

白建辉. 2010. 以能量观点研究可见光辐射在大气中的衰减 [J]. 气候与环境研究, 15 (6): 765–777. Bai Jianhui. 2010. A study of the attenuation of the solar visible radiation in the atmosphere from the point of view of energy [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 15 (6): 765–777.

以能量观点研究可见光辐射在大气中的衰减

白建辉

中国科学院大气物理研究所中层大气与全球环境探测重点实验室, 北京 100029

摘 要 2004年9月至2006年10月, 在华北地区的4个站开展了太阳辐射、气象参数等的综合测量, 得到了可见光辐射 Q_{vis} 、总辐射 Q 等的变化特征。水汽和散射因子对 Q_{vis}/Q 有明显的影响, 同时对 Q_{vis} 也有明显的作用。基于能量观点, 建立了实际天气 Q_{vis} 小时累计值 (时累) 的经验模式, 得到了较好的计算结果。水汽因子对于 Q_{vis} 在大气中的传输有一定的作用, 应该给予足够重视。计算表明, 华北地区受水汽因子衰减到达地面的 Q_{vis} 以及占地面 Q_{vis} 的比例分别为 $8.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 4.24% , 受散射因子衰减到达地面的 Q_{vis} 以及占地面 Q_{vis} 的比例分别为 $171.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 95.76% 。华北地区受水汽因子和散射因子影响损失于大气中的 Q_{vis} 分别为 $16.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 $311.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$, 这一能量损失有季节变化和区域差别。敏感性实验表明, 到达地面的 Q_{vis} 对水汽因子、散射因子的变化有不同的响应, Q_{vis} 对散射因子的变化比对水汽因子的变化更为敏感。水汽因子与可见光辐射之间的关系密切, 水汽因子项的真正含义应该是大气中的各种物质成分 (气、液、固态) 对可见光辐射直接和间接 (通过化学和光化学反应, 包括均相和非均相过程) 利用的总和。利用 Q_{vis} 经验模式计算了大气顶的 Q_{vis} , 其计算误差为 3.5% 。在目前及未来研究中, 应重视和考虑消耗于大气中的这部分与水汽有关的能量。采用能量观点与实测资料相配合来理解和探索大气中的物理化学过程和规律是一种有效、实用的方法。

关键词 可见光辐射 水汽 散射因子 能量 化学和光化学反应

文章编号 1006-9585 (2010) 06-0765-13 **中图分类号** P422.3+1 **文献标识码** A

A Study of the Attenuation of the Solar Visible Radiation in the Atmosphere from the Point of View of Energy

BAI Jianhui

Key Laboratory of Middle Atmosphere and Global Environment Observation, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

Abstract By using the integrated observations including the solar radiation and meteorological parameters at four stations in North China from September 2004 to October 2006, the variation characteristics of the solar visible radiation (Q_{vis}) and global radiation (Q) were obtained. Both Q_{vis}/Q and Q_{vis} were evidently influenced by the water vapor and scattering factors. An empirical model of the hourly Q_{vis} under actual sky conditions was established based on the point of view of energy, and good results were gained. The water vapor factor displayed some important roles in Q_{vis} transmission in the atmosphere and should be paid high attention. The results show that for North China,

收稿日期 2009-04-30 收到, 2010-06-08 收到修定稿

资助项目 中国科学院资源环境领域野外台站研究基金, 国家自然科学基金项目 40975082

作者简介 白建辉, 男, 1964 年出生, 博士, 研究员, 研究方向为太阳辐射、臭氧及其光化学、挥发性有机物。
E-mail: bjh@mail.iap.ac.cn

Q_{VIS} which was attenuated by the water vapor factor and its ratio to Q_{VIS} at the Earth's surface were $8.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and 4.24% , respectively, and Q_{VIS} which was attenuated by scattering factor and its ratio to Q_{VIS} at the Earth's surface were $171.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and 95.76% , respectively. The Q_{VIS} losses influenced by the water vapor factor and the scattering factor in the atmosphere are $16.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ and $311.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ in North China, respectively. This energy loss displayed seasonal variations and regional differences. The sensitivity test shows that Q_{VIS} displays different responses to different changing rates of the water vapor factor and the scattering factor, and is more sensitive to the change of the scattering factor than that of the water vapor factor. The Q_{VIS} has a close relationship with the water vapor factor. The actual meaning of the water vapor (item) is the sum of the direct consumption and indirect consumption (in the reactions of chemistry and photochemistry, including homogeneous and heterogeneous processes) by all kinds of substances (including gases, liquid, and solids) in the atmosphere. Q_{VIS} at the top of the atmosphere was calculated by the empirical model, and its error was 3.5% . The energy consumed in the atmosphere is related to water, and should be paid more attention at present and in the future study. The point of view of energy with observational data is a valid and practical method for understanding and exploring physical and chemical processes and their regularities in the atmosphere.

Key words solar visible radiation, water vapor, scattering factor, energy, chemical and photochemical reactions

1 引言

可见光辐射 (Q_{VIS}) 是太阳辐射中的重要组成部分, 这一波段的辐射也被称之为光合有效辐射 (Q_{PAR})。 Q_{VIS} 主要应用于辐射、气象、气候等领域, Q_{PAR} 则主要应用于农业、林业、生态、大气化学等领域。国内外关于 Q_{VIS} 或 Q_{PAR} 的研究有很多, 主要集中于气候学方面 (田国良, 1980; 董振国和于沪宁, 1983; 谢贤群, 1985; 赵名茶, 1985; Alados et al., 1996; Zhang et al., 2000; 季国良等, 1993; 白建辉和王庚辰, 2004; 李韧等, 2007; 马金玉等, 2007; 祁红彦等, 2008; 白建辉等, 2009)。研究发现, Q_{VIS} 或 Q_{PAR} 与总辐射 (以 Q 表示) 的比值在世界各地相对稳定 (季节或年际尺度上), 但受到多种因素 (如水汽、散射因子或气溶胶、霾、云、雨、雪、沙尘等) 的影响, 并有明显的时间、空间变化 (白建辉等, 2009; 白建辉, 2009)。可见光辐射经大气传输到达地表的过程中, 要受到一些气体的选择性吸收 (如 O_3 、 NO_2 等, 而损失在大气中的能量主要取决于不同地区大气中的吸收成分及其浓度)、气溶胶以及云等的散射等。研究发现, 水汽对于比值 Q_{VIS}/Q 、 Q_{PAR}/Q 具有重要的影响 (白建辉等, 2009; 白建辉, 2009), 那么有必要对水汽如何影响 Q_{VIS} 、 Q_{PAR} 的机制进行研究和探讨。关于云、水汽等与

太阳短波辐射之间的相互作用国内外学者作了很多研究及总结, 如陈洪滨 (1997)、Cess et al. (1999)、马晓燕和季国良 (2000)、白建辉和王庚辰 (2004), 白建辉等 (2002) 等。近年来, 我国不同地区工农业、经济、交通、制造业、石油、冶炼等的快速发展以及发展的不均衡, 造成了因人类活动向大气排放的各种物质增加及区域差别, 同时, 土地利用的变化也造成了植物排放到大气中各种成分的变化。因此, 研究不同地区大气中物质成分与可见光能量之间的相互作用和相互关系, 对于准确了解辐射、大气化学与光化学的过程及规律、区域气候等都具有重要意义。

2 资料与方法

选择华北地区的 4 个站点, 即山东禹城农业综合试验站 [$(36^{\circ}57'N, 116^{\circ}36'E)$, 海拔 23 m]、河北栾城农业生态系统试验研究站 [$(37^{\circ}50'N, 114^{\circ}40'E)$, 海拔 50.1 m]、中国科学院大气物理研究所香河站 [$(39^{\circ}47'N, 116^{\circ}57'E)$, 海拔 95 m]、大气本底观测网兴隆观测站 [$(40^{\circ}23'N, 117^{\circ}35'E)$, 海拔 960 m]、开展了太阳辐射各分量和气象参数等的观测 (观测时间详见表 1)。

香河站辐射仪器主要包括: 国产分光辐射表 (TBQ-4-1 型), 波段分别为 $270 \sim 3200 \text{ nm}$ 、 $400 \sim 3200 \text{ nm}$ 、 $700 \sim 3200 \text{ nm}$, 它们的灵敏度为

表 1 华北 4 站辐射测量时间

Table 1 Observational period of the solar radiation at four stations in North China

站点	时间
禹城站	2005 年 7 月 8~17 日、2005 年 12 月 12~26 日、2006 年 4 月 3~17 日、2006 年 10 月 1~17 日
栾城站	2005 年 7 月 19~28 日、2005 年 11 月 27 日至 12 月 11 日、2006 年 4 月 18 日至 5 月 3 日、2006 年 9 月 14~30 日
香河站	2004 年 9 月 12 日至 2005 年 7 月 12 日、2005 年 9 月 12 日至 2006 年 10 月 31 日
兴隆站	2005 年 9 月 10 日至 11 月 11 日、2006 年 2 月 19 日至 3 月 23 日、2006 年 5 月 12 日至 7 月 4 日、2006 年 8 月 11 日至 9 月 2 日

5~10 mV · kW⁻¹ · m²，稳定性均 ≤ ±2%；国产直接辐射表（TBS-2 型），波段为 270~3200 nm；散射辐射为国产 TBD-1 型散射装置和 TBQ-2 总辐射表。Q_{vis}（波段取 400~700 nm）为 400~3200 nm 和 700~3200 nm 测量值之差。国产辐射表在使用前均做了标定。直接辐射的观测始于 2005 年 9 月 21 日。辐射测量采样频率为 1 Hz。辐射和气象观测设在专门的气象观测场内，它们的测量数据由各自的计算机进行采集和存储（白建辉等，2009）。

其他 3 站使用另一套辐射测量系统（白建辉，2009），实验前国产辐射表均做了标定。该套测量系统在 3 站轮流使用，观测时间从日出到日落，采样频率为 1 Hz，日出前清洁所有表头，每小时巡视和维护仪器，同时记录天气状况、云等。辐射仪器均安装于楼顶，周围无遮蔽。温湿度测量为每 5 min 一次。

2004~2006 年实验期间，华北 4 站都有同步 Q_{PAR} 的测量（LI-190SA 型量子传感器），其相对误差小于 ±5%。此期间的实验数据表明，4 站 Q_{vis} 与 Q_{PAR} 测量结果的一致性都很好。实际天气条件下，Q_{vis} 与 Q_{PAR} 小时累计值（2595 组）的相关系数为 0.987，它们的比值为 0.205。

3 结果与讨论

3.1 Q_{vis}/Q

为了减小观测误差及偶然因素以及不合理数据的影响，剔除如下实验数据：1）日出后和日落前的 1 或 2 小时，视季节不同略有差别；2）各辐射量及其比值（如 Q_{vis}/Q）的异常值。为方便，本文将各个辐射分量（总辐射 Q、直接辐射 S、散射辐射 D、Q_{vis} 等）小时累计值简称为时累。基于 4 站辐射和气象参数的观测数据，获得了各个辐射量的时累、地面水汽压的时累以及温湿度的小

时平均值。

观测发现，4 站 Q_{vis}/Q（小时值之比）的日变化都比较明显，月变化相对稳定。晴天，Q_{vis}/Q 一般早晚高、中午低，云、霾、雨等天气下的 Q_{vis}/Q 则复杂、多变（白建辉，2009）。2004~2006 年实验期间，禹城站、栾城站、香河站、兴隆站 Q_{vis}/Q 的平均值分别为 0.39、0.39、0.43、0.42。

3.2 由 Q_{vis}/Q 计算 Q_{vis} 时累

利用比值（Q_{vis}/Q）方法及总辐射、常规气象数据来获得地面 Q_{vis} 时，应考虑影响 Q_{vis}、Q 传输的主要因素：1）太阳的运行规律——主要控制因子；2）大气中各种成分的吸收和散射作用——第二位控制因子，起着调制作用。因而控制 Q_{vis}/Q 的主要因素也应为：太阳的运行规律（以天顶角 Z 的余弦表示）、所有物质的吸收和散射作用（分别用 e^{-kW_m}、e^{-D/Q} 表示）。各个因素在实际大气中对于 Q_{vis}/Q 的真实作用根据对实测数据的分析来确定。这样，实际天气 Q_{vis} 时累的经验公式可表示为

$$Q_{vis}/Q = (A_1 e^{-kW_m} + A_2 e^{-D/Q} + A_0) \cos Z, \quad (1)$$

其中，k 为水汽的平均吸收系数，实际计算中，物质的吸收作用 e^{-kW_m} 的计算为（白建辉和王庚辰，2004）

$$e^{-kW_m} = 1 - \Delta S / (I_0 \cos Z),$$

$$\Delta S = 0.172(mW)^{0.303},$$

其中，ΔS 为整层大气吸收太阳辐射通量密度值，大气可降水量

$$W = 0.021E,$$

E 为地面水汽压（单位：hPa），m 为大气质量。太阳常数 I₀ = 1367 W · m⁻²。e^{-D/Q} 表示物质的散射作用，大气中各种物质成分对于太阳辐射的作用可以反映到地表测量的散射辐射、直接辐射、总辐射之中，因此，采用比值 D/Q 来客观地描述大气中物质成分的相对含量。朗伯比尔定律描述

的是单色光的衰减规律,作为复色光的 Q_{VIS} 、 Q 可以视为单色光的组合,因此,进一步推广为大气中物质(以 D/Q 表示)对于 Q_{VIS} 、 Q 的衰减规律也遵从朗伯比尔定律描述的指数形式,即以 $e^{-D/Q}$ 表达大气中各种成分综合的散射(或衰减)作用。如果选用散射辐射/直接辐射来表示物质的散射作用,其表达效果将比较显著,但实际天气直接辐射时累有时为 0,因而采用 D/Q 将更为合适和实用。公式(1)中的各物理量均取某一时段的累计值, m 取某一时段半点之值。系数 A_i ($i=1, 2$) 和常数 A_0 由对实验数据的统计分析来分别确定,它们分别表示物质吸收与散射及天顶角对于 Q_{VIS}/Q 的相对作用。

为尽量准确、可靠地揭示发生在大气中的物理化学过程的规律性,将初选数据做了严格的剔除,包括:1) 早晨、傍晚时段;2) 较大降雨时段;3) 某些和全天雾霾较严重时段;4) D/Q 很大、全天云量为 9、10 的时段。鉴于兼顾考虑各种天气,个别时段略微放宽,最后得到了 4 站辐射量时累数据(2977 组)。同样,同步处理温湿度和水汽压数据。

对 4 站(即禹城站 2005~2006 年、栾城站 2005~2006 年、香河站 2004~2005 年、兴隆站 2006 年)时累数据进行统计分析,确定了 $(Q_{\text{VIS}} \times \cos Z)/Q$ 与吸收因子(e^{-kW_m})和散射因子($e^{-D/Q}$)间的系数和常数以及它们之间的相关系数(R),并利用公式(1)计算了各站各时段的 Q_{VIS} 。计算值与观测值相对偏差(δ)的最大值(δ_{max})、最小值(δ_{min})和平均值($\bar{\delta}$)、计算值与观测值的线性关系(即计算值/观测值,为二维散点图中计算值与观测值线性回归的斜率)和相关系数(R') (见表 2)。分析 Q_{VIS} 的 δ 分布,大部分(占总数的 76%)的 $\delta < 20\%$ (白建辉, 2009)。 δ 较大的情形(如 $> 20\%$)多出现在早晚时段以及云量较大、

降雨、大雾、霾、沙尘等天气或时段,大气中物质成分对于 Q_{VIS} 、 Q 较大的衰减造成了 δ 较大。综合考虑计算结果、计算值与观测值的线性关系(白建辉, 2009), 4 站 Q_{VIS} 的计算值在量值和变化规律方面与观测值均符合得较好。

为了研究水汽和散射因子的作用,表 2 同时给出如下情形下的计算偏差(2977 组数据)。利用比值方法计算 Q_{VIS} 时:1) 水汽因子的重要性要远大于散射项;2) 散射因子或气溶胶的作用较小,但不能忽略(白建辉, 2009)。

3.3 直接计算 Q_{VIS} 时累

为什么水汽因子对于由比值方法获取的 Q_{VIS} 具有首要的重要性? 水汽和散射因子对于可见光辐射的真实作用如何? 由于水汽和散射因子对于可见光和总辐射有不同程度的衰减作用,因而比值方法显示的只是它们对于 Q_{VIS}/Q 的影响和贡献,大气中真实的物理化学过程则可能被掩盖了。为了得到代表实际大气状况(而非极端)并反映其中物理化学过程的经验模型,将前面的数据参照以前的标准做了更严格的剔除(主要是去除比较恶劣时段的数据,如有霾、大雾、 $D/Q=1$ 等),得到 2595 组数据。考虑 2 个因子对 Q_{VIS} 能量的作用,采用如下方法直接计算实际天气下 Q_{VIS} 时累:

$$Q_{\text{VIS}} = (B_1 e^{-kW_m} + B_2 e^{-D/Q} + B_0) \cos Z, \quad (2)$$

其中,系数 B_i ($i=1, 2$) 和常数 B_0 由对新实验数据的统计分析来确定,它们分别反映了 Q_{VIS} 随太阳运行规律的变化(B_0)及其吸收项和散射项的调制作用(B_1 、 B_2)。

为了清楚地了解每个因子对于 Q_{VIS} 的作用,此次分别对每个因子与 $Q_{\text{VIS}}/\cos Z$ 进行统计分析,同时确定实际天气不同情形下的系数和常数(见表 3)。表 3 中, R 为 $Q_{\text{VIS}}/\cos Z$ 与吸收因子(e^{-kW_m})和散射因子($e^{-D/Q}$)在不同情形下的相关系数。为清楚了解计算偏差 δ 的分布,以“水

表 2 比值方法计算 Q_{VIS} 的有关参数

Table 2 The parameters of calculated solar visible radiation Q_{VIS} by using ratio method

项目	R	A_1	A_2	A_0	$\bar{\delta}$	δ_{max}	δ_{min}	线性关系	R'
水汽+散射因子	0.928	-0.95	0.15	1.15	12.4%	48.7%	0	1.09	0.971
水汽因子+常数项		-0.95		1.15	13.4%	51.8%	0		
散射因子+常数项			0.15	1.15	82.8%	228.2%	0		
常数项				1.15	71.7%	194.9%	0		

表 3 直接计算 Q_{VIS} 的有关参数

Table 3 The parameters of direct calculation of solar visible radiation Q_{VIS}

项目	R	B_1	B_2	B_0	$\bar{\delta}$	δ_{max}	δ_{min}	线性关系	R'	$\delta \leq 30\%$ 的比例
水汽因子+常数项	0.244	0.23		0.97	27.9%	212.2%	0	0.94	0.674	75.11%
散射因子+常数项	0.783		1.57	0.16	16.0%	123.0%	0	0.96	0.904	87.71%
水汽因子+散射因子+常数项	0.787	0.08	1.54	0.14	15.8%	120.3%	0	0.97	0.908	88.48%

汽因子+散射因子+常数项”偏差分布为例给出： $\delta \leq 10\%$ 、 $10\% < \delta \leq 20\%$ 、 $20\% < \delta \leq 30\%$ 、 $30\% < \delta \leq 40\%$ 、 $40\% < \delta \leq 50\%$ 、 $\delta > 50\%$ 的比例分别为 39.85%、36.33%、12.29%、5.51%、2.12%、3.89%，其他情形偏差的分布与此类似（略）。

可以看到：1）水汽对 Q_{VIS} 具有一定的影响和作用， $Q_{\text{VIS}}/\cos Z$ 与水汽因子在信度 99% 的水平上存在相关关系（相关系数检验），即水汽因子与 Q_{VIS} 之间确实存在某种关系；2）单一考虑水汽因子时，其计算结果虽不是最好，但计算偏差还不是非常大；3）散射因子比水汽因子对 Q_{VIS} 更为重要， $Q_{\text{VIS}}/\cos Z$ 与散射因子在置信度 99.9% 的水平上存在显著相关关系（相关系数检验）；4）当考虑 2 个因子时，可以得到较好的计算结果；5）水汽因子的重要性虽远远弱于散射因子，但它对计算结果的改善有一定的贡献，在计算中应该考虑；6）直接计算 Q_{VIS} 方法的准确度差于比值方法，但其表达的意义比较清楚。

3.4 水汽和散射因子对地面 Q_{VIS} 的贡献

为了容易计算每个因子对地面 Q_{VIS} 的贡献，将公式（2）中的常数取为 0，以确立新的经验公式：

$$Q_{\text{VIS}} = (C_1 e^{-k W_m} + C_2 e^{-D/Q}) \cos Z, \quad (3)$$

与前类似，重新对实验数据（2595 组）进行统计分析后，确定了新的系数（见表 4）。计算偏差 δ 分布于各区间 $\delta \leq 10\%$ 、 $10\% < \delta \leq 20\%$ 、 $20\% < \delta \leq 30\%$ 、 $30\% < \delta \leq 40\%$ 、 $40\% < \delta \leq 50\%$ 、 $\delta > 50\%$ 的比例分别为 39.42%、36.72%、13.81%、5.32%、2.47%、2.20%。

总地来说，计算结果（相对偏差及线性关系等）还是可以接受的。从物理意义上讲，公式（3）

描述的是可见光辐射在大气中的衰减规律，系数 C_1 和 C_2 是大气上界分别与水汽和散射因子相关的可见光辐射， $C_1 + C_2$ 即为大气上界可见光辐射的时累，转换为辐照度约为 $512.17 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，它与大气上界可见光波段辐照度 $530.5 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 相差 -3.5% 。这表明，由公式（3）计算的大气上界 Q_{VIS} 辐照度是可信的。因此，这从另一个侧面也表明了华北地区实际天气下 Q_{VIS} 的经验公式（3）是合理、可行的，采用分光辐射表测量 Q_{VIS} 也是比较准确的。

利用公式（3）计算了考虑单一水汽或散射因子时地面的 Q_{VIS} （分别表示为 Q_{V1} 、 Q_{V2} ）和它们对地面 Q_{VIS} 的贡献（ Q_{V1}/Q_{VIS} 、 Q_{V2}/Q_{VIS} ）、各站受单一水汽或散射因子影响而损失能量的最大值（ Q_{V1M} 、 Q_{V2M} ），结果见表 5。因数据量较大，表 5 仅给出观测期间的最大值，其他均为年平均值，包括同步的 D/Q 。

可以看到，仅受水汽因子衰减到达地面的 Q_{VIS} 能量非常小，所占地面 Q_{VIS} 的比例也很小，平均而言，它们分别为 $8.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 4.24% ；仅受散射因子衰减而到达地面的 Q_{VIS} 能量比较大，所占地面 Q_{VIS} 的比例也较大，平均而言，它们分别为 $171.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 和 95.76% 。具体到 4 个站，仅受水汽因子衰减到达地面的 Q_{VIS} 能量以兴隆最大（ $12.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、香河最小（ $4.63 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）；仅受散射因子衰减到达地面的 Q_{VIS} 能量仍以兴隆最大（ $212.26 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）、香河最小（ $146.32 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ）。这与整层大气物质（即吸收性、散射性物质）的总含量有直接关系，各站 D/Q 值可以大致反映这点。

表 4 Q_{VIS} 计算的有关参数

Table 4 The parameters of calculated solar visible radiation Q_{VIS}

R	C_1	C_2	$\bar{\delta}$	δ_{max}	δ_{min}	线性关系	R'
0.779	0.10	1.75	15.1%	104.5%	0	0.98	0.95

各站 Q_{V1} 的变化率（与 4 站 Q_{V1} 平均值相比，取绝对值）为 19.04%~47.23%，各站 Q_{V2} 的变化率（与 4 站 Q_{V2} 平均值相比，取绝对值）为 6.50%~23.47%。各站 Q_{V1M} 的变化率（与 4 站 Q_{V1} 最大值相比，取绝对值）小于 8.91%，各站 Q_{V2M} 的变化率（与 4 站 Q_{V2} 最大值相比，取绝对值）小于 33.90%。这表明 Q_{V1} 平均值区域差别明显而最大值区域差别较小， Q_{V2} 最大值区域差别明显而平均值区域差别较小。

下面计算 Q_{VIS} 受单一水汽因子或散射因子影响损失在大气中的能量 ΔQ_{V1} 、 ΔQ_{V2} 及它们对总损失 ΔQ_{VIS} 的贡献（ $\Delta Q_{V1}/\Delta Q_{VIS}$ 、 $\Delta Q_{V2}/\Delta Q_{VIS}$ ）。根据大气上界的 C_1 、 C_2 以及考虑单一因子时地面 Q_{VIS} 计算值之差，可以方便地得到 ΔQ_{V1} 、 ΔQ_{V2} 。进一步，可以得到各站受单一水汽或散射因子影响而损失能量的季平均及其最大值（ ΔQ_{V1M} 、 ΔQ_{V2M} ）。

从表 6（ ΔQ_{V1} 、 ΔQ_{V2} 、 $\Delta Q_{V1}/\Delta Q_{VIS}$ 、 $\Delta Q_{V2}/\Delta Q_{VIS}$ 为年平均值， ΔQ_{V1M} 、 ΔQ_{V2M} 为季平均值）可见，4 站受“水汽因子”影响而损失于大气中的 Q_{VIS} 能量为 13.48~21.62 $W \cdot m^{-2}$ ，其平均值为 16.54 $W \cdot m^{-2}$ ，4 站因受散射因子影响而损失于大气中的 Q_{VIS} 能量为 273.66~339.59

$W \cdot m^{-2}$ ，其平均值为 311.07 $W \cdot m^{-2}$ 。由于大气中各种成分的综合作用，损失于大气中的 Q_{VIS} 为 287.14~361.22 $W \cdot m^{-2}$ ，华北地区的平均值约为 327.61 $W \cdot m^{-2}$ 。损失于大气中的 ΔQ_{V1} 、 ΔQ_{V1M} 、 ΔQ_{V2} 、 ΔQ_{V2M} 均以兴隆最小、香河最大。主要原因也是 2 个区域整层大气中物质总含量差别所致（可参考 D/Q 值）。

用 4 站年平均值来粗略研究 ΔQ_{V2} 与 D/Q 之间的关系，得到

$$\Delta Q_{V2} = 187.77D/Q + 189.02.$$

因此，“有 D/Q ”和“无 D/Q ”时损失能量的比例分别为 39.24%和 60.76%，它们分别对应气溶胶的衰减（122.05 $W \cdot m^{-2}$ ）、空气分子及其他分子的衰减（189.02 $W \cdot m^{-2}$ ）。这些数值在一定程度上可能反映了华北地区实际天气受大气中不同成分影响损失或消耗于大气中能量的平均状况，其准确程度还有待今后多点、更长时间序列测量数据的分析。

各站损失在大气中的能量占总损失的比例 $\Delta Q_{V1}/\Delta Q_{VIS}$ 或 $\Delta Q_{V2}/\Delta Q_{VIS}$ 相差不大，它们的平均值分别为 5.02%和 94.98%。计算表明，对于各实验区域以及华北地区的平均状况而言，受水汽因子影响而损失于大气中的 Q_{VIS} 能量在总损失

表 5 考虑单一因子时地面 Q_{VIS} 的计算值及其贡献

Table 5 The calculated solar visible radiation at the ground and its contribution when each factor is considered individually

站点	$Q_{V1}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{V1M}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{V2}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{V2M}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{VIS}/W \cdot m^{-2}$	$Q_{VISM}/W \cdot m^{-2}$	Q_{V1}/Q_{VIS}	Q_{V2}/Q_{VIS}	D/Q
禹城	10.45	19.26	157.71	290.99	168.16	307.93	6.00%	94.00%	0.68
栾城	11.02	20.46	183.08	440.19	194.10	459.46	5.47%	94.53%	0.57
香河	4.63	19.86	146.32	331.71	150.96	351.57	2.03%	97.97%	0.84
兴隆	12.78	21.15	212.26	440.14	225.04	460.53	5.83%	94.17%	0.51
平均	8.78	19.86	171.91	331.71	180.69	460.53	4.24%	95.76%	0.68

表 6 考虑单一因子时损失在大气中的 Q_{VIS} 及其贡献

Table 6 Solar visible radiation lost in the atmosphere and its contribution when each factor is considered individually

站点	$\Delta Q_{V1}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{V1M}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{V2}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{V2M}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{VIS}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{VISM}/W \cdot m^{-2}$	$\Delta Q_{V1}/\Delta Q_{VIS}$	$\Delta Q_{V2}/\Delta Q_{VIS}$
禹城	15.80	18.75	328.20	334.88	344.00	351.76	4.59%	95.41%
栾城	15.24	19.63	302.83	356.50	318.07	375.50	4.79%	95.21%
香河	21.62	24.95	339.59	384.72	361.22	409.30	5.99%	94.01%
兴隆	13.48	14.44	273.66	284.60	287.14	298.69	4.69%	95.31%
平均	16.54	24.95	311.07	384.72	327.61	409.30	5.02%	94.98%

中的比例很小, Q_{vis} 能量的主要损失源于大气中各种成分的散射衰减作用。

各站 ΔQ_{v1} 的变化率(与 4 站 ΔQ_{v1} 平均值相比, 取绝对值)为 4.43%~30.77%, 各站 ΔQ_{v2} 的变化率(与 4 站 ΔQ_{v2} 平均值相比, 取绝对值)为 2.65%~12.03%。各站 ΔQ_{v1M} 的变化率(与 4 站 ΔQ_{v1} 最大值相比, 取绝对值)在 21.32%~42.12%, 各站 Q_{v2M} 的变化率(与 4 站 ΔQ_{v2} 最大值相比, 取绝对值)为 7.34%~26.02%。这表明 ΔQ_{v1} 能量在平均值和最大值的区域差别上都明显大于 ΔQ_{v2} 的相应值。

虽然因水汽而损失在大气中的能量所占比例很小(约 5%左右), 但其平均的能量损失 $-16.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 还是不容忽视的。且计算表明, 这一能量损失在 4 站还存在着明显的地区差异和季节变化, 因而在目前及未来的研究中应该给予高度重视。它对大气中物质与能量的转化和分配、各种模式(辐射、化学、气候等)研究、大气环境及其变化、区域和全球的能量分布及其变化、气候及气候变化等众多方面都具有潜在且重要的影响和作用。例如, 大气中这些成分在时间和空间上的变化、它们参与大气化学与光化学反应的地区差异等, 最终将导致不同地区的能量及其分配发生变化, 因此它对大气运动以及相关过程产生的影响都将是重要和深远的。

禹城、栾城、香河、兴隆能量损失最大值 ΔQ_{v1M} 均出现在冬季, 各站冬季的 $E/D/Q$ 多为一年中的最小值; 4 站 ΔQ_{v2M} 出现的季节分别为秋季、秋季、冬季、夏季, 它分别对应于各站 D/Q 的最大值——这与大气中物质的衰减对应得很好。

各站 ΔQ_{v1M} 均出现在冬季, 从影响 Q_{vis} 的两个因子——水汽和散射因子均不能给出合理、圆满的解释, 因为 4 站冬季大气中很低的水汽含量及很小的 D/Q (主要反映大气中的颗粒物组分、云等)均不能导致 ΔQ_{v1M} 出现在冬季。因此, 应该另有原因。下面以兴隆站为例给出解释。兴隆站自 2005 年 5 月开始连续测量大气中的一些气体成分(NO_2 、 NO 、 SO_2 、 O_3 等)(白建辉等, 2008), 因此可以获得这些气体 2006 年的季平均值, 取春季为 2006 年 3~5 月, 夏季为 6~8 月, 秋季为 9~11 月, 冬季为 2006 年 12 月至 2007 年 2 月。 NO_2 、 NO 、 SO_2 等的浓度一般为冬季高、

春季低, 它们的浓度冬季分别为春季的 1.30、1.46、1.52 倍。兴隆 NO_2 的浓度远高于 NO 的浓度(白建辉等, 2008), NO_2 和 SO_2 四季的平均值(体积分, 10^{-9})分别为: 10.07、10.72、12.85、13.25 和 9.32、10.50、13.99、14.12。兴隆作为华北地区相对洁净的一个区域, 其气体的测量结果除反映它们局地的变化规律外, 在一定程度上也可以反映华北地区这些气体的变化规律。因此, 可以初步认为 4 个实验区域大气中各种气体成分(包括 NO_2 、 NO 、 SO_2 等)冬季要明显高于其他季节。其产生原因可能包括: 1) 火电行业排放: 我国火电行业以燃煤为主, 总体上我国火电行业氮氧化物(NO_x)排放量随着火电行业的发展呈不断增长趋势(刘孜等, 2008); 2) 冬季采暖锅炉: 北方冬季污染物高值的一个主要来源; 3) 其他人为源和自然源的排放: 如工农业生产、车辆、燃油、生物排放、生物质燃烧等。以 NO_2 为主的气体浓度在冬季的高值可能是造成 4 站冬季出现 ΔQ_{v1M} 的主要原因, NO_2 的直接吸收以及它在大气光化学反应中与 H_2O 、 OH 等的反应对可见光能量的消耗起到了重要和关键的作用; 特别需要重视的是 OH 自由基在大气中的各种光化学反应中所起到的催化与能量传输的纽带作用。另外, 大气中的其他物质(包括气、液、固相, 其中有污染物以及非污染物)对可见光能量的吸收和利用也是应该考虑的, 这些物质对于可见光能量能直接吸收和间接利用: 直接吸收是指很多成分(如 NO_2 、 O_3 等)在可见光波段都有吸收光谱, 间接利用是指没有直接吸收的物质(如大量的挥发性有机物 VOC)在与 OH 自由基、直接吸收成分(如 NO_2 、 O_3 等)的光化学反应过程中对可见光能量不停地利用。白天, 大气中的各种成分在不停的变化, 因此这一能量吸收和利用的过程便一直持续着、变化着。

NO_2 以及其他物质浓度冬季最高、春季最低以及它们与 OH 自由基、包括 $\text{NO}_2^* + \text{H}_2\text{O}$ (详见后文讨论)等的反应——主要原因, 造成了兴隆站以及其他 3 站损失于大气中的可见光能量冬季最大(夏秋季次之, 春季最小)。这一规律与兴隆 NO_2 的季节变化规律比较一致, 其他 3 站 NO_2 的季节变化有待数据验证, 山东德州 NO_2 的季节变化也为冬季高、春季低, 可以作为禹城的参考

(张存兰和靳梅芳, 2008)。由荷兰皇家研究所提供的对流层 NO_2 数据可以得到华北 4 站 NO_2 的柱浓度(白建辉, 2010), 发现 4 个站区对流层 NO_2 柱浓度在 2004~2006 年季节变化明显, 以冬季为最大。Zhang et al. (2007) 关于 1997~2006 年华北对流层 NO_2 柱浓度也以冬季最高。同时, 大量的 VOC 成分(烷、烯、芳烃、醛、酯、酮、卤烃等)以及它们与 OH 自由基、 O_3 、 NO_2 等在光化学反应中的能量吸收和利用也是需要考虑的一个方面。禹城、栾城、香河、兴隆在 2005 年冬季出现 ΔQ_{VIM} 的值分别为 18.75、19.63、24.95、14.44 $\text{W} \cdot \text{m}^{-2}$, 它们与各站对流层 NO_2 冬季的柱浓度(白建辉, 2010)对应不是很一致, 这也揭示了除 NO_2 外的其他气体起着重要作用。

水汽因子对于可见光辐射究竟通过什么机制起着作用? 根据目前已知的吸收光谱, 水汽在可见光波段的吸收很弱, 其较强的吸收在红外波段, 如在 1.38、1.87、2.7 μm 处都有较强的吸收, 3.2 μm 带是水汽的弱吸收带, 吸收最强的是 6.3 μm 振转带, 0.72、0.82、0.94、1.14 μm 的吸收带也都较弱。因此, 水或水汽的光谱吸收不可能是水汽因子对 Q_{VIS} 能量起作用的真正原因。我们知道大气中存在着吸收可见光的物质(如某些气、液、固态成分, NO_2 、 O_3 、黑碳等), 它们对可见光辐射能直接吸收, 但与水汽没有直接关系; 另外, 大气中还存在着一些其他物质(包括气液固相态, 如 VOC 等), 它们可以与大气中的 OH 自由基、 O_3 、 NO_2 等发生光化学反应, 这些反应包括均相和非均相过程, 并伴随着气一粒之间的相互转换, 如二次有机气溶胶的形成、发生在气溶胶及黑碳[有对 Q_{VIS} 能量较强的吸收(Horvath, 1993)]表面的过程。这些能量的吸收和利用过程绝大部分都可以通过 OH 自由基联系起来。OH 自由基既是参与反应的物质和中间产物, 更重要的是还起着光化学反应能量传输和桥梁作用。上述各方面综合的效果导致了损失于大气中的能量 ΔQ_{V1} 与水汽(或准确说是 OH 自由基)有着某种关系。这种关系与大气中物质成分总的 Q_{VIS} 能量吸收有关, 即主要与大气中的物质含量(如 NO_2 、VOC 等)、水或水汽含量、入射 Q_{VIS} 能量等密切相关。在这种能量关系中, 水或水汽(本质上是 OH 自由基)起着非常关键和至关重要的作用。

也正是因为这种能量吸收取决于多种成分、众多过程共同的作用, Q_{VIS} 与水汽因子的密切程度(或相关关系)才明显小于它与散射因子的密切程度(或相关关系)。

Li et al. (2008) 的研究表明, NO_2 吸收波长大于 420 nm 的辐射后, 可以转变为激发态的 NO_2 (NO_2^*)。 NO_2^* 与 H_2O 反应是对流层 OH 自由基的一个重要源, 且可以达到 $\text{O}(^1\text{D}) + \text{H}_2\text{O}$ 反应产生的 OH 自由基的一半。这一新发现与上面关于 Q_{VIS} 吸收机制的讨论以及 4 站 ΔQ_{VIM} 都出现在冬季的结果均相吻合, 恰为一个实验佐证。

还有研究表明(Matthews et al., 2005), 甲基过氧化氢(CH_3OOH)吸收 365~640 nm 的辐射可以产生 OH 自由基。甲基过氧化氢是对流层中含量比较大的一种有机过氧化物, 因此, 它是对流层 OH 收支重要的附加物。进一步而言, 其他有机过氧化物是否也有类似于甲基过氧化氢对 OH 的贡献和光化学作用也应该进行深入研究。

在可见光波段, 除了已知的一些吸收气体(如 NO_2 、 O_3)外, 还有很多成分, 包括一些 VOC 都有吸收光谱, 如 NOCl (Roehl et al., 1992)、二羰基化合物(Horowitz et al., 2001)(大气中二羰基化合物来源于直接排放、人为源与自然源排放的碳氢化合物的氧化降解, 如 CO 、 COOH 来源于生物燃烧、动植物、汽车排放、异戊二烯大气氧化的产物等。二羰基化合物在对流层的清除主要是通过光解及与 OH 自由基、 NO_3 的反应)等。关于这些成分的理化性质不再赘述。

根据前面水汽对于 Q_{VIS} 影响的分析以及目前已有的一些发现, 可以推断或相信, 大气中有一定量的化学成分(气、液、固相)在可见光波段有重要的 OH 自由基产生以及有与 H_2O 、OH 自由基的化学和光化学反应, 这些成分在大气化学和光化学反应过程中对 Q_{VIS} 能量有吸收作用。在未来的实验和研究中, 这些成分及其相应的化学和光化学过程有望被逐渐发现, 而且应该给予高度重视。最后, 将这些重要过程和机制及时补充到大气化学和光化学相应的模式中, 并广泛推广到大气化学、辐射、区域和全球的气候及其变化等众多领域的研究中。

由于大气中水汽和散射因子共同的吸收、衰减作用, 华北地区禹城、栾城、香河、兴隆损失

于大气中的可见光能量分别占大气顶的 64.85%、59.96%、68.09%、54.12%。若取它们的平均值来粗略表示华北地区的平均状况,那么在 2004~2006 年实验期间,华北地区有 61.75% 的可见光能量损失于大气中。

水汽和散射因子对于 Q_{VIS} 和 Q 的作用存在着显著的差别,因而它们对于 Q_{VIS} 和 Q_{VIS}/Q 的主次作用也存在着明显的差别。若从研究物理意义来讲,以采用直接描述 Q_{VIS} 的方式为好;若想获得比较准确的 Q_{VIS} 计算结果,取 Q_{VIS}/Q 的方式较好。

3.5 Q_{VIS} 对于水汽和散射因子的敏感性

在目前大气状况(如水汽、气溶胶、气体等)以及气象条件下,当水汽或散射因子变化时,地面 Q_{VIS} 将如何变化,或 Q_{VIS} 对于这些因子的敏感性如何?为此,利用公式(3)计算了单一的水汽(以地面水汽压 E 代替)或散射因子(D/Q)发生变化时地面 Q_{VIS} 时累的变化。基于各站时累的平均,可以得到各站的年平均值。

从图 1 和 2 可以看到,水汽的增加(或减少)将导致地面 Q_{VIS} 的减少(或增加),水汽的变化率越大,其导致的 Q_{VIS} 变化率也越大。取 4 站年平均来看,在不同的水汽变化率时,均以相对清洁的兴隆地区 Q_{VIS} 变化率最小,而以污染相对较重的香河地区 Q_{VIS} 变化率最大。这一结果反映了大气中水汽和其他各种成分通过直接和间接过程对 Q_{VIS} 能量吸收和利用的显著差别。在水汽增加率和减少率相同时,它们所导致的 Q_{VIS} 减少率明显小于其增加率,这从另一个侧面反映了大气中的其他成分对于 Q_{VIS} 吸收和利用的重要性,水或水汽作为可见光波段 OH 自由基产生的重要来源之一(如 $\text{NO}_2^* + \text{H}_2\text{O}$ 的反应)以及光化学反应的参与物具有无可替代和不可低估的作用。

4 站 Q_{VIS} 的季节变化情况也可揭示这一作用,计算表明,4 站因水汽不同程度的变化都导致了 Q_{VIS} 不同的变化率,变化率的最大值大都出现在夏、秋季。夏、秋季大气中水汽含量比较高、植物生理活动水平较高并导致了 VOC 排放较高、大气中化学物质的活性较高、OH 自由基的产生比较多,所有条件均有利于均相和非均相(如二次气溶胶的产生、气-粒相互转化等)光化学反应快速、高效的进行,从而造成了 Q_{VIS} 对水汽因子

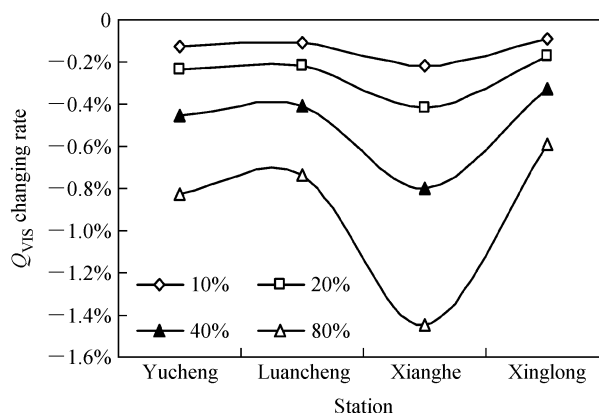


图 1 水汽因子增加导致地面 Q_{VIS} 的变化

Fig. 1 Q_{VIS} changing rates at the Earth's surface caused by the increase of water vapor factor

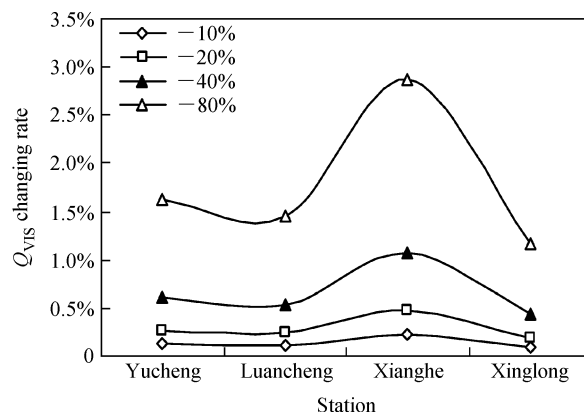


图 2 水汽因子减少导致地面 Q_{VIS} 的变化

Fig. 2 Q_{VIS} changing rates at the Earth's surface caused by the decrease of water vapor factor

在夏、秋季的高度敏感性。

需要说明一点,香河站与其他 3 站不同,其 Q_{VIS} 变化率的最大值出现在冬季,除了上述原因外,其主要原因可能是该地区冬季大气中各种气体(如 NO_2 、 SO_2 等)的高浓度、其散射成分浓度(D/Q)冬季最大也为非均相过程提供了良好的催化,这些导致了香河地区 Q_{VIS} 对水汽因子敏感性的与众不同。

香河 Q_{VIS} 变化率的最大值没有出现在夏、秋季,还需要考虑另一个方面:自然源排放的 VOC 的数量以及大气中的浓度、VOC 与 NO_x 的比例等,它们都控制着大气光化学反应的进程和程度,因而也影响着消耗于大气中的 Q_{VIS} 能量。研究表明(白建辉等,2009),2004~2006 年,香河地区的大气质量逐渐恶化,2005 和 2006 年 4~10 月

间, 香河全天有霾的日期明显增多, 2005 和 2006 年季平均的 D/Q 均是夏季高于春、秋两季, 夏季本应为一年最强的辐射状态反而没有达到。这同时也造成了香河地区植物 VOC 排放本应为一年最强的夏季反而大量下降 [光合有效辐射或 Q_{VIS} 是控制植物 VOC 排放的主要因子 (白建辉和王庚辰, 2004; 白建辉和 Baker, 2004a, 2005)], 由于具有高度化学活性的 VOC 夏季排放大幅度降低, 造成了香河 Q_{VIS} 对水汽因子变化敏感性在夏季显著降低。这应该是香河与其他 3 站显著不同的一个重要原因。

需要再提及一点, 水汽含量变化时, 相应的真实大气中的 VOC 排放也在变化 [水汽含量也是控制 VOC 排放的重要因子之一 (白建辉和 Baker, 2004b)], 虽然没有给出其变化量值, 这也是水汽因子所暗含表达的意义所在——物质对于 Q_{VIS} 能量的总吸收。

因此, 华北地区 4 个站点区域大气成分种类、数量的不同, 对损失于大气中的 Q_{VIS} 能量起着重要作用, 并显示出不同的区域特征。

从图 3 和 4 可见, 当散射因子 (D/Q) 增加 (或减少) 时, 它将导致地面 Q_{VIS} 的减少 (或增加)。 D/Q 的变化率越大, 其导致的 Q_{VIS} 变化率也越大。取 4 站年平均来看, 在不同的 D/Q 变化率时, 均以 D/Q 最低的兴隆地区 Q_{VIS} 变化率最小, 而以禹城地区 Q_{VIS} 的变化率最大。虽然香河 D/Q 的年均值最大, 但其 Q_{VIS} 随 D/Q 变化的敏感性不是最明显。仔细分析季节变化, 香河 Q_{VIS} 随 D/Q 变化的敏感性以冬季最明显 [主要是香河大气中的散射成分 (D/Q) 冬季为一年中最大], 其他 3 站则都以夏、秋季最为明显 (主要是各站夏、秋季 D/Q 较大)。这清晰地反映了大气中散射成分 (气溶胶、云等) 对 Q_{VIS} 能量的衰减作用以及地区和季节差异。在 D/Q 增加率和减少率相同时, 它们所导致的 Q_{VIS} 减少率明显小于其增加率。

对比地面 Q_{VIS} 对于单一水汽或散射因子变化引起的变化, 可以发现, Q_{VIS} 对散射因子的变化比对水汽因子的变化更为敏感, 也即在变化率相同时, 散射因子的变化比水汽因子的变化引起地面 Q_{VIS} 能量更大的变化, 这将造成它们各自引起的损失于大气中能量的显著不同。另一方面, 若以对 Q_{VIS} 能量衰减作为衡量指标, 目前华北地区

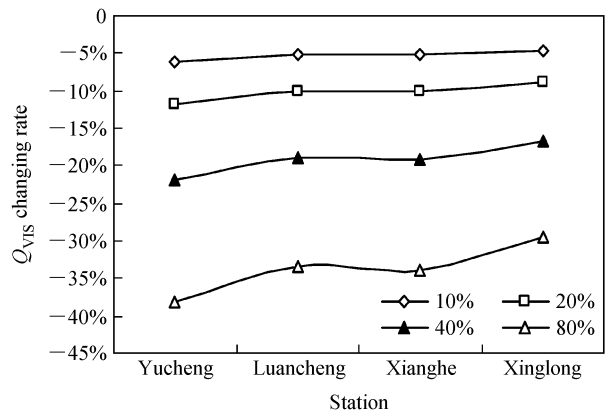


图 3 散射因子增加导致地面 Q_{VIS} 的变化

Fig. 3 Q_{VIS} changing rates at the Earth's surface caused by the increase of scattering factor

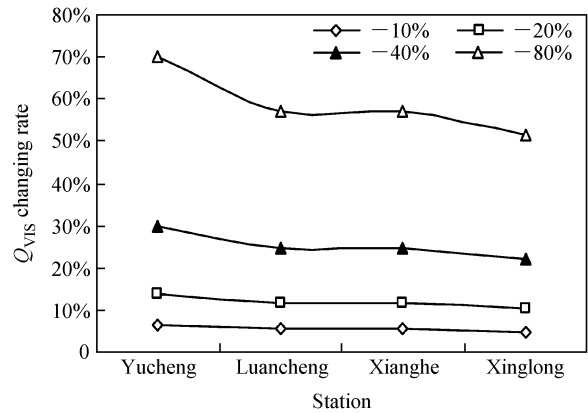


图 4 散射因子减少导致地面 Q_{VIS} 的变化

Fig. 4 Q_{VIS} changing rates at the Earth's surface caused by the decrease of scattering factor

散射因子的浓度水平远远高于水汽因子的浓度水平, 或散射物质成分处于相对高浓度水平而吸收成分处于相对很低的水平。

通过以上分析可以看到, 基于能量方法建立研究 Q_{VIS} 的经验模式是合理、可行的, 且比常用的辐射传输、化学模式 (只能考虑已知的而且被认为是主要的物理化学过程、对于这些过程的定量描述中还存在着很多的假定等) 具有简单、实用的优势。它可以将发生在大气中的物理、化学、生物过程以能量为桥梁、以对实测数据的统计分析为基础进行客观、准确的定量描述, 而不必去穷尽所有物理、化学、生物过程及其细节, 包括对每一过程的定量或参数化描述; 而且, 我们对自然的认识程度、认识水平一般总会迟于自然界发展和变化的速度, 诸如对发生在大气中的均相

特别是非均相过程、气-粒相互转换（如涉及 VOC 的二次有机气溶胶的光化学产生）、OH 自由基在可见光波段的产生（除最近新发现 $\text{NO}_2^+ + \text{H}_2\text{O}$ 的反应、甲基过氧化氢吸收可见光辐射外，是否还有其他的产生机制？）、黑碳对可见光的吸收（Horvath, 1993）、人类活动产生的新物质及其物理化学性质等定量化的认识。因此，以宏观的能量观点结合微观物理、化学、生物过程的研究应该是一种值得提倡的、全面、客观、科学的研究方法和研究手段。

4 结论

2004~2006 年间，在华北地区的 4 个站点开展了太阳辐射、气象参数等的综合测量，获得了 Q_{VIS} 、 Q 等的变化特征。水汽和散射因子对 Q_{VIS}/Q 、 Q_{VIS} 有明显的影响。基于 Q_{VIS} 能量受水汽和散射因子衰减的观点，建立了实际天气条件 Q_{VIS} 时累的经验模式，并得到了较好的计算结果。水汽因子对于准确获得地面 Q_{VIS} 有一定的作用，应给予关注。

华北地区（4 站平均）受水汽因子、散射因子影响到达地面的 Q_{VIS} 能量分别为 $8.78 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $171.91 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ，它们占地面 Q_{VIS} 的比例分别为 4.24%、95.76%。华北地区（4 站平均）受水汽因子和散射因子影响损失于大气中的 Q_{VIS} 能量分别为 $16.54 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 、 $311.07 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ 。华北地区的 4 站因受水汽因子影响而损失或消耗于大气中的 Q_{VIS} 能量有明显的地区差异和季节变化。计算表明，地表 Q_{VIS} 对于水汽因子、散射因子的变化有明显且不同的响应， Q_{VIS} 对于散射因子的变化比对水汽因子的变化要敏感得多。

研究发现，水汽因子与 Q_{VIS} 能量之间存在某种密切的关系，其本质原因应该是大气中的各种成分（气、液、固相）通过 OH 自由基参与了大气中的化学和光化学反应，并在这一复杂的反应过程中吸收和利用了可见光波段的能量，这一能量吸收与利用的过程包括了均相和非均相过程。近年来可见光波段 OH 自由基产生的实验结果为本文提出的机制分析提供了有力证据。采用 Q_{VIS} 时累经验公式计算大气顶 Q_{VIS} 的结果表明了经验模式的可信与有效。与水汽因子有关的这部分能

量对于辐射传输、大气化学与光化学、区域气候及气候变化等众多领域都将具有重要的意义和应用价值，在今后的实验和理论研究中应高度重视。以能量观点探索和研究物理、化学、生物过程及其相互作用是一种客观、全面的研究方法。

致谢 中国科学院山东禹城综合试验站欧阳竹、朱农、刘恩民、刘振民、蔡晓光、于延春等同志提供了帮助，禹城综合试验站提供了有关观测数据。中国科学院栾城农业生态系统试验站胡春胜、安忠民、李发东、宋灿、刘丽环、张宝山等同志提供了帮助，栾城农业生态系统试验站提供了有关观测数据。中国科学院大气物理研究所香河站李光平、南卫东、周大军、李伟、沈艳红等同志参加了观测工作，陈洪滨研究员和王庚辰研究员给予了大力支持。中国科学院国家天文台及兴隆观测基地的领导和同仁们给予了各方面支持。国家卫星气象中心齐瑾和李晓静同志提供了华北 4 站对流层 NO_2 的数据。对以上帮助和支持深表谢意。

参考文献 (References)

- Alados I, Foyo-Moreno I, Alados-Arboledas L. 1996. Photosynthetically active radiation measurements and modeling [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 78: 121-131.
- 白建辉, 王庚辰, 胡非. 2002. 太阳紫外辐射在大气中衰减的探讨 [J]. *气候与环境研究*, 7 (4): 440-446. Bai Jianhui, Wang Gengchen, Hu Fei. 2002. Attenuation of solar UV radiation in the atmosphere [J]. *Climatic and Environmental Research (in Chinese)*, 7 (4): 440-446.
- 白建辉, 王庚辰. 2004. 内蒙古草原光合有效辐射的计算方法 [J]. *环境科学研究*, 17 (6): 15-18. Bai Jianhui, Wang Gengchen. 2004. A calculating method of photosynthetically active radiation in the Inner Mongolia grassland [J]. *Research of Environmental Science (in Chinese)*, 17 (6): 15-18.
- 白建辉, Baker B. 2004a. 热带人工橡胶林异戊二烯排放通量的模式研究 [J]. *环境科学学报*, 24 (2): 197-203. Bai Jianhui, Baker B. 2004a. Model simulation of isoprene emission flux in a tropical forest plantation of rubber trees [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae (in Chinese)*, 24 (2): 197-203.
- 白建辉, Baker B. 2004b. 草地异戊二烯排放通量影响因子的研究 [J]. *大气科学*, 28 (5): 783-794. Bai Jianhui, Baker B. 2004b. Study on the affecting factors of isoprene emission at grassland [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 28 (5): 783-794.
- 白建辉, Baker B. 2005. 内蒙古草原典型草地异戊二烯的排放特征 [J]. *环境科学学报*, 25 (3): 285-292. Bai Jianhui, Baker B. 2005. Emission characteristics of isoprene at typical grassland in

- the Inner Mongolia grassland [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 25 (3): 285–292.
- 白建辉, 王普才, 王庚辰. 2008. 北京周边地区主要微量气体的基本特征 [J]. *科学技术与工程*, 8 (9): 2323–2330. Bai Jianhui, Wang Pucai, Wang Gengchen. 2008. The basic characteristics of main trace gases in the surrounding area of Beijing [J]. *Science Technology and Engineering* (in Chinese), 8 (9): 2323–2330.
- 白建辉, 陈洪滨, 王勇, 等. 2009. 香河地区光合有效辐射的测量和计算 [J]. *气象与环境学报*, 25 (1): 6–14. Bai Jianhui, Chen Hongbin, Wang Yong, et al. 2009. The measurement and calculation of photosynthetically active radiation at Xianghe region [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 25 (1): 6–14.
- 白建辉. 2009. 华北地区光合有效辐射的计算方法 [J]. *气象与环境学报*, 25 (2): 1–8. Bai Jianhui. 2009. Calculating photosynthetically active radiation in North China [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 25 (2): 1–8.
- 白建辉. 2010. 光合有效辐射在大气中的衰减 [J]. *环境科学学报*, 30 (2): 302–313. Bai Jianhui. 2010. The attenuation of photosynthetically active radiation in the atmosphere [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae* (in Chinese), 30 (2): 302–313.
- Cess R D, Zhang M, Valero F P J, et al. 1999. Absorption of solar radiation by the cloudy atmosphere: Further interpretations of collocated aircraft measurements [J]. *Journal of Geophysical Research*, 104 (D2): 2059–2066.
- 陈洪滨. 1997. 关于云和云天大气对太阳辐射的吸收异常 [J]. *大气科学*, 21 (6): 750–757. Chen Hongbin. 1997. On the anomalous absorption of solar radiation by water clouds and by the cloudy atmosphere [J]. *Scientia Atmospherica Sinica* (in Chinese), 21 (6): 750–757.
- 董振国, 于沪宁. 1983. 农田光合有效辐射观测和分析 [J]. *气象*, (7): 23–25. Dong Zhengguo, Yu Huning. 1983. Analysis and observation of the photosynthetically active radiation [J]. *Meteorological Monthly* (in Chinese), (7): 23–25.
- Horowitz A, Meller R, Moortgat G K. 2001. The UV–VIS absorption cross sections of the α -dicarbonyl compounds: Pyruvic acid, biacetyl and glyoxal [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 146: 19–27.
- Horvath H. 1993. Atmospheric light absorption—A review [J]. *Atmos. Environ.*, 27A (3): 293–317.
- 李韧, 季国良, 杨文, 等. 2007. 青藏高原北部光合有效辐射的观测研究 [J]. *太阳能学报*, 28 (3): 241–247. Li Ren, Ji Guoliang, Yang Wen, et al. 2007. The observation on PAR coefficient over northern part of Tibetan Plateau [J]. *Acta Energetica Solaris Sinica* (in Chinese), 28 (3): 241–247.
- Li Shuping, Matthews J, Sinha A. 2008. Atmospheric hydroxyl radical production from electronically excited NO_2 and H_2O [J]. *Science*, 319: 1657–1660.
- Matthews J, Sinha A, Francisco J S. 2005. The importance of weak absorption features in promoting tropospheric radical production [J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 102 (21): 7449–7452.
- 季国良, 马晓燕, 邹基玲, 等. 1993. 张掖地区的光合有效辐射特征 [J]. *高原气象*, 12 (2): 141–146. Ji Guoliang, Ma Xiaoyan, Zou Jiling, et al. 1993. Characteristics of the photosynthetically active radiation over Zhangye region [J]. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 12 (2): 141–146.
- 刘孜, 易斌, 高晓晶, 等. 2008. 我国火电行业氮氧化物排放现状及减排建议 [J]. *环境保护*, 16: 7–10. Liu Zi, Yi Bin, Gao Xiaojing, et al. 2008. China's emission status of NO_x from thermal power industry and suggestions on the emission reduction [J]. *Environmental Protection* (in Chinese), 16: 7–10.
- 马金玉, 刘晶森, 李世奎, 等. 2007. 基于试验观测的光合有效辐射特征分析 [J]. *自然资源学报*, 22 (5): 673–682. Ma Jinyu, Liu Jingmiao, Li Shikui, et al. 2007. Study on the features of the photosynthetic active radiation (PAR) with experimentations and measurements [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 22 (5): 673–682.
- 马晓燕, 季国良. 2000. 中国地区云对太阳短波辐射吸收的研究 [J]. *大气科学*, 24 (4): 527–540. Ma Xiaoyan, Ji Guoliang. 2000. A study of the absorption of solar radiation by clouds over China [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 24 (4): 527–540.
- 祁红彦, 周广胜, 许振柱. 2008. 北方玉米冠层光合有效辐射垂直分布及影响因子分析 [J]. *气象与环境学报*, 24 (1): 22–26. Qi Hongyan, Zhou Guangsheng, Xu Zhenzhu. 2008. Vertical distribution characteristics of photosynthetically active radiation in maize canopy and its controlling factors [J]. *Journal of Meteorology and Environment* (in Chinese), 24 (1): 22–26.
- Roehl C M, Orlando J J, Calvert J G. 1992. The temperature dependence of the UV–visible absorption cross-sections of NOCl [J]. *Journal of Photochemistry and Photobiology A: Chemistry*, 69 (1): 1–5.
- 田国良. 1980. 呼伦贝尔草原的太阳分光辐射能和光合潜力 [J]. *地理学报*, 35 (1): 76–82. Tian Guoliang. 1980. The spectral solar radiation and photosynthesis potential in Hulunbeier grassland, China [J]. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 35 (1): 76–82.
- 谢贤群. 1985. 黄淮海平原冬小麦生育期的光合有效辐射分布特征 [M] // 左大康. 黄淮海平原治理和开发 (第一集). 北京: 科学出版社, 139–148. Xie Xianqun. 1985. The distribution characteristics of photosynthetically active radiation during the bearing period of winter wheat on the plain of Huang, Huai and Hai [M] // Zuo Dakang. *The Governance and Exploitation of the Plain of Huang, Huai and Hai (1st Collection)* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 139–148.
- 张存兰, 靳梅芳. 2008. 德州市区大气环境质量监测与分析研究 [J]. *安徽农学通报*, 14 (9): 80–51. Zhang Cunlan, Jin Meifang. 2008. Analysis on peripheral environment of air pollution and its quality monitor [J]. *Anhui Agricultural Science Bulletin*

- (in Chinese), 14 (9): 80–51.
- Zhang Xiaozhou, Zhang Yiguang, Zhou Yunhua, 2000. Measuring and modeling photosynthetically active radiation in Tibet Plateau during April–October [J]. *Agricultural and Forest Meteorology*, 102: 207–212.
- Zhang Xingying, Zhang Peng, Zhang Yan, et al. 2007. The trend seasonal cycle and sources of tropospheric NO_2 over China during 1997–2006 based on satellite measurement [J]. *Science China (Ser. D)*, 50 (12): 1877–1884.
- 赵名茶. 1985. 用光量子测定分析黄淮海平原冬小麦的光能利用率 [M] // 左大康. 黄淮海平原治理和开发 (第一集). 北京: 科学出版社, 149–161.
- Zhao Mingcha. 1985. The utilizing efficiency of solar energy of winter wheat on the plain of Huang, Huai and Hai by the measurement and analysis of photons [M] // Zuo Dakang. *The Governance and Exploitation of the Plain of Huang, Huai and Hai (1st Collection)* (in Chinese). Beijing: Scientific Press, 146–161.