation.

Keywords Generalized Ertel-Rossby invariant, Fast-manifold condition, Torrential rain, Dynamical structure

1 引言

Ertel 位涡 (PV) 自提出以来 (Rossby, 1936; Ertel and Rossby, 1949), 由于具有守恒性和可反演性, 在分析大气运动及相应的动力过程中得到了广泛应用, 如: 研究二维层结流体的运动特点和绝热过程中垂直运动造成的自旋增强 (spin-up) 和自旋减弱 (spin-down) 现象; 理解二维准水平大气运动的平流过程等 (Uccellini et al., 1985; Hoskins and Berrisford, 1988; Hoskins, 1997; Holton, 2004)。但由于 PV 的可反演性建立在“慢流型” (slow-manifold) 的基础上 (Hoskins et al., 1985), 这个条件一般是在重力波或者惯性—重力波不存在或者被平滑掉的情况下成立 (McIntyre and Norton, 1991), 这个假设条件在暴雨过程发生时并不能满足。所以尽管用 PV 分析暴雨及台风等天气系统的例子很多 (王建中等, 1996; Schubert et al., 1999; Chen et al., 2003; 寿绍文, 2010; Yu et al., 2010), 但暴雨过程一般都是快变流型, PV 的应用存在局限。因此, 有必要研究是否有类似于 PV 的物理量, 具有守恒性, 同时也可以用于快变流型 (如暴雨) 等的分析中。利用韦伯变换和拉格朗日方程, Ertel and Rossby (1949) 从 PV 定义中推导得到了斜压大气中的 Ertel-Rossby 不变量, 这个不变量可用于分析快变流型中系统的演变, 但不能用于旋转流体, 仍然存在局限。Zdunkowski and Bott (2003) 通过韦伯变换得到了非旋转斜压大气的 Ertel-Rossby 不变量的表达式, 但是并没有给出具体的推导过程。而且, Ertel and Rossby (1949) 和 Zdunkowski and Bott (2003) 的研究中只涉及到数学变换, 还没有具体的物理意义解释。Gao et al. (2012) 通过 Clebsch 变换, 从运动方程得到广义速度方程, 在此基础上定义了一个新的示踪函数。通过这个示踪函数, 在旋转斜压大气中得到了一个新的不变量, 称为广义 Ertel-Rossby 不变量 (GERI)。理论上, 这

个新的 GERI 可以同时描述慢变流型及快变流型的变化, 在实际应用中更具有普遍性, 可用来表示大尺度及中尺度天气系统发展演变的动力结构。虽然 GERI 具有明确的物理意义, 但是 Gao et al. (2012) 的研究也只是给出了理论推导, 并没有具体应用到实际天气系统的快变流型的分析中, 不能证实这个变量在实际天气分析中是否真的适用。本文在介绍 GERI 的基础上, 具体分析 GERI 在实际暴雨过程中的异常及其分布, 以验证 GERI 是否可以指示流型快变的暴雨系统的动力结构, 以及是否可以用 GERI 来分析暴雨过程并诊断及预报暴雨落区。

2 广义 Ertel-Rossby 不变量 (GERI) 简介

由于 GERI 是一个新的不变量, 本文在应用它分析暴雨系统发展演变的同时, 有必要先简单介绍 GERI 的意义。忽略摩擦作用的大气运动方程可写为:

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} + \frac{1}{\rho} \nabla p + \mathbf{g}\mathbf{k} = 0, \quad (1)$$

其中, \mathbf{V} 为气块运动速度, $\boldsymbol{\Omega}$ 为地球自转角速度, \mathbf{g} 为重力加速度, \mathbf{k} 为沿着地球半径方向的单位矢量, p 为气压, ρ 为空气密度。引入熵的概念:

$$S = c_p \ln \theta + C, \quad (2)$$

其中, c_p 为定压比热, C 为常数。对公式 (2) 取拉普拉斯运算并代入公式 (1), 则运动方程转化为

$$\frac{d\mathbf{V}}{dt} + 2\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{V} - T \nabla S + \nabla H + \nabla \phi = 0, \quad (3)$$

其中, T 为温度, $H=c_p T$ 为焓, ϕ 为位势高度。对公式 (3) 取叉乘后可得:

$$\frac{d(\xi_a / \rho)}{dt} = \left(\frac{\xi_a}{\rho} \right) \cdot \nabla \mathbf{V} - \frac{\nabla T \times \nabla S}{\rho}, \quad (4)$$

其中, ξ_a 为绝对涡度。对于斜压大气, 定义 $\xi_g = \xi_a - \nabla \eta \times \nabla S$ 为广义涡度, η 为温度的拉格朗日积分, 满足 $d\eta/dt = T$ 。则方程 (4) 可化为

$$\frac{d(\xi_g / \rho)}{dt} = \left(\frac{\xi_g}{\rho} \right) \cdot \nabla V, \quad (5)$$

此方程被称为广义涡度方程。在大气满足 $dS/dt=0$ 的条件下, 由公式 (5) 最终可推得[具体推导过程见 Gao et al. (2012)]:

$$\frac{d[(\xi_g / \rho) \cdot \nabla \lambda]}{dt} = \left(\frac{\xi_g}{\rho} \right) \cdot \nabla \frac{d\lambda}{dt}, \quad (6)$$

其中, λ 就是任意的示踪函数。若取示踪函数 λ 为大气的熵 (S), 从公式 (6) 可得在大气研究中有重要应用的不变量一位涡 ($PV = \xi_a \cdot \nabla S / \rho$)。因此, 公式 (6) 中 λ 取不同的值, 可得到不同的不变量。利用 Clebsch 变换, Seliger and Whitham (1968) 把速度写为

$$V = \nabla \Phi + \eta \nabla S + \alpha \nabla \beta, \quad (7)$$

其中, Φ 、 α 和 β 都是拉格朗日积分函数, η 是温度 T 的时间积分。Gao et al. (2012) 把这一变换引入到旋转流体中, 定义绝对速度 V_a , 即: $V_a = V + V_e = V + \Omega \times r$ (V_e 是地球旋转的牵连速度), 最终可得:

$$\frac{dV_a}{dt} = \nabla \frac{d\Phi}{dt} + T \nabla S - \frac{1}{2} (V_a^2 - V_e^2) + V \times \Phi, \quad (8)$$

由于

$$\frac{d\Phi}{dt} = \frac{1}{2} (V_a^2 - V_e^2) - H - \phi, \quad (9)$$

而 $d\{[(\xi + 2\Omega - \nabla \eta \times \nabla S)/\rho] \cdot \alpha \nabla \beta\}/dt = \alpha[(\xi + 2\Omega - \nabla \eta \times \nabla S)/\rho] \nabla (d\beta/dt) = 0$ (ξ 为相对涡度), 因此, 可得到一个新的不变量:

$$d(\xi_g \cdot V_g / \rho)/dt = 0, \quad (10)$$

公式 (10) 中的 $\xi_g \cdot V_g / \rho$ 就是广义 Ertel–Rossby 不变量 (GERI)。 $\xi_g = \xi_a - \nabla \eta \times \nabla S$ 是广义涡度, $V_g = \alpha \nabla \beta = V_a - \nabla \Phi - \eta \nabla S$ 是广义速度。

对于无旋流体, $GERI = [(\xi + 2\Omega - \nabla \eta \times \nabla S)/\rho] \cdot (V_a - \nabla \Phi - \eta \nabla S)$ 转化为 $[(\xi - \nabla \eta \times \nabla S)/\rho] \cdot (V - \nabla \Phi - \eta \nabla S)$, 这就是传统的 Ertel–Rossby 不变量 (ERI)。除了有螺旋度效应及力管效应外, 位涡 PV 的表达式也包含在 ERI 中 (高守亭等, 2012)。因此, PV 在绝热无摩擦条件下的守恒性也包含在 GERI 中。因此, GERI 包含了 ERI 和 PV 的性质, 可用于旋转和非旋转大气中, 适用性更广泛。

从理论上来说, 由于 GERI 可以同时描述慢变流型及快变流型的变化, 在实际应用中更具有普遍性, 可用来分析大尺度及中尺度天气系统发展演变

的动力结构。因此, 本文就用这个新的不变量对暴雨天气过程进行诊断分析, 以验证 GERI 在实际天气分析中是否真的适用。文中分析所用的资料包括 NCEP/NCAR 的 0.5° (纬度) $\times 0.5^\circ$ (经度) 时间间隔为 6 h 的分析资料, 中国气象局提供的全国 6 h 累积实况降雨量。

3 北京“7.21”暴雨过程及天气形势简介

2012 年 7 月 21 日, 京津冀及山西北部等地区出现历史罕见暴雨天气, 部分地区降雨量突破历史纪录, 北京西南部、天津中部、河北保定、廊坊和唐山等地降雨量达 $260 \sim 541$ mm。此次强降雨过程, 北京市平均降雨量 170 mm, 城区平均降雨量 215 mm, 全市 86% 以上的面积降雨量超过 100 mm, 气象台站观测的最大降雨量为河北固安的 364 mm, 水文站观测最大降雨量出现在北京西南部房山区河北镇, 达到 460 mm。暴雨造成的局部洪水历史罕见, 是北京地区自 1951 年有气象观测记录以来最强的一次降水天气过程。本文拟分析这次暴雨过程中 GERI 的分布及演变, 以研究 GERI 对暴雨天气分析的能力, 实现 GERI 在实际天气个例分析中的应用。

暴雨前期 [20 日 08:00 (北京时间, 下同) 至 21 日 02:00], 500 hPa 天气图上 (图略), 西风槽槽线位于贝加尔湖附近, 切断低压的中心也在贝加尔湖, 并向东南方向缓慢移动, 副热带高压逐渐北抬, 北端由 33°N 北抬至 36°N , 与此同时, 位于河套西部的低槽东移发展 (图略), 形成了华北暴雨典型的“东高西低”天气形势。暴雨临近时的 21 日 08:00

(见图 1), 贝加尔湖附近的低涡主槽与河套西部东移发展的低槽合并, 槽前存在大范围 ($35^\circ\text{N} \sim 50^\circ\text{N}$, $105^\circ\text{E} \sim 120^\circ\text{E}$) 的西南气流, 其温度露点差小于 1.8°C 。北京、天津及河北北部都受强盛的西南暖湿气流及暖式切变线影响。之后, 低槽东移, 至 22 日 02:00 槽移至 114°E , 槽前气流由西南气流逐渐转为偏西气流, 22 日 08:00 槽线移过北京。

700 hPa 图上, 在暴雨前期的 20 日 08:00 至 21 日 02:00 (图略), 河套西部的低槽向东北方向移动, 并在槽前逐渐建立起偏南风暖湿空气输送通道。暴雨临近时 (21 日 08:00), 河套西部低槽继续东移并强烈发展为低涡, 中心位于 (39°N , 110°E) 附近,

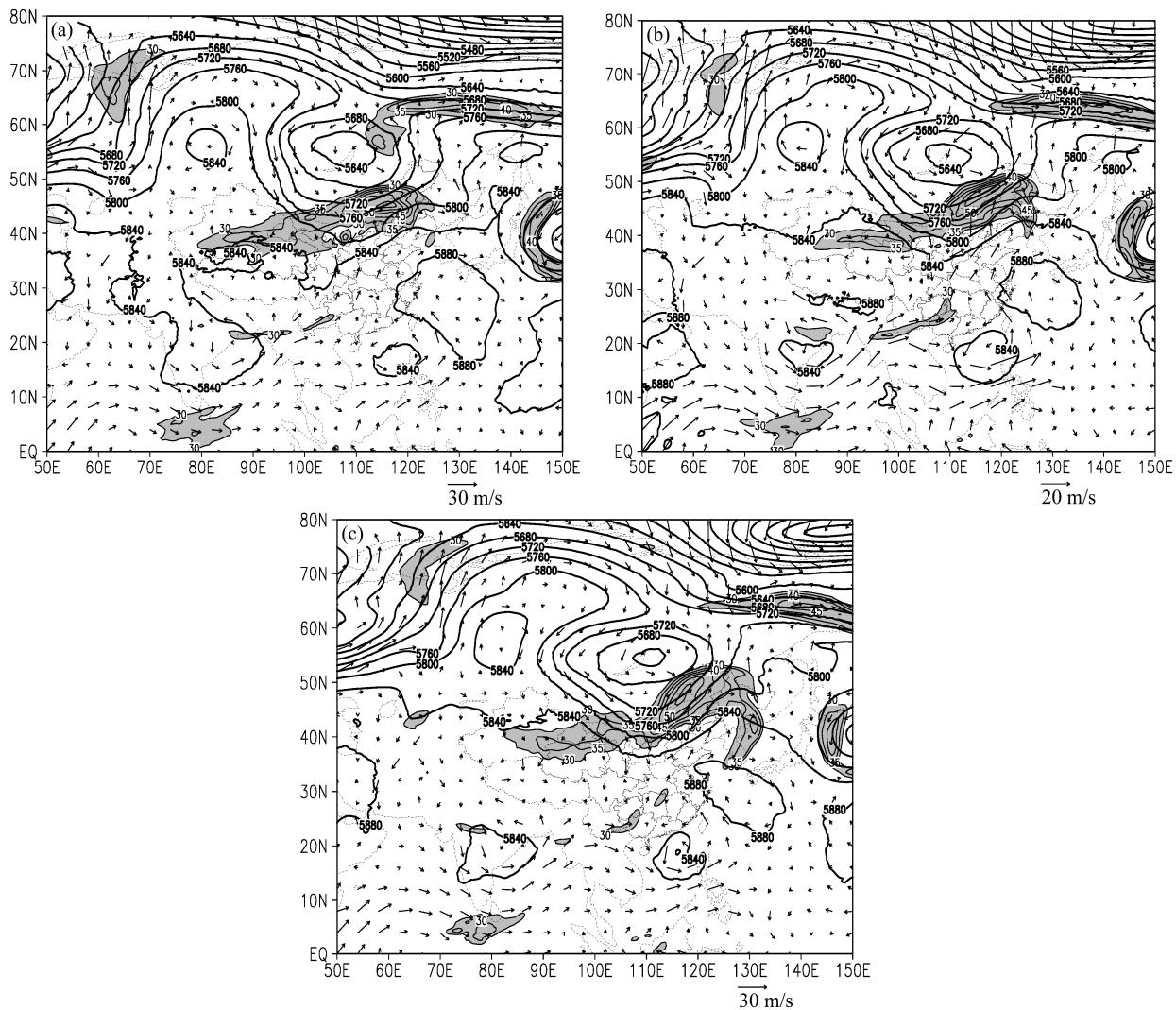


图 1 500 hPa 位势高度（粗等值线，单位: dagpm）、700 hPa 风场（矢量箭头）以及 200 hPa 风速大于 30 m/s（阴影区及细等值线，单位: m/s）的分布: (a) 2012 年 7 月 21 日 08:00; (b) 2012 年 7 月 21 日 14:00; (c) 2012 年 7 月 21 日 20:00

Fig. 1 Horizontal distributions of geopotential height (thick contour, units: dagpm) at 500 hPa, wind fields (arrow) at 700 hPa, and wind speed greater than 30 m/s (shading and thin contour, units: m/s) at 200 hPa: (a) 0800 LST 21 Jul 2012; (b) 1400 LST 21 Jul 2012; (c) 2000 LST 21 Jul 2012

低涡槽前存在着风速达 16 m/s 的西南急流，急流中心和高湿中心位于北京上游的太原，温度露点差小于 2 °C，水汽非常充沛，空气湿度基本达到饱和，北京处于暖式切变线附近。200 hPa 等压面上有高空急流东移加强。21 日 08:00，急流核从内蒙古西部向东延伸到东北地区上空，急流中心已移至北京偏北及内蒙中东部，北京处于急流的出口区（图 1 中阴影区），高空有明显的辐散气流，且高空辐散随时间加强。

暴雨开始阶段（21 日 14:00，图 1b），河套附近的低涡继续东移发展，中心位于山西大同附近（40°N, 113°E），低涡和槽前暖湿急流进一步增强，其前沿已伸至东北地区（46°N, 120°E）附近，北

京上游地区空气已接近饱和（太原—张家口一线温度露点差达到 1.2~1.4 °C），北京仍处于暖式切变线附近。最强降水时段（21 日 14:00 至 20:00，见图 1c），700 hPa 上低涡逐渐移至河北保定到北京附近，急流进一步增强，北京地区西南风达到 20 m/s，为急流中心。22 日 02:00，北京地区因低涡减弱逐渐移出而转为西北气流控制，降水逐渐结束。

地面天气形势与 700 hPa 有较好的对应。表现为倒槽内冷锋锋生和东移、气旋生成及气旋减弱移出的过程（图略）。概略地说，500 hPa 副热带高压北抬，贝加尔湖低涡及低槽向东南移动，为强降水提供了宽广和深厚的暖湿空气输送；700 hPa 河套低槽东移发展和低涡生成以及中低空明显的西南

暖湿急流带来的较强的低层辐合以及低层辐合高层辐散引起的强烈上升运动, 低空充沛的水汽供应, 为北京地区特大暴雨天气过程提供了有利的大尺度环流背景。

4 GERI 在北京“7.21”暴雨过程中的分析

由于 GERI 定义中包含有位涡的信息, 类似于位涡分析, 首先来看暴雨过程中 GERI 的演变是否能反映属于快变流行的暴雨系统的演变。图 2 是 7 月 21 日 08:00、14:00 及 20:00 的 700 hPa 等压面 GERI 与水平风矢量场分布。从图 2 可见, GERI 的

异常区域与风场上的辐合区基本一致, 都是在水平风场出现明显辐合和旋转的区域才有 GERI 的异常区出现, 尤其是在 14:00 和 20:00, GERI 分布与 700 hPa 上低槽东移并发展加强为低涡的位置基本一致(图 2b 和 2c), 且 GERI 的强度也随着低涡的加强而加强, 说明 GERI 确实能反映出暴雨低涡系统的强度变化, 可以作为新的变量来诊断分析暴雨系统的动力结构。

图 3 是 7 月 21 日 14:00 700 hPa 的 GERI 与 6 h 累积降水的分布。这个时刻北京的大暴雨处于开始阶段, 从降水分布来看, 主雨带处于北京以西, 主要降水区位于山西、内蒙及河北西部。从对应 GERI 的分布来看, 其异常大值区也位于山西、内蒙及河

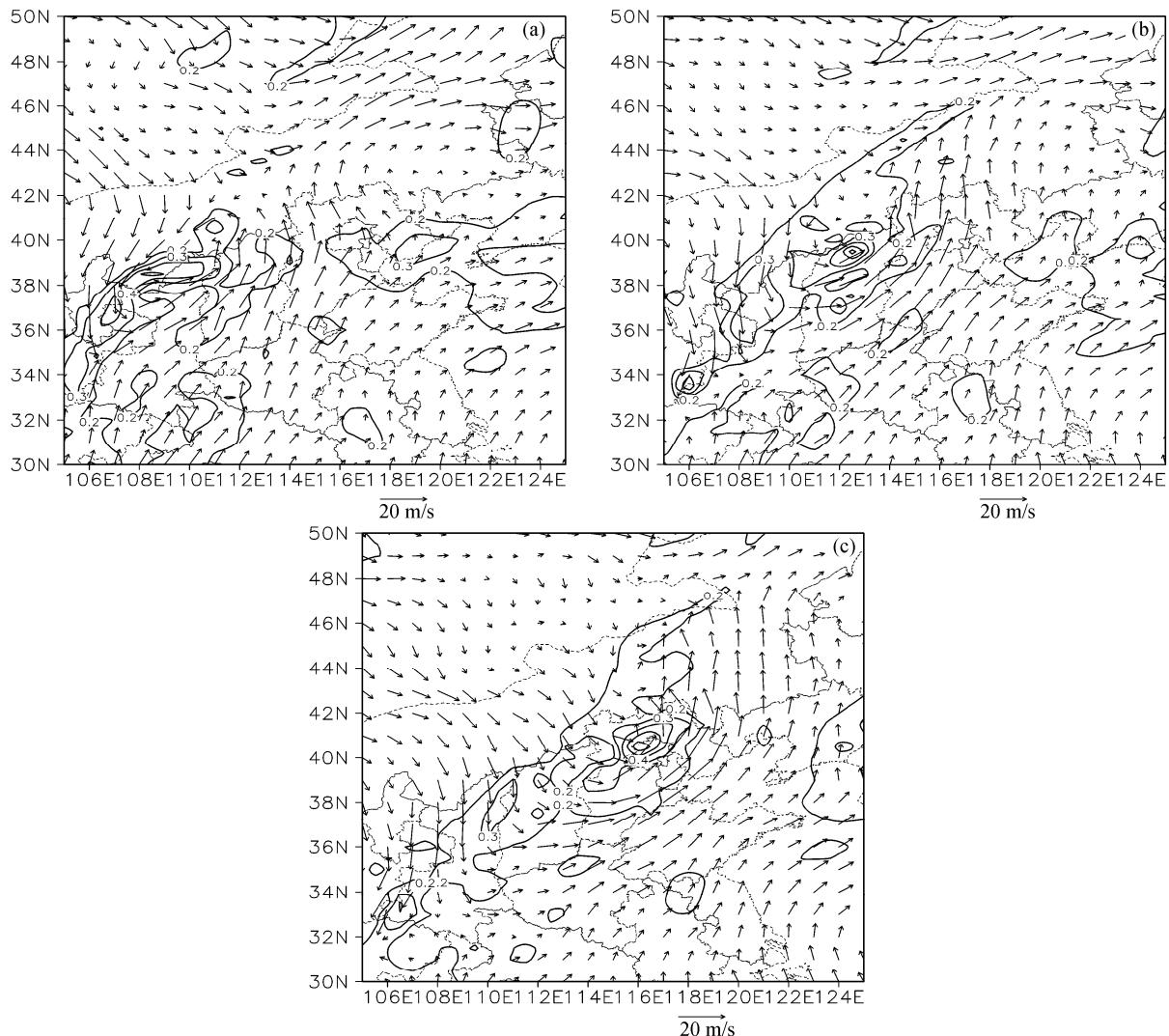


图 2 700 hPa 等压面上 GERI (等值线, 单位: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) 和水平风矢量 (矢量箭头) 分布: (a) 2012 年 7 月 21 日 08:00; (b) 2012 年 7 月 21 日 14:00; (c) 2012 年 7 月 21 日 20:00

Fig. 2 Horizontal distributions of GERI (Generalized Ertel-Rossby Invariant) (contour, units: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) and horizontal wind vectors (arrow) at 700 hPa: (a) 0800 LST 21 Jul 2012; (b) 1400 LST 21 Jul 2012; (c) 2000 LST 21 Jul 2012

北交界的河套附近，走向与主雨带是一致的。GERI 中心值与暴雨区在陕西界内没有重合，是因为 GREI 是一个瞬时量，而降水量是累积量，两个变量在时间上没有完全对应。而且一个动力变量也不可能囊括出一次大暴雨的全部原因，能抓住暴雨发生的主要动力过程就可以认为用这个变量反映暴雨过程是有效的。

图 4 是 7 月 21 日 20:00 700 hPa GERI 与 6 h 累积降水的分布。下午 14:00 到傍晚的 20:00 是这次

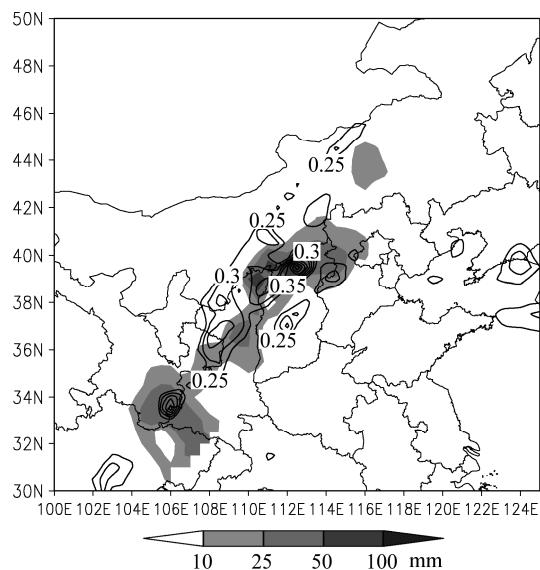


图 3 2012 年 7 月 21 日 14:00 700 hPa 等压面上 GERI(等值线, 单位: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) 和 6 h 累计降水(阴影)

Fig. 3 GERI (contour, units: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) and 6-h accumulated precipitation (shaded) at 700 hPa at 1400 LST 21 Jul 2012

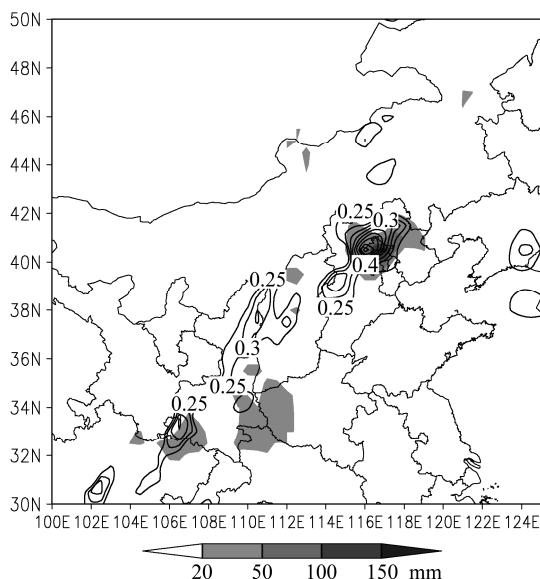


图 4 同图 3, 但为 2012 年 7 月 21 日 20:00

Fig. 4 Same as in Fig. 3, except for 20 LST 21 Jul 2012

特大暴雨发生最集中的时段。从这 6 h 累积的降水来看，暴雨区集中在北京及周边很小的范围内，降水强度远远高于前面的 6 h，也正是这个时段的强降水造成了北京的城市洪涝。从对应的 GERI 分布来看，与强降水的小范围集中类似，GERI 的异常区也主要位于北京附近，且异常中心与暴雨区高度重合，表明 GERI 的定义式中包含了中纬度大气运动的斜压性特点与旋转效应，尤其是温度与气压等值线不重合时的力管效应，抓住了该时刻河套附近的低涡东移发展、宽广的西南季风水汽输送和高空急流增强等动力过程，因此确实很好地指示了此次暴雨的走向及暴雨落区。这表明用 GERI 来分析暴雨过程是可行且有效的。

以上分析只是给出了一个时刻的 GERI 与暴雨区的对应情况，GERI 的有效性还应该用更多时刻的分布进行检验。图 5 是沿 39.5°N 所做的 GERI 与降水的经度—时间序列分布，从图 5 所示的 GERI 时间变化趋势来看，GERI 的异常与雨量变化趋势也是一致的，降水区基本都包含在了 GERI 的异常范围内。图 6 是北京站的 GERI 与 6 h 累积降水的时间序列，GERI 与降水变化的趋势基本一致，都是在降水增强时 GERI 出现异常，降水减小时 GERI 值也减小。

图 2 至图 6 分别从区域及单站分布上分析了同

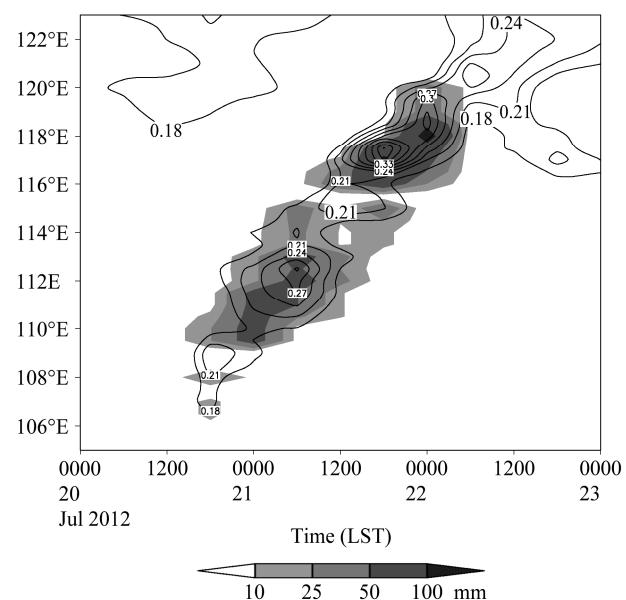


图 5 2012 年 7 月 20~23 日 GERI(等值线, 单位: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) 及 6 h 累积降水(阴影, 单位: mm) 沿 39.5°N 的经度—时间变化

Fig. 5 Longitude-time cross section of GERI (contour, units: $m^4 s^{-2} kg^{-1}$) and 6-h accumulated precipitation (shaded) along 39.5°N from 20 to 23 Jul 2012

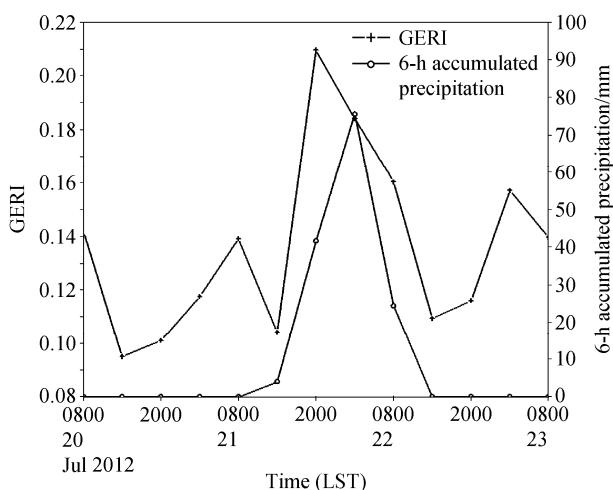


图 6 北京站 2012 年 7 月 20~23 日 GERI 及 6 h 累积降水随时间变化
Fig. 6 Time evolution of GERI and 6-h accumulated precipitation at Beijing station from 20 to 23 Jul 2012

一时刻及不同时刻的 GERI 异常与风场和降水的分布, 结果均表明 GERI 异常值区与暴雨低涡系统能对应起来, GERI 可以反映暴雨低涡系统的强度变化, GERI 演变与降水强度的位置及时间变化趋势都有较好相关性。GERI 的异常区基本覆盖了降水区, 表明 GERI 确实能较好反映暴雨发生的某些动力过程, 用以反映暴雨系统发展及分析预报暴雨落区是有效可行的。从图 5 和图 6 还可见, GERI 的异常与降水基本同位相, 表明 GERI 对反映暴雨过程的流型快变的特点是有效的。根据 Gao and Ran (2009) 和 Gao and Li (2011) 提出的动力因子预报方法思路, 如果用模式预报相对准确的风场、温度场、气压场及湿度场等变量直接计算 GERI, 就可以根据模式预报场计算的 GERI 的异常区域来预报暴雨落区的大致范围, 再与模式直接预报的降水落区相互订正, 有利于提高暴雨落区预报的准确率。

5 结论及讨论

GERI 的表达式中包含了 PV 的定义, 同时也包含了螺旋度效应及大气力管项作用, 对于分析研究大气快变流型的演变有一定优势。用 GERI 分析 2012 年 7 月 21 日北京地区的特大暴雨过程, 表明 GERI 的强度变化及异常区域与造成暴雨的低涡系统的发展加强较为一致, 对反映暴雨过程的流型快变的特点是有效的。类似于涡度及位涡等变量一样, 可用来分析暴雨低涡系统的动力结构。GERI

的异常与降水基本同位相, 表明 GERI 对反映暴雨过程的流型快变的特点是有效的。GERI 的异常区域与暴雨区也有很好的对应关系, 可为暴雨落区诊断及预报提供新的动力变量。需要指出的是, 位涡具有反演性, 且慢流或平衡流的位涡反演有严格约束条件, 而 GERI 要通过反演来研究大气的快变部分很复杂, 目前还不能实现。本文也只是初步给出了 GERI 对一个暴雨个例的分析结果, 其适用性还需要大量暴雨个例的检验。

参考文献 (References)

- Chen G T J, Wang C C, Liu S C S. 2003. Potential vorticity diagnostics of a Meiyu front case [J]. Mon. Wea. Rev., 131 (11): 2680–2696.
- Ertel H, Rossby C G. 1949. A new conservation-theorem of hydrodynamics [J]. Geofisica Pura e Applicata, 14 (3): 189–193.
- Gao S T, Ran L K. 2009. Diagnosis of wave activity in a heavy rainfall event [J]. J. Geophys. Res., 114 (D8): D08119, doi: 10.1029/2008JD010172.
- Gao S T, Li X F. 2011. Can water vapour process data be used to estimate precipitation efficiency? [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 137 (657): 969–978.
- Gao S T, Xu P C, Ran L K, et al. 2012. On the generalized Ertel-Rossby invariant [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (4): 690–694.
- 高守亭, 梁生俊, 邓涤菲, 等. 2012. 斜压 Ertel-Rossby 不变量在梅雨锋降水过程中的研究与应用 [J]. 气候与环境研究, 17 (4): 495–503. Gao Shouting, Liang Shengjun, Deng Difei, et al. 2012. The study and application of baroclinic Ertel-Rossby invariant in Meiyu front precipitation process [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 17 (4): 495–503.
- Holton J R. 2004. An Introduction to Dynamic Meteorology [M]. 4th ed. Beijing: Academic Press, 535pp.
- Hoskins B J. 1997. A potential vorticity view of synoptic development[J]. Meteorological Applications, 4 (4): 325–334.
- Hoskins B J, Berrisford P. 1988. A potential vorticity perspective of the storm of 15–16 October 1987 [J]. Weather, 43 (3): 122–129.
- Hoskins B J, McIntyre M E, Robertson A W. 1985. On the use and significance of isentropic potential vorticity maps [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 111 (470): 877–946.
- McIntyre M E, Norton W A. 1991. Potential vorticity inversion on a hemisphere [J]. J. Atmos. Sci., 57 (9): 1214–1235.
- Rossby C G. 1936. Dynamics of steady ocean currents in the light of experimental fluid mechanics [J]. Pap. Phys. Oceanogr. Meteor., 5 (1): 1–43.
- Schubert W H, Montgomery M T, Taft R K, et al. 1999. Polygonal eyewalls, asymmetric eye contraction, and potential vorticity mixing in hurricanes [J]. J. Atmos. Sci., 56 (9): 1197–1223.
- Seliger R L, Whitham G B. 1968. Variational principles in continuum mechanics[J]. Proc. Roy. Soc. London, 305 (1480): 1–25.
- 寿绍文. 2010. 位涡理论及其应用[J]. 气象, 36 (3): 9–18. Shou Shaowen.

2010. Theory and application of potential vorticity [J]. Meteorological Monthly (in Chinese), 36 (3): 9–18.
- Uccellini L W, Keyser D, Brill K F, et al. 1985. The presidents' day cyclone of 18–19, February, 1979: Influence of upstream trough amplification and associated tropopause folding on rapid cyclogenesis [J]. Mon. Wea. Rev., 113 (6): 962–988.
- 王建中, 马淑芬, 丁一汇. 1996. 位涡在暴雨成因分析中的应用 [J]. 应用气象学报, 7 (1): 19–27. Wang Jianzhong, Ma Shufen, Ding Yihui. 1996. Application of potential vorticity theory to analysis of formative mechanism of torrential rain [J]. Quarterly Journal of Applied Meteorology (in Chinese), 7 (1): 19–27.
- Yu Z F, Liang X D, Yu H, et al. 2010. Mesoscale vortex generation and merging process: A case study associated with a post-landfall tropical depression [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 27 (2): 356–370.
- Zdunkowski W, Bott A. 2003. Dynamics of the Atmosphere: A Course on Theoretical Meteorology [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 719pp.