

曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2010. 土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究 [J]. 大气科学, 34 (4): 726–736. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2010. Sensitivity research of the effects of land use change on climate and runoff over the Yangtze River basin [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 34 (4): 726–736.

土地利用变化对长江流域气候及水文过程影响的敏感性研究

曹丽娟¹ 张冬峰² 张勇² 董文杰³

1 国家气象信息中心, 北京 100081

2 国家气候中心, 北京 100081

3 北京师范大学地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

摘 要 使用区域气候模式 (RegCM3) 和大尺度汇流模型 (LRM), 研究土地利用/植被覆盖变化对长江流域气候及水文过程的影响。RegCM3 嵌套于欧洲数值预报中心 (ECMWF) 再分析资料 ERA40, 分别进行了中国区域在实际植被和理想植被分布情况下两个各 15 年 (1987~2001 年) 时间长度的积分试验。随后, RegCM3 两个试验的输出径流结果分别用来驱动 LRM, 研究土地利用/植被覆盖变化对长江流域河川径流的影响。研究结果指出, 中国当代土地利用变化对长江流域降水、蒸散发、径流深及河川径流等水文气候要素的改变较大, 对气温的改变并不明显。土地利用变化引起长江干流河川径流量在夏季 (6~8 月) 有所增加, 并且越向下游增加幅度越大, 其中大通站径流量增加接近 15%。总体而言, 土地利用改变加剧了长江流域夏季水循环过程, 使得夏季长江中下游地区降水增多, 径流增大。

关键词 土地利用变化 区域气候模式 长江流域

文章编号 1006-9895 (2010) 04-0726-11

中图分类号 P461

文献标识码 A

Sensitivity Research of the Effects of Land Use Change on Climate and Runoff over the Yangtze River Basin

CAO Lijuan¹, ZHANG Dongfeng², ZHANG Yong², and DONG Wenjie³

1 National Meteorological Information Centre, Beijing 100081

2 National Climate Center, Beijing 100081

3 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Beijing Normal University, Beijing 100875

Abstract A regional climate model (RegCM3) and a large-scale routing model (LRM) are employed to investigate the effects of land use and land cover change on climate and runoff of the Yangtze River basin in China. The RegCM3 is nested within ERA40 reanalysis data. Two 15-year simulations (1987–2001), one with current land use and the other with potential vegetation cover without human intervention over China, are conducted. The runoff outputs of the RegCM3 simulations are used to drive the LRM to study the land use and land cover change on streamflow of the Yangtze River. The analysis shows that the current land use changes have large influences on the

收稿日期 2009-03-09, 2010-03-10 收修定稿

资助项目 国家自然科学基金资助项目 40805060, 公益性行业 (气象) 科研专项项目 “中国气候系统协同观测与预测研究” 05 课题 03 专题资助

作者简介 曹丽娟, 女, 1980 年出生, 博士, 主要从事气候变化及其影响研究。E-mail: caolj@cma.gov.cn

hydrological variables such as precipitation, evapotranspiration, surface runoff depth and streamflow, but have not evident influences on surface air temperature. The land use changes lead to increased streamflow over the main stream of the Yangtze River in summer and the increment is more in the lower reaches, while at Datong station the change rate of the streamflow is close to 15%. Overall the land use changes in the Yangtze River basin may intensify the hydrological cycle of the basin, which should increase summer precipitation and streamflow.

Key words land use change, regional climate model, the Yangtze River basin

1 引言

全球变化是目前和未来人类和社会发展面临的共同问题。土地利用/土地覆盖变化与全球的气候变化、生物多样性的减少、生态环境演变以及人类与环境之间相互作用的可持续性等问题密切相关,是目前全球环境变化的主要原因(Walker and Steffen, 1997)。随着全球气候变暖和人类开发利用自然资源的强度增大,中国区域生态、环境已出现明显退化或恶化,对人类的生存与发展构成严重威胁。土地利用/土地覆盖变化研究计划(LUCC)明确指出,由于人类对土地资源利用引起的地表覆盖状况的变化不仅有局地 and 区域的影响,而且通过它与天气气候、生态过程、生物地球化学循环过程等的相互作用,产生重要的全球尺度的影响。许多分析表明,作为气候系统下垫面,地表植被类型的改变,通过粗糙度、反照率、叶面积指数等的改变影响地面环流和能量平衡,最终导致地区水分循环和热量循环的改变(李巧萍等, 2006; 高学杰等, 2007)。

在土地利用/植被覆盖变化对气候的影响方面,我国已经开展了许多研究工作,如使用全球或区域气候模式分析内蒙古草地荒漠化(郑益群等, 2002),西北干旱区植被退化及绿化(范广洲等, 1998; 吕世华等, 1999),土地利用对中国区域尺度气温和降水变化等的影响(Gao et al., 2003; 张井勇等, 2005),植被覆盖对地表过程影响模拟研究(陈峰等, 2009; 曾红玲等, 2010)。土地利用变化通过其对气候等的影响,在流域和区域尺度作用于水文系统(Potter, 1991),导致水资源变化,从而对流域生态、环境以及经济发展等多方面产生显著影响。流域是与水有关的区域尺度研究的最佳单元,因为它代表了水与自然特征、人类水土资源利用相关的物质迁移的自然空间综合体(Lahmer et al., 2001),因此近几十年来,流域尺度上LUCC的

水文效应与洪水响应成为人们普遍关注的焦点。其中森林水文效应受到更多的关注(Keppeler and Zimmer, 1990; 陈军锋等, 2001)。流域植被覆盖变化对水文的影响,所得结论因流域面积、气候、植被类型等因素的不同而有差异。许多学者采用水文模型模拟手段来评估土地覆被变化对流域水文过程的影响,有些学者还专门研制了土地覆被变化水文效应评估的模型(Karvonen et al., 1999)。

长江流域洪水灾害是我国频率高、为患严重的自然灾害之一(施雅风等, 2004)。全球变暖,降水增加,导致长江流域洪涝灾害频繁发生,造成的经济损失越发严重,已严重制约和影响了本区域经济和社会的可持续发展(任国玉等, 2008)。人类活动通过森林植被的破坏、干支流水库的兴建、围湖垦殖、洲滩开发及沿江泵站排涝等影响长江洪水(程海云等, 1999)。已有大量研究集中于历史资料分析及对洪水事件的模拟上(如 Xiong et al., 2003; 施雅风等, 2004; 姜彤等, 2005; Zhang et al., 2005)。针对长期以来关于森林的水文效应的争论,陈军锋等(2004)选择长江上游的一个中等流域,利用集总式和分布式水文模型分别模拟了该流域气候波动和土地覆被变化对其水文的影响。

由于区域气候模式比全球气候模式有更高精度的空间分辨率,能够更加细致地描述地形和海陆分布以及地表植被分布特征,更好地刻画气候的区域特征,使得区域气候模式的模拟能够更加接近于观测。目前,区域气候模式RegCM3对中国地区气候的模拟能力已经得到证实,张冬峰等(2005, 2007)研究结果表明,RegCM3模式较好地模拟了中国地区地面气温和降水的年、季空间分布特征,对主要雨带的季节性南北移动也有较好的模拟,此外,它对气温和降水年际变率的模拟也较为合理,模拟误差主要是对气温模拟的冷偏差,对降水模拟总体而言北方偏大、南方偏小。高学杰等(2007)研究了中国当代土地利用对区域气候的影响,重点分析了

对气温和降水的影响。曹丽娟等(2008)利用 RegCM3 与大尺度汇流模型连接,研究了土地利用变化对黄河流域径流的影响,结果表明:当代土地利用变化引起的植被退化,造成黄河流域年平均降水和径流量大幅度减少,并且越向下游减少幅度越大。由于长江流域与黄河流域在流域空间分布、气候特点、水文特征等方面都大不相同,在土地利用变化的情景下,长江流域表现出与黄河流域不同的区域响应特征,有必要针对长江流域进行详细分析,研究土地利用变化对长江流域气候及水文过程的影响,以获得该流域气候及水文过程对土地利用变化的响应,将对该流域水资源的开发利用及促进区域经济发展等方面都具有重要意义。本文在前期研究工作的基础上,首先分别进行了长江流域在实际植被覆盖和理想植被覆盖情况下的长时间(15 年)数值模拟试验,随后应用试验中模式输出径流结果同大尺度汇流模型(LRM)单向连接,通过对结果的对比分析,研究土地利用/植被覆盖变化对长江流域气候及水文过程产生的影响,重点分析植被覆盖变化后,长江流域气温、降水、蒸散发、径流深在年、冬季和夏季平均情况下的变化,以及河川径流量在植被覆盖改变之后发生的变化。

2 研究区域和试验设计

长江发源于青藏高原唐古拉山脉主峰各拉丹冬雪山西南侧,全长 6300 km,总落差 5400 m 左右,流域位置介于(24°30′~35°45′N, 90°33′~122°25′E)之间,处于欧亚大陆的东岸,东西横贯约 3000 km,南北纵跨约 1100 km,地理环境复杂。长江流域多年平均降水量为 1100 mm 左右,降雨集中在夏秋季,5~10 月降雨量约占全年的 70%~90%。地区分布很不均匀。长江基本属雨洪河流,融雪径流比重很小,汛期(4~10 月)长达 7 个月,其中 6、7、8 月降雨量最多。长江上游地区,各支流的洪灾一般具有洪峰高、来势猛、历时短的特点。流域的洪水主要由暴雨形成,洪水出现时间与暴雨季节一致,干流为 5~10 月,以 7~8 月最为集中,汉江为 7~10 月。长江作为我国第一大河,其径流量居全国河流之首,占全国总径流量的 35.1%。

本文使用意大利国际理论物理中心(the Abdus Salam International Center for Theoretical Physics)区域气候模式 RegCM3,分别进行了中国

区域在实际植被覆盖(侯学煜,1982)和理想植被覆盖(Holdridge,1967;张新时,1993)情况下,1986 年 10 月 1 日到 2002 年 1 月 1 日,共计 15 年 3 个月的连续长时间积分,其中 1986 年 10~12 月作为模式初始化(spun-up)时段不做分析。模式的水平分辨率为 50 km,模拟范围及参数化方案设计参见(曹丽娟等,2008),设计两组试验:试验 1 中模式在中国区域内使用中国科学院植物研究所的实测植被覆盖资料(侯学煜,1982),区域外使用美国 USGS 基于卫星观测反演的 GLCC(Global Land Cover Characterization)资料。试验 2 中区别于试验 1 的为将中国区域内植被替代为理想植被分布资料,其余均与试验 1 保持相同,同样进行上述时间段的积分,所使用的理想植被资料,是由改进后的生命力模型(Holdridge,1967;张新时,1993),根据当代中国气候特征计算得到的。试验 1 和试验 2 两者结果的差,被认为是实际土地利用相对于理想植被所产生的气候变化。

图 1a、b 分别给出中国区域内实际和理想两种植被的分布,由图可以看到,长江流域现有植被覆盖与理想状况相比,总体特征为以人类对土地的开发利用为主,如四川盆地以及长江中下游平原地区森林转化为水田,以及流域大范围森林向灌木林区和旱田的转变。地表植被类型的改变,通过粗糙度、反照率、叶面积指数等的改变影响地面环流和能量平衡,从而引起降水、气温等的变化,同时降水和气温的变化又会影响环流和地面能量的平衡。本研究应用大尺度汇流模型 LRM(Zhang et al., 2003; Cao et al., 2007)与区域气候模式 RegCM3 单向连接,将 RegCM3 模拟的径流深汇流至长江流域各水文站。LRM 模型假设某一网格中的径流只能从指向临近八个网格的其中一个方向流出,然后流入河流,并汇入下游(图 2),该河网是对自然状态的水流方向的极大概括,认为网格的产流是点源(即网格中心点),河道则用一维的线来描述,无论在某一网格还是河道汇流过程中,模型都是线性的和时不变的。模型用基流分离技术来表示地面径流和地下径流对时间的不同响应。对于地面径流的坡面汇流主要采用无因次单位线方法计算,一旦水流出网格将通过河网进一步汇流,河道汇流计算采用圣维南(Saint. Venant)方程。

为与 RegCM3 的分辨率相匹配,本研究中使用

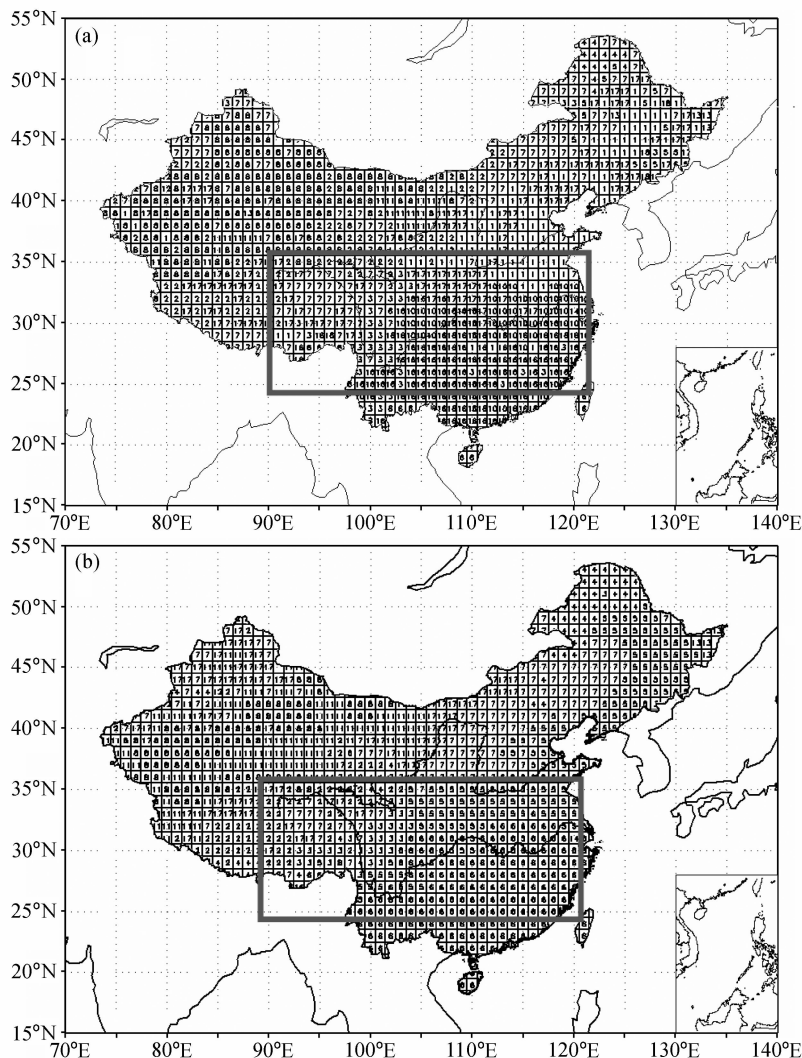


图1 中国地区植被分布：(a) 实际植被，(b) 理想植被。1 旱作农业，2 短草，3 常绿针叶林，4 落叶针叶林，5 落叶阔叶林，6 常绿阔叶林，7 高草，8 沙漠，9 冻土，10 水田，11 半沙漠，12 冰盖/冰川，13 沼泽，14 内陆冰，15 海洋，16 常绿灌木，17 落叶灌木，18 混合林地
Fig.1 Vegetation cover over China: (a) Current vegetation; (b) potential vegetation. 1 crop/mixed farming, 2 short grass, 3 evergreen needle leaf tree, 4 deciduous needle leaf tree, 5 deciduous broadleaf tree, 6 evergreen broadleaf tree, 7 tall grass, 8 desert, 9 tundra, 10 irrigated crop, 11 semi-desert, 12 ice cap/glacier, 13 bog or marsh, 14 inland water, 15 ocean, 16 evergreen shrub, 17 deciduous shrub, 18 mixed woodland

的 LRM 的水平分辨率为 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ (经纬度)。将 RegCM3 模拟结果中日均径流插值到 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 网格，驱动 LRM，模型需要输入的数据还包括：水文站的经纬度、流向、流速、扩散系数等 (Zhang et al., 2003)。流向数据来自于美国新罕布什尔大学 (UNH) 建立并发展起来的 $0.5^{\circ} \times 0.5^{\circ}$ 全球模拟地形网络 (STN30P) 数据 (Vörösmarty et al., 2000a, 2000b)。对于长江流域而言，流速的取值范围为 $1.0 \sim 3.0$ m/s，扩散系数取值范围为 $800 \sim 3000$ m^2/s 。前期研究表明，区域气候模式 RegCM3

同大尺度汇流模型 LRM 连接能够较好地再现长江流域不同台站的月径流过程，模拟的径流量同实测径流量在时间分布上较为一致，模拟的河川径流的年变化和季节变化同观测值比较接近。模式对长江流域水文台站径流量的模拟效果较好，表明该汇流模型适用于对长江流域进行径流模拟 (曹丽娟, 2007)。在此基础上，本文通过分析土地利用变化对长江流域气温、降水、蒸散发、径流等的影响，重点研究土地利用变化对长江流域气候和水文过程的影响。

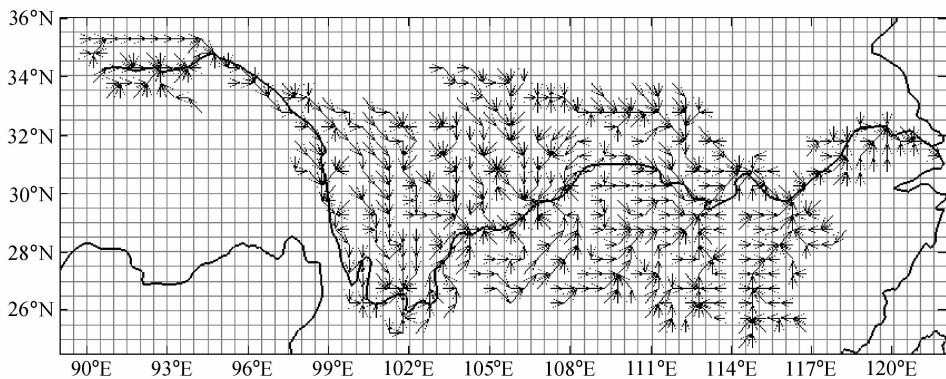


图2 长江流域河网

Fig. 2 The schematic river network for the Yangtze River basin

3 土地利用变化对长江流域水文和气候要素的影响

3.1 土地利用变化对长江流域气温的影响

图3给出长江流域从理想植被到实际植被分布引起的气温变化分布,由图中看出,土地利用的改变引起长江流域大部分地区气温降低,但降低幅度不大。对于年平均而言(图3a),总体表现为减少趋势,减少的幅度在长江中下游平原达到 1°C ,宜昌以上上游广大地区气温减少达到 0.5°C 。土地利用引起长江流域冬季(图3b)和夏季(图3c)气温变化的主要特征,仍然以大范围降温为主。冬季,四川盆地略有升温;夏季,长江干流沿线降温幅度较大,在长江中下游北岸降温幅度最大,超过 1.5°C ,夏季降温幅度最大地区位于森林变为水田的地区,而长江上游部分阔叶林,草地变为针叶林的地区出现升温。

3.2 土地利用变化对长江流域降水的影响

长江流域地处东南亚副热带季风区,且流域地势西北高、东南低,形成一个向东南开敞、面向太平洋的狭长地带,锋面活动显著,气旋过境频繁,从而在流域内产生各种不同程度和不同类型的降雨。图4给出长江流域从理想植被到实际植被分布引起的降水变化分布。土地利用改变引起长江流域年平均降水的变化(图4a),在四川盆地以及长江中下游地区为增加趋势,增加最大地区位于四川盆地,达到30%,此外在流域中下游平原地区降水增加幅度达到10%。四川盆地西部及南部山区,降水变化为减少,减少最大幅度接近20%。冬季(图4b),长江河道以北地区降水普遍增加而长江以南

地区则有减少趋势。降水增加幅度最大的地区仍然位于四川盆地及其周边地区,增加幅度达到30%;降水减少幅度最大的地区位于流域下游南部江浙地区,最大达到20%。夏季(图4c),土地利用改变引起长江流域降水除四川盆地西部山区及川东大巴山区出现减少趋势外,其余地区均以增加趋势为主,增加最大地区位于长江南部乌江支流水系,洞庭湖支流水系、鄱阳湖支流水系以及下游平原地区增加幅度均超过30%。对照图1,可以看到长江流域降水变化较大的地方,均对应着植被的明显改变区,长江流域降雨多集中在夏秋季,可以看到,人类对土地利用改变较大的地区,如森林变为水田和灌木的地区,夏季降水增加幅度较大;对于植被几乎无变化的四川盆地以西高原山区,降水变化相对较小。上述试验结果表明,长江流域的现有土地利用状况将导致长江流域中下游地区降水增加,加剧了长江流域发生洪涝的风险。

3.3 土地利用变化对长江流域蒸散发的影响

图5为长江流域从理想植被到实际植被分布引起的蒸散发变化分布,可以看到,土地利用变化对长江流域大部分地区蒸散发的影响在年平均、冬季和夏季平均以增加为主。土地利用改变引起长江流域年平均蒸散发的变化(图5a),在四川盆地以及长江中下游平原地区为增加趋势,增加最大地区位于四川盆地及长江中下游干流地区,超过30%。长江河道南部蒸散发总体为增加趋势,幅度可达10%,北部四川盆地西部及川东山区以蒸散发的减少为主,分布比较均匀。冬季整个流域蒸散发以增加为主(图5b),增加最明显的地区仍然位于四川盆地,以及长江中下游地区,增加幅度在30%以

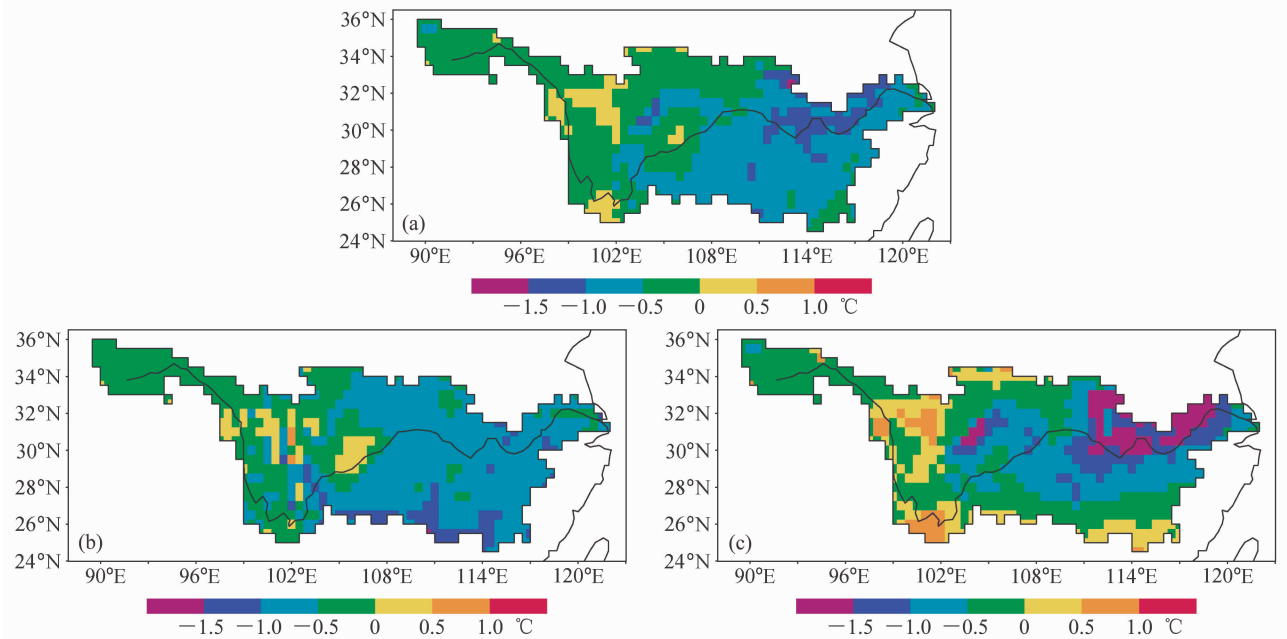


图3 土地利用引起长江流域气温变化：(a) 年平均；(b) 冬季平均；(c) 夏季平均

Fig.3 Effects of land use change on mean (a) annual, (b) winter, and (c) summer temperature in the Yangtze River basin

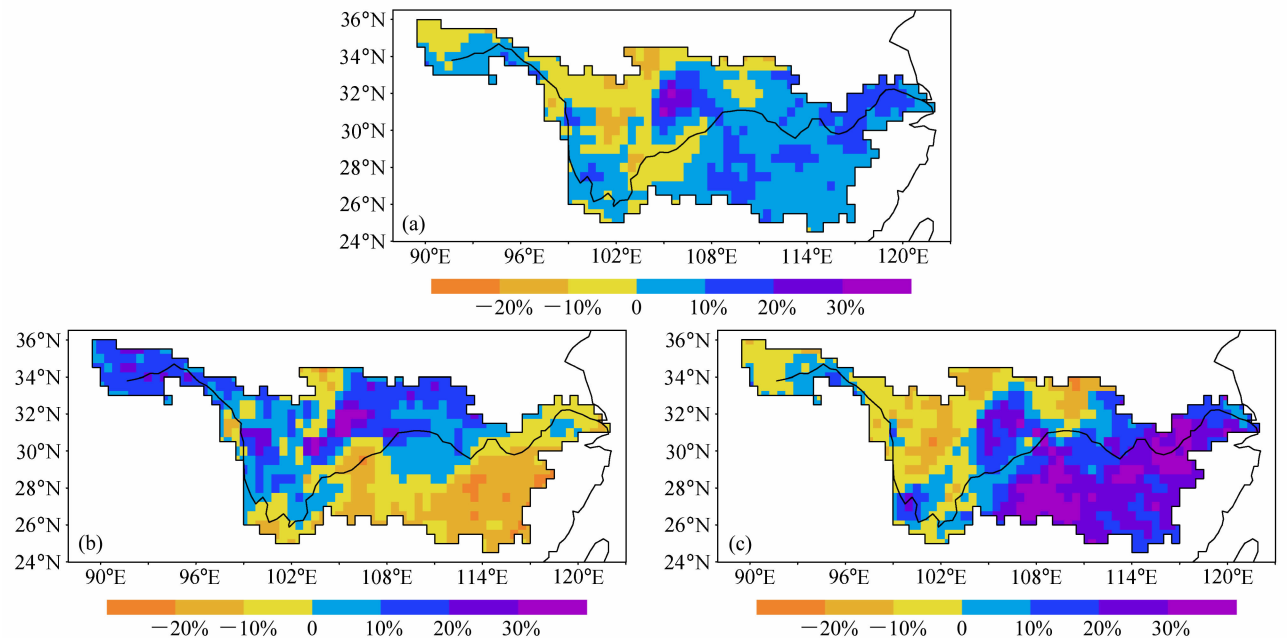


图4 土地利用引起长江流域降水变化：(a) 年平均；(b) 冬季平均；(c) 夏季平均

Fig.4 Effects of land use change on mean (a) annual, (b) winter, and (c) summer precipitation in the Yangtze River basin

上。夏季由于长江流域蒸散发量占全年比例较大，因此，土地利用变化引起蒸散发的改变同年平均变化基本一致（图 5c），在四川盆地以及长江南部地区为增加趋势，增加最大地区位于四川盆地，以及长江中下游地区，超过 30%。而在四川盆地以西山

区，以及川东大巴山区出现减少趋势。对照图 1，可以看到长江流域蒸散发变化较大的地方，对应着植被的明显改变区，特别是人类活动引起四川盆地及长江中下游干流地区森林向水田的转变地区，以及森林退化为灌木的大部分地区。上述试验结果表

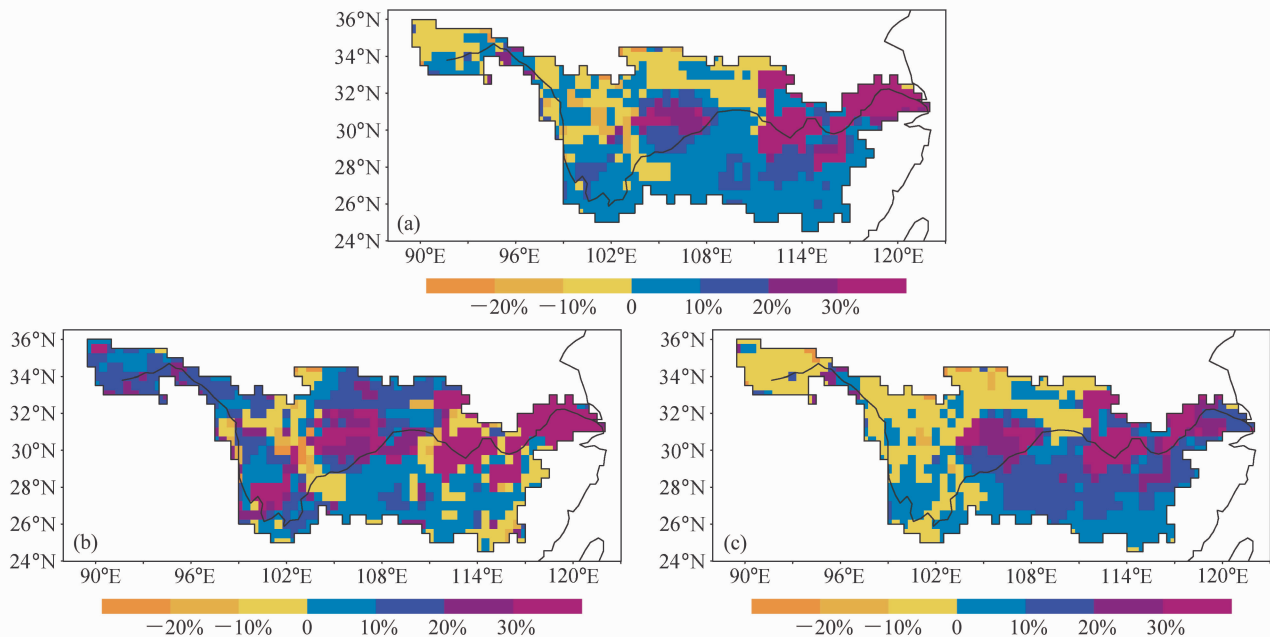


图 5 土地利用引起长江流域蒸散发变化: (a) 年平均; (b) 冬季平均; (c) 夏季平均

Fig. 5 Effects of land use change on mean (a) annual, (b) winter, and (c) summer evapotranspiration in the Yangtze River basin

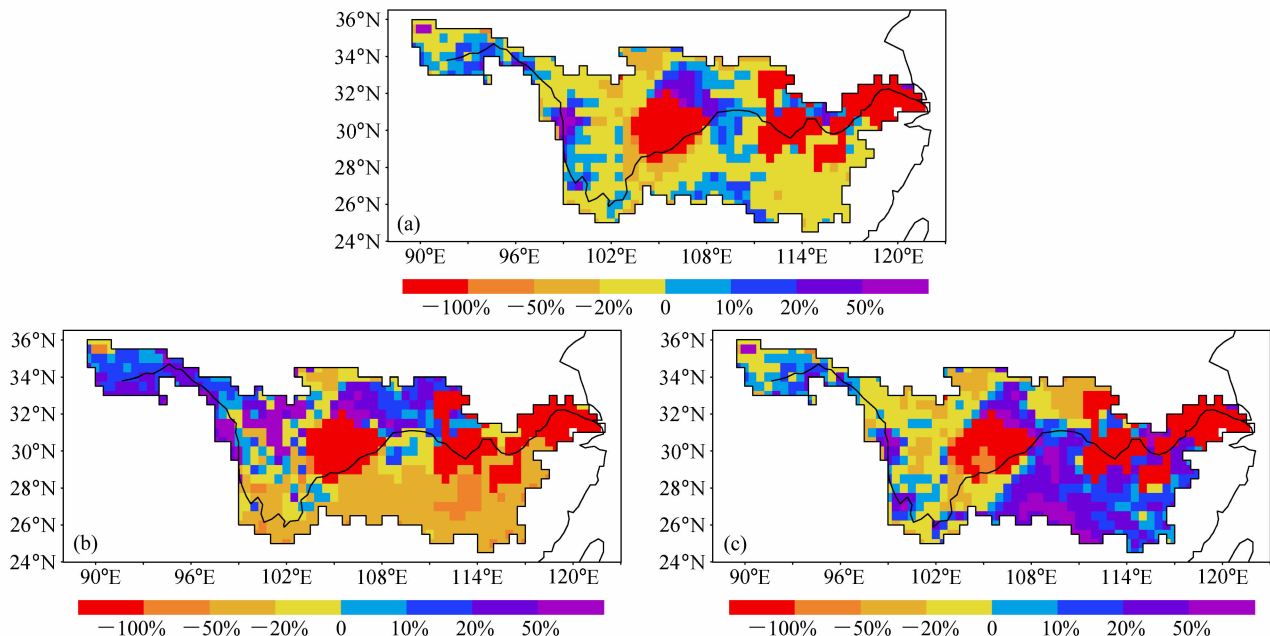


图 6 土地利用引起长江流域径流深变化: (a) 年平均; (b) 冬季平均; (c) 夏季平均

Fig. 6 Effects of land use change on mean (a) annual, (b) winter, and (c) summer surface runoff depth in the Yangtze River basin

明, 长江流域的现有土地利用相对于理想植被状况引起长江流域蒸散发的进一步增加, 加速了流域水循环过程, 使得更多的水汽通过蒸发、蒸腾作用进入大气, 进一步可能会引起局地更大的强降雨。在这一过程中, 温度的作用显得并不重要, 由于下垫

面水田的出现, 使得用于蒸发的水分增加, 由此引起了蒸散发总量的增加。

3.4 土地利用变化对长江流域径流深的影响

土地利用改变引起长江流域年平均径流深的变化 (图 6a), 总体表现为减少趋势, 减少最大的地区

位于四川盆地及长江中下游干流地区，减少幅度超过 100%。川东大巴山区径流深有所增加，增加幅度可以达到 50%。土地利用改变引起的长江流域冬季和夏季径流深变化的主要特征（图 6b、c），除了在四川盆地及长江中下游干流地区表现为减少趋势，在长江中下游干流南部冬季径流深减少，夏季径流深增加，减少与增加的幅度均可以达到 50%，此外，在四川盆地西部山区冬季径流深增加，夏季径流深减少。综合年平均情况，可以看到，冬、夏径流增加的地区并不能抵消夏、冬径流的减少幅度，从而使得年平均径流呈现大部分地区的减少趋势。试验结果表明，长江流域的现有土地利用状况导致长江流域表面径流深的大幅度减少，使得可利用的水资源减少，引起水资源短缺。径流减少较大地区位于四川盆地以及长江中下游等森林向水田的转变地区，水田地区由于蒸发量较大，按照水量平衡的原理，计算的表面径流深较小，与原有森林植被区计算的表面径流深相比较，减小幅度甚至超过 100%。

3.5 土地利用变化对长江流域河川径流量的影响

人类对长江流域土地的开发利用，以森林转化为水田和大范围森林向灌木林区 and 旱田的转变为主。

森林植被变化对水分分配和河川径流具有调节作用，森林对水文的影响主要表现在通过对冠层蒸散和对大气降水的重新再分配进而影响到森林的水量平衡，从而对森林生态系统和流域的水分循环产生影响。

图 7 为由土地利用变化引起长江流域干流三个代表台站宜昌、汉口、大通站和汉江支流三个代表台站石泉、白河、丹江口站在 1988~2001 年共 14 年的月平均径流量的绝对变化量（图 7a、c）和相对变化率（图 7b、d）。模拟结果表明在 1988~2001 年间，长江流域干流台站径流量除夏季（6~8 月）略有增加外，其余月份均减少。三个干流台站夏季径流表现出一致的增加趋势，河川径流增加的绝对值和百分率都是越向下游越大，其中大通站径流量增加幅度最大，接近 15%。由于长江流域土地利用以森林的退化为主，森林由于其土壤疏松，物理结构好，孔隙度高，具有较强的透水性。森林植被破坏后，植物根系分布变浅，持水力下降，导致土壤蓄水量减少。夏季长江流域蒸散发量增加较大，加剧水循环。夏季径流的增加部分原因是由于土地利用的改变造成夏季降水量的增加产生，而这部分产生的降水进入河道并不能完全被人类所利用，在某

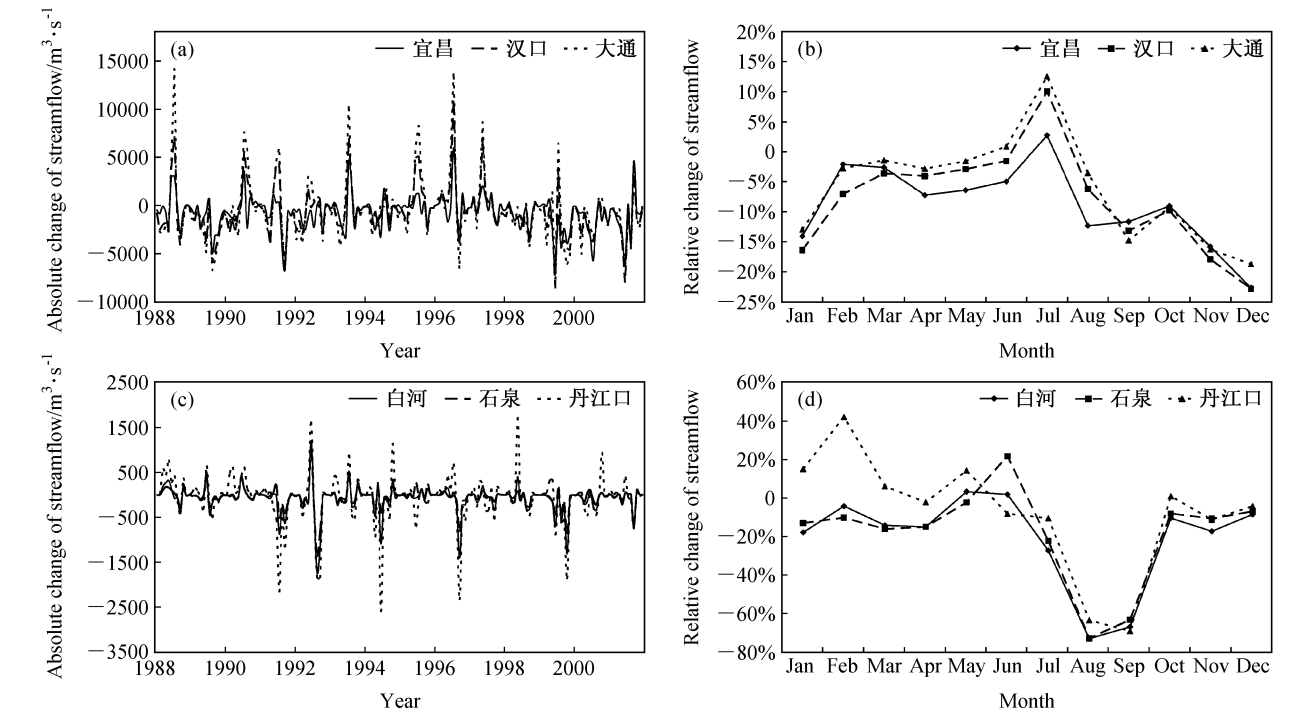


图 7 土地利用引起河川径流的 (a、c) 绝对变化量和 (b、d) 相对变化率：(a、b) 长江流域干流；(c、d) 汉江支流

Fig. 7 Effects of land use change on (a, c) absolute and (b, d) relative change of streamflow in the Yangtze River basin; (a, b) The main-stream of the Yangtze River; (c, d) the Hanjiang River

种程度反而增加了发生洪涝的危险。冬季,长江流域三个台站径流量减少较大,超过 20% 以上。汉江流域植被类型的改变主要是森林向灌木林区的转变。由图中可以看出,土地利用变化引起汉江支流河道径流的变化总体表现为减少趋势,以 7~10 月河川径流的减少最大,5~6 月径流略有增加。综上所述,土地利用引起的植被改变造成长江流域干流夏季河川径流的增加和冬季河川径流的大幅度减少,而汉江支流森林向灌木林区和旱田的转变总体趋势将导致汉江流域夏季河川径流的减少。

4 结论和讨论

使用区域气候模式 RegCM3 进行了中国区域在实际植被和理想植被覆盖情况下的两组各 15 年(1987~2001 年)时间长度的积分试验,对土地利用/植被覆盖改变引起的长江流域气候及水文过程的影响进行了数值模拟和分析。通过分析土地利用/植被覆盖变化引起长江流域年平均、冬季平均、夏季平均的气温、降水、蒸散发、径流深等的变化,研究土地利用/植被覆盖变化对长江流域气候及降雨径流过程的影响,随后将区域气候模式 RegCM3 与大尺度汇流模型 LRM 连接,比较长江流域水文站月平均径流在实际植被情况下相对于理想植被覆盖情况下的变化,研究土地利用对河川径流的影响。

结果表明:中国当代土地利用/植被覆盖的变化对长江流域降水、蒸散发、径流深、河川径流等水文气候要素的改变较大,对气温的改变并不明显。土地利用/植被覆盖的改变引起长江流域年、冬季和夏季平均气温降低,但降低幅度并不大;引起年平均和夏季平均四川盆地及长江中下游地区降水增多,四川盆地西部高原山区降水减少;冬季,长江北岸降水普遍增加,南岸降水减少。四川盆地以及长江中下游平原等地区年平均、冬季平均和夏季平均蒸散发的增加,引起这些地区表面径流深的极大减小。长江流域径流深变化同降水变化较为一致,冬季,长江流域北岸降水增加引起了北岸表面径流深的增加,南岸降水减少同样引起该地区径流深的减小。夏季降水的增加引起四川盆地及长江中下游地区表面径流深的增加,而年平均径流则呈现出大部分地区的减少趋势。

土地利用/植被覆盖的改变引起长江干流河川

径流量除夏季(6~8 月)略有增加外,其余月份均减少。土地利用变化引起长江流域汉江支流河川径流的变化总体表现为减少趋势,以 7~10 月河川径流的减少最大,5~6 月径流略有增加。总体而言,长江流域地区土地利用改变(森林转化为水田、流域大范围森林向灌木林区和旱田的转变等),加剧了长江流域的夏季水循环过程,使得夏季长江中下游地区降水增多,径流增大。

本研究揭示了土地利用变化对长江流域气候及降雨径流等水文过程产生的影响,探讨了长江流域水资源短缺的部分原因,并为改善长江流域水文状况提供了一些具有科学基础的参考意见。土地利用和植被覆盖变化对大尺度流域水文过程影响的研究在国内还很不完善。未来需要在改善区域气候模式对中国地区气候的模拟能力的基础上研究土地利用产生的气候水文效应,以得到进一步结论。

参考文献 (References)

- Cao L J, Dong W J, Xu Y L, et al. 2007. Validating the runoff from the PRECIS model using a Large Scale Routing Model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 24 (5): 855 - 862.
- 曹丽娟. 2007. 气候变化对黄河和长江流域水文过程影响研究 [D]. 中国科学院研究生院博士学位论文. 158pp. Cao Lijuan. 2007. Impacts of climate change on the hydrological processes of the Yellow River and the Yangtze River basins [D]. Ph. D. dissertation (in Chinese). The Graduate School of Chinese Academy of Sciences. 158pp.
- 曹丽娟, 张冬峰, 张勇, 等. 2008. 中国当代土地利用变化对黄河流域径流影响 [J]. *大气科学*, 32 (2): 300 - 308. Cao Lijuan, Zhang Dongfeng, Zhang Yong, et al. 2008. The effects of current land use in China on streamflow in the Yellow River basin [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese). 32 (2): 300 - 308.
- 陈锋, 谢正辉. 2009. 基于中国植被数据的陆面覆盖及其对陆面过程模拟的影响 [J]. *大气科学*, 33 (4): 681 - 697. Chen Feng, Xie Zhenghui. 2009. A land cover dataset based on Chinese vegetation data and its impact on land surface simulations [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences* (in Chinese), 33 (4): 681 - 697.
- 陈军锋, 李秀彬. 2001. 森林植被变化对流域水文影响的争论 [J]. *自然资源学报*, 16 (5): 474 - 480. Chen Junfeng, Li Xiubin. 2001. The impact of forest change on watershed hydrology—Discussing some controversies on forest hydrology [J]. *Journal of Natural Resources* (in Chinese), 16 (5): 474 - 480.
- 陈军锋, 李秀彬, 张明. 2004. 模型模拟梭磨河流域气候波动和土地覆被变化对流域水文的影响 [J]. *中国科学 (D 辑)*, 34 (7): 667 - 674. Chen Junfeng, Li Xiubin, Zhang Ming. 2005. Simu-

- lating the impacts of climate variation and land-cover changes on basin hydrology: A case study of the Suomo Basin [J]. *Science in China (Ser. D)*, 48 (9): 1501–1509.
- 程海云, 葛守西, 闵要武. 1999. 人类活动对长江洪水影响初析 [J]. *人民长江*, 30 (2): 38–40. Cheng Haiyun, Ge Shouxi, Min Yaowu. 1999. Impact of human activities on Yangtze flood [J]. *Yangtze River (in Chinese)*, 30 (2): 38–40.
- 范广洲, 吕世华, 罗四维. 1998. 西北地区绿化对该区及东亚、南亚区域气候影响的数值模拟 [J]. *高原气象*, 17 (3): 300–308. Fan Guangzhou, Lü Shihua, Luo Siwei. 1998. The influence of the NW China afforestation on regional climate in East and South Asia [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 17 (3): 300–308.
- Gao X J, Luo Y, Lin W T, et al. 2003. Simulation of effects of land use change on climate in china by a regional climate model [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20 (4): 583–592.
- 高学杰, 张冬峰, 陈仲新, 等. 2007. 中国当代土地利用对区域气候影响的数值模拟 [J]. *中国科学*, 37 (3): 397–404. Gao Xuejie, Zhang Dongfeng, Chen Zhongxin, et al. 2007. Simulation of land use effects on climate over China by RegCM3 [J]. *Science in China (Ser. D)*, 50 (4): 620–628.
- 侯学煜. 1982. 中华人民共和国植被图 (1: 4, 000, 000) [M]. 北京: 地图出版社. Hou Xueyu. 1982. *Vegetation Map of China (1: 4, 000, 000) (in Chinese)* [M]. Beijing: Cartographic Publishing House.
- Holdridge L R. 1967. *Life Zone Ecology (Revised Edition)* [M]. San Jose: Tropical Science Center.
- 姜彤, 苏布达, 王艳君, 等. 2005. 四十年来长江流域气温、降水与径流变化趋势 [J]. *气候变化研究进展*, 1 (2): 65–68. Jiang Tong, Su Buda, Wang Yanjun, et al. 2005. Trends of temperature, precipitation and runoff in the Yangtze River basin from 1961 to 2000 [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 1 (2): 65–68.
- Karvonen T, Koivusalo H, Jauhainen M, et al. 1999. A hydrological model for predicting runoff from different land use areas [J]. *Journal of Hydrology*, 217: 253–256.
- Keppler E T, Ziemer R R. 1990. Logging effects on streamflow: Water yield and summer low flows at caspar creek in Northwestern California [J]. *Water Resources Research*, 26 (7): 1669–1679.
- Lahmer W, Pflutzner B, Becker A. 2001. Assessment of land use and climate change impacts on the Mesoscale [J]. *Physics and Chemistry of the Earth*, 26: 565–575.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2006. 中国近代土地利用变化对区域气候影响的数值模拟 [J]. *气象学报*, 64 (3): 257–270. Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. 2006. A numerical simulation on impact of historical land use changes on regional climate in China since 1700 [J]. *Acta Meteorologica Sinica (in Chinese)*, 64 (3): 257–270.
- 吕世华, 陈玉春. 1999. 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*, 18 (3): 416–424. Lü Shihua, Chen Yuchun. 1999. The influence of Northwest China afforestation on regional climate in China [J]. *Plateau Meteorology (in Chinese)*, 18 (3): 416–424.
- Potter K W. 1991. Hydrological impacts of changing land management practices in a moderate sized agricultural catchment [J]. *Water Resources Research*, 27 (5): 845–855.
- 任国玉, 姜彤, 李维京, 等. 2008. 气候变化对中国水资源情势影响综合分析 [J]. *水科学进展*, 19 (6): 772–779. Ren Guoyu, Jiang Tong, Li Weijing, et al. 2008. An integrated assessment of climate change impacts on China's water resources [J]. *Advances in Water Science (in Chinese)*, 19 (6): 772–779.
- 施雅风, 姜彤, 苏布达, 等. 2004. 1840 年以来长江大洪水演变与气候变化关系初探 [J]. *湖泊科学*, 16 (4): 289–297. Shi Yafeng, Jiang Tong, Su Buda, et al. 2004. Preliminary analysis on the relation between the evolution of heavy floods in the Yangtze River catchment and the climate changes since 1840 [J]. *Journal of Lake Sciences (in Chinese)*, 16 (4): 289–297.
- Vörösmarty C J, Fekete B M, Meybeck M, et al. 2000a. A simulated topological network representing the global system of rivers at 30-minute spatial resolution (STN-30) [J]. *Global Biogeochemical Cycles*, 14: 599–621.
- Vörösmarty C J, Fekete B M, Meybeck M, et al. 2000b. Geomorphometric attributes of the global system of rivers at 30-minute spatial resolution (STN-30) [J]. *Journal of Hydrology*, 237: 17–39.
- Walker B, Steffen W. 1997. The terrestrial biosphere and global change: Implications for natural and managed ecosystems, a synthesis of GCTE and related research [R]. IGBP SCIENCE, No. 1, Stockholm: IGBP.
- Xiong Z, Wang S Y, Zeng Z M, et al. 2003. Analysis of simulated heavy rain over the Yangtze River valley during 11–30 June 1998 using RIEMS [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20: 815–824.
- 曾红玲, 季劲钧, 吴国雄. 2010. 全球植被分布对气候影响的数值试验 [J]. *大气科学*, 34 (1): 1–11. Zeng Hongling, Ji Jinjun, Wu Guoxiong. 2010. Numerical experiment of the influence of global vegetation distribution on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 34 (1): 1–11.
- 张冬峰, 高学杰, 赵宗慈, 等. 2005. RegCM3 区域气候模式对中国气候的模拟 [J]. *气候变化研究进展*, 3 (1): 119–121. Zhang Dongfeng, Gao Xuejie, Zhao Zongci, et al. 2005. Simulation of climate in China by RegCM3 model [J]. *Advances in Climate Change Research (in Chinese)*, 3 (1): 119–121.
- 张冬峰, 欧阳里程, 高学杰, 等. 2007. RegCM3 对东亚环流和中国气候模拟能力的检验 [J]. *热带气象学报*, 23 (5): 444–452. Zhang Dongfeng, Ouyang Licheng, Gao Xuejie, et al. 2007. Simulation of the atmospheric circulation over East Asia and climate in China by RegCM3 [J]. *Journal of Tropical Meteorology (in Chinese)*, 23 (5): 444–452.
- Zhang J Y, Dong W J, Fu C B, et al. 2003. Streamflow simulation

for the Yellow River basin using RIEMS and LRM [J]. *Advances in Atmospheric Sciences*, 20: 415–424.

张井勇, 董文杰, 符淙斌. 2005. 中国北方和蒙古南部植被退化对区域气候的影响 [J]. *科学通报*, 50 (1): 53–58. Zhang Jingyong, Dong Wenjie, Fu Congbin. 2005. Impact of land surface degradation in northern China and southern Mongolia on regional climate [J]. *Chinese Science Bulletin*, 50 (1): 75–81.

Zhang Q, Jiang T, Gemmer M, et al. 2005. Precipitation, temperature and discharge analysis from 1951 to 2002 in the Yangtze Catchment, China [J]. *Hydrological Sciences Journal*, 50 (1): 65

– 80.

张新时. 1993. 研究全球变化的植被—气候分类系统 [J]. *第四纪研究*, 2: 157–169. Zhang Xinshi. 1993. The vegetation-climate classification system for global change study [J]. *Quaternary Sciences* (in Chinese), 2: 157–169.

郑益群, 钱永甫, 苗曼倩, 等. 2002. 植被变化对中国区域气候的影响 I. 初步模拟结果 [J]. *气象学报*, 60 (1): 1–15. Zheng Yiqun, Qian Yongfu, Miao Manqian, et al. 2002. The effects of vegetation change on regional climate I: Simulation results [J]. *Acta Meteorologica Sinica* (in Chinese), 60 (1): 1–15.