

气候变化下热浪对人群健康的风险及健康经济损失 预估研究进展

李湉湉 杜宗豪 程艳丽

政府间气候变化专业委员会(IPCC)第4次评估报告以及我国第二次气候变化评估报告均指出,预估气候变化,特别是极端天气事件造成的人群健康风险是制定适应性政策的重要基础^[1-2]。2009年,《柳叶刀》杂志上发表的一篇文章提出,21世纪最严重的全球性健康危害是由气候变化造成的^[3]。在气候变化的大背景下,极端天气事件在全球频频发生,威胁了人群健康风险并且造成了相当严重的健康经济损失^[4-5]。世界灾害报告显示,从1999到2008年,全球有超过20亿人直接或间接的受到了极端天气事件的影响。2007年,全球发生极端天气约900起,直接导致死亡15000余例,直接经济损失约660亿美元^[6]。IPCC于2011年发布的极端天气事件特别报告中明确指出,在未来,气候变化不仅会导致极端天气事件的增加,并可能会引发史无前例的重大健康危害^[4]。

在诸多的极端天气事件中,高温热浪对人群健康的影响是最为巨大的。美国国家海洋和大气管理局(NOAA)统计数据显示,2010年,高温热浪直接致死人数为138例,在所有极端天气事件中排在首位^[7]。热浪的健康经济损失也居其他极端天气事件之首,每1000名居民健康经济损失达15万美元^[8]。2003年7—8月的欧洲高温热浪导致了超过30000例的超额死亡,特别是在法国,超额死亡数达到了14800例^[3,9],远远超出1999—2002年同期死亡数。高温热浪对我国人群的影响也相当严重,Lan等^[10]的文章报道了我国哈尔滨市2010年6月7日到11日一次典型热浪的死亡人数高于2009年同期非热浪期死亡数,超额死亡风险达到了40%左右。

未来高温热浪增加的趋势也十分明确,IPCC在报告中给出了“非常可能”的最高评级^[1]。Meehl和Tebaldi^[11]通过模型研究测算出,在21世纪,热浪在强度、频率及持续时间上都会明显增加。在此形势下,如果不采取有效的适应性措施并制定相关政策,热浪将会对人群健康造成无法估算的严

重威胁。

我国是一个极端天气事件频发的国家,仅以2010年为例,西南5个省份遭遇大旱,南方多个省市遭受暴雨袭击,全年有5个台风在福建沿海登陆,高温热浪席卷全国。2010年夏季,除青藏高原外,我国其余大部分地区均出现了35℃以上的高温天气,其中东北北部、华北中南部、新疆南部等地超过38℃。全国有44个气象观测站日最高温突破历史最高值^[12]。1957—2001年我国年均热浪次数趋于上升。在21世纪末我国温度增加约2.5~4.6℃的大背景下,未来高温热浪发生次数将非常可能继续增加^[2]。可以预见,未来我国高温热浪人群健康风险会越大,其经济损失会更加严重。因此开展此方面的研究将对制定符合我国国情的气候变化人群适应性政策,提高政府及公众的高温热浪适应能力,保护人群健康具有重要的意义。

1. 气候变化背景下高温热浪对人群健康风险的预估研究:以热浪(或极端高温)为代表的极端天气事件对人群健康风险的预估研究是制定气候变化适应性政策的重要基础,IPCC、WHO及许多著名学者均撰文指出,此方面研究是气候变化研究中的绝对优先领域^[1, 3, 13-15]。我国于2011年底出版的《第二次气候变化国家评估报告》也同样明确了此方面的研究需求^[2]。Peng等^[16]关于芝加哥热浪对人群死亡影响预估的文章受到了各界的广泛关注。该研究结果显示,在不同排放情景下,依据不同全球模型预估结果,到21世纪末,在芝加哥,年均由于热浪造成的死亡将会达到166~2217例,是现在的3.1~41.8倍。尽管该研究采用了多模型多情景,较好的表达了预估结果的不确定性,但是在进行预估时,并未纳入未来热浪强度变化的影响,仅仅考虑了热浪持续时间及频率变化的影响,造成了预估结果的低估。Li等^[17]首次利用16种全球气候系统模式(GCMs)和2种排放情景预估了纽约曼哈顿未来温度相关的死亡,在碳排放相对高速情景(A2)下2080年的热相关死亡例数将比1980年增加91%。从1997年至今,世界范围内公开发表的关于热浪或者与温度热效应相关的人群健康风险的预估研究共计十余项,均为美国,欧洲及澳大利亚等发达国家的研究成果^[16, 18-31],发展中国家的研究报道较少。Takahashi等^[19]预估了未来全球与温度增高有关的死亡变化,该研究显示,中国是受影响最大的国家之一。但是该研究由于缺乏区域尺度的历史数据且预估尺度过大,对于人群健康风险的预估可能存在较大偏差。我国目前公开发表的与温度相关的未来人群健康风险预估研究仅有1项。郭亚非等^[32]在我国上海

DOI:10.3760/cma.j.issn.0253-9624.2014.09.021

基金项目:国家自然科学基金(21277135);北京市自然科学基金(8132048);国家自然科学基金青年基金(40905069,41205081);地表过程与资源生态国家重点实验室开放课题(2013-KF-10)

作者单位:100021 北京,中国疾病预防控制中心环境与健康相关产品安全所 环境健康风险评估室(李湉湉、杜宗豪);中国气象科学研究院大气成分研究所(程艳丽)

通信作者:李湉湉,Email:tiantianli@gmail.com

地区进行了一些初步的探索性工作,预估在 A2 和相对低速增长模式(B2)下上海未来温度热效应人群死亡风险。该研究显示,在 21 世纪末,A2 高排放情景下,夏季与温度热效应相关的年均死亡人数为现在的 2.5 倍以上。综合比较上述各项研究结果,值得注意的一点是,未来各区域人群的健康风险变化有着较大的差别,这除了由于各地未来气候变化程度不同外,很大程度上也取决于热浪(极端高温)对各地区人群健康风险的不同。因此,热浪对不同区域人群健康的影响程度以及未来温度的变化是未来高温热浪健康风险评估不可或缺的两部分关键信息。

2. 高温热浪与人群健康的定量关系:通过历史数据构建区域尺度高温热浪与人群健康的定量关系是未来预估最为重要的基础^[33-34]。美国及欧洲的大量研究已经证实了热浪期间死亡及患病会增加^[34-40]。在不同地区,热浪对人群健康的影响程度会有较大差异^[41-44]。最新的一项美国全国性的热浪对人群健康影响的研究显示,从美国范围看,在热浪期死亡的风险比非热浪期增加了 3.74%;热浪强度每增加 1 华氏度,热浪死亡风险增加了 2.49%;热浪持续时间每增加 1 d,热浪死亡风险增加了 5.04%,死亡风险的变化趋势为,在纬度高的地区热浪对人群健康的影响更大^[44]。时间序列(time-series)与病例交叉(case-crossover)是目前公认的最科学的进行热浪对人群健康风险评估定量研究的方法,并在多项研究中得到了成功的应用。研究显示,两种方法所得到的结果差异并无统计学意义^[34, 37, 45-47]。上述提到的十余项未来健康风险评估研究,在构建热浪或极端高温对人群健康的定量关系上多数采用时间序列或病例交叉的方法。热浪的不同定义及热浪暴露的表达形式、空气污染物的混杂、滞后天数等问题是在构建复杂统计学模型时需要考虑的重要因素^[33, 45, 47]。不同地区的研究显示,上述因素对最终结果的影响会有不同。因此需要基于研究地区本身的历史数据,充分考虑研究区域特征及上述各影响因素,构建科学的模型形式计算出该区域热浪对人群健康的定量关系。人口学特征(年龄、性别等)、疾病特征(心血管疾病、呼吸系统疾病等)、社会经济学特征(收入、婚姻、种族等)等的效应修饰作用也是热浪对人群健康研究中重要的一个部分。基于此,可以定量的筛选出脆弱性人群及敏感性疾病^[5, 33-34, 37, 46]。Knowlton 等^[48]的研究发现,热浪期间患病与死亡的敏感性疾病模式及脆弱人群特征会有所不同,热浪期间与患病相关的敏感性疾病主要包括热衰竭、中暑、脱水、电解质紊乱、急性肾衰竭及神经类疾病,脆弱人群主要为老人、儿童及较年轻的成年人;与死亡相关的敏感性疾病主要包括心血管疾病、脑血管疾病及呼吸系统疾病,脆弱人群为老年人^[48]。Ebi^[33]认为在不同地区,热浪相关敏感性疾病及脆弱人群可能会有较大差异,此观点有待通过多区域研究得以证实。我国基于历史数据的热浪对人群健康的研究仍较为有限,仅在北京、上海、南京、汕头等地有过相关研究报道^[49-56]。近期孙允宗等^[57]报道了我国 5 个城市温度对人群死亡率影响的文章中,在日均温 30℃、滞后 0 d 的情况下,温度对死亡的热

效应进行了定量计算,南京、长沙、北京、天津和上海的人群死亡风险分别增加了 31%,25%,18%,18%及 15%。我国目前的研究以单一地点研究为主,多城市研究较少,且研究方法各异,很难阐明我国不同区域热浪对人群健康影响的差异这一重要问题;在研究方法及模型的选择上,需要不断提升统计模型的科学性;我国对于热浪相关的敏感性疾病及脆弱人群的研究十分薄弱,从国际研究现状看,对于敏感性疾病及脆弱人群的研究仍需继续深入探索,我国应借鉴国际经验并基于我国的特点,辨识出与我国热浪相关的敏感性疾病与脆弱人群特征。

3. 未来温度的预估:未来温度的预估是热浪对人群健康风险评估中不可或缺的信息。基于不同的 GCMs 及排放情景,可以预估未来的温度^[55-56]。但是由于 GCMs 的预估数值尺度较大,很难运用到区域尺度的评估及决策中,因此,需要对 GCMs 的数据实施降尺度处理(包括动力降尺度方法及统计学降尺度方法),这也是 IPCC 推荐使用的获取区域尺度(小尺度)数据的方法^[55]。自 1997 年以来所有热浪健康风险评估的预估研究中,绝大多数研究(9 项)并未使用任何降尺度方法,其结果并不能很好的代表未来区域的影响状况。仅有 2 项研究使用了动力降尺度的方法。动力降尺度方法利用与 GCM 嵌套的区域气候模式(RCM)来预估区域未来的温度^[58]。由于动力降尺度方法需要驱动 RCM,比较耗时,复杂,也很难应用于多个 GCMs 的集成运算中,其在目前的预估研究中应用性较差。其余的 6 项研究均使用的是统计降尺度方法。统计降尺度基于大尺度气候要素与区域尺度气候要素之间的经验关系进行区域温度的预估^[58-59]。Li 等^[17]首次利用 16 种 GCMs 的统计降尺度集成运算方法,报道了未来温度相关的超额死亡风险及风险数值范围,该研究证明,统计降尺度方法在未来人群健康风险评估研究中具有多模型集成运算的优势。因此,与动力降尺度方法相比,统计降尺度方法较为经济易行,且其结果与动力降尺度相比并差异不存在统计学意义,在多个 GCMs 的集成运算中具有非常明显的优势。

4. 高温热浪健康风险评估经济损失定量:健康风险评估的结果虽然是制定适应性政策的重要基础,但是对于政策制定者来说,通过健康风险评估的经济损失即货币化的定量数字依据,制定适应性政策,确定措施的优先级别是目前政策制定过程中所亟需的。在气候变化领域,无论在科学界还是政府部门,健康风险评估的经济损失定量估算数据都是严重缺失的^[8]。Knowlton 等^[48]首次基于在美国境内发生的 6 个极端天气事件的健康风险评估数据估算了人群健康经济损失,研究结果显示 6 个极端天气事件的健康经济损失高于 140 亿美元。对 6 个事件进行标化价值处理后,热浪的健康经济损失最大,每 1 000 名居民的健康经济损失为 148 792 美元^[8]。上述结果为相关措施及政策的制定工作及确定优先措施领域提供了重要的数字依据。但是,经济损失应该包括市场价值及非市场价值两部分^[60]。Knowlton 等^[48]的研究仅仅包括了市场价值部分的经济损失估算,因此在人群健康风险的经

济损失评估方面仍需要进一步的探讨和深入研究。

5. 预估研究中方法学的改进:除科学的获取热浪或高温对健康的定量关系数据及未来温度数据两方面重要信息外,在综合分析目前的 17 项研究的基础上,笔者认为进行热浪(极端温度)对人群健康风险的预估及经济损失研究还需要对现有的方法学进行改进,以获得更为准确的预估结果,同时更科学的表达结果的不确定性。改进方向为:(1)基于未来热浪变化特征进行预估。现有的研究有的仅考虑热浪强度的变化,有的仅考虑热浪频率和时间的变化,尚没有研究在预估中全面考虑到未来热浪的三个变化特征即强度、频率及持续时间的变化。(2)人口学信息的变化。在进行未来健康风险预估中,现有的研究在预估中多假设人口信息恒定不变。而未来的人口无论在数量或结构上都将发生变化,因此需要在预估中充分考虑未来人口的变化。(3)人群适应性的变化。目前的研究在进行未来温度的预估时,应用的是基于历史数据获取的热浪对人群健康的定量关系,即假设在未来定量关系与现在相同。随着全球增温的趋势及相关适应性措施的实施,人群对高温的适应性会增强^[34],在未来热浪对人群适应性会发生变化,如何在健康风险的预估中体现人群适应性的变化是目前研究中的一项重要挑战。(4)不确定性的表达。科学的表达预估结果的不确定性是预估研究中不可缺少的重要部分^[16, 33-34]。IPCC 认为通过使用多个 GCMs 的预估结果,可以较科学的表达结果的不确定性,这一方法已经成为模式领域处理不确定性的标准方法^[55]。因此在未来健康影响的预估研究中,也应尽可能多的进行 GCMs 的集成降尺度运算^[34]。(5)应用更全面的经济学评估方法,推动健康风险定量向健康价值货币化量化的结果转化,为政策制定提供更加直接的定量数字依据。

6. 展望:目前,与热浪事件相关的许多适应性政策问题尚无法回答,如:与热浪相关的敏感性疾病及脆弱性人群有哪些?热浪对不同区域人群的影响是否存在差异?热浪对人群健康的影响程度如何?未来将如何变化?为制定政策提供直接数字依据即人群健康风险货币化的经济损失是多少?未来亟需针对上述问题开展相关研究。通过对现有预估方法进行科学改进,使得预估结果更准确,结果的不确定表达更科学;通过应用更精准全面的经济学评估方法货币化定量评估未来健康风险的经济损失;通过分析不同时间、空间、敏感性疾病及脆弱人群的风险特征,能够提高热浪对人群健康影响的理论认识,明晰适应性政策的相关要点。此方面的研究将对制定适应性政策,提高政府及公众的适应能力,保护人群健康具有重要的意义。同时,预估的方法学具有较高的推广应用性,不仅可用于高温热浪的评估预估,还能推广应用于其他的极端天气事件中,可为我国目前亟需开展的极端天气事件人群健康研究提供科学的方法依据,具有重要的实践意义及应用价值。

参 考 文 献

[1] Parry M, Canziani O, Palutikof J, et al. IPCC, 2007: climate change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. Contribution

of working group II to the fourth assessment report of the intergovernmental panel on climate change [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.

[2] 《第二次气候变化国家评估报告》编写委员会. 第二次气候变化国家评估报告[M]. 北京:科学出版社, 2011:55-77.

[3] Costello A, Abbas M, Allen A, et al. Managing the health effects of climate change: Lancet and University College London Institute for Global Health Commission[J]. Lancet, 2009, 373(9676): 1693-1733.

[4] CB Field, Barros V, Stocker TF, et al. A special report of working groups I and II of the Intergovernmental Panel on Climate Change in: managing the risks of extreme events and disasters to advance climate change adaptation 2011 [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2011.

[5] McMichael AJ, Woodruff RE, Hales S. Climate change and human health: present and future risks [J]. Lancet, 2006, 367(9513): 859-869.

[6] World disasters report 2008 [EB/OL]. [2012-02-11]. <http://www.ifrc.org/PageFiles/89755/2008/WDR2008-full.pdf>

[7] National Weather Service. Weather Fatality, Injury and Damage Statistics [EB/OL]. [2011-09-23]. <http://www.nws.noaa.gov/om/hazstats.shtml>.

[8] Knowlton K, Rotkin-Ellman M, Geballe L, et al. Six climate change-related events in the United States accounted for about \$ 14 billion in lost lives and health costs [J]. Health Aff (Millwood), 2011, 30(11): 2167-2176.

[9] Pirard P, Vandendorren S, Pascal M, et al. Summary of the mortality impact assessment of the 2003 heat wave in France [J]. Euro Surveill, 2005, 10(7): 153-156.

[10] Lan L, Cui G, Yang C, et al. Increased mortality during the 2010 heat wave in Harbin, China [J]. Ecohealth, 2012, 9(3): 310-314.

[11] Meehl GA, Tebaldi C. More intense, more frequent, and longer lasting heat waves in the 21st century [J]. Science, 2004, 305(5686): 994-997.

[12] 孙英兰. 极端天气“常态化”之势 [J]. 瞭望, 2010(31): 35-37.

[13] WHO. Protecting health from climate change global research priorities [EB/OL]. [2009-12-22]. http://apps.who.int/iris/bitstream/10665/44133/1/9789241598187_eng.pdf.

[14] Campbell-Lendrum D, Woodruff R. Climate change: quantifying the health impact at national and local level [R]. Geneva: World Health Organization, 2007.

[15] Ebi KL, Gamble JL. Summary of a workshop on the development of health models and scenarios: strategies for the future [J]. Environ Health Perspect, 2005, 113(3): 335-338.

[16] Peng RD, Bobb JF, Tebaldi C, et al. Toward a quantitative estimate of future heat wave mortality under global climate change [J]. Environ Health Perspect, 2011, 119(5): 701-706.

[17] Li T, Horton RM, Kinney PL. Future projections of seasonal patterns in temperature-related deaths for Manhattan [J]. Nat Clim Chang, 2013(3): 717-721.

[18] Kalkstein LS, Greene JS. An evaluation of climate mortality relationships in large US cities and the possible impacts of a climate change [J]. Environ Health Perspect, 1997, 105(1): 84-93.

[19] Takahashi K, Honda Y, Emori S. Assessing mortality risk from heat stress due to global warming [J]. J Risk Research, 2007, 10(3): 339-354.

[20] Guest CS, Wilson K, Woodward AJ, et al. Climate and mortality in Australia: retrospective study, 1979-1990, and predicted impacts in five major cities in 2030 [J]. Climate, 1999, 13: 1-15.

[21] Gosling SN, McGregor GR, Lowe JA. Climate change and heat-related mortality in six cities Part 2: climate model evaluation and projected impacts from changes in the mean and variability of

- temperature with climate change[J]. *Int J Biometeorol*, 2009, 53(1): 31-51.
- [22] Hayhoe K, Sheridan S, Kalkstein L, et al. Climate change, heat waves, and mortality projections for Chicago[J]. *J Great Lakes Research*, 2010, 36(2): 65-73.
- [23] Martens WJ. Climate change, thermal stress and mortality changes[J]. *Soc Sci Med*, 1998, 46(3): 331-344.
- [24] Cheng CS, Campbell M, Li Q, et al. Differential and combined impacts of extreme temperatures and air pollution on human mortality in south-central Canada. Part II: future estimates[J]. *Air Qual Atmos Health*, 2008(1): 223-235.
- [25] Hayhoe K, Cayan D, Field CB, et al. Emissions pathways, climate change, and impacts on California[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101(34): 12422-12427.
- [26] Dessai S. Heat stress and mortality in Lisbon Part II. An assessment of the potential impacts of climate change[J]. *Int J Biometeorol*, 2003, 48(1): 37-44.
- [27] Baccini M, Kosatsky T, Analitis A, et al. Impact of heat on mortality in 15 European cities: attributable deaths under different weather scenarios[J]. *J Epidemiol Community Health*, 2011, 65(1): 64-70.
- [28] Knowlton K, Lynn B, Goldberg RA, et al. Projecting heat-related mortality impacts under a changing climate in the New York City region[J]. *Am J Public Health*, 2007, 97(11): 2028-2034.
- [29] Jackson JE, Yost MG, Karr C, et al. Public health impacts of climate change in Washington State projected mortality risks due to heat events and air pollution[J]. *Climatic change*, 2010, 102: 159-186.
- [30] Doyon B, Belanger D, Gosselin P. The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Quebec, Canada[J]. *Int J Health Geogr*, 2008, 7: 23.
- [31] Doherty RM, Heal MR, Wilkinson P, et al. Current and future climate- and air pollution-mediated impacts on human health[J]. *Environ Health*, 2009, 8(Suppl 1): S8.
- [32] 郭亚菲, 李涪涪, 程艳丽, 等. 气候变化背景下上海市温度热效应死亡风向评估[J]. *中华预防医学杂志*, 2012, 46(11): 1025-1029.
- [33] Ebi KL. Healthy people 2100: modeling population health impacts of climate change[J]. *Climatic Change*, 2007, 88(1): 5-19.
- [34] Kinney PL, O' Neill MS, Bell ML, et al. Approaches for estimating effects of climate change on heat-related deaths: challenges and opportunities[J]. *Environ Science & Policy*, 2008, 11(1): 87-96.
- [35] Basu R, Samet JM. Relation between elevated ambient temperature and mortality: a review of the epidemiologic evidence[J]. *Epidemiol Rev*, 2002, 24(2): 190-202.
- [36] Whitman S, Good G, Donoghue ER, et al. Mortality in Chicago attributed to the July 1995 heat wave[J]. *Am J Public Health*, 1997, 87(9): 1515-1518.
- [37] Kovats RS, Hajat S. Heat stress and public health: a critical review[J]. *Annu Rev Public Health*, 2008, 29: 41-55.
- [38] Medina-Ramón M, Zanobetti A, Cavanagh DP, et al. Extreme temperatures and mortality: assessing effect modification by personal characteristics and specific cause of death in a multi-city case-only analysis[J]. *Environ Health Perspect*, 2006, 114(9): 1331-1336.
- [39] Semenza JC, Rubin CH, Falter KH, et al. Heat-related deaths during the July 1995 heat wave in Chicago[J]. *N Engl J Med*, 1996, 335(2): 84-90.
- [40] Naughton MP, Henderson A, Mirabelli MC, et al. Heat-related mortality during a 1999 heat wave in Chicago[J]. *Am J Prev Med*, 2002, 22(4): 221-227.
- [41] Anderson BG, Bell ML. Weather-related mortality: how heat, cold, and heat waves affect mortality in the United States[J]. *Epidemiology*, 2009, 20(2): 205-213.
- [42] Curriero FC, Heiner KS, Samet JM, et al. Temperature and mortality in 11 cities of the eastern United States[J]. *Am J Epidemiol*, 2002, 155(1): 80-87.
- [43] Barnett AG, Hajat S, Gasparrini A, et al. Cold and heat waves in the United States[J]. *Environ Res*, 2012, 112: 218-224.
- [44] Anderson GB, Bell ML. Heat waves in the United States: mortality risk during heat waves and effect modification by heat wave characteristics in 43 U. S. communities[J]. *Environ Health Perspect*, 2011, 119(2): 210-218.
- [45] Anderson B, Bell M. Heat Waves and Mortality in New York[J]. *NY Epidemiology*, 2011, 22(1): S20.
- [46] Kovats RS, Kristie LE. Heatwaves and public health in Europe[J]. *Eur J Public Health*, 2006, 16(6): 592-599.
- [47] Medina-Ramon M, Schwartz J. Temperature, temperature extremes, and mortality: a study of acclimatisation and effect modification in 50 US cities[J]. *Occup Environ Med*, 2007, 64(12): 827-833.
- [48] Knowlton K, Rotkin-Ellman M, King G, et al. The 2006 California heat wave: impacts on hospitalizations and emergency department visits[J]. *Environ Health Perspect*, 2009, 117(1): 61-67.
- [49] 陈横. 汕头市金平区高温热浪与每日死亡关系的研究[D]. 汕头: 汕头大学, 2010.
- [50] 陈横, 李丽萍, 陈英凝. 沿海城市高温热浪与每日居民死亡关系的研究[J]. *环境与健康杂志*, 2009, 26(11): 988-991.
- [51] 刘玲, 张金良. 热浪与非意外死亡和呼吸系统疾病死亡的病例交叉研究[J]. *环境与健康杂志*, 2010, 27(2): 95-99.
- [52] 许遐祯, 郑有飞, 尹继福, 等. 南京市高温热浪特征及其对人体健康的影响[J]. *生态学杂志*, 2011, 30(12): 2815-2820.
- [53] Tan J, Zheng Y, Song G, et al. Heat wave impacts on mortality in Shanghai, 1998 and 2003[J]. *Int J Biometeorol*, 2007, 51(3): 193-200.
- [54] Huang W, Kan H, Kovats S. The impact of the 2003 heat wave on mortality in Shanghai, China[J]. *Sci Total Environ*, 2010, 408(11): 2418-2420.
- [55] Solomon S. Climate change 2007-the physical science basis: Working group I contribution to the fourth assessment report of the IPCC[R]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [56] Nakicenovic N, Alcamo J, Davis G, et al. Special report on emissions scenarios: a special report of Working Group III of the Intergovernmental Panel on Climate Change [J]. Cambridge: Cambridge University Press, 2007.
- [57] 孙允宗, 李丽萍, 周脉耕. 气温对中国五城市居民死亡率的滞后影响分析[J]. *中华预防医学杂志*, 2012, 46(11): 1015-1019.
- [58] Lynn BH, Druyen L, Hogrefe C, et al. Sensitivity of present and future surface temperatures to precipitation characteristics [J]. *Climate Res*, 2004, 28: 53-65.
- [59] Spak S, Holloway T, Lynn B. A comparison of statistical and dynamical downscaling for surface temperature in North America [J]. *J Geophys Res*, 2007, 112(D8): D08101.
- [60] Callan S, Thomas JM. Environmental economics & management: theory, policy, and applications [M]. Mason: South-Western College Publishing, 2009.

(收稿日期:2013-11-05)

(本文编辑:郑湃)