

临震前地球放气与大气顶射出光谱辐射*

汪宏七 赵高祥

(中国科学院大气物理研究所, 北京 100029)

提 要

通过不同分辨率的辐射传输计算, 分析了大气中 CH_4 浓度增加对大气顶射出光谱辐射率的影响。在某些波段, 射出光谱辐射率在 CH_4 浓度显著增加时会有明显的减少, 而气溶胶和水汽等的变化造成的影响又较小。这种通道的射出辐射可反映出大气中 CH_4 浓度的增加, 从而有可能通过卫星辐射测量对地震前孕震区大气中 CH_4 浓度增加这一地震前兆进行监测。

关键词: 卫星遥感; 甲烷; 地震前兆。

一、引 言

人们早就观测到地震前地面出现的异常增温, 并已有工作利用卫星热红外波段来监测这种地面增温, 并用来试报地震^[1-3]。地震前的另一种现象是孕震区地球大量放气, 对此也有不少观测和研究^[4-6]。观测显示, 一些地震前地面 CH_4 含量可能有几倍的增长。例如在首都圈地区 (38.5—41.0°N, 113.0—120.0°E) 的唐山、滦县、河间、渤海1991年相继发生了四次3.8级到5.1级的地震, 在震前几天到十几天, 北京观测到地面 CH_4 含量增加七成到五倍多 (见表1), 而且, CH_4 浓度显著的增加可出现在震中周围相当大的范围内。 CH_4 是一种红外吸收气体, 它在大气中浓度的变化就可能引起某些波段上大气顶的地气系统向外射出辐射的变化, 因此也有可能在卫星上利用这些波段的辐射测量, 持续地对出现在相当大范围内的这种地震前兆进行监测。而同时利用热红外通道和 CH_4 通道, 则可能排除天气过程引起的温度变化的干扰, 更有效地利用卫星对地震前兆进行监测。

本文利用辐射传输理论计算, 考察在地面和近地大气中 CH_4 含量增加的一些不同的情况下, 大气顶射出的高分辨率光谱辐射率的变化情况, 以及其它大气成分变化可能引起的干扰。计算结果表明, 在近红外 CH_4 吸收带中有些窄波段上, 地面和近地面大气 CH_4 显著变化可引起大气顶射出辐射有明显的减少, 而 H_2O 、 O_3 等成分对射出辐射的影响则很小, 甚至没有什么影响; 在另一些窄波段上 CH_4 变化对射出辐射没有影响, 射出辐射变化只反映地面和大气温度等的状况。因此不同波段上大气顶射出光谱辐射率的异常变化可以反映地球向大气大量排放 CH_4 这一重要事实, 从而可在地震前兆监测和地震预报研究中加以利用。

1993年5月31日收到, 10月10日收到修改稿。

* 中国科学院大气物理研究所所长择优基金资助项目。

表 1 在 1991 年首都圈地区的唐山、滦县、河间和渤海四次地震前，在北京观测到的近地面大气中 CH₄ 浓度变化

地 震	CH ₄ 浓度 (ppmv)								
唐 山 1991 年 5 月 30 日 (39°41'N, 118°16'E) M _S 5.1 Δ=180km	5 月 21 日	5 月 29 日							
	2.92	2.36							
滦 县 1991 年 7 月 27 日 (39°57'N, 118°44'E) M _S 4.6 Δ=200km	7 月 9 日	7 月 10 日	7 月 11 日	7 月 16 日	7 月 19 日	7 月 23 日	7 月 24 日	7 月 25 日	7 月 26 日
	5.4	6.2	3.1	9.3	4.5	5.6	3.0	3.16	2.6
河 间 1991 年 8 月 10 日 (38°21'N, 115°55'E) M _S 3.8 Δ=158km	7 月 28 日	7 月 29 日	8 月 2 日	8 月 3 日	8 月 4 日	8 月 5 日	8 月 6 日	8 月 8 日	
	4.5	3.59	4.43	3.28	3.2	2.7	3.7	3.9	
渤 海 1991 年 9 月 2 日 (38°46'N, 120°14'E) M _S 4.6 Δ=400km	8 月 13 日	8 月 21 日	8 月 31 日						
	3.6	3.2	3.65						

M_S: 震级; Δ: 震中至北京监测台的距离。

二、理 论

在波数为 ν 处，地气系统在大气顶垂直方向向外发射的红外光谱辐射率 $I(\nu)$ 可表示为

$$I(\nu) = B(\nu, T_s)\tau_s(\nu) + \int_0^\infty B(\nu, T) \frac{\partial \tau(\nu, z)}{\partial z} dz, \tag{1}$$

式中 B 为普朗克函数， τ_s 为地面到大气顶的垂直方向上的大气光谱透过率， T 为在大气中高度 z 处的气温， τ 为从高度 z 到大气顶的垂直方向上的大气光谱透过率。这里，为简单起见，在 (1) 式中把地面看作黑体。

在光谱宽度为 $\Delta\nu$ 的波段上，地气系统在大气顶的射出辐射率则可由 (1) 式在 $\Delta\nu$ 上对频率积分得到

$$I(\Delta\nu) = \int_{\Delta\nu} B(\nu, T_s)\tau_s(\nu)d\nu + \int_{\Delta\nu} \int_0^\infty B(\nu, T) \frac{\partial \tau(\nu, z)}{\partial z} dzd\nu, \tag{2}$$

式中右端第一项表示地面辐射经大气层吸收后对射出辐射率 $I(\Delta\nu)$ 的贡献，右端第二项为大气中各个层的辐射经相应的层以上的大气吸收后对 $I(\Delta\nu)$ 的贡献。

由 (2) 式可以看到，若 $\Delta\nu$ 处在 CH₄ 的吸收带中，则当大气中 CH₄ 的浓度发生变化时，大气的透过率 τ_s 和 τ 就会有变化；大气层对辐射的吸收和发射率也有变化；从而地面对大气顶射出辐射的贡献和大气本身的贡献都可发生变化；造成总的射出辐射率

$I(\Delta\nu)$ 的改变。同时, 地面和大气不同高度的各个层的贡献在射出辐射中所占的份额也有所改变。这种变化的大小, 与 $\Delta\nu$ 在 CH_4 吸收带中所处的位置, 以及 CH_4 浓度变化的大小和 CH_4 浓度变化在垂直方向的分布有关。当 CH_4 浓度变化引起的射出辐射率 $I(\Delta\nu)$ 的变化足够大时, 就可在卫星上测量到这种变化, 从而有可能在适当波段, 由卫星对地震前大气中 CH_4 浓度增加这一地震前兆进行监测。

三、计算结果

为了考察大气中 CH_4 浓度变化与大气顶射出辐射率变化之间的关系, 利用 FASCODE 辐射传输计算程序^[7], 计算了不同大气状况下, 大气顶向上的近红外 CH_4 $3.3\mu\text{m}$ 吸收带中的光谱辐射率。图 1 给出在地面能见度为 23km 的乡村大陆背景气溶胶模式时, 美国标准大气在 $2870\text{--}3050\text{cm}^{-1}$ 波段范围内的 1cm^{-1} 间隔平均的大气顶垂直向上光谱辐射率, 在图的下方同时给出对美国标准大气, 在(a)0—5km 高度上,

CH_4 增加一倍; (b)0—5km 高度, H_2O 增加 20%; 和(c)大气各高度 O_3 增加 20%等几种情况下, 大气顶向上的光谱辐射率相对美国标准大气时的相对变化。为清晰起见, 图中三种情况纵坐标的零点相差一格。可以看到在这一光谱范围内, 在较强的 CH_4 吸收线附近, 0—5km 高度 CH_4 浓度加倍可引起 1cm^{-1} 平均辐射率减少 10%以上, 如在 2927 、 2938cm^{-1} 减少 15%左右, 在 2917 、 3014cm^{-1} 减少达 18%。 O_3 的变化仅对大于 2975cm^{-1} 的波段的射出辐射率有影响, 当 O_3 增加 20%时, 在 $2975\text{--}3050\text{cm}^{-1}$, 辐射率减少小于 0.7%。 H_2O 的影响在 $2961\text{--}3050\text{cm}^{-1}$ 较显著, 在有些波长上, H_2O 在 0—5km 增加 20%可使辐射率减少 7%。但在小于 2944cm^{-1} 的有些波长上, H_2O 吸收很弱, H_2O 变化的影响很小, 小于 0.5%。图 2 中给出与图 1 对应的光谱宽度为 1cm^{-1} 上平均的亮温值, 及上述成分变化后的大气与美国标准大气的亮温差。可以看到, 对情况(a), 有些波段上亮温减小可达 2—3K; 对情况(b), 在 2961 到 3050cm^{-1} 范围内, H_2O 的影响可使有些波长上的亮温变化达 1K 多, 但在波数小于 2944cm^{-1} 时, 大多数频率上水汽吸收引起的亮温变化都很小, 在有些频率上的亮温变化小于 0.1K; 对情况(c), 在所考虑的光谱范围

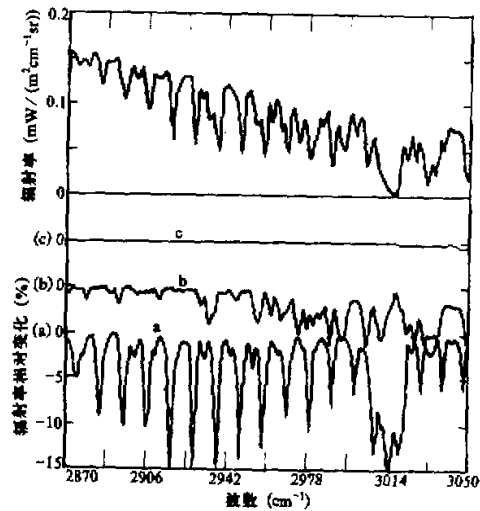


图 1 $2870\text{--}3050\text{cm}^{-1}$ 波段大气顶垂直向上光谱辐射率及不同大气成分变化引起的射出光谱辐射率相对变化
U.S.标准大气, 1cm^{-1} 间隔平均, 地面能见度 23km
(a)0—5km, CH_4 增加一倍, (b)0—5km, H_2O 增加 20%, (c)各高度 O_3 增加 20%

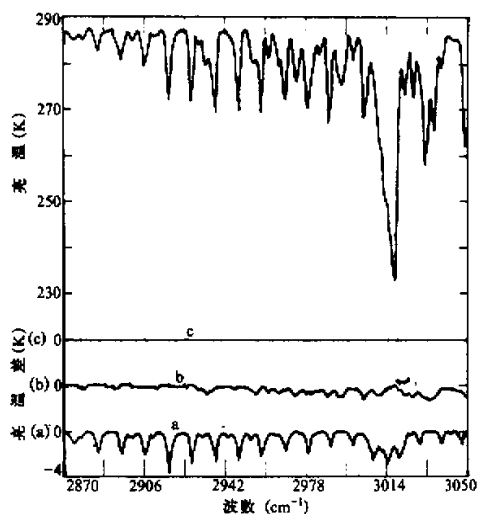


图2 2870—3050 cm^{-1} 波段大气顶垂直向上射出辐射光谱亮温及不同大气成分变化引起的亮温差
U.S.标准大气, 1 cm^{-1} 间隔平均, (a), (b), (c)情况如图1

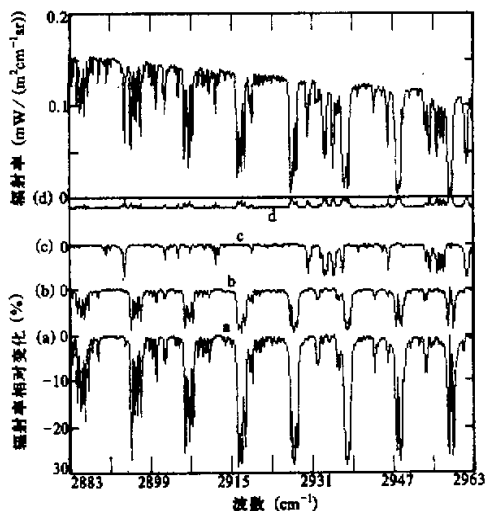


图3 2883—2963 cm^{-1} 波段大气顶垂直向上光谱辐射率及不同大气成分变化引起的射出光谱辐射率相对变化
U.S.标准大气, 地面能见度23km, 0.1 cm^{-1} 间隔平均
(a)0—5km, CH_4 增加一倍, (b)0—2km, CH_4 增加一倍, (c)0—5km, H_2O 增加20%, (d)地面能见度5km

内, O_3 没有或几乎没有什么影响。

对水汽影响较小的 2883—2963 cm^{-1} 波段, 进一步考察了更高分辨率的光谱射出辐射率的变化。图3给出 2883—2963 cm^{-1} 中分辨率为 0.1 cm^{-1} , 地面能见度为 23km 乡村大陆背景气溶胶模式时的美国标准大气的大气顶向上光谱辐射率, 以及其它状况相同, 但(a)在 0—5km 高度 CH_4 增加一倍, (b)0—2km 高度 CH_4 增加一倍, (c)0—5km 高度 H_2O 增加 20%, (d)气溶胶为地面能见度 5km 的乡村气溶胶等几种情况下的射出光谱辐射率的相对变化。在更高的光谱分辨率下, 辐射率随波长变化更快, 可以观测到更精细的光谱结构, 在较宽光谱间隔平均时被平滑掉的一些变化, 在 0.1 cm^{-1} 分辨率时则明显可见。在有些波长上, 0—5km 高度 CH_4 加倍可使辐射率减少大于 28%, 在 0—2km 高度上 CH_4 增加一倍, 辐射率减少大于 9%。在 2896、2907、2917 cm^{-1} 等波长附近对 CH_4 变化有较高的灵敏度, 并且在这些波段上, H_2O 吸收影响很小, O_3 没有影响。在图中同时列出了气溶胶改变引起的辐射变化。近地面大气中气溶胶增加使能见度由 23km 变成 5km 时, 可使在大气很透明的波长上辐射率减少约 2.2%, 而在 CH_4 或 H_2O 较强的吸收线上, 由于发射辐射的贡献主要来自地面以上的大气, 所以近地面的气溶胶影响较透明的波长要小, 只有约 0.7% 左右。因此, 这些波段上 CH_4 增加引起的辐射变化比其它成分更大, 能容易地区分出来。

由于地震前还常有大气增温的现象, 我们还考察了大气温度升高, CH_4 不变和 CH_4 大量增加时射出辐射的变化。

图4给出中纬夏季大气, 在地面能见度为 23km 的乡村背景气溶胶时, 2892—2922

cm^{-1} 的大气顶射出辐射率以及(a)地面到 5km 高度温度增加 5K, 0—5km 高度 CH_4 增加一倍, (b)地面到 5km 高度温度增加 5K, 0—2km 高度 CH_4 增加一倍, (c)地面到 5km 高度温度增加 5K, CH_4 没有变化等三种情况下, 0.1cm^{-1} 上平均的大气顶射出辐射率相对中纬夏季大气时的变化。可以看到, 地面和大气温度的升高使大气顶这一波段范围内各波长上的射出辐射增加, 在有吸收的波长上比透明波长上增加稍小, 在这个波段的辐射增加量在 23%—27% 之间。当同时有低层大气 CH_4 大量增加时, 情况则不同。在 0—5km 高度 CH_4 加倍的情况下, 较透明波段仍有相同的增加, 但在有吸收的波长上辐射增加很少或还有减少, 在强吸收波长上辐射减少 2%—4%。在 0—2km 高度 CH_4 加倍时, 吸收波长上辐射仍是增加的, 但比 CH_4 不变时要小。图 5 给出类似图 4, 但分辨率为 0.01cm^{-1} , 波长范围在 2891—2901 cm^{-1} 的中纬夏季大气时的射出辐射率和(a)、(b)两种情况下辐射率的相对变化。表 2 给出这两种不同分辨率, 在两种不同大气状况下, 几个波长上的辐射率的相对变化。其中 2898.3 cm^{-1} 、2898.25 cm^{-1} 位于较透明处, 2895.8 cm^{-1} 、2895.76 cm^{-1} 位于有吸收处。当温度升高, CH_4 不变时, 这几个波长的射出辐射增加差不多, 约 25%—27%, 当同时有 0—2km CH_4 加倍时, 在吸收的波长处辐射明显比 CH_4 不变时要小。通道宽度为 0.1cm^{-1} 时, 增加为 19% 左右, 分辨率为 0.01cm^{-1} 时比分辨率为 0.1cm^{-1} 更明显一些, 仅增加

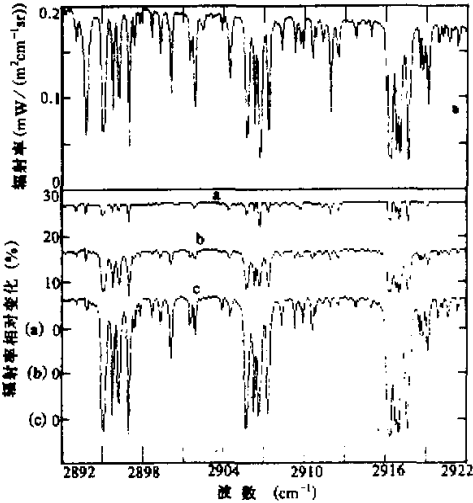


图 4 2892—2922 cm^{-1} 波段大气顶垂直向上光谱辐射率及不同大气成分变化引起的射出光谱辐射率的相对变化
中纬夏季模式大气, 地面能见度 23km, 0.1cm^{-1} 间隔平均。
(a)0—5km 大气温度增加 5K, (b)0—5km, 大气温度增加 5K, 0—2km, CH_4 增加一倍, (c)0—5km, 大气温度增加 5K, 0—5km, CH_4 增加一倍

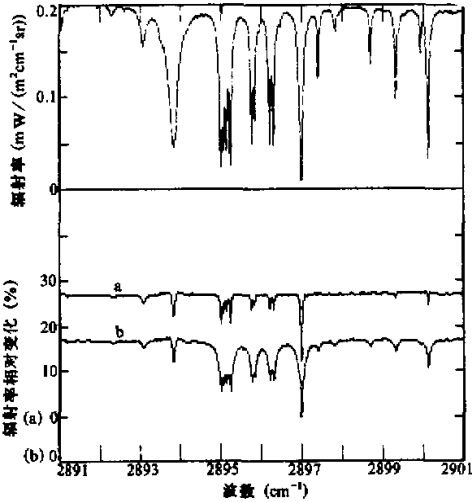


图 5 2891—2901 cm^{-1} 波段大气顶垂直向上光谱辐射率及不同大气成分变化引起的射出光谱辐射率的相对变化
中纬夏季大气, 地面能见度 23km, 0.01cm^{-1} 间隔平均。
(a)(b)情况如图 4

表 2 不同宽度, 不同通道大气顶垂直射出辐射率在大气状况变化时
相对模式大气时的变化 (中纬夏季模式大气)

通道宽度 (cm^{-1})	波 数 (cm^{-1})	射出辐射率相对变化 (%)	
		0—5km T+5K CH_4 不变	0—5km T+5K 0—2km $\text{CH}_4 \times 2$
0.1	2898.3	+26.9	+25.1
	2895.8	+26.7	+19.0
0.01	2898.25	+27.0	+27.0
	2895.76	+26.8	+17.6

17.6%, 但透明的波长处辐射率的增加几乎没有多少变化, 仍然超过 26%。因此, 由 2895.8cm^{-1} (或 2895.76cm^{-1}) 和 2898.3cm^{-1} (或 2898.25cm^{-1}) 两个通道, 可识别只有气温增加和气温与 CH_4 浓度同时增加的两种不同情况。类似地还可找出多对具有同样性质的通道。

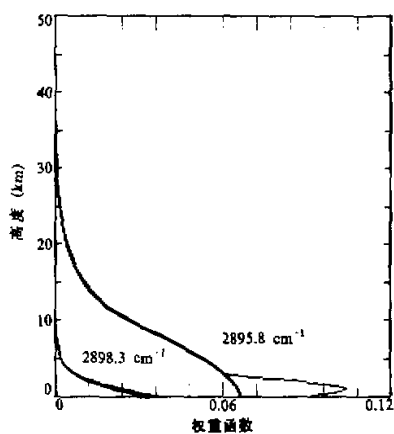


图 6 宽度为 0.1cm^{-1} 的二个通道的权重函数
粗线: 中纬夏季大气; 细线: 中纬夏季大气 0—1km
高度 CH_4 增加一倍, 1—2km 高度 CH_4 增加 50%

作为例子, 在图 6 中给出中纬夏季大气 0.1cm^{-1} 宽的两个通道的权重函数。粗线为中纬夏季大气时的情况, 细线为 0—1km 高度 CH_4 增加一倍, 1—2km 高度 CH_4 增加 0.5 倍时的情况。其中位于吸收波长上的 2895.8cm^{-1} 通道的辐射主要贡献来自低层大气和地面, 权重函数极大在地面, 当近地面 0—2km 高度 CH_4 大量增加时, 权重函数极大的位置向上提高, 近地面大气的贡献增加, 而地面透过率由 0.35 减为 0.27, 使地面贡献减少。在透明波长上的 2898.3cm^{-1} 通道, 主要贡献来自地面, 当大气 0—2km CH_4 增加时, 权重函数几乎没有什么变化, 这个通道的辐射反映地面的状况而与大气 CH_4 量无关。因此, 这二个通道表现出的不同性质, 使之可用来监测大气中 CH_4 增加和

区分是否同时有温度的变化。

四、小 结

由对 CH_4 近红外的 $3.3\mu\text{m}$ 吸收带, 在光谱范围 $2870\text{—}3050\text{cm}^{-1}$ 中, 分辨率为 1cm^{-1} 、 0.1cm^{-1} 和 0.01cm^{-1} 时, 不同大气状况下进行的辐射传输计算表明, 在某些波段上, 大气中 CH_4 浓度的增加可引起大气顶射出光谱辐射率有明显的减少, 而同时,

大气中臭氧、水汽和气溶胶对这些波段的射出辐射的影响又比较小。因此, 这些波段上大气顶的射出辐射, 可以很好反映出大气中 CH_4 含量变化的情况。但当地面和大气温度有变化时, 地面和大气温度变化可对这种波段上的射出辐射造成明显的影响。仅由这类波段的射出辐射本身是不可能区分辐射的变化是由温度变化造成的, 还是由 CH_4 含量变化引起的。但是, 若同时考察某些不受大气中 CH_4 浓度影响的波段的射出辐射时, 则仍有可能判别大气中是否有 CH_4 含量改变, 和是否同时还有温度变化。因此, 利用这二类性质不同的通道, 有可能利用卫星对地震前孕震区上空大气中 CH_4 浓度的增加进行监测。

由图 1—5 的结果还表明, 光谱分辨率越高, 在一些频率上大气顶射出光谱辐射对大气中 CH_4 浓度变化的响应越大。因此, 利用高光谱分辨率的仪器有利于从卫星上对地震前孕震区大气中 CH_4 浓度增加进行监测, 这种仪器的研制在技术上的要求也更高, 困难也更大。但目前国外已具有研制这种高光谱分辨率的卫星遥感仪器的能力。美国 1985 年在 Spacelab-3 上装载的 ATMOS^[8] 是一种 Michelson 干涉仪, 它工作在 $500-4800\text{cm}^{-1}$ 范围内, 其光谱分辨率可达到 0.015cm^{-1} , 用于监测平流层中层的多种微量气体成分, 预计在 90 年代末将在极轨平台上搭载的 AIRS^[9] 的光谱分辨率可达到 $0.4-2.0\text{cm}^{-1}$, 它工作在 $3.4-17\mu\text{m}$, 用于大气温度、湿度和微量气体成分的探测, 在 GOES 卫星上将使用的 HIS 也可达到同样的光谱分辨率, 工作的频率范围也大致相同 ($3.7-17\mu\text{m}$), HIS 的机载样机已经研制成功, 并取得了飞机试验的资料^[10]。具有 ATMOS 仪器的光谱分辨, 但带有冷却的光学系统的新卫星仪器的研制也已在计划中^[8,11], 它可直接对大气热辐射进行测量, 遥感对流层微量成分。因此, 从目前高光谱分辨率卫星遥感仪器的研制能力和将来的发展来看, 通过对高光谱分辨率的大气顶射出辐射测量来监测大气中 CH_4 浓度的增加是具有现实可能性的。

目前, 地震前孕震区 CH_4 浓度的一些测量都是在地面进行的, 还没有关于 CH_4 浓度在大气中各高度上变化的资料。在所考虑的光谱范围, 大气顶射出辐射率的变化在很大程度上取决于大气中 CH_4 含量变化的情况。当 CH_4 在大气中增加的情况不同时, 不同通道大气顶射出辐射变化不同, 适于监测的通道也会有所不同。因此, 还须进行必要的观测, 以便取得地震前孕震区 CH_4 浓度随高度变化的资料, 这对选择合适的监测通道是十分重要的。

致 谢: 有关唐山等地区地震前北京地区 CH_4 观测资料由国家地震局地质研究所强祖基教授提供, 特此致谢。

参 考 文 献

- [1] 徐秀登、强祖基、贺常恭, 1990, 实发性地面增温与临震前兆, 地震地质, 12(3), 243—250.
- [2] 强祖基、徐秀登、贺常恭, 1990, 卫星热红外异常——临震前兆, 科学通报, 17, 1324—1327.
- [3] 贺常恭、王宜吉、强祖基, 1992, 卫星热红外异常增温与常熟临震前兆, 科学通报, 9, 821—824.
- [4] 国家地震局唐山地震编组, 1982, 1976 年唐山地震, 地震出版社, 272—292.
- [5] Л.И. 玛罗佐娃等 (徐秀登译), 1990, 现代地质学关于岩石圈与大气圈的联系问题, 地震地质译丛, 2, 34—35.

- [6] В.И. ГОРЧУЙ 等 (徐秀登译), 1990, 地球热红外辐射——地震活动的标志, 地震地质译丛, 2, 38—39.
- [7] Clough, S.A., F.X. Kneizys, E.P. Shettle and G.P. Anderson, 1986, Atmospheric radiance and transmittance: FASCOD2, *Proceedings of the Sixth Conference on Atmospheric Radiation*, Williamsburg, VA, 141—144.
- [8] Taylor, F.W., 1989, Satellite measurements of minor constituents in the middle atmosphere, *Adv. Space Res.* 9, (7), 303—309.
- [9] Smith, W.L., 1989, Satellite soundings—current status and future prospects, *Adv. Space Res.* 9, (7), 363—372.
- [10] Clough, S. A. et al., 1989, Validation of Fascade Calculations with HIS Spectral Radiance Measurements, IRS' 88: Current Problems in Atmospheric Radiation, *Proceedings of the International Radiation Symposium*, Lille, France, 18—24 August 1988, 376—379.
- [11] Harries, J. E. et al., 1987, SAFIRE: A novel high resolution cooled spectrometer for atmospheric research, *Proc. I. A. F. Congress*, 87—137.

Emitting Gases from the Earth in Seismic Areas and Outgoing Spectral Radiation at the Top of the Atmosphere

Wang Hongqi and Zhao Gaoxiang

(Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029)

Abstract

Through radiative transfer calculations with different spectral resolution, the effects of increasing CH_4 concentration in the atmosphere on the outgoing spectral radiances at the top of the atmosphere have been analyzed. It is found that at some frequencies, the outgoing radiances will diminish significantly with increasing CH_4 concentration obviously, at the same time, the influences caused by the variations of aerosols and water vapor are rather small. So that the increase of CH_4 concentration in the atmosphere can be well reflected by the outgoing radiances at these frequencies, and it might be possible to monitor such an earthquake precursor, the pronounced increase of CH_4 concentration in the atmosphere in seismic areas, through satellite radiative measurements.

Key words: satellite remote sensing; methane; earthquake precursor.