· 实验研究 ·

眼暴露与环境紫外辐射光谱差异性研究*

王芳[1], 高倩[1], 杨德棋[2], 于佳明[2], 刘扬[1]

摘 要: 目的 探讨眼部暴露与环境紫外辐射光谱的差异性, 为指导公众正确防护眼部紫外线损伤提供依据。**方法** 使用自制的安装有高紫外灵敏度光纤光谱仪的眼紫外线暴露模型在中国海南省三亚地区进行实地监测, 获得大量眼部暴露和环境紫外辐射光谱数据。眼部紫外辐射光谱数据与角膜损伤、结膜损伤、晶体损伤作用光谱相加权, 计算对应的生物有效强度, 再与时间相加权计算紫外辐射剂量。**结果** 环境紫外辐射随日间时间推移呈单峰分布, 峰值出现在 13:00 左右, 而眼部暴露紫外辐射随日间时间推移呈双峰分布, 峰值分别出现在 10:00 和 16:00 左右; 不同波长光谱分布分析显示, 随波长增加环境与眼暴露紫外辐射强度增加。环境 400 nm 正午峰值约为 161.51 μw cm^{-2} nm^{-1}, 眼部 400 nm 上、下午峰值分别约为 65.43 和 66.20 μw cm^{-2}nm^{-1}。而眼角膜、结膜和晶体损伤光谱强度分别在 311、300 和 307 nm 出现峰值, 10:00 辐射强度值高于其他时间点, 峰值分别约为 0.300 0、0.004 6 和 0.440 0 μw cm^{-2}nm^{-1}。**结论** 眼部暴露与环境紫外辐射光谱分布不同。

关键词: 眼; 环境; 紫外辐射; 光谱; 波长

中图分类号: R 122.2^{+}5 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0580(2017)09-1374-04 DOI: 10.11847/zgggws2017-33-09-20

Dissimilarity in distributions of ocular exposure and environment spectrum irradiance of ultraviolet

WANG Fang*, GAO Qian, YANG De-qi, et al (* *Department of Occupational and Environmental Health, School of Public Health, China Medical University, Shenyang, Liaoning Province* 110122, China)

Abstract: Objective To explore the difference in the distributions of ocular ultraviolet (UV) exposure and environment UV spectrum irradiance. **Methods** The UV exposure levels at Sanya city of Hainan province, China were determined; a dual-detector spectrometer and a self-designed manikin with optical fiber high sensitive spectrometer were used to measure ocular UV exposure and ambient UV spectral irradiance simultaneously. The biological effective intensity (BEI) of UV irradiance were assessed based on spectrum-weighted irradiance at noon and injuries of cornea, conjunctiva, and lentil; then the UV irradiance dose was calculated with time-weighted BEI. **Results** The diurnal variation of environment UV irradiance reaches the maximum at 13:00 post meridiem (PM), exhibiting a unimodal distribution; however, the peak value of ocular exposure to UV irradiance is at 10:00 ante meridiem (AM) and 16:00 PM, exhibiting a bimodal distribution. The maximum wavelength of environment and ocular exposure to UV irradiance are both at 400 nm, with the dosage of 161.51 μw cm^{-2}nm^{-1} for environment irradiance at noon and the dosages of 65.43 μw cm^{-2}nm^{-1} and 66.20 μw cm^{-2}nm^{-1} for ocular exposure at AM and PM. Whereas, the injury-related maximum biologically effective wavelength of UV irradiance are 311 nm for cornea, 300 nm for conjunctiva, and 307 nm for lentil, with the corresponding intensities of 0.30 μw cm^{-2}nm^{-1}, 0.004 6 μw cm^{-2}nm^{-1}, and 0.44 μw cm^{-2}nm^{-1} at 10:00 AM, respectively. **Conclusion** The distributions of UV spectrum irradiance are different for ocular exposure and background environment.

Key words: eye; environment; ultraviolet radiation; spectrum; wavelength

太阳紫外辐射过度暴露导致的眼部损伤主要表现为角膜炎、结膜炎、白内障、翼状胬肉等[1-4]。为了解紫外辐射对眼部损伤, 需要对环境紫外辐射进行测量[5], 应用真人佩戴仪器进行个体暴露测量[6-8]以及应用人体模型进行模拟个体眼部紫外辐射暴露测量[9-11]等。紫外辐射对人体产生危害的生物损伤效应具有波长依赖性。作用光谱某个特定波长紫外辐射可引起生物反应的相对损伤效应[12-13]。欲获得紫外辐射对眼产生损伤作用的生物有效强度则需将到达眼部的紫外光谱强度和眼损伤效应作用光谱相加权。目前少数应用水平或垂直面太阳紫外辐射与作用光谱加权[14-16]进行研究, 而应用到达眼部的紫外辐射光谱强度与眼损伤作用光谱加权构建的生物有效强度眼损伤研究较少。本研究采用人体模型和光纤光谱仪采集的到达眼部紫外辐射光谱数据, 并与角膜损伤[17]、结膜损伤[18]、晶体损伤[19]作用光谱相加权, 计算对应的生物有效强度, 旨在阐明眼部暴露与环境紫外辐射的光谱差异性, 指导公众正确认知眼部紫外线暴露的危险时段。结果报告如下。

* **基金项目:** 国家自然科学基金(81273034)
作者单位: 1. 中国医科大学公共卫生学院环境卫生教研室, 辽宁 沈阳 110122; 2. 中国医科大学附属第四医院
作者简介: 王芳(1985 -), 女, 辽宁铁岭人, 讲师, 博士, 研究方向: 紫外线生物效应。
通讯作者: 刘扬, E-mail: yangliu@cmu.edu.cn
数字出版日期: 2016 - 9 - 6 14:27
数字出版网址: http://www.cnki.net/kcms/detail/21.1234.R.20160906.1427.012.html

1　材料与方法

1.1　主要仪器与设备

1.1.1　监测仪器　AvaSpec-2048 × 14 – 2 – USB2 型光纤光谱仪(荷兰 Avantes B. V 公司),具有高量子效率和高紫外灵敏度的薄型背照式 CCD 光谱仪。它基于 AvaBench-75 光学平台,采用对称式 Czerny-Turner 光路设计,采用 2 048 × 14 个像素的高紫外灵敏度 CCD 面阵探测器,尤其适合较弱强度和高分辨率方面的应用监测;光谱仪的半波峰宽度为 2.0 nm,杂散光 <0.1%,信噪比约为 500 dB。光谱仪使用的衍射光栅的光栅线对数为 1 200 线/mm,闪耀波长为 250 nm,狭缝宽度为 200 μm;配置 16 位 AD 转换卡和高速 USB 2.0 接口,可实现每秒 450 幅光谱的超高速采样速率,每幅光谱图的传输速度为 2.24 ms。本研究使用的光纤探头为余弦校正器 CC-UV/VIS,其有效直径为3.9 mm,采用特氟龙(聚四氟乙烯)漫射材料,对 200 ~ 800 nm 谱段优化,可接收 180°视场角的光线。仪器定标由英国国家物理实验室(National Physical Laboratory, NPL GB)完成,光谱范围为 200 ~ 400 nm。

1.1.2　监测设备　旋转式眼部紫外辐射暴露模型(中国医科大学公共卫生学院环境卫生教研室自制),从上至下由人体头部模型、支架及转盘 3 部分组成,整体高度约 1.70 m;人体模型眼部中心距地面高度约 1.6 m,2 眼中心水平距离约 6 cm;眉弓最高点距眼表面水平距离约 0.6 cm;光纤光谱仪的一个探头置于模型右眼中心眼表面最前位置,用于进行眼部紫外暴露强度的监测。眼部探头的视线低于水平面约 10°,眼视角(field of the view, FOV)约 139°(上视角约 58°,下视角约 81°)。光纤光谱仪另一探头位于模型头顶水平位置,用于进行水平环境紫外辐射强度的监测。

1.2　监测方法

1.2.1　监测地点　监测地点为海南省三亚市海棠湾镇(18.4°N, 109.7°E, 海拔约 18 m)。监测地点为 5 层楼楼顶,楼顶为铺有沥青的水泥地面,视线范围内无遮挡。

1.2.2　监测条件　(1)监测时间:选择当地年最高太阳高度角日附近几天进行。三亚市位于北回归线(23.5°N)以南,其在一年中有 2 次太阳直射(年最高太阳高度角日)分别出现在 5 和 7 月,5 月当地雨水较多,故选择在 7 月份进行监测。(2)天气条件:天气条件的选择遵循首选晴朗天气原则、天空中尽量无云或少云,远方地平线附近的少量云可忽略不计。在一天的监测过程中云少时进行,云多有遮挡停止监测,待云量减少后进行。

1.2.3　监测方法　在监测开始前将模型转速设定为 1 r/min(360°),匀速顺时针旋转,相当于 6°/s。同时,将光纤光谱仪监测模式调整为每隔 1 秒收集 1 次数据,且每次监测时长 1 min,确保每次监测模型正好旋转 1 周,并收集到眼和环境各 60 组不同波长的光谱数据,代表 1 周 60 个不同地理朝向,数据单位为 $\mu w\ cm^{-2} nm^{-1}$。在监测时,每次监测人体模型均以模型眼部正对太阳方向作为起始位置,并顺时针旋转进行监测,2 次监测时间间隔 5 min。

1.3　数据收集与处理

1.3.1　数据处理　监测获得的数据由光纤光谱仪自带的"AvaSoft 7.4 for USB 2.0"软件处理为 Microsoft Excel 格式,此时的数据是眼部暴露数据和环境监测数据分开表示的数据,该光谱数据不是间隔 1 nm 的整波长数据,需要使用 OriginPro 8.0 数据处理软件计算整波长的光谱数据。在整波长的光谱数据基础上应用 OriginPro 8.0 软件对 300 ~ 400 nm波长紫外辐射积分求得 UVB(ultraviolet B)段紫外辐射强度值。本研究以模型正对太阳时眼部的监测数据作为最大暴露值,模拟人体眼部紫外辐射的最大暴露状态。

1.3.2　生物有效紫外辐射强度计算　生物有效紫外辐射强度是由实际监测获得的紫外光谱辐射强度值与对应的作用光谱相加权,计算公式如下:

$$UVBE = \int_{UV} S(\lambda) A(\lambda) d(\lambda)$$

式中 S(λ)代表监测获得的紫外光谱辐射强度值,$A(\lambda)$代表特定损伤效应在某一波长作用光谱权重系数值,d(λ)是光谱的波长间隔,为 1 nm。本研究应用的角膜、结膜、和晶体损伤作用光谱,其开始波长均为 300 nm,而截止波长分别为 318、310 和 371 nm,所有光谱均呈现线性分布间隔 1 nm。

1.3.3　紫外辐射剂量计算　紫外辐射暴露剂量计算公式如下:

$$H = \int_{T} S(\lambda) T$$

式中 S(λ)代表监测获得的紫外光谱辐射强度值,T 代表暴露紫外辐射的时间间隔。本研究监测时间从北京时间(China standard time, CST)8:00 到 18:00。

2　结　果

2.1　环境和眼部暴露紫外光谱辐射日间分布(图 1、2)

在紫外光谱 300 ~ 320 nm 范围内以 5 nm 为间隔,在 320 ~ 400 nm 范围内以 10 nm 为间隔共选择 13 个波长,分别为 300、305、310、315、320、330、340、350、360、370、380、390 和 400 nm。在时间相同时,环境和眼部不同波长辐射强度值分布与波长呈正相关(图

1,2)。环境紫外辐射不同波长辐射强度随时间分布呈单峰状,最大值出现在北京时间13:00左右,最大值范围从 2.8 μw cm^{-2}nm^{-1}(300 nm)~161.5 μw cm^{-2}nm^{-1}(400 nm)(图1)。眼暴露紫外辐射的日间分布与环境不同,呈双峰分布,峰值出现在北京时间10:00[最大值范围从 0.7 μw cm^{-2}nm^{-1}(300 nm)~65.4 μw cm^{-2}nm^{-1}(400 nm)]和 16:00 左右[最大值范围从 0.7 μw cm^{-2}nm^{-1}(300 nm)~66.2 μw cm^{-2}nm^{-1}(400 nm)](图2)。

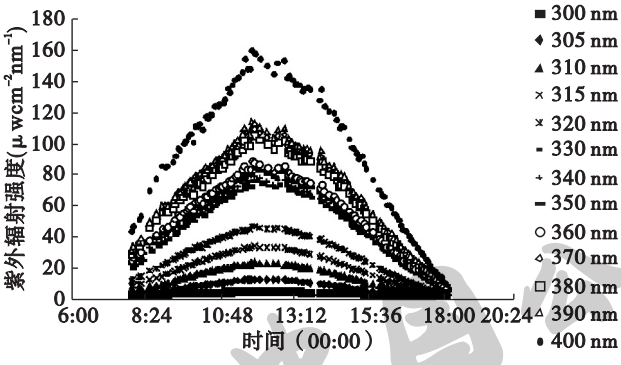


图 1　环境不同波长辐射强度随时间日间分布

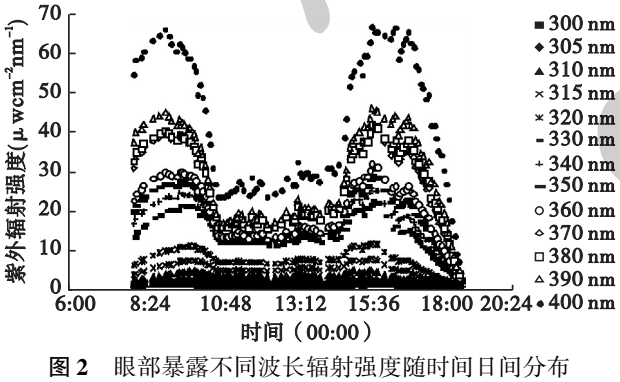


图 2　眼部暴露不同波长辐射强度随时间日间分布

2.2　*环境和眼部暴露紫外辐射光谱*(图3、4)　从光谱分布形状上看无论是环境还是眼部暴露紫外辐射,所有不同时间点的光谱分布几乎一致,均呈现在 300~320 nm 的 UVB 段随波长变长值增高,中间没有波峰与波谷;而在 320~400 nm 的 UVA 段,总体是随波长变长值增高,但是中间分布波峰与波谷。环境紫外辐射值是 13:00 左右最高(图3),而眼部暴露紫外辐射是 10:00 和 16:00 左右最高(图4)。

2.3　*眼部暴露眼损伤生物有效紫外辐射光谱*(图5)　图5A、B 和 C 分别表示每 1 h 间隔不同时间点眼部暴露各波长眼角膜损伤、结膜损伤和晶体损伤生物有效紫外辐射分布。结果显示,眼角膜损伤、结膜损伤和晶体损伤紫外辐射光谱截止波长分别为 318、310 和 371 nm;眼部暴露结膜损伤有效紫外辐射在所有时间点上均呈现随波长增加辐射减小趋势,10:00,300 nm 最大值约为 0.004 6 μw cm^{-2}nm^{-1}。眼暴露角膜损伤和晶体损伤有效紫外辐射分布,在18:00,均呈现随波长增加辐射减小趋势,而在其它时间点,角膜损伤辐射在 311 nm 出现峰值,在305 nm出现谷值,晶体损伤辐射在 307 nm 出现峰值;10:00,311 nm 角膜损伤最大辐射值约为 0.300 0 μw cm^{-2}nm^{-1},而 307 nm 晶体损伤最大辐射值约为 0.440 0 μw cm^{-2}nm^{-1}。

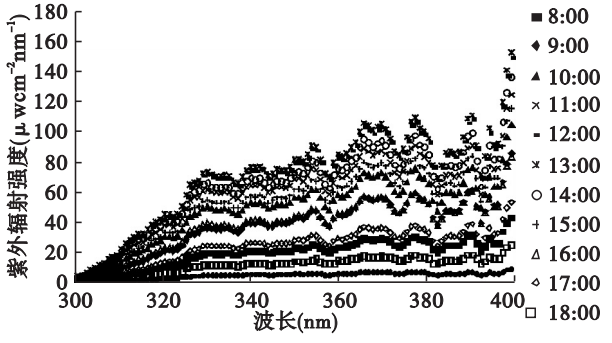


图 3　不同时间点环境紫外辐射光谱

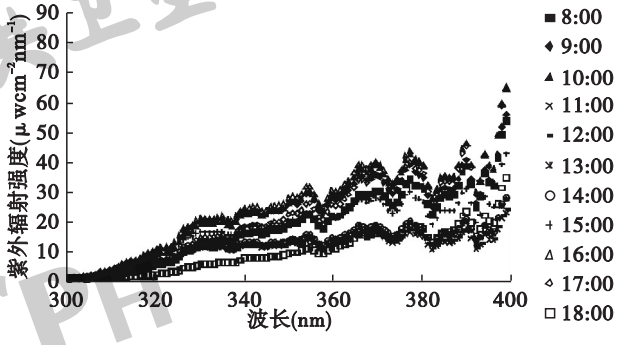
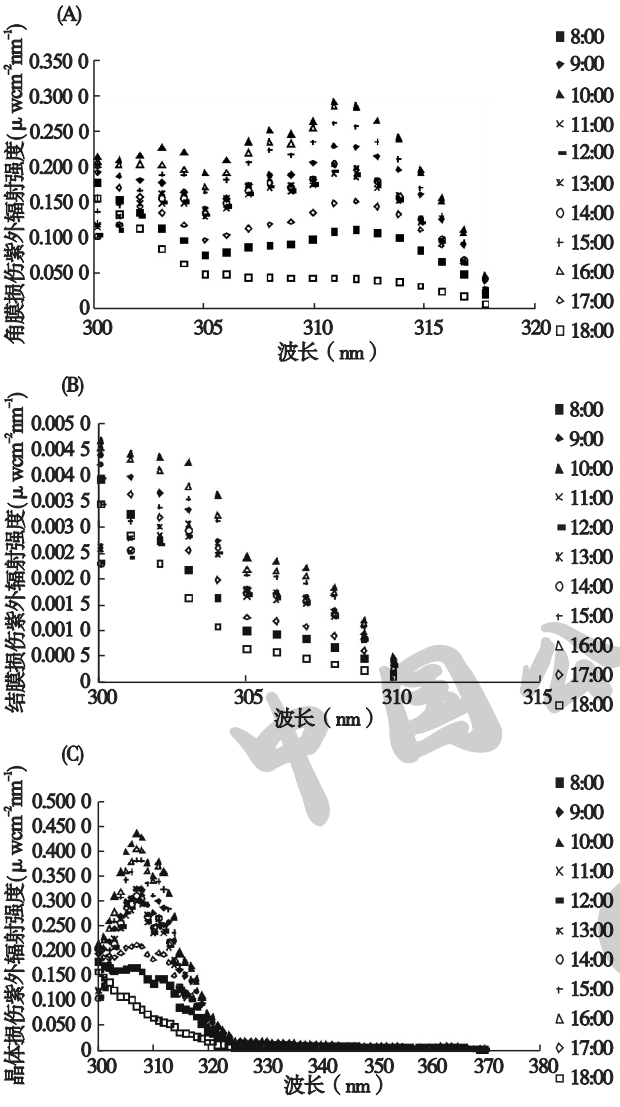


图 4　不同时间点眼部暴露紫外辐射光谱

3　讨　论

本研究结果显示,环境紫外辐射不同波长辐射强度随时间成钟形的单峰分布,最大值出现在北京时间 13:00 左右;眼暴露紫外辐射的日间分布与环境暴露日间分布不同,呈双峰分布,眼部暴露的峰值出现在北京时间 10:00 和 16:00 左右;9:00—10:00 和 15:00—16:00 是除中午以外对眼损伤的高危时间段。

紫外辐射作用于人体的生物效应取决于对生物有效损伤强度。Parisi 等[14]在澳大利亚(27.5 °S,海拔 693 m)监测水平环境紫外辐射并与眼损伤光谱权重加权,求得水平环境紫外辐射对应的角膜和晶体生物损伤有效值,结果显示,生物有效强度在 3 个不同太阳天顶角(solar zenith angle,SZA)上的分布呈现同一波长眼损伤有效强度是 SZA 越小值增大,在 SZA 6°角膜和晶体损伤有效光谱辐射强度的最大值,分别在 2 和 3 μw cm^{-2}nm^{-1}左右。本研究结果显示,同一波长角膜、结膜、晶体眼损伤生物有效辐射强度随太阳高度角分布呈现在10:00和16:00(太阳高度角 50°)出现最大值,并且角膜损伤和晶体损伤的最大有效辐射强度分别为 1.6 和 2.5 μw cm^{-2}nm^{-1}。本研究结果与 Parisi 等[14]结果不同。差异可能与下列因素有关:(1)监测地点海



注：A：角膜损伤；B：结膜损伤；C：晶体损伤。

图 5　1 h 间隔眼部暴露生物有效紫外辐射光谱

拔差异：Parisi 等研究地点海拔 693 m，而本文是 18 m，海拔不同可能造成紫外辐射强度上的差异。有文献表明海拔每增加 1 000 m，320 nm 紫外辐射强度降低 20%，300 nm 紫外辐射强度降低 30%[20]；(2) Parisi 等未标明监测地表面物质及是否无遮挡，而本文是在沥青屋顶进行监测，监测结果可能受到地面反照率影响[21-22]；(3) Parisi 等是应用水平环境数据，而本文是测量到达眼部的眼暴露数据。

本研究结果显示，角膜损伤光谱强度在 311 nm 出现峰值，在 305 nm 出现谷值；结膜损伤在 303 nm 出现峰值；晶体损伤光谱强度在 307 nm 出现峰值，类似钟形曲线分布。提示，不同部位眼损伤的强效应波长不同。生物有效强度是由作用特定部位的紫外辐射强度和对应作用光谱相加权构建的。任何影响监测获得的紫外辐射光谱构成的因素发生改变，生物损伤有效强度就会变化。研究表明云和大气污染对紫外辐射的影响具有波长依赖性[23]。不同气候，不同污染程度，尤其是乌云和严重环境污染条件下可能会得到不同的结果。因此，在进行眼部紫外辐射暴露评估时，还应充分考虑各种气候条件以及空气污染程度等因素。

参考文献

[1] Young RW. The family of sunlight-related eye diseases[J]. Optom Vis Sci, 1994, 71: 125 - 144.

[2] 刘扬，孙炜. 紫外线致白内障的流行病学研究现状[J]. 中国公共卫生，2002，18(1)：109 - 110.

[3] 夏旭霞，刘扬. 环境紫外线辐射与老年性白内障[J]. 中国公共卫生，2012，28(7)：992 - 994.

[4] 宋文熹，张道明，侯厚垣，等. 西藏昌都地区 1468 名藏族农牧民中老年性白内障的发病情况调查[J]. 中华眼科杂志，1979，15：100 - 104.

[5] Blumthaler M, Ambach W, Ellinger R. UV-Bestrahlung von horizontalen und vertikalen Flachen im Hochgebirge[J]. Wetter und Leben, 1996, 48: 25 - 31.

[6] Moehrle M, Korn M, Garbe C. Bacillus subtilis spore film dosimeters in personal dosimetry for occupational solar ultraviolet exposure[J]. Int Arch Occup Environ Health, 2000, 73: 575 - 580.

[7] Moehrle M, Dennenmoser B, Garbe C. Continuous long-term monitoring of UV radiation in professional mountain guides reveals extremely high exposure[J]. Int J Cancer, 2003, 103: 775 - 778.

[8] Duncan DD, Muñoz B, Bandeen-Roche K, et al. Visible and ultraviolet-B ocular-ambient exposure ratios for a general population[J]. Salisbury Eye Evaluation Project Team. Invest Ophth Vis Sci, 1997, 38: 1003 - 1011.

[9] Hu LW, Gao Q, Xu WY, et al. Diurnal variations in solar ultraviolet radiation at typical anatomical sites[J]. Biomed Environ Sci, 2010, 23: 234 - 243.

[10] Gao N, Hu LW, Gao Q, et al. Diurnal variation of ocular exposure to solar ultraviolet radiation based on data from a manikin head[J]. Photochem Photobiol, 2012, 88: 736 - 743.

[11] Sasaki H, Sakamoto Y, Schnider C, et al. UV-B exposure to the eye depending on solar altitude[J]. Eye Contact Lens-Sci Clin, 2011, 37: 191 - 195.

[12] Wong JC, Parisi AV. Measurement of UVA exposure to solar radiation[J]. Photochem Photobiol, 1996, 63: 807 - 810.

[13] Environmental Health Criteria Document. Ultraviolet Radiation[J]. 14th, Geneva: World Health Organization, 1979.

[14] Parisi AV, Downs N. Cloud cover and horizontal plane eye damaging solar UV exposures[J]. Int J Biometeorol, 2004, 49: 130 - 136.

[15] Parisi AV, Kimlin MG. Horizontal and sun-normal spectral biologically effective ultraviolet irradiances[J]. J Photochem Photobiol B-Bio, 1999, 53: 70 - 74.

[16] Schouten P, Parisi AV. Direct comparison between the angular distributions of the erythemal and eye-damaging UV irradiances: a pilot study[J]. J Photochem Photobiol B-Bio, 2010, 102: 146 - 155.

[17] Hellux CA, Schaefer KG. Commission Internationale de L' Eclairage Photokeratitis[J]. CIE-Journal, 1986, 5: 19 - 23.

[18] Hellux CA, Schaefer KG. Commission Internationale de L' Eclairage Photoconjunctivitis[J]. CIE-Journal, 1986, 5: 24 - 28.

[19] Oriowo OM, Cullen AP, Chou BR, et al. Action spectrum and recovery for *in vitro* UV-induced cataract using whole lenses[J]. Invest Ophthalmol Vis Sci, 2001, 42: 2596 - 2602.

[20] Grobner J, Albold A, Blumthaler M, et al. Variability of spectral solar ultraviolet irradiance in an Alpine environment[J]. J Geophys Res, 2000, 105: 26991 - 27003.

[21] Sliney DH. UV radiation ocular exposure dosimetry[J]. J Photochem Photobiol B-Bio, 1995, 31: 69 - 77.

[22] Tanskanen A, Manninen T. Effective UV surface albedo of SEA sonally snow-covered lands[J]. Atmos Chem Phys, 2007, 7: 2759 - 2764.

[23] An JL, Wang YS, Li X, et al. Relationship between surface UV radiation and air pollution in Beijing[J]. Acta Scientiae Circumstantiae, 2008, 29: 1053 - 1058.

收稿日期： 2016-06-13　（解学魁编校）