

陈怀亮,徐祥德,李飞,等. 大规模城镇化对黄淮海地区气候及水资源影响的数值试验[J]. 气象,2012,38(4):385-391.

大规模城镇化对黄淮海地区气候及 水资源影响的数值试验^{*1}

陈怀亮^{1,2} 徐祥德³ 李 飞¹ 王兰宁⁴ 杜子璇^{1,2}

1 中国气象局河南省农业气象保障与应用技术重点开放实验室,郑州 450003

2 河南省气象科学研究所,郑州 450003

3 中国气象科学研究院,北京 100081

4 国家气候中心,北京 100081

提 要: 黄淮海地区是我国传统的农耕区,也是经济快速发展、城镇化进程快速推进的区域之一,使得该地区植被覆盖发生了明显变化。为研究城镇化对气候与水资源的影响,应用 RegCM3 区域气候模式,通过控制试验和敏感性试验,在保证积分时间(2001—2005 年)的情况下,输出降水、蒸发、温度、湿度、土壤水分、径流、整层水汽含量等资料,利用敏感性试验和控制试验输出量的差值,来分析黄淮海地区城镇化对气候和水资源要素的影响情况。结果表明,城镇化对研究地区气候及水资源造成的影响主要表现在使局地风场减弱、降水减少、地面气温增加、空气湿度减小、水资源总量减少、土壤含水量减少和地表径流增加等方面,从而对气候和水资源造成影响。

关键词: RegCM3 区域气候模式,控制试验,敏感试验,城镇化,黄淮海地区

Numerical Experiment on the Impact of the Urbanizing on Regional Climate and Water Resources in Huanghe-Huaihe-Haihe Zone

CHEN Huailiang^{1,2} XU Xiangde³ LI Fei¹ WANG Lanning⁴ DU Zixuan^{1,2}

1 CMA/Henan Key Laboratory of Agrometeorological Safeguard and Applied Technique, Zhengzhou 450003

2 Henan Institute of Meteorological Sciences, Zhengzhou 450003

3 Chinese Academy of Meteorological Sciences, Beijing 100081

4 National Climate Centre, Beijing 100081

Abstract: Numerical experiment has been carried out over HHH (Huanghe-Huaihe-Haihe) zone by using regional climate model RegCM3 for 5 years (2001—2005). The simulation has two tests, a control test and a sensitivity test on urbanizing conditions. The output results of the regional climate model are precipitation, evaporation, temperature, humidity, soil moisture, runoff, and the total water vapor content. The difference value between sensitivity test and control test responds to the influence of vegetation variation on regional climate and water resources in HHH zone. The results showed that the urbanization could weaken the local wind field, decrease rainfall and water resources and make the temperature increase. The variations resulting in the autumn drought happen easily, the floods became more severity because of the increasing of runoff in summer. The urbanization caused the decreasing of soil moisture holding capacity, and stimulated the vegetation degradation greatly. Accordingly, the climate abnormality and the shortening of water resources in HHH zone transformed tempestuously, and led to the ecological environment deteriorating.

* “十一五”国家科技支撑计划重点项目(2006BAD04B01)、公益性行业(气象)专项(GYHY200906022)和中国气象局气候变化专项(CCSF2006-15)共同资助

2011 年 3 月 30 日收稿; 2011 年 9 月 29 日收修定稿

第一作者: 陈怀亮,主要从事遥感与农业气象研究. Email:h. chen@vip. 163. com

Key words: RegCM3 model, control test, sensitivity test, urbanization, HHH (Huanghe-Huaihe-Haihe) zone

引言

随着全球气候变化,我国的区域气象灾害有增多的趋势,严重地威胁着人们的生存环境。植被退化对我国的区域气候造成了显著影响。因此,加强陆面过程与大气相互作用的研究,对于正确预估人类活动对未来气候及人类生存环境的影响,应对极端天气事件的频繁出现具有积极意义。

区域气候模式能够对多种不同尺度之间的相互作用进行很好的模拟,在于它可以通过侧边界条件引入真实的大尺度强迫场以及可以对中小尺度强迫进行更好的描述^[1-5]。研究表明区域气候对地表特征的响应程度与植被变化的时空尺度密切相关,较为一致的观点认为植被退化导致地表反射率加大、粗糙度减小、地面热通量改变,导致退化区温度升高,土壤湿度降低,减弱东亚季风环流,进而影响我国降水分布特征。以往植被变化对区域气候影响的研究主要集中在几个气候敏感区:内蒙古^{〔6-7〕}、青藏高原^{〔8〕}、西北及南方等区域^{〔9-11〕},且多为植树造林绿化和荒漠化气候影响模拟,而针对由于城镇化和农田化进程造成植被破坏而影响气候的人类活动活跃区的研究较少,特别是利用高分辨率区域气候模式开展黄淮海地区植被变化影响的研究也相对较少^{〔12-14〕}。

黄淮海地区是我国传统的农耕区,农业植被占总植被面积的 62.15%。但该区也是经济社会快速发展、城镇化进程快速推进的区域之一^{〔15-17〕}。近 20 年来,黄淮海部分地区的城市扩张、大规模小城镇建设、商业开发等导致的城镇化进程加快,大量农田甚至自然植被被侵占,从而对气候和水资源产生了影响。为此,本文利用 RegCM3 区域气候模式,通过数值模拟的方法,模拟黄淮海地区城镇化对气候和水资源的影响情况,为今后该区域经济社会发展和土地资源、气候资源、水资源的合理开发提供科学依据。

1 RegCM3 区域气候模式简介

最初区域气候模式的构想由 Dickinson 等^{〔18〕}和 Giorgi 等^{〔19〕}提出,通过 GCM(General Circulation Model)提供初始场和边界条件,来进行单向嵌套的高分辨率区域气候模拟。第一代 NCAR RegCM 模

式是建立在 MM4 上,模式的动力部分来自 MM4,采用静力平衡,垂直方向为 σ 坐标。为了将 MM4 应用于区域气候模拟,一系列参数化方案被替代,大部分是辐射传输和陆面过程,包括 BATS^{〔20-21〕} CCM1 的辐射传输方案、中分辨率的行星边界层方案、Kuo 积云参数化方案。1993 年 RegCM 改进成 RegCM2^{〔22-23〕},引入了 CCM2 的辐射传输包、Holtslag 的非局地边界层方案、Grell 的积云分参数化方案,以及最新的 BATS1E。最近几年,一些新方案被引入了 RegCM,发布了 RegCM3。首先使用 CCM3 的辐射传输包代替了原有的 CCM2,不但包括原有的全部结构,还引入一些新的特征,诸如温室效应气体(NO_2 , CH_4 , CFCs)、气溶胶、云的结冰等的影响,另一个重要改进是原来的显示水汽方案被它的一个类似版本取代,这是因为原气候模式这部分的计算量太大。其他改进包括新的大尺度降水方案,优化输入输出等方面。

RegCM 的垂直坐标为:

$$\sigma = \frac{p - p_t}{p - p_s} \quad (1)$$

式中 p 为气压, p_t 为模式层顶气压, p_s 为地面气压。

模式垂直坐标格点选取是任意的,各变量在垂直方向上交替分布。垂直速度定义在整 σ 层上,其他变量定义在半 σ 层上。模式水平方向采用 Arakawa B Lambert 交错网格。动量(U, V)定义在网格中间,其他变量定义在网格交叉点上。模式还提供了四种地图投影坐标 Lambert, Polar Stereographic, Normal Mercator 和 Rotated Mercator。模式可以使用 ECMWF, ERA40, NNRP1, NNRP2 和 fvGCM 及 FNEST 提供的初始场和侧边界条件。

2 方案设计

选取 2001—2005 年作为研究时段,通过数值试验来模拟黄淮海地区在城镇化情况下,对该区域气候及水资源的影响。数值模拟试验采用 ICTP(International Center for Theoretical Physics)的 RegCM3 进行。试验中垂直坐标取 18 层非均匀垂直分层,模式顶气压取为 5 hPa。水平区域中心位于($35^\circ\text{N}, 110^\circ\text{E}$),南北 120 个格点,东西 140 个格点,分辨率为 20 km,时间积分步长为 30 s。初始场和侧边界条件采用 NCAR/NCEP 提供的 2000—

2005 年再分析资料 (NNRP2), 水平分辨率为 $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, 要素包括气压、位势高度、气温、纬向风和经向风, 垂直层共 17 层; 比湿层从 1000~300 hPa 共 8 层。通过时间倾向分析得到侧边界条件, 将其作为理想的外界强迫场用于模拟, 侧边界条件每 6 小时更新一次; 边界层方案采用 Holtslag 方案; 积云参数化方案为 Arakawa & Schubert 方案; 侧边界采用指数张弛逼近; 用周平均海温资料代替逐日海温, 分辨率为 $1^{\circ} \times 1^{\circ}$ 。

控制试验: 初始场选用 2000 年 12 月 1 日的再分析资料, 侧边界条件每 6 小时更新一次。模拟结束时间为 2005 年 12 月 31 日, 每天输出一次模拟结果, 结果分析从 2001 年 1 月 1 日开始。

敏感性试验: 此试验通过将黄淮海及周边地区的植被修改为城镇, 研究城镇化对该区气候和水资源的影响。植被修改范围为 $31^{\circ} \sim 42^{\circ} \text{N}$ 、 $105^{\circ} \sim 120^{\circ} \text{E}$, 修改时为了突出城镇化的影响, 采用大规模城镇化的方式, 即将所有植被类型改为城镇, 非植被下垫面(海洋、湖泊)保持不变。由于 RegCM3 中的地面覆盖类型 BATS 方案中没有城镇类型, 只好采用相近的半沙漠类型即类型 11 (semi-desert) 来表征城镇类型, 为了更接近城镇类型, 同时对粗糙度、反照率、叶面积指数等相关下垫面物理量参数按模式设计进行了相应变化, 其他设置同控制实验。

控制试验及敏感性试验的植被覆盖类型比例见表 1。

表 1 控制试验及敏感性试验区植被覆盖类型分布比例

Table 1 The proportion of vegetation type distributions in the region of control test and sensitivity test

类型	植被覆盖类型	控制试验 格点数	控制试验 百分比/%	敏感性试验 格点数	敏感性试验 百分比/%
1	庄稼 (crop/mixed farming)	2661	15.399	1807	10.457
2	短草 (short grass)	3335	19.300	2829	16.372
3	常绿针叶林 (evergreen needle leaf tree)	320	1.852	320	1.852
4	落叶针叶林 (deciduous needle leaf tree)	17	0.098	11	0.064
5	落叶阔叶林 (deciduous broad leaf tree)	598	3.461	331	1.916
6	常绿阔叶林 (evergreen broad leaf tree)	258	1.493	258	1.493
7	高草 (tall grass)	157	0.909	128	0.741
8	沙漠 (desert)	1324	7.662	1268	7.338
9	冻原 (tundra)	78	0.451	78	0.451
10	灌溉庄稼 (irrigated crop)	2195	12.703	892	5.162
11	半沙漠 (semi-desert)	1890	10.938	5591	32.355
12	冰帽、冰川 (ice cap/glacier)	3	0.017	3	0.017
13	沼泽 (bog or marsh)	6	0.035	6	0.035
14	内陆水 (inland water)	57	0.330	32	0.185
15	海洋 (ocean)	2074	12.002	2074	12.002
16	常绿灌木 (evergreen shrub)	351	2.031	347	2.008
17	落叶灌木 (deciduous shrub)	311	1.800	83	0.480
18	混合林地 (mixed woodland)	511	2.957	463	2.679
19	林田交错 (forest/field mosaic)	1134	6.562	759	4.392
20	水陆混合 (water and land mixture)	0	0.000	0	0.000

3 控制试验结果分析

本试验中, 风场、温度、位势高度场等采用同期 NCEP 再分析资料 NNRP2 进行对比, 降水为气象站降水资料。

本文对 RegCM3 控制试验模拟结果中基本要素场的年平均气候特征与实况进行比较, 发现位势高度场和风场的模拟与实况比较吻合, 其中 500 hPa 模拟的 580 线较实况偏南约 2° , 说明模拟的副热带

高压略偏南, 这可能与我们采用的模拟分辨率较细而实况场分辨率较粗有关。年均温度场的模拟结果表明, 等温线分布与 NCEP 实况及温度梯度较为一致, 反映了温度南高北低的分布; 年平均风场从低层到中层均与实况接近; 模拟的降水分布与降水实况基本一致, 但雨带略偏北, 西南地区的量级偏大, 可能与模式本身对高原地形的处理不足有关, 这些也存在于以往的区域气候模拟研究中^[11,20]。从年平均环流的角度看, 基本模拟出了东亚地区的平均环流状况。

从季平均环流的模拟结果看,冬季位势高度场模拟值与实况比较一致,各层高低值中心与等值线的分布与实况相当吻合。夏季的不如冬季准确,高低压中心分布趋势相近,但是较冬季偏差要大。500 hPa 位势高度场的模拟结果较实况值偏低,即夏季副热带高压的模拟结果较实况偏南。冬季温度场模拟值与实况较为接近,850 hPa 上位于我国西南的冷中心在模拟结果中也有很好的反映,但是模拟结果稍偏西。夏季中、高层温度场上明显地反映出海陆热力对比的东西差异,温度场的模拟结果要比位势高度场好。冬、夏两季模拟的降水分布均与实况接近,但是相对而言,夏季降水的模拟量级偏大。

控制试验结果分析表明:利用该模式对研究区气候 5 年间的模拟能够反映区域的环流、降水分布特征、强度变化和季节转换特征。但是存在西南地区降水量级偏大,夏季模拟效果不如冬季的问题,这些可能与模式本身的系统误差有关。

4 敏感性试验结果分析

从年平均降水差值图(图 1)上看,城镇化造成黄淮海和长江中下游地区降水明显减少,基本上在 $-1 \text{ mm} \cdot \text{d}^{-1}$ 左右,而华南西南地区呈现增多的趋势。季节平均降水差值显示,冬季植被改变区降水略有增加,西南与长江下游地区则减少;春季植被改变区减少比较明显,而华南有所增加;夏季的分布与春季类似,呈现北少南多的趋势,只是量级进一步加大,这与李巧萍等^[9]的研究结论是一致的。秋季降水与其他各季不同,植被改变区域及其南北两侧降水减少、西侧降水增多,整体分布趋势为东负、西正。

在年平均环流差值风场(图 2)上,850 hPa 在黄淮海地区东部呈现一差值反气旋;700 hPa 差值反气旋仍位于黄淮海地区但位置偏西;在 500 hPa 上差值反气旋环流中心进一步偏西且较弱,自华东至西南呈现较为一致的差值北风。在低层黄淮海地区呈现为一致的偏北差值风场,叠加在基本环流场上,在某种程度上减弱了西南暖湿气流的输送,这在郑益群等^[5]、李巧萍等^[9]的试验中有类似的结果。

为了研究该区域水资源的变化情况,用降水量与蒸发量之差表征研究区水资源总量^[24-28]。从年平均水资源总量差值图(图 3)可见,水资源总量减少最显著的地方不是在植被改变区域,而在改变区的南部及其南侧,较降水减少显著的区域(见图 1)更

加偏南。主要原因在于植被改变造成了该区域的降水减少,但蒸发量也趋向减少。从季节分布来看,冬季水资源减少区域主要在西南至长江中下游的狭长地带;春季与冬季类似,只是减少区有所北抬和扩大,河南、安徽的部分地区已经进入减少区域;夏季除山东及辽东外,黄淮海平原均为减少区域,分布情况与降水差值分布类似;秋季分布与降水差值趋向近似,黄淮海地区西部总量增加,其他总量减少。

通过计算整层积分水汽(从地面积分到高空的水汽量也称为大气可降水量)发现,水汽减少最多的区域在豫东北、鲁西北、冀东南和天津一带,与降水减少相对应,可降水量也呈现下降趋势。表明差值环流一定程度上减弱了西南暖湿气流的输送,导致黄淮海地区水资源总量减少。

从夏季地表径流差值图(图 4a)可见,整个黄淮海地区的地表径流呈增加趋势。黄淮海地区夏季降水占全年降水总量的大部分,水资源总量减少,降水减少,而地表径流增加的主要原因在于植被破坏后土壤蓄水能力减弱、地表截流能力降低。径流增加所导致的直接后果就是夏季降水后各流域汇流加速,径流流量加大,洪涝灾害趋于严重;同时土壤蓄水能力减弱造成地下水供应不足,进一步加剧了植被的退化。地表径流的模拟结果表现为降水减少的区域地表径流增加。

从图 4b 可见,在植被改变区地面温度升高,且扩大到华南地区,但在内蒙古等区域温度则降低。这可能由于本来的沙漠地区修改成半荒漠,造成了该地区年平均温度的降低。相应的地面比湿(图 4c)在植被改变区也有了明显的降低,这与降水及整层水汽减少相对应。

从湿度垂直剖面图(图 5)看,湿度降低区主要发生在 500 hPa 以下的中低层区域,且越往低层降低越多。从 34°N 剖面图看,湿度降低最大值中心在 $110^{\circ}\sim 117^{\circ}\text{E}$ 之间,达 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上;从 115°E 剖面图看,湿度降低最大值中心在 $34^{\circ}\sim 39^{\circ}\text{N}$ 之间,也达 $1.0 \text{ kg} \cdot \text{kg}^{-1}$ 以上; 28°N 以南和 43°N 以北地区为湿度增大区,但其量级较小。湿度的这种变化形式也反映了植被覆盖改变后环流场、水汽场的变化状况。

整体来看,城镇化进程对黄淮海地区的影响主要体现在降水减少,易发生秋旱,环流场呈现反气旋差值环流,且差值风场呈现为西倾的特征,在一定程度上减弱了季风强度,导致水汽输送减少,大气可降水

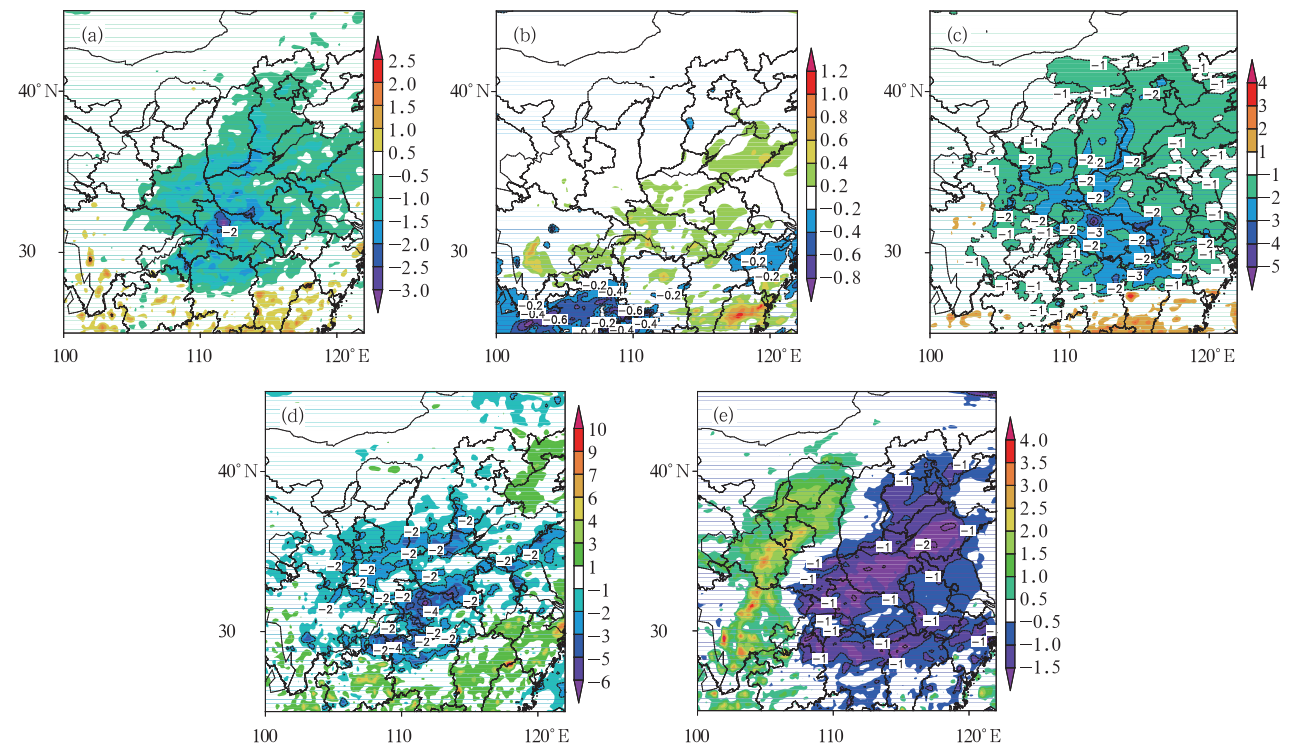


图 1 敏感性试验减去控制试验降水差值 (单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

(a) 年平均, (b) 冬季, (c) 春季, (d) 夏季, (e) 秋季

Fig.1 The sensitivity test subtracts the control test on precipitation (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)

(a) annual average, (b) winter, (c) spring, (d) summer, and (e) autumn

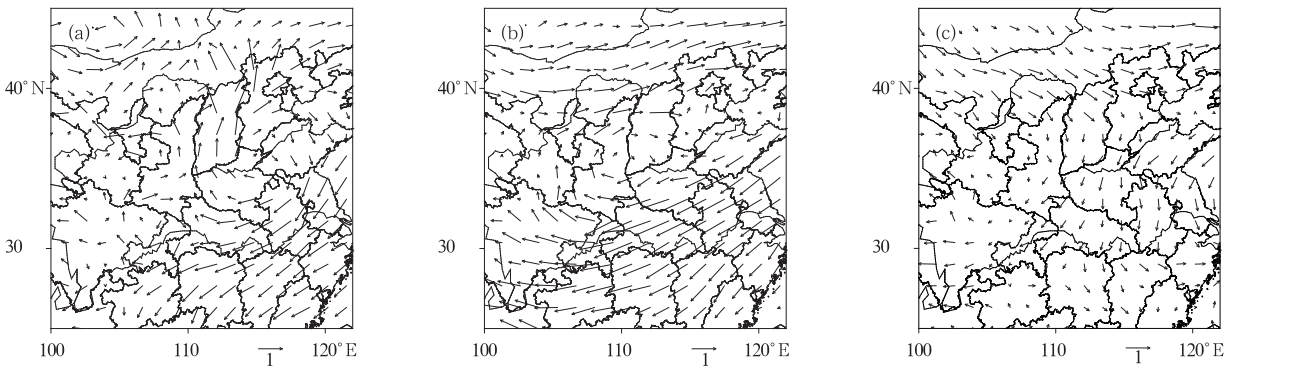


图 2 敏感性试验减去控制试验年平均差值风场 (单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 850 hPa, (b) 700 hPa, (c) 500 hPa

Fig.2 The sensitivity test subtracts the control test on annual average wind field (unit: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)

(a) 850 hPa, (b) 700 hPa, and (c) 500 hPa

量减少,引发黄淮海地区的水资源总量的减少,夏季地表径流趋于增多,导致局地洪涝灾害趋于严重,气候异常和水资源短缺进一步加剧。

5 结论与讨论

本文利用 RegCM3 模式进行了黄淮海地区植被覆盖变化对气候和水资源要素影响的 5 年数值模

拟试验,得到如下结论:

(1) 通过 5 年的数值试验,表明 RegCM3 模式能够反映模拟区域的环流、降水分布特征、强度变化和季节转换特征。但模拟结果存在着降水量级偏大,夏季模拟效果不如冬季的问题。

(2) 敏感性试验表明,城镇化进程会对黄淮海地区的气候及水资源状况造成影响。主要表现在城镇化进程会导致局部风场减弱、降水减少、地面气温

增高、空气湿度减小、水资源总量减少、土壤含水量减少,地表径流增加。从季节的影响来看更易发生秋旱,夏季地表径流趋于增多,导致局地洪涝灾害趋于严重。同时,植被改变造成了土壤蓄水能力不足,土壤含水量减少又加快了植被的退化,从而导致该地区的气候异常和水资源短缺进一步加剧。

(3) 通过数值模拟发现,大规模城镇化进程造

成了气候及水资源要素的变化,特别是试验中用城镇替代植被覆盖,而植被下垫面涵养水源与调节气候的能力远比城镇下垫面要强得多,因此大范围盲目的都市化、城镇化扩张,可能将对气候和水环境造成不利影响。所以,应做好大规模城镇化的气候可行性论证工作,合理规划、和谐发展。

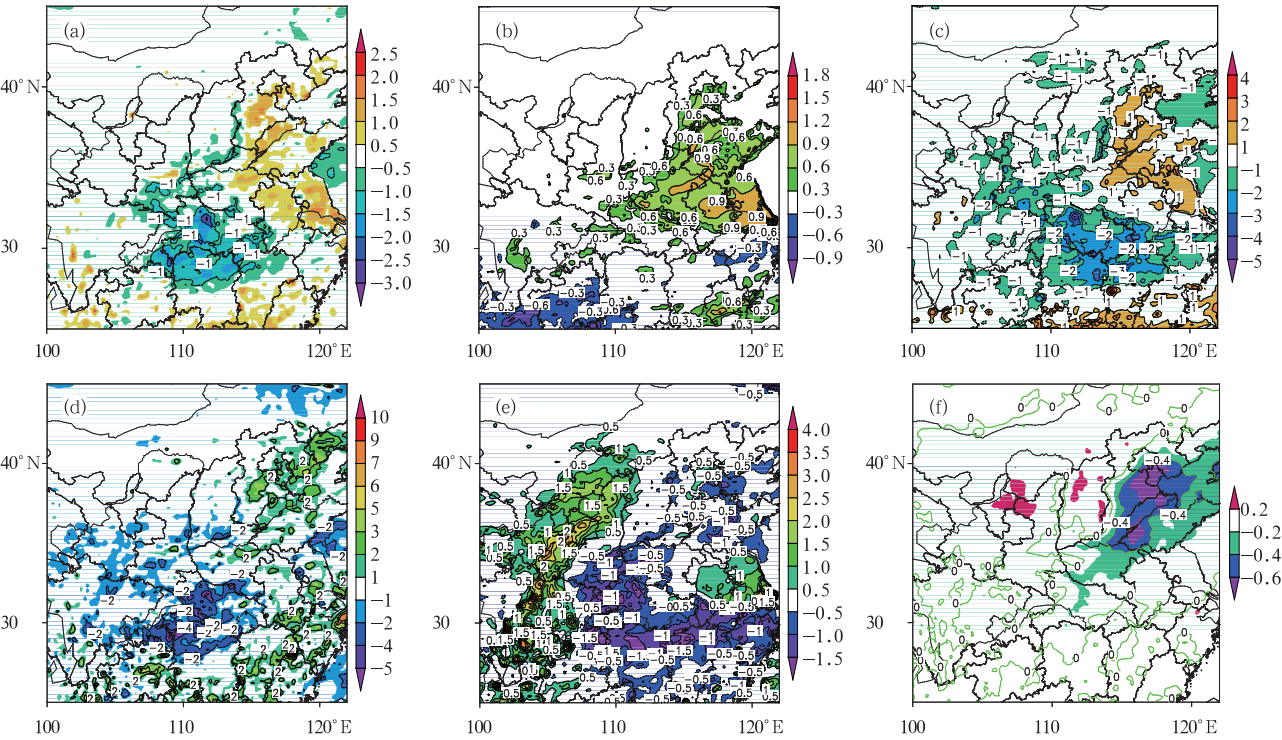


图 3 年平均(a)、冬季(b)、春季(c)、夏季(d)和秋季(e)的敏感性试验减控制试验水资源总量差值(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$)和年均整层水汽积分差值(f)(单位: mm)

Fig. 3 The sensitivity test subtracts the control test on total water resources (unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$); (a) annual average, (b) winter, (c) spring, (d) summer, (e) autumn, and (f) the integration difference of annual total water vapor (unit: mm)

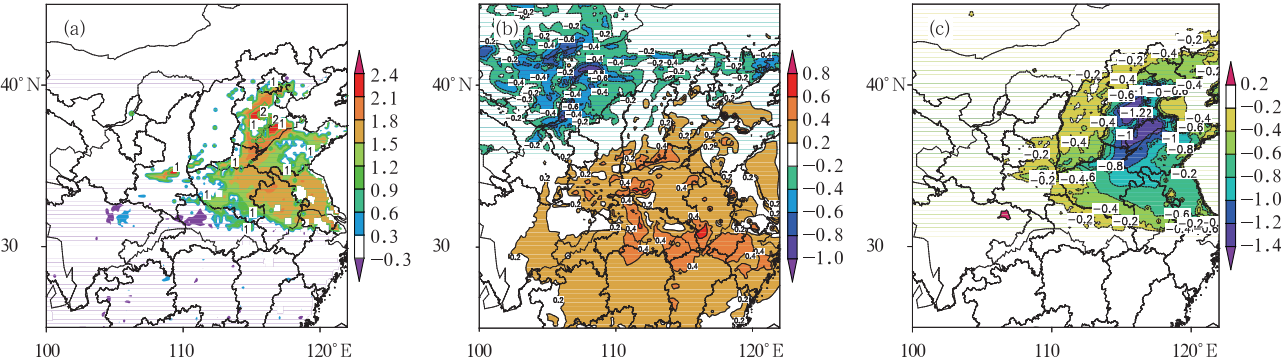


图 4 敏感性试验减去控制试验

(a) 地表径流差值(单位: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), (b) 地面气温差值(单位: $^{\circ}\text{C}$), (c) 地面比湿(单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

Fig. 4 The sensitivity test subtracts the control test on surface runoff (a, unit: $\text{mm} \cdot \text{d}^{-1}$), surface temperature (b, unit: $^{\circ}\text{C}$), and surface specific humidity (c, unit: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)

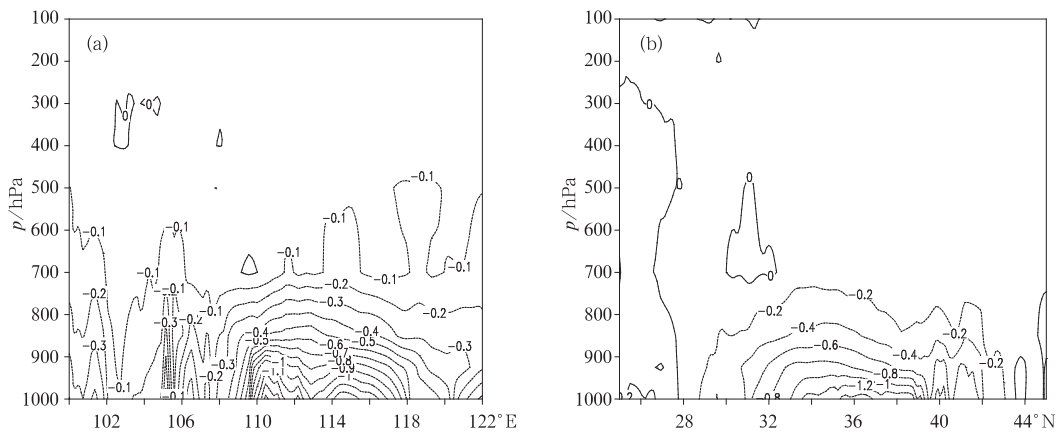


图 5 敏感性试验减去控制试验比湿剖面图 (单位: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$)
(a) 沿 34°N 纬线, (b) 沿 115°E 经线

Fig. 5 The profiles of the difference value of the sensitivity test minus test on specific humidity (unit: $\text{kg} \cdot \text{kg}^{-1}$) along 34°N (a) and 115°E (b)

参考文献

[1] 魏和林,符淙斌,王维强. 区域气候模式侧边界的处理对东亚夏季风降水模拟的影响[J]. 大气科学, 1998, 22(5): 779-790.

[2] 秦大河,陈宜瑜,李学勇. 中国气候与环境演变(上卷):气候与环境的演变及预测[M]. 北京:科学出版社, 2005.

[3] Xue Y K. The impact of desertification in the Mongolian and the Inner Mongolian Grass land on the regional climate[J]. J Climate, 1996, 9(9): 2173-2189.

[4] 符淙斌,魏和林,郑维忠,等. 中尺度模式对中国大陆地表覆盖类型的敏感性试验[M]. // 符淙斌,严中伟主编. 全球变化与我国未来的生存环境. 北京:气象出版社, 1996.

[5] 郑益群,钱永甫,苗曼倩. 植被变化对中国区域气候的影响 II: 机理分析[J]. 气象学报, 2002, 60(1): 17-29.

[6] 王兰宁,郑庆林,宋青丽. 青藏高原下垫面对中国夏季环流影响的研究[J]. 南京气象学院学报, 2002, 25(2): 186-191.

[7] 吕世华,陈玉春. 西北植被覆盖对我国区域气候变化影响的数值模拟[J]. 高原气象, 1999, 8(3): 416-424.

[8] 丁一汇,李巧萍,董文杰. 植被变化对中国区域气候影响的数值模拟研究[J]. 气象学报, 2005, 63(5): 613-621.

[9] 李巧萍,丁一汇. 区域气候模式对东亚季风和中国降水的多年模拟与性能检验[J]. 气象学报, 2004, 62(2): 140-153.

[10] 李巧萍. 土壤湿度和植被覆盖变化对我国区域气候影响的数值模拟研究[D]. 南京:南京信息工程大学, 2004.

[11] 高学杰,徐影,赵宗慈. 数值模式不同分辨率和地形对东亚降水模拟影响的试验[J]. 大气科学, 2006, 30(2): 185-192.

[12] 刘绿柳,许红梅. 黄河流域主要植被类型 NDVI 变化规律及其与气象因子的关系[J]. 中国农业气象, 2007, 28(3): 334-337.

[13] 张可欣,孙成武. 鲁中山区地形对山东区域气候影响的敏感性试验[J]. 中国农业气象, 2009, 30(4): 496-500.

[14] 陈怀亮,徐祥德,杜子璇,等. 黄淮海地区植被活动对气候变化的响应特征[J]. 应用气象学报, 2009, 20(5): 513-520.

[15] 陈怀亮. 黄淮海地区植被覆盖变化及对气候与水资源影响研究[M]. 北京:气象出版社, 2008.

[16] 杜子璇,陈怀亮,刘忠阳. 黄淮海地区植被覆盖变化驱动力与

驱动机制研究[J]. 气象与环境科学, 2007, 30(3): 3-7.

[17] 陈怀亮,刘玉洁,杜子璇,等. 基于卫星遥感数据的黄淮海地区植被覆盖时空变化特征[J]. 生态学杂志, 2010, 29(5): 991-999.

[18] Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. A regional climate model for the western United States[J]. Clim Change, 1989, 15(3): 383-422.

[19] Giorgi F, Bates G T. The climatological skill of a regional model over complex terrain[J]. Mon Wea Rev, 1989, 117(11): 2325-2347.

[20] Dickinson R E, Henderson-Sellers A, Kennedy P J. Biosphere-Atmosphere Transfer Scheme (BATS) Version 1e as Coupled to the NCAR Community Climate Model[R]. NCAR/TN-387 + STR, 1993, 72.

[21] Giorgi F. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part I: Boundary-layer and radiative transfer processes[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2794-2813.

[22] Giorgi F. Development of a Second-Generation Regional Climate Model (RegCM2). Part II: Convective processes and assimilation of lateral boundary conditions[J]. Mon Wea Rev, 1993, 121: 2814-2832.

[23] 孙林海,刘一鸣. 区域气候模式对中国夏季平均气温和降水的评估分析[J]. 气象, 2008, 34(11): 31-39.

[24] Sud Y C, Fennessy M J. A study of the influence of surface albedo on July circulation in semi-arid regions using the GLAS GCM[J]. J Climate, 1982, 2(2): 185-125.

[25] 施雅凤. 气候变化对西北华北水资源的影响[M]. 济南: 山东科学技术出版社, 1995.

[26] 范广洲,吕世华,程国栋. 华北地区夏季水资源特征分析及其对气候变化的响应(I): 近 40 年华北地区夏季水资源特征分析[J]. 高原气象, 2001, 20(4): 421-428.

[27] 高歌,李维京,张强. 华北地区气候变化对水资源的影响及 2003 年水资源预评估[J]. 气象, 2003, 29(8): 26-30.

[28] 杜川利,刘晓东. 中国区域陆地水资源数值模拟分析[J]. 气象, 2009, 35(8): 49-60.