

气候变化对长三角臭氧污染影响的 数值模拟研究

高达¹, 谢旻¹, 陈星¹, 王体健¹, 刘倩², 占晨超¹, 任俊宇¹

(1. 南京大学 大气科学学院, 南京 210023; 2. 江苏省环境科学研究院, 南京 210029)

摘要: **目的** 研究气候变化对污染物浓度的影响, 进而了解其对环境空气质量的影响。**方法** 利用 WRF-Chem 模拟 2014 年 1 月、7 月 (代表现在) 和 2050 年 1 月、7 月 (未来) 长三角地区的气象要素和空气质量的数据, 研究气候变化对该区域臭氧浓度的影响。**结果** 在夏季, 未来 (2050 年 7 月) 与现在相比 (2014 年 7 月), 整个长三角区域的臭氧浓度变化幅度较小, 约为 -0.09×10^{-9} , 且呈现出北部增加, 南部减少的趋势, 在长三角北部的陆地地区, 臭氧浓度增加达到极大值 (15.0×10^{-9})。在冬季, 与 2014 年 1 月的数据比较, 未来 (2050 年 1 月) 整个长三角地区臭氧比现在降低约 7.9%, 其中在上海以东洋面上减少达到极值 (-25.1%)。**结论** 在夏季, 导致长三角北部地区臭氧浓度升高的主要原因是太阳辐射量的增加、VOC 和 NO_x 浓度的升高、边界层高度的降低以及增强南风的输送有关。长三角南部地区臭氧浓度的减少, 主要原因是其太阳辐射的减少以及风速的增加。在冬季, 在南通、上海以东洋面上臭氧减少的幅度较大, 这与温度的降低、辐射的减少以及 NO_x 浓度的增加有关。长三角南部区域的臭氧浓度有所增加, 这与该区域太阳辐射的增加以及区域范围内的输送有关。在制定臭氧控制策略时, 应该考虑未来气候变化的影响。

关键词: 臭氧; 气候变化; 长江三角洲; WRF-Chem

DOI: 10.7643/issn.1672-9242.2019.06.018

中图分类号: X511

文献标识码: A

文章编号: 1672-9242(2019)06-0115-08

Numerical Modeling of Effects of Climate Change on Air Quality in the Yangtze River Delta Region

GAO Da¹, XIE Min¹, CHEN Xing¹, WANG Ti-jian¹, LIU Qian², ZHAN Chen-chao¹, REN Jun-yu¹

(1. School of Atmospheric Sciences, Nanjing University, Nanjing, 210023, China; 2. Jiangsu Provincial Academy of Environmental Science, Nanjing 210029, China)

ABSTRACT: Objective To study effect of climate change on concentration of pollutants and air quality of environment. **Methods** The meteorological elements and air quality of the Yangtze River Delta region (YRD) in January, July of 2014 (present) and 2050 (future) were simulated with WRF-Chem to research influences of climate change on the ozone concentration of the region. **Results** By comparing the modeling results for July 2014 with those for July 2050, we found that the concentration of ozone in YRD had little change, about -0.09 ppb. It increased in the north and decreased in the south. The maximum increment of ozone concentration occurred in the north of YRD, with the value of 15.0 ppb. Compared with the data for January in 2014, the ozone concentration in the entire YRD reduced 7.9% in January 2050. The maximum decrease of ozone concentration oc-

收稿日期: 2019-01-30; 修订日期: 2019-05-21

基金项目: 国家重点研发计划课题资助 (2018YFC0213502; 2018YFC0213503); 国家自然科学基金项目 (41475122; 40805059)

作者简介: 高达 (1994—), 男, 山西阳泉人, 博士, 主要研究方向为空气污染及气候变化。

通讯作者: 谢旻 (1978—), 男, 湖北黄冈人, 副教授, 博士生导师, 主要研究方向为大气物理学与大气环境。

curred in the east of Shanghai, with the value of -25.1% . **Conclusion** For the summer, the main reasons causing the increase of ozone concentration in YRD include the increase of solar radiation, NO_x concentration and PBLH and the transportation of strengthen south wind. However, the reduction of O_3 concentration in the south of YRD is due to the reduction of solar radiation and the increase of wind speed. For the winter, the ozone concentration reduces a lot in the east of Shanghai and Nantong, which is related with the reduction of temperature and solar radiation and the increase of NO_x and VOC concentration. However, ozone concentration increases in the south. This phenomenon is related to the increase of solar radiation and the regional transportation. The effect of climate change should be considered when making the pollution control countermeasure.

KEY WORDS: ozone; climate change; the Yangtze River Delta region; WRF-Chem

环境空气质量恶化是当今人类面临的重要问题,如何防治大气污染已被我国政府高度重视,气候变化会造成气象系统和气象条件的变化^[1-3],这些变化会进一步影响环境空气质量。过去,气候变化和环境空气质量恶化,作为两个独立的领域,被国内外的学者进行了广泛研究。近些年,随着学科的发展,两者之间的相互影响和相互作用,引起了学者们的广泛关注。其中区域和全球气候对大气环境质量的影响逐渐成为了国际学术研究的前沿和热点问题。这些研究中,多数偏重于讨论温室气体与气溶胶排放对气候系统的影响,而气候变化对环境空气质量影响的研究相对较少^[4]。

近地面臭氧主要是由 NO_x 和 VOC 在复杂的光化学反应生成的二次污染物,高空的臭氧可以阻挡对人体有害的紫外辐射,但近地面的臭氧浓度过高,则会损害人体健康。在过去的几十年中,学者利用不同的气候模式模拟了未来几十年内臭氧浓度的变化,阐述了其驱动因子,并且发现气候变化可以影响区域臭氧的浓度,通过改变气象场,扰乱对流层和平流层之间的交换,或者增加臭氧前体物的排放^[4-5]。Sun 等^[6]研究发现,在 RCP8.5 方案下,未来臭氧浓度将会在美国东部减少,西部增加。Hou 和 Wu^[7]基于 RCP8.5 方案研究发现,相比于现在(2001),在未来情况下(2100),由热浪导致的高臭氧污染会增加约 25%。Yahya 等^[8]研究发现,未来情况下,在美国的大部分地区, RCP4.5 方案下臭氧减少, RCP8.5 方案下臭氧增加。Zhang 等^[9]研究了美国地区在 RCP8.5 方案下,未来(2046—2066)情况下由热浪、空气静稳以及他们的复合事件造成的高臭氧浓度污染将比现在(2001—2010)平均多约 16、0.5、5 天。在我国,吴润等^[10]曾在污染物与天气条件的相关分析方面开展了一些工作。赵春生等^[11]对长江三角洲地区 O_3 的模拟发现,物理因子(平流输送和垂直湍流输送)的作用和化学因子的作用同样重要。朱帅等^[12]的模拟结果表明,气象场对长江三角洲地区空气污染的分布形式起着至关重要的作用。Lin 等^[13]基于全球模式,研究得到中国东部的 O_3 2090 年比 1990 年增加 3%~12%或 1%~5%。Wang 等^[14]发现,在 2000—2050 年,中国东部的臭氧浓度将会升高,西部的臭氧浓

度将会降低,另外 40%的臭氧浓度变化来自于 BVOC 排放的增加。Liu 等^[15]研究表明,相比于 2000 年,由于人为排放的影响,导致 2050 年的珠三角区域的臭氧浓度会上升 12.8×10^{-9} ,而气候变化和人为排放共同的作用使得臭氧上升了 18.2×10^{-9} 。经过多年的研究,人们逐渐认识到,全球气候变化通过影响区域气温、太阳辐射、相对湿度、风速、混合层高度等气象因子以及臭氧前体物的浓度来影响污染物的排放、输送、化学和沉降过程,最终引起对流层臭氧的变化。

长三角地区包括上海市、江苏省 9 市、浙江省 8 市和安徽省 8 市,区域面积达 21.17万 km^2 ,是我国经济最发达的地区之一,也是污染比较严重的地区之一。已有研究表明,长三角 26 个城市存在不同程度的 O_3 日超标现象,超标率在 1.6%~15.1%,且颗粒物污染与 O_3 污染在时间上呈相反的态势^[16]。刘芷君等^[17]分析了长三角地区臭氧污染的时空分布特征,结果表明,长三角地区臭氧污染浓度呈现夏季高、冬季低的季节变化,且近海城市臭氧年均浓度较高。长三角地区处于典型的季风气候带,其气象条件和空气质量对气候变化敏感。因此,需要从气候变化出发,研究气象因子对臭氧和颗粒物污染的影响,以便在一定程度上控制污染态势。过去的研究中,Xie 等^[18]讨论了长三角地区在未来气候条件下自然源排放的改变对臭氧的影响,发现 2050 年植被 VOC 排放、土壤 NO_x 排放比 2008 年分别增长 25.5%和 11.5%;自然源改变引起地面 O_3 浓度增加 2×10^{-9} ;流场改变引起分布变化,北部增加 5×10^{-9} ~ 15×10^{-9} 、南部减少 -5×10^{-9} ~ -15×10^{-9} ;未来部分 VOC 控制区会向 NO_x 控制区转变。他们的研究主要关注自然源的变化及影响,没过多讨论气象因子的变化对臭氧的可能影响。因此,需要进一步加强这方面的研究。

文中将利用 WRF/Chem 模式模拟现在(2014 年)和未来(2050 年)气候条件下长三角区域的气象场和污染物浓度,通过比较 2014 年和 2050 年 1 月(冬季)、7 月(夏季)的模拟结果,得出未来气候变化的改变对夏季(7 月)和冬季(1 月)温度,边界层高度、降水量、风等区域气象条件的影响,并探讨气候变化影响 O_3 浓度的趋势及可能机制。

1 数据资料与模式方法

区域空气质量模式系统 WRF-Chem 是中尺度气象模式 WRF 和化学模式在线完全耦合的新一代的区域空气质量模式。它是由美国 NOAA 预报系统实验室开发的, 广泛运用于业务天气预报、天气动力学研究以及区域气候、环境的模拟预报。其中, 气象模式 WRF 是美国气象界联合开发的新一代中尺度预报模式和同化系统, 具有较好的性能^[19]。化学模式包括了污染物的传输、扩散、沉降(干、湿)、气相化学反应、源排放、光分解、气溶胶动力学、气溶胶化学等。每一个过程都是高度模块化, 有利于用户根据实际问题自行选择。WRF-Chem 模式的气象场和化学场在计算中使用相同的水平和垂直坐标, 相同的物理参数化方案。气象场和空气质量的反馈已经包含在模式中。在我国, WRF-Chem 模式是模拟中尺度、城市尺度的空气质量问题的有利工具^[15,20]。

本研究利用 WRF-Chem 对长三角地区臭氧及其前体物进行模拟。模拟时间为 2050 年(未来)和 2014 年(现在)的 1 月(冬季)和 7 月(夏季)。模拟区域采用了三层嵌套: 第一层模拟区域覆盖了大部分亚洲地区, 水平网格为 85×75, 格距为 81 km; 第二层模拟区域的范围包括华东地区, 水平网格为 76×70, 格距为 27 km; 第三层模拟区域包括长三角地区, 水平网格为 76×70, 格距为 9 km。WRF-Chem 垂直方向分为 30 层, 模式顶气压为 50 hPa。

模式模拟过程中选择的主要物理和化学参数化方案见表 1。主要包括: 微物理方案采用 Purdue Lin 方案; 长波辐射方案采用 RRTM 方案; 短波辐射方案采用 Goaddard 方案; 积云参数化方案采用 Kain-Frisch 方案; 陆面过程方案采用 Noah 方案; 边界层参数化方案选择 Mellor-Yamada-Janjic 方案^[21]; 城市冠层模型采用单层冠层模型(SLUCM); 气相化学方案采用 CBM-Z 方案, 包含了 55 种化合物和 134

种反应^[22]; 气溶胶模块方案采用 MOSAIC 方案, 按气溶胶粒径大小分布分为 8 种^[23]。此外气溶胶的直接间接效应和大气辐射、光化学、微物理过程也被考虑其中。

MOZART-4 全球化学传输模型的模拟结果被用于提供 WRF-Chem 化学初始场和边界条件。2050 年的气象场初始和边界条件来自 T85 水平分辨率 CCSM3 输出资料。2014 年的气象场初始和边界条件来自 NCEP 精度为 1°×1°的全球再分析资料。相比于 CCSM3 模型资料, NCEP 再分析资料来源于观测数据, 能更准确地代表现在的气候。2014 年的人为排放来自清华的 MEIC, 分辨率为 0.25°×0.25°, 源清单包括了电力、工厂、居民区、交通运输以及农业所排放的 SO₂、NO_x、CO、NH₃、NMVOC、PM₁₀、PM_{2.5}、BC 等^[24]。中国之外人为排放源取自 NASA INTEX-B 的数据, 精度为 0.5°×0.5°, 源清单包括了电力、工厂、居民区以及交通运输所排放的 SO₂、NO_x、CO、PM₁₀、PM_{2.5}、BC、OC 和 VOC^[25]。文中主要探讨气象场变化对 O₃ 浓度的影响, 因此模拟方案中 2050 年的人为源排放与现在相同。自然源排放应用 MEGAN 方案计算。

2 模式验证

为了定量检验预报效果, 采用 3 个观测站点(南京、杭州、上海)的地面观测数据为标准, 分别计算模式预报中 2014 年 7 月的地面臭氧和气象因子(地面 2 m 温度 t_2 , 地面 2 m 相对湿度 RH_2 , 地面 10 m 风速 v_{WS10})与地面观测值之间的平均误差 σ_{MB} , 均方根误差 σ_{RMSE} 和相关系数 R_{CORR} , 它们的定义为:

$$\sigma_{MB} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i) \tag{1}$$

$$\sigma_{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (S_i - O_i)^2} \tag{2}$$

$$R_{CORR} = \frac{\sum_{i=1}^N (S_i - S_m)(O_i - O_m)}{\sqrt{\sum_{i=1}^N (S_i - S_m)^2} \sqrt{\sum_{i=1}^N (O_i - O_m)^2}} \tag{3}$$

式中: N 代表样本总数; S_i 代表观测值; O_i 代表模拟值。

计算结果见表 2, 可以看出, t_2 的 R_{CORR} 达到了 0.8~0.9, 与观测值具有较好的一致性, 但是从 σ_{MB} 可以看出, 有一定程度的高估。 RH_2 的 R_{CORR} 也有较好的模拟, 相关系数达到了 0.7~0.9, 但是从负值 σ_{MB} 看出, 模式存在一定程度的低估。 v_{WS10} 的 R_{CORR} 较低, 在 0.4~0.6 之间, 这是因为模式对风场的模拟一直存在较大的不确定性。O₃ 的 R_{CORR} 在 0.6~0.7 之间, 但是在南京和杭州同时存在较大的 σ_{MB} 偏差。总体而言, WRF-Chem 能够较好地体现气象因子和臭氧浓度

表 1 WRF-Chem 中网格设置以及选择的物理、化学参数化方案

模式设置	具体内容
维数 (x, y)	(85,75)、(76,70)、(76,70)
网格大小/km	81、27、9
时间步长/s	360
微物理方案	Purdue Lin microphysics scheme
长波辐射方案	RRTM scheme
短波辐射方案	Goddard scheme
积云参数化方案	Kain-Fritsch scheme
陆面过程方案	Noah land surface model
行星边界层方案	Mellor-Yamada-Janjic scheme
城市冠层模型	SLUCM
气相化学方案	CBM-Z
气溶胶模块方案	MOSAIC using 8 sectional aerosol bins

表2 气象因子和臭氧浓度的数据验证

变量	站点	观测值	模拟值	σ_{MB}	σ_{RMSE}	R_{CORR}
$t_2/^\circ\text{C}$	南京	26.9	27.4	0.5	3.9	0.9
	杭州	28.2	30.0	1.7	3.4	0.9
	上海	27.6	28.5	0.8	2.8	0.8
$RH_2/\%$	南京	82.4	81.5	-0.9	14.0	0.9
	杭州	76.9	72.0	-4.9	13.3	0.8
	上海	78.7	75.2	-3.5	11.0	0.7
$v_{WS10}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	南京	2.3	2.0	-0.2	1.2	0.6
	杭州	2.0	2.0	0.1	1.1	0.5
	上海	1.1	3.5	2.5	1.8	0.4
$c(\text{O}_3)/(\times 10^{-9})$	南京	35.9	43.5	7.6	23.0	0.6
	杭州	35.6	43.5	7.9	23.6	0.6
	上海	33.5	32.3	-1.2	32.2	0.7

的整体值和变化趋势, 预报值和实测值较为吻合。

3 气候变化对区域气象场的影响

气候变化对长三角区域夏季气象场的影响(未来-现在)如图1所示。相比于2014年7月(现在), 长三角地区2050年7月(未来)的太阳辐射将增加 19.4 W/m^2 , 其中西南部与东北部增加的幅度最大($>40 \text{ W/m}^2$)(图1a)。太阳辐射的增加对应地面温度的增加。从温度来看, 整个长三角区域的温度处于上升的趋势(图1b)。整个区域平均温度升高了 1.7°C , 其中长三角西南部温度升高幅度较大($>3.5^\circ\text{C}$), 而在东北角海上部分升高幅度较小, 在北部地区甚至出现降温。温度的升高, 加强了空气的垂直运动, 进而使边界层高度升高^[20]。从图1d未来风场的变化来看, 整个长三角地区风速增加了 1.0 m/s , 其中长三角南部地区风速增加的幅度较大。这应该是由于地面温度的增加, 增强了空气垂直运动, 也加强了地面空气的辐合, 因此导致了区域地面风速的增加。增强的垂直运动会将地面的水汽带到上层。对于绝对湿度, 长三角地区呈现出南部降低而北部升高的趋势(图1e), 这与长三角北部降水的增加以及南部降水的减少有关(图1f)。从图1c中可以看出, 整个长三角陆地地区边界层高度比变化与温度的分布相似, 其中在西南部边界层高度增加达到极值, 这与此处温度的大幅度升高有关。在长三角的西北部地区, 边界层高度降低, 这可能是由于其较多的水分(较大的相对湿度)将部分到达地面的太阳辐射的能量转化为潜热。

气候变化对长三角区域冬季气象场的影响如图2所示。由图2a可见, 未来冬季长三角区域太阳辐射

量减小了 4.2 W/m^2 。在中东和中西部, 太阳辐射量减少的幅度较大, 而在长三角地区东南部, 太阳辐射量却有一定的增加, 这应该同云量的变化有关。对于温度来说(图2b), 整个长三角地区温度处于下降趋势, 约降低 1.3°C , 对应了太阳辐射的减少。然而, 长三角区域地面温度降低的幅度各地不同, 在长三角的南部地区的温度降幅较少, 在西北部地区降幅较大($>2.5^\circ\text{C}$), 这与太阳辐射变化的分布比较一致。图2c显示了未来长三角大部分地区降水量的变化, 可见大部分区域是增加的, 其中南部增加的幅度较大, 约为 4 mm 。长三角大部分地区太阳辐射的减少可以显示出, 云量的增多, 增加了降水的概率。如图2d所示, 南部降水的增加也导致了其绝对湿度的增加。这些气象要素的改变的趋势和强度都可以被先前的研究证实^[14-15,26]。

4 气候变化对长三角地区污染物浓度的影响

长三角地区夏季 O_3 及其前体物浓度的变化如图3所示。图3a是气候变化对长三角夏季臭氧 O_3 浓度的影响。相比于现在(2014年7月), 未来(2050年7月)长三角大部分地区的臭氧浓度有所增加, 增加的最大值出现在长三角北部的海上地区。其陆地的高值部分出现在长三角的中北部地区, 大约为 15.0×10^{-9} , 这与太阳辐射量的增加、边界层高度的降低以及南风增强了臭氧由南向北的输送有关。在长三角中北部地区, NO_x 和VOC的增多(图3b、c), 也为生成臭氧的光化学生成提供了足够的前体物, 再加上太阳辐射的增加加快了生成臭氧的光化学反应。边界层高度的降低, 使得更多的臭氧和其前体物集中在低

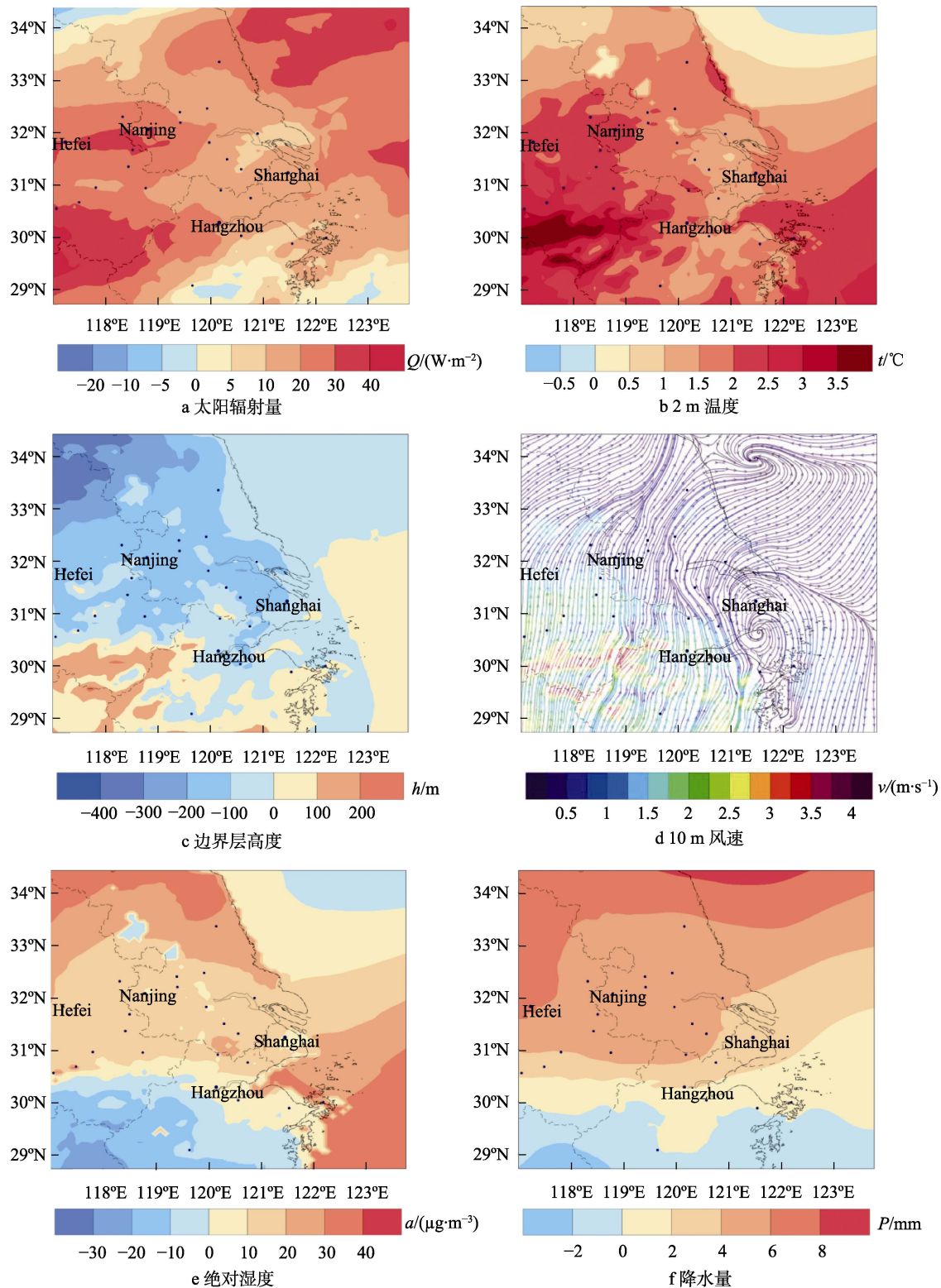


图 1 气候变化对长三角区域夏季气象场的影响（2050 年 7 月—2014 年 7 月）

层，增加了地面臭氧浓度。南风的增强也加强了臭氧由南向北的输送，有利于北部臭氧浓度的增加。然而，长三角东南部以及中部地区 O_3 浓度有一定降低，常州、杭州、舟山等地臭氧浓度降低的幅度较大，降低最多超过 -12.0×10^{-9} 。这种降低主要是同太阳辐射的减弱以及风速的变化有关。杭州附近由于边界层高度

的增加以及水平风速的增加，加强了湍流以及臭氧的垂直输送，使得地面臭氧浓度降低。在常州、舟山附近臭氧浓度的降低，则是由于风速的增大。南部风速的增大，加强了臭氧的向北输送以及垂直输送，在一定程度上降低了臭氧的浓度。

气候变化对长三角冬季臭氧浓度的影响如图 4

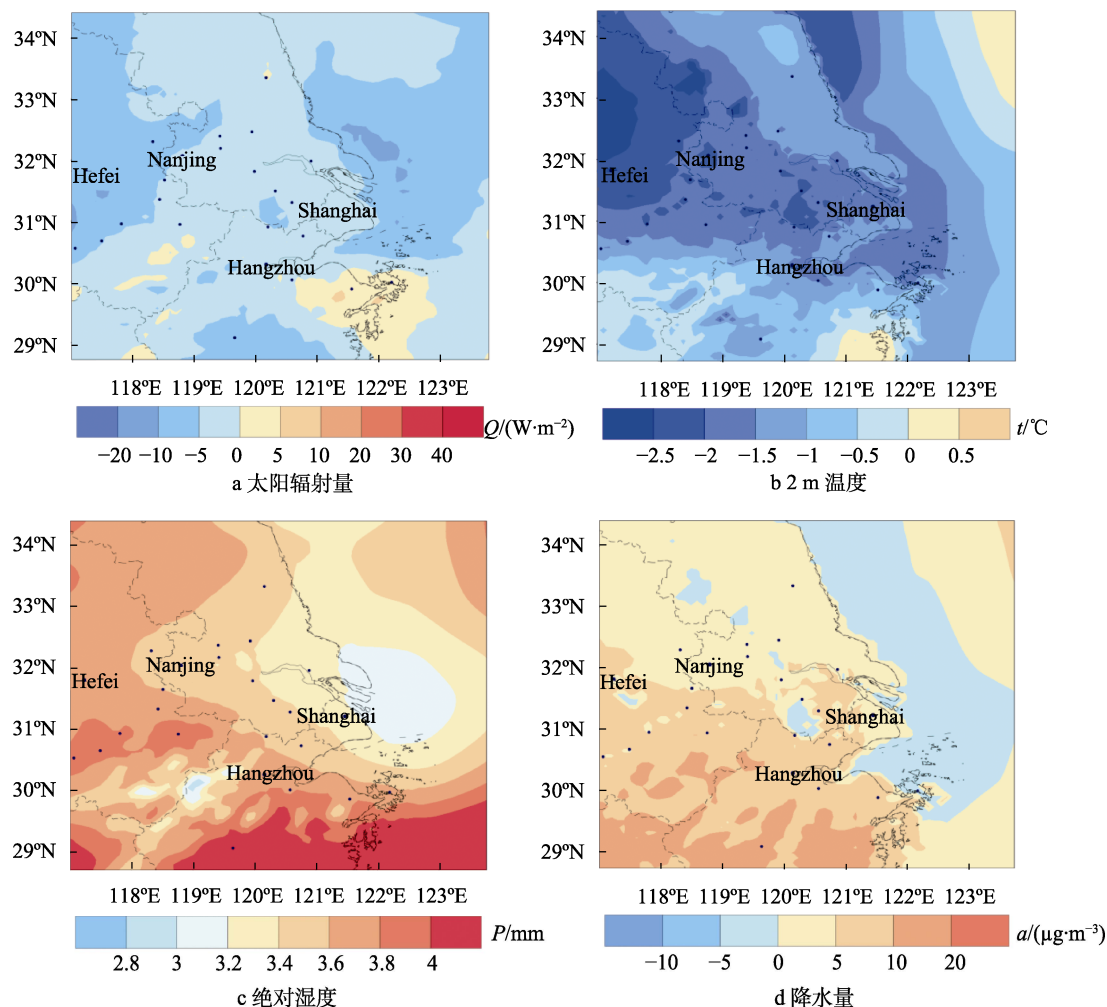


图2 气候变化对长三角区域冬季气象场的影响(2050年1月—2014年1月)

所示。由于冬季臭氧浓度变化的幅度较小,所以利用臭氧变化率以及较主要的气象因子进行讨论。相比于现在,未来的长三角地区臭氧浓度降低了约 7.9%,在长三角的海上地区 O_3 浓度有不同程度的降低,降低的最大值在南通和上海以东的洋面上(图 4a)。从图 4b 和 4c 中得出, NO_x 和 VOC 在东部洋面上增加,在内陆地区减少。长三角东部洋面上臭氧浓度的降低与该区域温度的降低以及太阳辐射的减少有关。温度的降低、辐射的减少以及 NO_x 浓度的增加(图 4b),使得 NO_2 光解作用减弱,而 NO 和臭氧的反应还在发生,降低了洋面上的臭氧浓度。长三角南部陆地地区臭氧浓度有所增加,这与南部地区太阳辐射的增加以及区域范围内的输送有关。由于处于冬季,低温状态下生成臭氧的化学反应并不强,所以升高的幅度较小。

5 结论

利用 WRF-Chem 研究长三角地区气候变化对地面臭氧影响,重点探讨了气象条件的变化对污染物浓度变化的影响。得出以下主要结论。

1) 在夏季,未来长三角地区的太阳辐射将增加 $19.4 W/m^2$,温度升高 $1.9^{\circ}C$,地面风速增加了 $0.7 m/s$,降水和绝对湿度的变化都呈现北部增加南部减少的趋势。其中温度的升高使边界层高度升高,西北部边界层高度的降低可能与绝对湿度的升高增加了潜热有关。从污染物浓度来看,未来的长三角地区的臭氧浓度呈现出北部增加南部减少的趋势,最大值出现在中北部地区,这与此处太阳辐射的增加、边界层高度的降低、南风的增强以及 NO_x 和 VOC 的增多有关。东南部、中部部分地区臭氧浓度的减少,主要是因为太阳辐射的减少以及风速的增大,另外杭州、常州、舟山几个极小值中心的出现是由于边界层高度的升高以及风速的增加。

2) 在冬季,长三角地区太阳辐射量将减少 $4.2 W/m^2$,温度降低 $1.3^{\circ}C$,降水量和绝对湿度都呈现出增加的趋势,其中在南部出现极大值。从污染物浓度来看,未来的长三角地区臭氧会比原来降低约 7.9%,而在南通、上海以东洋面上,臭氧减少的幅度较大,这与温度的降低、辐射的减少以及 NO_x 浓度的增加有关。南部臭氧浓度的增加与南部太阳辐射的增加以及

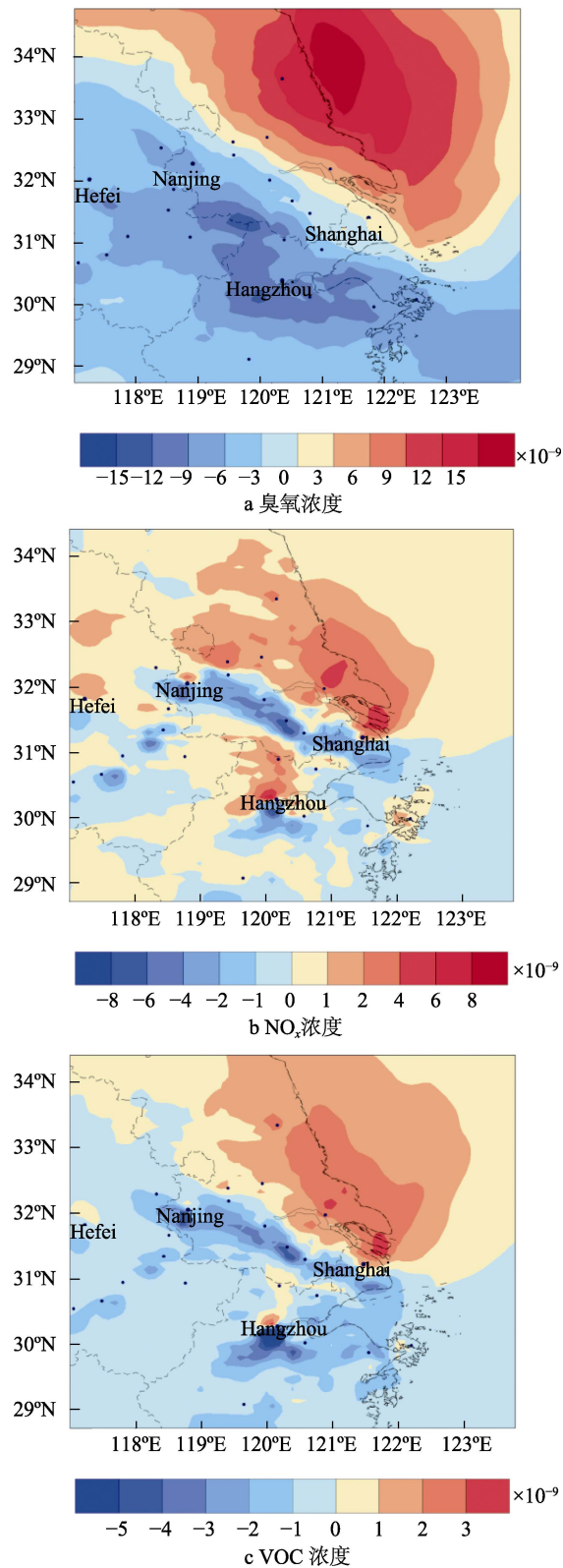


图 3 气候变化对夏季臭氧和臭氧前体物浓度差
(2050 年 7 月—2014 年 7 月)

区域范围内的输送有关。

未来气候变化对长三角区域臭氧浓度有较大影响，在制定臭氧污染控制策略时应充分考虑这一因素。文中只讨论了气象条件的变化，并以一些臭氧前

体物浓度变化为辅助，讨论了臭氧浓度的变化。对于臭氧具体排放、输送、化学、沉降具体每个过程的

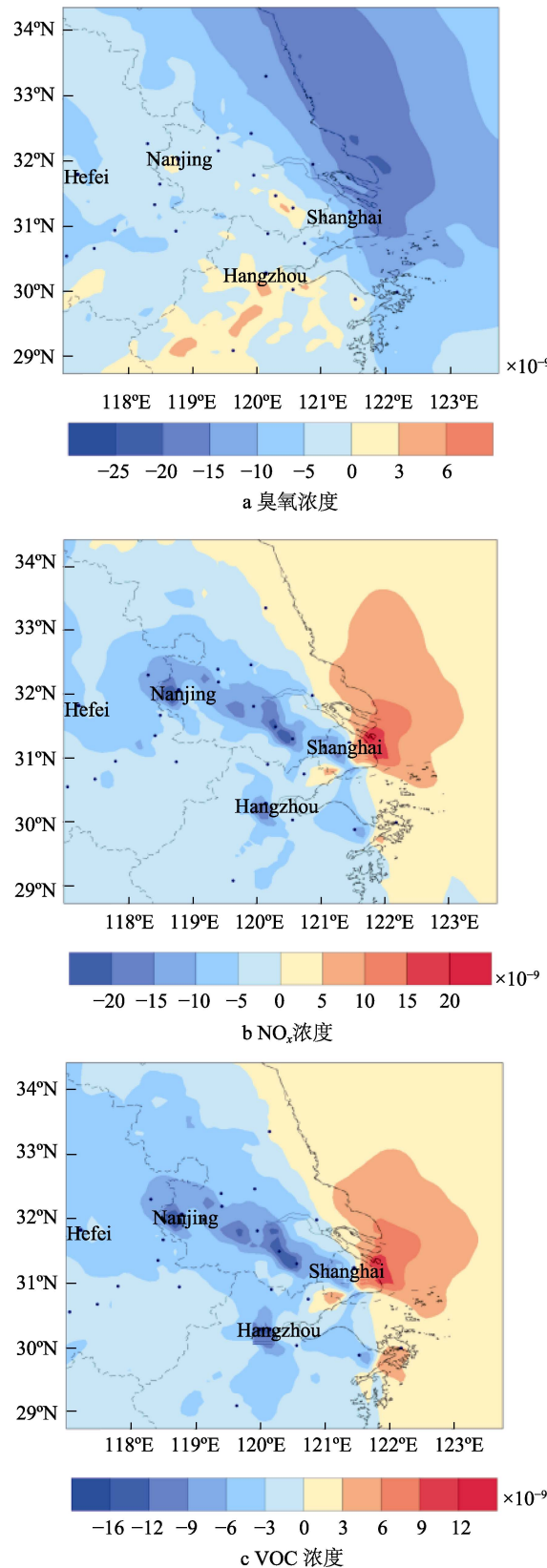


图 4 气候变化对冬季臭氧和臭氧前体物浓度差
(2050 年 1 月—2014 年 1 月)

影响, 还需以后进一步研究。

参考文献:

- [1] LI G, XIE S P, YAN D, et al. Effects of Excessive Equatorial Cold Tongue Bias on the Projections of Tropical Pacific Climate Change. Part I: The Warming Pattern in CMIP5 Multi-model Ensemble[J]. *Climate Dynamics*, 2016, 47(12): 1-15.
- [2] LI G, XIE S P, DU Y. A Robust But Spurious Pattern of Climate Change in Model Projections over the Tropical Indian Ocean[J]. *Journal of Climate*, 2016, 29(15): 5589-5608.
- [3] LI G, XIE S P, HE C, et al. Western Pacific Emergent Constraint Lowers Projected Increase in Indian Summer Monsoon Rainfall[J]. *Nature Climate Change*, 2017, 7: 708-712.
- [4] 孙家仁, 许振成, 刘煜, 等. 气候变化对环境空气质量影响的研究进展[J]. *气象与环境研究*, 2011, 16(6): 805-814.
- [5] JACOB D J, WINNER D A. Effect of Climate Change on air Quality[J]. *Atmospheric Environment*, 2009, 43(1): 51-63.
- [6] SUN J, FU J S, HUANG K, et al. Estimation of Future PM_{2.5}- and Ozone-related Mortality over the Continental United States in a Changing Climate: An Application of High-resolution Dynamical Downscaling Technique[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2015, 65(5): 611-623.
- [7] HOU P, WU S. Long-term Changes in Extreme Air Pollution Meteorology and the Implications for Air Quality[J]. *Scientific Reports*, 2016, 6: 23792-23800.
- [8] YAHYA K, CAMPBELL P, ZHANG Y. Decadal Application of WRF/Chem for Regional Air Quality and Climate Modeling over the U.S. under the Representative Concentration Pathways Scenarios. Part 2: Current vs. Future Simulations[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 152: 562-583.
- [9] ZHANG J, GAO Y, LUO K, et al. Impacts of Compound Extreme Weather Events on Ozone in the Present and Future[J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2018, 18(13): 9861-9877.
- [10] 吴润, 蒋维楣, 刘红年, 等. 区域气候模式和大化学模式对中国地区气候变化和对流层臭氧分布的模拟[J]. *南京大学学报(自然科学)*, 2002, 38(4): 572-582.
- [11] 赵春生, 彭丽, 孙爱东, 等. 长江三角洲地区对流层臭氧的数值模拟研究[J]. *环境科学学报*, 2004, 24(3): 525-533.
- [12] 朱帅, 马建中, 王堰, 等. 长江三角洲地区春季臭氧异常高值的数值模拟研究[J]. *环境科学研究*, 2006, 19(6): 1-8.
- [13] LIN J T, PATTEN K O, HAYHOE K, et al. Effects of Future Climate and Biogenic Emissions Changes on Surface Ozone over the United States and China[J]. *J Appl Meteor Climatol*, 2008, 47: 1888-1909.
- [14] WANG Y, SHEN L, WU S, et al. Sensitivity of Surface Ozone over China to 2000—2050 Global Changes of Climate and Emissions[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 75(4): 374-382.
- [15] LIU Q, LAM K S, JIANG F, et al. A Numerical Study of the Impact of Climate and Emission Changes on Surface Ozone over South China in Autumn Time in 2000—2050[J]. *Atmospheric Environment*, 2013, 76(5): 227-237.
- [16] 易睿, 王亚林, 张殷俊, 等. 长江三角洲地区城市臭氧污染特征与影响因素分析[J]. *环境科学学报*, 2015, 35(8): 2370-2377.
- [17] 刘芷君, 谢小训, 谢旻, 等. 长江三角洲地区臭氧污染时空分布特征[J]. *生态与农村环境学报*, 2016, 32(3): 445-450.
- [18] XIE M, SHU L, WANG T, et al. Natural Emissions under Future Climate Condition and Their Effects on Surface Ozone in the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Environment*, 2017, 150: 162-180.
- [19] JOSEPH B K. Weather Research and Forecasting Model : A Technical Overview[C]// 84th AMS Annual Meeting. Seattle, USA, 2004.
- [20] XIE M, LIAO J, WANG T, et al. Modeling of the Anthropogenic Heat Flux and Its Effect on Regional Meteorology and Air Quality over the Yangtze River Delta Region, China[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics Discussions*, 2016, 15(22): 32367-32412.
- [21] 胡向军, 陶健红, 郑飞, 等. WRF 模式物理过程参数化方案简介[J]. *甘肃科技*, 2008, 24(20): 73-75.
- [22] ZAVERI R A, PETERS L K. A New Lumped Structure Photochemical Mechanism for Large-scale Applications[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1999, 104(D23): 30387-30415.
- [23] ZAVERI R A, EASTER R C, FAST J D, et al. Model for Simulating Aerosol Interactions and Chemistry (MOSAIC)[J]. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 2008, 113(D13): 1395-1400.
- [24] Li M, Zhang Q, Kurokawa J I, et al. MIX: A Mosaic Asian Anthropogenic Emission Inventory under the International Collaboration Framework of the MICS-Asia and HTAP[J]. *Atmos Chem Phys*, 2017, 17: 935-963.
- [25] ZHANG Q, STREETS D G, CARMICHAEL G R, et al. Asian Emissions in 2006 for the NASA INTEX-B Mission[J]. *Atmospheric Chemistry & Physics*, 2009, 9(14): 5131-5153.
- [26] 李新周, 刘晓东. Numerical Simulations of Extreme Precipitation in Eastern China under A1b Scenario[J]. *热带气象学报: 英文版*, 2014, 20(2): 121-134.