夏江江,杨庆,郑子彦,等. 2015. 土地利用变化对 20 世纪中国地区气候干湿变化的影响 [J]. 气候与环境研究, 20 (2): 154-166, doi: 10.3878/j.issn. 1006-9585.2014.14007. Xia Jiangjiang, Yang Qing, Zheng Ziyan, et al. 2015. Role of land use change in dry/wet trends in China during the 20th century [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (2): 154-166.

土地利用变化对 20 世纪中国地区气候 干湿变化的影响

夏江江 杨庆 郑子彦 赵天保 严中伟 马柱国

中国科学院东亚区域气候一环境重点实验室,北京100029

摘 要 利用 CMIP5 耦合模式历史情景和土地利用情景结果,定量评估了模拟的土地利用变化对 20 世纪中国地 区气候干湿变化的影响。结果表明,土地利用的变化加剧了 20 世纪中国地区干旱化的进程,其贡献约为 1/3。其 中,湿润区具有显著变干的趋势,土地利用变化的贡献约为 35.4%;半干旱区显著变干,土地利用对半干旱地区 变干的贡献不显著;两种情景下干旱区干湿变化都不显著。在土地利用情景下,中国地区土地利用的变化主要表 现为一级土地的减少和牧草用地的增加,二者分别从国土面积的 72.7%和 12.9%(1901 年)变为 36.0%和 41.9% (2004 年),且 1950 年代之后变化速率显著增大。其中大面积显著的变化主要发生在青藏高原、内蒙古以及新疆 北部地区,导致这些地区降水减少、温度降低,而降水减少带来的干旱化作用大于温度降低带来的变湿作用。 关键词 CMIP5 耦合模式 干旱 土地利用 地表湿润指数 文章编号 1006-9585 (2015) 02-0154-13 中图分类号 P461⁺.8 文献标识码 A doi: 10.3878/j.issn.1006-9585.2014.14007

Role of Land Use Change in Dry/Wet Trends in China during the 20th Century

XIA Jiangjiang, YANG Qing, ZHENG Ziyan, ZHAO Tianbao, YAN Zhongwei, and MA Zhuguo

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

Abstract The contribution of land use change to the dry/wet trends in China during the 20th century is assessed on the basis of climate simulations of coupled models under historical and land use scenarios provided by the fifth phase of the Coupled Model Intercomparison Project (CMIP5). The results suggest that land use change may have enhanced aridification in China during the 20th century, with a contribution of approximately one-third. For humid regions, the contribution is approximately 35.4%. Although the drying trend in semi-arid regions is significant, the influence of land use is not detectable. For the arid regions, the drying trend is not significant. The land use change scenario in China is featured by a loss of primary land and increase of pasture throughout the 20th century, from 72.7% and 12.9% of the total national land in 1901, respectively, to 36.0% and 41.9% in 2004, with the enhanced changing rate lasting into the latter half of the century. This type of land use change occurs mainly in the Qinghai–Tibetan Plateau, Mongolia, and northern Xinjiang, causing decreasing trends in both temperature and precipitation. The drying trend due to decreasing precipitation overwhelms the effect of cooling temperatures.

Keywords CMIP5, Drought, Land use, Surface wetness index

通讯作者 严中伟, E-mail: yzw@tea.ac.cn

收稿日期 2014-01-06; 网络预出版日期 2014-10-28

资助项目 国家重大科学研究计划项目 2012CB956203

作者简介 夏江江,男,1984年出生,博士,助理研究员,主要从事全球气候年代际变化及机理研究。E-mail: xiajj@tea.ac.cn

引言 1

2 期

干旱和干旱化是造成经济损失最为严重的自 然灾害之一(Wilhite, 1993, 2000; Sheffield et al., 2004; 马柱国, 2005; Ma and Fu, 2007a; Sternberg, 2011; Wang et al., 2011)。据联合国统计, 全球每年 因干旱和荒漠化失去约 1.2×10⁵ km² 的土地。而全 球每年因干旱所造成的经济损失达60~80亿美元, 数以百万计的人口生存已经受到威胁(Wilhite, 2000)。中国北方地区 20 世纪 90 年代以来由干旱 化造成的直接经济损失每年在 1000 亿元人民币以 上,这严重威胁到水资源安全(符淙斌等,2005)。 无疑,干旱化已经严重威胁到人类社会的可持续发 展。

然而我们对干旱化形成机理的认识还很薄 弱。迄今已有很多对干旱及干旱化成因的研究。例 如,有研究表明,由增暖所引起的潜在蒸散发的增 加是全球尺度干旱化加剧的主要原因(Ma and Fu, 2007b; Briffa et al., 2009; Dai, 2013a)。 整体来说, 变暖导致了全球干旱发生的总面积在 80 年代以后 显著增加(Dai, 2011b)。但是, 对应于全球范围的 普遍增温,潜在蒸散发的普遍增加不足以在区域尺 度上解释年代际尺度干湿趋势的差异(Ma and Fu, 2007a, 2007b; Dai, 2011a).

有证据表明,人类活动所引起的土地利用/土地 覆盖(Land-Use and Land-Cover, LULC)的变化, 可以增加大气中碳的含量,改变地表反照率、地表 空气动力学粗糙度以及植被根深等,进而影响全球 及区域气候 (Hurtt et al., 2009)。 例如 LULC 变化通 过改变地表反照率,导致地表入射辐射发生变化 (Myhre et al., 2005); 通过影响蒸散发进而改变地 表感热通量和潜热通量,最终影响区域水循环 (Davin and de Noblet-Ducoudre, 2010); 引起 CO₂ 排放和吸收的变化对生物地球化学过程产生影响 (Betts et al., 2007)。这些因素通过非线性过程耦合在 一起,导致气候变化对 LULC 变化的响应十分复杂。

虽然LULC变化对气候干湿演变的贡献仍然存 在争议。但整体来说, 植被退化会促使干旱化加剧。 例如,敏感性试验结果表明,将南美洲北部、巴西、 非洲北部和南部以及澳大利亚北部地区的热带稀 树草原替换为草原,除非洲北部地区降水无明显变 化外,其余4个地区的降水都减少10%(Hoffmann and Jackson, 2000); 当 Sahel 地区农田范围扩张(森 林、草原退化)时,会引起降水的大幅减少,干旱 化加剧(Taylor et al., 2002)。这说明大尺度土地利 用的变化对于干旱的维持和发展具有重要作用。

对中国而言,观测到的干湿变化进程存在显著 的区域差异(王志伟和翟盘茂, 2003; Ma and Fu, 2007a),在西北东部、华北和东北地区由于降水的 持续减少呈现出明显的干旱化趋势。相反地,西北 西部却处在一个相对湿润的时段,在20世纪80年 代后期气候由暖干型向暖湿型转变(施雅风等, 2002; 2003)。中国历史上的长期垦伐,以及近代 的过渡放牧和森林砍伐等,引起了植被覆盖状况的 巨大变化。这种土地利用的变化对中国地区干湿演 变的影响不可忽视。然而,历史土地利用变化特征, 尤其是细致的时空变化分布特征具有很大的不确 定性,阻碍了目前对中国地区土地利用变化的定量 化研究。同时由于较难从观测资料中分离出单独的 人类活动的影响——土地利用变化的影响,导致土 地利用变化在气候变化中的贡献还未被充分研究 (Christidis et al., 2013).

国际耦合模式比较计划阶段 5 (CMIP5) 提供 了单独的人为强迫驱动耦合模式的模拟结果,其中 包括土地利用 (land use) 情景 (只有土地利用强迫 随时间变化,其他所有强迫都保持在工业化以前的 水平)。利用 CMIP5 的耦合模式模拟结果,已有研 究表明,土地利用变化对中国地区气候极端的变化 具有不可忽视的贡献(Wen et al., 2013)。本研究旨 在借助 CMIP5 提供的 5 个耦合模式 (CanESM2、 GFDL-ESM2M、GISS-E2-H、GISS-E2-R、HadGEM2-ES)的土地利用情景,同时结合相应的历史情景 (包括所有的自然强迫和人为强迫)的模拟输出结 果,来研究模拟得到的土地利用的变化对 20 世纪 中国不同气候地区(包括干旱区、半干旱区和湿润 区) 气候干湿变化的贡献, 旨在加深对区域干旱化 机理的认识。这对于理解过去人类、气候、环境之 间的相互作用,对进一步的评估未来气候变化下的 土地景观和生态系统脆弱性也具有参考意义 (McGregor et al., 2009).

数据和方法 2

2.1 数据

(1) 划分中国干旱区、半干旱区、湿润区所使

用的降水数据

本文使用了全球降水气候中心(Global Precipitation Climatology Centre,简称为GPCC,版 本 v6)GPCC-v6的中国地区逐月降水数据。该数 据的空间分辨率为0.5°(纬度)×0.5°(经度),时 间范围为1961~1990年(ftp://ftp-anon.dwd.de/ pub/data/gpcc/html/gpcc_normals_v2011_doi_downlo ad.html [2013-05-09])。

(2) 评估 CMIP5 耦合模式模拟能力的观测的 温度、降水数据

采用中国气象局整编的756个台站1961~2010 年逐月温度和降水资料,剔除连续缺测达1年的台 站,其余零星缺测月份采用多年平均值插补,最后 保留583个站。按照Cressman(1959)插值方法, 将583个台站的逐月温度、降水数据插值到1°(纬 度)×1°(经度)的网格上。

(3) CMIP5 耦合模式输出的历史情景和土地利 用情景下温度、降水数据

CMIP5 中共有 5 个耦合模式(共 20 个试验) 提供历史情景和土地利用情景下中国地区 1901~ 2004 年逐月的平均温度、降水数据。数据如表 1 所 示,历史情景使用所有的自然强迫和人为强迫作为 模式模拟试验的输入,其中自然强迫包括太阳辐射 和火山活动等的变化,人为强迫包括随时间演变的 温室气体、气溶胶、土地利用等的变化;相应地, 土地利用情景表示随时间演变的土地利用作为模 式模拟试验的单一强迫因子,而其他所有强迫因子 固定在前工业化时期的水平(Taylor et al., 2012)。 为处理方便,将 5 个模式的输出结果插值到 1°(纬 度)×1°(经度)的网格上(数据下载地址: http:// pcmdi9.llnl.gov/esgf-web-fe/live;jsessionid=73569C8 E0AA4183314A9EDE72D1FF6AC#[2013-07-20])。

全球历史土地利用资料采用全球土地利用模型(Global Land-use Model, GLM)的输出结果,时间范围为1500~2005年,分辨率为0.5°(纬度)×0.5°(经度)(Hurtt et al., 2011)。全球土地利用的变化描述了诸如农田用地(cropland)、牧草(pasture)、一级土地(primary land)、二级土地(secondary land)、城市用地(urban land)等的时空演变特征。CMIP5各耦合模式使用这套土地利用资料作为单因子强迫得到土地利用情景的模拟输出、或结合其他所有强迫得到历史情景的模拟输出(土地利用变化数据下载地址:http://tntcat.iiasa.

ac.at:8787/RcpDb/dsd?Action=htmlpage&page=about #lucinfo [2013-07-20])。

应当强调的是, GLM 模拟的中国地区土地利 用的变化是基于全球历史环境数据(History Database of the Global Environment, HYDE) 所得 (Hurtt et al., 2011)。Miao et al. (2013) 综述了 34 套数据集中有关中国地区土地利用(农田用地、森 林、草地、城市用地)的研究(包括 HYDE),结 论表明:由于自然因素和人为因素对气候和环境的 共同作用,中国的土地利用经历了复杂而且巨大的 变化,加上可靠的土地利用数据的缺失,使得基于 不同方法和数据源的中国历史土地利用重建结果 存在很大的不确定性。总体来说,过去100年中国 地区农田用地显著增加(Ramankutty and Foley, 1999; Ge et al., 2000; Liu and Tian, 2010); 森林 面积的变化主要表现为 1949 年之前减少、之后增 加的趋势(凌大燮, 1983; Fan and Dong, 2001; Ge et al., 2008)。这在 HYDE 数据中都有所体现。 其中中国地区的人口数增长是农田用地增加(Liu and Tian, 2010) 和森林用地减少(1949年之前的 变化)的主要驱动力 (Fan and Dong, 2001)。对于 中国地区历史城市用地的变化来说,只有两套长期 数据集: HYDE (Klein Goldewijk, 2001) 和 LIU 数据集(Liu and Tian, 2010)。这两套数据都表明 城市用地在 20 世纪呈现显著的增加趋势, 二者的 不同之处在于前者变化速率大于后者。历史草地用 地变化的研究相对于城市用地的研究更为稀少,只 有 HYDE 数据集给出了长期的牧草用地变化特征: 草地用地的变化在 1950 年之前呈现缓慢的增长, 而后快速增加,直到2000年左右的时候停止增长。

表 1	CMIP5	耦合模:	式历史情	青景和土	上地利用	情景	数据
-----	-------	------	------	------	------	----	----

Table 1	Historical	and	land	use	datasets	of	the	CMIP5
coupled n	nodels							

模式	温度/降水数据出处	模式所在机构
CanESM2	试验*1~5	加拿大气候模拟与分析中心
GFDL-ESM2M	试验1	美国国家大气海洋局地球物理流
		体动力学实验室
GISS-E2-H	试验1~5	美国国家航空航天局戈达德空间
		科学研究所
GISS-E2-R	试验1~5	美国国家航空航天局戈达德空间
		科学研究所
HadGEM2-ES	试验1~4	英国气象局哈德莱中心

*表示同一种模拟情景(历史情景或土地利用情景)的多个试验成员间的强迫条件一致,但每一个成员初始化条件选自前工业控制试验(Preindustrial control run)的不同时间点(Taylor et al., 2012)。

2.2 方法

(1) 划分干旱区、半干旱区、湿润区

依据我国干湿气候区的一般划分标准(王延禄,1990),以1961~1990年30年的气候平均年降水量为基准,将年降水量少于200mm的地区划分为干旱区,主要包括新疆大部和甘肃、内蒙的西部地区;年降水量在200~500mm的区域划分为半干旱区,该区域呈"西南一东北"向的带状分布,包括了内蒙古中东部、华北北部、黄土高原和青藏高原的北部和西部;年降水量大于500mm的区域划分为半湿润区和湿润区(本研究将半湿润区和湿润区合并,以下统称湿润区),该区域主要包括了东北平原东部、云贵高原、江淮流域及以南地区(如图1所示)。本文进行干湿气候区划,旨在探讨我国不同气候区气候干湿变化对20世纪土地利用变化响应的差异。

(2) 地表湿润指数

地表干湿状况同时受降水与蒸散发的影响。随着全球增暖,地表蒸散发加剧。降水异常已不能客观表征地表的干湿变化(Ma and Fu, 2007a)。本 文采用地表湿润指数(Surface Wetness Index, SWI, *I*_{SW})(Hulme et al., 1992)来表征中国区域的干湿演 变。*I*_{SW}为年降水量与年潜在蒸散发量的比值:

$$I_{\rm SW} = \frac{\sum_{1}^{12} P_i}{\sum_{1}^{12} E_i} , \qquad (1)$$

其中, P_i 为逐月降水量(单位: mm); E_i 为逐月潜 在蒸散发量(单位: mm),采用 Thornthwaite (1948) 方法进行计算。 I_{SW} 能准确地检测出年尺度的旱涝 事件与干湿演变,因而被广泛应用于干旱及干旱化 问题的研究(UN General Assembly, 1994; Ma and Fu, 2003; Ma and Fu, 2007a)。 I_{SW} 的干湿等级划 分如表 2 所示。

表 2 地表湿润指数干湿等级

Table 2 Surface	wetness index ranks
数值	等级
$0 \le I_{SW} \le 0.05$	极端干旱
$0.05 \le I_{SW} \le 0.2$	干旱
$0.2 \le I_{SW} \le 0.5$	半干旱
$0.5 \le I_{\rm SW} \le 0.65$	半湿润干旱
$I_{\rm SW} \ge 0.65$	湿润

(3) 一致性水平指数

为了定量地评估模式对气候变化模拟结果的 一致性,这里引入 Wang (2005) 定义的一致性水 平指数(Consistency index, *I*_c), 计算公式如下:

$$I_{c} = \begin{cases} \frac{N_{p}}{N_{p} + N_{n}}, & (N_{p} \ge N_{n}) \\ -\frac{N_{n}}{N_{p} + N_{n}}, & (N_{p} \le N_{n}) \end{cases}$$
(2)

其中, N_p表示某个格点的模拟结果变化趋势增大的 试验个数(本研究共有 20 个试验), N_n表示模拟结 果减少的模式个数。I_c的符号表示大多数试验模拟 结果的变化方向, I_c的大小表示模拟结果的一致性 水平,绝对值大于 50%。

3 结果

相比 CMIP3 耦合模式, CMIP5 耦合模式在分 辨率及试验设计等方面都有一定的提高和改进,情 景试验设计也更加合理,代表了国际主要先进模式 的最新版本(Taylor et al., 2012)。已有的结果表明: 这些模式都能很好地再现中国区域年平均温度和 降水的气候态空间特征与长期变化趋势(Chen, 2013: 郭彦等, 2013)。本研究所选取的 5 个耦合 模式模拟历史情景的气温和降水的气候态分布与 实际观测资料的空间相关系数(图略)分别为: 0.83~0.87、0.63~0.84, 表明模式具有比较好的模 拟能力。另外,多模式集成可以有效地减少模式次 网格尺度过程中参数化方案所带来的不确定性误 差(Wang et al., 2005),使得多模式集合结果要比 单个模式结果更为可靠(Rowell, 1998; Palmer et al., 2004),在耦合模式对当代东亚气候模拟能力的评 估中,多模式集合的表现要好于单个模式的模拟能 力(Jiang et al., 2005; 徐崇海等, 2007; Chen, 2013)。 因此,本文将分别对这5个模式及其集合平均的结 果进行分析。

3.1 土地利用对中国地区干湿变化进程的贡献

图 2 给出了多模式集合平均的 1901~2004 年 中国区域平均 *I*_{SW} 的距平时间序列。从历史情景模 拟的结果可以看出, 1901~2004 年中国地区呈现 出显著的变干趋势, *I*_{SW} 的趋势系数为-0.104 (100 a)⁻¹。在土地利用情景和除土地利用变化外 其他强迫情景(历史情景的结果减去土地利用情景 的结果)下, *I*_{SW} 也显示出了显著的变干趋势,二 者的趋势系数分别为-0.036 (100 a)⁻¹和-0.068 (100 a)⁻¹。这说明 20 世纪中国地区显著的干旱化 趋势主要由除土地利用变化外其他外强迫所导致,





Fig. 2 Ensemble mean I_{SW} anomalies from 20 runs of five coupled models for the period 1901–2004 with respect to the values in 1901. Two scenarios are 'Historical' and 'Land use' scenarios. Assuming the difference between the responses simulated by the two experiments (Historical–Land use) approximates the effect of forcings other than the land use change. Thin line indicates the raw ensemble mean I_{SW} time series. Thick smoothed line indicates the secular trend by using the ensemble empirical mode decomposition method (Wu et al., 2011)

但土地利用的变化也加剧了这种干旱化的进程,贡 献为 34.6%。

为了分析土地利用变化对中国地区 1901~2004年干旱化进程贡献的显著性,我们统计了5个 耦合模式20个模拟试验结果的特征(其结果如图3 所示)。可以看出,就整个中国地区而言,绝大多 数模拟试验的 I_{SW} 变化方向呈现一致的结果(图 3a):历史情景下变干(I_{SW} 减小)的速率为-0.18~ -0.04(100 a)⁻¹(所有20个试验);除 HadGEM2-ES中的试验3外,19个试验的结果表明,因土地 利用变化导致 I_{SW} 变干的速率为-0.11~-0.002 (100 a)⁻¹。尽管本文使用的 5 个耦合模式采用了 不同的物理参数化方案、对相同外强迫(土地利用) 具有不同的响应等,但结果呈现出较高的一致性。 这说明 20 世纪中国地区显著的干旱化以及土地利 用的变化加剧了其干旱化进程这一结果,是不依赖 于模式且统计上是显著的。

另外,为了研究土地利用变化对我国不同气候 区干湿变化的影响,本文分别计算了干旱区、半干 旱区和湿润地区的 *I*_{SW} 变化趋势。结果表明,湿润 区具有显著的变干趋势 [-0.17 (100 a)⁻¹],其中 土地利用变化的贡献约为 35.4% (图 3d);半干旱



图 3 1901~2004 年 (a) 中国、(b) 干旱区、(c) 半干旱区、(d) 湿润地区 *I*_{SW} 趋势系数 (5 个耦合模式 20 个模拟试验的结果)的箱须图 (每个 箱须图中矩形的上、下边分别对应数据分布的上、下四分位数;横线为数据分布的中位数;一标示出 1.5 倍四分位数间距范围内的最小、最大的异 常值; +为极端的异常值)

Fig. 3 Boxplot of linear trends for I_{SW} by total 20 runs of five coupled models for 1901–2004: (a) The whole China, (b) arid region, (c) semi-arid region, and (d) humid region [units: $(100 \text{ a})^{-1}$]. The bottom and top of the box are the 25th and 75th percentile (the lower and upper quartiles, respectively), and the band near the middle of the box is always the 50th percentile (the median). The black bands are within 1.5 inter quartile range of the lower/upper quartile, and + is the extreme value

区也显著变干 [-0.082 (100 a)⁻¹],但土地利用情 景下模拟得到的变干和变湿的试验分别有11个和9 个,模拟结果存在较大的不确定性,表明土地利用 变化对半干旱地区变干的贡献不显著(图 3c);而 对于干旱区而言,在历史情景下9个模拟试验的结 果呈现变干的趋势(图 3b),11个模拟试验的结果 则显示出变湿的趋势,这表明 20 世纪干旱区的干 湿变化并不显著,而土地利用情景下模拟的变干和 变湿的试验各有 10 个,说明土地利用变化的贡献 也不显著。

根据前人对观测资料分析得到的研究结果(马柱国和符淙斌,2005)可知,20世纪后半叶中国干旱区、半干旱区和湿润区分别表现出了湿润化、干旱化和干旱化的趋势。这与本研究使用 CMIP5 耦合模式模拟结果得到的历史情景下 20 世纪(尤其是 20 世纪后半叶,图 2)中国各干湿气候区干湿变化趋势大致可比:半干旱区和湿润区具有显著变干的趋势(图 3c 和 3d);干旱区干湿变化不显著,这与观测结果略有不同(马柱国和符淙斌,2005)。实际上,对于干旱区来说,模拟得到的变湿趋势的

试验个数(11个)略多于结果为变干趋势的试验个数(9个),表现出了不显著的变湿趋势(图3b)。 这说明模拟结果和观测结果大致可比,证明了用 CMIP5 多模式集合给出的中国地区历史情景的模 拟输出近似代表观测的合理性。

3.2 中国地区土地利用的变化

从 Miao et al. (2013)的综述结果,对中国地 区土地利用变化的研究依然存在较为一致的结论: 变化较大的为森林和草地,其次是农田用地,最小 的为城市用地。这与 CMIP5 耦合模式所使用的土 地利用情景具有一致的特征。图 4 给出了 GLM 模 拟的中国地区各类土地利用占中国国土总面积百 分比的时间序列,其中包括农田用地、牧草、一级 土地、二级土地和城市用地。总体来看,中国地区 土地利用的变化主要表现为一级土地的减少和牧 草用地的增加,二者分别从 1901 年的 72.7%和 12.9%变为 2004 年的 36.0%和 41.9%,且 50 年代之 后变化速率明显增加。二级土地、农田和城市用地 均呈现出持续增加的趋势,从 1901~2004 年增幅 分别为 0.8%、6.5%和 0.35%。其中,农田用地的明



图 4 1901~2004 年中国地区各类土地利用面积占中国国土面积百分比的时间序列 Fig. 4 Percentages of the land use states in the China land area during 1901–2004

显增加主要发生在 80 年代以后。城市用地具有最 大的相对变化,2004年的城市面积(0.45%)是1901 年(0.1%)的4.5倍。

为了反映 1901~2004 年中国地区土地利用变 化的空间特征,分别计算了农田用地、牧草、一级 土地、二级土地和城市用地变化趋势的空间分布。 从图 5 中可以看出,在整个中国范围内一级土地均 呈现出减少的趋势,而牧草和城市用地均呈现出增 加的趋势。其中,一级土地的减少和牧草用地的增 加这种此消彼长的关系主要发生在青藏高原、内蒙 以及新疆北部地区。城市用地的显著增加主要发生 在中国东部地区,如华北平原、长江中下游、四川 盆地和东南沿海等。二级土地和农田用地的变化则 呈现出明显的区域差异性。农田用地在东北平原和 四川盆地等地明显增加,在江淮流域则明显减少。 二级土地在江淮流域和东北北部明显增加,在青藏 高原南部与长江以南地区则明显减少。

3.3 主要的土地利用变化(一级土地变为牧草用地)对气候干湿变化的影响

众所周知,土地利用的变化可以改变大气中碳 的含量、地表反照率、地表空气动力学粗糙度以 及植被根深等,进而影响气候(Hurtt et al., 2009)。 上文的分析指出,中国地区 5 种土地利用类型呈 现出不同的变化趋势,这 5 种土地类型变化对气候 的影响通过非线性过程耦合在一起,使我们对其中 物理机制的研究变得十分困难。由图 5 可以看出, 从 1901~2004 年大面积显著的土地类型变化主要 发生在青藏高原地区,表现为一级土地的减少和牧 草用地的增加,二者的平均变化速率分别约为 -59.7% (100 a)⁻¹和 58.0% (100 a)⁻¹。因而这 组 20 个试验可以近似看做将一级土地改变为牧草 用地后对青藏高原地区气候变化产生影响的敏感 性试验。

由于 *I*_{SW} 为年降水量和年潜在蒸发量(温度的 函数)的比值,我们初步分析土地利用变化对青藏 高原地区(35°N以南、95°E以西的青藏高原地区) 气温和降水变化的影响,以便于探讨其中可能原 因。图 6 和图 7 分别给出了 1901~2004 年温度、 降水的变化趋势,相应地,图 8a 和图 8b 给出了 20 个试验分别对温度和降水变化趋势模拟一致性的 检验结果。可知,土地利用情景下,大多数试验模 拟的 20 世纪青藏高原地区的温度具有降低的趋势 (图 6),而模拟的降水具有减少的趋势(图 7)。 一致性检验结果也表明,模式对青藏高原地区的模 拟结果具有高度的一致性(图 8),说明温度和降水 都减少的趋势是显著的。

进一步定量的研究结果表明,在土地利用情景 下,4个模式(GFDL-ESM2M,GISS-E2-H,GISS-E2-R和HadGEM2-ES)共15个试验集合平均的青 藏高原地区降温速率为-1.04℃(100 a)⁻¹。这主 2 期



图 5 1901~2004 年中国地区(a)农田用地、(b)牧草、(c)一级土地、(d)二级土地、(e)城市用地变化趋势的空间分布 Fig. 5 Linear trends of (a) cropland, (b) pasture, (c) primary land, (d) secondary land, and (e) urban land states during 1901-2004

要是因为模式中青藏高原地区的一级土地主要是 森林,当其向牧草转变时,使得地表反照率增加, 入射太阳辐射减少,导致温度降低。另外,一级土 地的减少, 使得地表潜热通量减小, 进入大气中的 水汽量降低,削弱局地水循环的强度,从而导致该 地区降水的减少(图7),所有20个试验集合平均 的降水量减少速率为-89.9 mm (100 a)⁻¹。这说 明土地利用变化使得青藏高原地区温度降低、降水 量减少。我们知道,温度降低的直接作用是使得年

潜在蒸发量减少,进而影响 Isw 增加 (变湿);相反 地,降水量减少的直接作用则是使得 Isw 减少(干 旱化)。而由于降水量减少带来的 Isw 减少(干旱 化)的作用大于温度减少带来的 Isw 增加(变湿) 的作用,最终计算得到的青藏高原地区 Isw 变化趋 势为-0.041 (100 a)⁻¹,即 20 世纪青藏高原地区 表现为干旱化的趋势。这种以土地利用变化来解释 温度和降水的变化的结果也佐证了全球耦合模式 土地利用变化模拟结果在区域尺度的合理性。



图 6 土地利用情景下 1901~2004 年温度变化趋势的空间分布: (a) - (e) 模式 CanESM2 的试验 1~5, (f) - (j) 模式 GISS-E2-H 的试验 1~5, (k) - (o) 模式 GISS-E2-R 的试验 1~5, (p) 模式 GFDL-ESM2M 的试验 1, (q) - (f): 模式 HadGEM2-ES 的试验 1~4 Fig. 6 Linear trends of temperature during 1901-2004 under the land use scenario: (a) - (e) Run1-Run5 for CanESM2 model, (f) - (j) Run1-Run5 for GISS-E2-H model, (k) - (o) Run1-Run5 for GISS-E2-R model, (p) Run1 for GFDL-ESM2M model, (g) - (f) Run1-Run4 for HadGEM2-ES model

值得注意的是,相对于青藏高原地区较为单一的土地利用变化,其他地区的土地利用变化空间交错、加之不同模式物理参数化方案的差异,使得这些地区土地利用变化对当地温度、降水变化的影响更为复杂(图6和图7)。例如,对于江淮地区来说,土地利用变化包括农田用地减少、牧草用地增加、一级土地减少、二级土地增加、城市用地增加的共同作用(图5)。已有的研究结果表明,即使是变化百分比相对最小的城市用地的增加,对温度增加和降水减少的影响也是显著的(Wang et al., 2012),

加之其他4种土地利用变化的相互影响,因而很难 归咎出江淮地区(或者其他地区)土地利用变化的 气候效应。

4 结论和讨论

土地利用变化是人类活动影响气候的重要强 迫之一。科学探讨与定量评估土地利用变化在区域 气候变化中的相对贡献,具有重要的社会意义。本 文利用 CMIP5 中的 5 个耦合模式 20 个试验的结果



图 7 同图 6, 但为降水变化趋势的空间分布 Fig. 7 Same as Fig. 6, but for the linear trends of precipitation

(包括历史情景和土地利用情景)分析了 1901~2004年土地利用变化对中国地区干湿变化的贡献,结果表明土地利用的变化加剧了中国地区 20 世纪干旱化的进程。其主要结论如下:

(1) 历史情景下 I_{SW} 的变化趋势约为-0.104 (100 a)⁻¹, 其中因土地利用变化作用而导致的 I_{SW} 变化趋势约为-0.036 (100 a)⁻¹。土地利用的变化 加剧了中国地区 20 世纪干旱化的进程, 贡献约为 1/3;

(2)通过将中国地区划分为干旱区、半干旱区 和湿润区可以发现,湿润区具有显著变干的趋势 [-0.17(100 a)⁻¹],其中土地利用变化的贡献约为 35.4%; 半干旱区也具有显著变干的趋势, 但土地 利用变化的贡献不显著; 干旱区在 20 世纪的干湿 变化趋势不显著, 且土地利用变化的贡献也不显 著;

(3) CMIP5 耦合模式的土地利用情景中,中国 地区土地利用的变化主要表现为一级土地的减少 和牧草用地的增加,二者分别从国土面积的 72.7% 和 12.9% (1901 年),变为 36.0%和 41.9% (2004 年),且 50 年代之后变化速率明显增加。二级土地、 农田和城市用地均呈现出持续增加的趋势,从 1901~2004 年增幅分别为 0.8%、6.5%和 0.35%。

(4) CMIP5 耦合模式的土地利用情景中,中国



图 8 5个模式 20个试验模拟的 1901~2004 年土地利用情景下 (a) 温度、(b) 降水变化趋势的一致性水平指数 *I*_c Fig. 8 Consistency index (*I*_c) from the 20 runs of 5 coupled models in simulating the direction of changes in (a) temperature and (b) precipitation during 1901–2004 under the land use scenarios

地区大面积显著的土地类型变化主要发生在青藏 高原地区,表现为一级土地的减少和牧草用地的增 加。在 1901~2004 年间,该地区一级土地的减少 的速率为-59.7% (100 a)⁻¹,牧草用地的增加速 率为 58.0% (100 a)⁻¹。相应地,该地区温度减少 速率为-1.04 °C (100 a)⁻¹,降水减少速率为-89.9 mm (100 a)⁻¹,计算得到的 I_{SW} 变化趋势为-0.041 (100 a)⁻¹,可以说明降水量减少带来的 I_{SW} 减少 (干旱化)的作用大于温度减少带来的 I_{SW} 增加(变 湿)的作用。

另外, 值得注意的是, 土地利用的变化是影响 局地气候变化 (例如干湿变化)的重要而非唯一的 因素。区域干湿变化也会受到诸如气候系统内部变 率以及外强迫等的影响。例如,已有研究表明,中 国华北地区从 70 年代中后期持续至今的干旱与 1976年太平洋年代际振荡 (PDO) 由冷位相向暖位 相的转变密切相关(马柱国和邵丽娟, 2006; Ma, 2007); PDO 的冷、暖位相分别对应美国中部和西 部降水的偏少和偏多(Dai, 2013b); 大西洋多年 代际振荡(AMO)的冷位相对应于 20 世纪南美洲 东南部持续变湿(Seager et al., 2010),而 AMO 的 暖位相会导致非洲 Sahel 西部、赤道北太平洋以及 美国中部降水增加,南非西部、赤道南大西洋以及 南美东部降水减少(Ting et al., 2011)。然而,各种 因子诸如土地利用、PDO、AMO 对中国地区气候 变化的相对贡献仍是未知数,因此在以后的工作

中,我们计划利用更多情景下 CMIP5 耦合模式的 结果,进一步研究不同强迫对气候变化的相对贡 献,进而深入理解中国地区干旱和干旱化进程的物 理机制。

致谢 耦合模式 HadGEM2-ES 中土地利用情景 4 个试验结 果由英国 Hadley 中心 Wu Peili 教授提供,特比感谢!

参考文献(References)

- Betts R A, Falloon P D, Goldewijk K K, et al. 2007. Biogeophysical effects of land use on climate: Model simulations of radiative forcing and large-scale temperature change [J]. Agricultural and Forest Meteorology, 142 (2): 216–233.
- Briffa K R, van der Schrier G, Jones P D. 2009. Wet and dry summers in Europe since 1750: Evidence of increasing drought [J]. International Journal of Climatology, 29 (13): 1894–1905.
- Chen H P. 2013. Projected change in extreme rainfall events in China by the end of the 21st century using CMIP5 models [J]. Chinese Science Bulletin, 58 (12): 1462–1472, doi: 10.1007/s11434-012-5612-2.
- Christidis N, Stott P A, Hegerl G C, et al. 2013. The role of land use change in the recent warming of daily extreme temperatures [J]. Geophys. Res. Lett., 40 (3): 589–594, doi: 10.1002/grl.50159.
- Cressman G P. 1959. An operational objective analysis system [J]. Mon. Wea. Rev., 87 (10): 367–374.
- Dai A G. 2011a. Drought under global warming: A review [J]. Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change, 2 (1): 45–65.
- Dai A G. 2011b. Characteristics and trends in various forms of the Palmer drought severity index during 1900–2008 [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 116: D12115, doi: 10.1029/2010JD015541.

- Dai A G 2013a. Increasing drought under global warming in observations and models [J]. Nature Climate Change, 3 (1): 52–58.
- Dai A G. 2013b. The influence of the inter-decadal Pacific oscillation on US precipitation during 1923–2010 [J]. Climate Dyn., 41(3–4): 633–646, doi: 10.1007/s00382-012-1446-5.
- Davin E L, de Noblet-Ducoudre N. 2010. Climatic impact of global scale deforestation: Radiative versus nonradiative processes [J]. J. Climate, 23 (1): 97–112.
- Fan B M, Dong Y. 2001. A discussion on China's ancient forest coverage [J]. Journal of Beijing Forestry University, 23 (4): 60–65.
- 符淙斌,安芷生,郭维栋. 2005. 我国生存环境演变和北方干旱化趋势 预测研究 (I): 主要研究成果 [J]. 地球科学进展, 20 (11): 1157–1167. Fu Congbin, An Zhisheng, Guo Weidong. 2005. Evolution of life-supporting environment in our nation and the predictive study of aridification in northern China (I): Main scientific issues and achievements [J]. Advances in Earth Science (in Chinese), 20 (11): 1157– 1167.
- Ge Q S, Zhao M C, Zheng J Y. 2000. Land use change of China during the 20th century [J]. Acta Geographica Sinica, 55 (6): 698–706.
- Ge Q S, Dai J H, He F N, et al. 2008. Land use changes and their relations with carbon cycles over the past 300a in China [J]. Science in China Ser. D: Earth Sciences, 51 (6): 871–884.
- 郭彦,董文杰,任福民,等. 2013. CMIP5 模式对中国年平均气温模拟及 其与 CMIP3 模式的比较 [J]. 气候变化研究进展, 9 (3): 181–186, doi: 10.3969/j.issn.1673-1719.2013.03.004. Guo Yan, Dong Wenjie, Ren Fumin, et al. 2013. Assessment of CMIP5 simulations for China annual average surface temperature and its comparison with CMIP3 simulations [J]. Advances in Climate Change Research (in Chinese), 9 (3): 181–186.
- Hoffmann W A, Jackson R B. 2000. Vegetation–climate feedbacks in the conversion of tropical savanna to grassland [J]. J. Climate, 13 (9): 1593– 1602.
- Hulme M, Marsh R, Jones P D. 1992. Global changes in a humidity index between 1931–60 and 1961–90 [J]. Climate Research, 2 (1): 1–22.
- Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, et al. 2009. Harmonisation of global land-use scenarios for the period 1500–2100 for IPCC-AR5 [J]. Integrated Land Ecosystem-Atmosphere Processes Study (iLEAPS) Newsletter, 7: 6–8.
- Hurtt G C, Chini L P, Frolking S, et al. 2011. Harmonization of land-use scenarios for the period 1500–2100: 600 years of global gridded annual land-use transitions, wood harvest, and resulting secondary lands [J]. Climatic Change, 109 (1–2): 117–161.
- Jiang D B, Wang H J, Lang X M. 2005. Evaluation of East Asian climatology as simulated by seven coupled models [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 22 (4): 479–495.
- Klein Goldewijk K. 2001. Estimating global land use change over the past 300 years: The HYDE database [J]. Global Biogeochemical Cycles, 15 (2): 417–433.
- 凌大燮. 1983. 我国森林资源的变迁 [J]. 中国农史, 2 (1): 26–36. Ling D X. 1983. The changes of the forest resources in our country [J]. Agricultural History of China (in Chinese), 2 (1): 26–36.

Liu M L, Tian H Q. 2010. China's land cover and land use change from

1700 to 2005: Estimations from high-resolution satellite data and historical archives [J]. Global Biogeochemical Cycles, 24 (3): GB3003, doi: 10.1029/2009GB003687.

- Ma Z G, Fu C B. 2003. Interannual characteristics of the surface hydrological variables over the arid and semi-arid areas of northern China [J]. Global and Planetary Change, 37 (3): 189–200.
- 马柱国. 2005. 我国北方干湿演变规律及其与区域增暖的可能联系 [J]. 地球物理学报, 48 (5): 1011–1018. Ma Zhuguo. 2005. Dry/wet variation and its relationship with regional warming in arid-regions of northern China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (5): 1011–1018.
- 马柱国, 符淙斌. 2005. 中国干旱和半干旱带的 10 年际演变特征 [J]. 地 球物理学报, 48 (3): 519–525. Ma Zhuguo, Fu Congbin. 2005. Decadal variations of arid and semi-arid boundary in China [J]. Chinese Journal of Geophysics (in Chinese), 48 (3): 519–525.
- 马柱国, 邵丽娟. 2006. 中国北方近百年干湿变化与太平洋年代际振荡的关系 [J]. 大气科学, 30 (3): 464-474. Ma Zhuguo, Shao Lijuan. 2006. Relationship between dry/wet variation and the Pacific Decade Oscillation (PDO) in northern China during the last 100 years [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 30 (3): 464-474.
- Ma Z G 2007. The interdecadal trend and shift of dry/wet over the central part of North China and their relationship to the Pacific Decadal Oscillation (PDO) [J]. Chinese Science Bulletin, 52 (15): 2130–2139.
- Ma Z G, Fu C B. 2007a. Some evidence of drying trend over northern China from 1951 to 2004 [J]. Chinese Science Bulletin, 51 (23): 2913–2925.
- Ma Z G, Fu C B. 2007b. Global aridification in the second half of the 20th century and its relationship to large-scale climate background [J]. Science in China Ser. D: Earth Sciences, 50 (5): 776–788.
- McGregor H V, Dupont L, Stuut J B W, et al. 2009. Vegetation change, goats, and religion: A 2000-year history of land use in southern Morocco [J]. Quaternary Science Reviews, 28 (15–16): 1434–1448.

Miao L J, Zhu F, He B, et al. 2013. Synthesis of China's land use in the past 300 years [J]. Global and Planetary Change, 100: 224–233.

- Myhre G, Kvalevag M M, Schaaf C B. 2005. Radiative forcing due to anthropogenic vegetation change based on MODIS surface albedo data [J]. Geophys. Res. Lett., 32: L21410, doi: 10.1029/2005GL024004.
- Palmer T N, Alessandri A, Andersen U, et al. 2004. Development of a European multimodel ensemble system for seasonal-to-interannual prediction (DEMETER) [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 85 (6): 853–872.
- Ramankutty N, Foley J A. 1999. Estimating historical changes in global land cover: Croplands from 1700 to 1992 [J]. Global Biogeochemical Cycles, 13 (4): 997–1027.
- Rowell D P. 1998. Assessing potential seasonal predictability with an ensemble of multidecadal GCM simulations [J]. J. Climate, 11 (2): 109–120.
- Seager R, Naik N, Baethgen W, et al. 2010. Tropical oceanic causes of interannual to multidecadal precipitation variability in southeast South America over the past century [J]. J. Climate, 23 (20): 5517–5539.
- Sheffield J, Goteti G, Wen F H, et al. 2004. A simulated soil moisture based drought analysis for the United States [J]. J. Geophys. Res.: Atmos., 109 (D24): D24108, doi: 10.1029/2004JD005182.

施雅风, 沈永平, 胡汝骥. 2002. 西北气候由暖干向暖湿转型的信号、影

响和前景初步探讨 [J]. 冰川冻土, 24 (3): 219–226. Shi Yafeng, Shen Yongping, Hu Ruji. 2002. Preliminary study on signal, impact and foreground of climatic shift from warm-dry to warm-humid in Northwest China [J]. Journal of Glaciology and Geocryology (in Chinese), 24 (3): 219–226.

- 施雅风, 沈永平, 李栋梁, 等. 2003. 中国西北气候由暖干向暖湿转型的 特征和趋势 [J]. 第四纪研究, 23 (2): 152–164. Shi Yafeng, Shen Yongping, Li Dongliang, et al. 2003. Discussion on the present climate change from warm–dry to warm–wet in northwest China [J]. Quaternary Sciences (in Chinese), 23 (2): 152–164.
- Sternberg T. 2011. Regional drought has a global impact [J]. Nature, 472 (7342): 169–169.
- Taylor C M, Lambin E F, Stephenne N, et al. 2002. The influence of land use change on climate in the Sahel [J]. J. Climate, 15 (24): 3615–3629.
- Taylor K E, Stouffer R J, Meehl G A. 2012. An overview of CMIP5 and the experiment design [J]. Bull. Amer. Meteor. Soc., 93 (4): 485–498.
- Thornthwaite C W. 1948. An approach toward a rational classification of climate [J]. Geographical Review, 38 (1): 55–94.
- Ting M F, Kushinir Y, Seager R, et al. 2011. Robust features of Atlantic multi-decadal variability and its climate impacts [J]. Geophys. Res. Lett., 38: L17705, doi: 10.1029/2011GL048712.
- UN General Assembly. 1994. Elaboration of an International Convention to Combat Desertification in Countries Experiencing Serious Drought and/or Desertification particularly in Africa– UNCCD [M]. United Nations, New York, 58pp.
- Wang A, Lettenmaier D P, Sheffield J. 2011. Soil moisture drought in China, 1950–2006 [J]. J. Climate, 24 (13): 3257–3271.
- Wang B, Ding Q H, Fu X H, et al. 2005. Fundamental challenge in simulation and prediction of summer monsoon rainfall [J]. Geophys. Res. Lett., 32 (15): L15711, doi: 10.1029/2005GL022734.

- Wang G L. 2005. Agricultural drought in a future climate: Results from 15 global climate models participating in the IPCC 4th assessment [J]. Climate Dyn., 25 (7–8): 739–753.
- Wang J, Feng J M, Yan Z W, et al. 2012. Nested high-resolution modeling of the impact of urbanization on regional climate in three vast urban agglomerations in China [J]. J. Geophys. Res., 117: D21103, doi: 10.1029/2012JD018226.
- 王延禄. 1990. 我国建立、引用和验证气象干旱指标综述 [J]. 干旱区地 理, 13 (3): 80-86. Wang Yanlu. 1990. The summae concerning arid meteorological targets to establish, quote and test in China [J]. Arid Land Geography (in Chinese), 13 (3): 80-86.
- 王志伟, 翟潘茂. 2003. 中国北方近 50 年干旱变化特征 [J]. 地理学报, 58 (S): 61-68. Wang Zhiwei, Zhai Panmao. 2003. Climate change in drought over northern China during 1950-2000 [J]. Acta Geographica Sinica (in Chinese), 58 (S): 61-68.
- Wen Q H, Zhang X, Xu Y, et al. 2013. Detecting human influence on extreme temperatures in China [J]. Geophys. Res. Lett., 40(6): 1171–1176, doi: 10.1002/grl.50285.
- Wilhite D A. 1993. Drought Assessment, Management and Planning: Theory and Case Studies [M]. Kluwer Academic Publishers, 293pp.
- Wilhite D A. 2000. Drought as a natural hazard: Concepts and definitions, in drought: A global assessment [J]. Routledge, 1: 3–18.
- Wu Z H, Huang N E, Wallace J M, et al. 2011. On the time-varying trend in global-mean surface temperature [J]. Climate Dyn., 37 (3–4): 759–773, doi: 10.1007/s00382-011-1128-8.
- 徐崇海, 沈新勇, 徐影. 2007. IPCC AR4 模式对东亚地区气候模拟能力 的分析 [J]. 气候变化研究进展, 3 (5): 287–292. Xu Chonghai, Shen Xinyong, Xu Ying. 2007. An analysis of climate change in East Asia by using the IPCC AR4 simulations [J]. Advance in Climate Change Research (in Chinese), 3 (5): 287–292.