

工业 SO_2 排放对东亚和我国 温度变化的影响

钱 云 符淙斌 胡荣明* 王自发

(中国科学院大气物理研究所全球变化东亚区域研究中心, 北京 100029)

摘 要 根据东亚地区工业 SO_2 排放资料和硫化物输送模式模拟得到的 SO_4^{2-} 气溶胶的区域分布状况, 计算了 SO_4^{2-} 对地气系统的直接辐射强迫作用, 并用能量平衡模式模拟了其对应东亚和我国温度变化的影响。模拟结果和资料分析表明, 80 年代以来在全球变暖的背景下, 我国南方大部分地区平均气温 (特别是日最高温度和白天温度) 普遍下降。工业 SO_2 排放引起的大气中 SO_4^{2-} 含量的增加可能是引起降温的主要原因之一。

关键词 二氧化硫 硫酸盐气溶胶 辐射强迫 温度变化

1 引言

地球环境和气候的变化受人类活动的影响越来越大。全球平均温度究竟将会上升还是下降, 这不仅取决于大气中 CO_2 等温室气体浓度的增加, 同时还取决于对流层大气中硫酸盐气溶胶 (SO_4^{2-}) 含量的变化。 SO_4^{2-} 的增加可能会增大对太阳辐射的反射从而减少地气系统吸收的太阳辐射通量, 而且 SO_4^{2-} 作为云凝结核会影响成云和云量, 作为一种间接强迫影响地气系统的辐射和能量收支^[1]。另一方面, 和 CO_2 的温室效应不同, 由于 SO_4^{2-} 空间分布上的区域性特征, 其气候效应的区域性特征也十分明显。

SO_2 主要来源于工业活动, 对流层大气中超过三分之二的 SO_2 是人为造成的, 其中 90% 产生于北半球^[2]。在晴空或云内, SO_2 通过不同方式都能转化成 SO_4^{2-} 微粒。根据观测研究, 全球已形成北美、欧洲和东亚 3 个 SO_2 和 SO_4^{2-} 高值中心, 其中东亚地区是全球经济发展最快污染排放源增长最快的地区, 大气中硫化物含量也增长最快^[3]。本文利用已建立的硫化物输送模式模拟了东亚地区工业 SO_2 的排放和 SO_4^{2-} 的区域分布特征, 计算了其光学厚度和对地气系统的直接辐射强迫作用。最后用能量平衡模式模拟了 SO_4^{2-} 对东亚和我国温度变化的影响, 并探讨了 SO_4^{2-} 的温度效应和 80 年代以来我国温度变化的可能关系。

2 SO_4^{2-} 的区域分布特征

利用考虑了相关的物理和化学变化过程的三维欧拉型硫化物输送模式^[4], 模式控制

1996-03-21 收到

* 现在国家气候中心工作

方程中包含了干沉降和降水的湿清除以及污染物的气相和液相化学过程, 考虑了温度、水汽、光强、云雾及各种物质浓度对气相转化率的影响。区域为东经 $98^{\circ}\sim 146^{\circ}\text{E}$, 北纬 $16^{\circ}\sim 50^{\circ}\text{N}$, 基本代表东亚地区, 水平格距 $1^{\circ}\times 1^{\circ}$, 采用 C 交错网格, 垂直方向分为 8 层。气象场资料采用欧洲中心资料样条插值到模式格点上, SO_2 排放资料分别根据中国环保局的统计年报和 Akimoto^[5] 资料。

通过对模式参数的灵敏性试验以及物质守恒性试验, 模式有较高的分辨率和守恒性。我们分别模拟了东亚地区不同季节和年平均的 SO_4^{2-} 的空间分布状况。模拟结果和湿沉降中 SO_4^{2-} 实测值作了比较, 相关系数达 0.8, 平均误差 20%。

图 1 是模拟的年平均对流层大气中工业 SO_4^{2-} 含量分布。从图上可以看到, 在整个对流层, 模式区域中部地区 SO_4^{2-} 含量较大, 极大中心分别在长江中下游地区、黄河下游和西南部分地区。整个模式区域和我国东中部地区 SO_4^{2-} 的平均含量分别达 5.76 mg/m^2 和 10.82 mg/m^2 。

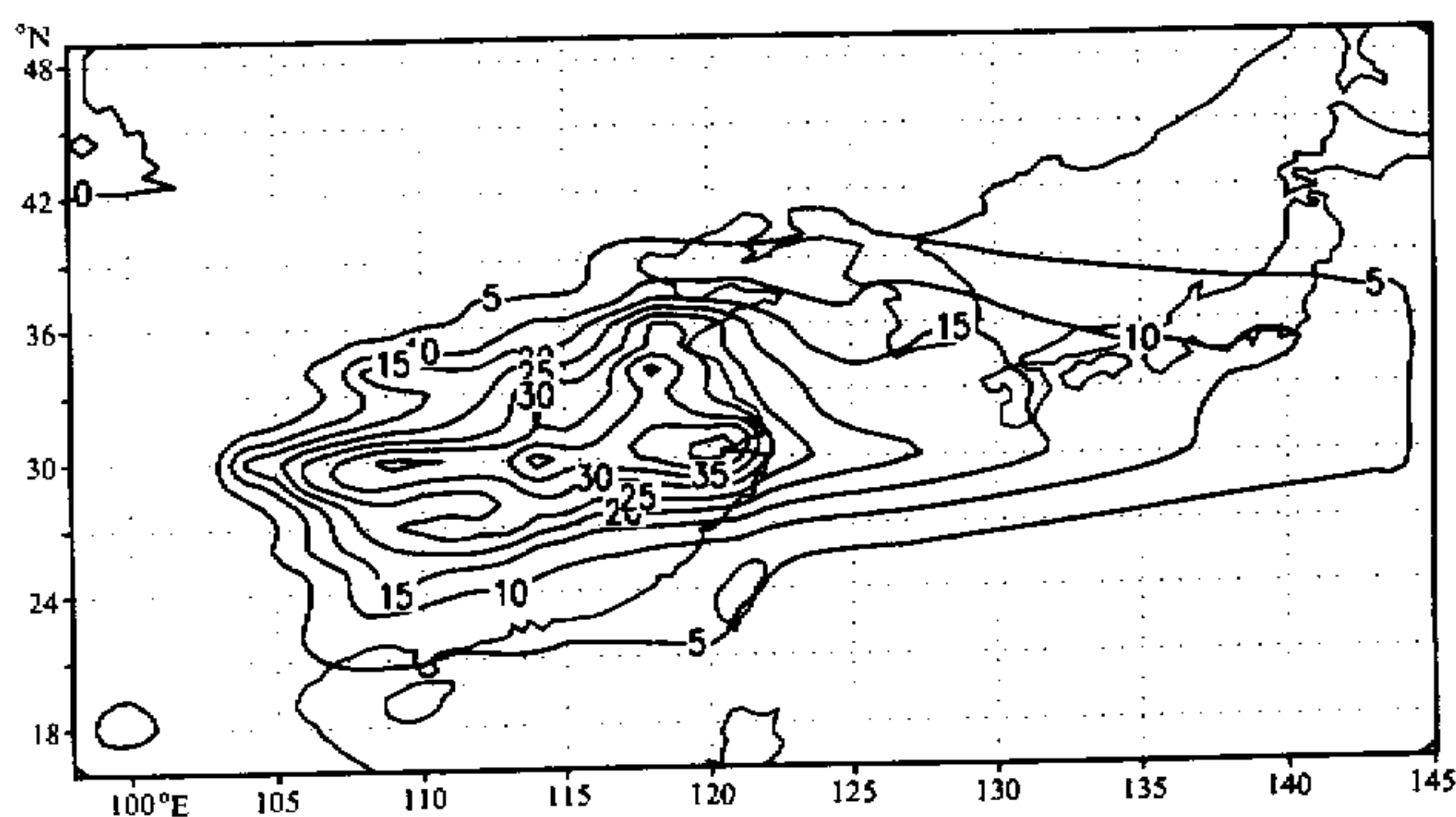


图 1 对流层工业 SO_4^{2-} 含量的区域分布。单位: mg/m^2

模拟的各模式层浓度分布图上显示出低层 SO_4^{2-} 含量较高, 且主要分布在大陆地区, 与 SO_2 排放源分布较为一致。随着高度升高扩散增强其分布区域逐渐向南向东扩展, 浓度也逐渐减小。其季节变化特征与四季的气候要素场有关, 夏季我国受季风气候的影响, 雨水较充沛, 清除和沉降量较大, 所以大气中 SO_4^{2-} 浓度反而较小。

3 SO_4^{2-} 对地气系统的辐射强迫作用

假设 $c(z)$ 为大气中 SO_4^{2-} 浓度, Z_p 为对流层顶, δ 为 SO_4^{2-} 光学厚度, 则有

$$\delta = \int_0^{Z_p} \alpha c(z) dz, \quad (1)$$

α 为质量散射系数, 取环境湿度下的平均值 $8.5 \text{ m}^2 \cdot \text{g}^{-1}$ [6]。

对于单独的气溶胶层, 散射辐射通量(F_s)比入射通量(F_i)之比

$$F_s / F_i = 1 - \exp(-\delta \sec \theta_0) \approx \delta \sec \theta_0, \quad (2)$$

$\delta \sec \theta_0$ 为斜距光学厚度。设 β 为散射的向上部分, 则气溶胶层的反射率为

$$R_a = \beta \frac{F_s}{F_i} = \beta \delta \sec \theta_0. \quad (3)$$

假设下垫面反照率为 R_s , 则下垫面和气溶胶层形成的复合反照率 R_{as} 为

$$R_{as} = R_a + T_a^2 R_s [1 + R_a R_s + (R_a R_s)^2 + \dots] = R_a + \frac{T_a^2 R_s}{1 - R_a R_s}, \quad (4)$$

这里, $T_a = 1 - R_a$ 为气溶胶层透过率 (不考虑吸收)。

因此, 可以得到由于气溶胶的存在地气系统反照率的变化

$$\Delta R_{as} = R_{as} - R_s \approx R_a + (1 - 2R_a)R_s(1 + R_a R_s) - R_s \approx R_a(1 - R_s)^2$$

(因为 $R_a \ll 1$), 但这只是表示气溶胶层顶反照率的变化, 由于上层大气对辐射的削弱作用 (设透射率为 T_i), 实际的行星反照率 R_p 的变化比 ΔR_{as} 要小些,

$$\Delta R_p \approx T_i^2 \Delta R_{as} (1 - A_c) = T_i^2 (1 - A_c) (1 - R_s)^2 \beta \delta \sec \theta_0. \quad (5)$$

太阳入射辐射通量为

$$\mu_0 Q_0 = \cos \theta_0 Q_0,$$

Q_0 为太阳常数, 取 1370 W/m^2 , $\mu_0 = \cos \theta_0$, θ_0 为太阳天顶角。所以, 地气系统平均的辐射强迫的损失为

$$\Delta F_r = \frac{1}{2} \mu_0 Q_0 \Delta R_p = \frac{1}{2} Q_0 T_i^2 (1 - A_c) (1 - R_s)^2 \beta \delta, \quad (6)$$

1/2 表示就平均状况而言, 各地只有一半时间有太阳照射。 T_i 取平均值约 0.76^[6]。

由 (1) 式已求出光学厚度 δ , 根据区域分布的平均云量资料 A_c 和全球平均反照率资料 R_s ^[7], 由 (6) 计算出 SO_4^{2-} 引起的地气系统的辐射损失, 见图 2。

由图可见, SO_4^{2-} 引起的辐射强迫区域分布和其浓度的区域分布较类似, 极大负强迫中心分别在长江三角洲、胶东半岛及华中地区, 东海、黄海和日本海附近也有较强的负强迫。表 1 比较了不同地区工业 SO_4^{2-} 的光学厚度和辐射强迫作用。

从图 2 和表 1 可以看到工业 SO_4^{2-} 对东亚地气系统的辐射冷却作用。目前, 全球平均 CO_2 的温室效应约 1.5 W/m^2 , 加上其它温室气体约为 2.5 W/m^2 , 而在我国黄河以南的大部分地区 SO_4^{2-} 的辐射强迫作用达 -4 W/m^2 以上, 最大值甚至超过

表 1 区域平均的大气中工业 SO_4^{2-} 的含量 c 、光学厚度 δ 和辐射强迫作用 ΔF_r

	全 球	北半球	东亚(模式区域)	中国中部东部*
$c / [\text{mg/m}^2]$	2.00	3.58	5.76	10.82
$\delta / [\times 10^{-2}]$	1.70	3.04	4.87	9.22
$\Delta F_r / [\text{W/m}^2]$	-0.6	-1.07	-1.70	-3.18

* 中国中部东部指我国东经 106°E 以东地区

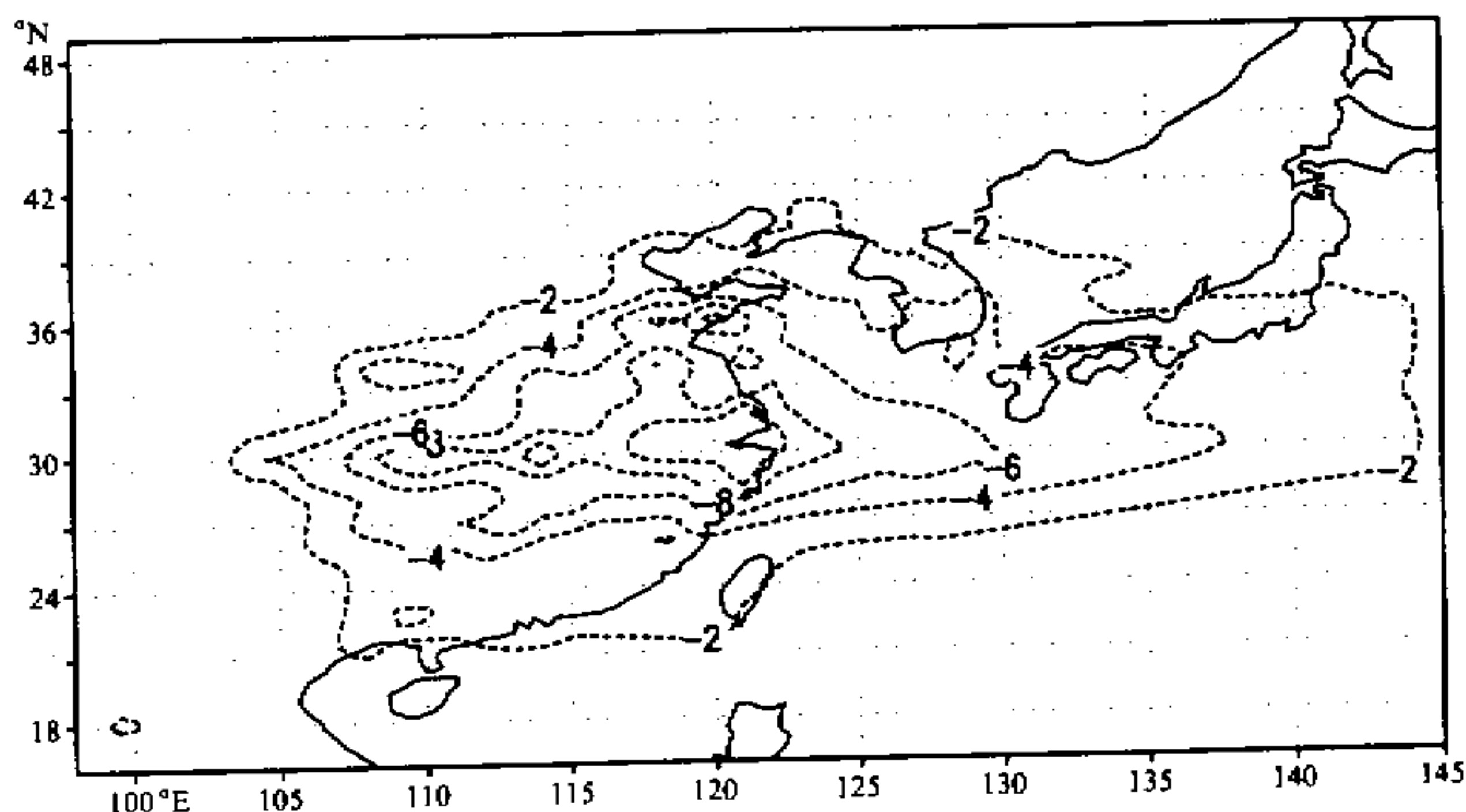


图2 东亚地区工业 SO_4^{2-} 对地气系统的辐射强迫作用。单位: W/m^2

$-10 \text{ W}/\text{m}^2$, 超过了温室气体的温室效应。

4 SO_4^{2-} 对东亚和我国温度变化的影响

根据 SO_4^{2-} 对地气系统的辐射强迫作用, 我们用水平二维的能量平衡模式模拟了 SO_4^{2-} 的温度效应。能量平衡模式是在 North 等^[8]的二维能量平衡模式的基础上发展起来的, 并把全球下垫面状况的地理分布引入模式, 对红外辐射、反照率和能量的水平输送等参数化过程都作了一定的改进。

模式的基本方程为

$$C(\vec{r}) \frac{\partial T(\vec{r}, t)}{\partial t} - \nabla [D(\vec{r}) \cdot \nabla T(\vec{r}, t)] + A + BT(\vec{r}, t) = QS(\vec{r}, t)[1 - \alpha(\vec{r})], \quad (7)$$

式中 $\vec{r}$ 为位置矢量, $C(\vec{r})$ 为单位面积的有效热容量, 与下垫面状况有关; $-\nabla [D(\vec{r}) \cdot \nabla T(\vec{r}, t)]$ 代表热量的水平输送, 其中 $D(\vec{r})$ 为包含各种形式的水平热量输送的热扩散系数; $A + BT(\vec{r}, t)$ 为地气系统的射出长波辐射, 经验系数 $A = 203.3 \text{ W}/\text{m}^2$, $B = 2.09 \text{ W}/\text{m}^2 \cdot \text{K}$; $QS(\vec{r}, t)[1 - \alpha(\vec{r})]$ 为地气系统的短波辐射收支。

模式采用谱方法求解。将方程(7)各量按球谐函数展开, 其中的时间变化项再展开成傅氏级数的形式, 求解方程组可求得各谐波 n 的振幅和位相, 再对 n 求和即可得 $T(\vec{r}, t)$ 。实际计算时先求解方程(7), 积分至准平衡态得到控制试验温度 T_0 。然后在方程右侧的辐射收支项中加上第二节算得的 SO_4^{2-} 的辐射强迫作用, 积分求解得到敏感性试验的温度 T_1 , 其差值 $\Delta T_{\text{SO}_4^{2-}} = T_1 - T_0$ 即代表 SO_4^{2-} 引起的温度变化。

图3为模拟的 $\Delta T_{\text{SO}_4^{2-}}$ 的区域分布, 可以看到我国黄河以北广大地区普遍降温明显, 最大降温区在长江中下游地区, 降温幅度超过 0.4°C , 我国东部、中部及西南部分地区降温幅度也较大。

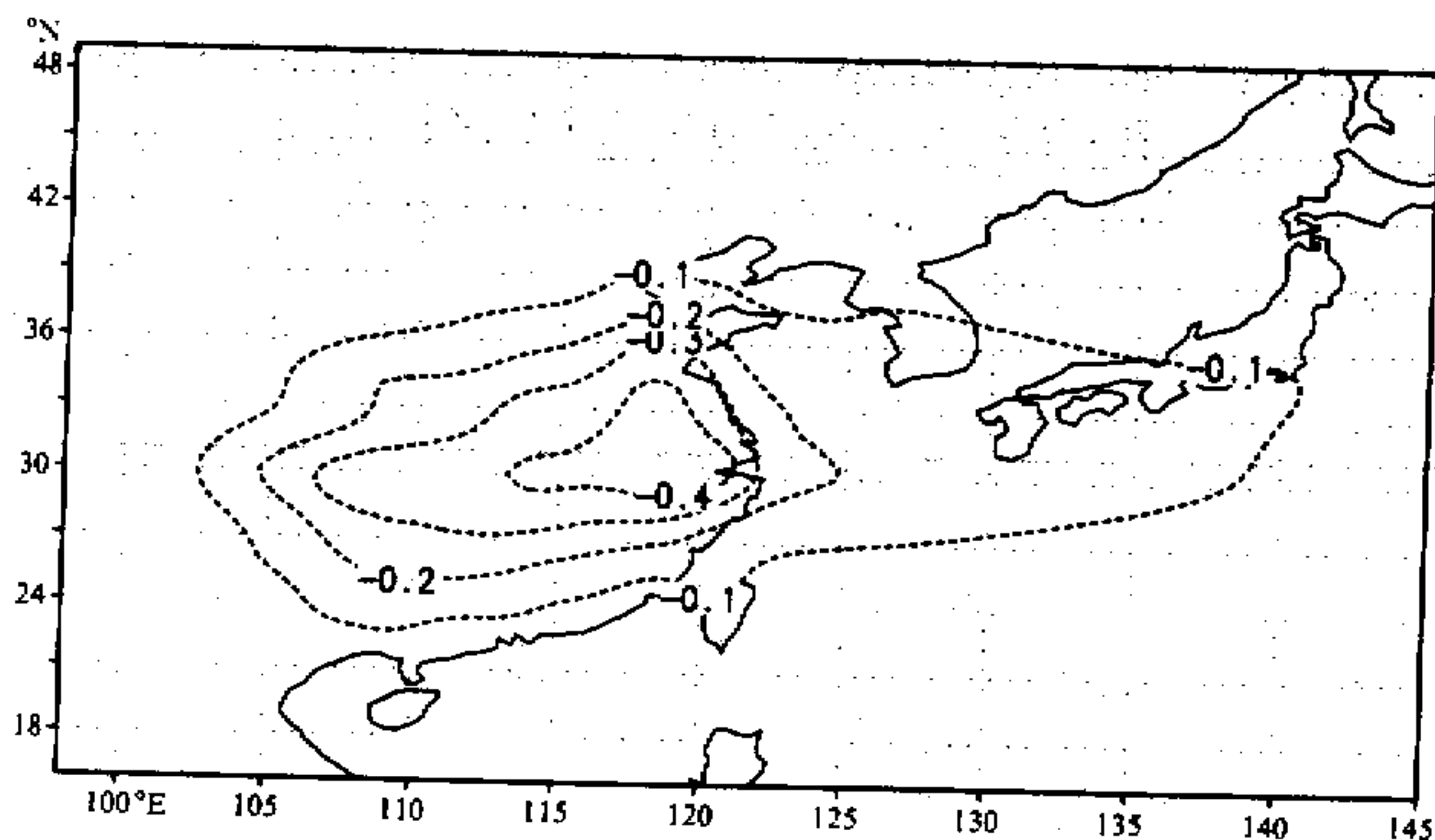


图 3 能量平衡模式模拟的 SO_4^{2-} 温度效应 $\Delta T_{\text{SO}_4^{2-}}$ 。单位: $^{\circ}\text{C}$

5 80 年代以来我国的温度变化和 SO_4^{2-} 的温度效应的可能关系

图 4 给出了我国 1981~1993 年经济迅速发展以来 13 年间与 1951~1980 年 30 年年平均温度、日最高最低温度年平均值的差值分布。从中可以发现在全球变暖的大背景下, 80 年代以来我国南方大部分地区升温幅度明显比北方小, 甚至出现降温区域。如图 4a 的年平均温度差值图上, 我国北方大部分地区增温达 0.5°C 以上, 而南方除了华南大部分地区增温约 0.2°C 外, 其余各地温度变化幅度很小, 四川盆地、福建沿海部分地区降温约 $0.1\sim 0.2^{\circ}\text{C}$ 。这其中可能就包含了 SO_4^{2-} 的负辐射强迫效应。

比较 SO_4^{2-} 的光学特性, 以 75% 的 H_2SO_4 为例, 在 $0.3\sim 0.7\mu\text{m}$ 的可见光部分, 其单次散射反照率 $\omega_0 = 1.0$, 消光系数 σ 从 1.55 到 0.71, 比在长波部分大 1~2 个量级。例如 $\sigma(10\mu\text{m})/\sigma(0.55\mu\text{m}) = 0.05$, 可见 SO_4^{2-} 对辐射的影响主要是对太阳短波辐射的影响。在白天, SO_4^{2-} 削弱了太阳辐射, 使地气系统获得的辐射加热率减小, 长期平均的白天温度和日最高温度下降; 相反, 在夜间, SO_4^{2-} 的影响要小得多, 而且可能还会有一定程度的保温作用。

一般日最高温度出现在正午稍后, 日最低温度则出现在夜间或凌晨, 所以从日最高温度平均值差值图 (图 4b) 上我们大致可以判断出 80 年代以来我国南方地区的降温主要是白天温度的下降。图 4b 和图 3 的相关性更高些, 因此 SO_4^{2-} 对白天太阳辐射的影响更大; 而夜间温度 (日最低温度, 图 4c) 在南方地区变化较小, 没有负值区, 部分地区温度还升高了。尽管 SO_4^{2-} 主要作用于白天的太阳短波辐射, 但由于地气系统的热惯性, 南方夜间温度的升温幅度还是比北方地区小得多。

表 2 列出了实际降温幅度较大的 5 个测站的温度变化及模式模拟的 SO_4^{2-} 的降温效应, 从中可以发现我国中部地区及长江流域由于大气中 SO_4^{2-} 含量较高, 降温效应比较明显, 而实际观测资料也表明这些地区是降温的, 或是温度变幅较小。从表中可以看出日最高温度差值和模拟结果在符号上具有较好的一致性。

表 2 5 个测站 1981~1993 年和 1951~1980 年平均的温度、日最高、最低温度差值及相应的 SO_4^{2-} 的降温效应的模拟结果。单位: $^{\circ}\text{C}$

	年均温度差值	日最高温度差值	日最低温度差值	模拟结果
汉 中	-0.09	-0.40	0.28	-0.18
成 都	-0.17	-0.40	0.15	-0.20
宜 昌	-0.10	-0.30	0.18	-0.33
汉 口	0.02	-0.20	0.29	-0.38
安 庆	0.05	-0.20	0.25	-0.40

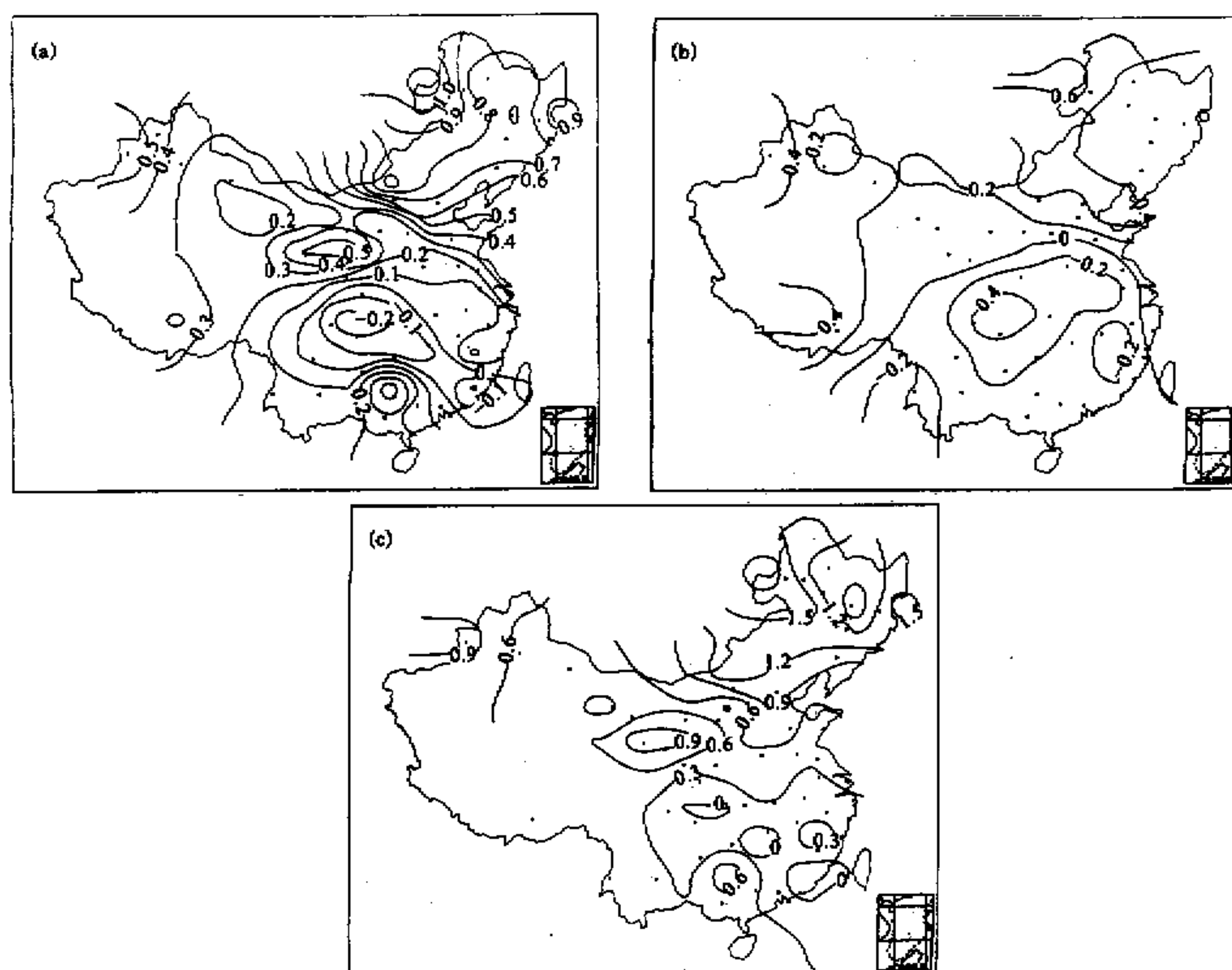


图 4 中国 1981~1993 年与 1951~1980 年平均的温度(a)、日最高(b)和最低温度(c)的差值分布。单位: $^{\circ}\text{C}$

6 讨论

以上我们利用硫化物输送模式模拟了东亚地区工业 SO_2 的排放和 SO_4^{2-} 气溶胶的区域分布特征, 根据 SO_4^{2-} 的含量计算了它对地气系统的直接辐射强迫作用, 并用能量平衡模式模拟了 SO_4^{2-} 对东亚和我国温度变化的影响。通过对实际观测资料的分析, 发现在全球变暖的背景下, 我国南方大部分地区平均气温下降, 其中主要是白天温度下降, 它和 SO_4^{2-} 的温度效应有较好的相关性, 所以该地区的降温可能包含了 SO_4^{2-} 的负辐射强迫效应的影响。

本文只是初步考虑了 SO_4^{2-} 对太阳辐射的直接强迫作用。其实, SO_4^{2-} 作为一种云凝结核, 其含量的变化也会影响成云、云量及降水, 从而改变地气系统的辐射加热状况和

大气温度, 尽管这一过程和影响还有许多不确定性, 但却也是不容忽视的。需要指出的是, 能量平衡模式只是简单考虑了地气系统的主要辐射强迫过程, 没有较完整的动力学过程, 所以要进一步了解 SO_4^{2-} 对东亚和我国温度变化的真实影响, 还需在大气候变化背景下用区域气候模式进行进一步的模拟研究。当然, 影响我国气候变化的原因很多, 除了工业活动引起的大气成分的变化外, 火山爆发、地表类型的改变以及气候本身各种周期的自然变率等等都会对气候变化产生影响。

致 谢 感谢曾昭美、严中伟、温 刚的大力帮助。

参 考 文 献

- 1 R.J. Charlson, et al., 1991, Perturbation of the Northern Hemisphere radiative balance by backscattering from anthropogenic sulfate aerosols, *Tellus*, **43AB**, 152~163.
- 2 R.J. Charlson, et al., 1992, Climate forcing by anthropogenic aerosols, *Science*, **255**, 423~430.
- 3 C.B. Fu, J-W Kim and Z.C. Zhao, 1996, Impacts of global change on Asia, *Asian Change in the Context of Global Change*, edited by Galloy J. N. and J. Melillo, Cambridge University Press.
- 4 M. Huang et al., 1996, Modelling studies on sulfur deposition and transport in East Asia, *Water Soil and Pollution*, **86**(1).
- 5 Akimoto Hajime, 1994, Distribution of SO_2 , NO_x and CO_2 emissions from fuel combustion and industrial activities in Asia with $1^\circ \times 1^\circ$ resolution, *Atmospheric Environment*, **28**, 213~225.
- 6 Waggoner, A.P. et al., 1976, Sulphate-light scattering ratio as an index of the role of sulphur in the tropospheric optics, *Nature*, **261**, 120.
- 7 R.J. Charlson, J. Langner, 1991, Sulphate aerosol and climate, *Nature*, **348**, 22.
- 8 North G.R., J.G. Mengel and D.A. Short, 1983, Simple energy balance model resolving the seasons and the continents: application to the astronomical theory of the ice ages, *J. Geophys. Res.*, **88**(1), 576~586.

Effects of Industrial Sulphur Dioxide Emission on Temperature Variation in China and East Asia

Qian Yun, Fu Congbin, Hu Rongming and Wang Zifa

(START Regional Research Centre for Temperature East Asia, Institute of Atmospheric Physics,
Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract On the basis of the emission data of the industrial sulphur dioxide (SO_2) and the distribution of sulphate (SO_4^{2-}) simulated by a three dimensional regional model of sulfur deposition and transport, the direction radiative forcing of SO_4^{2-} on the earth-atmosphere system is calculated and its temperature effects are simulated by using a two dimensional energy balance model. The observed climatic data shows that averaged temperature has decreased in southern areas of China under the background of global warming since 1980s. The increasing concentration of SO_4^{2-} caused by industrial SO_2 emission may be one of the principal factors which lead to temperature come down according to the simulated results of this paper.

Key words sulphur dioxide sulphate radiative forcing temperature variation