

白建辉,王庚辰. 2013. 气温与地表辐射收支的联系:基于禹城和栾城站点资料的分析. 气象, 39(11):1437-1444.

# 气温与地表辐射收支的联系:基于禹城 和栾城站点资料的分析<sup>\*</sup>

白建辉 王庚辰

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

**提 要:** 基于对华北禹城和栾城站 2005—2006 年辐射和气象数据的分析,建立了大气内能与地面总辐射、大气物质吸收、物质散射、大气动能和净辐射之间的能量关系。经验关系可以模拟出 2 站温度“月平均”的变化规律,其“月平均”计算值与观测值最大正负偏差分别为 3.84 和 -4.05℃,“年均值”计算值与观测值的偏差小于 0.36℃。敏感性计算表明,气温对净辐射的变化最敏感,其次是散射因子、吸收因子、地面总辐射、地面风速。净辐射、散射因子、吸收因子、总辐射和地面风速分别增加 5% 造成气温的变化分别为 0.93、-0.40、0.23、-0.20 和 -0.12℃。研究温度的变化,除了考虑有限的温室气体(如 CO<sub>2</sub>、水汽和臭氧等)的作用,还要考虑其他物质的吸收作用、气液固相物质的散射作用、地表组成和特性的变化、地面风速的变化、总辐射的变化,尤其要重视净辐射的变化。

**关键词:** 气温, 总辐射, 净辐射, 吸收和散射因子, 能量

**中图分类号:** P422

**文献标志码:** A

**doi:** 10.7519/j.issn.1000-0526.2013.11.007

## Correlation Between Temperature and Surface Radiation Budget: Analysis of Observational Data from Yucheng and Luancheng Stations

BAI Jianhui WANG Gengchen

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

**Abstract:** The measurements of solar radiation and meteorology were carried out at Yucheng and Luancheng Stations in North China during 2005—2006. Based on the analysis on the observation data, an energy relation between internal energy of the atmosphere and the surface solar global radiation, the absorption of atmospheric substances, the scattering of substances, the moving energy of atmosphere, the net radiation is developed. The variation of “monthly mean” of surface air temperature at 2 stations is simulated by using the empirical model, the maximum and minimum biases between the calculated and observed surface air temperature are 3.84 and -4.05℃ for “monthly mean”, respectively, and less than 0.36℃ for “annual mean”. The sensitivity calculation shows that the surface air temperature is most sensitive to the variation of net radiation, then to the changes of the scattering of substances, the absorption of atmospheric substances, the moving energy of atmosphere and solar global radiation. The increase of 5% contributed by individual factor, net radiation, the scattering of substances, the absorption of the atmospheric substances, the moving energy of the atmosphere, solar global radiation can cause the changes of surface air temperature by 0.93, -0.40, 0.23, -0.20, -0.12℃, respectively. To study the change of surface air temperature, it is necessary to consider the roles of greenhouse gases (such as CO<sub>2</sub>, water vapor, and

<sup>\*</sup> 国家自然科学基金项目(40975082 和 41275137)及中华人民共和国科技部-欧洲空间局合作“龙计划”3 期项目(ID10663)共同资助  
2012 年 5 月 22 日收稿; 2013 年 4 月 22 日收修定稿  
第一作者:白建辉,主要从事太阳辐射、臭氧及其光化学、挥发性有机物等方面的研究. Email: jianhuib@sina.com

$O_3$ ). Meanwhile, it is also important to consider the absorption of other substances, the scattering of substances (in gases, liquid and particle phases), the changes of the compositions and characteristics of the Earth's surface, the changes of surface wind velocity, and solar global radiation, especially the net radiation.

**Key words:** surface air temperature, solar global radiation, net radiation, absorbing and scattering factors, energy

## 引 言

气温是描述气候系统状态常用的重要参量之一。近年来,我国科学家研究了近 50~100 年来中国地区平均气温的变化规律(丁一汇等,1994;唐国利等,2009;丁海燕等,2010),也研究了很多因素(如城市化)对于气温的影响(赵宗慈,1991;刘霞等,2010;赵娜等,2011)。观测和模式研究表明,近百年我国和全球气温都表现出上升趋势(丁一汇等,2007),但对于区域尺度未来气候变化趋势的预估还有一定的不确定性,这是由对自然气候变化规律认识的不足,对气候系统各种关键过程和反馈机制缺乏充分了解,气候模式本身还不很完善等(丁一汇等,2007;Zhou et al, 2006;穆穆等,2011)等原因造成的。在变暖原因方面(包括人类排放及自然原因等)也有很多不确定性(赵宗慈等,2009;周天军等,2006)。因此,对于具体地区的气候和气候变化,我们应该对大气与地表区域内的物质与能量及其相关过程进行全面、详细的研究。

影响气温变化的因素较多,哪些因子的作用比较关键?它们通过什么过程影响气温升降?气温变化除了受温室气体影响外,还需考虑哪些因素?本文尝试寻找和建立气温和与之有关能量之间的关系,研究各影响因子对气温的作用,探讨各种因素变化带给气温的影响及其在这一变化过程中所起的作用,希望为相关研究提供一定的借鉴和参考。

## 1 资料与方法

选择华北地区山东禹城农业综合试验站(36°57'N,116°36'E,海拔 23 m)和河北栾城农业生态系统试验研究站(37°50'N,114°40'E,海拔 50.1 m)开展太阳辐射和气象参数的测量。禹城站观测时间为:2005 年 7 月 8—17 日和 12 月 12—26 日、2006 年 4 月 3—17 日、2006 年 10 月 1—17 日。栾城站观测时间为:2005 年 7 月 19—28 日和 11 月

27 日至 12 月 11 日、2006 年 4 月 18 日至 5 月 3 日和 9 月 14—30 日。

太阳辐射仪器包括(白建辉,2010a):总辐射表(TBQ-4-1 型),波段为 270~3200 nm,稳定性均小于 2%;直接辐射表(TBS-2 型);其他辐射表(分光辐射表、光合有效辐射表)等。这些辐射表均安装于楼顶,数据由计算机自动采集。辐射表在使用前均做了标定。该系统在禹城和栾城站轮换使用。试验期间,每日日出前清洁表头,每小时巡视和维护仪器(包括必要的清洁)、记录天气状况和云量等。温湿度每 5 分钟自动记录一次。风速(60 分钟内最大风速)和净辐射数据取自禹城和栾城站气象观测数据。

## 2 经验模型和初步结果

太阳辐射是地球系统重要的能量来源,也是本文利用能量观点研究气温的基础。为准确确定大气中物理化学过程的规律,辐射数据的使用采取了严格标准:鉴于辐射表在低太阳高度角较大的余弦误差,统一取太阳高度角大于 9°的数据。剔除(1)较大降雨及雾霾严重时段数据(因为辐射表头水珠及泥斑将引起较大的测量误差);(2)散射辐射/总辐射大于 0.9 及云量为 9、10 的时段。兼顾获取足够的各种天气资料,个别时段的条件略微放宽,最后得到两站辐射量小时数据 958 组。同样,同步处理温湿度、水汽压和风速等数据。对每日小时平均值求平均后,得到两站 107 组的“日平均”。两站数据每日小时值的取值范围分别为:2005 年 7 月 07:00—18:00、2005 年 11 和 12 月 10:00—15:00、2006 年 4 和 5 月 08:00—17:00、2006 年 9 和 10 月 08:00—17:00。

影响大气内能( $c_{pT}$ ,取单位质量内能,大气定压比热  $c_p = 1004 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$ )或气温( $T$ ,地面上 1.5 m 处的温度)的主要能量包括:(1)地表总辐射;(2)大气中物质对太阳辐射的吸收;(3)大气中物质以及地表等对太阳辐射的散射:包括各种气液固相成分对太阳辐射的散射、有云出现时也包括云的散射以及云和地表对太阳辐射的多次散射;(4)大气运

动的动能;(5)地面净辐射(指向下长短波辐射之和减去向上长短波辐射之和)。本文计算以小时值为基本数据,上述各项的表达和计算如下:(1)总辐射以  $Q$ (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )表示,取小时平均值;(2)大气中物质对太阳辐射的吸收以  $e^{-kwm}$  表示(白建辉, 2010a),  $k$  为水汽的平均吸收系数,实际计算中,取  $e^{-kwm}$  为  $1 - \Delta S/I_0 \cos Z$ , 整层大气吸收太阳辐射通量密度值  $\Delta S = 0.172(mW)^{0.303}$ , 大气可降水量  $W$  (按 60 min 计算)  $= 0.021 \times 60 \times E$ ,  $E$  为地面水汽压(单位: hPa),  $m$  为大气质量。太阳常数  $I_0 = 1367 W \cdot m^{-2}$ ;(3)各种物质以及地表等对太阳辐射的散射以  $e^{-D/Q}$  表示(白建辉, 2010a), 散射辐射  $D$ (单位:  $W \cdot m^{-2}$ )  $=$  总辐射  $-$  直接辐射。散射辐射包含了大气中各种成分的散射、云和地表等对辐射的多次散射,因而散射因子  $D/Q$  可以客观表达各种气液固成分以及地表等对辐射的综合散射作用;(4)大气的动能以单位质量计为  $0.5 v^2$  (单位: J),  $v$  为气象站测量的地面风速(单位:  $m \cdot s^{-1}$ );(5)净辐射以  $NR$  表示(单位:  $W \cdot m^{-2}$ )。大气内能与上述能量通量(或能量)的动态交换之间存在定量关系,并由大气和周围环境的实测数据来确定。气温的经验公式表示为:

$$c_p T = A_1 Q + A_2 e^{-kwm} + A_3 e^{-D/Q} + 0.5A_4 v^2 + A_5 NR + A_0 \quad (1)$$

式中,  $c_p$  取为 1, 气温取  $T + 273.15$  (单位: K)。基于禹城和栾城二站“日平均”数据以及式(1)的能量关系,采用回归分析的方法确定了式(1)中的各个系数和常数  $A_1 = -0.01, A_2 = -54.1, A_3 = -26.28, A_4 = -0.06, A_5 = 0.09, A_0 = 332.89$ 。计算中各参数日平均均为每日小时值的平均,仅  $m$  为每日中午 12:00 之值。分析表明,  $c_p T$  与式(1)中右面 5 个因子间的相关系数  $R = 0.84$ 。经相关系数检验,该经验关系通过  $\alpha = 0.001$  显著性水平检验。二站气温日平均的计算结果见图 1。

总体而言,温度“日平均”计算值与测量值的变化规律较为一致,但在某些日期两者存在较大偏差,其最大正负偏差分别为  $15.55$  和  $-13.78^\circ C$ 。2006 年 10 月禹城站气温的计算偏差比较大,这主要是由于此期间多是有霾的天气且云量较大(大多在 8~10),偶有大雾出现;此期间  $D/Q$  大多大于 0.7。整个试验期间,二站温度“日平均”的计算值为  $19.09^\circ C$ ,与测量值的平均值一致;气温计算值和测量值的关系为:  $T_{cal} = 0.70T_{obs} + 5.68, R^2 = 0.84$  (通过  $\alpha = 0.001$  显著性水平检验)。本文中“日平均”为

所取测量时间段内的平均值。

影响温度日均变化的过程较多也较复杂,不同试验仪器的测量误差也会影响到经验公式的计算误差。因而取试验期间各月“月平均”来检验温度的计算结果(“月平均”值由“日平均”计算得到)。为方便计算,将测量日期较少的跨月数据归并到测量日期较多的月份来表示。图 2 给出二站气温“月平均”的计算值和测量值。禹城站温度“月平均”计算值与观测值最大正负偏差分别为  $3.96$  和  $-5.33^\circ C$ , 温度“年平均”的计算值与测量值分别为  $19.02$  和  $19.38^\circ C$ , 相差  $0.36^\circ C$ ; 栾城站温度“月平均”计算值与观测值最大正负偏差分别为  $3.84$  和  $-4.05^\circ C$ , 温度“年平均”的计算值与测量值分别为  $20.07$  和  $20.23^\circ C$ , 相差  $0.15^\circ C$ 。总体而言,温度“月平均”的计算值在二站都更接近于测量值,变化规律与测量值也比较一致;二站气温计算值和测量值的关系为:  $T_{cal} = 0.69T_{obs} + 5.93, R^2 = 0.97$  (通过  $\alpha = 0.001$  水平显著性检验)。禹城站温度计算值和测量值的标准差分别为  $6.02$  和  $8.90$ , 而栾城站测分别为  $7.52$  和  $10.20$ ; 二站 2005—2006 年温度计算值和测量值的标准差分别为  $6.81$  和  $9.57$ 。可见,计算值的标

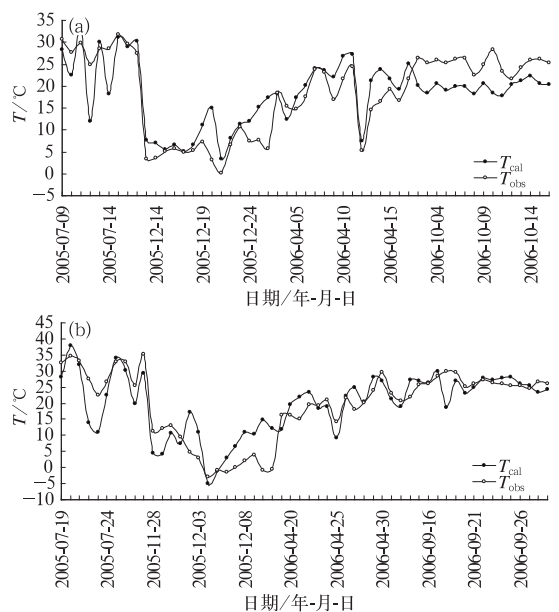


图 1 气温日平均的计算值( $T_{cal}$ )和测量值( $T_{obs}$ ) (单位:  $^\circ C$ )

(a)禹城站, (b)栾城站

Fig. 1 The calculated ( $T_{cal}$ ) and observed ( $T_{obs}$ ) daily averages of surface air temperature (unit:  $^\circ C$ )

(a) Yucheng Station, (b) Luancheng Station

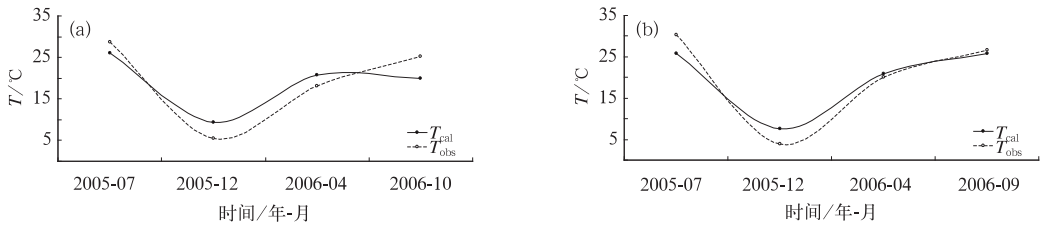


图 2 气温月平均的计算值( $T_{\text{cal}}$ )和测量值( $T_{\text{obs}}$ ) (单位:  $^{\circ}\text{C}$ )

(a) 禹城站, (b) 栾城站

Fig. 2 The calculated ( $T_{\text{cal}}$ ) and observed ( $T_{\text{obs}}$ ) monthly averages of surface air temperature (unit:  $^{\circ}\text{C}$ )

(a) Yucheng Station, (b) Luancheng Station

准差均小于测量值的标准差。

上面温度对比中采用由“日平均”得到“月平均”值的方法,“日平均”的正负偏差相互抵消了将使得“月平均”计算误差变小。为避免此问题,将二站“日平均”数据进行计算得到它们的“月平均”,再采用回归分析确定了大气内能与各能量通量的定量关系,即式(1)中的各个系数及常数,  $A_1 = -0.07$ 、 $A_2 = -73.53$ 、 $A_3 = -18.22$ 、 $A_4 = -0.29$ 、 $A_5 = 0.19$ 、 $A_6 = 347.83$ ,  $R^2 = 0.98$ 。在此种条件下,二站温度“月平均”计算值与测量值也表现出比较一致的变化规律(图略),而且数值均为  $19.80^{\circ}\text{C}$ ,温度计算的最大正负偏差分别为  $2.00$  和  $-4.49^{\circ}\text{C}$ ;气温计算值和测量值的关系为:  $T_{\text{cal}} = 0.96T_{\text{obs}} + 0.87$ ,  $R^2 = 0.96$  (通过  $\alpha = 0.001$  显著性水平检验)。

## 2.1 敏感性实验

很多因素影响气温及其变化,它们对气温变化的影响程度如何?为回答此类问题,利用经验公式(1)作如下分析:针对目前大气及周围环境条件,增加或减少某一参数,同时保持其他参数不变,计算新的气温及其变化(表 1)。考虑到某些因子的实际变化程度,对于一些因子的变化做了不同的敏感性计算。

在各因子变化相同时(如 5%),气温对净辐射的变化最敏感,其次是散射因子,然后是吸收因子和总辐射,最后是风速。在各个因子均增加 5%的情形,净辐射、散射因子、吸收因子、总辐射、风速的变化将造成气温的变化分别为  $0.93$ 、 $-0.40$ 、 $0.23$ 、

表 1 各个因子变化率(dF,单位:%)造成气温的变化率(dT,单位: $^{\circ}\text{C}$ )

Table 1 Variation of surface air temperature (dT, unit:  $^{\circ}\text{C}$ ) caused by changes of individual factors (dF, unit: %)

项目	Q					E			D/Q			
dF/%	+1	-1	+5	-5	+5	-5	+20	-20	+5	-5	+10	-10
dT/ $^{\circ}\text{C}$	-0.04	0.04	-0.20	0.20	0.23	-0.24	0.89	-1.02	-0.40	0.39	-0.82	0.77
项目	v					NR						
dF/%	+5	-5	+10	-10	+5	-5	+10	-10				
dT/ $^{\circ}\text{C}$	-0.12	0.11	-0.23	0.21	0.93	-0.93	1.85	-1.85				

$-0.20$ 、 $-0.12^{\circ}\text{C}$ 。

## 2.2 气温变化与其他因子变化之间的关系

以“日平均”为例,分析气温测量值与各因子变化量之间的关系。数据处理是计算“后一值”与“前一值”之差,剔除不同站和不同月份相邻月份差值的数据。此时,气温变化与各因子变化间的关系表现出与敏感性结果一些异同:(1)气温变化与净辐射、风速分别表现出  $+0.66$ 、 $-0.32$  的相关关系,与敏

感性分析结果大致相同;(2)与总辐射、吸收项、散射项分别表现出  $+0.65$ 、 $-0.36$ 、 $+0.41$  的相关关系,与敏感性分析结果相反,这些关系的物理意义不是很明确且与前面的结果矛盾,气温变化与总辐射变化的关系也与实际情况相反。这是由于实际大气条件下各种因素协同变化并共同作用于气温,仅分析数据间的相关很难发现每个因子独立作用于气温的效果,经验模式则很容易研究每个因子独立作用于气温的效果。

## 3 讨论和分析

### 3.1 太阳总辐射

总辐射是影响气温的重要因子之一,但气温对地面总辐射的变化不是最敏感。IPCC 第三次评估报告引用的结果认为,从蒙德尔极小期到现代太阳常数的变化不超过 0.3%,第四次评估报告则认为只有大约 0.05%(王绍武,2009)。因此,太阳常数比较稳定或大气上界太阳辐射变化很小。基于此实际情况,假设地面总辐射增或减 1%时,计算的气温将降低或增加 0.04℃,这表明地面总辐射变化引起温度的变化比较有限。在仅仅地面总辐射增加 1%情形,二站气温“月平均”减小值表现出不同的季节变化特征:春、夏最大,分别为 -0.04℃(禹城站 2006 年 4 月)和 -0.06℃(栾城站 2005 年 6 月);秋季最小,均为 -0.03℃(禹城站 2006 年 10 月、栾城站 2005 年 11 月)。敏感性试验中,假定其他参数不变, $Q$  增加 1%,根据式(1),气温的变化应为  $-0.01 \times 1\% \text{℃}$ ,但实际变化为  $-0.04 \text{℃}$ 。这是由于每日的计算是基于每日太阳总辐射(以及各个参量)之值,由于每日总辐射是不同的,因此,总辐射变化导致的气温变化也不相同。计算表明,仅在地面总辐射增加 1%时,2005—2006 年两站气温的下降范围为  $-0.08 \sim -0.01 \text{℃}$ 。本文中的敏感性分析中,有关净辐射计算结果也有与总辐射类似的现象。总辐射增或减带来气温降或升与我们日常的感觉有些矛盾,这是仅从总辐射对大气内能而言为负能量得到的,应注意随总辐射增减伴有净辐射的增减,而净辐射对内能为正能量,实际情况下,它们是同时变化的并共同决定气温的升降(参见表 1)。观测表明:北京地区总辐射 1979—1996 年间呈现下降趋势(白建辉等,1998),此时段的气温呈现增长趋势(丁海燕等,2010;赵娜等,2011)。但它并不表明北京地区气温的上升是由总辐射下降导致的。如要准确了解此时段气温变化的原因,需根据各参数及其变化量进行综合评估。

### 3.2 大气中能量的吸收与利用

大气中水汽含量(以地面水汽压  $E$  代替)增加或减少 5%时,气温将增加 0.23 或减少 0.24℃。实际上,此项包含了大气中物质对于短波辐射(包括紫

外、可见光及近红外)的总吸收—气液固相成分通过与 OH 自由基在化学和光化学过程对紫外和可见光能量的利用(白建辉,2010a;2010b)、水汽在 0.70~2.845  $\mu\text{m}$  的吸收等。各能量间的定量关系由对实测数据的统计分析确定,以客观地描述研究区域实际大气中各种成分的综合作用。 $E$  的增加或减少反映了:(1)水汽对近红外辐射吸收的增加或减少。(2)大气中 OH 自由基的增加或减少[OH 在紫外和可见光波段产生过程参见文献(白建辉,2010a;2010b)],因而气液固相物质[如挥发性有机物:烷、烯、醛、酯、酮、芳烃及卤烃等;臭氧;氮氧化物( $\text{NO}_x$ );二氧化硫( $\text{SO}_2$ );二次有机气溶胶(SOA)——光化学过程产生;黑碳——在紫外和可见光波段均有吸收等]对于紫外和可见光能量吸收与利用的增加或减少,其中也包括二氧化氮( $\text{NO}_2$ )和  $\text{SO}_2$  通过化学和光化学反应形成硝酸和硫酸的过程对能量的吸收与利用;总效果揭示了大气中气液固相成分对于太阳辐射吸收与利用的增加或减少,从而引起气温升或降。随着人类活动和自然源排放到大气中各种气液固成分的增加,它将导致(1)吸收性物质(各种挥发性有机物、 $\text{NO}_x$ 、 $\text{SO}_2$ 、黑碳等)增加;(2)它们与 OH 自由基等的化学和光化学反应产生的物质增加(包括一些吸收性的 SOA),从而近地层物质成分(包括各种污染物)增加,导致它们对太阳辐射总吸收与利用的增加(返回大气上界的能量减少),总效果将引起近地层大气升温。

大气中还有很多物质吸收紫外和可见光能量,包括二羰基化合物、酮、苯甲酸、亚硝酰氯、SOA、黑碳和甲基过氧化氢等(白建辉,2010a;2010b),它们在大气中的浓度大多比较低,但随着工农业、交通、车辆、经济、城市化等的快速发展,人为源排放到大气中的物质将逐渐增多;随着气温增加,自然源排放的挥发性有机物也将增加(温度是控制植物挥发性有机物排放的关键因子(白建辉等,2004))。因此,各种来源的污染和非污染性成分对辐射能量累计吸收(升温)与利用(降温)作用不应再被忽视,这些成分对太阳辐射累计吸收及利用的净效果应该是升温,因为它们所利用的能量大多来源于大气中各种成分的直接吸收(白建辉,2010a;2010b)。在经验公式(1)中,这些吸收性成分的能量吸收作用已通过 OH 自由基的作用表达于吸收项之中。建议目前的辐射、化学和气候模式考虑这一机制。

当大气中水汽含量(以  $E$  代替)增加 10%时,二

站气温的增长值均表现出秋季最大,分别为  $0.52^{\circ}\text{C}$  (禹城站 2006 年 10 月)和  $0.60^{\circ}\text{C}$  (栾城站 2006 年 9 月),春季最小,分别为  $0.36^{\circ}\text{C}$  (禹城站 2006 年 4 月)和  $0.34^{\circ}\text{C}$  (栾城站 2006 年 4 月)。

### 3.3 大气中能量的散射

$e^{-D/Q}$  表达了大气中的物质对于辐射的散射衰减作用,在一定程度上也表达了云、地表、大气之间的多次散射作用。当大气中总物质( $D/Q$ )增加或减少 5% 时,气温将相应减少  $0.40$  或增加  $0.39^{\circ}\text{C}$ ,即大气中总物质成分增加或减少时将导致气温降或升。当  $D/Q$  增加 5% 时,二站气温月平均的减小值表现出的最大值分别为  $-0.80^{\circ}\text{C}$  (禹城站 2005 年 12 月)和  $-0.65^{\circ}\text{C}$  (栾城站 2005 年 11 月),最小值分别为  $-0.16^{\circ}\text{C}$  (禹城站 2005 年 7 月)及  $-0.25^{\circ}\text{C}$  (栾城站 2006 年 9 月)。

大气中物质对紫外和可见光辐射的吸收与利用造成禹城和栾城地区损失于大气的紫外能量分别为  $20.25$  和  $18.93 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,可见光能量分别为  $15.82$  和  $15.24 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ;大气中物质的散射造成禹城和栾城地区损失于大气的紫外能量分别为  $39.54$  和  $35.88 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ ,可见光能量分别为  $329.35$  和  $303.66 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$  (白建辉, 2010a; 2010b)。在紫外和可见光波段,损失于大气的能量均以散射为主,特别是可见光波段。敏感性分析表明,散射因子相对于吸收因子造成的气温变化更大,大约是 2 倍的关系。敏感性分析结果与上述能量分配规律基本上是相符的,这表明大气中能量的吸收和散射取决于大气中物质的组成、浓度及其变化,并决定着温度的三维分布和变化。

火山爆发形成的气溶胶对辐射的衰减作用也可通过散射项定量表达。相关研究表明, $D/Q$  能较好地反映 El Chichon 和 Pinatubo 火山爆发引起的气溶胶变化,以能量为基础的经验模式中散射项可较好地表达火山气溶胶对紫外辐射的影响 (Bai, 2011)。

### 3.4 动能

风速变化也会改变大气能量,从而影响气温变化。计算表明,当风速增加或减少 5% 时,气温将减少  $0.12$  或增加  $0.11^{\circ}\text{C}$ 。即某一区域风速的增加以消耗该区域大气的能量为代价,进而引起该区域大气降温。当风速增加 5% 时,气温月平均减小的最

大值分别为  $-0.18^{\circ}\text{C}$  (禹城 2006 年 4 月)和  $-0.12^{\circ}\text{C}$  (栾城 2006 年 4 月),最小值分别为  $-0.10^{\circ}\text{C}$  (禹城 2005 年 7 月)和  $-0.04^{\circ}\text{C}$  (栾城 2006 年 9 月)。

### 3.5 地表净辐射

NR 增加或减少 5% 将引起气温增加  $0.93$  或减少  $0.93^{\circ}\text{C}$ ,气温对净辐射的变化的响应是所有因子中最敏感的,即净辐射对于气温变化具有首要的重要作用。气温最高值出现时间滞后于地面长波辐射和净辐射最大值出现时间,它表明了太阳辐射从太阳到地表,被吸收后转为长波辐射到大气的传输过程 (白建辉等, 2007)。因而应特别重视净辐射及其变化对气温的作用。影响长波净辐射(或地面有效辐射)的因素包括地表物质构成(它直接影响地表的比辐射率)、大气中的成分(水汽、 $\text{CO}_2$ 、臭氧等)、云等。影响短波净辐射的主要有总辐射和地表反射率,它涉及到大气中各种组分、地表或下垫面性质。不同类型地面(如土壤、沙石、水体、植被等)对于长波辐射的吸收率存在差别,云对长波净辐射有明显的影响和作用 (白建辉等, 2007)。气温对净辐射最敏感的启示是人类活动(人为排放、土地利用、植被变化、城市化等)引起地表结构和性质的改变、大气中各种成分的变化(如水汽、 $\text{CO}_2$ 、其他吸收性气体以及散射性物质)都将引起地面长波辐射、大气逆辐射、短波净辐射的变化,这些成分的变化将通过净辐射直接影响气温的升降。因此,研究气候或气温的变化,除了  $\text{CO}_2$  外,还应重视其他吸收性成分的变化以及影响净辐射的各因素及其变化。由于总辐射和净辐射通过不同的过程和机制影响和制约着气温及其变化,因而经验模型中做了引入以分别研究它们的作用。为准确计算,未来如有资料可用的情况下,可采用长波净辐射取代净辐射以更清楚地了解不同的辐射对于气温的作用。

NR 增加 5% 引起气温的增加值在二站也有明显不同,最大值分别为  $1.15^{\circ}\text{C}$  (禹城 2005 年 7 月)和  $1.35^{\circ}\text{C}$  (栾城 2006 年 4 月),最小值分别为  $0.64^{\circ}\text{C}$  (禹城 2005 年 12 月)和  $0.38^{\circ}\text{C}$  (栾城 2005 年 11 月)。

分析日平均值, $c_p T$  与总辐射、 $c_p T$  与净辐射均为正相关, $R$  分别为  $0.38$  和  $0.57$  (均通过  $\alpha=0.001$  显著性水平检验),这表明净辐射比总辐射对于大气内能或气温的作用要重要;它揭示了长波净辐射比

地面总辐射及短波净辐射对于大气内能更为重要,即大气内能及气温直接受控于长波净辐射而非地面总辐射;总辐射与净辐射的  $R$  为 0.93,两者虽然高度相关(通过  $\alpha=0.001$  显著性水平检验),但它们并没有显著影响  $c_p T$  与  $Q$ 、 $e^{-kW_m}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 $v^2$ 、 $NR$  等项之间相互关系,因为其  $R$  值 0.84 明显小于总辐射与净辐射的  $R$  值 0.93。 $c_p T$  与  $Q$ 、 $e^{-kW_m}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 $v^2$  等项之间的  $R=0.80$ (通过  $\alpha=0.001$  显著性水平检验),各项系数的符号依次为+、-、-、-;在引入净辐射后, $c_p T$  与  $Q$ 、 $e^{-kW_m}$ 、 $e^{-D/Q}$ 、 $v^2$ 、 $NR$  等项之间的  $R=0.84$ ,各项系数的符号依次为-、-、-、-、+,即考虑净辐射后,总辐射系数由正变负,它清楚地反映了不同的能量以及能量传输过程对大气内能的作用;地表总辐射能量被地表物质吸收(负号的意义,相对于大气内能而言为损失),然后转化为长波辐射直接用于增加大气内能,从而提高气温,即地面总辐射并不直接施加影响于大气内能,它需要一个能量转换和传递过程。这就是为什么气温最大值出现时间迟于净辐射最大值出现的原因(白建辉等,2007)。对实际状况而言,总辐射与净辐射是同步变化的,假设总辐射增加 5%,净辐射增加 2.5%(基于二站的实测结果),由表 1 知,两者产生的净效果将提高气温 0.27℃。因此,将总辐射的作用显式考虑后,可以区分并了解总辐射与净辐射对大气内能及气温的不同作用,它将帮助我们深刻理解大气内能变化的过程和本质。

大气中物质成分对辐射吸收造成的气温升高与这些成分对辐射散射造成的气温降低具有相反的作用,而且气温对物质成分( $D/Q$ )的变化比对  $E$  的变化更敏感。除净辐射外, $D/Q$  和  $E$  是引起气温变化的两个主要因子且起着相反的作用。因此,我们应测量和获得这些吸收性和散射性成分的浓度,及时掌握它们的动态变化,在此基础上评估它们对太阳辐射的吸收和散射作用,准确评价它们对气温的定量影响。

采用第二节中的方法对比了温度的月平均,虽然计算的系数发生了变化,但每项的符号均没有变化,它表明大气内能与各种能量的关系是稳定的,系数数值的变化表明了“日平均过程”和“月平均过程”中的能量关系发生了变化。为详细了解大气中的物理化学规律,应该以基本的过程为研究对象。

禹城站 2 年试验期间  $Q$ 、 $E$ 、 $D/Q$ 、 $v$ 、 $NR$  的平均值分别为 364.42  $W \cdot m^{-2}$ 、14.36 hPa、0.68、6.40

$m \cdot s^{-1}$ 、202.39  $W \cdot m^{-2}$ ;栾城站的对应值分别为 411.25  $W \cdot m^{-2}$ 、13.95 hPa、0.65、5.11  $m \cdot s^{-1}$ 、215.67  $W \cdot m^{-2}$ 。它们的变化率分别为 11.4%、-2.9%、-4.5%、-25.2%、6.2%,进而分别引起气温的变化为 -0.46、-0.14、0.35、0.53 和 1.15℃,净效果为 1.42℃。禹城和栾城站 2 年试验期间气温的平均值分别为 19.38 和 20.23℃。经验模式的预测结果与测量结果比较符合,两者相对偏差为 2.8%。两地因为各种条件的差异带来了气温的不同,上述结果或可做为一个区域经历了“微小气候变化”的模拟。类似地,分别计算禹城和栾城 2005 和 2006 年各参量的平均值及其变化率,进而得到二站 2005 和 2006 年气温的变化,其计算值与实测值的变化趋势一致,但相对偏差均明显增大(数据略)。

综上所述,讨论气温变化,除了已考虑的温室气体外(王绍武等,2012),还要考虑其他气体的吸收作用、大气中物质的散射作用、地表组成和特性的变化、风速的变化、地表接收辐射量的变化,这样才能给出比较全面的评估。针对某一区域乃至全球来讨论气温变化时,应该研究上述各个能量过程及相关因子的综合作用,不应只强调某一因子的作用;另外,还应按照不同的地表类型或其他特征进行分类研究,这是因为不同区域大气中物质成分及其涉及的能量过程可能是不同的或相反的,如不加区分地求平均以获得更大区域的平均状况,可能“抵消”很多过程而得不到真实的结果(如上段举例计算)。敏感性分析面向实际大气,其结果应较为接近大气真实状况,或可用于未来温度变化预测的参考。

以能量为线索分析实测数据,研究气温及其有关的能量过程和相互作用是一种值得提倡的方法。它有助于对各种复杂物理化学过程的简化和提炼,有助于对这些过程本质的深入理解。受试验时间和数据采用标准的限制,本文的“日平均”和“月平均”与通常所指的意义有一些差别。基于目前的初步结果,模拟的气温变化规律与实测结果比较吻合,未来可尝试将本文方法应用到日、月、年平均,做为进一步的检验和应用。

## 4 初步结论

本文尝试了以能量观点研究气温及其相关的物理化学过程。基于对华北二站 2005—2006 年实际天气数据的分析,确立了大气内能和总辐射、物质吸

收、物质散射、大气运动动能、净辐射之间的经验关系。该经验模型模拟的二站气温“月平均”与测量值表现出较为一致的变化规律,其“月平均”计算偏差在 3.84 和 -4.05℃ 之间,“年均值”计算偏差小于 0.36℃。净辐射、散射因子、吸收因子、总辐射、风速增加 5% 时,将带来气温的变化分别为 0.93、-0.40、0.23、-0.20、-0.12℃。地表气温对净辐射的变化最敏感,其次是散射因子、吸收因子、总辐射、风速。二站虽然处于华北邻近地区,但它们对于各个因子的变化表现出不同的季节变化特征。研究气温变化,除主要温室气体外,还应考虑其他物质的吸收作用、物质的散射作用、地表组成和特性的变化、地面风速的变化、地表总辐射的变化,更要重视净辐射及其相关因子的变化。人类活动、自然变化(太阳活动、火山爆发等)都将通过影响大气和地表的物质以及有关的能量过程而引起气温变化。以能量观点研究气温及其变化、气温变化机制等值得尝试。

**致谢:**感谢中国科学院禹城农业综合试验站和栾城农业生态系统试验站提供的气象数据。

## 参考文献

- 白建辉. 2010a. 以能量方法研究紫外辐射在大气中的传输. 环境科学学报, 30(4): 702-713.
- 白建辉. 2010b. 光合有效辐射在大气中的衰减. 环境科学学报, 30(2): 302-313.
- 白建辉, Baker B. 2004. 草地异戊二烯排放通量影响因子的研究. 大气科学, 28(5): 783-794.
- 白建辉, 王庚辰. 1998. 1979—1996 年期间北京地区太阳紫外总辐射的变化趋势. 大气科学, 22(5): 709-717.
- 白建辉, 邹捍, 李爱国, 等. 2007. 珠穆朗玛峰北坡山谷太阳辐射和大气的特征与分析. 高原气象, 26(6): 1162-1172.
- 丁一汇, 戴晓苏. 1994. 中国近百年来来的温度变化. 气象, 20(12): 19-26.
- 丁一汇, 任国玉, 赵宗慈, 等. 2007. 中国气候变化的检测及评估. 沙漠与绿洲气象, 1(1): 1-10.
- 丁海燕, 郑祚芳, 刘伟东. 2010. 北京 1951—2008 年升温趋势和季节变化. 气候变化研究进展, 6(3): 187-191.
- 刘霞, 景元书, 王春林, 等. 2010. 城市化进程对南京市气温变化影响的主成分分析. 热带气象学报, 26(4): 509-512.
- 穆穆, 陈博宇, 周非凡, 等. 2011. 气象预报的方法与不确定性. 气象, 37(1): 1-13.
- 唐国利, 丁一汇, 王绍武, 等. 2009. 中国近百年温度曲线的对比分析. 气候变化研究进展, 5(2): 71-78.
- 王绍武. 2009. 太阳常数. 气候变化研究进展, 5(1): 61-62.
- 王绍武, 黄建斌, 闻新宇. 2012. 古气候的启示. 气象, 38(3): 257-265.
- 赵娜, 刘树华, 虞海燕. 2011. 近 48 年城市化发展对北京区域气候的影响分析. 大气科学, 35(2): 373-385.
- 赵宗慈. 1991. 近 39 年中国气温变化与城市化影响. 气象, 17(4): 14-16.
- 赵宗慈, 王绍武, 罗勇, 等. 2009. 近百年气候变暖的不确定性分析. 科技导报, 27(23): 41-48.
- 周天军, 赵宗慈. 2006. 20 世纪中国气候变暖的归因分析. 气候变化研究进展, 2(1): 28-31.
- Bai Jianhui. 2011. Analysis of ultraviolet radiation in clear skies in Beijing and its affecting factors. Atmospheric Environment, 45(38): 6930-6937.
- Zhou T., Yu R. 2006. Twentieth century surface air temperature over China and the globe simulated by coupled climate models. J Climate, 19(22): 5843-5858.