

欧洲中期天气预报中心大气环流模式视角下 大气重力波动量通量的全球分布特征

卫俊宏



合作作者:

Fuqing Zhang (张福青 教授) *from Penn State,*

Jadwiga H. Richter *from NCAR,*

M. Joan Alexander *from NorthWest Research Associates,*

and Y. Qiang Sun (孙永强 老师) *from Princeton University.*

2023年8月10日 (星期四)

Session 5: 对流的多尺度结构及演变机制

第五届全国中尺度气象学论坛

时间: 2023年8月9-12日

地点: 宁夏银川



致谢: **Linus Magnusson, Inna Polichtchouk** *from ECMWF*

研究意义

大气重力波

中尺度
气象学

大气
动力学

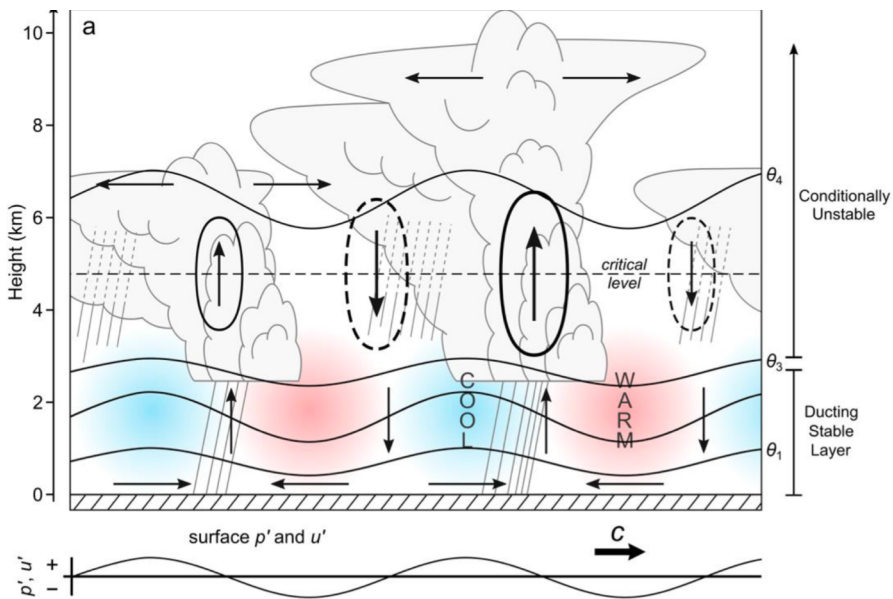
研究意义

大气重力波

中尺度
气象学

天气过程

Ducted Wave-CISK 示意图



Ruppert et al. (BAMS, 2022)

研究意义

大气重力波

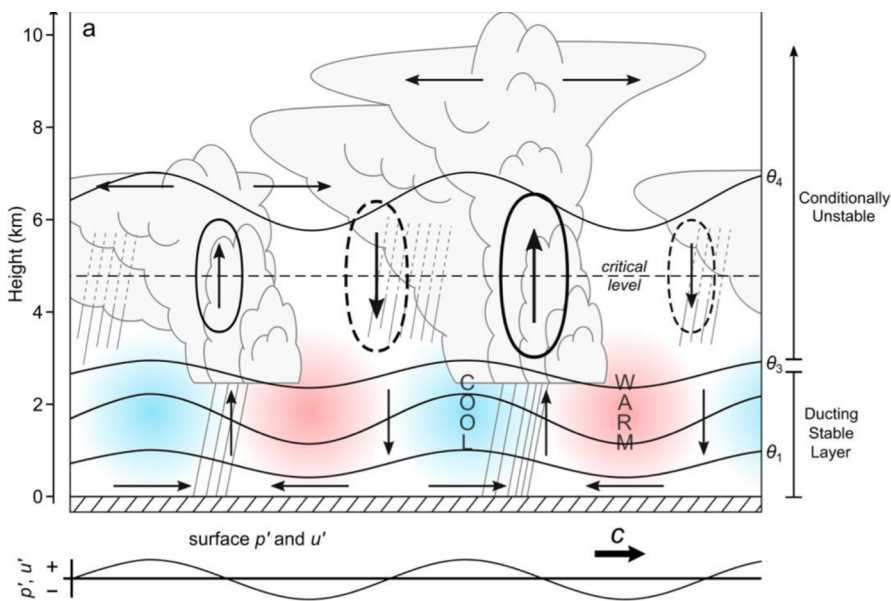
中尺度
气象学

天气过程

Mesoscale Gravity Waves & Midlatitude Weather

The Inspiring Determination and Dedication of Fuqing Zhang

Ducted Wave-CISK 示意图



Ruppert et al. (BAMS, 2022)



BAMS, September 2022

研究意义

大气重力波

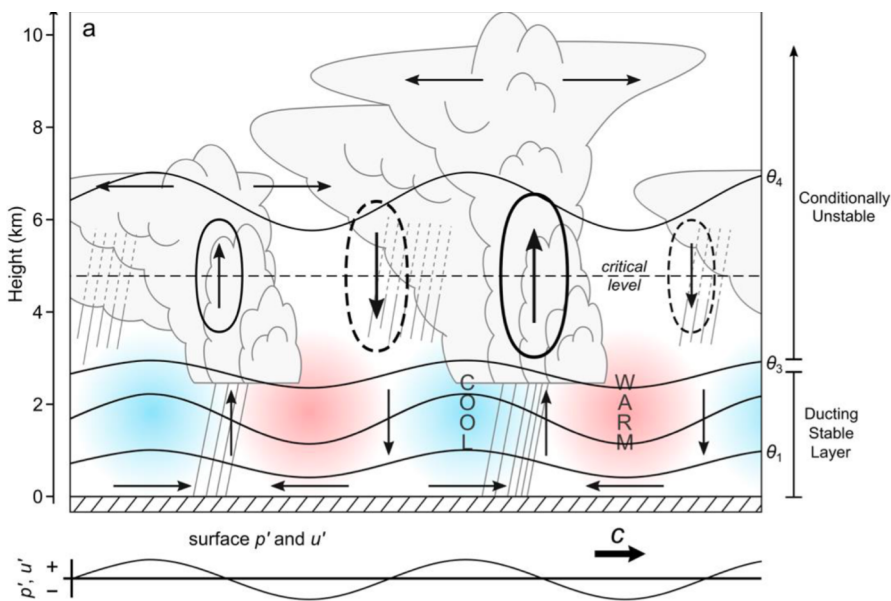
中尺度
气象学

大气
动力学

天气过程

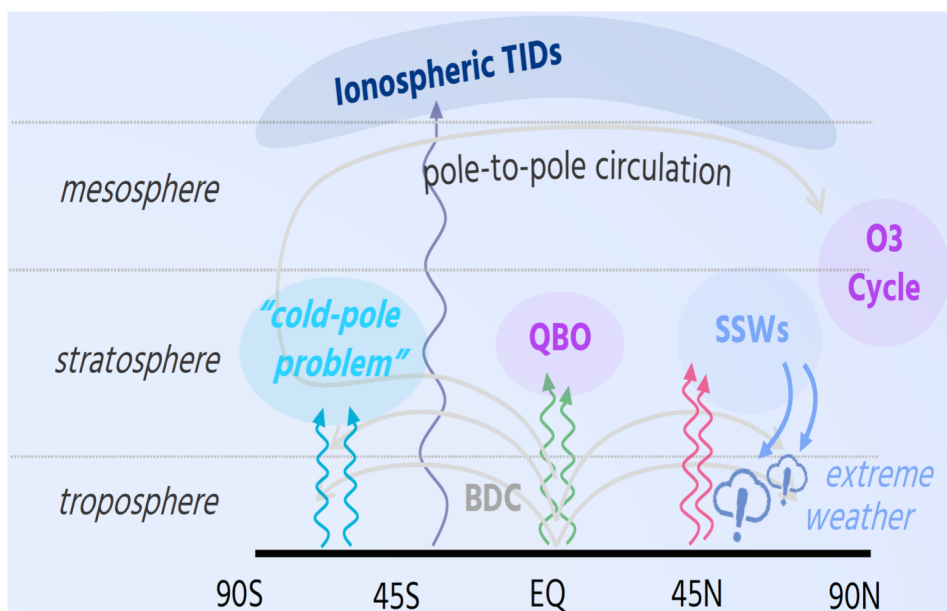
波流相互作用

Ducted Wave-CISK 示意图



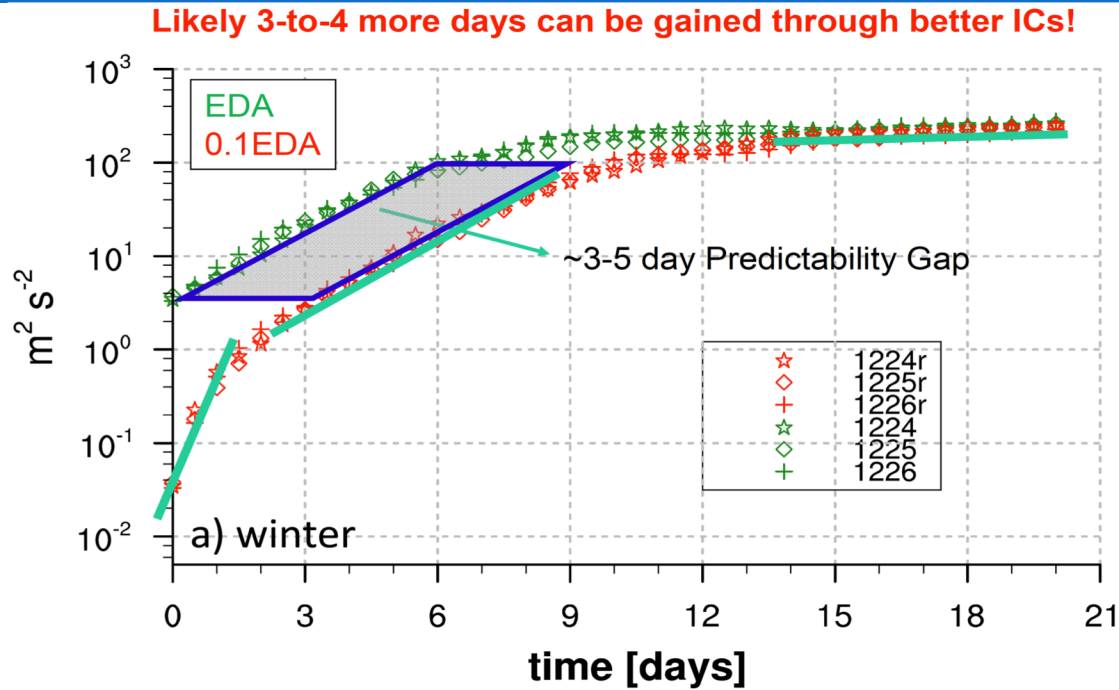
Ruppert et al. (BAMS, 2022)

大气重力波生命史示意图



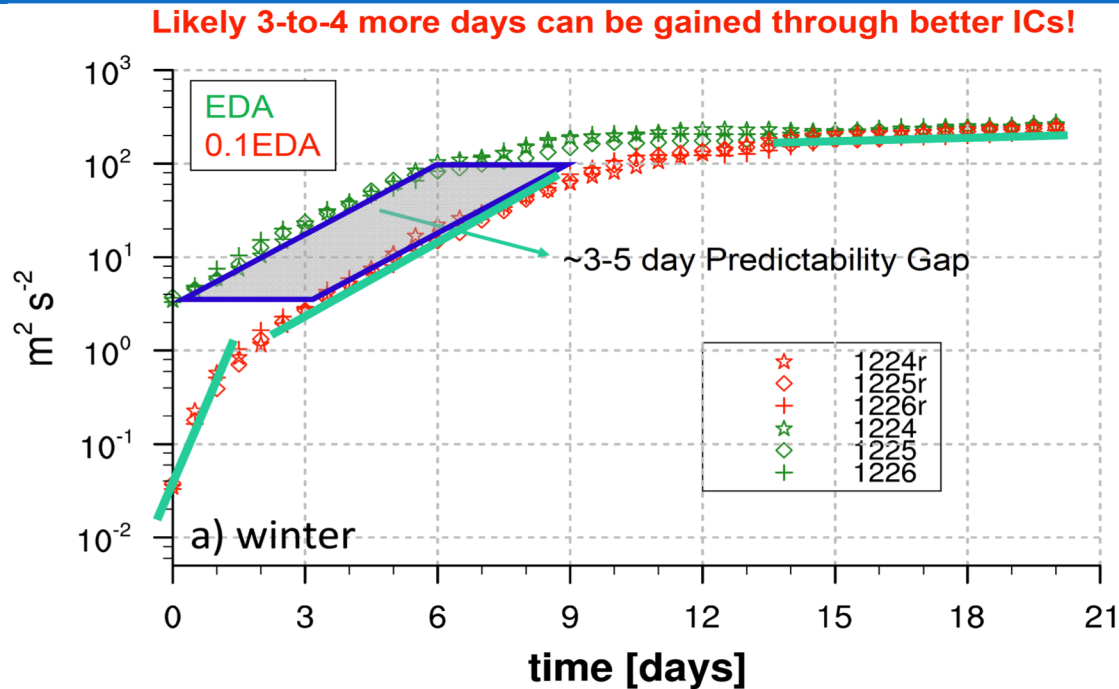
Adapted From the talk of Neil Hindley (2022)

Zhang et al. (2019) 及其延伸的新工作



Zhang et al. (2019) 聚焦的关键科学问题：
中纬度天气的可预报性边界是什么？

Zhang et al. (2019) 及其延伸的新工作



Zhang et al. (2019) 聚焦的关键科学问题：
中纬度天气的可预报性边界是什么？



新工作聚焦的关键科学问题：
重力波通量的全球分布特征是什么？

The High-Resolution GCM Outputs Employed in This Study:
9-km ECMWF experiments from Zhang et al. (2019)

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

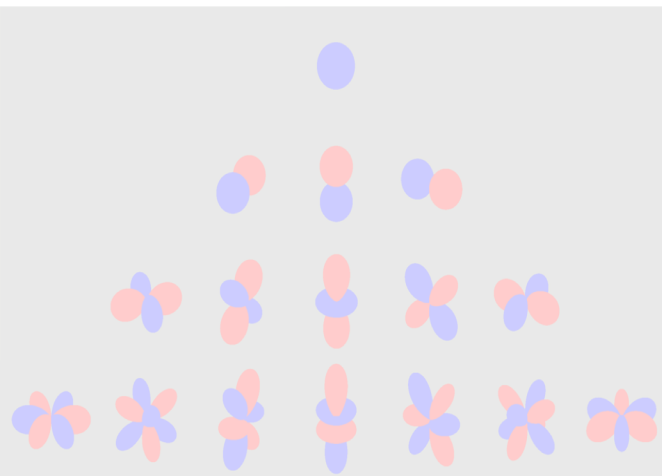
步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

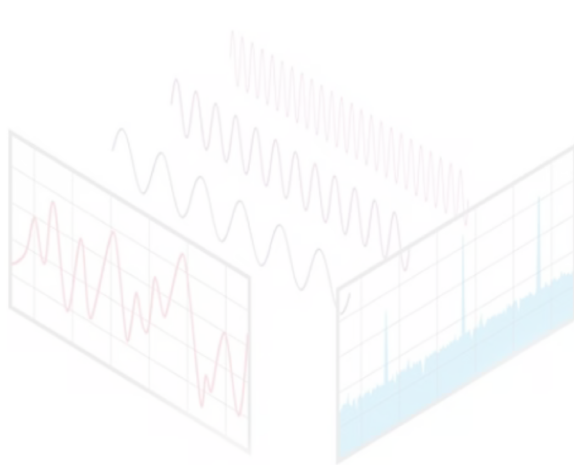
统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

(a) 球谐函数滤波器



(b) 快速傅里叶变换



(c) 局地空间滑动平均



(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

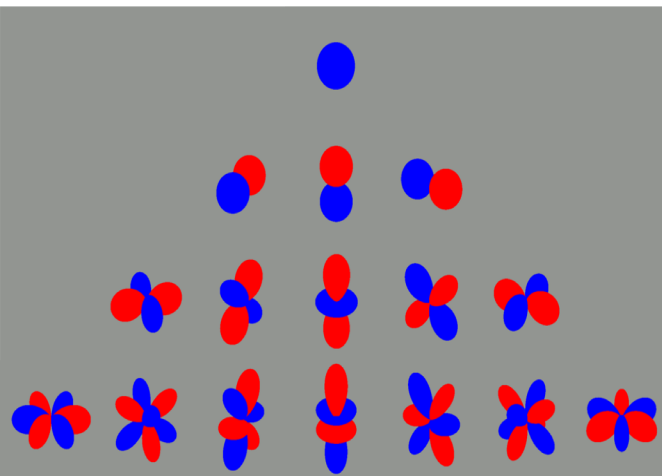
步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

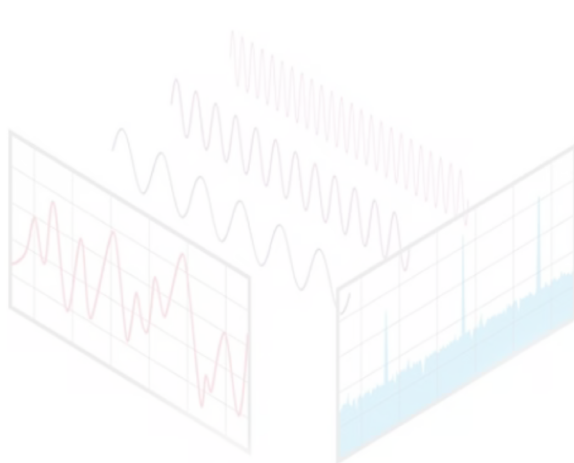
统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

(a) 球谐函数滤波器



(b) 快速傅里叶变换



(c) 局地空间滑动平均



(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

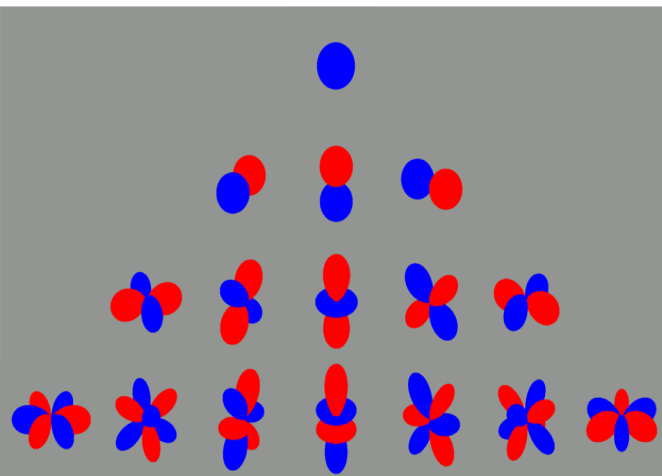
步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

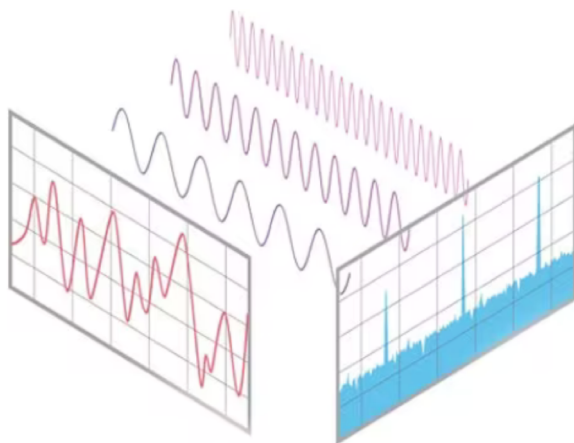
统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

(a) 球谐函数滤波器



(b) 快速傅里叶变换



(c) 局地空间滑动平均



(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

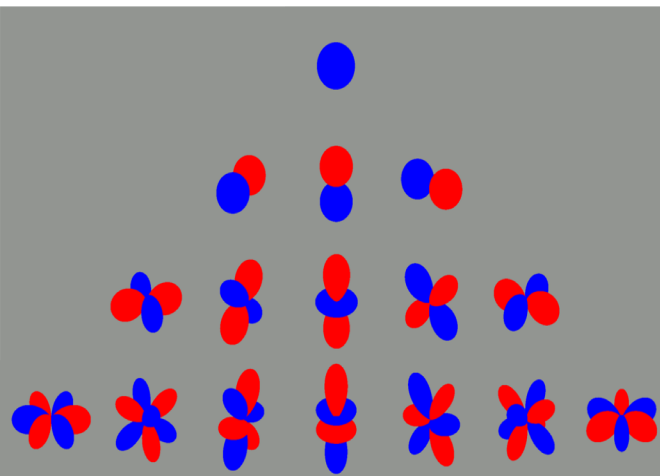
步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

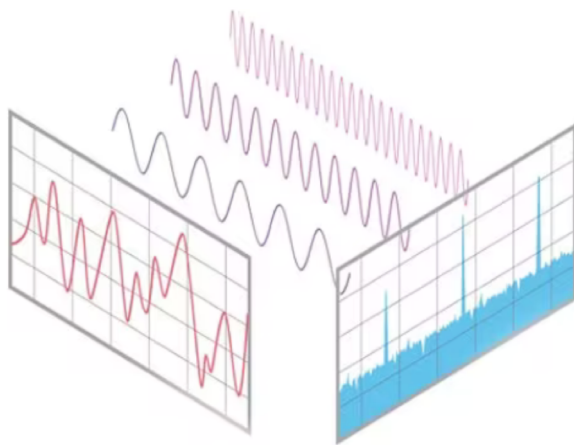
统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

(a) 球谐函数滤波器



(b) 快速傅里叶变换



(c) 局地空间滑动平均



(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

- (a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40
- (b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude
- (c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

步骤一：方法 a

步骤二：方法 c

步骤一：方法 c

步骤二：方法 c

步骤一：方法 a

步骤二：方法 a

(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

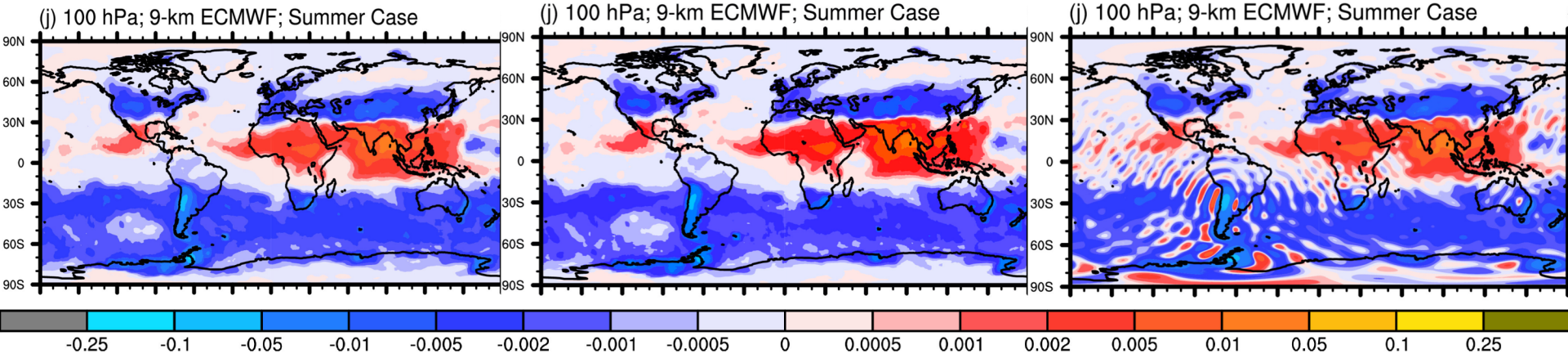
重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$



步骤一：方法 a
步骤二：方法 c

步骤一：方法 c
步骤二：方法 c

步骤一：方法 a
步骤二：方法 a

(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

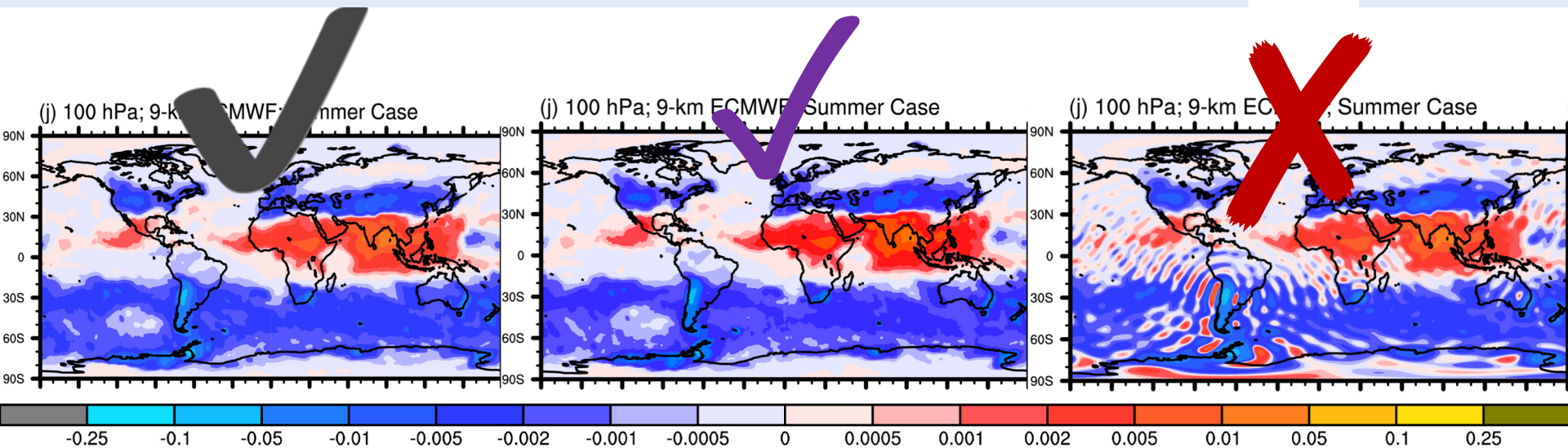
重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$



步骤一：方法 a
步骤二：方法 c

步骤一：方法 c
步骤二：方法 c

步骤一：方法 a
步骤二：方法 a

(a) Spectrally truncated retrieval of total wavenumbers ≤ 40

(b) Zonal retrieval of all zonal wavenumbers ≤ 72 at each available latitude

(c) The $5^\circ \times 5^\circ$ latitude–longitude horizontal running average

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

动力学方案：

基于某类平衡关系或动力约束条件的诊断手段

重力波通量计算

步骤一：获取大尺度背景场

$$u = \bar{u} + u'$$

步骤二：二次量的平滑处理

$$\overline{u'w'}$$

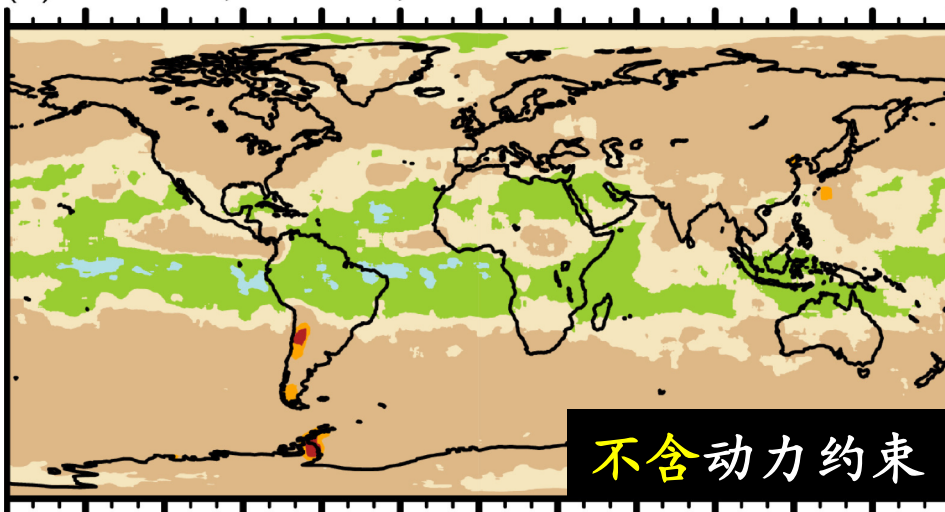
统计学方案：

基于背景场和扰动场之间尺度分离的前提假设

动力学方案：

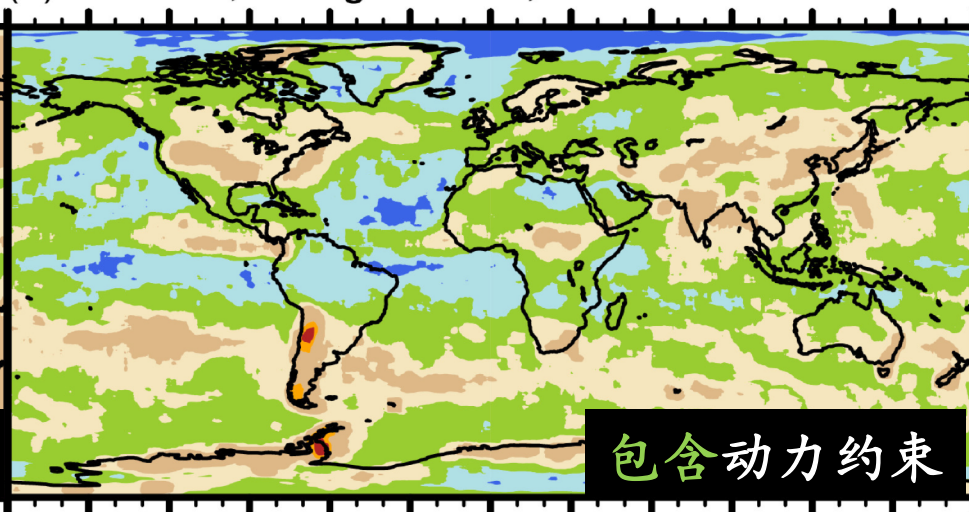
基于某类平衡关系或动力约束条件的诊断手段

(b) 300 hPa; full wind; Summer Case



不含动力约束

(e) 300 hPa; divergent wind; Summer Case



包含动力约束

0.0005

0.001

0.002

0.005

0.01

0.05

0.1

0.25

- 在对流层，仅仅单一使用“统计学方案”将导致较大的估算误差。

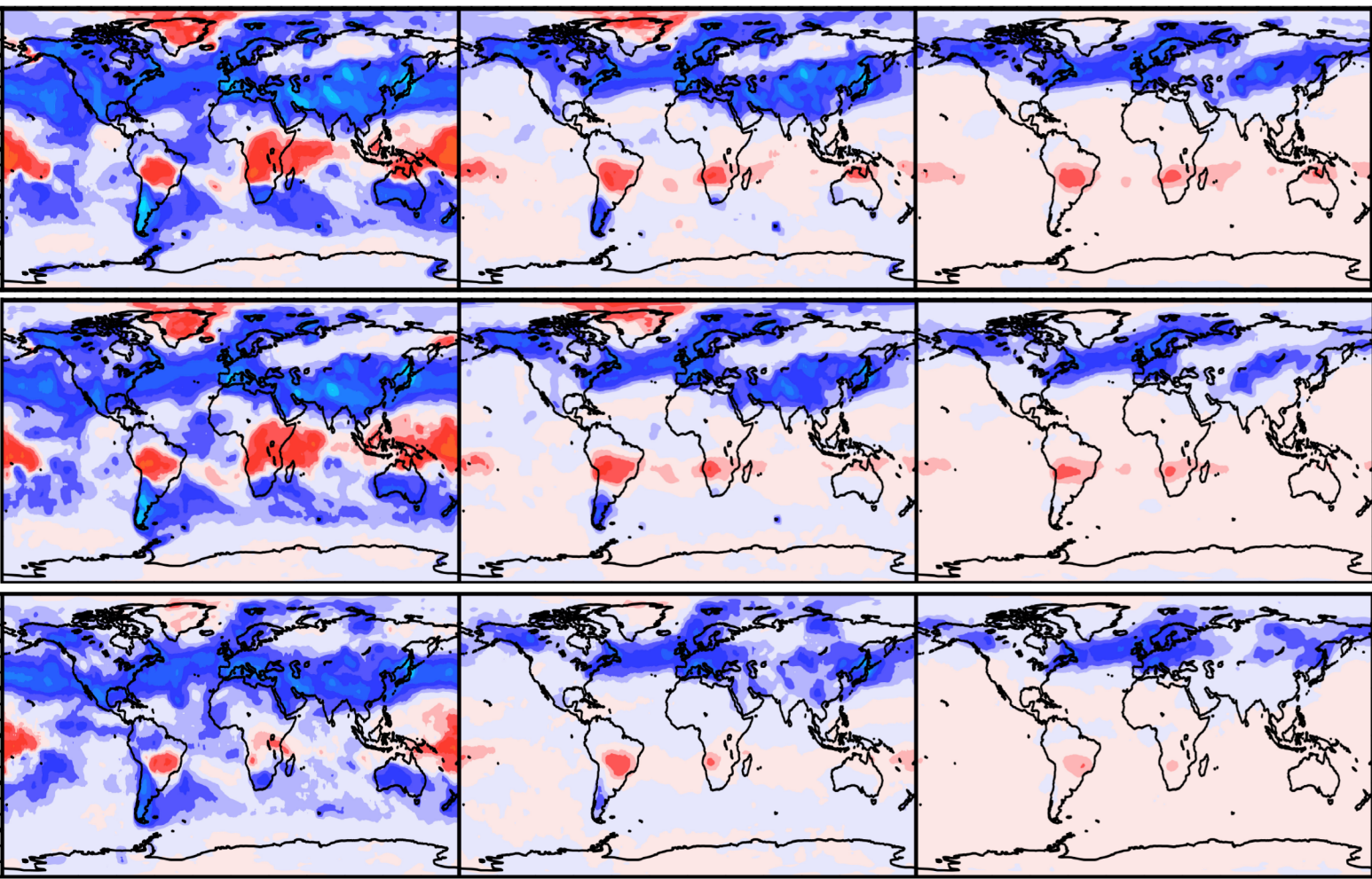
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球冬季 (欧洲北部发生强寒潮事件): 20天全球平均分布场 (从12/25/2015至01/14/2016)

100 hPa

50 hPa

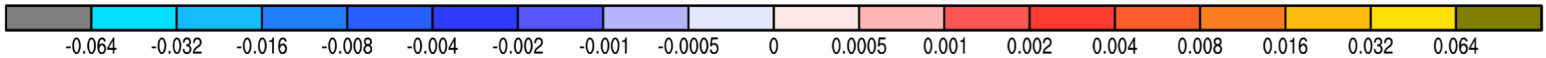
10 hPa



ECMWF
(9-km水平分辨率)

ECMWF
(18-km水平分辨率)

ERA5
(30-km水平分辨率)



❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区

❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱

❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

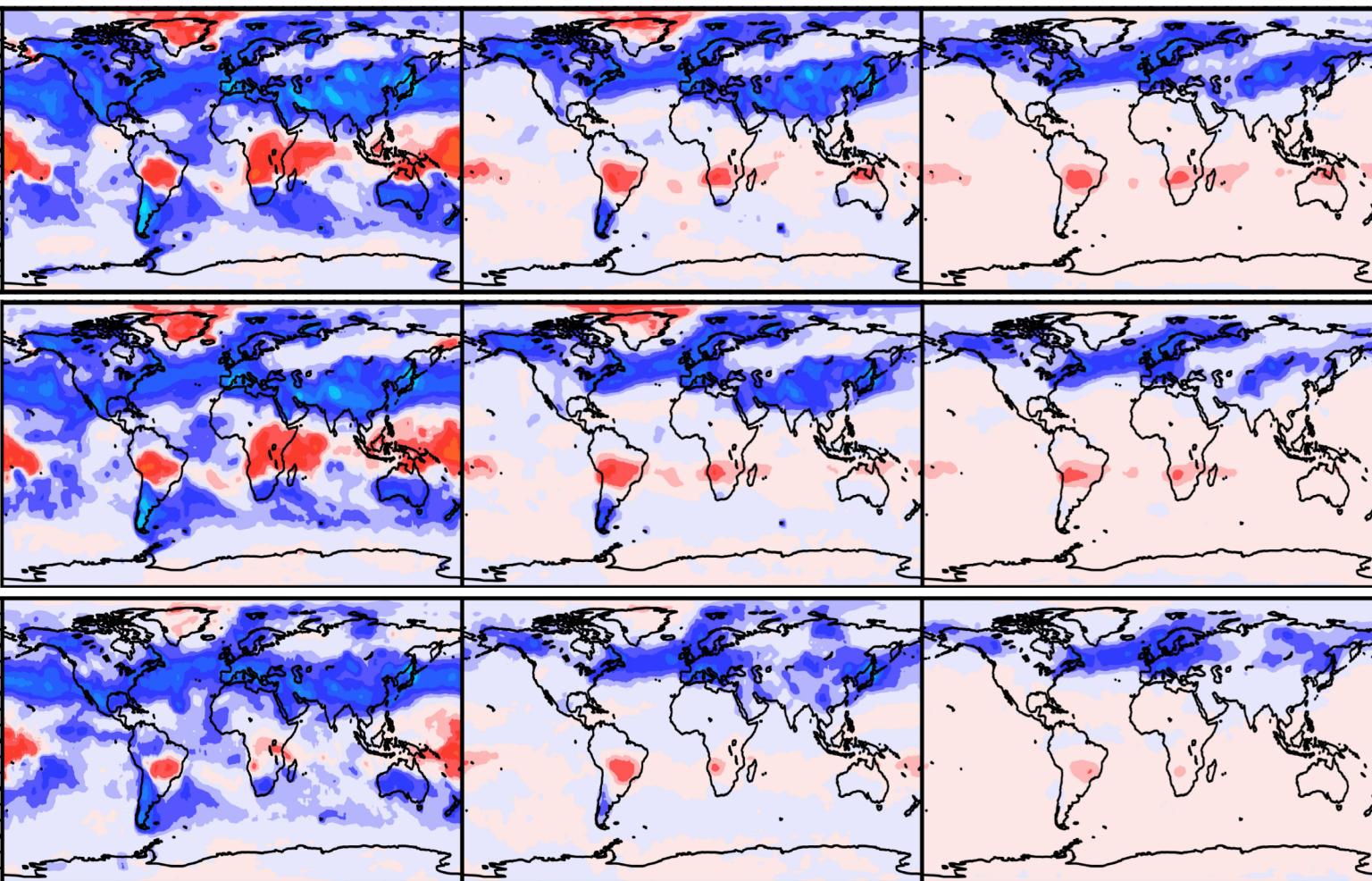
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球冬季 (欧洲北部发生强寒潮事件): 20天全球平均分布场 (从12/25/2015至01/14/2016)

100 hPa

50 hPa

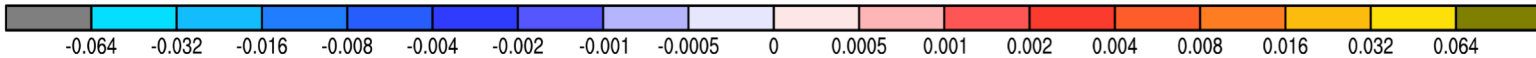
10 hPa



ECMWF
(9-km水平分辨率)

ECMWF
(18-km水平分辨率)

ERA5
(30-km水平分辨率)



- ❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区
- ❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

- ❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱
- ❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

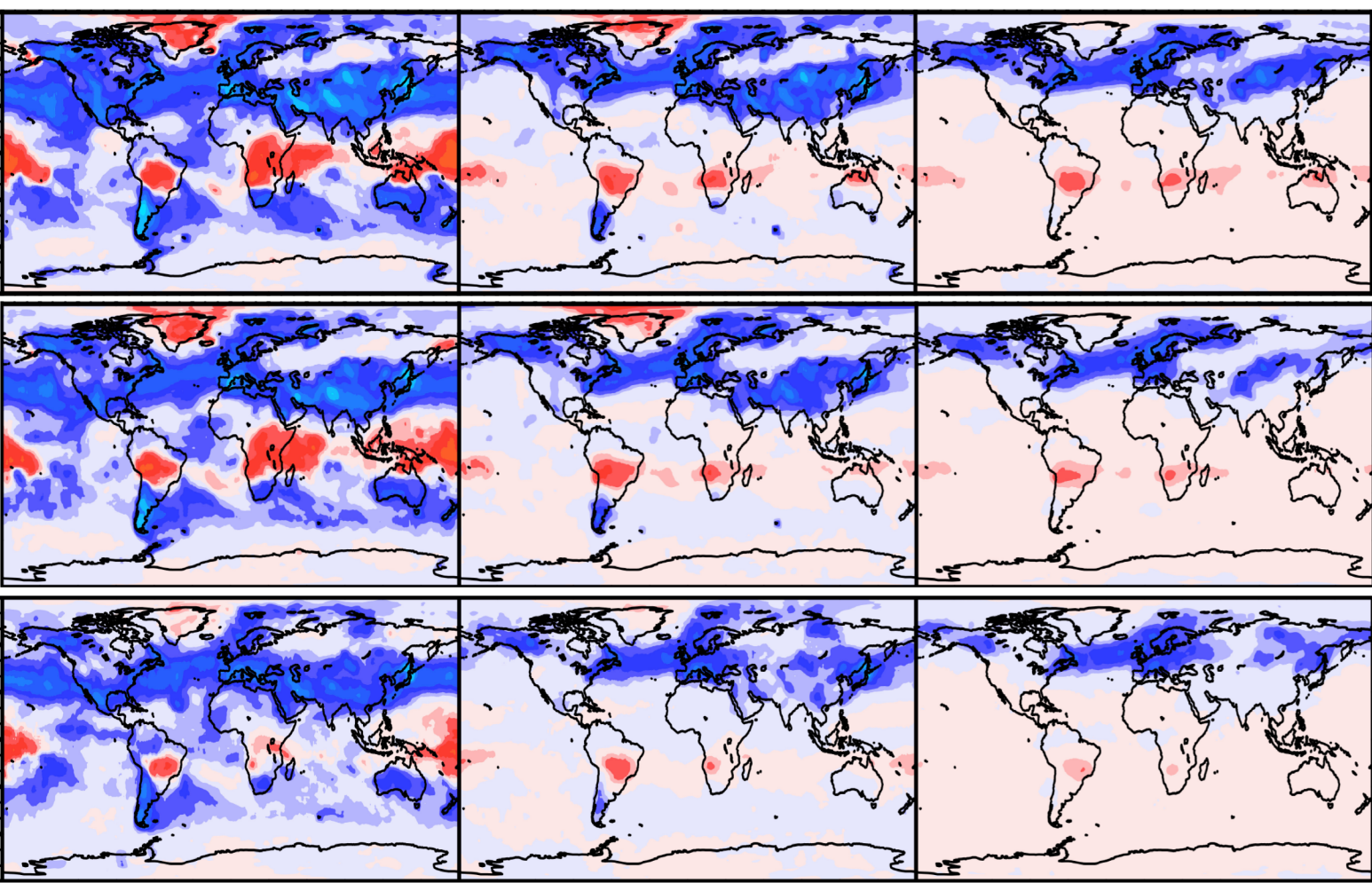
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球冬季 (欧洲北部发生强寒潮事件): 20天全球平均分布场 (从12/25/2015至01/14/2016)

100 hPa

50 hPa

10 hPa



ECMWF

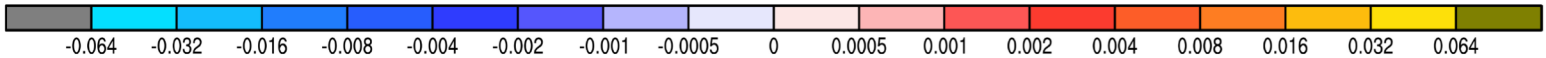
(9-km水平分辨率)

ECMWF

(18-km水平分辨率)

ERA5

(30-km水平分辨率)



❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区

❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱

❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

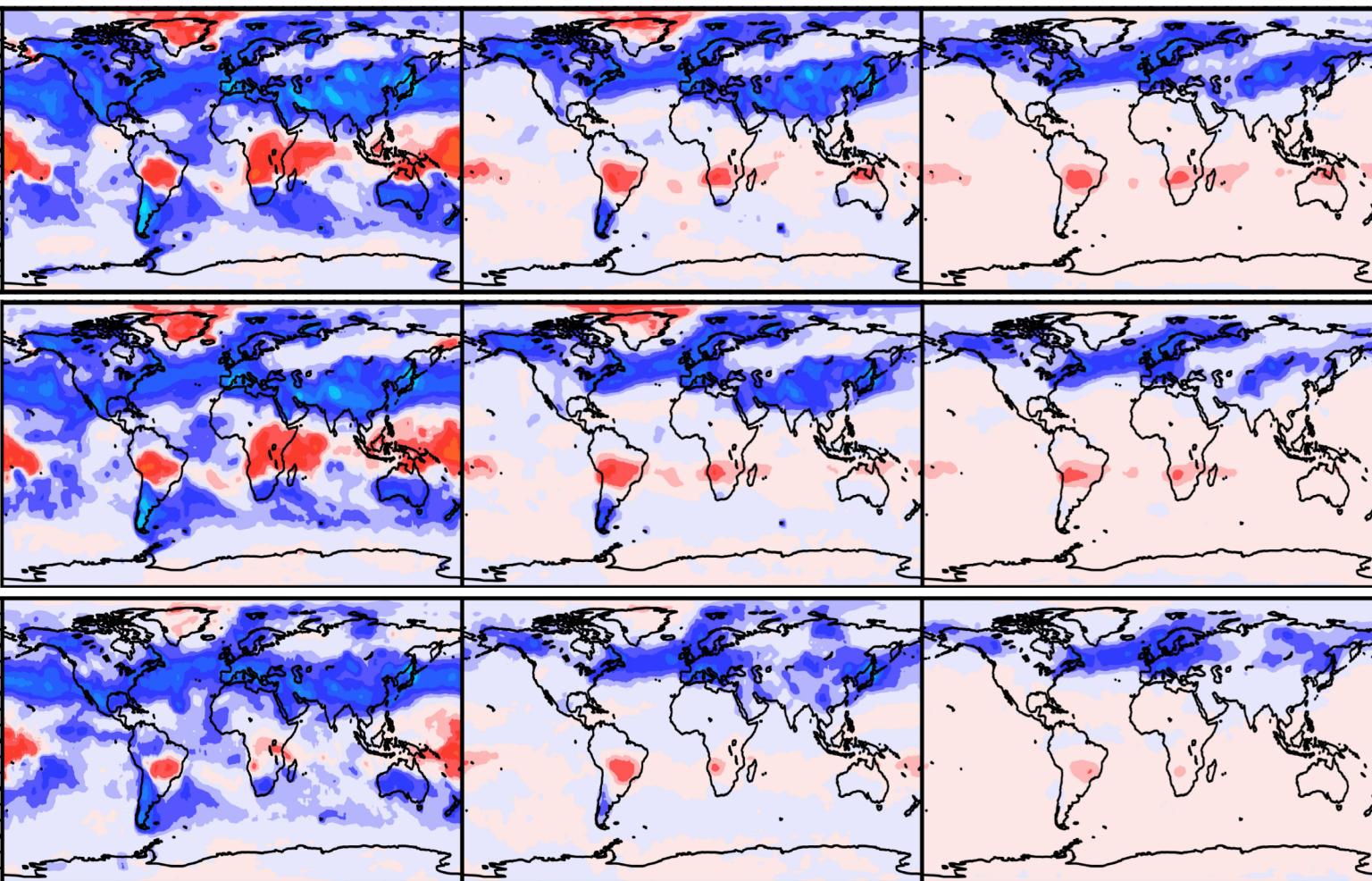
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球冬季 (欧洲北部发生强寒潮事件): 20天全球平均分布场 (从12/25/2015至01/14/2016)

100 hPa

50 hPa

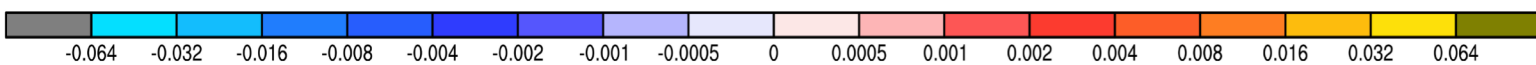
10 hPa



ECMWF
(9-km水平分辨率)

ECMWF
(18-km水平分辨率)

ERA5
(30-km水平分辨率)



- ❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区
- ❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

- ❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱
- ❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

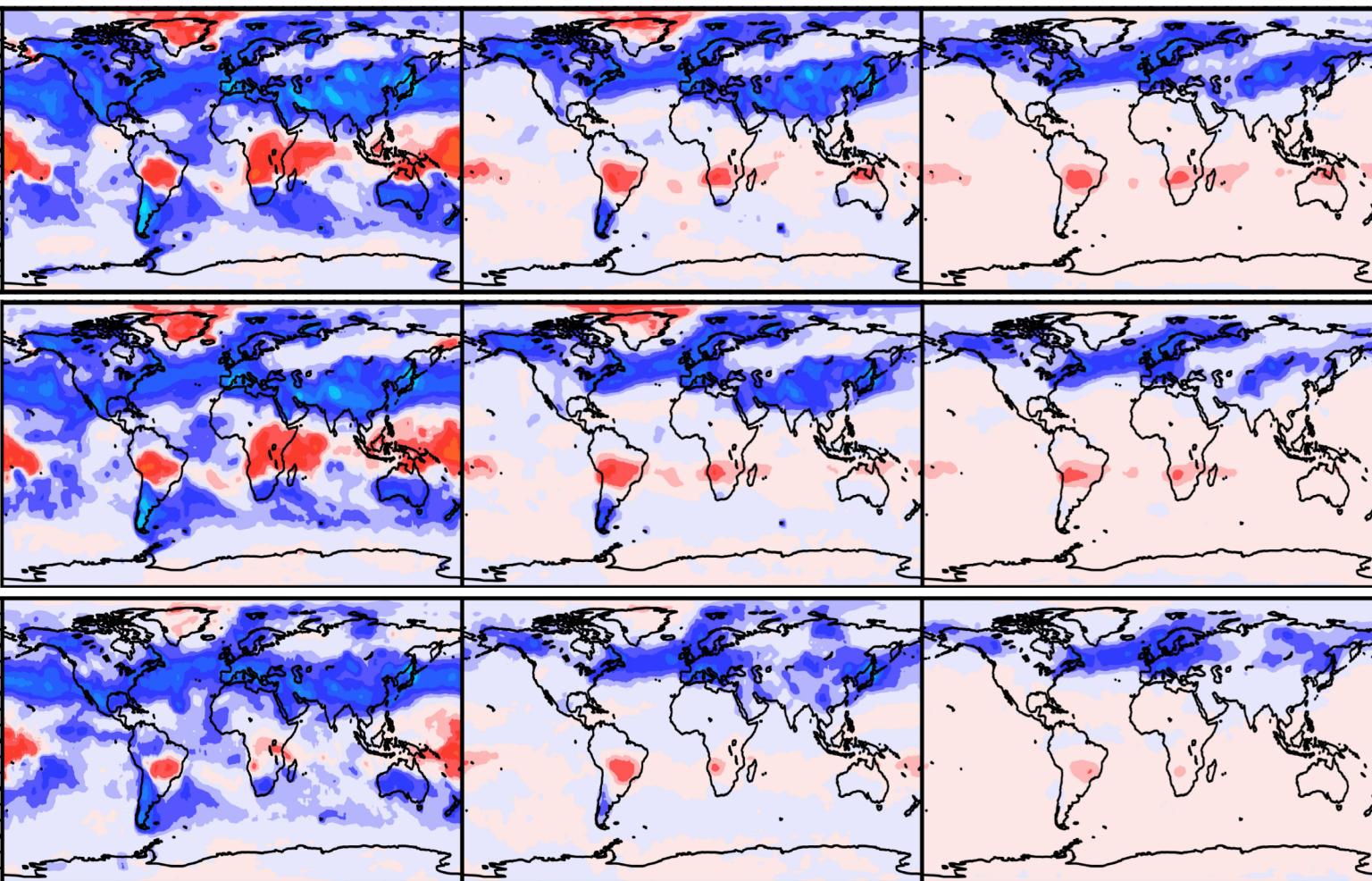
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球冬季 (欧洲北部发生强寒潮事件): 20天全球平均分布场 (从12/25/2015至01/14/2016)

100 hPa

50 hPa

10 hPa



ECMWF

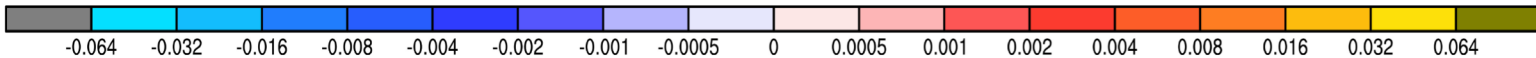
(9-km水平分辨率)

ECMWF

(18-km水平分辨率)

ERA5

(30-km水平分辨率)



❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区

❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱

❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

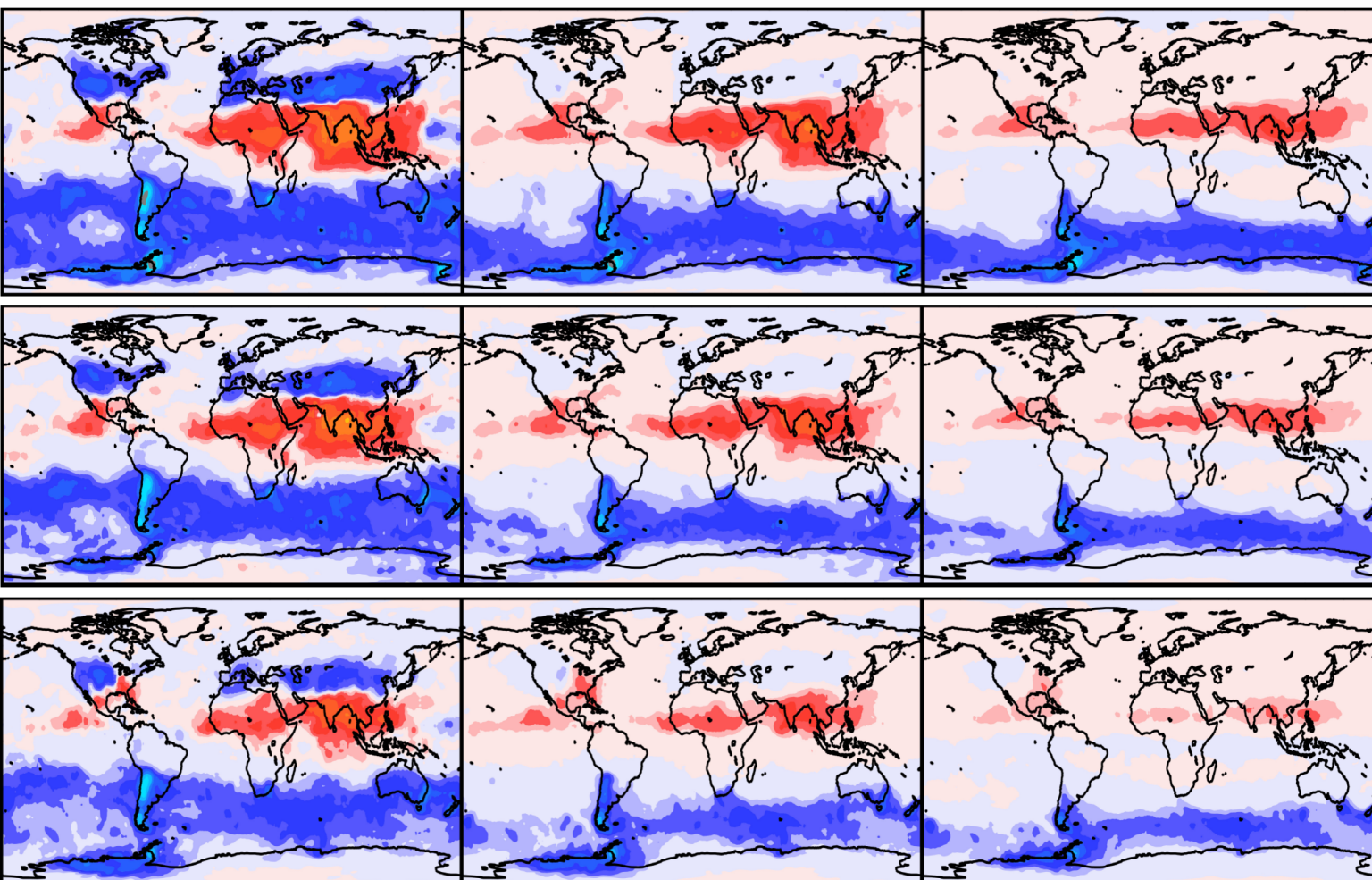
ECMWF模拟与ERA5再分析资料的平流层重力波纬向动量通量全球分布对比图

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

100 hPa

50 hPa

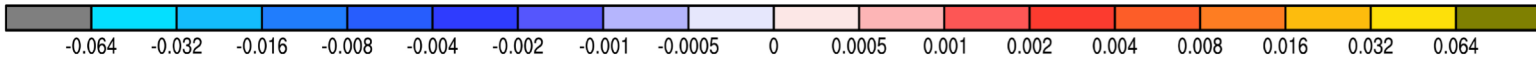
10 hPa



ECMWF
(9-km水平分辨率)

ECMWF
(18-km水平分辨率)

ERA5
(30-km水平分辨率)



❑ 负动量通量控制冬半球中纬度地区

❑ 正动量通量影响夏半球的赤道地区

❑ 高度越高, 重力波动量通量信号越弱

❑ 网格越细, 重力波动量通量信号越强

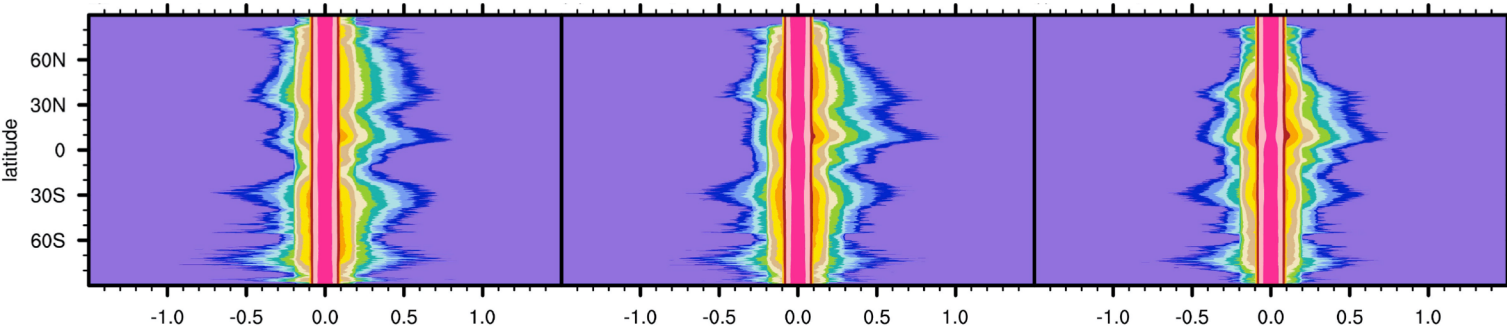
对流层内垂直速度的概率密度分布特征

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

500 hPa

300 hPa

200 hPa

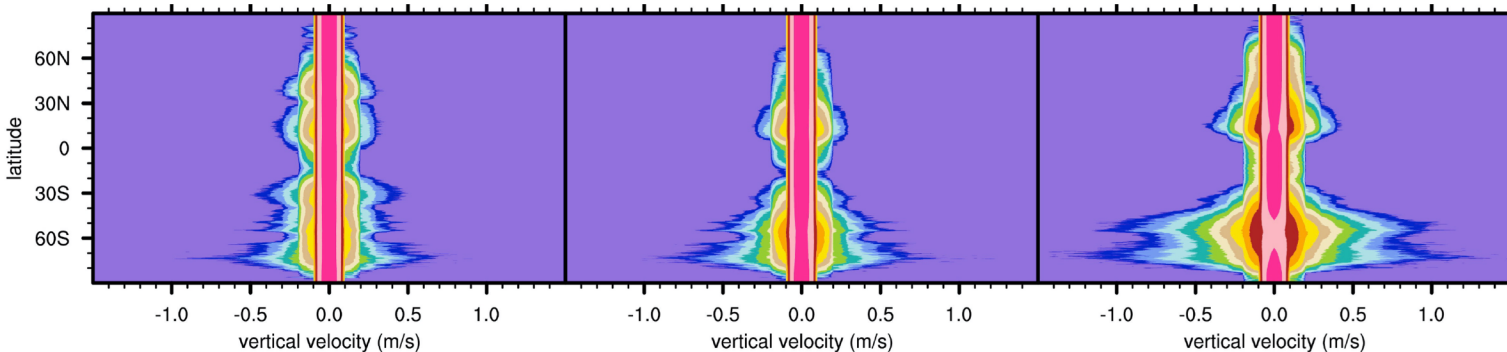


对流层
(无过滤方案)

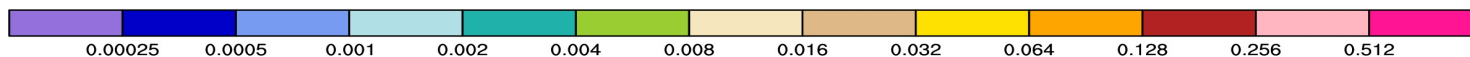
100 hPa

50 hPa

10 hPa



平流层
(无过滤方案)



□ 无过滤方案：对流层内相对零速度点存在明显的**非对称特征**。

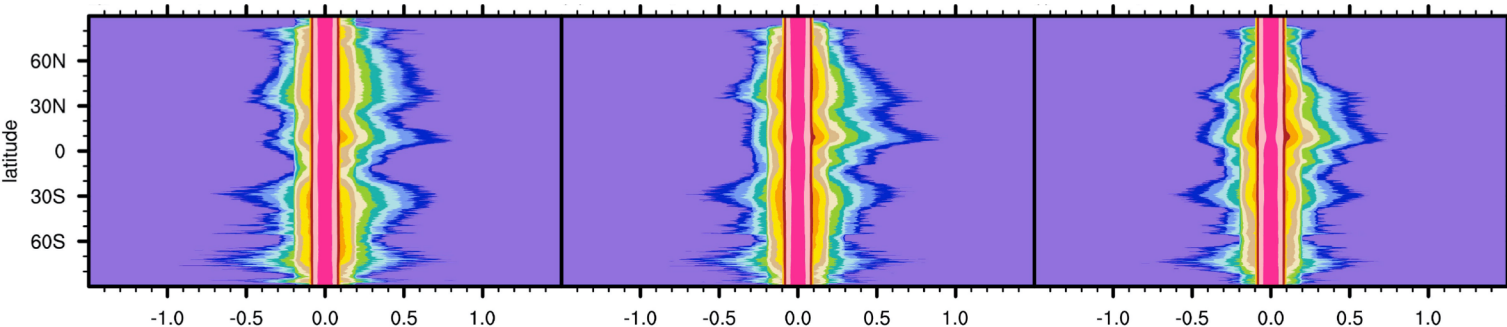
对流层内垂直速度的概率密度分布特征

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

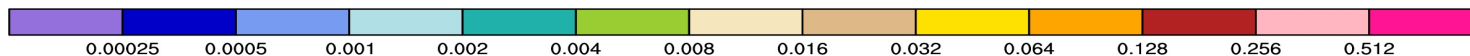
500 hPa

300 hPa

200 hPa



对流层
(无过滤方案)



□ 无过滤方案：对流层内相对零速度点存在明显的**非对称特征**。

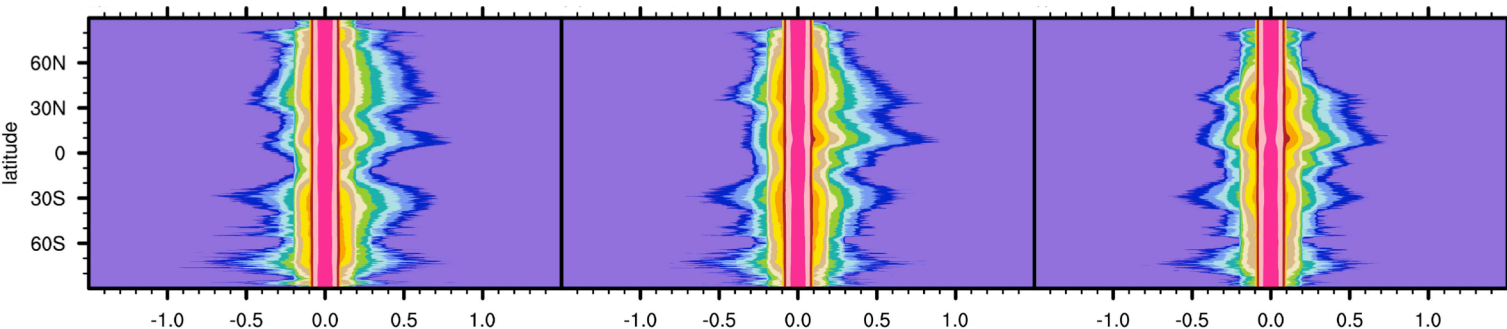
对流层内垂直速度的概率密度分布特征

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

500 hPa

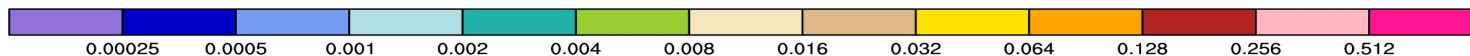
300 hPa

200 hPa



对流层
(无过滤方案)

过滤方案的提出：利用降水信息！



□ 无过滤方案：对流层内相对零速度点存在明显的**非对称特征**。

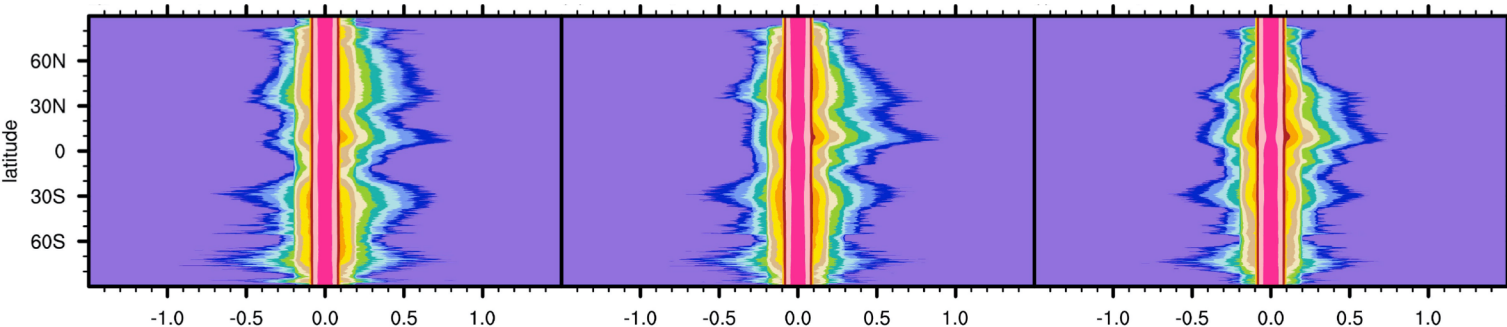
对流层内垂直速度的概率密度分布特征

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

500 hPa

300 hPa

200 hPa



对流层
(无过滤方案)

C1 方案

满足以下情况过滤 w'

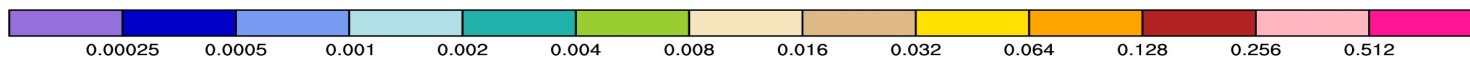
12小时累计降水
> 0.01m

C2 方案

满足以下情况过滤 w'

12小时累计降水
> 0.001m

过滤方案的提出：利用降水信息！



□ 无过滤方案：对流层内相对零速度点存在明显的**非对称特征**。

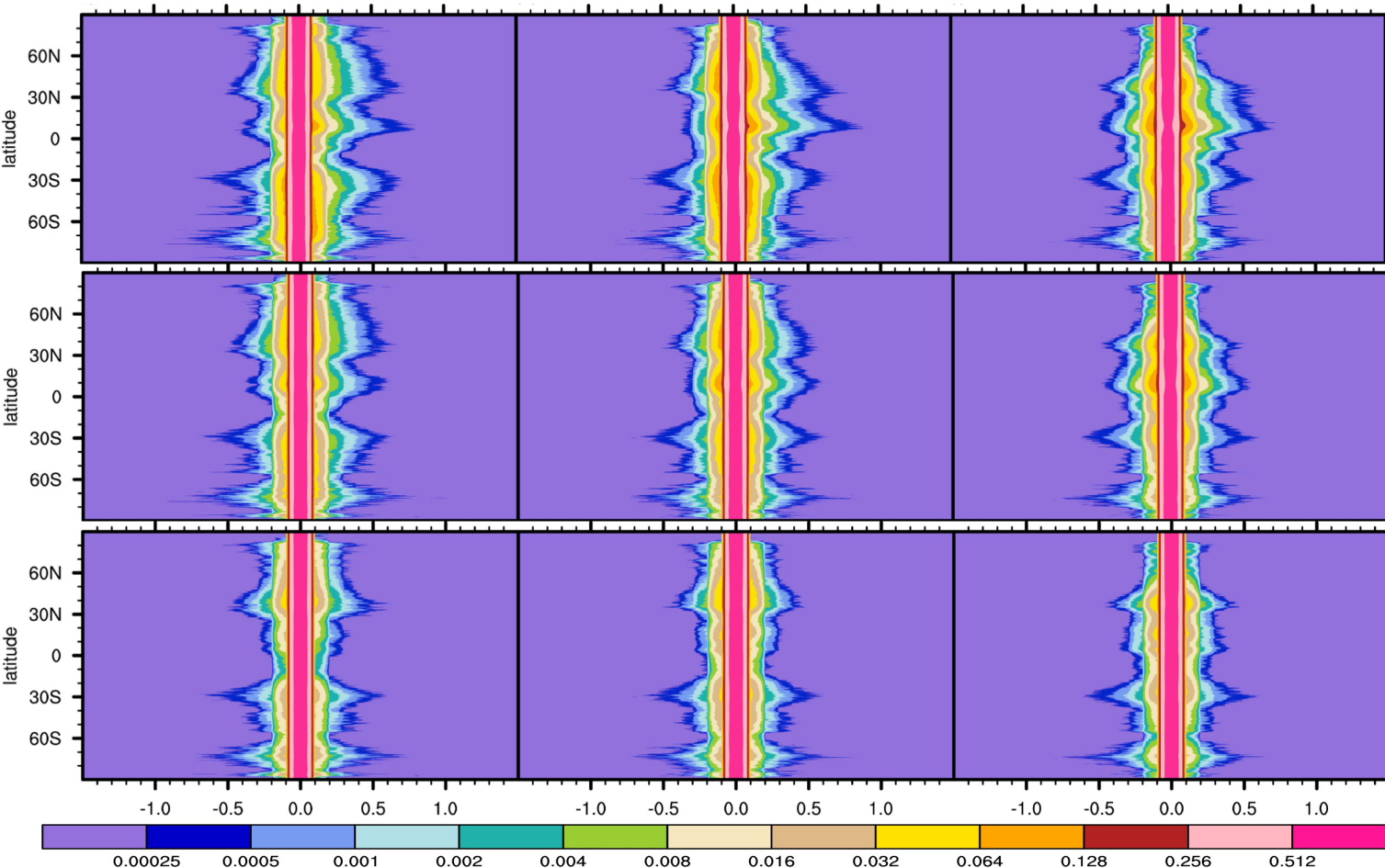
对流层内垂直速度的概率密度分布特征

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

500 hPa

300 hPa

200 hPa



对流层
(无过滤方案)

C1 方案

满足以下情况过滤 w'

12小时累计降水
> 0.01m

C2 方案

满足以下情况过滤 w'

12小时累计降水
> 0.001m

❑ 无过滤方案：对流层内相对零速度点存在明显的**非对称特征**。

❑ 过滤实验：**对流强迫（而非自由传播的重力波信号）**导致了上述非对称特征（详见 Alexander et al. 2006）。

重力波通量计算

方向动量通量 (Directional Momentum Flux)

$$MF_x \equiv \rho_0 \overline{u'w'}$$

纬向动量通量

$$MF_y \equiv \rho_0 \overline{v'w'}$$

经向动量通量

绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

ORI 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \left[(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2 \right]}$$

WTQ 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \overline{w'w'} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'}) \left[1 + \frac{f^2}{\Omega^2} \right]^{-1}}$$

$$\text{where } \frac{f^2}{\Omega^2} = \left(\frac{fg}{N^2} \right)^2 \left(\frac{\overline{(T'/T_0)^2}}{\overline{w'w'}} \right)$$

根据重力波极化关系理论，
可证明两个方案 (ORI、WTQ) 对应的M值相等。

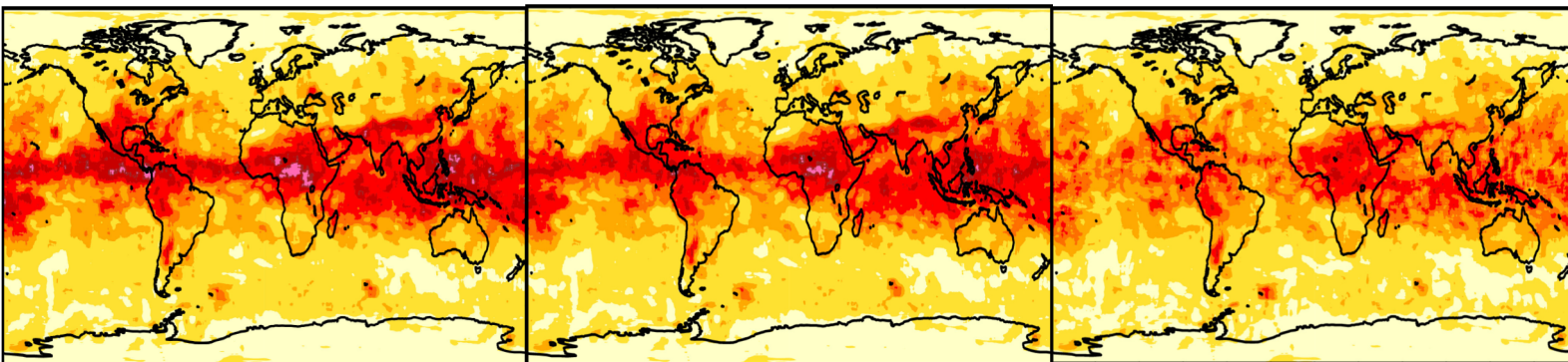
WTQ / ORI 比值的全球分布图

北半球夏季 (中国发生历史性洪涝灾害): 20天全球平均分布场 (从06/25/2016至07/14/2016)

无过滤方案

C1 方案

C2 方案

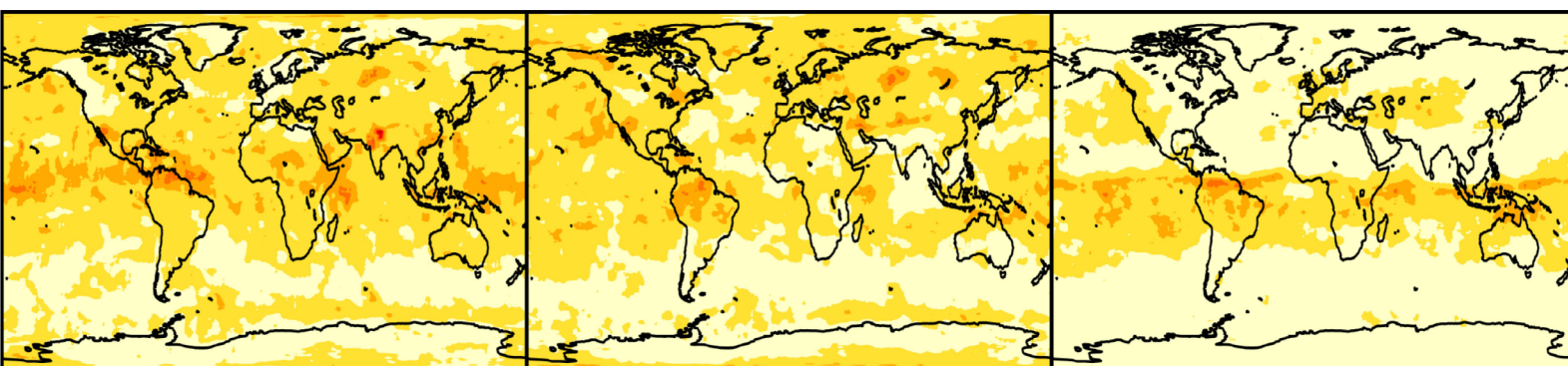


对流层
(200 hPa)

100 hPa

50 hPa

10 hPa



平流层
(无过滤方案)

0.9

1

2

3

4

5

7

9

10

- ❑ 过滤方案的提出有助于降低 WTQ / ORI 比值。
- ❑ 相比于对流层，该比值在平流层有明显的减小。
- ❑ 然而，**WTQ > ORI** 依然成立！

重力波通量计算

ORI方案可能导致严重低估。

Geller et al. (2013, JC)

ORI 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \left[\overline{(u'w')}^2 + \overline{(v'w')}^2 \right]}$$

WTQ 方案

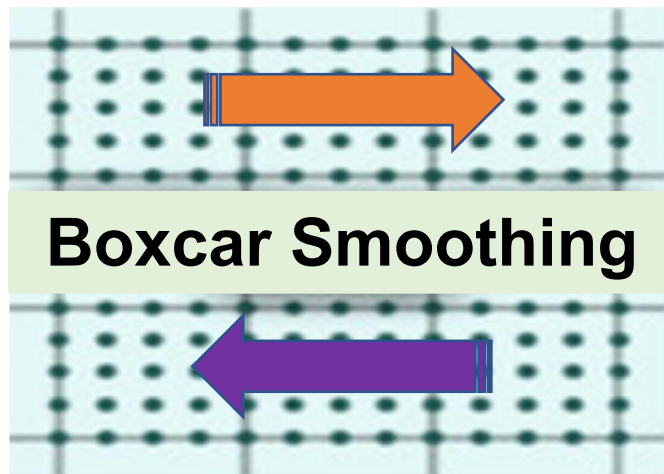
$$M = \sqrt{\rho_0^2 \overline{w'w'} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'}) \left[1 + \frac{f^2}{\Omega^2} \right]^{-1}}$$

where $\frac{f^2}{\Omega^2} = \left(\frac{fg}{N^2} \right)^2 \left(\frac{\overline{(T'/T_0)^2}}{\overline{w'w'}} \right)$

根据重力波极化关系理论，
可证明两个方案（ORI、WTQ）对应的M值相等。

重力波通量计算

局地空间滑动平均



ORI 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \left[\overline{(u'w')}^2 + \overline{(v'w')}^2 \right]}$$

WTQ 方案

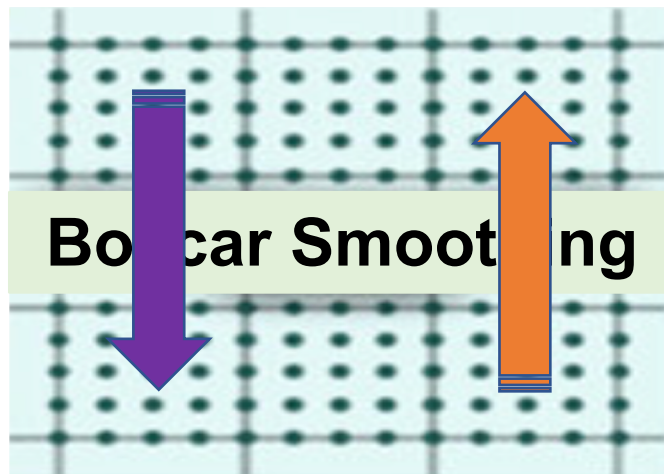
$$M = \sqrt{\rho_0^2 \overline{w'w'} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'}) \left[1 + \frac{f^2}{\Omega^2} \right]^{-1}}$$

where $\frac{f^2}{\Omega^2} = \left(\frac{fg}{N^2} \right)^2 \left(\frac{\overline{(T'/T_0)^2}}{\overline{w'w'}} \right)$

根据重力波极化关系理论，
可证明两个方案（ORI、WTQ）对应的M值相等。

重力波通量计算

局地空间滑动平均



ORI 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \left[(\overline{u'w'})^2 + (\overline{v'w'})^2 \right]}$$

WTQ 方案

$$M = \sqrt{\rho_0^2 \overline{w'w'} (\overline{u'u'} + \overline{v'v'}) \left[1 + \frac{f^2}{\Omega^2} \right]^{-1}}$$

where $\frac{f^2}{\Omega^2} = \left(\frac{fg}{N^2} \right)^2 \left(\frac{(\overline{T'/T_0})^2}{\overline{w'w'}} \right)$

根据重力波极化关系理论，
可证明两个方案（ORI、WTQ）对应的M值相等。

结 论

1. 平流层重力波动量通量

- 9-km ECMWF IFS vs. 18-km ECMWF IFS vs. 30-km ERA5 reanalysis
- 网格越细，重力波动量通量信号越强

2. 对流层重力波动量通量

- 统计学方案 + 动力学方案
- 优化方案的提出：利用降水信息过滤对流强迫信号

3. 绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

- 对流层和平流层： $WTQ > ORI$
- 建议采用 WTQ 方案 (ORI 方案可能导致严重低估)

结论

1. 平流层重力波动量通量

- **9-km ECMWF IFS** vs. **18-km ECMWF IFS** vs. **30-km ERA5 reanalysis**
- 网格越细，重力波动量通量信号越强

2. 对流层重力波动量通量

- 统计学方案 + 动力学方案
- 优化方案的提出：利用降水信息过滤对流强迫信号

3. 绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

- 对流层和平流层： $WTQ > ORI$
- 建议采用**WTQ**方案（**ORI**方案可能导致严重低估）

结论

1. 平流层重力波动量通量

- **9-km ECMWF IFS** vs. **18-km ECMWF IFS** vs. **30-km ERA5 reanalysis**
- 网格越细，重力波动量通量信号越强

2. 对流层重力波动量通量

- 统计学方案 + 动力学方案
- 优化方案的提出：利用降水信息过滤对流强迫信号

3. 绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

- 对流层和平流层： $WTQ > ORI$
- 建议采用 WTQ 方案 (ORI 方案可能导致严重低估)

结 论

1. 平流层重力波动量通量

- **9-km ECMWF IFS** vs. **18-km ECMWF IFS** vs. **30-km ERA5 reanalysis**
- 网格越细，重力波动量通量信号越强

2. 对流层重力波动量通量

- 统计学方案 + 动力学方案
- 优化方案的提出：利用降水信息过滤对流强迫信号

3. 绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

- 对流层和平流层：**WTQ** > **ORI**
- 建议采用**WTQ**方案（**ORI**方案可能导致严重低估）

1. 平流层重力波动量通量

- **9-km ECMWF IFS** vs. **18-km ECMWF IFS** vs. **30-km ERA5 reanalysis**
- 网格越细，重力波动量通量信号越强

2. 对流层重力波动量通量

- 统计学方案 + 动力学方案
- 优化方案的提出：利用降水信息过滤对流强迫信号

3. 绝对动量通量 (Absolute Momentum Flux)

- 对流层和平流层：**WTQ** > **ORI**
- 建议采用**WTQ**方案（**ORI**方案可能导致严重低估）

新工作：欢迎关注墙报（序号：6-6）！

墙报报告人：李子祎（中山大学）

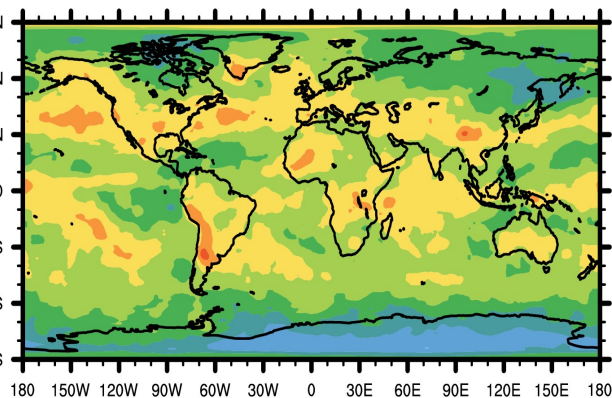
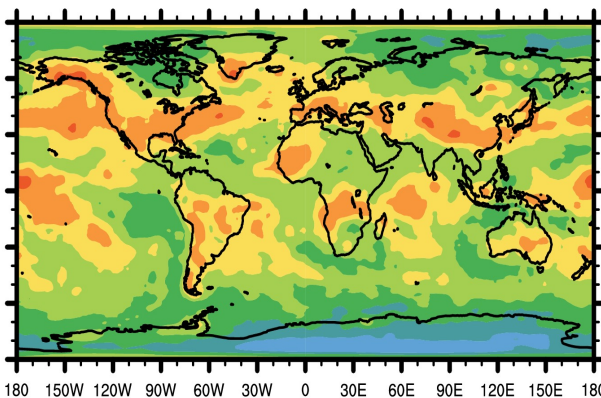
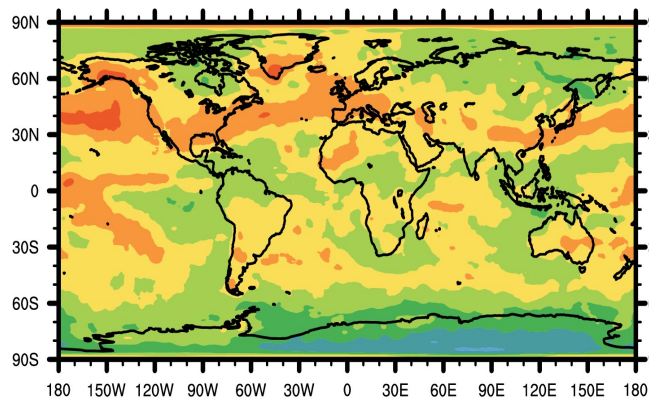
六套主流单位全球再分析资料下中尺度重力波动能的全球分布对比图（300hPa）

北半球冬季（欧洲北部发生强寒潮事件）：20天全球平均分布场（从12/25/2015至01/14/2016）

ERA5

CRA

MERRA2



CFSv2

JRA-55

ERA-Interim

