

中层顶 Na 层稳定性的初步研究^{*}

潘小敏¹ 易帆¹ 李芳²

¹(武汉大学电子信息学院 武汉 430079)

²(中国科学院电子学研究所)

摘 要

利用武汉大学激光雷达的观测数据验证了当前 Na 层数值模型的普适性. 在简化模型的基础上, 采用微扰法, 分析模型的稳定性. 计算表明, 在参数的调节范围内, 所有特征值的实部都小于零, 这说明该模型是个稳定系统. 扰动垂直波长和扩散系数对模型的所有特征值都会产生较大影响, 背景温度和化学成分密度则只对某些特征值影响较大.

关键词 Na 层, 数值模型, 稳定性

1 引言

自 1969 年 Bowman 等人首次利用共振荧光探测技术观测高空 80—110 km 范围的 Na 层以来^[1], 世界上许多国家和地区先后建立了地基的和机载的 Na 荧光共振激光雷达. 武汉大学的 Na 荧光共振激光雷达也于 2001 年 3 月投入日常观测, 迄今已获得超过 600 h 的观测数据^[2]. 观测表明, Na 原子数密度的峰值高度一般在 90 km 左右, 其顶部和底部的标高都很小, 约为 2—3 km. 受重力波、潮汐等的影响, Na 层中还经常出现波状结构. 作为示踪物, Na 层是人们研究中高层大气动力学和化学过程的有力工具. 随着观测手段的发展和数据的积累, 人们在 Na 层数值模型的建立和计算方面也取得了很大进展^{[3]—[11]}. Plane 等人提出的模型可以较精确地计算出中性 Na 原子数密度随高度的分布; 适当调节模型中的参数, 该模型还能反映出 Na 层的季节变化. 但这些工作主要是对背景 Na 层进行模拟, 而很少分析 Na 层的变化, 特别是短期变化. 此外, 中层顶 Na 层结构的稳定性问题至今未见任何文献报道. Na 层中出现的各种尺度的波动是随着时间增长还是随着时间衰减, 或是振幅保持不变, 对于理解 Na 层的结构及其变化是相当重要的. 而当前模型的模拟结果是否能够作为分析 Na 层中波动的背景初值, 也是利用模型研究 Na 层中波动现象必须回答的问题. 本文根据 Plane 等提出的 Na 层模型^[7], 对高空大气中各种含 Na 成分的粒子数密度分布进行了理论计算, 并与武汉大学激光雷达观测结果进行了比较. 为了讨论该模型的稳定性, 本文对模型进行了简化, 取中层顶附近 85—95 km 为计算区域, 仅考虑计算区域内 5 种数密度较大的含 Na 成分, 在模型稳态解上叠加含 Na 成分数密度的小扰动, 分析模型中小扰动的稳定性, 验证了该模型的计算结果是否可以作为 Na 层扰动的背景初值, 为今后研究更复杂的 Na 层变化提供了一个理论基础.

^{*} 国家自然科学基金重大项目资助 (49990450)

2002-12-20 收到原稿, 2003-05-06 收到修定稿

2 Na 层模型及计算结果

对高空 Na 层的数值模拟涉及到 Na 的源和汇、含 Na 成分的垂直输送及化学循环三个方面. 前两者描述了含 Na 成分在高空的垂直密度分布, 后者决定了各种含 Na 成分的比例关系. 目前认为图 1 中所示的 12 种含 Na 物质必然存在于高空大气 (为了简捷起见没有列出 NaO_2 和 NaCO_3 . 其中用粗黑线框表示重要的含钠成分, 并用带箭头的粗线表示 Na 和 NaHCO_3 之间的循环), 并通过参与表 1 中的化学反应 (用 k_c ($c = 1, 2, \dots, 24$) 表示它们的反应常数) 来保持动态平衡. 模型还假设, 在顶部和底部, Na 层的汇分别是 Na^+ 和 NaHCO_3 [7].

人们认为陨石 (或流星) 烧蚀是高空 Na 层的最主要来源, 而中性 Na 原子层的形态主要由闭合的气相化学反应控制. 也就是说, 模型中各种物质可以相互转化, 但不能逃逸出系统. 这样在模型中, 第 i ($i = 1, 2, \dots, 12$) 种含 Na 物质的连续性方程为

$$\frac{dn_i}{dt} - P_i + L_i - I_i + \nabla \Phi_i = 0, \quad (1)$$

其中, P_i 和 L_i 为化学反应的生成项和消耗项, I_i 为流星烧蚀注入项, Φ_i 为垂直输送项, n_i 为第 i 种含 Na 成分的数密度. 假设相对于垂直输送, 化学反应速度足够快 [8], 则任何高度上 Na 层都处于化学平衡态. 由于化学反应循环是闭合的, 所以对式 (1) 求和有

$$\frac{d(n)(\text{Na})}{dt} = \sum_i (I_i - \nabla \Phi_i) = I(\text{Na}) - \nabla \Phi(\text{Na}), \quad (2)$$

式中, $n(\text{Na})$ 为含 Na 成分总量的数密度随高度的分布, $I(\text{Na})$ 为流星的总注入率, $\Phi(\text{Na})$ 为所有含 Na 成分的垂直输送流. 在时间平均情况下, (2) 式左端等于 0. 忽略地球曲率效应的影响, 垂直输送流可以表示为 [7]

$$\Phi(\text{Na}) = (-K) \left[\frac{\partial n(\text{Na})}{\partial z} + n(\text{Na}) \left(\frac{1}{H} + \frac{1}{T} \frac{\partial T}{\partial z} \right) \right], \quad (3)$$

式中, K 为湍流扩散系数, H 为大气标高, T 为大气温度, 在模型中我们假定它们对所有的含 Na 成分都相同.

根据流星注入观测数据, 由 (2) 和 (3) 式解出含 Na 成分总量随高度的分布, 再结合表 1 中满足闭合条件的化学循环和背景大气密度, 就可以算出各种含 Na 成分的数密度. 本文采用的模型包含 Na, NaO, NaO_2 , NaO_3 , NaOH, NaCO_3 , NaHCO_3 , Na^+ 和 Na 离子簇, 共 12 种含 Na 成分, 相关背景大气数据主要取自 Roble 的 TIME-GCM 模型 [7]; 流星观测和扩散系数数据取自文献 [7].

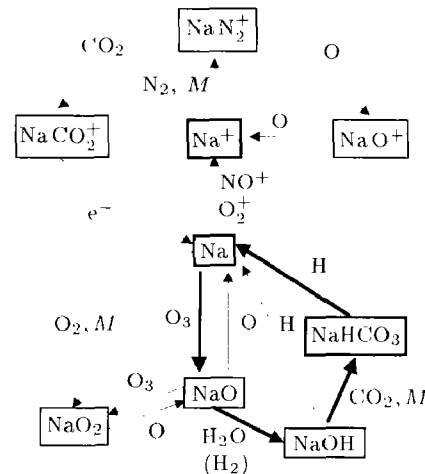


图 1 中层顶钠层中主要物质循环
Fig.1 Schematic drawing of the important cycles of sodium in the upper mesosphere

表 1 Na 层模型中的化学反应过程及其反应速度常数
Table 1 The chemical Reactions of Na species in the upper
mesosphere and their rate coefficients

Reaction No.	Reaction	Rate Coefficient
R1	$\text{Na} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$	$1.1 \times 10^{-9} e^{(-116/T)}$
R2	$\text{NaO} + \text{O} \rightarrow \text{Na} + \text{O}_2$	$2.2 \times 10^{-10} (T/200)^{1/2}$
R3	$\text{NaO} + \text{O}_2 + M \rightarrow \text{NaO}_2 + M$	$5.0 \times 10^{-30} (T/200)^{-1.22}$
R4a	$\text{NaO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{NaO}_2 + \text{O}_2$	$1.1 \times 10^{-9} e^{(-568/T)}$
R4b	$\text{NaO} + \text{O}_3 \rightarrow \text{Na} + 2\text{O}_2$	$3.2 \times 10^{-10} e^{(-550/T)}$
R5	$\text{NaO} + \text{O}_2 + M \rightarrow \text{NaO}_3 + M$	$5.3 \times 10^{-30} (T/200)^{-1}$
R6	$\text{NaO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$	$5.0 \times 10^{-10} e^{(-940/T)}$
R7	$\text{NaO}_3 + \text{O} \rightarrow \text{Na} + 2\text{O}_2$	$2.5 \times 10^{-10} (T/200)^{1/2}$
R8	$\text{NaO} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + \text{OH}$	$4.4 \times 10^{-10} e^{(-507/T)}$
R9a	$\text{NaO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{NaOH} + \text{H}$	$1.1 \times 10^{-9} e^{(-1100/T)}$
R9b	$\text{NaO} + \text{H}_2 \rightarrow \text{Na} + \text{H}_2\text{O}$	$1.1 \times 10^{-9} e^{(-1400/T)}$
R10	$\text{NaO} + \text{H} \rightarrow \text{Na} + \text{OH}$	$3.0 \times 10^{-10} e^{(-668/T)}$
R11	$\text{NaO}_2 + \text{H} \rightarrow \text{Na} + \text{HO}_2$	$1.0 \times 10^{-9} e^{(-1000/T)}$
R12	$\text{NaOH} + \text{H} \rightarrow \text{Na} + \text{H}_2\text{O}$	$4.0 \times 10^{-11} e^{(-550/T)}$
R13	$\text{NaO} + \text{CO}_2 + M \rightarrow \text{NaCO}_3 + M$	$1.3 \times 10^{-27} (T/200)^{-1}$
R14	$\text{NaCO}_3 + \text{O} \rightarrow \text{NaO}_2 + \text{CO}_2$	$5.0 \times 10^{-10} e^{(-1200/T)}$
R15	$\text{NaCO}_3 + \text{H} \rightarrow \text{NaOH} + \text{CO}_2$	$1.0 \times 10^{-9} e^{(-1400/T)}$
R16	$\text{NaOH} + \text{CO}_2 + M \rightarrow \text{NaHCO}_3 + M$	$1.9 \times 10^{-28} (T/200)^{-1}$
R17	$\text{NaHCO}_3 + \text{H} \rightarrow \text{Na} + \text{H}_2\text{O} + \text{CO}_2$	$1.0 \times 10^{-11.8} e^{(-460/T)}$
R18	$\text{Na} + \text{O}_2^+ \rightarrow \text{Na}^+ + \text{O}_2$	2.7×10^{-9}
R19	$\text{Na} + \text{NO}^+ \rightarrow \text{Na}^+ + \text{NO}$	8.0×10^{-10}
R20	$\text{Na}^+ + \text{N}_2 + M \rightarrow \text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + \text{NO}$	$4.8 \times 10^{-30} (T/200)^{-2.2}$
R21	$\text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + X \rightarrow \text{Na} \cdot X^+ + \text{N}_2 \quad (CX = \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O})$	8.0×10^{-10}
R22	$\text{Na} \cdot \text{N}_2^+ + \text{O} \rightarrow \text{NaO}^+ + \text{N}_2$	6.0×10^{-10}
R23	$\text{NaO}^+ + \text{O} \rightarrow \text{Na}^+ + \text{O}_2$	8.0×10^{-10}
R24	$\text{Na} \cdot Y^+ + e^- \rightarrow \text{Na} + Y \quad (Y = \text{N}_2, \text{CO}_2, \text{H}_2\text{O}, \text{O})$	$1 \times 10^{-6} (T/200)^{-1/2}$

* 表中单分子、双分子及三分子反应的反应速率常数的单位分别为: s^{-1} , $\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ 和 $\text{cm}^6 \cdot \text{s}^{-1}$.

计算中有两个可以调节的参数, 分别是含 Na 成分总量的参考值和表 1 中反应 (17) 的反应常数 k_{17} . 对于 k_{17} , 取 $1.0 \times 10^{-11.8} e^{-460/T}$, 量级与其经验值表达式^[10] 相同. 95 km 处, 90% 以上的含 Na 成分是以 Na 原子的形式存在^[7], 因此, 以此处的 Na 原子密度为参考值, 可以较精确算出含 Na 成分总量的分布. 为此本文利用武汉大学激光雷达在 2001 年 4 月 17 日晚至 18 日凌晨的观测数据, 取其 95 km 处 Na 原子数密度的平均值为参考值.

根据雷达方程^[11], z 高度上 Na 原子数密度 $n(z)$ 由公式

$$n(z) = \frac{z^2 \sigma_R n_a(z_R)}{z_R^2 \sigma} \frac{(N(z) - N_B R_L \Delta t)}{(N_R(z_R) - N_B R_L \Delta t)}$$

求出. 其中, z_R 为归一化高度, $n_a(z_R)$ 为归一化高度上的大气数密度, $N(z)$ 为 z 高度上距离 Δz 范围内在积累时间 Δt 内的回波光子计数, N_B 为单位脉冲的背景光子计数, R_L 为激光器的脉冲重复频率, 根据激光器的输出波长和线宽, 可以得出瑞利微分散射截面 σ_R 和 Na 荧光共振微分散射截面 σ 分别为 $4.012 \times 10^{-32} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$ 和 $0.425 \times 10^{-16} \text{ m}^2 \cdot \text{sr}^{-1}$.

按上述一维模型计算的高空中性 Na 原子及其他主要含 Na 成分数密度的高度分布如图 2 所示, 其他几种含 Na 物质数密度均远小于 10 cm^{-3} , 因此没有在图中显示. 为了对比, 图中还给出了武汉上空 Na 层的观测结果. 由于模型计算的是时间平均下的结果, 所以应该用观测结果的平均值与之比较. 对 2001 年 4 月 17 日晚到次日凌晨大约 120 个观测剖面作时间平均, 得到图 2(a) 中的观测结果. 我们看到, 理论计算与实际观测到的 Na 层分布在基本形态, 包括曲线轮廓、分布范围、峰值高度和变化趋势等各个方面都吻合得相当好. 其主要差别是, 峰值处中性 Na 原子数密度的值及 Na 层上下边界的细微变化等, 但总的来说模型是有效的. 由图还可以看出, 95 km 以上 Na^+ 占主导地位, 95 km 以下, Na, NaO, NaO_2 , NaOH 和 NaHCO_3 是 Na 的主要存在形式.

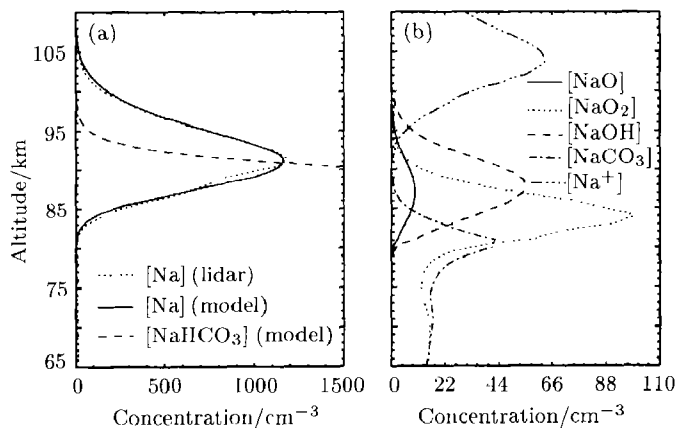


图 2 模型计算得到的中性钠原子及其他主要含钠成分数密度
Fig.2 Modeled concentration profiles of Na and other major sodium species

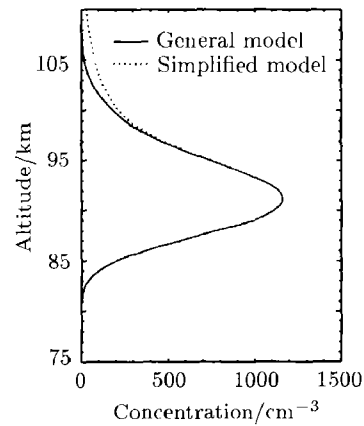


图 3 利用简化模型计算的中性钠原子的数密度
Fig.3 Concentration profile of Na obtained from the simplified model

当简化模型时, 只考虑 Na, NaO, NaO_2 , NaOH 和 NaHCO_3 5 种含 Na 成分, 发现此时的模拟结果除了 95 km 以上外, 也与观测数据吻合得较好, 如图 3 所示. 这说明各种含 Na 物质的重要性在不同区域是不同的, 因此理论分析时可以根据需要对模型作一定的简化.

3 模型的稳定性分析

3.1 控制方程组的简化

有了平衡态的结果, 就可以分析叠加在平衡态上的小扰动是否发展, 从而讨论模型的稳定性. 为了方便, 对模型作一些简化. 首先, Na 原子数密度在中层顶附近达到最大值,

所以取 85—95 km 为计算区域. 其次只考虑上述 5 种含 Na 物质的化学循环, 从上面模拟结果知道这是合理的. 最后, 中层顶附近温度和扩散系数变化不大, 因此可以假定计算区域为等温层, 且各高度上扩散系数相等. 另外, 我们假设垂直风速为零, 因此, 模型中 $\frac{dn}{dt} = \frac{\partial n}{\partial t} + \omega \frac{\partial n}{\partial z} = \frac{\partial n}{\partial t}$, ω 为垂直风速.

与 (1) 式对应, 模型简化后有 5 个方程, 利用它们可以分析模型的稳定性. 为了方便, 用 n_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 表示上述 5 种含 Na 物质的数密度分布, 用 $A-G$ 和 J 分别表示 O_3 , O , H , CO_2 , H_2O , O_2 , N_2 和 H_2 的数密度, 用 M 表示大气平均密度, 则有

$$\begin{aligned} \frac{dn_1}{dt} = & n_1(-k_1A - k_3FM) + n_2(k_2B + k_{4a}A + k_{9b}J + k_{10}C) + n_3k_{11}C + n_4k_{12}C \\ & + n_5k_{17}C + K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial n_1}{\partial z} + n_1 \frac{1}{H} \right) + I_1, \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{dn_2}{dt} = & n_1k_1A + n_2(-k_2B - k_{4a}A - k_{4b}A - k_8E - k_{9a}J - k_{9b}J - k_{10}C) \\ & + n_3k_6B + K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial n_2}{\partial z} + n_2 \frac{1}{H} \right) + I_2, \end{aligned} \quad (5)$$

$$\frac{dn_3}{dt} = n_1k_3FM + n_2k_{4a}A + n_3(-k_6B - k_{11}C) + K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial n_3}{\partial z} + n_3 \frac{1}{H} \right) + I_3, \quad (6)$$

$$\frac{dn_4}{dt} = n_2(k_8E + k_{9a}J) + n_4(-k_{12}C - k_{16}DM) + K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial n_4}{\partial z} + n_4 \frac{1}{H} \right) + I_4, \quad (7)$$

$$\frac{dn_5}{dt} = n_4k_{16}DM - n_5k_{17}C + K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial n_5}{\partial z} + n_5 \frac{1}{H} \right) + I_5. \quad (8)$$

为了讨论方程组的稳定性, 在方程组平衡态解 $\bar{n}_i$ ($i = 1, 2, \dots, 5$) 上叠加一个小扰动项 $n'_i = \bar{n}_i T_i(t) e^{jk_z z + \theta_i}$, 其中, $T_i(t)$ 为时间的函数, 与具体的含 Na 成分相关; k_z 为含 Na 成分数密度扰动的垂直波数; θ_i 为密度扰动的相位因子. 则有

$$\frac{\partial n'_i}{\partial z} = jk_z \bar{n}_i T_i(t) e^{jk_z z + \theta_i} + T_i(t) e^{jk_z z + \theta_i} \frac{\partial \bar{n}_i}{\partial z} = jk_z n'_i + \frac{n'_i}{\bar{n}_i} \frac{\partial \bar{n}_i}{\partial z}, \quad (10)$$

$$\frac{\partial^2 n'_i}{\partial z^2} = \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial n'_i}{\partial z} \right) = \frac{n'_i}{\bar{n}_i} \frac{\partial^2 \bar{n}_i}{\partial z^2} + 2jk_z \frac{n'_i}{\bar{n}_i} \frac{\partial \bar{n}_i}{\partial z} - k_z^2 n'_i. \quad (11)$$

同时, 因为 (4)–(8) 式在平衡态下仍然成立, 所以取 $I_i = -K \frac{d}{dz} \left(\frac{\partial \bar{n}_i}{\partial z} + \bar{n}_i \frac{1}{H} \right)$. 将 $n_i = \bar{n}_i + n'_i$ 代入上述方程组中, 利用 (10) 和 (11) 式, 即可推导出关于小扰动的线性方程组. 为了方便起见, 记 $\mathbf{n}' = [n'_1 \ n'_2 \ n'_3 \ n'_4 \ n'_5]^T$. 在垂直风速为零的假设下, 有

$$\frac{d\mathbf{n}'}{dt} = \mathbf{C}_A \cdot \mathbf{n}', \quad (12)$$

式中 $\mathbf{C}_A$ 为方程组的系数矩阵, 其具体形式为

$$\mathbf{C}_A = \begin{bmatrix} \beta_1 \beta_2 & k_{11}C & k_{12}C & k_{17}C & \\ k_1A & \beta_3 & k_6B & 0 & 0 \\ k_3FM & k_{4a}A & -k_6B - k_{11}C + K_3 & 0 & 0 \\ 0 & k_8E + k_{9a}J & 0 & -k_{12}C - k_{16}DM + K_4 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & k_{16}DM & -k_{17}C + K_5 \end{bmatrix},$$

$$\beta_1 = -k_1A - k_3FM + K_1, \quad \beta_2 = k_2B + k_{4b}A + k_{9b}J + k_{10}C,$$

$$\beta_3 = -k_2 B - k_{4a} A - k_{4b} A - k_8 E - k_{9a} J - k_{9b} J - k_{10} C + K_2.$$

其中,

$$K_i = K \left[\frac{1}{\bar{n}_i} \frac{d^2 \bar{n}_i}{dz^2} + \frac{1}{H} \frac{1}{\bar{n}_i} \frac{d \bar{n}_i}{dz} + \frac{d}{dz} \left(\frac{1}{H} \right) - k_z^2 + j \left(2k_z \frac{1}{\bar{n}_i} \frac{d \bar{n}_i}{dz} + \frac{k_z}{H} \right) \right], \quad (i = 1, 2, \dots, 5).$$

令 $\bar{n}' = C_B X$, C_B 为 5×5 矩阵, 代入到 (12), 并在方程两边乘以 C_B^{-1} , 有

$$\frac{dX}{dt} = C_B^{-1} \cdot C_A \cdot C_B X. \quad (13)$$

如果 C_A 有 5 个特征向量, 以它们为列构成 C_B 时, 方程 (13) 可化为

$$\frac{dX}{dt} = \begin{bmatrix} \lambda_1 & & & & \\ & \lambda_2 & & & \\ & & \lambda_3 & & \\ & & & \lambda_4 & \\ & & & & \lambda_5 \end{bmatrix} X. \quad (14)$$

其中, λ_i ($i = 1, 2, \dots, 5$) 为系数矩阵 C_A 的特征值. 下面利用 λ_i 讨论模型的稳定性.

方程组的系数矩阵 C_A 是扰动的垂直波长, 背景化学成分密度, 扩散系数和温度的函数. 其中, 背景化学成分密度与上文 Na 层稳态模型的相同, 温度和扩散系数的数据取自 Roble 的 TIME-GCM 模型 [7], 但是与稳态不同, 这里取它们在计算区域内的平均值代入计算, 并让它们在一定范围内变化. 在 85—95 km 之间, 稳态模型中扩散系数的平均值是 $60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 但 Plane 等提到, 它的取值可能比实际值大 5 倍左右 [7], 所以本文将其调节范围取为 $10\text{--}60 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 而温度的平均值为 184 K, 取 174—194 K 为其调节范围. 关于扰动波长的取值, 需用 WKB 近似条件来限制, 本文计算区域内背景大气和 Na 层变化的特征尺度的最小值为 2 km 左右, 因此, 计算时扰动的垂直波长的取值应小于 2 km.

3.2 计算结果与讨论

计算表明, C_A 有 5 个不同的特征值, 说明小扰动有 5 种传播模式. 这些特征值是扰动波长, 背景化学成分密度, 扩散系数和温度的函数, 我们的主要目的是分析模型的稳定性, 所以本文只对这些特征值的实部展开讨论.

图 4 显示了 85 km 处, 温度为 174 K、扩散系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 5 个特征值的实部随扰动波长的变化. 从图中可知, 当扰动波长较小时, 它们随着波长的增大而剧烈增加; 但是随着波长的继续增大, 它们却逐渐趋于稳定, 变化很小; 而且, 即使波长达到 2 km, 所有特征值的实部仍然小于零.

由于在不同高度上, 只有背景化学成分密度不同, 所以图 5 也就反映了特征值随背景化学成分密度的变化. 观察该图发现, 有两个特征值变化相当剧烈, 且都随着高度的增加而减小; 有两个变化相对较小, 但是它们随着高度的增加而增大; 最后这一个几乎不随高度变化. 而且在所有高度上, 特征值的实部也都小于零.

图 6 描述了在 85 km 处, 当扰动的垂直波长为 2 km, 温度为 174 K 时, 特征值的实部随扩散系数的变化. 计算表明, 在扩散系数的调节范围内, 5 个特征值的实部也都小于零, 而且它们都随着扩散系数近似线性减小. 由于变化规律基本相同, 图中仅给出 5 条曲线中的一条. 从图中看到, 与图 4 和图 5 相比, 其变化要平缓一些.

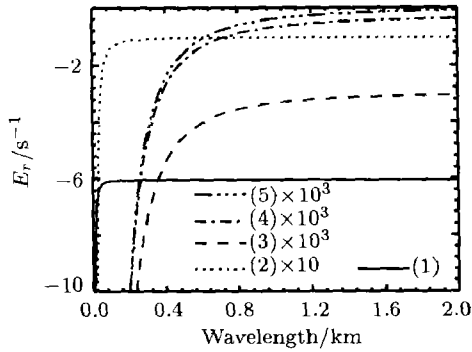


图4 当高度为 85 km, 温度为 174 K, 扩散系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时特征值实部随扰动波长的变化

Fig.4 When the altitude, temperature and eddy coefficient are, respectively, taken to be 85 km, 174 K and $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, variations of real parts of the eigenvalues with wavelengths of perturbations

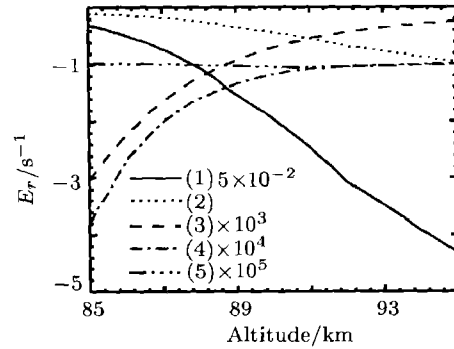


图5 当扰动波长为 2 km, 温度为 174 K, 扩散系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时特征值实部随高度的变化

Fig.5 When the wavelengths of perturbations, temperature and eddy coefficient are, respectively, taken to be 2 km, 174 K and $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, variations of real parts of the eigenvalues with altitude

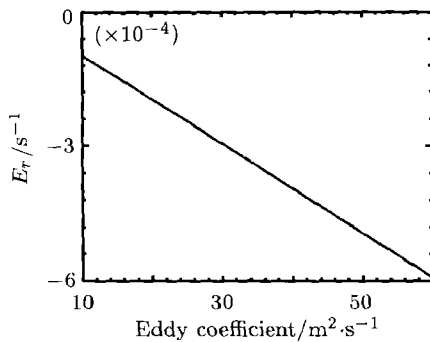


图6 当高度为 85 km, 温度为 174 K, 扰动波长为 2 km 时特征值实部随扩散系数的变化

Fig.6 When altitude, temperature and wavelengths of perturbations are, respectively, taken to be 85 km, 174 K and 2 km, variation of real part of the eigenvalue with the eddy coefficient

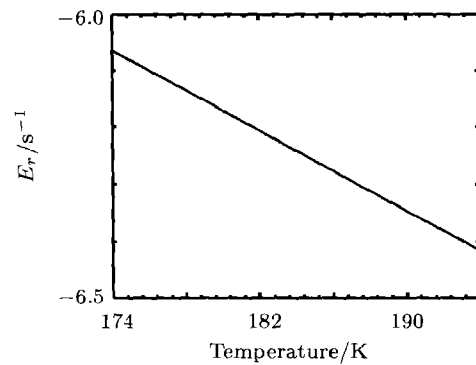


图7 当高度为 85 km, 扩散系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, 扰动波长为 2 km 时特征值实部随温度的变化

Fig.7 When altitude, eddy coefficient and wavelengths of perturbations are, respectively, taken to be 85 km, $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ and 2 km, variations of real part of the eigenvalue with temperature

分析温度对特征值的影响发现, 当温度由 174 K 增加到 194 K 时, 5 个特征值中只有 2 个特征值变化幅度较大, 且它们的实部随温度升高而变小, 其他 3 个变化非常小, 其中一个的实部随温度升高变大, 另外两个随温度升高而变小. 而且在温度的调节范围内, 所有特征值的实部都小于零. 图 7 给出了变化幅度较大的特征值中的一个. 图中显示, 在 85 km 高度处, 取扰动波长为 2 km, 扩散系数为 $10 \text{ m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$ 时, 这个特征值的实部随温度近似线性减小.

从上述特征值的实部随参数变化规律看到, 计算区域的各个高度上, 在其他参数的调

节范围内, 无论如何调节参数, 甚至取扰动波长为 5 km 时, 所有特征值的实部都小于零, 这说明小扰动的振幅随时间而衰减, 模型是个稳定的系统. 同时还发现, 扰动的垂直波长和扩散系数使 5 个特征值产生相似的变化, 而不同的特征值随背景化学成分密度和温度的变化特点不同, 这反映它们对特征值的影响具有选择性. 观察模型的控制方程知道, 背景化学成分和温度通过化学反应来影响计算, 由于不同化学反应的反应系数和温度敏感性不同, 所以它们对不同的特征值的影响不同; 而垂直波长和扩散系数是通过扩散过程影响含 Na 成分的分布, 在模型中我们假定扩散系数对所有含 Na 成分都相同, 所以它们会引起所有含 Na 成分产生相似变化, 因此 5 个特征值随它们的变化规律相似.

4 总结

与武汉大学激光雷达的观测数据进行比较, 本文验证了 Na 层理论模型的普适性. 通过适当调节少数几个参数, 就可得到与实际观测吻合得很好的理论计算结果. 但是由于模型本身对温度和大气背景比较敏感, 在计算时对这些参数的精确性有较高要求. 而在测量它们时, 受实验条件的限制, 无法同时获得这些参数, 只能用模型和观测的平均值代替, 因此模型的精确性在一定程度上受到影响. 这导致了理论计算与实际观测的差别, 包括峰值处中性 Na 原子数密度的大小及 Na 层上下边界的细微变化等.

在简化模型的基础上, 分析模型的稳定性发现, 模型中小扰动有 5 种传播模式, 而且它们的振幅都随时间衰减, 模型是个稳定系统. 这说明本文采用的模型可以作为很好的背景, 来分析 Na 层中存在波动时等较复杂的情况. 文中提到, 模型中除了 Na 离子和 NaHCO_3 以外, 没有其他形式的汇, 但研究表明, 大气中的尘埃对含 Na 成分有较强的吸附作用, 附着其上的含 Na 成分极有可能成为 Na 层的汇^[7], 考虑这种汇的机制后, 模型应该变得更稳定性.

参 考 文 献

- [1] Bowman M R, Gibson A J, Stanford M C. Atmosphere sodium measured by a tuned laser radar. *Nature*, 1969, **221**:456—457
- [2] YI Fan, Zhang Shaodong, Zeng Haijian *et al.* Lidar observations of sporadic Na layers over Wuhan (30.5°N, 114.4°E). *Geophys. Res. Lett.*, 2002, **29**(9):59-1—59-4
- [3] Plane J M C. The chemistry of meteoric metals in the Earth's upper atmosphere. *Int. Rev. Phys. Chem.*, 1991, **10**:55—106
- [4] Helmer M, Plane J M C. A study of the reaction $\text{NaO}_2 + \text{O} \rightarrow \text{NaO} + \text{O}_2$: Implications for the chemistry of sodium in the upper atmosphere. *J. Geophys. Res.*, 1993, **98**(D12):23 207—23 222
- [5] McNeil W J, Murad E, Lai S T. Comprehensive model for the atmospheric sodium layer. *J. Geophys. Res.*, 1995, **100**(D8):16 847—16 855
- [6] Li Hongjun, Zheng Wengang, Yang Guotao *et al.* The observation and theoretical modeling of sodium distribution over Wuhan, China. *Chin. J. Space Sci.*, 1999, **19**(1):54—60. in Chinese (李洪钧, 郑文钢, 杨国韬等. 中国武汉上空钠层分布的实验观测与理论模拟. 空间科学学报, 1999, **19**(1):54—60)
- [7] Plane J M C, Gardner C S, Yu J, She C Y, Garcia R R, Pumphrey H C. Mesospheric Na layer at 40°N: Modeling and observations. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104**(D3):3 773—3 788
- [8] Plane J M C, Cox R M, Qian J, Pfenninger M, Papen G C, Gardener C S, Espy P J. The mesospheric Na layer at extreme high latitudes in summer. *J. Geophys. Res.*, 1998, **103**(D6):6 391—6 389

- [9] Plane, J M C, Cox R M, Rollason R J. Metallic layer in the mesopause and lower thermosphere region. *Adv. Space Res.*, 1999, **24**(11):1 559—1 570
- [10] Rachel M Cox, Self D E, Plane J M C. A study of the reaction between NaHCO_3 and H: Apparent closure on the chemistry of mesospheric Na. *J. Geophys. Res.*, 2001, **106**(D2):1 733—1 739
- [11] Richter E S *et al.* Lidar observations of the mesospheric sodium layer over Urbana Illinois. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 1981, **43**:327—337

A PRELIMINARY STUDY ON STABILITY OF Na LAYER AT MESOPAUSE

PAN Xiaomin¹ YI Fan¹ LI Fang²

¹(College of Electronics and Information, Wuhan University, Wuhan 430079)

²(Institute of Electronics, The Chinese Academy of Sciences)

Abstract

By comparing the modeled results with observations obtained by Wuhan University Lidar, the validity of the current Na layer model is examined. With a small number of permitted adjustable parameters, the model is able to reproduce many observed features of the Na layer remarkably well. The stability of a simplified model is analyzed by using the perturbation method. It is indicated that the model is a stable system because all the model's five eigenvalues' real parts are negative when reasonably adjusting the mayor coefficients, including the wavelengths of perturbations, the concentration of the background chemical species, eddy coefficient, and temperature. The results show that the wavelengths of perturbations and the magnitude of eddy coefficient strongly influence all the five eigenvalues: the magnitudes of all the eigenvalues' real parts ascend with the increasing perturbation wavelengths and descend with the increasing eddy coefficient. However, the concentrations of the background chemical species and temperature have strong effects on only part of them.

Key words Na layer, Numerical model, Stability