구름-장파복사 상호작용이 아시아 몬순 순환에 미치는 영향

The Impact of Interaction between Cloud and Longwave Radiation In Asia Monsoon Circulation

유 근 혁, 손 병 주
(서울대학교 지구환경과학부 대기과학과)

초 록

구름의 몬순의 활동에 있어서 직접적으로나 간접적으로 영향을 준다. 본 연구에서는 이러한 구름이 몬순의 활동에 어떠한 영향을 주는지를 알아보기 위해 ISCCP 구름자료와 GAME 재분석 자료를 입력자료로한 장파 복사 모델을 수행하였다. 모델 수행의 결과로 얻어진 대기 상부에서의 플럭스는 CERES 관측치와 비교하였으며, 구름에 의한 가열율은 몬순활동을 해석하기 위해 사용하였다.

구름이 몬순에 끼치는 영향을 파악하기 위해 맑은 대기의 가열율과 구름을 포함한 평균 대기의 가열율의 차이를 구하였으며, 이를 수평과 연직분포의 관점에서 해석하였다. 가열율의 지리적 분포는 수평적으로는 인도양에서 장파 복사 가열율의 최대가 나타났으며, 가열의 최저 (냉각)은 티벳고원에 나타났다. 이러한 공간적 분포는 구름이 남북방향으로 차등가열을 유발시키고 있음을 보여주고 있어 구름의 분포가 열적인 몬순순환을 강화시켜주고 있음을 시사하고 있다. 이러한 차등가열의 강화는 동서방향으로도 나타나 구름이 동서방향 순환에도 영향을 줄 수 있음을 보여준다.

구름에 의한 복사 가열의 연직구조는 운정에 의한 냉각과 운저에 의한 가열이 일어날 수 있음을 보여주고 있으며, 이로 인해 대기의 불안정성이 높아져 연직 운동을 향상시킬 수 있는 역할을 하고 있음이 밝혀졌다. 즉 몬순순환에 의해 생성된 구름은 구름 생성의 원인이 되었던 순환을 더욱 강화시키고 있음을 보이고 있다.

주요어 : 몬순순환, 장파복사, 구름복사강제력, 대기가열율, OLR, 복사전달

1. 서 론

몬순의 가장 큰 특징은 1년 주기에 있다. 이 1년 주기의 날씨변동으로 인하여 몬순의

영향을 받는 많은 지역에서의 경제적, 문화적인 모습이 습한 시기와 건조한 시기가 뚜렷이 구별이 된다. 습한 시기란 물론 많은 강수를 동반하는 더운 시기를 의미하며 바람은 바다에서 육지로 불어가는 모습을 보인다. 모든 대기와 해양의 운동은 태양 가열의 결과이다. 엄격히 말해서, 대기와 해양에서의 운동의 힘이 되는 것은 가열(heating)이라기보다는 그 가열(heating)의 분포라고 할 수 있다. 여름 몬순의 경우 열대 순환계의 변화로 하계-강우를 동반하는데 이는 대류활동에 의한 다량의 그리고 다양한 형태의 구름이 몬순 지역을 덮고 있음을 나타낸다. 하지만 지구의 에너지 수지와 기후에 대한 민감도에 대한 구름의 역할에 대한 연구는 비교적 근래에 와서 이루어 졌다. 또한 이전의 연구들에서는 총 구름의 양에 대한 대기 상부에서의 순 복사 값의 변화들을 조사한 것이 많았다. 이러한 분석들은 구름의 연직분포가 대기 내에 비단열 가열을 유발하고 이가 다시 순환에 영향을 줄 수 있음을 고려할 때 구름의 몬순에 끼치는 영향을 조사하기에는 충분한 연구라 할 수 없다. 본 연구의 주 목적은 구름과 장파복사 상호작용으로 인한 복사 가열율이 몬순의 진행에 따른 역할을 이해하는 데 있다. 특히 구름을 ISCCP 구름 유형에 따라 세분화 하여 각 운형에 따른 장파복사에의 기여도와, 이 기여가 몬순 순환에 주는 영향을 알아보고자 한다. 앞서 많은 관측과 연구는 상층 구름에 따른 흡수와 순환에의 영향을 이해하는데 반하여 본 연구는 지표면에서부터 대기 상층에 까지 연직적인 모습을 살펴보는 것이다. 또한 본 연구에서는 몬순이 진행되는 과정에서 구름의 역할에 대해서도 살펴보고자 한다. 이를 위해 연구의 영역으로 20°S－50N°, 40°E－180°E를 선택하였다.

2. 자 료

아시아 전반을 포함하는 연구영역에서 1998년 4월부터 9월까지의 자료를 사용하였다. 모델 수행의 입력 자료로 사용한 자료로는 크게 GAME 재분석 자료와 ISCCP 구름 자료가 있다. 또한 모델 수행 결과를 비교하기 위하여 CERES의 장파 복사 자료를 사용하였다.

3. 복사 전달 모델

본 연구에서 사용한 복사모델은 Smith and Shi(1992)에 의해 기술된 무작위 비산란 중간 밴드모델이다. 이 모델은 산란을 고려하지 않은 상태에서 기체 분자에 의한 복사 흡수영역을 고려하였으며, 2－250㎛의 적외선 영역을 27 스펙트럼 밴드로 나누었다. 이 모델은 상향과 하향의 적외 플럭스의 연직 구조와 대기층에서의 순 적외 기온 감률을 제공하기 위해 고안되었다. 흡수 기체로는 H2O(선, 연속 흡수 포함), O3, CO2와 균등혼합기

체 (uniformly mixed gas)인 N2O, CH4, CO, N2, O2를 포함한다. LOWTRAN－5의 투과율 자료를 이용하여 H2O와 CO2 균등 혼합 기체에 대해서는 Goody의 무작위 밴드모델을, 9.6㎛의 O3 밴드의 통과율 계산에서는 Malkmus의 무작위 밴드모델 (Malkmus, 1968)이 사용되었다. 구름에 의한 효과는 우적과 빙정의 양으로 매개 변수화 하였다. 모델에서의 지표의 경계층 조건은 지표의 방출율과 함께 하층 대기온도와 지표면 온도와의 차이로 정의되었다.

3.1 맑은 대기에서의 복사 전달

산란이 없는 맑은 대기의 경우 주어진 파 수 간격 $\triangle\nu$, 평평한 대기층의 기압면 p에서 장파의 상향과 하향 복사속 $[F^{\uparrow}_{\triangle\nu}(p), F^{\downarrow}_{\nu}(p)]$은 다음과 같이 주어진다.

$$F^{\uparrow}_{\triangle\nu}(p) = \int_{\triangle\nu} B_{\nu}(T_s)\tau_{\nu}(p,p_s)d\nu + \int_{\triangle\nu}\int_{p_s}^{p} B_{\nu}[T(p')]\frac{\partial\tau_{\nu}(p',p)}{\partial p'}dp'd\nu \quad (1)$$

$$F^{\downarrow}_{\triangle\nu}(p) = \int_{\triangle\nu}\int_{p_s}^{p} B_{\nu}[T(p')]\frac{\partial\tau_{\nu}(p',p)}{\partial p'}dp'd\nu \quad (2)$$

여기서 ν는 파수, $B_{\nu}[T(p')]$는 플랑크 함수, $\tau_{\nu}(p,p')$는 기준 기압면 (p)과 임의의 기압면 (p') 사이의 확산 투과도 (diffuse transmittance), T는 온도, 아래 첨자 s는 지표면 값을 의미한다.

주어진 기압면 p에서 상향과 하향 장파 총 복사속은 27개의 스펙트럼 밴드에서 계산된 각각의 밴드 복사속을 적분하여 얻는다. 즉,

$$F^{\uparrow}_{clr}(p) = \sum_{i=1}^{27}[F^{\uparrow}_{\triangle\nu}(p)]_i \quad (3)$$

$$F^{\downarrow}_{clr}(p) = \sum_{i=1}^{27}[F^{\downarrow}_{\triangle\nu}(p)]_i \quad (4)$$

여기서 아래 첨자 clr은 맑은 대기를 지칭한다.

3.2 흐린 대기의 복사 전달

흐린 대기의 복사전달 계산은 구름의 중첩을 고려하지 않으며, 구름의 기하학적 모양을 간단화한 평행 수평면 이론 (plane-parallel theory)을 적용한다. ISCCP 구름 분류에

근거를 둔 Fig. 1의 여섯 가지 운형 각각에 대하여 구름 복사 특성을 다음과 같이 정의된 LWP의 함수로 진단한다.

$$LWP = \int_{z_B}^{z_T} \rho_\ell (LWC) dz \tag{5}$$

구름이 낀 대기의 총 복사속은 맑은 대기와 6가지 운형에 대한 복사속을 각각 계산한 후 이들을 맑은 대기의 비율과 각 운량으로 하중하여 계산한다. 즉,

$$F^{\uparrow}(p) = (1 - A_{tot}) F_{clr}^{\uparrow} + \sum_{i=1}^{6} (F_{cld}^{\uparrow})_i A_i \tag{7}$$

여기서 $F_{cld}^{\uparrow}$는 구름층을 통과하는 복사속이며 A_{tot}은 ISCCP 자료에 근거한 6가지 종류의 운량을 합한 총 운량이다. 따라서 $A_{tot} = \sum_{i=1}^{6} A_i$ 이다. 여기에서 중첩하는 구름은 고려하지 않는다. 식 (7)과 유사하게 어떤 기압면 p에서 총 하향 복사속은 다음과 같이 주어진다.

$$F^{\downarrow}(p) = (1 - A_{tot}) F_{clr}^{\downarrow} + \sum_{i=1}^{6} (F_{cld}^{\downarrow})_i A_I \tag{8}$$

식 (7)과 식 (8)에서 F_{clr}과 F_{cld}는 식 (3)과 (4)에서와 같이 27개의 스펙트럼 밴드에서 계산된 복사속을 합한 것이다.

4. 모델 수행 결과

4.1 Outgoing Longwave Radiation

모델 수행에 있어서 가장 기본적인 결과는 각 층에 해당하는 상향 및 하향 플럭스의 값이다. 기본적으로 각 기압면을 기준으로 플럭스가 계산되었으며 그 플럭스 값 중에서 최상층의 상향 플럭스가 OLR이다. Fig. 2와 Fig. 3은 각 달의 평균 OLR을 나타낸다. 맑은 대기에서의 OLR 값 (왼쪽 그림)은 지표의 온도와 매우 밀접한 연관이 있다. 지표의 온도가 높은 사막지역에서 높은 OLR 분포를, 지표 온도가 낮은 고원지대에서 낮은 OLR 분포를 나타남을 확인 할 수 있다. 이는 맑은 대기에서의 OLR은 하층에서의 플럭스가 상층으로 복사 전달되면서 흡수를 이루는 물질은 H2O와 O3, 그리고 CO2등 기체에 의한 흡수만 이루어지기 때문이다.

각 운형의 특징을 살펴보면 하층 구름으로 분류된 LC 와 LS 에서는 비교적 높은 OLR

을 방출하며 맑은 대기에서의 OLR의 패턴과 유사하다. 티벳 고원에서 나타나는 에러는 티벳 고원의 평균 기압이 구름 분류의 기준이 되었던 680hPa 보다 낮은 500－600hPa를 나타내어 LC 와 LS 가 구현되지 못한 것이다. 반면에 중층과 상층에는 맑은 대기와는 확연히 다른 형태를 보이고 있다. 또한 구름의 물리적 특징인 광학적 두께가 큰 구름에서는 더욱 낮은 OLR값을 보인다. 이렇게 구현된 OLR 분포를 이용해 다음 절에 나오는 운형별 복사 강제력을 구해 보았다.

4.2 운형별 복사 강제력

복사 전달 계산에서 얻어진 1998년 여름철, 대기상부에서의 구름 복사 강제력을 CERES 관측자료와 비교하였다 (Fig. 14). 계산한 구름 복사 강제력은 6월 그 최대지역이 벵갈만 남부에 위치하고 있으며, 7월과 8월 동안 점차 북상을 하여 인도 내륙에 위치하고 있음을 알 수 있다. 또한 그 전반적인 형태가 CERES 관측치와도 잘 일치하는 것을 보여준다. 그러나 정량적인 면에서 CERES 관측치와 비교하여 열대 우림지역, 적도지방의 태평양 지역에서 북아프리카로 이어지는 ITCZ (Intertropical Convergence Zone), 서태평양 난수역등 대류활동이 왕성한 지역에서는 약 10Wm-2이상의 복사속 차이가 나타나고 있다. Fig. 14에서 나타나는 불일치는 복사전달 모델의 결함이나 입력 자료의 오차, 또는 CERES의 맑은 대기 복사속이 구름을 포함하는 실제 대기보다 건조한 대기를 대표하는 값으로 편이되는 가능성 등이 이러한 불일치의 원인이 될 수 있다.

5. 결　론

복사 전달 계산에서 얻어진 복사량으로부터 계산한 대기 가열율은 인도양에서 구름에 의한 복사 가열이 티벳 고원 지역을 중심으로 복사 냉각이 나타남을 보여준다. 이러한 복사 가열과 냉각의 수평 분포는 몬순지역을 중심으로 남북 방향의 차등가열을 유발하고 있다. 몬순 순환에 있어서 이와 같은 차등 가열의 중요성은, 차등 가열이 대기에서의 열 소스와 열 싱크의 직접적인 반응인 동시에 대기 대순환이 차등 가열에 의한 잠재 에너지와 변환된 형태의 운동에너지에 기인하는 것이다. 즉, 구름이 장파 복사 전달 과정을 통해 몬순 지역에서 차등 가열을 유발하고 있으며, 이 차등 가열이 몬순의 순환을 강화시키는 것이다. 그리고 몬순이 진행함에 따라 차등 가열의 정도가 더욱 커지므로, 구름에 의한 차등 가열과 몬순의 순환은 사승 작용을 가지고 발전한다고 할 수 있다. 연직 방향에서의 구름에 의한 장파 복사 가열 효과는 운정과 운저가 위치해 있는 고도에서 각각

복사 냉각과 가열이 뚜렷하게 나타나고 있다. 몬순이 시작되는 시기인 5월부터 서서히 발달하기 시작하여 6, 7, 8월에 더욱 강화되고, 9월에는 약화되는 모습을 보인다. 구름에 의한 대기에서의 가열과 냉각의 효과로 대기의 안정도를 떨어뜨리게 되고, 따라서 연직 운동을 유발시키는 원인이 된다. 이렇게 유발된 연직 운동은 몬순 지역에서의 대류운동을 보다 증가시키는데 기여를 할 것이므로 구름의 장파 복사 과정을 통한 가령의 연직적인 효과 역시 여름 몬순의 순환을 강화시키는 역할을 하는 것이다.

6. 참고 문헌

손병주, 1996: 구름이 지표장파복사 수지에 미치는 영향. 한국기상학회지, 32, 229-242.

Bernstein, L. S., A. Berk, P. K. Acharya, D. C. Robertson, G. P. Anderson, J. H. Chetwynd, and L. M. Kimball, 1996: Very Narrow Band Model Calculations of Atmospheric Fluxes and Cooling Rates. J. Atmos. Sci., 15, 2887-2904.

Griffith, K., S. K. Cox, and R. G. Knollenberg, 1980: Infrared properties of tropical cirrus clouds inferred from aircraft measurements. J. Atoms. Sci., 37, 1077-1087.

IPCC, 2001: Climate Change: The IPCC scientific assessment. Cambrige University Press, 102pp.

Lau, K. M. and M. T. Li, 1984: The Monsoon of East Asia and its Global Associations - A Survey. Bull. Amer. Meteor. Soc., 65, 114-125.

Krishnamurti, T. N., 1985: Summer Monsoon Experiments - A review. Mon. Wea. Rev., 113,

1590-1626.

Liou, K. N., 2002: An Introduction to Atmospheric Radiation. Academic Press, 583pp.

Luo, H., and M. Yanai, 1983: The large-scale circulation and heat sources over the Tibetan Plateau and surrounding area during the early summer of 1979. Part I : Precipitation and kinematic analyses. Mon. Wea. Rev., 111, 922-944.

Mehta, A. V., and E. A. Smith, 1997: Variability of radiative cooling during Asian Summer Monsoon and its influence on intraseasonal waves. J. Atmos. Sci., 54, 941-966.

Paltridge, G. W., and C. M. R. Platt, 1981: Aircraft measurements of solar and infrared radiation and the microphysics of cirrus cloud. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 107, 367-380.

Prabhakara, C. and G. Dalu, 1976: Remote Sensing of the Surface Emissivity at Over the Globe. J. Geophy. Res., 81, 3719-3724.

Shi, L., and E. A. Smith, 1992: Surface forcing of the infrared cooling profile over Tibetan Plateau. Part II: Cooling rate variation over large scale plateau domain during summer monsoon transition. J. Atmos. Sci., 49, 823-844.

Smith, E. A., and L. Shi, 1992: Surface forcing of the infrared cooling profile over the Tibetan Plateau. Part I : Influence of relative longwave radiative forcing at high latitude. J. Atmos. Sci., 49, 805-822.

Smith, E. A., and L. Shi, 1995: Reducing discrepancies in atmospheric heat budget of Tibetan Plateau by satellite-based estimates of radiative cooling and cloud-radiation feedback. Meteor. Atmos. Physics, 56, 229-260.

Sohn, B. J. 1999: Cloud-Induced Infrared Radiative Heating and Its Implications for Large - Scale Tropical Circulation. J. Atmos. Sci., 56, 2657-2672.

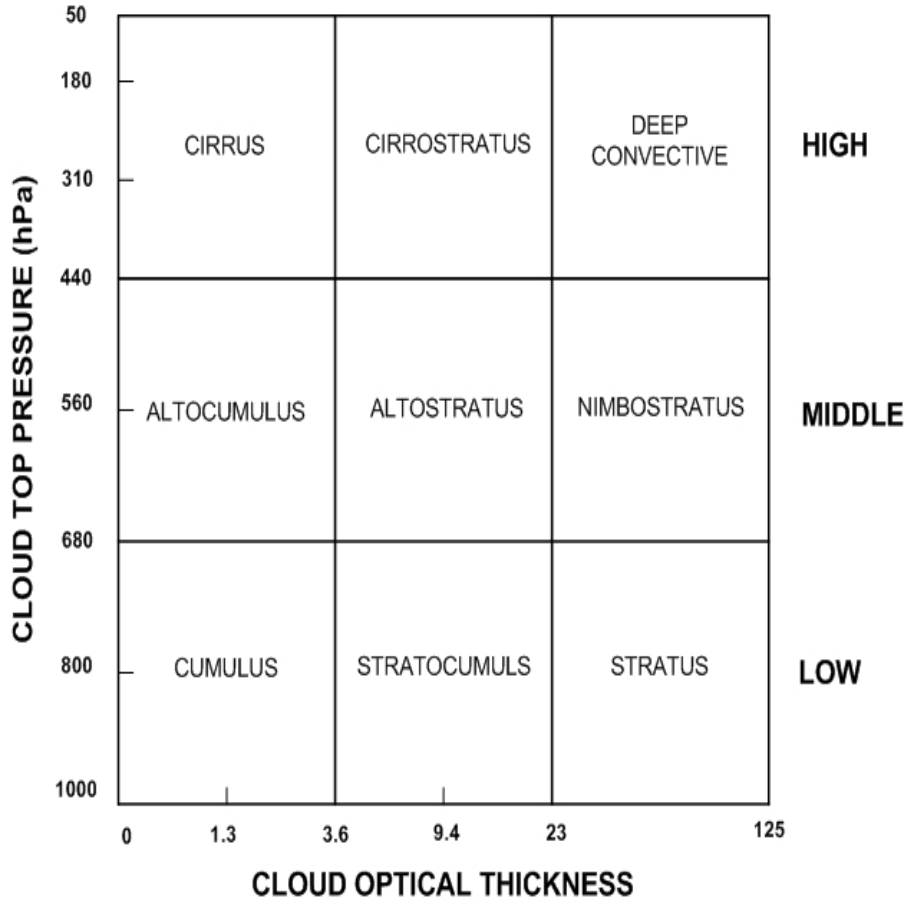

Figure 1. ISCCP cloud classification.

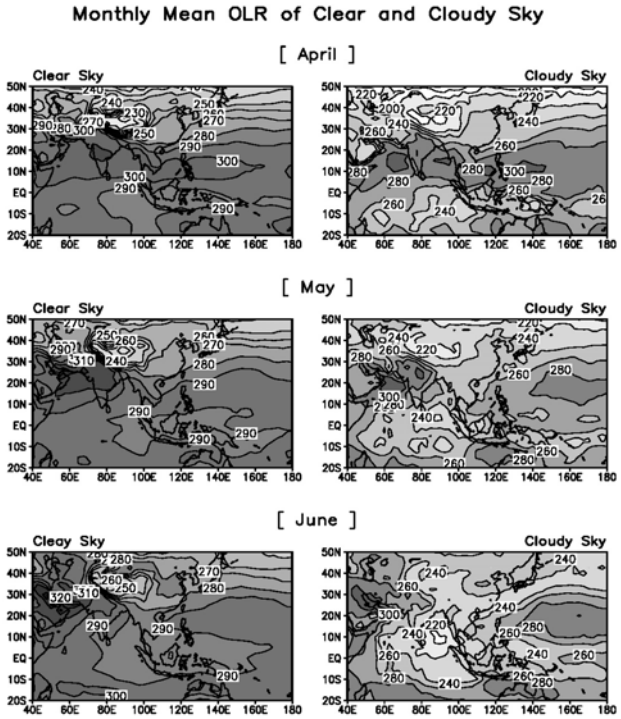

Figure 2. Monthly mean OLR (Wm-2) of clear and cloudy sky for April, May, June 1998.

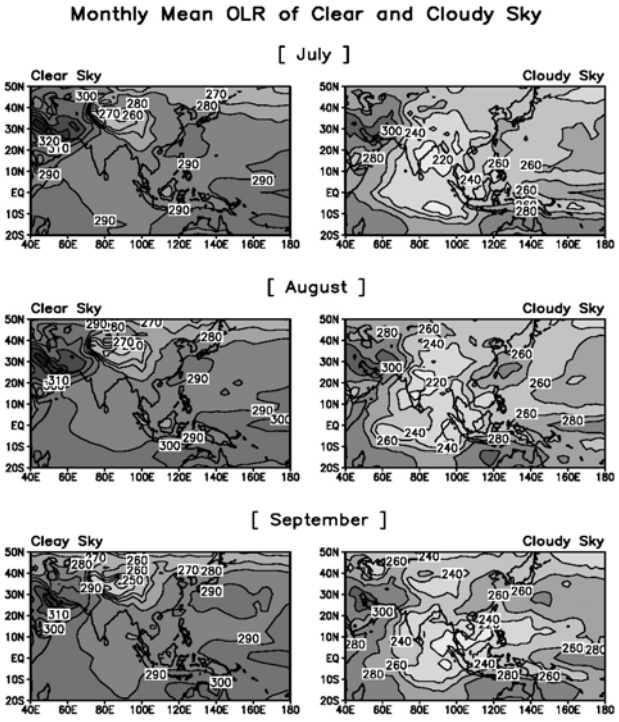

Figure 3. Same as Fig. 2 except for July, August, September 1998.

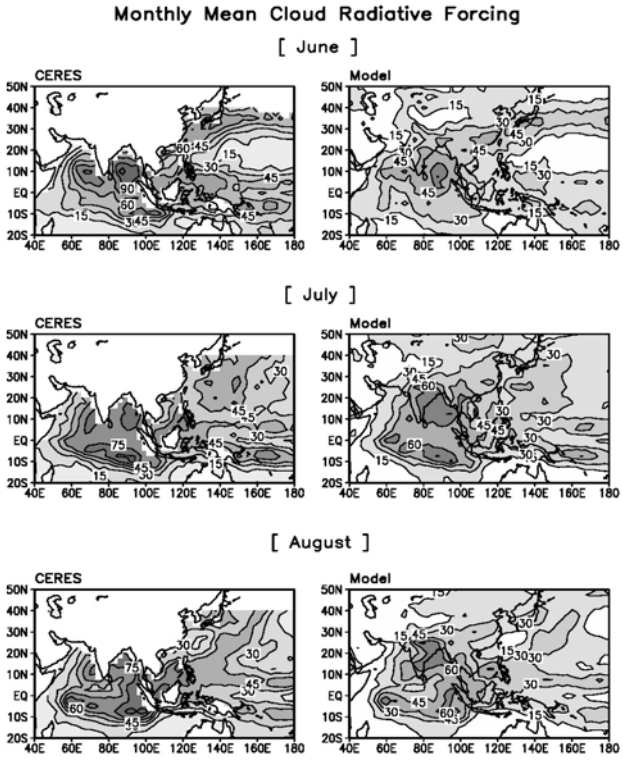

Figure 4. Longwave cloud-radiative forcing at the top of the atmosphere observed by the CERES and the simulated cloud radiative forcing for the June, July and August 1998.

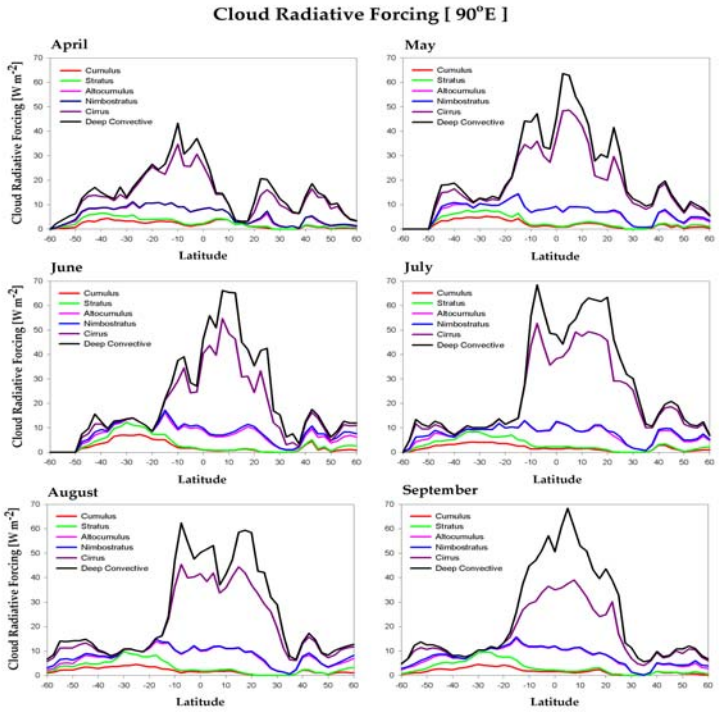

Figure 5. Cloud radiative forcing by various cloud types at 90°E.

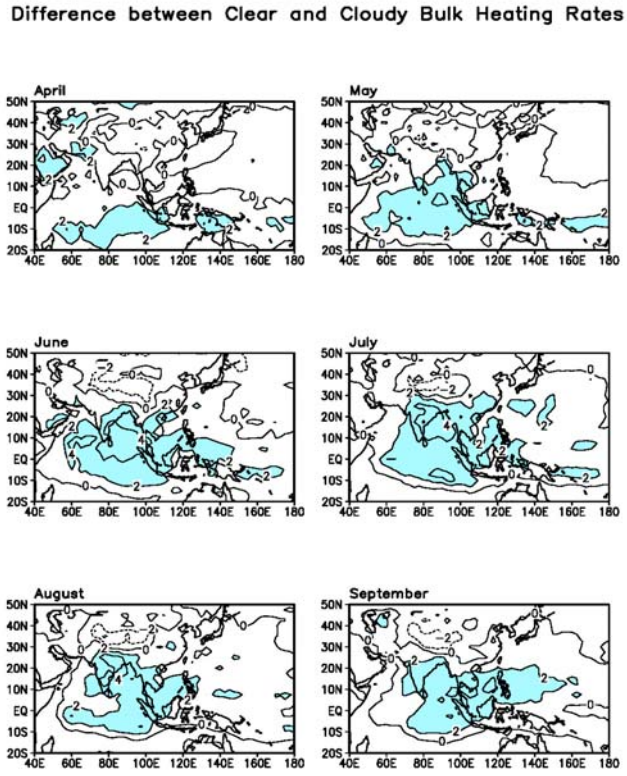

Figure 6. Bulk longwave radiative heating difference between clear-sky and cloudy-sky atmosphere for 1998. Values are multiplied by 10 with units given in °C day-1.

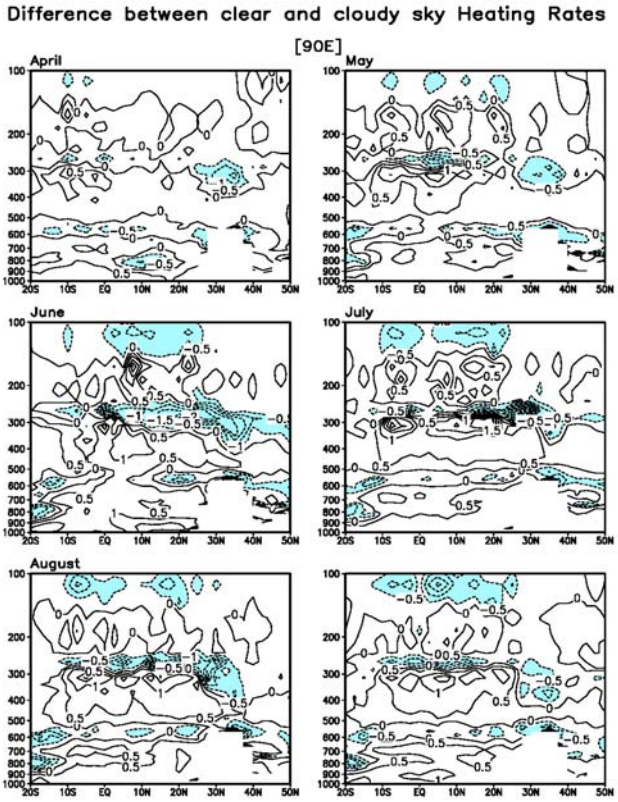

Figure 7. Vertically averaged bulk longwave radiative heating difference between clear-sky and cloudy-sky atmosphere at 90°E in 1998 with units given in °C day-1.