

有序人类活动造成的土地利用变化对 区域降水的可能影响

宋 帅^{1,2} 鞠永茂³ 王汉杰¹

1 中国科学院大气物理研究所东亚区域气候-环境重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院研究生院, 北京 100049

3 中国人民解放军 61741 部队气象中心, 北京 100081

摘 要 人类社会的发展主要通过土地利用变化和温室气体排放两种途径影响着气候环境, 因此, 完善的气候模式需要从这两方面与社会经济学模式进行耦合。作者从土地利用变化的角度出发, 引入系统动力学模型预测的土地利用数据库资料, 并利用该资料动态地修正区域气候模式的下垫面地表覆盖类型, 实现了社会经济学模式与区域气候模式的单向耦合。在此基础上, 利用耦合的区域环境系统集成模式 (RIEMS 2.0), 将社会经济稳定发展和高速发展两种驱动情景下不同时段土地利用资料, 分别进行数值模式运行。最后根据得出的预测结果, 从降水的空间分布和时间演变等方面分析了未来 50 年中国气候可能的年代际演变特征, 同时对土地利用变化影响区域气候的机理进行了探讨。

主要研究表明, 区域气候变化尤其是区域降水对土地利用变化的响应较为敏感, 而且土地利用变化引起的气候效应不仅局限于土地利用发生改变的区域, 因此, 研究土地利用变化对区域环境的影响要综合考虑其区域分布以及各区域的变化程度。长时间的气候预测研究, 在气候模式中耦合社会经济学模式是必要的。仅考虑土地利用的变化, 未来 50 年华南地区年降水量将呈现减少的趋势, 北方地区的年降水量在 2010 年左右将呈现增长的趋势, 且增长的趋势可能持续到 2050 年。预测结果同时显示, 西部干旱半干旱区沙漠绿化, 增加东北及内蒙古西部地区的森林面积, 华北地区退耕还草等措施对北方地区年降水量的增加是有益的。同时, 对应西部沙漠面积扩大, 华北地区城市用地增加, 东北及内蒙古西部地区林地退化以及华南地区林地增加等土地利用的变化, 北方的干旱化趋势会进一步加剧。土地利用变化可以引起气候模式下垫面参数中的地表反照率、粗糙度等发生改变, 变化的地表覆盖类型与大气的能量和水分通量交换差异作用于大气的流场和温度场等要素, 从而改变了区域的气候环境。

关键词 土地利用变化 社会经济学模式 系统动力学模型 RIEMS 气候预测

文章编号 1006-9585 (2008) 06-0759-16 **中图分类号** P461 **文献标识码** A

Possible Impacts of Land Use Change on Regional Rainfall Associated with Orderly Human Activities

SONG Shuai^{1, 2}, JU Yong-Mao³, and WANG Han-Jie¹

1 *Key Laboratory of Regional Climate-Environment Research for Temperate East Asia, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029*

2 *Graduate University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049*

3 *Meteorology Center of 61741 Troop, PLA, Beijing 100081*

收稿日期 2007-10-30 收到, 2008-08-26 收到修定稿

资助项目 国家重点基础研究发展规划 2006CB400500、2006CB400505 和国家自然科学基金 40675040

作者简介 宋帅, 男, 1975 年出生, 在职博士, 工程师, 主要从事气候与全球变化方面的研究。E-mail: Songshuai@126.com

通讯作者 鞠永茂, E-mail: juym100@sina.com

Abstract Regional human development may affect the regional climate and environment by many means, including land use change and green house gas emission. So there are at least two connection ways to link social-economic model with climate model when considering model integration. The authors focused on the first factor. By dynamically changing the low boundary conditions, the new generation of the Regional Integrated Environment Modeling System (RIEMS 2.0) was coupled with the Social Economic Dynamic Model which may reveal possible land use change in the future 50 years under different development scenarios. According to the data given from Social Economic Dynamic Model under high development and stable development scenarios, the single coupled model was used to study the possible regional climate change of China in the future shown by analysis of the regional precipitation spatial distribution and its evolution.

The preliminary results show that RIEMS was sensitive to land use change. The spatial distribution of different regions and variation degree of those corresponding regions should be taken into account because the total impacts of the land use change on climate was not only limited to those regions where land use changed, but also to those regions where the land use didn't change at all. So it is necessary to integrate the social economic model into climate models when performing climate forecast for long time integration. The ecological construction engineering implemented including the Green-Great Wall construction engineering in the arid and semi-arid regions of west China, the natural forest conservation in northeast China and the west part of Inner Mongolia, also the replace farming with forestry and grass movement in north China etc will work positively on the eco-environment improvement, particularly will show as the increased precipitation in north China. The simulation also shows that the precipitation in north China will decrease and then speed up the aridification in this region, corresponding to the expand of the desert in the west China and the urbanization land in north China, the degeneration of forests in northeast China and the west part of Inner Mongolia, also the coverage of forests enlarged in south China etc. In north China, however, the co-effects of urban land increase with the forests coverage enlarged by irrigation will do positive effect to this region's precipitation. In the future 50 years, the rainfall in south China will decrease, while the rainfall will increase in north China around 2010 and the rainfall increase tendency most likely lasts to 2050, which benefits to the national economy and eco-environment because the water shortage is the critical factor in blocking economy growing in this area. Under stable social economical development scenery, the rainfall increment in north China is not as clear as those in high-speed scenery. Land use change will lead to the variation of surface parameters such as albedo and roughness length etc, and result in regional climate change because the equilibrium of water and heat transfer in the air-vegetation interface is changed.

Key words land use change, social economic model, system dynamic model, RIEMS, climate prediction

1 引言

全球变暖以及由此引发的一系列极端天气气候事件,使得全球气候变化引起了人类社会的普遍关注。土地利用变化是全球气候变化的主要驱动力之一,也是全球变化研究的中心内容。研究土地利用变化对气候的反馈作用,除了作为基础性工作的野外观测研究之外,主要是借助于气候模式开展的数值模拟研究。相关的数值试验研究成果^[1~4]初步证实了土地利用变化可以在多种时间和空间尺度上对地气之间的水分、热量以及动量交换产生重要的影响。我国人口密度大,人类

活动强度高,产业转型所带来的大规模土地利用变化必将对区域气候环境产生影响。同时,我国独特的地形地理特征以及季风气候特性,使得气候变化具有空间上的复杂性和对外界变化响应的时敏敏感性的特点^[5]。认识人类活动导致的土地利用变化对区域气候变化的影响和作用机理,对指导我国生态工程建设、工农业布局等都具有重要的意义。

近年来,我国学者利用不同的数值模式,在陆气相互作用过程方面进行了大量的数值试验。研究工作主要是针对中国土地利用变化的敏感区展开的,其中包括西北荒漠半荒漠地区^[6~8]、青藏高原地区^[9]、中国北方草原区与南方长绿阔叶

林区^[10]以及内蒙古农牧过渡带区域^[11]等。数值试验的设计主要是改变模式区域内局部区域的土地利用状况的理想性敏感性试验。一系列的研究工作主要取得了两方面的初步成果，一是论证了土地利用变化对区域气候环境有着显著的影响，二是对数值模式中陆气相互作用的计算进行了大量的改进。但是，该两方面的成果又有其各自的局限性。一方面，敏感性试验中土地利用变化集中于模式的局部区域，并不能对模式区域整体的土地利用变化状况进行客观的刻画，而且在土地利用变化的程度上往往会大大夸大其变化的幅度。因而，研究工作在反映土地利用变化所引起的气候变化的时空尺度及影响程度方面有一定的不足，关于土地利用变化对气候影响的时空尺度以及它在气候变化中的作用究竟有多大的问题，仍然是一个科学难题^[12]。另一方面，土地利用的变化受自然因素和社会因素的共同影响，有研究表明^[13,14]，人类对地球陆地表面、生物多样性、生物地球化学循环和水循环等的改变已超过了自然变化的影响。所以，研究人类活动所引起的气候效应应该成为全球变化的重要研究内容。叶笃正等^[15]提出了“有序人类活动”的概念，同时强调指出，把区域气候模式运用于讨论虚拟植被变化引起的区域气候和水文环境变化的研究工作只是初步的，深入研究有序人类活动的数值模式应该是在气候模式基础上发展起来的，包括了经济问题、社会问题和环境问题的“人类活动-气候环境模式”。

为了能全面、真实和细致地考虑模式模拟区域的土地利用变化，弥补数值模式中对土地利用变化描述的不足，时间和空间上连续的卫星数据被大量地用于土地利用变化与气候相互作用机理方面的研究^[13,16]。此外，在气候模式中耦合社会经济学模式，为进一步完善数值模式，研究有序人类活动所带来的气候效应提供了新思路。社会经济发展模式可以通过人类活动引起的土地利用变化和温室气体排放两个方面与气候模式耦合^[17]。本文从土地利用变化的角度，基于社会经济学模式提供的数据库资料，利用区域环境系统集成模式 RIEMS^[18]对中国未来 50 年气候变化的年代际特征进行了模拟研究，利用预测结果，对

有序人类活动可能引起的区域气候效应进行初步探讨的同时，对土地利用变化影响区域气候的机理进行进一步的研究。

2 系统动力学模型构造的土地利用数据分析

以卫星反演的中国北方 13 省近 20 年的历史土地利用变化资料为基础，结合详细的调查统计工作，何春阳等^[19]、黄庆旭等^[20]建立了即基于现阶段中国北方干旱化趋势的影响又充分考虑未来社会经济发展趋势的土地利用变化系统动力学模型（System Dynamics Model，以下简称 SD 模型）。利用该模型，综合考虑中国北方 13 省实际地域情况和未来整体发展政策规划，通过人口、GDP、市场调节和技术进步等情景组合设定一系列不同的系统状态，以 1999 年的遥感及统计资料为模型的系统初值，模拟得出了中国北方 13 省未来 50 年不同气候背景和社会经济发展情景共同影响下的土地利用结构变化资料。相关检验结果表明，SD 模型能在一定程度上反映土地利用系统的复杂驱动行为^[19,20]。SD 模型共给出了 54 种中国未来不同社会经济驱动情景下的土地利用资料，该数据库资料把中国北方 13 省区域的地表覆盖状况划分为 7 种类型，分别为耕地（农田）、林地（北方森林）、草地、水体（湖泊）、难利用地（沙漠戈壁）、城镇用地（城区）和湿地。其中，水体和湿地基本保持不变，其他地表覆盖类型变化较为明显。数据库资料的空间分辨率为 60 km，时间序列依次为 1999、2010、2020、2030、2040 和 2050 年。本文选用了具有实际意义的 2 种土地利用资料进行模拟分析，即在封闭平衡系统状态前提下的经济稳定发展情景（以下简称稳定发展型）和经济高速发展情景（以下简称高速发展型）。表 1 给出了此两种情景驱动下 SD 模型所选定的具体社会经济指标。

图 1 给出了该两种经济发展情景下，SD 模型输出的 5 种主要地表覆盖类型的时间演变趋势。从图中可以看出，两种情景下土地利用变化是大致符合基本社会经济发展规律的。图 1 中所显示的两种情景下我国森林面积逐渐增加及草地面积在

表 1 SD 模型选定的社会经济学指标
Table 1 Social economic factors used by Social Systematic Dynamic Model

年份	稳定发展			高速发展		
	GDP 增长/%	人口增长/‰	技术进步/%	GDP 增长/%	人口增长/‰	技术进步/%
2010~2020	7.2	7.8	0	7.5	8.1	0.5
2030~2050	4.7	1.8	0	5.0	2.1	0.1

注：GDP 增长：年经济增长率；人口增长：年人口增长率；技术进步：粮食单产增长率

2020 年之前较快增长的规律，与我国现行的退耕还林（还草）的生态环境建设政策是一致的。两种情景下城区面积变化的比例虽然不高但都具有增长的趋势，其对应我国社会经济转型的客观事实。在高速发展型情景下未来我国农田的面积是大幅度减少的，而经济稳定发展型情景下农田的面积基本保持不变。农田是土地利用变化中最易发生变化的土地利用形式，稳定发展情形下保持农田的比例不变也符合我国的基本政策方针。因此，尽管 SD 模型所给出的仅是对未来某种社会发展情形下一种可能情况的预测，本身存在较大的不确定性，但是其所描述的土地利用变化规律是大致符合我国现有政策及规划的，其基于遥感和社会调查的初始态较好地描述了我国土地利用分布现状，而且预测产品中各土地利用类型变化的比例不是很大，在此基础上组建的土地利用资料可以作为合理构建我国土地利用实际状况的重要参考。

以 SD 模型数据库资料给出的土地利用变化特征为依据，将上述两种驱动情景下不同时段的土地利用资料分别进行模拟分析。这里需要说明的

是，由于数据库的预测结果只给出了中国北方 13 省的土地利用变化资料，而对气候变化的预测需要考虑整个模式区域的土地利用变化的影响，所以，文章基于中国北方 13 省主要地表覆盖类型（耕地、林地、城镇用地、草地和难利用地）变化比例将其变化规律推广到了整个模拟区域。在此处理过程中，主要考虑了中国区域的政策一致性以及周边国家（地区）的社会经济发展类型。假定 SD 模型数据库所给出的土地利用变化比率适用于整个中国区域以及 35°N 以南的模式区域中的发展中国家区域，同时假定 35°N 以北中国北方 13 省区域之外的其他区域（主要是蒙古的草原地区，为发展中国家）的土地利用不发生变化。基于上述资料和假定，对模式区域原有下垫面的地表覆盖类型进行了修正。如表 2 所示，以 PSU/NCAR 中尺度模式 MM5 中的 24 种地表覆盖类型数据为基础，考虑 SD 模型数据库资料给出的 7 类地表覆盖类型及其分布，保留 SD 模型数据库资料地域范围以外区域的特有地表覆盖类型（常绿阔叶林、常绿针叶林、海洋、冻土和冰雪区），将 MM5 中的 24 种地表覆盖类型数据重新界定为 12 类不同

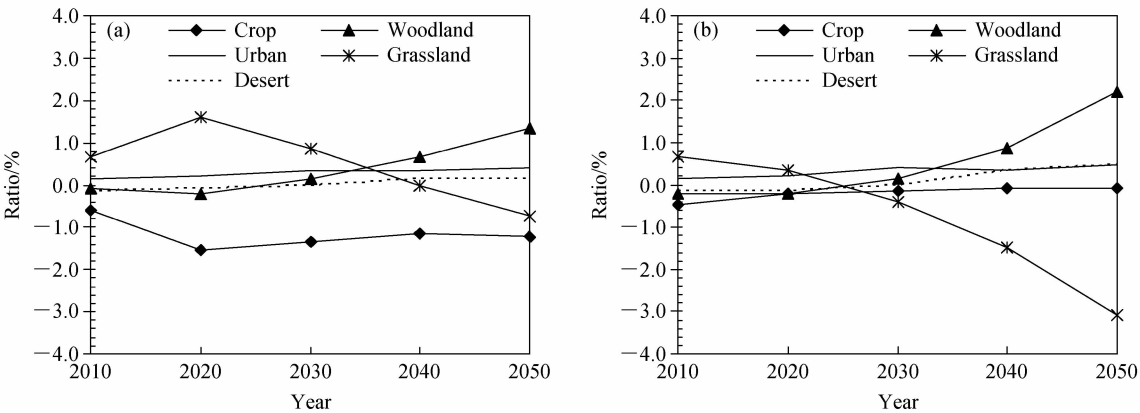


图 1 SD 模型预测的中国北方 13 省未来 50 年土地利用变化趋势：(a) 高速发展型，(b) 稳定发展型
Fig. 1 Land use change of the 13 provinces in the northern China predicted by Social Systematic Dynamic Model: (a) high-speed development scenery, (b) stable development scenery

的地表覆盖类型。然后，利用 SD 模型数据库资料所给出的 1999 年地表覆盖类型直接替代中国北方 13 省区域原有的地表覆盖类型，从而实现对 1999 年模式下垫面资料的修正。2010~2050 年模式下垫面资料的修正分为两步，对中国北方 13 省区域的地表覆盖类型的修正方法和 1999 年修正方法相同，通过把原格点位置的地表覆盖类型用其周围最近的 SD 模型数据库资料来替换的方法予以实现。对 35°N 以南和中国北方 13 省以外的模式区域地表覆盖类型的修正是基于修正后的 1999 年下垫面资料逐格点进行的。首先利用 USGS 的 30'' 地表覆盖类型资料给出该模式区域每个格点处的全部地表覆盖类型及其各自所占比例。然后依据图 1 所示的 2010~2050 年 SD 模型数据库资料中 5 种

主要地表覆盖类型相对于 1999 年资料的变化比率，对每个格点处所有与 SD 模型数据库资料中的 5 类地表覆盖类型相关的原有地表覆盖类型都变更相应的比率，按照单网格范围内地表覆盖类型所占比率最高的原则重新定义该格点处的地表覆盖类型。最后依据表 2 所示的地表覆盖类型合并规律，将经过该调整后的模式区域地表覆盖类型合并成 12 类地表覆盖类型。对各类地表覆盖类型的物理参数作相应的均值调整（表 2）。

3 区域气候模式试验方案设计

研究工作采用了区域环境系统集成模式 RIEMS 2.0，该模式依据 Fu 等^[18]提出的广义季风系统的

表 2 基于 SD 模型预测资料修正后的我国主要陆地区域地表覆盖类型及其物理参数
Table 2 Land cover categories and their thermal-dynamic parameters used in climate model adjusted by SD model

序号	PSU/NCAR MM5	RIEMS	反照率/%		土壤湿度/%		发射率/%		粗糙度/cm	
	地表覆盖类型	地表覆盖类型	夏半年	冬半年	夏半年	冬半年	夏半年	冬半年	夏半年	冬半年
1	城区	城区	18	18	0.10	0.10	0.88	0.88	50.00	50.00
2	旱地作物	农田	17	22	0.35	0.52	0.92	0.92	16.00	8.00
3	灌溉作物									
4	混合作物									
5	作物与草混合									
6	物林木混合									
7	温带草原	草地	20	23	0.14	0.23	0.91	0.91	12.00	11.00
8	灌木									
9	草原灌木混合									
10	亚热带大草原									
11	落叶阔叶林	北方森林	14	15	0.30	0.60	0.94	0.93	50.00	50.00
12	落叶针叶林									
15	混合林									
13	常绿阔叶林	常绿阔叶林	12	12	0.50	0.50	0.95	0.95	50.00	50.00
14	常绿针叶林	常绿针叶林	12	12	0.30	0.60	0.95	0.95	50.00	50.00
16	水体	湖泊	8	8	1.00	1.00	0.98	0.98	0.01	0.01
		海洋	8	8	1.00	1.00	0.98	0.98	0.01	0.01
17	草湿地	湿地	14	14	0.48	0.73	0.95	0.95	30.00	30.00
18	林木湿地									
19	稀疏植被	沙漠戈壁	25	25	0.02	0.05	0.85	0.85	10.00	10.00
20	草地冻土	冻土	18	59	0.38	0.91	0.91	0.93	16.00	15.00
21	林木冻土									
22	混合冻土									
23	裸露冻土									
24	冰雪	冰雪	55	70	0.95	0.95	0.95	0.95	5.00	5.00

注：黑体为 SD 模型数据库资料中的 5 类主要地表覆盖类型

概念,综合考虑了物理-化学-生物-社会等诸多要素对东亚季风这一复杂系统的影响。基于该模式的大量模拟研究认为其可以较好地用于东亚区域的气候、气候变化以及陆面生态系统等多领域的研究^[8,21~23]。研究区域中心位于(40°N, 105°E),经向和纬向网格数分别为 65 和 90,缓冲区取 10 个网格。模式水平分辨率 60 km,采用 Lambert 投影,标准纬度分别定位 55°N 和 15°N,垂直方向分为 23 层,顶层气压设为 100 hPa。物理参数化方案分别为 Kuo 积云对流参数化、简单冰相微物理方案、MRF 行星边界层方案以及 CCM3 辐射方案。陆面过程处理采用 BATS 参数化方案,对订正处理后的模式区域的地表覆盖类型分别与 BATS 方案的地表覆盖类型相对应,分不同的驱动情景和不同的时间序列依次进行了模拟计算。

对于模式积分需要的气象场初边值资料,选用了气候正常年份 2002 年的 NCEP 资料(2.5°×2.5°),模式积分 14 个月,从 2002 年 1 月 1 日 0 时到 2003 年 2 月 28 日 0 时,将前两个月作为模式的 Spin-up 时间,分析后 12 个月的数值计算结果。在此需要说明的是,数值方案设计中应该分别使用 1999 年的历史资料和 2010~2050 年的预测气候场资料来驱动区域气候模式,但是,未来大气环流形式存在着多种变化的可能,现阶段全球模式预测的气候预测产品都有一定的不确定性,而且对未来气候变化的预测本身也是本文所要研究的内容。同时,考虑到 1999 年是继 1997 和

1998 年之后的气候异常年,所以本文统一选取了气候正常年份 2002 年的 NCEP 资料作为常规气候态驱动场来驱动区域气候模式,以期使得数值预测的结果主要体现有序人类活动引起的土地利用变化的影响。数值模拟结果分析过程中,将 1999 年土地利用资料的模拟结果作为控制实验,通过对比不同地表覆盖类型变化情况下模拟结果的差值变化,来揭示有序人类活动引起的土地利用变化对未来气候的可能影响。

4 数值计算结果与分析

4.1 对 2002 年降水的模拟

为了检验模式方案设计是否合理,初步验证 RIEMS 模式对我国年降水量的模拟能力,首先对 2002 年的气候特征进行了模拟。得出年降水量的模拟结果及其与实况的比较如图 2 所示,观测站点包括中国及周边区域共 803 个。为便于说明,以 32°N 为界,把中国 32°N 以北的区域称为北方地区,32°N 以南(100°E 以东)的区域称为华南地区。同时,以 105°E 为界,以西为西部干旱半干旱区,以东为东部季风区。由东北地区西部及内蒙古中东部起,向西南方向延伸至河北、山西、陕西一带的区域称为农牧过渡带。比较模拟的年降水量的强度,可以看出,控制实验对我国北方地区降水的模拟结果相对于观测结果存在降水量偏高的不足,200~800 mm 之间的等值线相对于观测结果略微偏南。但模式对西部干旱半干旱区

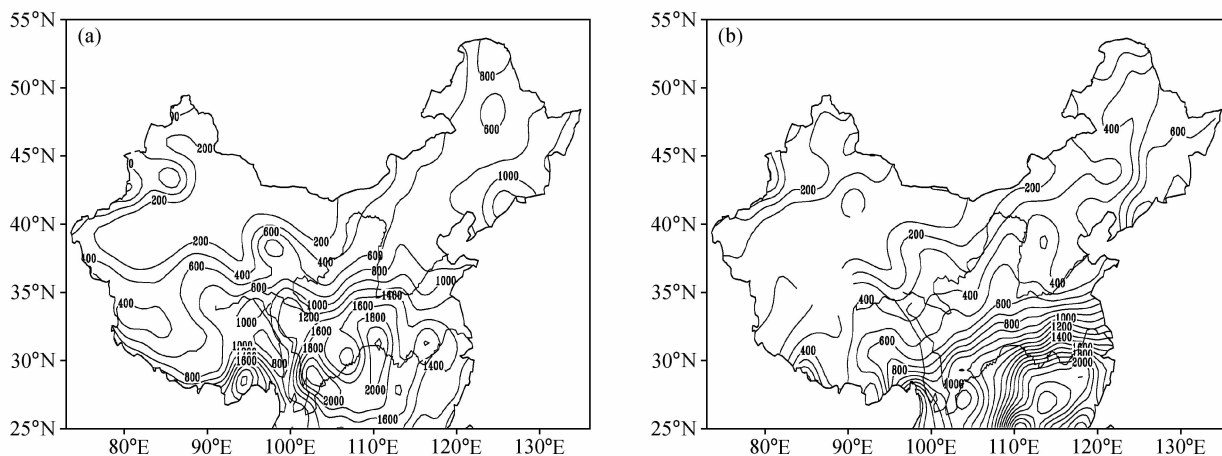


图 2 2002 年 3 月~2003 年 2 月 (a) RIEMS 模拟年降水量与 (b) 实况降水分布(单位: mm·a⁻¹)

Fig. 2 Annual precipitation distribution by (a) RIEMS simulation and (b) observation during Mar 2002 to Feb 2003 (units: mm·a⁻¹)

以及华南地区年降水量的模拟结果与观测较为接近。此外,从降水的区域分布上看,控制试验对我国降水区域分布差异有较好的描述,模拟结果显示的雨区分布与观测结果基本一致。控制试验结果不但再现了我国南北降水分布的梯度差异,同时,对我国北方地区的新疆西北部、甘肃南部以及东北东南部等区域相对于北方地区其他区域降水偏高的趋势也有一定的反映。模拟结果主要分析气候变化的相对趋势,因此,RIEMS 模式及本文的方案设计对我国的区域降水具有一定的模拟能力。

4.2 稳定发展型的预测结果

下面利用数值模式的计算结果,分析两种不同社会经济情景驱动下 SD 模型数据库的土地利用变化特征,从模拟的年降水量空间分布变化的角度,分区域讨论不同区域年降水变化的年代际特征。如图 3 所示,在稳定发展型驱动情景下,2010 年土地利用变化的主要特征是:西部干旱半干旱区沙漠和农田绿化为草地,华北地区部分的区域由森林退化为草地,华南地区有少量比例的区域由农田转变为草地(图 3a)。由此引起的气候变化表现在降水场上显示为北方地区降水量增加,其中包括新疆地区、黄河上游区域以及华北、东北中东部地区和山东半岛等区域。华南地区以及东北东部区域降水量则有所减少(图 3b)。总体上看,2010 年北方地区降水将会增加。

2020 年,模式区域的主要陆地地表覆盖类型变化较少。西部干旱半干旱区依然是沙漠化治理和退耕还草,但相对 2010 年退耕还草的力度有所下降。在山西、河南等地区城镇用地增加,河北地区少量森林被开垦为农田。东北和华南地区地表覆盖类型没有发生改变(图 3c)。与土地利用变化相对应,2020 年北方地区总体降水量基本保持总量的平衡,具体的区域分布状况为:西部地区的宁夏、陕西等绿化区域的降水量增加,其他区域降水量变化不大。在华南地区和东部季风区,降水量呈现减少的趋势,但降水减少显著的区域位于内蒙古中东部和东北地区南部(图 3d)。对比分析 2010 年的预测结果,不难看出,如果西部地区不能更好地退耕还草和进行有效的沙漠化治理,北方地区的气候变化将继续向干旱化趋势发展。

2030 年,西部干旱半干旱区土地利用没有发生变化,土地利用的主要变化出现在东部季风区。以华北地区部分的农田变成城镇用地为主要特征。同时,在内蒙古中部地区有少量草地被开垦为农田。东北地区土地利用变化比较复杂,有少量比例的区域由草地转化为森林或农田,也有少量的森林转变为城镇(图 3e)。对应复杂的地表覆盖类型变化,在东北地区的北部和南部降水有所增加,中部降水则有所减少(图 3f)。西部干旱半干旱区除新疆地区降水量变化不大以外,其周边区域包括东部季风区的降水大面积减少,华北地区城镇化用地增加的地区年降水量减少尤为明显,这说明在中国大部分区域尤其西部干旱半干旱区土地利用基本不发生变化的情形下,华北地区城镇用地的增加会使北方地区降水量减少,加剧北方地区的干旱化程度。此外,整个模式区域土地利用变化比例相对比较小,但是其对区域降水分布仍然有一定的影响,体现了区域气候环境尤其是区域降水对土地利用变化响应的敏感性。

2040 年,SD 模型所反映的中国土地利用变化比较显著,以草地转化成森林为主要特征(图 3g)。从区域分布上看,在新疆西部地区有少量草地转变为森林,内蒙古西部地区部分地表覆盖类型由草地退化为沙漠,东北地区部分草地转变为森林,林地面积增加,以(35°N, 110°E)为中心的中国中部地区草地转变为森林,农田被开发为城镇。相应的年累积降水量的变化情况为,在新疆绿化地区的降水量有所增加,内蒙古沙漠化的区域降水量减少,东北地区森林的增加使内蒙古东部和农牧过渡带的年降水有所增加(图 3h)。与 2030 年不同,对应华北城镇化区域的年降水量是有所增加的,这说明在华北地区,城市化用地增加的同时人为灌溉引起森林面积的增加,两者综合的区域效应可以增加该区域的降水量,对北方地区环境的改善是有益的。

2050 年,中国土地利用变化的总体趋势和 2040 年类似,以大面积草地转换成森林为主要特征,但林业化的比例较 2040 年明显提高(图 3i)。在东北中西部地区和华南地区大面积的草地转变为林地,其余农牧过渡带的西侧林地增加,东侧城镇增加。沿着新疆和内蒙古地区的国境线附近,草地退化,沙漠面积有所扩大,虽然在新疆北部

地区有少量的草地转变为林地,但西部地区总体呈现沙漠化扩大趋势。由此引起的年降水量的变化情景为:东北北部地区降水量增加,中国其他地区降水量大面积减少,以华北和中国中部地区

降水减少最为明显(图 3j)。与 2040 年比较分析可以看出,华南地区林地面积的增加,尤其是西部地区荒漠化加剧会引起中国北方以及中部地区降水量的大面积减少。

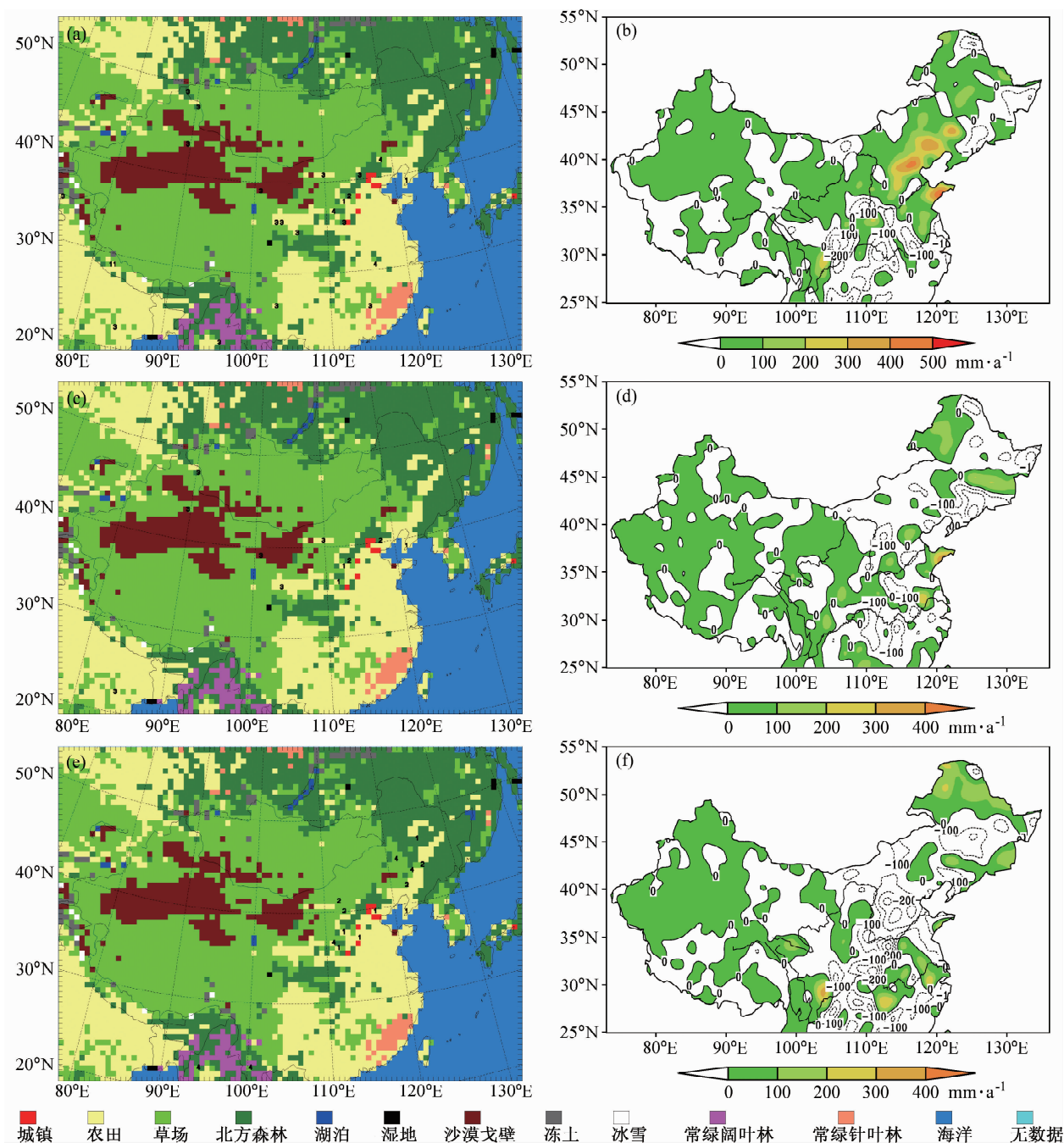
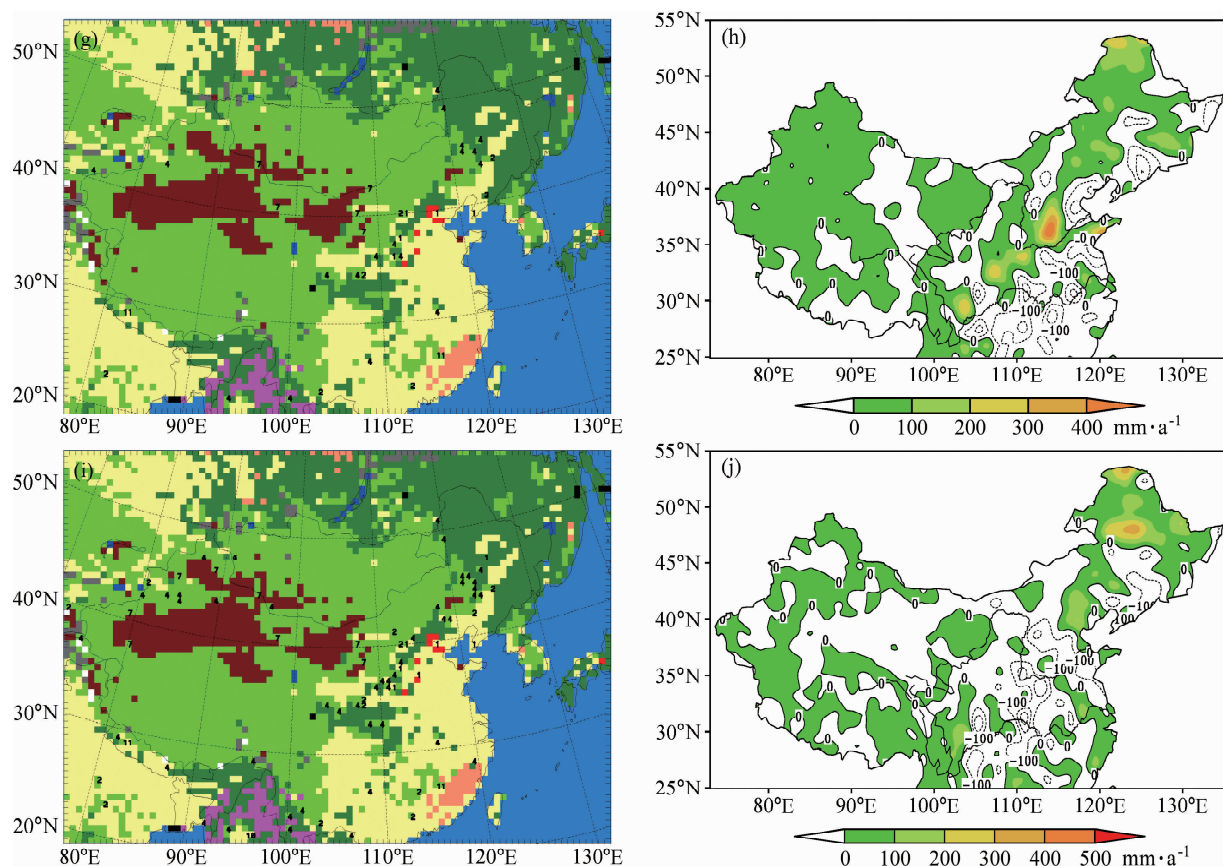


图 3 稳定发展型预测结果相对于 1999 年的土地利用(左列)及年降水量(右列)变化:(a)、(b) 2010 年;(c)、(d) 2020 年;(e)、(f) 2030 年;(g)、(h) 2040 年;(i)、(j) 2050 年(单位: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

Fig. 3 Land use change predicted by the Social Economic Dynamic Model (left panel) and corresponding precipitation change (right panel) compared with 1999 under stable development scenery : (a), (b) 2010; (c), (d) 2020; (e), (f) 2030; (g), (h) 2040; (i), (j) 2050 (units: $\text{mm} \cdot \text{a}^{-1}$)

图 3 (续)
Fig. 3 (Continued)

4.3 高速发展型的预测结果

图 4 给出了在高速发展型驱动情景下，未来 50 年中国陆地主要区域土地利用变化以及对应情形所预测的年累积降水量分布的差异。

在该驱动情景下，2010 年中国土地利用变化以西部干旱半干旱区的沙漠和农田绿化为草地为主要特征，华北地区部分区域由农田转变为森林和城镇，华南地区部分农田转变为森林或草地，东北地区 120°E 以东的区域土地利用没有发生改变（图 4a）。对应的气候变化反映在降水上表现为：新疆、甘肃东部以及宁夏等西北地区降水增加，河套地区南部、东北地区北部以及内蒙古东部地区降水也有增加，东北北部地区降水增加但其东南部区域降水减少，华南地区降水减少（图 4b）。与稳定发展型同时期土地利用变化的主要差异在于河北、山西一带的农牧过渡带森林退化为草地的比例稍低，由此导致了相应区域年累积降水的增加，这说明农牧过渡带森林退化为草地会增加农牧过渡带的年降水量。

2020 年，北方地区的河北、山西和陕西等中西部地区以及华南地区大面积农田绿化为草地，西部干旱半干旱区土地利用基本没有发生改变，东北北部少量比例的区域由农田或森林转变为草地（图 4c）。在此情形下，上述北方地区的绿化区域的降水量明显增加，东北北部及东部农田减少区域的降水量略有增加。在西北、东北和华南区域降水则均不同程度的减少，以华南地区年降水量减少最显著，其次是东北中部区域（图 4d）。从总的土地利用变化程度分析，2020 年中国草地面积增加最多，但由于其区域分布比较集中，因此气候变化的区域性效应比较明显。由此引起的年降水变化虽然使北方地区的中西部地区降水量增加，但同时也使西北干旱半干旱区域和东北区域降水量减少，其总体效应并没有使北方地区干旱化得到缓解。这显示了在以往土地利用变化的敏感性试验中，对土地利用变化敏感区域采用人为给定的地表覆盖类型替换原有的多种地表覆盖类型，夸大了土地利用变化的方案在设计上的不足。

同时也说明要改善北方干旱化环境,从土地利用的角度看,必须要在华北退耕还草的基础上,对西部荒漠化地区进行有效的治理,同时要增加东北地区的林地面积。

2030 年,模式主要区域地表覆盖类型变化与 2010 年相似,其降水分布差异也不大。不同之处在于整个模式区域退耕还林(草)的面积有所增

加,东北西部有少量农田和草地转变为森林,华北地区和东北中部城市用地增加(图 4e)。与 2010 年相比,降水分布变化主要是东北的西部和东部地区降水有所增加,华北地区降水量略有增加,其他区域降水变化较小(图 4f)。这说明东北林地面积的增加以及该区域城市面积的增加对年降水量的增加是有益的。在西部地区以及华北退

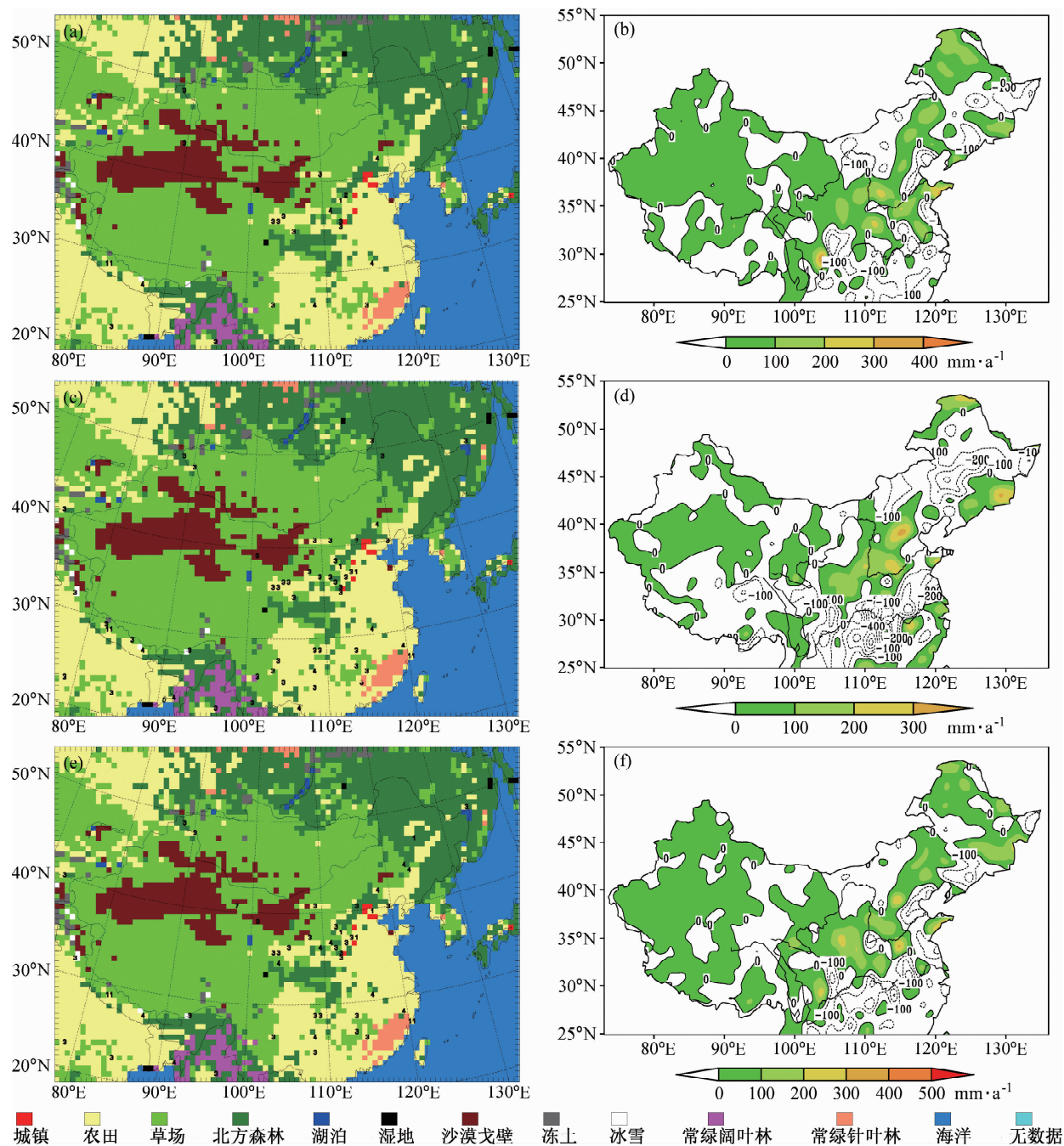
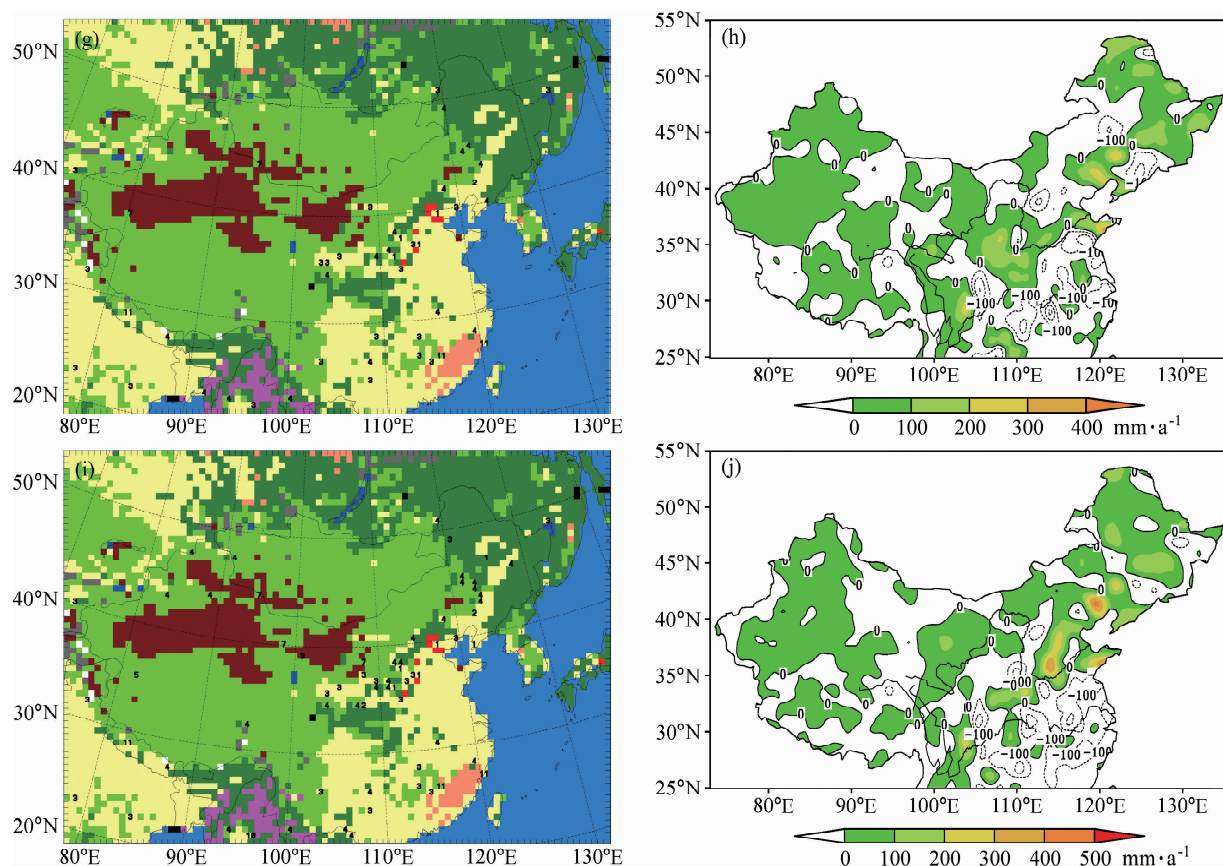


图 4 同图 3, 但为社会经济模型高速发展情景

Fig. 4 Same as Fig. 3, but for high development scenery of Social Economic Dynamic Model

图 4 (续)
Fig. 4 (Continued)

耕还草的背景下, 华北城镇面积的增加可以增加该地区的降水量。

2040 年, 对应西部小范围区域由草地退化为沙漠, 沙漠面积的扩大使该区域降水减少区域的面积扩大。由于过渡带附近区域的部分草地或农田转变为森林, 地处农牧过渡带的河套南部地区、山西以及东北地区的降水增加。华北地区有少量农田转变为城市用地, 华南地区则有大部分农田绿化为草地, 南方地区的东南部又有少量农田转变为森林 (图 4g), 总体效应使华北地区和华南地区降水减少 (图 4h)。与 2030 年相反, 在西部地区荒漠化面积扩大以及华南地区部分区域森林面积增加的背景下, 华北地区城镇用地的增加会减少该区域的年总降水量。

2050 年, SD 模型所给出的中国土地利用变化较为复杂 (图 4i)。新疆北部部分地区由草地转变为森林, 内蒙古西部地区少部分区域由草地退化为沙漠, 东北地区森林和城市面积增加, 农牧过渡带的森林面积增加, 农牧过渡带以东的河北、

山西等地的城市面积增加的同时也有部分的农田转换为草地, 华南地区大量农田转变为草地。对应的降水变化分布状况为: 甘肃北部内蒙古西部地区降水减少, 华北以及东北地区降水增加, 华南地区降水减少 (图 4j)。这反映了区域降水对土地利用的变化的敏感性, 对应着土地利用变化的复杂性, 年降水量也表现出明显的局地性特征。

4.4 稳定发展型与高速发展型预测结果的综合比较

对比图 3 和 4 的结果不难看出, 区域气候变化尤其是区域降水对土地利用变化的响应比较敏感, 模式区域内所占比例不多的土地利用变化即能引起该区域年降水量的分布产生一定比例的改变, 如图 3 中 2020~2030 年的模拟结果。在东北地区、内蒙古荒漠地区以及农牧过渡带区域, 土地利用变化的区域性气候效应尤为显著, 如图 3 中 2020 年华北地区的城市面积增加的气候效应, 2040 年内蒙古西部地区荒漠化的气候效应, 以及图 4 中 2030~2040 年东北地区森林面积改变的气

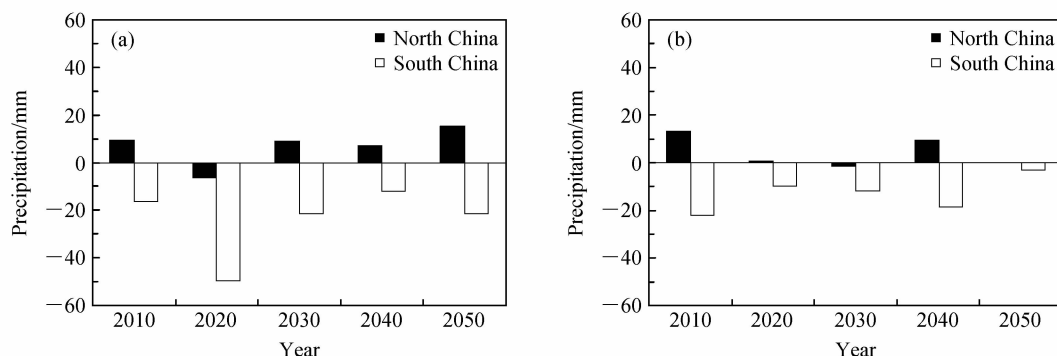


图5 高速发展型 (a) 与稳定发展型 (b) 区域平均的区域年降水量偏差

Fig. 5 Area averaged precipitation variation in North China and South China under stable (a) and high-speed (b) development scenery

候效应等等。此外,土地利用变化的气候效应不仅局限于土地利用发生改变的区域,土地利用没有发生改变区域的气候条件也会有所响应,如图3中2010~2020年、图4中2010年的东北地区,图3中2030年与图4中2020年的西部干旱、半干旱区等。所以,研究土地利用变化对区域环境的影响,要综合考虑土地利用变化的区域分布以及各个区域的变化程度,这是以前开展的针对土地利用变化引起的区域气候变化的敏感性试验所忽略的。

图5给出了高速发展型与稳定发展型预测结果在北方地区和华南地区的区域平均年降水量的时间演变。图中显示,仅考虑土地利用的变化,未来50年华南地区年降水量将呈现减少的趋势,北方地区的年降水量则会由于不同的社会经济发展情景而有所差异。在社会经济高速发展情景下,北方地区的年降水量在2010年左右将呈现增长的趋势,虽然在2020年左右出现年降水量异常减少,但年降水量增长的趋势会持续到2050年(图5a)。在社会经济稳定发展情形下,北方地区年降水量增加的趋势并不明显,仅在2020年和2040年该区域的年降水量可能会有所增加。该发展情景下预测的北方地区年降水量变化的波动幅度比较大,呈现增长和减少交替的规律(图5b)。由于水资源短缺是制约北方地区经济发展的重要因素,所以高速发展型情景对中国的经济发展和气候环境是有利的。图1对土地利用变化的分析显示,两种经济发展情景下森林面积都是先部分减少后逐步增加的,主要差异在于稳定发展型情景下农田比例基本不变化,森林和草地面积的转换

是土地利用变化的主要特征,而高速发展型情景下森林面积的增加还部分地来源于农田的退耕。由此不难看出,森林面积的增加对改善北方地区的气候环境有益,但维持农田面积不变,以大规模的牺牲草地面积来保持森林增长的举措是不恰当的,在保持森林增长的同时,退耕还林(草)的措施值得继续倡导。

综合分析图3~5可以看出,稳定发展型的2010年和2050年的预测结果分别是中国未来气候变化较优和较劣的两种土地利用变化的配置。下面通过详细分析该两种情形下的土地利用变化配置及其引起的区域温度、流场、感热通量和潜热通量的变化,来探讨土地利用变化影响区域气候的机理特征。

4.5 土地利用变化的区域配置及其对气候变化影响的原因分析

稳定发展型情景下2010年的预测结果显示:华南地区降水减少,区域面积平均的降水量减少22 mm左右,北方地区年降水量大面积增加,区域面积平均的降水量增加12 mm左右,该情形下北方地区降水量增加,干旱化趋势得到明显改善。从前面对土地利用变化的趋势分析看,在该情景下,首先是西部干旱半干旱区在退耕还草的同时沙漠化区域得到治理,沙漠面积减少,使该区域的地表反照率减少,粗糙度增大,覆盖度增加,叶面积指数增加。其次是华北地区草地面积增加,其中包括森林退化和农田绿化,华南地区的部分农田绿化为草地,使这两个区域粗糙度减少,地表反射率增加。再者,过渡带东侧的东北地区附近森林略有增加,粗糙度增加,地表反射率减少。

这种西部干旱半干旱区沙漠化治理和退耕还草，东北及过渡带东部地区林地增加，华北以及华南地区退耕还草的土地利用变化的配置促使北方降水增加，南方地区降水减少。季风性气候的特征决定了中国大部分区域降水集中于夏半年（6~11月），图6表明，伴随地面降水北增南减的趋势，相应的低层大气温度是南增北减。南方地区温度升高尤为明显，强度达到 0.45°C ，而且垂直方向上从近地层一致延伸到300 hPa附近的高空，北方地区近地层降温为 0.25°C 左右，垂直方向上近延伸到600 hPa（图6a）。地表粗糙度的改变会使地表面摩擦改变，进而影响大气的环流场。从夏半年850 hPa平均流场的变化（图6b）看出，西北及华北过渡带地区存在两个明显的气旋式环流，华南地区则出现明显的反气旋式环流，东部季风区的两个偏差环流在 35°N 附近交汇，从而 100°E 以东的偏南风把西南暖湿气流不断向北方地区输送，为降水的增加提供了大量的水汽保障。从图6c夏半年平均的感热通量偏差和图6d夏半年平均

的潜热通量偏差也可以看出，北方地区近地面感热通量是减少的，潜热通量是增加的，华南地区则相反。也主要是由于以上因素构成了该情景下2010年区域降水分布的差异。

稳定发展型情景下2050年的预测结果显示：西部干旱半干旱区的年降水量减少，东部季风区东北北部地区以外区域的年降水量也是减少的，中国大陆主要区域尤其是华北地区及河南、山东等华东地区降水量减少更加明显，部分地区年降水量减少超过150 mm，虽然从总降水量上看北方地区和华南地区变化不大，但北方地区呈现明显的干旱化趋势。从前面土地利用的变化上看，降水减少的原因主要有3个，一是西部干旱、半干旱区北部大量草地退化为沙漠，使该地区地表反照率增加，粗糙度减少。二是华南地区草地变化为森林，使华南地区粗糙度增加，地表反射率减小。三是华北地区森林增加，粗糙度增加，蒸发加强，同时城镇面积增加，粗糙度增加，土壤湿度减少。西部干旱、半干旱区沙漠化面积扩大，

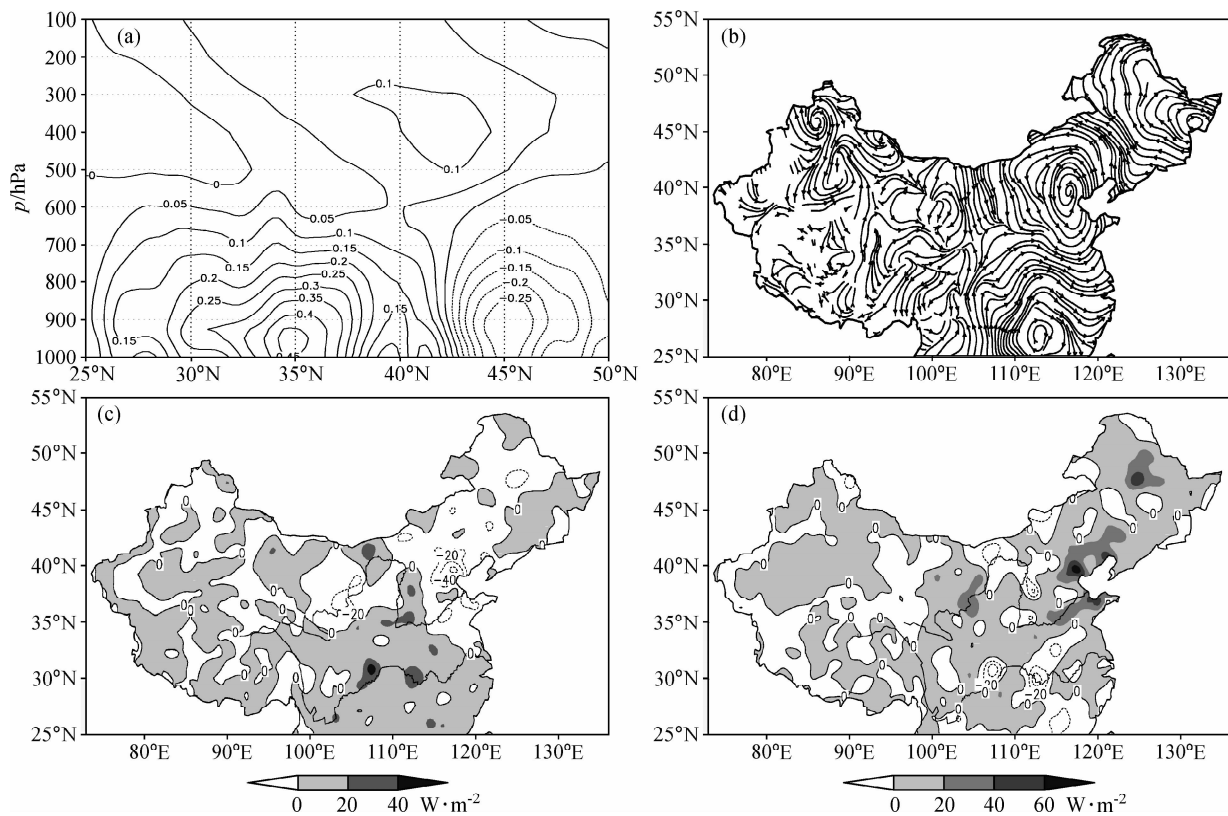


图6 稳定发展型2010年夏半年各气象要素的变化：(a) 温度（单位： $^{\circ}\text{C}$ ），(b) 850 hPa 风场，(c) 感热通量，(d) 潜热通量
Fig. 6 Variations of several factors under stable development scenery of Social Economic Dynamic Model about 2010 summer: (a) temperature (units: $^{\circ}\text{C}$), (b) 850 hPa wind, (c) sensible heat flux, (d) latent heat flux

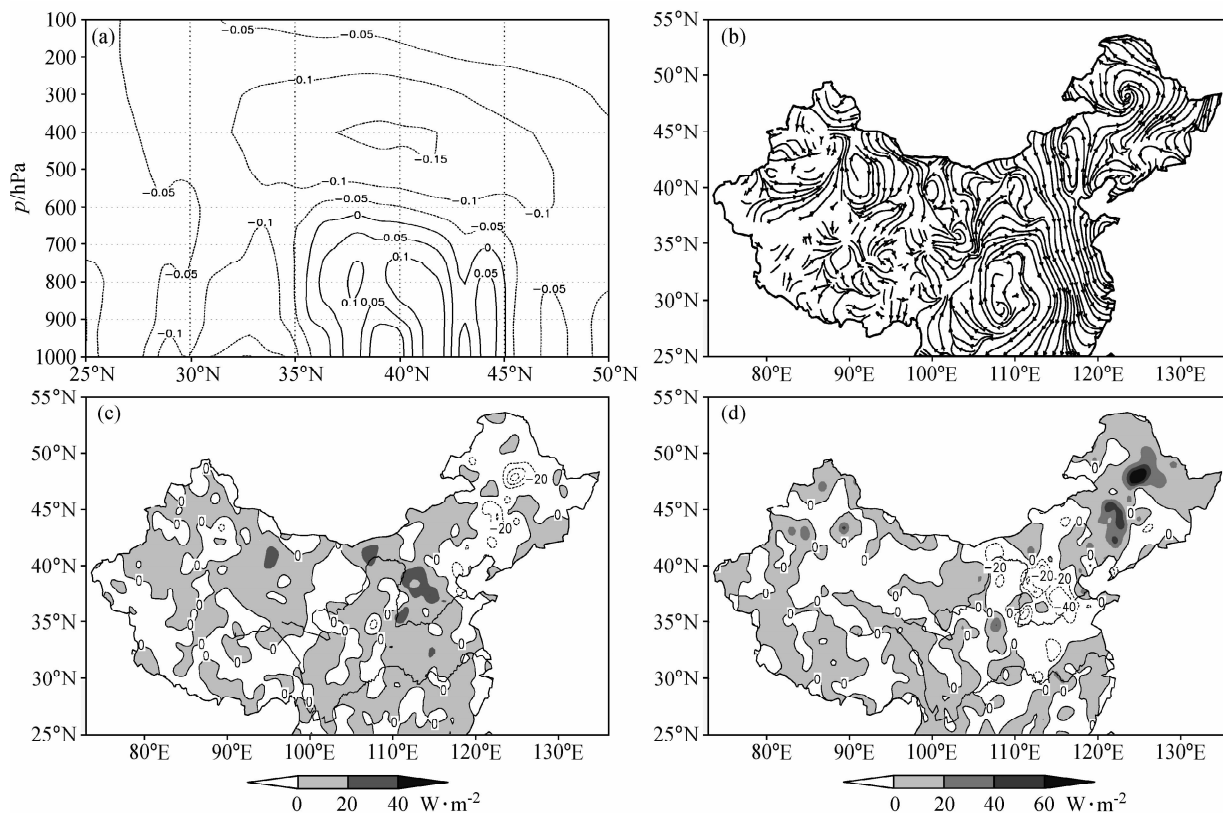


图7 同图6, 但为社会经济模型稳定发展情景 2050 年结果

Fig. 7 Same as Fig. 6, but for year 2050 under stable development scenery of Social Economic Dynamic Model

华北地区草地面积减少, 城市 and 森林面积增加, 华南地区森林增加的这种土地利用变化配置导致了中国大部分地区降水量的减少。图 7 显示, 对应北方地区的干旱化形势, 北方地区低层大气的温度升高, 南方地区大气温度降低, 强度总体比较弱, 升降温的变化都是 0.1°C 左右 (图 7a)。与图 6a 一致, 南方地区低层温度的变化可以影响到 300 hPa 的高空, 北方地区温度升高的趋势只延伸到 600 hPa 高层。从夏半年 850 hPa 平均流场的变化 (图 7b) 看出, 华南地区出现一反气旋式环流, 其位置较图 6b 偏西, 而且其东侧是比较强的偏北气流。西部新疆地区也出现一弱的反气旋性环流, 东北地区北部为气旋性环流。整个偏差流场的配置和降水的偏差是一致的。从夏半年平均的感热通量偏差 (图 7c) 和潜热通量偏差 (图 7d) 可以看出, 北方地区近地面感热通量增加, 潜热通量减少, 华南地区感热通量和潜热通量变化不大。所以, 地面降水、温度及低层流场的变化主要是由于地气之间的能量和水分

交换引起的。

5 结论与讨论

利用 RIEMS 模式, 结合社会经济学模型对中国未来 50 年土地利用变化的预测资料, 主要从降水的时空变化方面探讨了未来中国土地利用变化可能引起的气候效应, 并对土地利用变化引起气候变化的机理进行了研究。在此基础上, 基于数值模拟的结果, 对我国土地资源的合理开发利用进行了初步探讨, 得出的主要结论如下:

(1) 区域气候变化尤其是区域降水对土地利用变化的响应较为敏感, 而且土地利用变化的气候效应不仅局限于土地利用发生改变的区域, 所以研究土地利用变化对区域环境的影响, 要综合考虑土地利用变化的区域分布以及各个区域的变化程度, 在长时间的气候预测 (模拟) 过程中, 在气候模式中耦合社会经济学模型是必要的。

(2) 西部干旱、半干旱区沙漠绿化, 增加东

北及内蒙古西部地区的森林面积, 华北地区退耕还草等措施对北方地区年降水量的增加是有益的。相反, 对应西部沙漠面积扩大, 华北地区城市用地增加, 东北及内蒙古西部地区林地退化以及华南地区林地增加等土地利用的变化, 北方的干旱化趋势会进一步加剧。华北地区城市化用地增加的同时人为灌溉引起森林面积的增加, 两者综合的区域效应可以增加该区域的年降水量。

(3) 仅考虑土地利用的变化, 未来 50 年华南地区年降水量将呈现减少的趋势, 北方地区的年降水量在 2010 年左右将呈现增长的趋势, 并且年降水量增长的趋势可能会持续到 2050 年。对于北方地区降水来说, 社会经济高速发展型情景要优于经济稳定发展型情景。

(4) 地面降水、温度及低层流场的变化主要是由于地气间的能量和水分交换引起的, 土地利用变化引起地表反照率、粗糙度等参数的变化, 通过下垫面不同地表覆盖类型与大气能量和水分交换影响大气的流场和温度等要素, 进而改变区域的气候环境。

有序人类活动既可以破坏地表生态环境, 也可以改善地表生态环境, 通过预测未来土地利用变化可能导致的气候效应, 对认识有序人类活动可能引起的中国区域气候的影响有非常重要的指导意义。应当指出, SD 模型给出的土地利用资料仅是未来情景的一种可能的预测产品, 资料本身具有较大的不确定性。同时, RIEMS 模式在预测降水方面也有许多有待进一步改进的地方, 受资料的限制, 试验的设计仅利用了相同的气候正常年份的背景场资料来驱动区域气候模式, 未能以全球增暖为背景研究未来土地利用变化情景对气候系统反馈的综合效应。因此, 本文所开展的工作仅为对未来区域降水可能情景的一种虚拟试验, 得到的关于未来我国区域降水的演变规律也有一定的不确定性。此外, 本文仅考虑了对有序人类活动导致的土地利用的变化, 对有序人类活动引起的气溶胶、温室气体等方面的气候效应进行研究还有大量的工作要做。由于土地利用对气候的反馈过程在时间、空间以及和其他过程相互作用机理上的复杂性, 对这种反馈作用还有待于大量的试验来进一步探讨。

参考文献 (References)

- [1] Charney J G, Quirk W J, Chow S H, et al. A comparative study of the effects of albedo change on drought in semiarid regions. *J. Atmos. Sci.*, 1977, **34** (9): 1366~1385
- [2] Pinty J P, Mascart P, Richard E, et al. An investigation of mesoscale flows induced by vegetation inhomogeneities using an evapotranspiration model calibrated against HAPPEX-MOBILHY data. *J. Appl. Meteor.*, 1989, **28**: 976~992
- [3] Peter M C, Richard A B, Chris D J, et al. Acceleration of global warming due to carbon-cycle feedbacks in a coupled climate model. *Nature*, 1998, **408**: 184~187
- [4] Wei H L, Fu C B. Studies of the sensitivity of a regional model in response to land cover change over Northern China. *Hydrological Processes*, 1998, **12**: 2249~2265
- [5] 周广胜, 王玉辉, 白莉萍, 等. 陆地生态系统与全球变化相互作用的研究进展. *气象学报*, 2004, **62** (5): 692~707
Zhou Guangsheng, Wang Yuhui, Bai Liping, et al. Study on the interaction between terrestrial ecosystems and global change. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2004, **62** (5): 692~707
- [6] 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. *高原气象*, 1999, **8** (3): 416~424
Lü Shihua, Chen Yuchun. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 1999, **8** (3): 416~424
- [7] 钟中, 王汉杰, 熊文愈, 等. 三北防护林体系区域环境效应的数值模拟 (I) 区域环境模式简介和检验. *解放军理工大学学报*, 2001, **2** (1): 7~12
Zhong Zhong, Wang Hanjie, Xiong Wenyu, et al. Numerical study of environmental effect of the three north shelter belts system. Part I: Model description and verification. *Journal of PLA University of Science and Technology* (in Chinese), 2001, **2** (1): 7~12
- [8] Shi Weilai, Wang Hanjie. The regional climate effects of replacing farmland and re-greening the desertification land with forest or grass in west China. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (1): 45~54
- [9] 王兰宁, 郑庆林, 宋青丽. 青藏高原中西部下垫面对东亚大气环流季节转换影响的数值模拟. *高原气象*, 2003, **22** (2): 179~184
Wang Lanning, Zheng Qinglin, Song Qingli. Numerical simulation of the influences of west-central Qinghai-Xizang plateau on East Asia seasonal transition. *Plateau Meteorology* (in Chinese), 2003, **22** (2): 179~184
- [10] 郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 植被变化对中国区域气候

- 的影响 I: 初步模拟结果. 气象学报, 2002, **60** (1): 1~16
- Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. The effects of vegetation change on regional climate I: Simulation results. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2002, **60** (1): 1~16
- [11] 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. 气象学报, 2005, **63** (5): 613~621
- Ding Yihui, Li Qiaoping, Dong Wenjie. A numerical simulation study of the impacts of vegetation changes on regional climate in China. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2005, **63** (5): 613~621
- [12] 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟. 气象学报, 2006, **64** (3): 257~270
- Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. A numerical simulation on impact of historical land use changes on regional climate in China since 1700. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 2006, **64** (3): 257~270
- [13] 符淙斌, 袁慧玲. 恢复自然植被对东亚夏季气候和环境影响的一个虚拟试验. 科学通报, 2001, **46** (8): 691~695
- Fu Congbin, Yuan Huiling. A virtual numerical experiment to understand the impacts of recovering natural vegetation on the summer climate and environmental conditions in East Asia. *Chinese Science Bulletin* (in Chinese), 2001, **46** (8): 691~695
- [14] 符淙斌, 延晓冬, 郭维栋. 北方干旱化与人类适应—以地球系统科学观回答面向国家重大需求的全球变化的区域响应和适应问题. 自然科学进展, 2006, **16** (10): 1216~1223
- Fu Congbin, Yan Xiaodong, Guo Weidong. The aridification in Northern China and human adaptation—To answer the regional response and adaptation issues associated with global change facing the directly demand of nation in the manner of the earth system view. *Advance in Physical Sciences* (in Chinese), 2006, **16** (10): 1216~1223
- [15] 叶笃正, 符淙斌, 季劲钧, 等. 有序人类活动与生存环境. 地球科学进展, 2001, **16** (4): 453~460
- Ye Duzheng, Fu Congbin, Ji Jinjun, et al. Orderly human activities and subsistence environment. *Advance in Earth Sciences* (in Chinese), 2001, **16** (4): 453~460
- [16] 高学杰, 罗永, 林 Wantao, 等. Simulation of effect of landuse change on climate in China by a regional climate model. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20** (4): 583~592
- [17] 符淙斌, Frits P V. 季风亚洲区域集成研究科学计划. 北京: 气象出版社, 2007. 3~8
- Fu C B, Frits P V. *Initial Science Plan of the Monsoon Asia Integrated Regional Study* (in Chinese). Beijing: Chinese Meteorological Press, 2007. 3~8
- [18] Fu C B, Wei H L, Qian Y. Documentation on regional integrated environmental model system (RIEMS). TEA COM Science Report No. 122. 2000
- [19] 何春阳, 史培军, 李景刚, 等. 中国北方未来土地利用变化情景模拟. 地理学报, 2004, **59** (4): 599~607
- He Chunyang, Shi Peijun, Li Jinggang, et al. Scenarios simulation land use change in the northern China by system dynamic model. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2004, **59** (4): 599~607
- [20] 黄庆旭, 史培军, 何春阳, 等. 中国北方未来干旱化情景下的土地利用变化模拟. 地理学报, 2006, **61** (12): 1299~1310
- Huang Qingxu, Shi Peijun, He Chunyang, et al. Modeling land use change dynamic under different acidification scenarios in Northern China. *Acta Geographica Sinica* (in Chinese), 2006, **61** (12): 1299~1310
- [21] Xiong Zhe, Wang Shuyu, Xing Zhaomei, et al. Analysis of simulation heavy rain over the Yangtze river valley during 11—30 June 1998 using RIEMS. *Adv. Atmos. Sci.*, 2003, **20**: 815~824
- [22] 熊喆. 区域气候模式 RIEMS 对东亚气候的模拟. 气候与环境研究, 2004, **9** (2): 251~260
- Xiong Zhe. The multiyear surface climatology of RIEMS over East Asia. *Climatic and Environmental Research* (in Chinese), 2004, **9** (2): 251~260
- [23] Fu C B, Wang S Y, Xiong Z, et al. Regional climate model inter-comparison project for Asia. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 2005, **86** (2): 257~266