

我国春季大气沙尘气溶胶分布和 短波辐射效应的数值模拟

吴 润^{1,2}, 蒋维楣¹, 王卫国², 姚克亚³, 袁仁民³

(1. 南京大学大气科学系,南京 210093; 2. 云南大学资源环境与地球科学学院大气科学系,昆明 650091)
(3. 中国科学技术大学地球和空间科学学院,合肥 230026)

摘要:利用已建立的区域气候模式与大气化学模式耦合的模拟系统,在气候模式中引入了起沙机制,同时建立了与气候模式连接的沙尘气溶胶输送模式,模拟沙尘的输送、扩散、沉降等过程。通过对1998年4月的模拟,分析得到中国地区沙尘气溶胶的主要源区分布情况、沙尘的浓度分布特点和光学厚度特征,并且将一次沙尘暴个例与同期卫星观测的气溶胶指数分布做了对比。进一步模拟了沙尘气溶胶辐射效应,发现沙尘气溶胶能减少地面的辐射净收入,使南方的大气辐射收入减少,使北方的大气辐射收入增加。由于沙尘气溶胶对辐射的削弱使地面气温有显著降低。

关键词:沙尘气溶胶;起沙机制;气溶胶指数;光学厚度;辐射效应

中图分类号:P264 **文献标识码:**A

0 引言

近年来,由于我国北方地区干旱化趋势日益明显和陆地的过度利用,使沙漠化过程加剧,因此造成北方地区春季沙尘天气增多,甚至在一定天气条件下形成沙尘暴^[1]。

沙尘暴多发对大气环境有显著的影响:使其所经过地区污染指数增高,大气光学厚度显著增加^[2],甚至造成沙尘的跨国输送,扩大影响范围。因此对沙尘暴的预测研究有重要的环境意义和社会意义。另一方面,由于北方地区春季多沙尘天气,且相当一部分沙尘在大气中停留时间长,能远距离输送。沙尘作为气溶胶,会强烈地散射和吸收太阳辐射,使地面和低层大气吸收的辐射减少,同时沙尘气溶胶也发射和吸收红外辐射,又起到保温的作用。因此沙尘天气增多会对一些地区的辐射收支状况产生影响,进而影响到这些地区的气候状况^[3]。

针对沙尘天气的特点,许多科学家已经利用地面激光雷达观测^[2]、卫星遥感^[4-6]、数值模拟等手段开展研究工作。目前气象部门已经在北方地区建立了数十个地面监测站,配合气

收稿日期:2003-03-26

基金项目:国家重点基础研究项目(G1999043400);国家自然科学基金项目(40205016);云南省教育厅科研基金项目(0111163)

作者简介:吴润,男,1973年生,副教授。研究方向:大气环境与气候变化的模拟。E-mail: wujian@ynu.edu.cn

象卫星遥感开展沙尘天气的监测预报工作. 随着研究的深入, 沙尘气溶胶的气候效应正受到广泛关注, 在开发和完善气候模式的过程中, 考虑沙尘气溶胶的辐射气候效应是其中一个重要的物理因子, 并且利用模式对其辐射气候效应进行模拟和估算亟待深入研究.

本文利用区域气候模式与沙尘输送模式构成的模拟系统, 考虑沙尘的起沙、输送、扩散、沉降过程, 模拟 1998 年 4 月中国地区沙尘的分布情况, 并与卫星观测的气溶胶指数做了比较, 且估算了沙尘气溶胶对地气系统辐射收支的影响和由此产生的对地面气温的影响.

1 模式和资料

1.1 模式基本情况

文中所用的区域气候模式为 RegCM2, 并且在气候模式中耦合了沙尘气溶胶输送模式, 沙尘气溶胶的输送、扩散、沉降等物理过程与前期工作中的大气化学模式相同^[7], 其中沙尘气溶胶的清除过程包含了干湿沉降过程.

1.2 起沙机制

对地面起沙机制的研究在中亚、非洲撒哈拉等地区进行过观测与统计研究, 在环境风洞中进行过物理模拟, 并提出了多种起沙机制^[8~12]. 研究所利用的物理条件大至可以分为两类: 利用地面临界风速; 利用地表摩擦速度, 本文选用后者, 用到的各种地表类型对应的临界摩擦速度如表 1 所示^[9]. 当模式中计算出某一格点的摩擦速度大于临界值时, 按照以下方法计算该格点的起沙量:

$$\text{soil} = \text{zgfr} \times 1.4 \times 10^{-15} \times (1.0 \times 10^8 u_*^4 - 1.0 \times 10^6 u_*^3 u_{*h}) \times dx \times dy$$

其中: $u_*/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 为模式计算出的摩擦速度, $u_{*h}/(\text{cm} \cdot \text{s}^{-1})$ 为临界摩擦速度; $dx/\text{cm}, dy/\text{cm}$ 为水平网格距. soil 为网格内的起沙率. Ginoux 指出, 由于地形的起伏将会导致实际起沙量比公式计算出的偏小, 并且这种作用是非常重要的, 因此本文引入 $zgfr$ 作为地形修正因子^[13],

$$zgfr = [(zg_{\max} - zg_{\min}) / (zg_{\max} - zg_{\min})]^5$$

其中 $zg_{\max}, zg_{\min}, zg_{\text{mean}}$ 为该格点最临近的 9 个网格点中地形高度的最大、最小和平均值.

1.3 粒子谱

根据观测, 沙尘气溶胶粒子谱为 $0.1 \sim 1000 \mu\text{m}$, 但半径较大的粒子在大气中的停留时间很短, 对长距离输送没有意义^[14]. 于是本文中将粒子半径划分为 5 段: $0.4 \sim 0.6 \mu\text{m}, 0.6 \sim 1.4 \mu\text{m}, 1.4 \sim 2.6 \mu\text{m}, 2.6 \sim 5.4 \mu\text{m}, 5.4 \sim 10.6 \mu\text{m}$. 中心半径分别为 $0.5, 1.0, 2.0, 4.0, 8.0 \mu\text{m}$. 模式中只考虑这 5 段粒子, 并且把每一段的粒子都作为不发生化学反应的独立物种, 分别模拟其输送、扩散、沉降等物理过程. 根据在贺兰山及周围地区春季观测的沙尘气溶

表 1 各种地表类型对应的临界摩擦速度^[9]

Tab. 1 The threshold friction velocity of each land types^[9]

地表类型 代 码	类型名称	临界摩擦速度 / (cm · s ⁻¹)
1	城市	999
2	农田	250
3	草地	65
4	落叶林	999
5	常绿林	999
6	混合森林与湿地	999
7	水面	999
8	沼泽与湿地	999
9	沙漠	30
10	苔原	100
11	永久冻土	999
12	热带森林	999
13	热带草原	45

胶质量谱近似符合对数正态分布,作为模拟中粒子谱的依据^[15],经计算得到各谱段沙的质量占总起沙质量的 0.278%、14.66%、40.26%、38.42%、6.38%.

1.4 气象资料与模拟区域

利用 1998 年 4 月 1 日北京时间 8:00 的 NCEP 资料为模式提供初始场,侧边界采用 NCEP 资料外强迫方法,每 6 h 更新一次,积分到 1998 年 4 月 30 日 24:00,积分过程中每 6 h 输出一次结果,将所有输出结果的平均值作为月平均结果;同一天内连续 4 次输出结果的平均值作为日平均结果. 模拟区域中心在(102°E, 39°N),南北方向取 55 个格点,东西方向取 65 个格点,格距 90 km. 采用 TOMS 卫星观测的逐日气溶胶指数分布与模拟出的沙尘气溶胶分布进行比较,虽然气溶胶指数与垂直积分浓度量纲不同,不能定量比较,但可定性分析检验模拟结果的分布特征.

2 结果与分析

2.1 沙尘源区

模式中采用的模拟区域陆地类型共分为 13 类(如表 1 所列),然后计算月平均起沙率. 由结果可见,我国境内起沙率大于 $6 \mu\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$ 的主要沙尘源区位于塔克拉玛干沙漠南部、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠,其中腾格里沙漠起沙率最大,有效起沙面积也最大,同时离华北地区较近,因此有可能对华北地区产生显著影响. 此外,河北和内蒙交界处的浑善达克沙地、青海的柴达木盆地、新疆准噶尔盆地、内蒙和陕西交界处的毛乌素沙地以及西藏的中西部地区也是沙尘的源地. 以上模拟出的沙尘源地与对 1998 年 4 月一次沙尘暴的观测分析所推断的源区是一致的^[16],说明模拟出的起沙区具有一定的可靠性. 此外与我国新疆相邻的哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦的部分地区,也是影响我国西北地区大气沙尘气溶胶浓度的重要源地. 蒙古国南部是影响华北、东北、华东地区的重要沙尘源地. 东北地区中部还存在强度较弱的局地扬尘区,这与春季地表植被覆盖率低有关. 以上模拟的沙尘源地主要是沙漠和草地两种陆地类型.

2.2 月平均沙尘积分浓度和光学厚度

图 1 中(a)、(b)、(c)分别给出了 NASA 卫星利用 TOMS 遥感器观测的月平均气溶胶指数模拟出的月平均沙尘气溶胶垂直积分浓度分布和沙尘气溶胶光学厚度. 虽然观测的气溶胶指数包括了沙尘、硫酸盐等气溶胶的贡献,但春季在我国北方地区,沙尘气溶胶是主体,故用气溶胶指数可以定性地分析沙尘的分布. 同时需要指出的是,在长江以南、印度、东南亚地区,由于观测的气溶胶指数主要是生物燃烧产生的烟尘气溶胶,并非沙尘气溶胶,因此,用气溶胶指数数据至少在长江以北地区可以用于分析沙尘气溶胶的相对含量. 从图 1(a)看出模拟区域内沙尘最高浓度区主要位于塔克拉玛干沙漠附近,气溶胶指数超过 1.0,最大达到 1.6. 在天津附近出现了次高值中心,指数为 1.0. 此外,在吉林、甘肃二省也出现两个高中心,指数为 0.8. 总体上,沙尘气溶胶遍布长江以北我国大部分地区,并且自西向东沙尘分布区在南北向扩展的范围逐渐加大. 对于华北南部、华东地区,沙尘气溶胶是由距离较远的地区输送来的,对于其他沙尘分布区,局地的起沙是很重要的. 图 1(b)模拟的结果基本上显示了观测结果的形势:在塔克拉玛干附近地区是最高浓度区,五个谱段的粒子总垂直积分浓度大于 0.30 g/m^2 ,最大达 0.50 g/m^2 ;甘肃、陕西及黄河中下游地区浓度普遍大于 0.10 g/m^2 ;

东北南部、长江下游地区在 0.05 g/m^2 左右。模拟出的沙尘分布区域和大部分高浓度中心的位置与观测结果比较一致，并且北方地区沙尘的分布范围与观测吻合较好。但是天津附近的高值中心没有模拟出来，甘肃和内蒙交界处模拟的浓度偏大，长江中下游模拟出的分布比观测的向南扩展范围大一些。总体上，对北方地区的模拟是比较好的。图 1(c) 所示为模拟出的

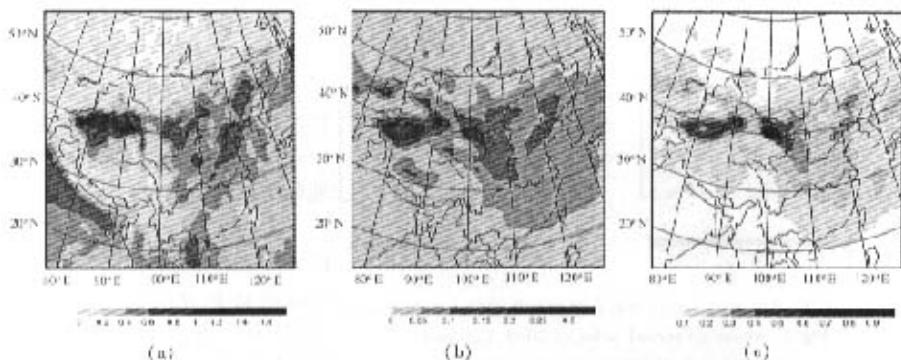


图 1 (a) 观测的月平均气溶胶指数；(b) 模拟的月平均气溶胶垂直积分浓度/($\text{g} \cdot \text{m}^{-1}$)；
(c) 模拟的月平均光学厚度

Fig. 1 (a) monthly average aerosol index; (b) modeling vertical integration concentration;
(c) modeling optical depth of dust aerosol

沙尘气溶胶在波长 $0.55 \mu\text{m}$ 光学厚度的分布，沙尘气溶胶在波长 $0.55 \mu\text{m}$ 的消光系数采用文献[3]的数据。塔克拉玛干沙漠、河套地区、渤海湾附近为三个显著的大值区，光学厚度大于 0.4。长江以北地区光学厚度基本大于 0.2，光学厚度分布与观测的气溶胶指数分布比较一致，也与通过地面辐射资料反演的、我国地区 4 月份多年平均的光学厚度分布^[17] 比较接近。

2.3 沙尘天气个例模拟

为进一步考查模拟结果的可靠性，选取了 4 月 20 日至 4 月 25 日一次冷空气过程的日平均气溶胶指数和模拟的沙尘垂直积分浓度作对比分析，模式结果为日平均结果。此过程的天气形势如下述。20 日开始，在模拟区域西北角出现一个冷高压，21 日得到加强，并且开始南下影响我国。22 日形成一个沿蒙古和俄罗斯边境走向的西南东北向高压脊，蒙古国和我国北疆地区为偏北风，同时在华北北部和内蒙古出现一个低压系统。23 日高压脊位于中蒙边境，为东南西北走向。低压已经移动到东北地区，并且中心得到明显加强。从华北到东北地区形成了一低一高的分布。24 日高压脊东移到我国东部沿海地区，东北低压继续加强，并基本移出我国。25 日高压已经东移出海，但我国长江中下游地区仍然为强劲的西南风。东北低压已经移出模拟区域。

本文计算了 20、21、22 日三天的气溶胶指数和模拟结果，从图 2 中可看出 20 日观测的气溶胶主要分布在西北、华北、东北地区，并且在黑龙江、吉林有两个呈东北西南走向的最高浓度区，河套、中蒙边境出现次高值。结果中的东北、河套、中蒙边境几个高值中心都模拟出来了，但是东北地区的高中心位置偏西南。模拟的气溶胶分布范围与观测结果非常接近。21 日从观测看，气溶胶呈东西方向分布，自西向东浓度逐渐增大，在东北中部有一个高值中心，

塔克拉玛干沙漠、中蒙边境有次高值中心。模拟结果很好地再现了东西分布并且浓度东高西低的特征,但是东北中部的高中心位置偏东。22日沙尘气溶胶有两个中心,一个位于塔克拉

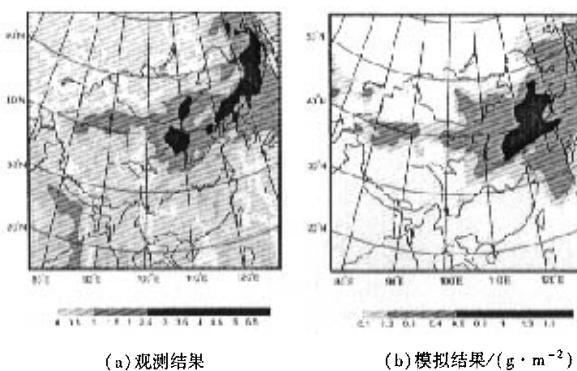


图2 4月20日观测的气溶胶指数和模拟的气溶胶垂直积分浓度

Fig. 2 Observed aerosol index on 20nd April and simulated vertical integration concentration

海湾、东北东部。这些基本特征在模拟结果中得到了很好地体现,但是陕西中部模拟偏强,在西安附近出现一个虚假的高浓度中心。24日气溶胶主要分布在塔克拉玛干地区、华中地区,其他地区较少。模拟结果除再现了这两个高浓度中心外,在渤海湾附近模拟过强,可能与沉降过程失真有关。25日的观测结果表明,沙尘在长江下游和塔克拉玛干出现两个高浓度区,此外,在华北、陕西附近也有少量分布,其他地区大气比较洁净。模拟结果也有两个高浓度中心,分别位于塔克拉玛干和甘肃与青海的交界处,比观测结果偏西。

从以上连续6天的模拟与观测对比表明,模式能比较客观地反应出沙尘的总体分布特征,并且在多数情况下,对沙尘浓度的高值中心也有很好的模拟能力。尤其对于西北、华北地区模式的模拟能力最好,对华东地区和长江中下游模拟能力有所下降,在长江中下游地区模拟出的沙尘分布范围比观测的广,这可能与沙尘的清除过程在长江中下游地区偏弱有关,需要进一步分析研究。

在前人研究工作中,就曾观测到北京地区沙尘暴期间,大气光学厚度有显著增大,可达0.65,光学厚度最大值甚至超过10^[2]。本文模拟了4月份逐日的光学厚度变化情况。图4(a)~图4(f)给出了20~25日模拟的沙尘气溶胶0.55 μm光学厚度,显示了沙尘气溶胶的输

送情况,沙尘从河套地区向东北方向延伸。模拟结果较好地再现了沙尘的东北西南方向分布特征,并且塔克拉玛干地区的高中心模拟较好,东北地区的最高浓度中心位置稍偏东,巴丹吉林沙漠地区模拟浓度过大。

本文还计算了23、24、25日三天的气溶胶指数和模拟的气溶胶垂直积分浓度,如图3所示。23日出现4个中心,分别在塔克拉玛干沙漠、河套地区、渤海

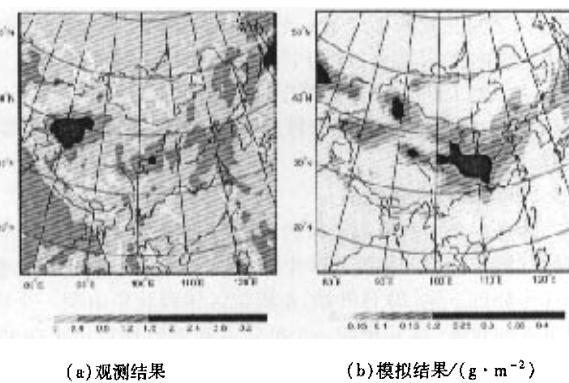


图3 4月23日观测的气溶胶指数和模拟的气溶胶垂直积分浓度

Fig. 3 Observed aerosol index on 23nd April and simulated vertical integration concentration

送过程.一般沙尘分布区的光学厚度大于0.2,这6天中最大光学厚度约在3左右,平均最大值略比1大.在模拟的整个4月份中,沙尘气溶胶最大光学厚度出现在4月14日,达到6.0,这主要是受14~17日发生的特大沙尘暴影响^[16].

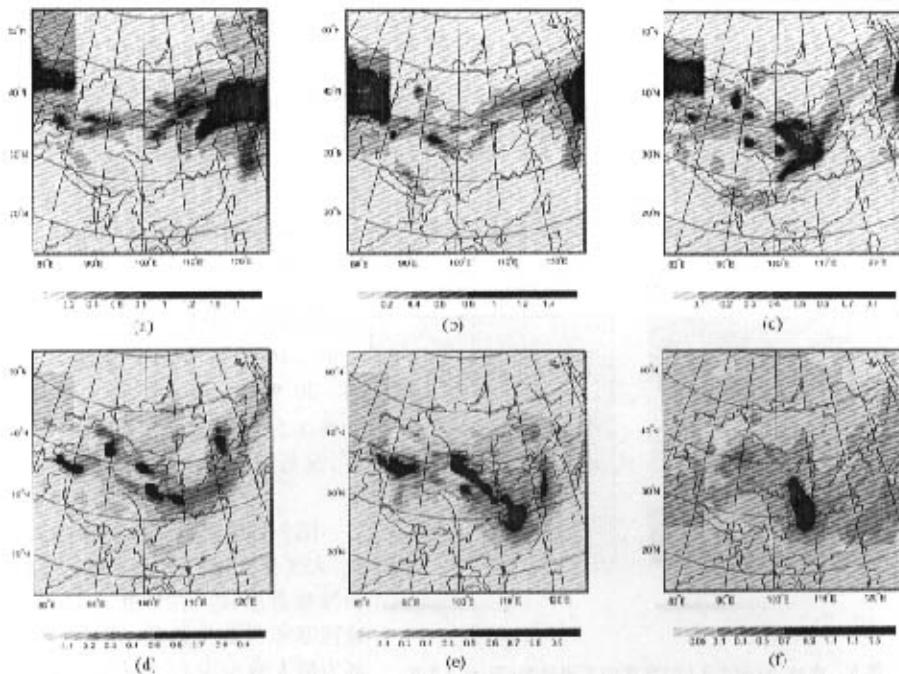


图4 4月20~25日模拟的沙尘气溶胶0.55 μm 光学厚度

Fig. 4 Dust aerosol optical depth at 0.55 μm of day 20~25

2.4 沙尘气溶胶对辐射的影响

本文利用Mie散射理论求得的沙尘气溶胶归一化消光系数、单次散射反照率、非对称因子随太阳辐射波长和粒子半径变化^[18],分别如图5(a)、(b)、(c)所示.沙尘粒子的消光系数随半径和波长的变化最复杂.对于0.5 μm 以下的辐射,半径越大消光越剧烈;对大于0.5 μm 的辐射,消光系数变化剧烈,出现多个极值.在5 μm 波长以下各种半径的粒子消光系数只有一个峰值,但是对应波长不同.在5 μm 波长以下,半径越小,单次散射反照率越大,说明小粒子的散射消光比大粒子强.5 μm 波长以下的非对称因子随半径增大而增大.利用沙尘粒子的这些光学特性,在气候模式的辐射计算方案中增加考虑了沙尘气溶胶在0.2~5 μm 范围内的直接辐射效应,并将模拟结果与没考虑沙尘辐射效应时的做了差值比较.

图6为考虑沙尘辐射效应后,月平均地面(a)和大气(b)吸收的太阳辐射的变化.在沙尘分布区,地面吸收的太阳辐射有明显减少,尤其塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠减少最剧烈,变化量达-30 W/m^2 .华北地区变化量在-15~-10 W/m^2 ,东北在-10~-5 W/m^2 ,华东地区在-30~-25 W/m^2 .大气吸收的太阳辐射基本呈现增加的趋势,尤其在我国北方地区

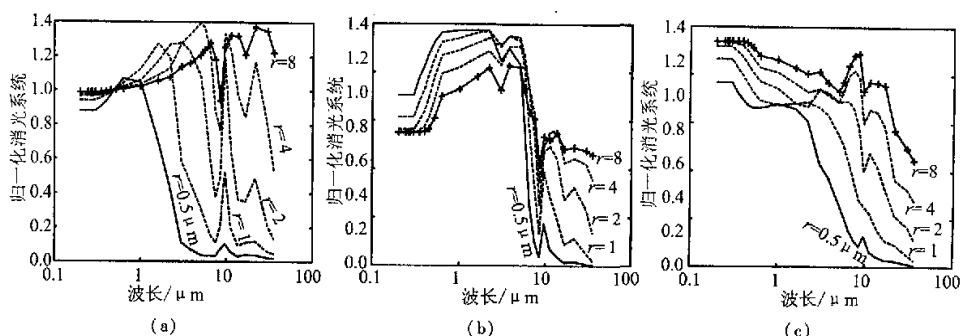


图5 沙尘气溶胶归一化消光系数(a)、单次散射反照率(b)、非对称因子(c)

Fig. 5 Optical parameters of dust aerosol (a) normalized extinction parameter; (b) Single scattering albedo; (c) asymmetry parameter

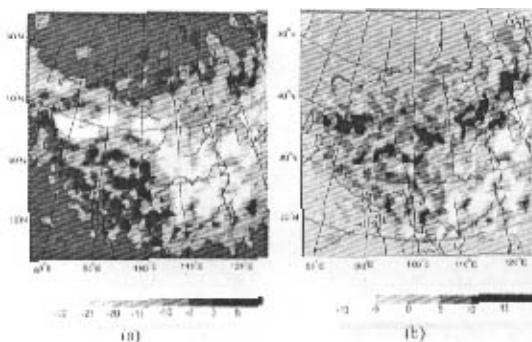


图6 地面(a)和大气(b)吸收的太阳辐射(W/m^2)变化

Fig. 6 Variation of absorbed solar radiation of surface(a) and atmosphere(b)

有明显增加. 西北、华北地区增加量在 $10 \sim 15 \text{ W}/\text{m}^2$, 东北地区更大些为 $15 \sim 20 \text{ W}/\text{m}^2$, 但是在华东、华南部分地区变化幅度在 $-10 \sim -5 \text{ W}/\text{m}^2$, 这可能与这些地区云量变化有关.

图7为地面长波辐射净收入变化、大气长波辐射净收入变化. 地面长波辐射净收入在华北北部、东北地区基本为减少趋势, 尤其华北北部为最大减少中心, 变化了 $-6 \text{ W}/\text{m}^2$. 对比图6, 这一地区地面吸收的太阳辐射减少, 应使地面发射的长

波辐射减少, 同时大气吸收的太阳辐射增加, 应使大气逆辐射增加, 如果不考虑云的影响, 这一地区地面长波净收入应该增加. 模拟结果显示的减少现象可能由于这一地区上空大气吸收太阳辐射增加, 有利于云消散, 同时地面吸收太阳辐射减少不利于对流运动发展, 因此可能导致云量减少, 由于云减少削弱了大气逆辐射, 最终导致地面长波辐射净收入减少. 在长江以南地面净长波收入增加, 最大达 $9 \text{ W}/\text{m}^2$. 这一地区地面和大气吸收的太阳辐射均有减少, 可能导致大气温度降低, 有利于凝结发生, 产生更多的云, 加大大气逆辐射, 导致地面长波净收入增加. 大气净长波收入基本趋势与地面的相反, 在华北北部、东北地区有增加, 长江以南有减少. 主要原因可能也与云的变化有联系, 在华北、东北云量减少, 损失的长波辐射减少, 在江南云增多, 逆辐射加强. 总体上, 由于沙尘气溶胶引起的地面和大气净长波辐射的变化量比它们收入的太阳辐射的变化量小得多, 沙尘气溶胶的辐射效应主要体现在对太阳辐射的影响方面.

图8为同时考虑长短波辐射的地面(a)和大气(b)的辐射收入的变化. 模拟区域内大部分地区的地面辐射收入受到沙尘气溶胶的显著影响. 从西北、华北、东北到江南地区, 沿沙尘

输送的主要路径上辐射收入都有明显的减少,其中塔克拉玛干沙漠、腾格里沙漠地区为两个最大减少地区,变化可以达 -35 W/m^2 ,西北地区大部、华北南部东北中部和长江中下游地区在 $-25 \sim -20 \text{ W/m}^2$,华北北部在 $-15 \sim -10 \text{ W/m}^2$,大气的辐射收入变化显示了与地面不同的形势.从西北到华北、东北一线的北方地区,辐射收入有明显增加,普遍在 5 W/m^2 左右,尤其在华北北部和东北东部增加量达到 15 W/m^2 ,但是在华东和江南一带却有显著减少,最大变化为 -15 W/m^2 .由于引入沙尘气溶胶使大气的辐射收入变化

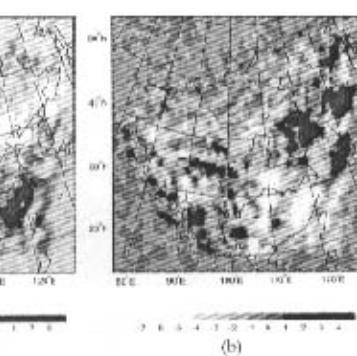


图7 地面(a)和大气(b)长波辐射(W/m^2)净收入的变化

Fig. 7 Variation of net long wave incoming of surface (a) and atmosphere (b)

呈现南方减少、北方增加的趋势,这是南北方大气和下垫面含水状况、热力状况差异造成的.

2.5 沙尘气溶胶对温度的影响

图9为引入沙尘气溶胶后月平均地面气温变化情况.由于沙尘气溶胶对辐射的削减,导致西北、华北、东北、华东和江南部分地区呈现大范围地降温,多数地区降温幅度在 $-0.6 \sim -0.8 \text{ K}$,此外还存在几个降温比较强的中心,例如塔克拉玛干沙漠、毛乌素沙地附近地区、河南,这些地区降

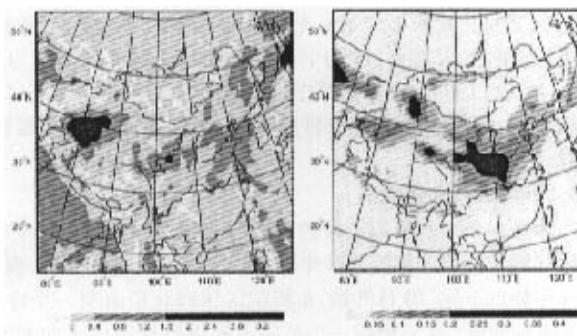


图8 地面(a)和大气(b)辐射(W/m^2)净收入的变化

Fig. 8 Variation of radiative net incoming of surface (a) and atmosphere (b)

温幅度达 -1.2 K .在华北北部和东北北部有两个 $-0.4 \sim -0.2 \text{ K}$ 的弱降温中心.从这些结果看出,沙尘气溶胶对我国北方大部分地区和东南沿海地区的气温有显著影响,是影响这些地区春季气候变化的一个重要因子.

3 结论与讨论

通过对1998年4月我国地区大气沙尘气溶胶分布特征和辐射气候效应的模拟估算,可以总结如下:

(1) 我国境内沙尘的源地主要有塔克拉玛干沙漠南部、巴丹吉林沙漠、腾格里沙漠,这些地区的起沙率大于 $6 \text{ } \mu\text{g}/(\text{s} \cdot \text{m}^{-2})$,其中腾格里沙漠起沙率最大,有效起沙面积也最大,同时离华北地区较近,因此有可能对华北地区产生显著影响.这些沙尘源地的陆地类型主要是沙漠和草地两种类型.

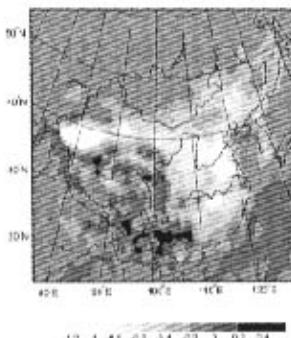


图9 月平均地面气温(K)变化

Fig.9 Variation of monthly average surface air temperature

(II)月平均沙尘垂直积分浓度在塔克拉玛干附近地区最高,达 0.3 g/m^2 以上,最大达 0.5 g/m^2 ;甘肃、陕西及黄河中下游地区浓度普遍大于 0.1 g/m^2 ;东北南部、长江下游地区在 0.05 g/m^2 左右,向东向南沙尘浓度逐渐降低。华北南部、华东地区沙尘气溶胶是由异地输送的,对于其它沙尘分布区,主要是局地扬尘。

(III)月平均 $0.55\text{ }\mu\text{m}$ 光学厚度塔克拉玛干沙漠、河套地区、渤海湾附近为三个显著的大值区,光学厚度大于0.4,最大接近1,长江以北受沙尘影响的地区光学厚度基本大于0.2。由于受强沙尘暴影响,日平均光学厚度最大可以达到6.0。

(IV)沙尘气溶胶减少了地面吸收的太阳辐射,增加了北方地区大气对太阳辐射的吸收,导致地面净长波收入在华北、东北地区减少,在江南增加;大气净长波收入与地面净长波收入分布趋势基本相反,导致地面长短波辐射净收入减少,大气辐射净收入北方地区增加,南方地区减少。

(V)由于沙尘气溶胶对辐射的削弱作用,导致大部分地区地面气温显著下降,普遍为 $-0.6\sim-0.8\text{ K}$,最大超过 -1.2 K ,说明沙尘气溶胶是影响我国,尤其是北方地区春季气候变化的一个不容忽视的重要因子,应当在气候研究和预测中给予足够的重视。

(VI)本文是研究沙尘气溶胶分布和辐射气候效应的初步工作,其中还有一些不完善之处,例如,起沙机制是否能很好地适合我国的下垫面状况,沙尘谱还缺乏更可靠的描述,沙尘粒子辐射特性是否适合我国沙尘的实际等不确定性问题,这些问题有待于收集大量观测资料之后进一步研究解决。

参 考 文 献

- [1] Sun J, Zhang M, and Liu T. Spatial and temporal characteristics of dust storms in China and its surrounding regions, 1960—1999: Relations to source area and climate [J]. *J Geophys. Res.*, 2001, 106(10):10 325-10 333.
- [2] 邱金桓,孙金辉.沙尘暴的光学遥感及分析[J].*大气科学*,1994,18(1):1-10.
- [3] Tegen I, Lacis A A. Modeling of particle size distribution and its influence on the radiative properties of mineral dust aerosol [J]. *J Geophys. Res.*, 1996, 101(14):19 237-19 244.
- [4] 郑新江,陆文杰,罗敬宁.气象卫星多通道信息监测沙尘暴的研究[J].*遥感学报*,2001,5(4):300-305.
- [5] 张增祥,周全斌,刘斌等.中国北方沙尘灾害特点及其与下垫面状况的遥感监测[J].*遥感学报*,2001,5(5):377-382.
- [6] 张国平,张增祥,赵晓丽等.2000年华北沙尘天气遥感研究[J].*遥感学报*,2001,5(6):466-471.
- [7] 吴润,蒋维楣,刘红年等.硫酸盐气溶胶直接和间接辐射气候效应的模拟研究[J].*环境科学学报*,2002,22(2):129-134.
- [8] Marticorena B, Bergametti G. Modeling the atmospheric dust cycle: 1. Design of a soil-derived dust emission scheme [J]. *J Geophys. Res.*, 1995, 100(8):16 415-16 430.
- [9] Gillette D A, Passi R. Modeling dust emission caused by wind erosion [J]. *J Geophys. Res.*, 1988, 93(11):14 234-14 242.

- [10] Gillette D. A wind tunnel simulation of the erosion of soil : Effect of soil texture, sandblasting, wind speed, and soil consolidation on dust production [J]. *Atmos. Environ.*, 1978, 12: 1 735-1 743.
- [11] Shao Y. A model for mineral dust emission [J]. *J Geophys. Res.*, 2001, 106 (17): 20 239-20 254.
- [12] Shao Y, Raupach M R, Findlater P A. The effect of saltation bombardment on the entrainment of dust by wind [J]. *J Geophys. Res.*, 1993, 98:12 719-12 726.
- [13] Ginoux P, Chin M, Tegen I, et al. Sources and distributions of dust aerosols simulated with the GOCART model [J]. *J Geophys. Res.*, 2001, 106 (17):20 255-20 273.
- [14] Tegen I, Fung I. Modeling of mineral dust in the atmosphere: Source, transport, and optical thickness [J]. *J Geophys. Res.*, 1994, 99 (11):22 897-22 914.
- [15] 牛生杰, 章澄昌, 孙继明. 贺兰山地区沙尘气溶胶粒子谱分布的观测研究 [J]. *大气科学*, 2001, 25 (3):243-252.
- [16] Sun J, Liu T, Lei Z. Sources of heavy dust fall in Beijing, China on April 16, 1998 [J]. *J Geophys. Res.*, 2000, 105 (14):2 105-2 108.
- [17] Luo Y, Lu D, Zhou X, Li W, He Q. Characteristics of the spatial distribution and yearly variation of aerosol optical depth over China in last 30 years [J]. *J Geophys. Res.*, 2001, 106 (13):14 501-14 513.
- [18] Sokolik I N, Toon O B. Incorporation of mineralogical composition into models of the radiative properties of mineral aerosol from UV to IR wavelengths [J]. *J Geophys. Res.*, 1999, 104 (8):9 423-9 444.

Simulation of Distribution and Radiative Effects of Dust Aerosol in Spring Over China Area

WU Jian^{1,2}, JIANG Wei-mei¹, WANG Wei-guo², YAO Ke-ya³, YUAN Ren-min³

(1. Department of Atmospheric Science, Nanjing University, Nanjing 210093)

(2. Department of Atmospheric Science, Yunnan University, Kunming 650091)

(3. School of Earth and Space Science, USTC, Hefei 230026)

Abstract: An uplifting mechanism of dust aerosol and its transportation processes were coporated into an regional climate model. Based on the model system, the distribution of dust aerosol and its optical depth over China area in April 1998 were researched and compared with TOMS aerosol index data. The main sources of dust aerosol were been discussed. The radiative effects of dust aerosol were detected. A fairly reduction of incoming radiation of surface is found, and the decrease in surface air temperature due to dust aerosol is revealed in the results of modeling.

Key words: dust aerosol; uplifting mechanism of dust; TOMS aerosol index; optical depth of dust aerosol; radiative effects of dust aerosol