

到达中国陆面的生物有效紫外线辐射强度分布

廖永丰^{1,2}, 王五一^{1,*}, 张 莉¹, 杨林生¹

(1. 中国科学院地理科学与资源研究所, 北京 100101; 2. 国家减灾中心, 北京 100053)

摘要: 随着大气臭氧层的日趋变薄, 估算到达陆面的太阳紫外线辐射变化, 评估对人体健康的影响日趋成为环境健康研究的一个重要课题。基于 DISORT 辐射传输模型, 从生物健康效应的角度提出了估算陆面有效紫外线辐射强度的方法, 并采用 LibRadtran 软件包 UVSPEC 模型以及 GIS 空间分析技术模拟了 2000 年 1 月和 7 月到达中国陆面的生物有效紫外线辐射强度空间分布, 讨论了臭氧、云量、地表反照率等因素对陆面生物有效紫外线辐射强度的影响, 研究了基于云量、海拔数据修正陆面紫外线辐射的方法。另外, 还系统分析了 2000 年 1 月、7 月我国陆面生物有效紫外线辐射强度的空间分布特征, 1 月份辐射强度是低纬度较高, 而 7 月份是中高纬度较高。UVA 和 UVB 陆面辐射强度分布明显不同, 特别是 7 月份, UVB 辐射强度的高值区域较 UVA 明显偏向低纬度地区。UVB 的生物有效辐射强度大约是 UVA 的 6 倍。

关键词: 生物有效; 紫外线辐射; UVA; UVB; 分布

文章编号: 1000-0585(2007)04-0821-08

1 引言

紫外线辐射在太阳辐射光谱中的谱区范围为 100~400 nm。按照不同波长紫外线所起的生物作用, 可分为三部分: 紫外线 A 段 (UVA), 波长 320~400 nm, 这部分生物作用较弱, 主要是皮肤老化和产生皱纹; 紫外线 B 段 (UVB), 波长 280~320 nm, 此段对人体健康影响较大, 适量照射会促进维生素 D 合成预防佝偻病, 而过量照射可使皮肤产生红斑、皮肤癌以及白内障、免疫系统能力下降等负健康效应; 紫外线 C 段 (UVC), 波长 100~280 nm, 这段紫外线具有最大杀菌力, 对机体细胞也有强烈的刺激破坏作用^[1~3], 但由于几乎完全被臭氧层吸收而不能到达地面。

紫外线生物有效辐射是指到达地面的对人体健康和农作物生长有重要影响的紫外线辐射, 通常是指 280~400 nm 之间的紫外线辐射^[4], 其中 UVB 对人体健康和动植物生理影响最大, 但 UVA 的生理作用也不容忽视。紫外线辐射强度的获取是进行紫外线辐射健康风险评估的基础。由于各波段紫外线辐射对人体健康具有不同效应, 故在评估时采用的辐射强度应考虑各波段的辐射强度而不是整个紫外谱段的辐射强度。国外开展紫外线辐射监测较早, 地表紫外线辐射变化特征研究较为全面, 得到了紫外线辐射的长期变化特征规律及时间变化特征^[5~9]。我国对太阳紫外线辐射的观测起步较晚。目前除北京、广州等少数几个大城市以及青藏高原上进行紫外线辐射观测外^[10~12], 全国性的紫外线辐射观测台站

收稿日期: 2006-09-08; 修订日期: 2007-03-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (40471059); 科技部国际科技合作项目 (2005DFA20010)

作者简介: 廖永丰 (1974-), 男, 甘肃人, 博士。主要从事环境健康研究。E-mail: liaoyongfeng@ndrcc.gov.cn

* 通讯作者: 王五一 (1949-), 研究员, 博士生导师。

相对较少,如中国科学院生态系统研究网络有 29 个台站进行观测。在进行大范围评估时,仅用已有的少数台站的观测数据并不能满足要求,而且已有的台站监测的紫外线波长范围存在差别,对不同地区之间的紫外线辐射强度比较带来很大的困难。为了弥补监测数据的不足,通常采用模式计算方法来估算生物有效紫外线辐射强度。

估算到达陆面紫外线辐射强度的计算模式归纳起来有两大类——辐射传输方程的求解和近似计算。近似计算又可分为两类:一类是对辐射传输物理过程进行参数化处理^[13];一类是基于常规气象资料和太阳总辐射资料,采用经验方法近似计算到达陆面的紫外线辐射^[14~16]。前者受参数化方案的影响十分明显,后者受大气状况(水汽、气溶胶和云)的影响较大,而且只能估算全谱段紫外线辐射强度。采用辐射传输方程求解是一种可靠的陆面紫外线辐射强度估算方法,如美国国家气象局(NWS)采用大气辐射传输模式来计算晴天紫外线辐射强度,然后进行高度和云量的修正^[17]。大气辐射传输模式的最大优点是可以估算任意波段的紫外线辐射量。

本文借助 LibRadtran 软件包的 UVSPEC 工具,以中纬度大气模式参数作为输入,同时考虑臭氧、气溶胶、地表反照率等的时空变化,采用 ArcGIS 空间分析技术中 Spline 的插值方法,通过 DEM 和云量进行修正,估算出我国 2000 年 1 月、7 月份陆面生物有效紫外线辐射强度的空间分布。

2 数据与方法

2.1 陆面生物有效紫外线辐射强度估算方法

到达陆面的生物有效紫外线辐射对人体健康的影响取决于日辐射总量和日辐射峰值两个指标。本文计算的陆面生物有效紫外线辐射强度主要指日生物有效紫外线辐射总量。

2.1.1 晴空生物有效紫外线辐射通量计算模型 生物有效紫外线辐射主要包括 UVA (320~400 nm)、UVB (280~320 nm) 两个波段,通常以 270 nm 波长的紫外线辐射作为标准,将不同波段的辐射进行加权计算。方法如下:

$$E_{uv} = \sum E_{\lambda} \cdot S(\lambda) \cdot \Delta\lambda \quad (1)$$

式中: E_{uv} 为加权的生物有效性辐射通量 (W/m^2); E_{λ} 为光谱辐射照度 ($W/m^2 \cdot nm$); $S(\lambda)$ 为相对光谱有效性系数,参见文献 [18]; $\Delta\lambda$ 为计算的谱宽。

光谱辐射照度 E_{λ} 基于辐射传输理论进行模拟,辐射传输方程采用 Stamnes 等^[19, 20]提出的 DISORT2 模式求解。具体数值计算采用 LibRadtran-1.01 软件包中 UVSPEC 工具^[21]。UVSPEC 是一个专门用于计算紫外线和可见光谱辐射通量的软件工具,能够系统模拟大气垂直结构、臭氧、气溶胶、下垫面反照率对紫外线辐射的削弱作用;同时可以根据实际需要选择相应的大气辐射传输模型,每种求解模型都由模型的提出者进行过验证^[22]。

根据我国大陆的空间地理位置,本文选择 Anderson 等^[23]提出的中低纬大气模式进行模拟。气溶胶模式采用 Shettle^[24]提出的模式,利用 Angstrom 公式计算得到气溶胶的光学厚度,所有波段选用统一的散射率 0.85。

表 1 不同类型下垫面的反照率 (%)

Tab. 1 Different types of surface albedo (%)

下垫面	水面	草地	黄裸地	黑裸地	水泥地	沙地	新雪
反照率	4.5	2.1	2.4	6.6	6.7	4.2	83.5

下垫面结构是影响地表反照率的主要因子, 具体体现在土壤的物理化学成分, 植被覆盖率、植被生长季节和土壤水分含量等因子对反照率的影响。文中引用的地表反照率见表 1^[25, 26]。

2.1.2 晴空生物有效紫外线辐射强度计算 晴空条件下, 到达陆面的太阳紫外线辐射随着太阳高度角的变化而变化。观测结果^[27, 28]表明, 太阳紫外线辐射日变化呈抛物线型。本文假设晴空特定地点到达陆面的紫外线辐射的日变化分布函数为:

$$E_{uv}(t) = at^2 + bt + c \quad (2)$$

通过式(1)估算正午、日出、日落三个特殊时刻的生物有效紫外线辐射通量, 确定函数 $E_{uv}(t)$ 的系数 a, b, c 。对式(2)积分求出特定地点的陆面生物有效紫外线辐射强度 Q_{eff} (J/m^2), 如下式:

$$Q_{eff} = \int_{t_1}^{t_2} (at^2 + bt + c) dt \quad (3)$$

式中: t_1, t_2 分别为日出、日落时刻, 采用估算点的时角具体确定。

2.1.3 陆面生物有效紫外线辐射强度修正 海拔与云量对紫外线辐射具有重要影响。海拔高度越高, 紫外线被散射的越少, 紫外线辐射量就越大。云对紫外线辐射有明显的减弱作用, 在某些阴天情况下, 到达地面的紫外线辐射要比晴空的情况下减少 30%^[3]。

式(3)计算出的 Q_{eff} 为晴空大地水准面上生物有效紫外线辐射强度。根据海拔高度和云量对 Q_{eff} 进行修正, 采用式(4)计算到达陆面的生物有效紫外线辐射强度 Q_{eff}^* :

$$Q_{eff}^* = Q_{eff} \cdot (1 + H_c) \cdot CAF \quad (4)$$

式中: H_c 为海拔高度修正值, CAF 为由于云量而引起的紫外线总辐射衰减量。

海拔高度修正系数 H_c ($\%/km$) 采用 Frederick 模式给出的方程计算^[17]:

$$H_c = a_0 + a_1 z_c + a_2 z_c^2$$

式中: $a_0 = -0.04556$, $a_1 = 6.62033$, $a_2 = -0.23067$, z_c 为海拔高度(km)。

云量修正系数 CAF 采用 NWS 的云衰减因子方程进行计算, 分晴空、少云、多云、阴天 4 种云量状况分段处理^[17]。

2.2 数据来源与处理

陆面生物有效紫外线辐射强度模拟空间点阵直接采用由 194 个国际气象交换站组成的空间点阵。由于青藏高原区域站点较少, 为了提高计算精度在西藏区域又增设 16 个模拟空间点, 总计 210 个(图 1)。每一个模拟空间点, 本文均提取了地表覆被类型。

自然环境背景数据采用国家基础地理信息中心发布 1:400 万的矢量数据, 包括境界、土壤、植被、高程、水系等各个图层。臭氧时空分布数据选自美国雨云气象卫星 TOMS 监测的我国 2000 年 1 月、7 月大气臭氧时空分布数据。

3 结果与讨论

3.1 结果

采用 2000 年 1 月和 7 月大气及自然环境数据估算 210 个模拟空间点晴空日生物有效紫外线辐射强度, 运用 ArcGIS 的 Spline 空间域面插值模型模拟我国海平面上 $1 km \times 1 km$ 的日生物有效紫外线辐射强度分布, 最后采用 DEM 和 1 月、7 月云量平均分布对其进行修正, 获得我国陆面日生物有效紫外线辐射强度分布(图版 4, 图 2、3)。

从图 2 (A, B) 中可以看出: 1 月份, 低纬度地区日生物有效紫外线辐射强度高于高

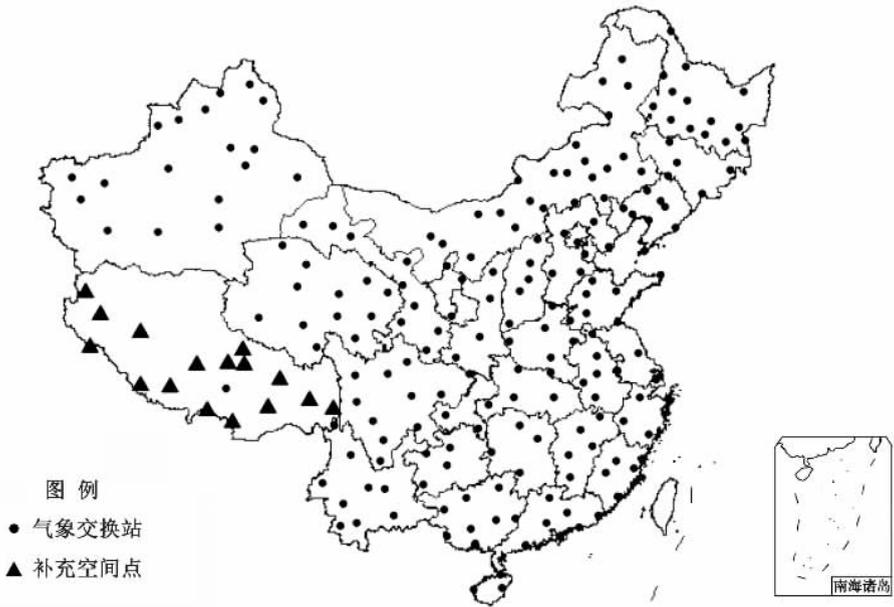


图 1 陆面生物有效紫外线辐射强度模拟空间点阵

Fig. 1 Spatial array of simulated biologically effective ultraviolet radiation intensity

纬度地区，其中青藏高原、横断山区、云贵高原西部以及东南沿海地区日辐射强度超过 472 KJ/m^2 ，四川盆地、天山和阿尔泰山地区、大兴安岭北部日辐射强度较低，低于 318 KJ/m^2 。7 月份，全国日生物有效紫外线辐射强度普遍增大，分布格局与 1 月截然不同，中高纬度地区日生物有效紫外线辐射强度高于低纬度地区，全国大约 $3/4$ 地区日生物有效紫外线辐射强度高于 1.18 MJ/m^2 ，其中青藏高原中北部、内蒙古高原、黄土高原地区日辐射强度超过 1.39 MJ/m^2 ，青藏高原南部、横断山区、云贵高原西部地区的日辐射强度相对较低，低于 0.66 MJ/m^2 。

图 3 (A, B, C, D) 表明，1 月和 7 月 UVA、UVB 的日辐射强度分布格局均不相同。UVA 的日辐射强度分布趋势与生物有效紫外线辐射总量分布 (图 2) 基本相同。UVB 1 月份日辐射强度较高的区域主要分布于低纬度的横断山区、云贵高原西部、东南沿海、海南岛、台湾岛，随着纬度的升高日辐射强度逐渐降低，东北北部、新疆地区日辐射强度最低；7 月份，青藏高原北部、内蒙古高原中西部、黄土高原以及长江以南中东部地区日辐射强度较高，青藏高原南部、横断山区、云贵高原西部、阿尔泰山地区、大兴安岭北部日辐射强度较低。对比 1 月和 7 月份的 UVA、UVB 日辐射强度分布，UVB 日辐射强度分别比 UVA 大 6 倍左右。

3.2 讨论

由于我国目前尚未建立常规的紫外线辐射观测网，现有的观测站缺乏对生物有效紫外线辐射监测，本文未能对估算结果进行统计检验。将估算结果与我国常年 1 月、7 月份的太阳总辐射分布^[29]以及文献 [30] 的研究结果相比较，发现变化趋势基本一致。

影响生物有效紫外线辐射估算的因素主要有云量、臭氧和地面反照率等。臭氧浓度主要受气温波动影响，多年气候监测表明 1 月和 7 月日均气温相对稳定，臭氧浓度维持相对

稳定, 对生物有效紫外线辐射的估算不确定性的影响较小。云量监测数据具有很大的不确定性, 云量对紫外线辐射强度的修正应采用同步监测数据, 本文采用月平均云量数据对晴空日有效紫外线辐射强度进行了修正, 造成估算结果与实际监测数据有一定的误差。同时, 本文根据区域主要植被类型确定地表反照率, 忽略了局地地表覆被的变化, 导致局地日辐射强度估算出现一定偏差, 但对全国日辐射强度的总体分布趋势影响较小。

我国生物有效紫外线辐射强度分布主要受以下因素的影响: (1) 地理纬度。通过影响太阳高度和日照时间间接地影响辐射强度变化。冬季 (1 月), 我国大陆由南向北太阳高度角逐渐减小, 导致辐射强度呈现出由南向北逐渐减小的趋势。夏季 (7 月), 辐射强度最高值主要出现在太阳高度较大、日照时间较长的华北和西北地区。华南和青藏高原南部辐射强度相对较低。(2) “三大阶梯”的基本地势格局, 特别是青藏高原对生物有效紫外线辐射的空间分布格局具有重要影响。从东南沿海向西北内陆随着海拔高度的升高, 辐射强度逐渐增强。青藏高原是我国海拔最高的区域, 而且研究发现 1 月份青藏高原上空平流层存在臭氧的“低谷区”^[31], 致使紫外线辐射被吸收和散射较少, 故 1 月青藏高原是我国生物有效紫外线辐射强度的高值区域。(3) 云对紫外线辐射的散射作用。1 月份, 四川盆地、青藏高原南部的雅鲁藏布峡谷地区云量较大, 日辐射强度明显低于周边地区。7 月份, 青藏高原南部、云贵高原西部、横断山区云量较同纬度华南地区云量偏大, 导致日辐射强度低于华南地区。(4) 臭氧的选择性吸收。臭氧对 UVB 的吸收程度远大于 UVA, 造成 7 月份我国 UVB 日辐射强度分布的高值较 UVA 明显偏向低纬度地区。(5) UVA 生物有效辐射相对于 270 nm 辐射的加权系数远小于 UVB 的加权系数^[21]。

4 结论

(1) 从生物健康效应评估的角度提出了生物有效紫外线辐射强度的概念, 并基于 LibRadtran 的 UVSPEC 辐射传输模型建立了估算陆面生物有效紫外线辐射强度的方法。这一方法能够较好地解决生物健康效应评估中面临的两大问题: 一是特定波段陆面生物有效紫外线辐射强度的估算; 二是陆面生物有效紫外线辐射空间连续分布模拟。但是, 模型输入要求较高, 需要获得同步监测的臭氧、云量和地表覆被数据。其中, 云量数据日变化较大, 直接采用日平均云量分布数据估算对陆面紫外线辐射强度模拟造成较大不确定性。研究建立日云量变化与陆面紫外线辐射强度之间的关联模型是解决这一问题的有效途径。

(2) 2000 年 1 月和 7 月的估算结果表明, 我国陆面生物有效紫外线辐射强度夏季 (7 月) 明显高于冬季 (1 月); 1 月份生物有效紫外线辐射强度低纬度地区高于中高纬度地区, 而 7 月份则是中纬度地区高于低纬度与高纬度地区; UVA 和 UVB 两个波段陆面辐射强度空间分布也存在较大差异, 特别是 7 月份, UVB 日辐射强度的高值区域较 UVA 明显偏向低纬底地区。

参考文献:

- [1] 刘灵奕, 刘玉清, 王国钦. 紫外线辐射对生态系统和人类健康的影响. 国外医学卫生学分册, 2000, 27(5): 269~273.
- [2] Matsumura Y, Ananthaswamy H N. Toxic effects of ultraviolet radiation on the skin. Toxicology and Applied Pharmacology, 2004, 195: 298~308.
- [3] 吴兑. 太阳紫外线辐射及其生物效应. 气象, 2001, 4: 54~57.

- [4] 郭世昌,杨秀红. 昆明地面生物有效紫外线辐射照度的初步计算. 大气科学,1996,20(4):414~421.
- [5] Frederick J E. Trends in atmospheric ozone and ultraviolet radiation; Mechanisms and observations for the northern hemisphere. Photochemistry and Photobiology,1990,51:757~763.
- [6] Frederick J E, Weatherhead E C. Temporal changes in surface ultraviolet radiation; A study of the Roberston—Berger meter and Dobson data records. Photochemistry and Photobiology,1992,56:123~131.
- [7] Mckenzie R L. Determining variabilities and trends in UV radiation. In: WCRP—99, Proceedings of the First SPARC General Assembly. Geneva: WMO/TD-814,1997,517~520.
- [8] Chubarova N Y, Nezval Y I. Thirty year variability of UV irradiance in Moscow. Geophysical Research, 2000, 105(D10):12529~12539.
- [9] Ogunjobi K O, Kim Y J. Ultraviolet (0.280-0.400 μm) and broadband solar hourly radiation at Kwangju, South Korea: Analysis of their correlation with aerosol optical depth and clearness index. Atmospheric Research,2004, 71(3):193~214.
- [10] 白建辉,王庚辰,胡非. 近20年北京晴天紫外线辐射的变化趋势. 大气科学,2003,27(2):273~280.
- [11] 白建辉,王庚辰. 广州地区太阳紫外总辐射的统计计算方法. 太阳能学报,1998,19(1):54~59.
- [12] 江灏,季国良,师生波,等. 藏北高原紫外线辐射的变化特征. 太阳能学报,1998,19(1):7~12.
- [13] Green A E, Cross K R, Smith L A. Improved analytic characterization of ultraviolet skylight. Photochemistry and Photobiology,1980,31:59.
- [14] 白建辉,王庚辰. 2000年北京地区太阳紫外线辐射的长期变化趋势及分析. 太阳能学报,2000,21(2):192~197.
- [15] 毕家顺. 紫外线辐射对人体的影响及其预报. 云南环境科学,2001,20(21):46~48.
- [16] 曾艳,吴幼乔. 紫外线辐射强度预报模型研究. 南京气象学院学报,2003,26(5):685~693.
- [17] Long C S, Miller A J, Hai-Tien L, *et al.* Ultraviolet index forecasts issued by the National Weather Service. Bulletin of the American Meteorological Society,1996,77(4):729~748.
- [18] ICNIRP. Guidelines on limits of exposure to ultraviolet radiation of wavelengths between 180nm and 400nm. Health Physics,2004,87(2):171~186.
- [19] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, *et al.* Numerically stable algorithm for discrete-ordinate-method radiative transfer in multiple scattering and emitting layered media. Applied Optics,1988,27(12):2502~2509.
- [20] Stamnes K, Tsay S C, Wiscombe W, *et al.* DISORT—A General-Purpose Fortran Program for Discrete-Ordinate-Method Radiative Transfer in Scattering and Emitting Layered Media; Documentation of Methodology. 2000.
- [21] Kylling A, Mayer B. LibRadtran-1.01 manual, ACP,2004. July 26,2005. ACP.
- [22] Mayer B, Kylling A. Technical note: The libRadtran software package for radiative transfer calculations—description and examples of use. Atmospheric Chemistry and Physics Discussions,2005,5:1319~1381.
- [23] Anderson G P, Clough S A, Kneizys F X, *et al.* AFGL Atmospheric Constituent Profiles (0~120km), AFGL-TR-86-0110, AFGL(OPI),1986.
- [24] Shettle E P. Models of aerosols, clouds and precipitation for atmospheric propagation studies. In: AGARD Conference Proceedings No. 454, Atmospheric propagation in the uv, visible, ir and mm-region and related system aspects,1989.
- [25] Blumthaler M, Ambach W. Solar UVB-albedo of various surfaces. Photochemistry and Photobiology,1988,48:85~88.
- [26] 刘布春,卢志光,高景明,等. 干旱、半干旱地区紫外线辐射强度及其预报方法的研究. 中国农业气象,2003, 24(1):44~47.
- [27] Sullivan S S, Cobba J L, Rosenb C J, *et al.* Assessment of sun exposure in adolescent girls using activity diaries. Nutrition Research,2003,23:631~644.
- [28] 刘扬,喻道军,等. 个体紫外线暴露剂量与环境紫外线剂量的关系. 中国公共卫生,2003,19(1):11~13.
- [29] 中央气象局. 中华人民共和国气候图集. 北京:地图出版社,1979. 7~13.
- [30] 沈元芳,况石. 紫外线模式预报方法的研究和试验. 应用气象学报,2002,13(U01):223~231.
- [31] 周秀骥,罗超,李维亮,等. 中国地区臭氧总量变化与青藏高原低值中心. 科学通报,1995,15:1396~1398.

Distribution of biologically effective solar ultraviolet radiation intensity on the ground in China

LIAO Yong-feng^{1,2}, WANG Wu-yi¹, ZHANG Li¹, YANG Lin-sheng¹

(1. Institute of Geographic Sciences and Natural Resources Research, CAS, Beijing 100101, China;

2. National Disaster Reduction Center of China, Beijing 100053, China)

Abstract: With the stratospheric ozone layer turning thinner and thinner, to calculate solar ultraviolet radiation reaching the Earth's surface and assess its effects on human health has become a focus. Based on radiation transmission model of DISORT, a new method to calculate biologically effective ultraviolet radiation intensity on the ground is identified and spatial distribution of biologically effective ultraviolet radiation intensity in China in January and July, 2000 is simulated using UVSPEC model of LibRadtran software package and GIS spatial analysis technique. This paper discusses the effects of the spatial and temporal variation of atmospheric ozone, cloud cover and ground albedo on ground ultraviolet radiation intensity, and explores the correction method with the result of DEM and cloud cover. In addition, it systematically analyzes the spatial distribution characteristics of ground biologically effective ultraviolet radiation intensity in China in January and July, 2000. Ultraviolet radiation intensity is higher in low latitude than that in mid-high latitude in January and on the contrary in July. Because of the higher altitude and lower ozone thickness, the ultraviolet radiation intensity is higher on the Tibetan Plateau than in the other regions in January. There are different radiation intensity distribution patterns between UVA and UVB in January and July because ozone can absorb more UVB radiation than UVA. Higher radiation distribution of UVB is closer to the low latitude than that of UVA. Owing to the higher relative spectral effective coefficient against 270nm of UVB, normalized UVB biologically effective radiation is about six times more than that of UVA.

Key words: biologically effective; ultraviolet radiation; UVA; UVB; spatial distribution

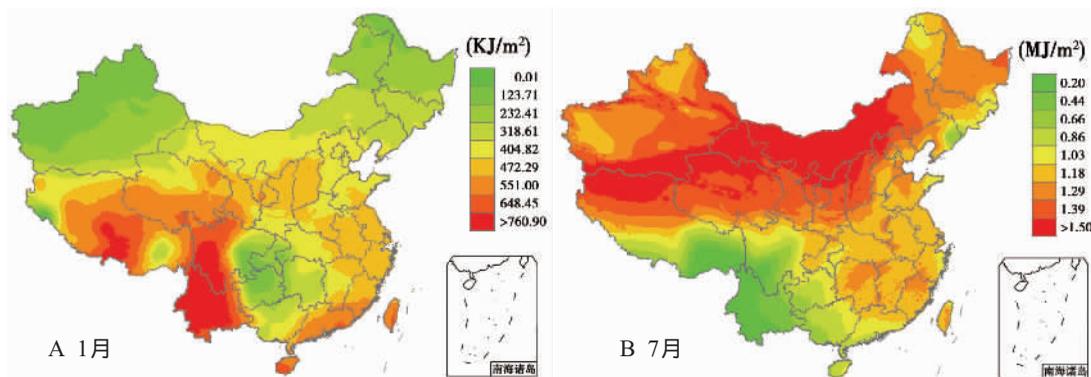


图 2 2000 年 1 月和 7 月陆面日生物有效辐射强度分布(A-1 月,B-7 月)
Fig.2 Biologically effective ultraviolet radiation intensity distribution in 2000(A-Jan, B-Jul)

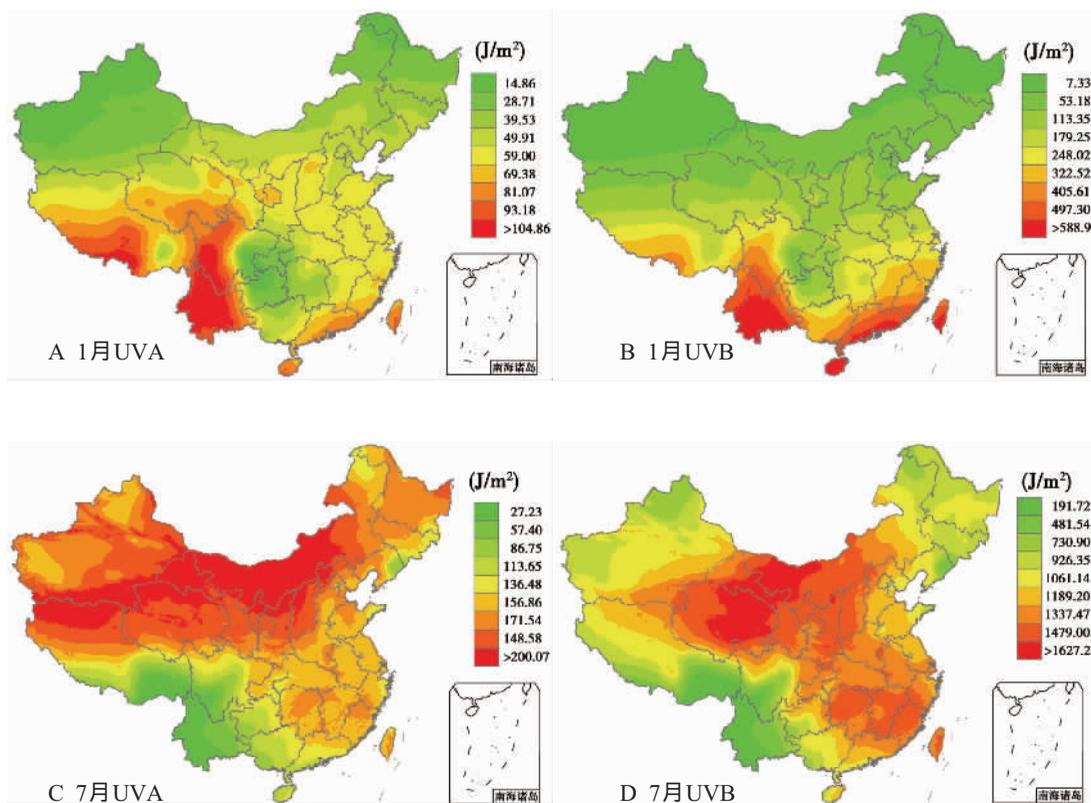


图 3 2000 年 1、7 月陆面日 UVA、UVB 辐射强度分布
Fig.3 UVA and UVB radiation intensity distribution in 2000
(A-Jan,UVA; B-Jan,UVB; C-Jul,UVA; D-Jul,UVB)