

曾毓金, 谢正辉. 2015. 基于 CMIP5 模拟的中国区域陆气耦合强度评估及未来情景预估 [J]. 气候与环境研究, 20 (3): 337–346, doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14242. Zeng Yujin, Xie Zhenghui. 2015. Projection and evaluation of the land–atmosphere coupling strength over China by CMIP5 models [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 20 (3): 337–346.

基于 CMIP5 模拟的中国区域陆气耦合强度 评估及未来情景预估

曾毓金^{1,2} 谢正辉¹

1 中国科学院大气物理研究所大气科学和地球流体动力学数值模拟国家重点实验室, 北京 100029

2 中国科学院大学, 北京 100049

摘要 基于第五次国际耦合模式比较计划 (CMIP5) 11 个模式历史情景的模拟结果计算得到了中国区域夏季的陆气耦合强度并进行集合平均, 结果表明, 位于半干旱区的华北和内蒙古地区陆气耦合强度相对较强, 西部干旱区的陆气耦合强度相对较弱, 位于湿润区的中国东北地区东部、长江中下游和西南地区陆气耦合强度最弱。利用上述模式集合平均结果与由 NCEP 再分析资料和欧洲中心的中期气象预报 40 年再分析资料 (ERA40) 计算得到的陆气耦合强度相比较, 结果显示这些模式的集合平均与再分析资料 NCEP 和 ERA40 的计算结果有较好的一致性。利用历史情景模拟和不同的典型排放路径 (RCP), 即低排放情景 RCP2.6、中排放情景 RCP4.5 和高排放情景 RCP8.5 下的模拟结果预估陆气耦合强度未来变化。结果显示: 与历史情景相比较, 位于湿润区的中国南方地区蒸散发的主要控制因子是温度, 在 3 种排放情景下随着温度上升引起蒸散发增加所导致陆气耦合强度升高; 位于青藏高原以及半干旱区的内蒙古大部分地区蒸散发在未来的年际变化幅度减弱导致陆气耦合指数降低; 位于西北干旱区陆气耦合强度在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景上升, 然而在 RCP8.5 情景下陆气耦合强度下降, 其原因是在高排放情景下, 水汽平流输送明显增强, 局地蒸散发异常对空气湿度变化的贡献减弱, 导致了陆气耦合强度降低。未来预估结果在中国南方可信度相对较高, 从全国来看, 在 RCP4.5 情景下可信度相对较高。

关键词 CMIP5 中国 陆气耦合强度

文章编号 1006-9585 (2015) 03-0337-10

中图分类号 P461

文献标识码 A

doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2015.14242

Projection and Evaluation of the Land–Atmosphere Coupling Strength over China by CMIP5 Models

ZENG Yujin^{1,2} and XIE Zhenghui¹

1 State Key Laboratory of Numerical Modeling for Atmospheric Sciences and Geophysical Fluid Dynamics, Institute of Atmospheric Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100029

2 University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049

Abstract The ensemble mean summer land–atmosphere coupling strength of eleven models from the CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5), performing the historical run in China, is calculated. The results show that the strength is relatively high in Huabei and Inner Mongolia, located in the semi-arid area, and the result in West China, located in the arid area, is second strongest. The lowest strength regions are the humid areas of eastern Northeast China,

投稿日期 2014-11-14; 网络预出版日期 2015-03-06

资助项目 国家自然科学基金项目 91125016, 中国科学院战略性先导科技专项 XDA05110102

作者简介 曾毓金, 男, 1989 年出生, 博士研究生, 主要从事陆面模式发展及陆气耦合过程研究。E-mail: zengyj@mail.iap.ac.cn

通讯作者 谢正辉, E-mail: zxie@lasg.iap.ac.cn

the middle and lower reaches of the Yangtze River, and Southwest China. Comparison of the ensemble mean with results calculated from NCEP and ERA-40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40-Year Reanalysis) data shows high consistency. Next, the ensemble mean of the CMIP5 historical run and three RCP (Representative Concentration Pathway) runs (RCP2.6, RCP4.5, and RCP8.5) are used to predict the change in the strength of summer land-atmosphere coupling in China. The results show, compared to the historical run, the strength increases in the humid area of southern China, induced by higher evapotranspiration caused by higher temperatures. Meanwhile, the strength reduces in the Tibetan Plateau and semi-arid area of Inner Mongolia, induced by a reduction in the land-atmosphere coupling index caused by a reduction of evapotranspiration amplitude. The arid area of Xinjiang shows increasing strength in the RCP2.6 and RCP4.5 runs, but decreasing strength in the RCP8.5 run. This result is caused by enhanced vapor advection in the high emissions scenario, which makes the relationship between local evaporation and air humidity weaker. There is a higher degree of confidence in the prediction results in southern China and in the RCP4.5 run.

Keywords CMIP5 models, China, Land-atmosphere coupling strength

1 引言

陆地约占地球表面的三分之一，是气候系统重要而复杂的组成部分（陈海山和孙照渤，2002），地表状态的变化会对区域甚至全球的气候要素产生影响（于燕和谢正辉，2012），而其中土壤湿度异常对大气水分含量的变化起着重要作用（Namias, 1963）。陆地地温与土壤湿度的变化影响陆面与大气之间的水分与能量通量，进而改变大气中的降水场、温度场和风场，从而对天气和气候系统产生直接影响（Sun and Wu, 2001；黄荣辉等，2013）。另外，土壤湿度与植被有着密切联系。植被的腾发是陆地散发的主要组成部分，其对潜热通量和降水有重要影响，是影响陆气耦合强度一个重要因素（Dirmeyer, 1994；Hoffmann and Jackson, 2000）。土壤湿度的异常会通过影响植被的生长改变腾发量和陆表覆盖状况（张强等，2005；陈海山等，2006），间接的影响气候（Shukla and Mintz, 1982）。近年的研究还表明，除去气候平均态，极端气候事件对土壤湿度异常也十分敏感（周晶和陈海山，2012；陈海山和周晶，2013；Seneviratne et al., 2013）。

不过这种大气对陆表状况异常的响应并不是绝对的，而是与局地气候环境因子、陆面状况和所选的时空尺度有着密切的联系（Betts et al., 1996）。在研究气候变化时，确定反映这种大气温度、湿度、降水等变量对于陆地地表温度、土壤湿度变化响应程度的陆气耦合强度是十分必要的（马柱国等，2000）。在陆气耦合强度较强的区域，土壤湿度的变化会导致大气水汽以及大气降水产生较大的改变，特别是在春、夏季节，土壤湿度通过潜热通量

和感热通量对大气有较强的反馈（林朝晖等，2001；佟华等，2007），由此可以通过土壤湿度提高对东亚夏季气候的潜在可预报性（李忠贤等，2012），改进数值天气预报及短期气候和灾害极值事件的预测（邹旭东等，2004；孙丞虎等，2005；李巧萍等，2007；郭维栋等，2007；张文君等，2012）。

然而，由于复杂多变的非均匀下垫面特征（刘辉志等，2013），陆气耦合的过程及其机理是十分复杂的（林朝晖等，2008），获取时空连续的观测较为困难，因此陆气耦合研究需要依赖于陆面过程模式和气候系统模式。Koster et al. (2005) 利用 12 个大气模式进行了全球陆气耦合敏感性试验，在全球尺度上确定了陆气耦合强度较高的区域，并且指出影响耦合强度的关键因子是潜热通量（Guo et al., 2005），然而由于计算代价较大，这种短期敏感性试验只适用于研究季节内的陆气耦合强度，较难在年际尺度上进行模拟研究。Dirmeyer (2011) 将大气对土壤湿度的响应分解为潜热通量对土壤湿度异常的响应和大气状况对潜热通量异常的响应，并分别给出了这两部分的数学表达式（Dirmeyer et al., 2013a, 2013b），利用该方法以及国际耦合模式比较计划 CMIP5（Taylor et al., 2012）模拟结果，分别研究了全球和北美区域在高排放情景 RCP8.5 下陆气耦合强度的变化。然而 Dirmeyer et al. (2013a, 2013b) 仅仅给出了高排放情景下的结果，并未分析陆气耦合强度在未来不同情景下随着温室气体排放浓度不同而产生的变化，也没有探究引起耦合强度变化的原因。因此，为了理解不同区域温室气体排放浓度对于陆气耦合强度的影响及其作用机制，有必要分析未来各种排放情景下耦合强度的变化。

本文基于 CMIP5 中 11 个模式的历史模拟进行

集合平均，并与 NCEP 和 ERA40 再分析资料相比对，分析了过去 40 年中国区域陆气耦合强度的空间分布特征，然后利用模式集合模拟预估了未来高排放、中排放和低排放情景下中国不同区域陆气耦合的强度及其相对于历史情景的变化情况，最后给出了不确定性分析，确定了未来预估置信度较高的区域和排放情景。

2 数据和方法

2.1 数据

本研究利用了 CMIP5 中 11 个模式的历史情景模拟(1850~2005 年)以及未来低排放情景 RCP2.5、中排放情景 RCP4.5 和高排放情景 RCP8.5 情景模拟(2006~2099 年)的表层 10 cm 土壤水含量(mrsos)、地表向上的潜热通量(hfls)、2 m 绝对湿度(huss)数据。这些模式包括 bcc-csm1-1、CanESM2、FGOALS-g2、FGOALS-s2、GFDL-CM3、GFDL-ESM2G、CCSM4、CNRM-CM5、INM-CM4、IPSL-CM5A-LR、IPSL-CM5A-MR，其模式分辨率以及其使用的陆面模式或者陆面计算方案等相关信息见表 1。之所以选择这些模式是因为它们在 CMIP5 中的模拟结果涵盖了历史和未来情景下计算陆气耦合强度所需要的所有数据，并且这些模式

的结果在过去的一些相关研究中也多次使用(Ren and Yang, 2012; Anav et al., 2013; Dirmeyer et al., 2013a, 2013b; Seneviratne et al., 2013; Zunz et al., 2013)。

为了提升结果的可靠性，研究还利用了 NCEP 再分析资料(Kalnay et al., 1996; Kistler et al., 2001)和欧洲中心的中期气象预报 40 年再分析资料(ERA40)(Uppala, 2002)来计算陆气耦合强度并与模式的模拟结果作对比。这里近似认为 ERA40 7 cm 土壤湿度与其表层 10 cm 土壤湿度相等。

由于上述模式与再分析资料的空间分辨率可能互不相同，将模式模拟结果和再分析资料双线性插值到 0.5°(纬度)×0.5°(经度)经纬网进行分析。本研究的侧重点为陆气耦合强度的年际变化，其计算所利用的模拟数据和再分析资料均使用月平均。

2.2 陆气耦合强度算法

陆气耦合过程主要表现为大气状态变化与陆表状态变化之间的联系，其中最为典型的是降水对土壤湿度的响应。本研究则利用与地表关系比较密切的 2 m 处空气的绝对湿度来研究近地表空气湿度对于土壤湿度异常的响应，这种响应过程主要是通过潜热通量来实现的。

将空气湿度对土壤湿度变化的响应分解为潜热通量对土壤湿度变化的响应和空气湿度对潜热

表 1 11 个 CMIP5 气候模式概况

Table 1 Information on the eleven CMIP5 models used in this study

| 研究机构 | 模式名称 | 所用陆面过程模型或者方案 | 分辨率(纬向×经向) |
|--|--|--|------------|
| 中国气象局国家气候中心, 中国 | BCC-CSM1.1 (Beijing Climate Center, Climate System Model, version 1.1) | BCC_AVIM1.0 (Atmosphere and Vegetation Interaction Model 1.0) | 128×64 |
| 加拿大气候模式与分析中心, 加拿大 | CanESM2 (second generation Canadian Earth System Model) | CLASS2.7+CTEM1 (adjusted land cover and soil albedo model) | 256×128 |
| 中国科学院大气物理研究所 LASG (大气科学和地球流体力学数值模拟国家重点实验室), 中国 | FGOALS-g2 (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System Model, gridpoint version 2) | CLM3 (Community Land Model 3) | 128×60 |
| 中国科学院大气物理研究所 LASG, 中国 | FGOALS-s2 (Flexible Global Ocean-Atmosphere-Land System model, spectral version 2) | CLM3 | 128×108 |
| NOAA 地球物理动力学实验室, 美国 | GFDL-CM3 (Geophysical Fluid Dynamics Laboratory Climate Model, version 3) | LM3 (Land Model 3) | 144×90 |
| NOAA 地球物理动力学实验室, 美国 | GFDL-ESM2G (Earth System Model with GOLD ocean component) | LM3 | 144×90 |
| NCAR, 美国 | CCSM4 (Community Climate System Model, version 4) | CLM4 (Community Land Model 4) | 288×192 |
| 国家气象研究中心及欧洲高级培训与科学计算研究中心, 法国 | CNRM-CM5 (Centre National de Recherches Meteorologiques Coupled global climate Model, version 5) | ISBA (Interaction Sol-Biosphère-Atmosphère) | 256×128 |
| 数值计算研究所, 俄罗斯 | INM-CM4 (Institution of Numerical Mathematics Coupled Model, version 4.0) | 内嵌于大气模块中简单的模型 | 180×120 |
| 皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所, 法国 | IPSL-CM5A-LR (L'Institut Pierre-Simon Laplace Coupled Model, version 5, coupled with NEMO, Low Resolution) | ORCHIDEE (Organising Carbon and Hydrology In Dynamic Ecosystems) | 96×96 |
| 皮埃尔西蒙拉普拉斯研究所, 法国 | IPSL-CM5A-MR (Mid Resolution) | ORCHIDEE | 144×143 |

通量变化的响应，定义陆气耦合指数 (Dirmeyer, 2011) 表示潜热通量对土壤湿度异常的响应:

$$I(w_m, h_m) = \sum (w'_{m,y} h'_{m,y}) / \sqrt{(w'_{m,y})^2}, \quad (1)$$

其中, $I(w_m, h_m)$ 表示 m 月的陆气耦合指数; $w'_{m,y}$ 和 $h'_{m,y}$ 分别表示 y 年 m 月的土壤湿度和潜热通量的距平值, 即 y 年 m 月的值减去 m 月的气候态平均值。由此定义可以推得陆气耦合指数的另一种表达形式:

$$I(w_m, h_m) = \sqrt{n} r(w_m, h_m) \sigma(h_m), \quad (2)$$

其中, $r(w_m, h_m)$ 是由 m 月的土壤湿度和潜热通量组成的时间序列的相关系数, $\sigma(h_m)$ 是 m 月的潜热通量时间序列的标准差, n 则是数据的时间长度 (年数)。陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 是由土壤湿度与潜热通量的相关系数 $r(w_m, h_m)$ 和潜热通量的标准差 $\sigma(h_m)$ 共同决定的。

潜热通量与大气状态的关系可用潜热通量与 2 m 处的绝对湿度的相关系数 $r(h_m, q_m)$ 来表示 (Dirmeyer et al., 2013a, 2013b)。当潜热通量对土壤湿度异常的响应和大气状况对潜热通量异常的响应都较高, 即陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 和潜热通

量与 2 m 绝对湿度的相关系数 $r(h_m, q_m)$ 都较高时, 说明空气中的水汽变化对于土壤含水量的变化较敏感, 陆气耦合强度较强。研究陆气耦合最终目的是研究土壤湿度对于降水的反馈能力, 而中国降水主要集中在夏季, 本研究只研究夏季的陆气耦合强度。使用夏季 6、7、8 月份平均的土壤湿度、潜热通量和 2 m 湿度进行陆气耦合强度的计算。

3 1958~2001 年中国区域陆气耦合强度的空间分布

用 CMIP5 中 11 个模式历史情景模拟结果以及 NCEP 和 ERA40 再分析资料计算中国区域夏季的陆气耦合强度得到 44 年 (1958~2001 年) 表示潜热通量对土壤湿度异常响应的陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 和潜热通量与 2 m 空气湿度相关系数 $r(h_m, q_m)$ 的空间分布, 结果见图 1。

由于再分析资料对于土壤湿度的刻画能力也有限, 因此在这里只选择 CMIP5 模式集合与两套再分析资料表现一致的区域, 认为这些区域模式模拟和再分析资料计算出的陆气耦合强度可信度较

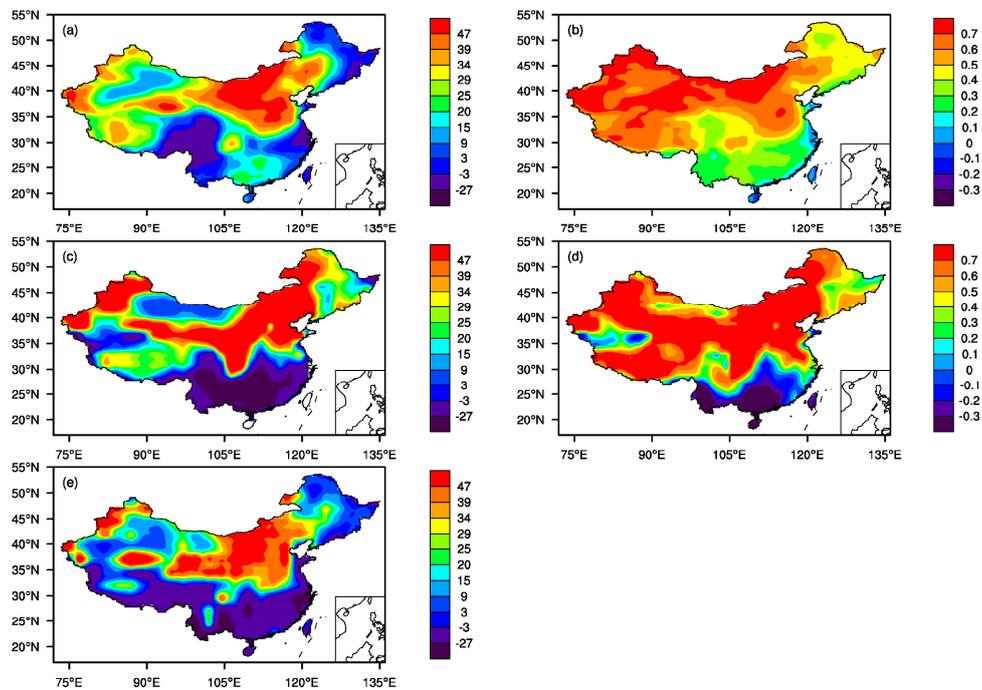


图 1 (a、b) CMIP5 模式集合、(c、d) NCEP 再分析资料、(e) ERA40 再分析资料计算的 1958~2001 年中国夏季陆气耦合强度: (a、c、e) $I(w_m, h_m)$; (b、d) $r(h_m, q_m)$
Fig. 1 Simulated land-atmosphere coupling strength in summer, in China, from 1958 to 2001, calculated by (a, b) CMIP5 (Coupled Model Intercomparison Project, phase 5) ensemble, (c, d) NCEP reanalysis data, and (e) ERA-40 (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts 40-Year Reanalysis) data: (a, c, e) $I(w_m, h_m)$; (b, d) $r(h_m, q_m)$

高, 针对这些区域进行分析。由图 1a、1c、1e, 模式集合模拟的 $I(w_m, h_m)$ 和由再分析资料计算得到的 $I(w_m, h_m)$ 在华北和内蒙古地区较高, 说明这些区域潜热通量对于土壤湿度的异常响应较强, 水分是限制蒸散发的主要因素。在东北大部分地区, 西南部分地区和长江中下游地区, 模式模拟和再分析资料计算的陆气耦合指数较低, 说明在这些区域潜热通量对于土壤湿度的变化不敏感, 能量是制约蒸散发的主要因素。图 1b、1d 是模拟和再分析资料计算的空气湿度和潜热通量的相关性 $r(h_m, q_m)$ 。模式和再分析资料的结果表明, 西北和华北 $r(h_m, q_m)$ 较高, 而在南方相对较低。无论是 $I(w_m, h_m)$ 还是 $r(h_m, q_m)$, 模式模拟和再分析资料计算的空间分布大体一致, 一定程度上说明了用模式集合平均计算陆气耦合强度的合理性, 弥补了前人尤其是 Dirmeyer et al. (2013a, 2013b) 在其研究中未使用再分析资料和模式结果进行对比的空白。

结合陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 和潜热通量与空气湿度的相关系数 $r(h_m, q_m)$ 一起来看, 无论是模式集合还是再分析资料都显示位于半干旱区的华北和内蒙古地区 $I(w_m, h_m)$ 和 $r(h_m, q_m)$ 同时较大, 说明该区域整体陆气耦合强度较大; 位于西部干旱区的陆气耦合强度相对较弱; 位于湿润区的中国东北地区东部、长江中下游和西南地区, $I(w_m, h_m)$ 和 $r(h_m, q_m)$ 同时较小, 陆气耦合强度最弱。造成这种分布的主要原因可能有以下几点: 首先, 陆气耦合强度较大的华北和内蒙古地区, 属于东部季风区, 在夏季可以保证一定的降水量 (尚宗波等, 2001) 和不低的土壤含水量 (0.15~0.3) (张文君等, 2008), 同时夏季气温较高, 有足够的能量将土壤水分蒸发至大气。其次, 由于该区域夏季水汽水平输送通量小于南方 (黄荣辉等, 2011), 空气湿度主要受局地蒸散发影响, 即被蒸散发的土壤水分可以对局地的空气湿度产生较大贡献。另外, 在华北地区, 植被覆盖度高 (张学珍和朱金峰, 2013), 叶面蒸发较大, 总的蒸散发潜热释放较大, 导致对流较强, 这也是该区域陆气耦合强度较强的原因之一。在南方区域, 夏季水汽水平输送通量较大 (黄荣辉等, 2011), 导致水汽充沛, 局地蒸散发对空气水分的贡献不大, 导致陆气耦合强度不大。在东北, 夏季温度不够高, 没有充足的能量将土壤中的水分蒸发出去, 导致陆气耦合强度也不高。在西北地区, 由于水资源过于短缺 (陈亚宁等, 2012), 导致蒸散

发以及蒸散发的标准差 $\sigma(h_m)$ 较小, $I(w_m, h_m)$ 较低, 陆气耦合强度不高。

4 未来情景下中国陆气耦合强度空间分布

图 2 是 2056~2099 年低排放情景 RCP2.6、中排放情景 RCP4.5 和高排放情景 RCP8.5 下 $I(w_m, h_m)$ 和 $r(h_m, q_m)$ 的空间分布。图 2 显示 $I(w_m, h_m)$ 和 $r(h_m, q_m)$ 的空间分布在不同排放情景下差异不显著, 并且和图 1 中历史情景的空间分布相似。由图 2d、2e、2f, $r(h_m, q_m)$ 在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景的西北地区南部与历史情景相比有明显的下降, 其它地区变化不大。RCP8.5 情景下, 除了西北南部区域, 在华北以及西北北部地区, 也有比较明显的降低。这与 Dirmeyer et al. (2013a) 的结果一致。由图 2j、2k、2i, $I(w_m, h_m)$ 在未来 3 个情景下, 华北地区, 内蒙古, 东北以及西藏地区与历史情景相比有所降低, 而在南方地区以及华中地区升高。

图 3 显示了图 2 中陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 与潜热通量和空气湿度相关系数 $r(h_m, q_m)$ 同时上升和同时降低的区域, 红色是两者同时上升的区域, 蓝色是两者同时降低的区域, 白色是变化方向相反的区域。图 3 表明, 中国长江以南地区在 3 个排放情景下耦合强度增强, 这可能是由于温度升高导致湿润区蒸散发升高引起的。在西北南部地区和东北北部地区, 耦合强度降低, 这是由于潜热通量的振幅 $\sigma(h_m)$ 减小导致陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 降低所引起的, 详见图 4。

图 4 表明, 全国大部分地区潜热通量振幅有小幅度增长, 而西北南部地区和东北地区有明显的下降, 特别是在 RCP2.6 情景下, 潜热通量振幅下降的区域 (图 4a) 和陆气耦合强度下降的区域 (图 3a) 有很高的一致性。

另外, 由图 3, 陆气耦合强度对于温室气体排放比较敏感的是西北干旱区, 该区域 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下陆气耦合强度上升, RCP8.5 情景下下降, 这是由于 $r(h_m, q_m)$ 在高排放情景出现明显的下降导致的 (图 2f), 进一步分析见图 5。

图 5 表明, 在高排放情境下新疆北部地区 2040 年之后绝对湿度相比低排放和中排放情景有大幅提升, 然而蒸散发在 3 个情景中却并未见明显的变化趋势。在蒸散发未变的前提下, 空气湿度升高, 说明平流的水汽补充增强了, 这就造成了蒸散发与

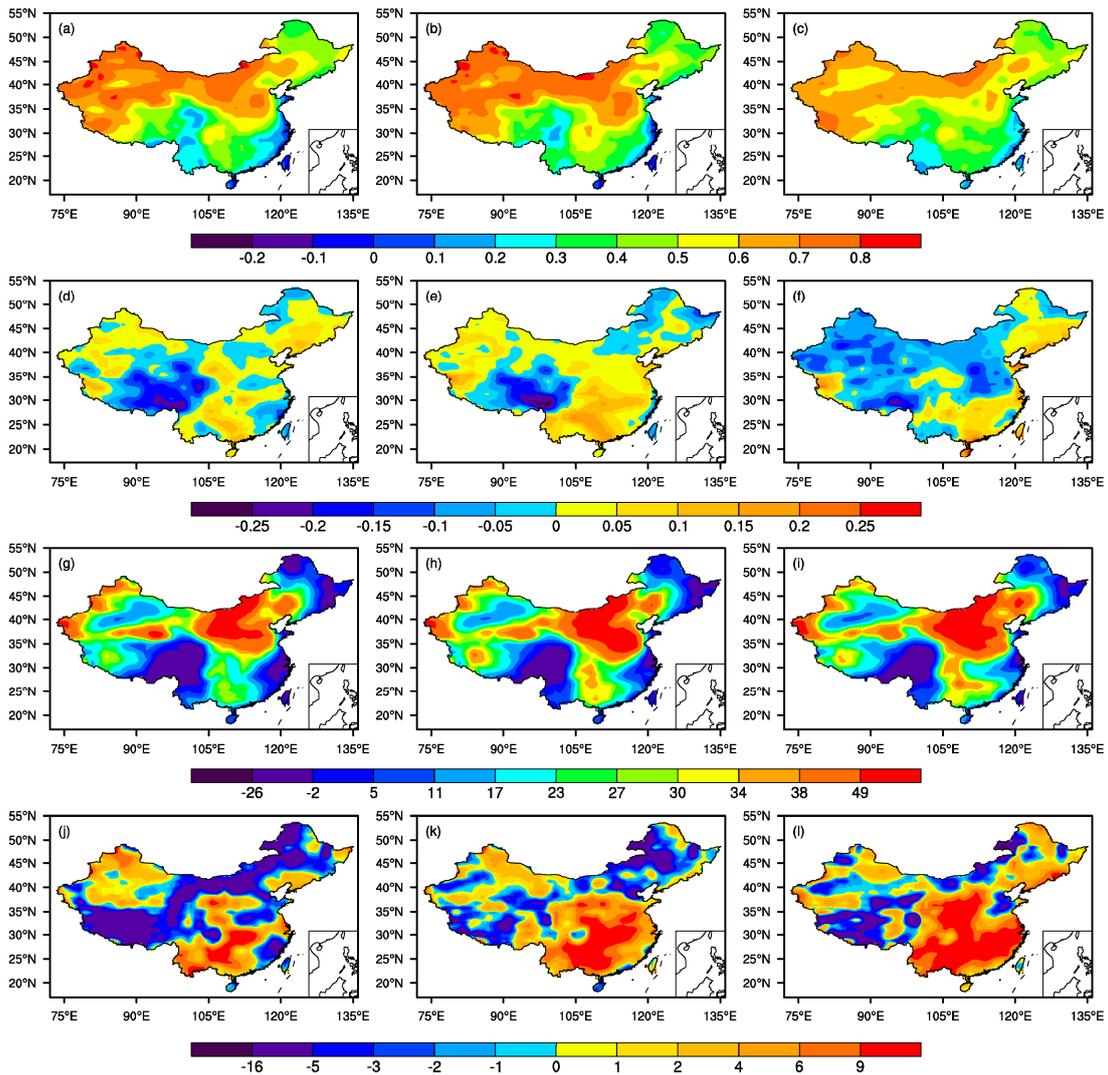


图2 CMIP5 模式集合模拟的 2056~2099 年 RCP2.6 (左)、RCP4.5 (中)、RCP8.5 (右) 情景下中国夏季 (a-c、g-i) 陆气耦合强度及其 (d-f、j-l) 与 1958~2001 年集合模拟之差: (a-f) $r(h_m, q_m)$; (g-l) $I(w_m, h_m)$

Fig. 2 The Chinese summer (a-c, g-i) land-atmosphere coupling strength from 2056 to 2099, and (d-f, j-l) its differences with the results from 1958 to 2099 simulated by CMIP5 ensemble models in RCP2.6 (Representative Concentration Pathway) (left), RCP4.5 (middle), and RCP8.5 (right): (a-f) $r(h_m, q_m)$; (g-l) $I(w_m, h_m)$

空气湿度的相关性 $r(h_m, q_m)$ 减弱, 陆气耦合强度降低。由此可见, 陆气耦合强度不但受到土壤湿度和温度的影响, 局地的蒸散发的波动和水汽平流也影响了耦合强度的变化。在西北干旱区, 虽然温度升高使能量更加充沛, 但是同时也引起了更强的水汽平流, 导致陆气耦合强度反而降低, Dirmeyer et al. (2013a, 2013b) 在其研究中仅使用的高排情景来研究未来陆气耦合强度的变化是不够全面的。

5 陆气耦合强度预估的不确定性

由于 CMIP5 模式对于未来气候模拟的不确定

性较大 (Knutti and Sedláček, 2013), 因此由图 3 所表示的模式集合对于中国区域未来夏季的陆气耦合强度变化方向的模拟也有较大的不确定性。本研究由不同 CMIP5 模式模拟陆气耦合强度变化方向的一致程度来分析所得结果在不同区域和各个排放情景的可信度。图 6 是 10 个 CMIP5 模式中 (由于 FGOALS-s2 没有在 RCP2.6 下的模拟结果, 这里仅用剩下的 10 个模式进行分析), 对未来陆气耦合强度变化方向的模拟与图 3 保持一致的模式数量的空间分布。红色越深表示该区域有越多的模式同时模拟出了陆气耦合强度变强或者变弱的趋势, 可信程度也越高; 红色越浅则表示该区域越少模式模拟

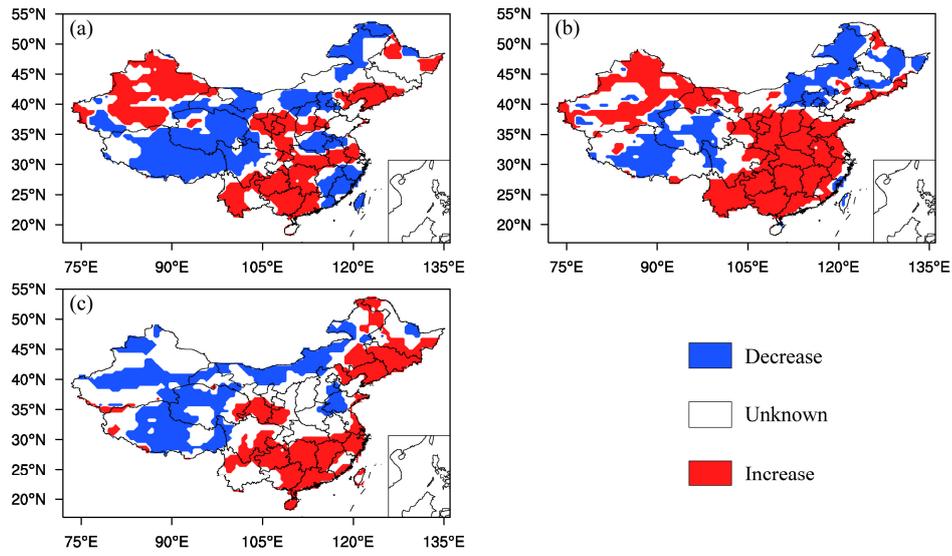


图 3 中国区域整体的陆气耦合强度的变化方向：(a) RCP2.6；(b) RCP4.5；(c) RCP8.5

Fig. 3 The change direction of full land–atmosphere coupling strength in China: (a) RCP2.6; (b) RCP4.5; (c) RCP8.5

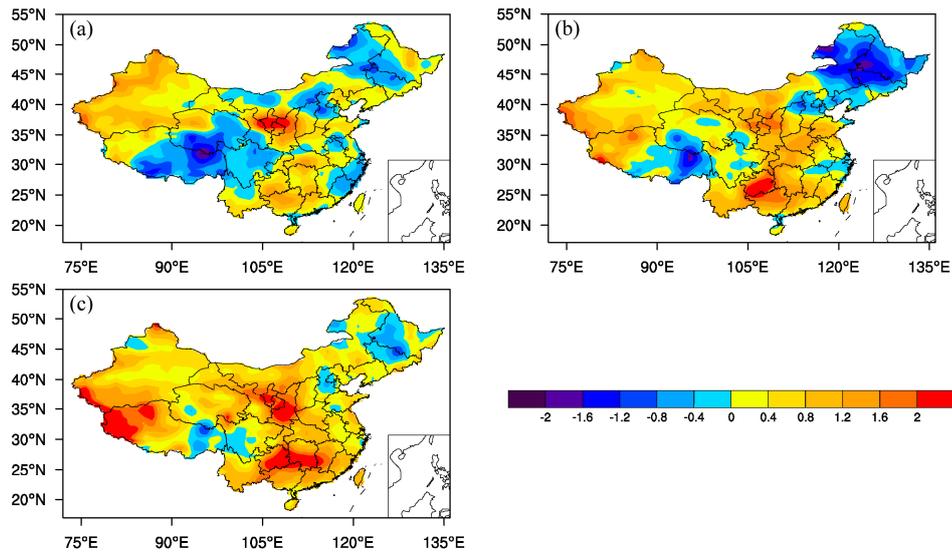


图 4 未来情景和历史情景的潜热通量振幅 $\sigma(h)$ 的差值：(a) RCP2.6；(b) RCP4.5；(c) RCP8.5

Fig. 4 The differences of amplitudes of latent heat flux $\sigma(h)$ between future and historical runs: (a) RCP2.6; (b) RCP4.5; (c) RCP8.5

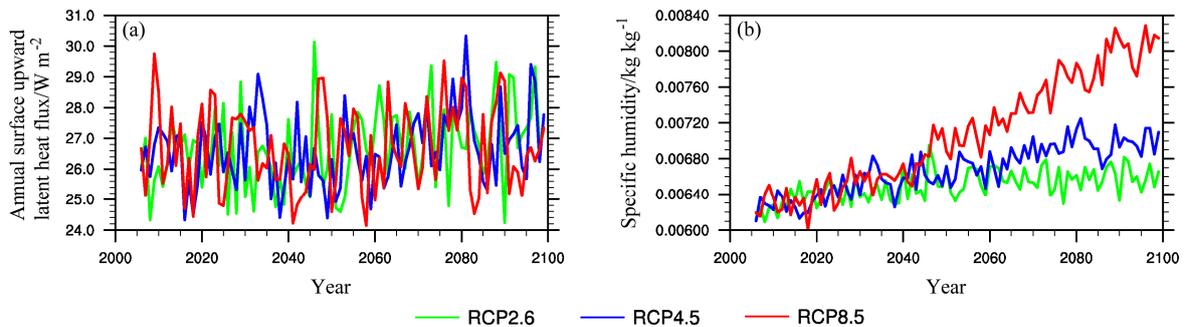


图 5 2006~2099 年新疆北部区域夏季 (a) 潜热通量和 (b) 绝对湿度的年际变化

Fig. 5 The annual summer (a) latent heat flux and (b) specific humidity in North Xinjiang from 2006 to 2099

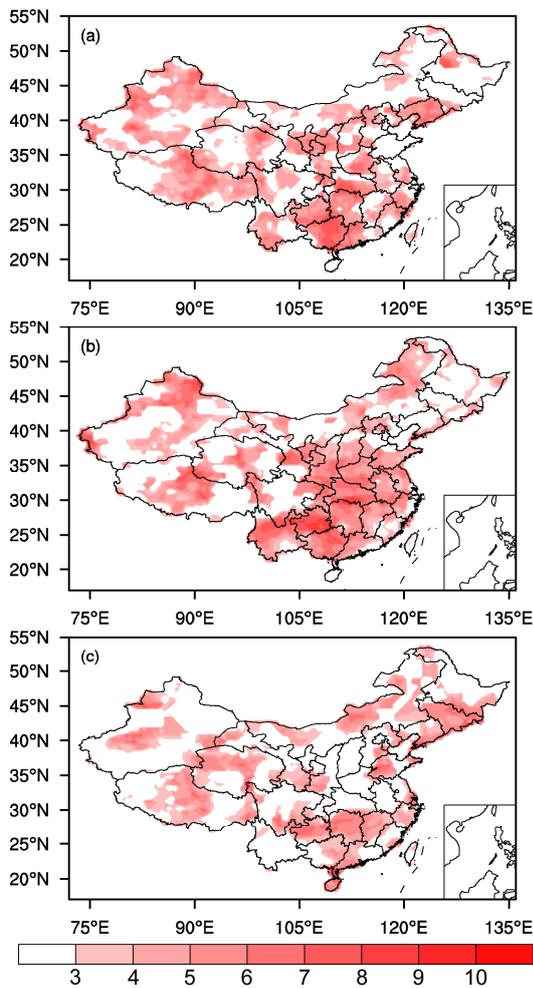


图6 10个CMIP5模式中模拟的陆气耦合强度变化方向与图3一致的模式数量: (a) RCP2.6; (b) RCP4.5; (c) RCP8.5.

Fig. 6 The amount of CMIP5 models, out of ten, showing consistent results for land-atmosphere coupling strength as those in Fig. 3: (a) RCP2.6; (b) RCP4.5; (c) RCP8.5.

出了陆气耦合强度一致性的变化,可信程度越低。当某区域能模拟出图3中陆气耦合强度变化方向的模式数量不足3个时,则认为该区域模式平均的结果不可信(这是因为,如果模式模拟耦合强度变化的方向是随机的,则恰好与图3中结果一致的概率是25%)。由图6可见,在中国区域南方,CMIP5模式模拟的可信程度较高,西部地区和华北地区次之,而在东北地区,CMIP5模式集合模拟的一致性较差,可信度较低。可信度在不同排放情景下差异也较大,从全国来看,模式的模拟结果在中排放情景RCP4.5下可信程度最高,在低排放情景RCP2.6下可信程度其次,而在高排放情景RCP8.5下可信程度最低。这同时也说明 Dirmeyer et al. (2013a,

2013b)在其研究中仅仅使用高排放情景下的模拟结果来预估未来陆气耦合强度变化的不合理之处。

6 结论

本研究基于11个CMIP5模式在历史情景模拟的表层土壤湿度,潜热通量和2 m处空气的绝对湿度,计算了陆气耦合指数 $I(w_m, h_m)$ 和潜热通量与2 m空气绝对湿度的相关系数 $r(h_m, q_m)$,并与基于NCEP和ERA40两套再分析资料所计算的陆气耦合强度进行对比,分析了中国夏季陆气耦合强度的空间分布特征,弥补了前人未使用再分析资料计算的陆气耦合强度与模式模拟结果进行对比的空白。之后利用CMIP5模式集合模拟的结果预估了在未来RCP2.6、RCP4.5和RCP8.5 3个排放情景下中国夏季的陆气耦合强度的空间分布和其与历史相比的变化情况。研究表明,在历史情景和未来情景下,位于华北和内蒙古地区陆气耦合强度相对较高,这些区域空气湿度对土壤湿度的异常有较强响应,位于西部干旱区的陆气耦合强度相对较弱,位于湿润区的中国东北地区东部,长江中下游和西南地区陆气耦合强度最弱,这些区域空气湿度对于土壤湿度的变化响应能力弱。模式的集合平均与再分析资料对于陆气耦合强度空间分布的刻画较为相似。未来3个排放情景下,在长江以南地区,陆气耦合强度增长,在西北南部地区和东北北部地区,陆气耦合强度下降。值得注意的是,在西北干旱区,陆气耦合强度在低排放情景和中排放情景下上升,在高排放情景下下降,这是由于在高排放情景下西北干旱区水汽平流增强导致的。对未来预估的可信度在中国南方区域相对较高,从全国来看在中排放情景RCP4.5下可信度相对较高。Dirmeyer (2013a, 2013b)在其研究中仅仅针对RCP8.5情景进行未来预估,不但无法研究陆气耦合强度对温室气体排放的敏感性,而且可信度不如RCP4.5。

本研究依然存在一些不确定性。首先研究使用了有关土壤湿度的数学表达式来表示陆气耦合强度,这样的表达方式仅仅是考虑了大气对于土壤湿度变化的响应程度,并未考虑对其他因素比如土壤温度的响应,而且这种响应是局部的,并未考虑蒸发通过环流作用影响其他地区的大气水含量的情况。其次,研究中所用模式和再分析资料数值与真实值相比,都存在一定的误差,这是不确定性的

主要来源。再次, 本研究着重于探讨空气湿度对于土壤湿度变化的响应, 如果要探讨降水对土壤湿度变化的响应, 在本研究的基础之上, 还需要进一步分析空气中的水分是否易于通过对流产生降水。

未来的研究工作, 应当主要基于 3 个方面, 第一个是降低不确定性, 可以通过收集更多的观测资料来优化再分析资料, 并将更多的模式加入模式集合以减小不确定性。第二个方向是进一步进行陆气耦合的机理研究, 更深入地分析引起水汽平流和潜热通量振幅改变的原因以及是否还存在其他的对陆气耦合强度影响较大的因素。第三个方向是把理论应用于实践, 研究如何在陆气耦合强度较高的区域应用土壤湿度辅助降水预报。

参考文献 (References)

- Anav A, Friedlingstein P, Kidston M, et al. 2013. Evaluating the land and ocean components of the global carbon cycle in the CMIP5 earth system models [J]. *J. Climate*, 26 (18): 6801–6843.
- Betts A K, Ball J H, Beljaars A C M, et al. 1996. The land surface-atmosphere interaction: A review based on observation and global modeling perspectives [J]. *J. Geophys. Res.*, 101 (D3): 7209–7225.
- 陈海山, 孙照渤. 2002. 陆气相互作用及陆面模式的研究进展 [J]. *南京气象学院学报*, 25 (2): 278–288. Chen Haishan, Sun Zhaobo. 2002. Review of land-atmosphere interaction and land surface model studies [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 25 (2): 278–288.
- 陈海山, 倪东鸿, 李忠贤, 等. 2006. 植被覆盖异常变化影响陆面状况的数值模拟 [J]. *南京气象学院学报*, 29 (6): 725–734. Chen Haishan, Ni Donghong, Li Zhongxian, et al. 2006. Modeling of impacts of vegetation coverage change on land surface conditions [J]. *Journal of Nanjing Institute of Meteorology (in Chinese)*, 29 (6): 725–734.
- 陈海山, 周晶. 2013. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 II. 敏感性试验分析 [J]. *大气科学*, 37 (1): 1–13. Chen Haishan, Zhou Jing. 2013. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part II: Sensitivity experiments analysis [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (1): 1–13.
- 陈亚宁, 杨青, 罗毅, 等. 2012. 西北干旱区水资源问题研究思考 [J]. *干旱区地理*, 35 (1): 1–9. Chen Yaning, Yang Qing, Luo Yi, et al. 2012. Ponder on the issues of water resources in the arid region of Northwest China [J]. *Arid Land Geography (in Chinese)*, 35 (1): 1–9.
- Dirmeyer P A. 1994. Vegetation Stress as a feedback mechanism in midlatitude drought [J]. *J. Climate*, 7 (10): 1463–1483.
- Dirmeyer P A. 2011. The terrestrial segment of soil moisture-climate coupling [J]. *Geophys. Res. Lett.*, 38 (16): 1–5.
- Dirmeyer P A, Jin Y, Singh B, et al. 2013a. Trends in land-atmosphere interaction from CMIP5 Simulations [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 14 (3): 829–849.
- Dirmeyer P A, Jin Y, Singh B, et al. 2013b. Evolving land-atmosphere interactions over North America from CMIP5 simulations [J]. *J. Climate*, 26 (19): 7313–7327.
- 郭维栋, 马柱国, 王会军. 2007. 土壤湿度——一个跨季度降水预测中的重要因子及其应用探讨 [J]. *气候与环境研究*, 12 (1): 20–28. Guo Weidong, Ma Zhuguo, Wang Huijun. 2007. Soil moisture—An important factor of seasonal precipitation prediction and its application [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 12 (1): 20–28.
- Guo Z, Dirmeyer P A, Koeter R D, et al. 2005. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part II: Analysis [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7 (4): 611–625.
- 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.
- 黄荣辉, 陈际龙, 刘永. 2011. 我国东部夏季降水异常主模态的年代际变化及其与东亚水汽输送的关系 [J]. *大气科学*, 35 (4): 589–606. Huang Ronghui, Chen Jilong, Liu Yong. 2011. Interdecadal variation of the leading modes of summertime precipitation anomalies over eastern China and its association with water vapor transport over East Asia [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 589–606.
- 黄荣辉, 周德刚, 陈文, 等. 2013. 关于中国西北干旱区陆-气相互作用及其对气候影响研究的最近进展 [J]. *大气科学*, 37 (2): 189–210. Huang Ronghui, Zhou Degang, Chen Wen, et al. 2013. Recent progress in studies of air-land interaction over the arid area of Northwest China and its impact on climate [J]. *Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 37 (2): 189–210.
- Kalnay E, Kanamitsu M, Kistler R, et al. 1996. The NCEP/NCAR 40 year reanalysis project [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 77 (3): 437–471.
- Kistler R, Collins W, Saha S, et al. 2001. The NCEP/NCAR 50-year reanalysis: Monthly means CD-ROM and documentation [J]. *Bull. Amer. Meteor. Soc.*, 82 (2): 247–267.
- Knutti R, Sedláček J. 2013. Robustness and uncertainties in the new CMIP5 climate model projections [J]. *Nature Climate Change*, 3 (4): 369–373.
- Koster R D, Sud Y C, Guo Z C, et al. 2005. GLACE: The global land-atmosphere coupling experiment. Part I: Overview [J]. *Journal of Hydrometeorology*, 7 (4): 590–610.
- 李巧萍, 丁一汇, 董文杰. 2007. 土壤湿度异常对区域短期气候影响的数值模拟试验 [J]. *应用气象学报*, 18 (1): 1–11. Li Qiaoping, Ding Yihui, Dong Wenjie. 2007. A numerical study on effects of the soil moisture upon the regional short-term climate [J]. *Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese)*, 18 (1): 1–11.
- 李忠贤, 陈海山, 倪东鸿, 等. 2012. 土壤湿度对东亚夏季气候潜在可预报性影响的数值模拟 [J]. *大气科学学报*, 35 (4): 423–430. Li Zhongxian, Chen Haishan, Ni Donghong, et al. 2012. Numerical simulation of effect of soil moisture variability on potential predictability of summer climate over East Asia [J]. *Transactions of Atmospheric Sciences (in Chinese)*, 35 (4): 423–430.
- 林朝晖, 杨晓松, 郭裕福. 2001. 陆面过程模式对土壤含水量初值的敏感性研究 [J]. *气候与环境研究*, 6 (2): 240–248. Lin Zhaohui, Yang Xiaosong, Guo Yufu. 2001. Sensitivity of land surface model to the initial condition of soil moisture [J]. *Climate and Environmental Research (in Chinese)*, 6 (2): 240–248.

- 林朝晖, 刘辉志, 谢正辉, 等. 2008. 陆面水文过程研究进展 [J]. 大气科学, 32 (4): 935-949. Lin Zhaihui, Liu Huizhi, Xie Zhenghui, et al. 2008. Recent progress in the land-surface and hydrological process studies [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 32 (4): 935-949.
- 刘辉志, 冯建武, 王雷, 等. 2013. 大气边界层物理研究进展 [J]. 大气科学, 37 (2): 467-476. Liu Huizhi, Feng Jianwu, Wang Lei, et al. 2013. Overview of recent studies on atmospheric boundary layer physics at LAPC [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese), 37 (2): 467-476.
- 马柱国, 魏和林, 符淙斌. 2000. 中国东部区域土壤湿度的变化及其与气候变率的关系 [J]. 气象学报, 58 (3): 278-287. Ma Zhuguo, We Helin, Fu Congbin. 2000. Relationship between region soil moisture variation and climatic variability over East China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 58 (3): 278-287.
- Namias J. 1963. Surface-atmosphere interactions as fundamental causes of droughts and other climatic fluctuations [J]. Arid Zone Research, 20: 345-359.
- Ren R C, Yang Y. 2012. Changes in winter stratospheric circulation in CMIP5 scenarios simulated by the climate system model FGOALS-s2 [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 29 (6): 1374-1389.
- Seneviratne S I, Wilhelm M, Stanelle T, et al. 2013. Impact of soil moisture-climate feedbacks on CMIP5 projections: First results from the GLACE-CMIP5 experiment [J]. Geophys. Res. Lett., 40 (19): 5212-5217.
- 尚宗波, 高琼, 杨奠安. 2001. 利用中国气候信息系统研究年降水量空间分布规律 [J]. 生态学报, 21 (5): 689-694. Shang Zongbo, Gao Qiong, Yang Dianan. 2001. Spatial pattern analysis of annual precipitation with climate information system of China [J]. Acta Ecologica Sinica (in Chinese), 21 (5): 689-694.
- Shukla J, Mintz Y. 1982. Influence of land-surface evapotranspiration on the earth's climate [J]. Science, 215 (4539): 1498-1501.
- 孙丞虎, 李维京, 张祖强, 等. 2005. 淮河流域土壤湿度异常的时空分布特征及其与气候异常关系的初步研究 [J]. 应用气象学报, 16 (2): 129-138. Sun Chenghu, Li Weijing, Zhang Zhuqiang, et al. 2005. Distribution and variation features of soil humidity anomaly in Huaihe River basin and its relationship with climatic anomaly [J]. Journal of Applied Meteorological Science (in Chinese), 16 (2): 129-138.
- Sun L, Wu G X. 2001. Influence of land evapotranspiration on climate variations [J]. Science in China Series D: Earth Sciences, 44 (9): 838-846.
- 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.
- 佟华, 刘辉志, 陈起英, 等. 2007. 土壤湿度初值对边界层物理量预报影响的分析 [J]. 气候与环境研究, 12 (4): 546-552. Tong Hua, Liu Huizhi, Chen Qiyang, et al. 2007. The impact of initial soil moisture to the forecast of boundary layer variables [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 12 (4): 546-552.
- Uppala S. 2002. ECMWF reanalysis, 1957-2001, ERA-40 [R]. ERA-40 Project Report Series, 3: 1-10.
- 于燕, 谢正辉. 2012. 中国区域陆面覆盖变化的气候效应模拟研究[J]. 气候变化研究进展, 8 (6): 426-433. Yu Yan, Xie Zhenghui. 2012. A simulation study on climatic effects of land cover change in China [J]. Progressus Inquisitiones DE Mutatione Climatis (in Chinese), 8 (6): 426-433.
- 张强, 肖风劲, 牛海山, 等. 2005. 我国北方植被指数对土壤湿度的敏感性分析 [J]. 生态学杂志, 24 (7): 715-718. Zhang Qiang, Xiao Fengjin, Niu Haishan. 2005. Analysis of vegetation index sensitivity to soil moisture in northern China [J]. Chinese Journal of Ecology (in Chinese), 24 (7): 715-718.
- 张文君, 周天军, 宇如聪. 2008. 中国土壤湿度的分布与变化 I. 多种资料间的比较 [J]. 大气科学, 32 (3): 581-597. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Yu Rucong. 2012. Spatial distribution and temporal variation of soil moisture over China Part I: Multi-data intercomparison [J]. Chinese Journal of Atmosphere Science (in Chinese), 32 (3): 581-597.
- 张文君, 周天军, 智海. 2012. 土壤湿度影响中国夏季气候的数值试验[J]. 气象学报, 70 (1): 78-90. Zhang Wenjun, Zhou Tianjun, Zhi Hai. 2012. A numerical experiment on the effect of soil moisture to summer climate over China [J]. Acta Meteorologica Sinica (in Chinese), 70 (1): 78-90.
- 张学珍, 朱金峰. 2013. 1982~2006 年中国东部植被覆盖度的变化[J]. 气候与环境研究, 18 (3): 365-374. Zhang Xuezhen, Zhu Jinfeng. 2013. Variations in fractional vegetation coverage over the eastern China during 1982-2006 [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 18 (3): 365-374.
- 周晶, 陈海山. 2012. 土壤湿度年际变化对中国区域极端气候事件模拟的影响研究 I. 基于 CAM3.1 的模式评估 [J]. 大气科学, 36 (6): 1077-1092. Zhou Jing, Chen Haishan. 2012. Impact of interannual soil moisture anomaly on simulation of extreme climate events in China. Part I: Model evaluation of CAM3.1 [J]. Chinese Journal of Atmosphere Sciences (in Chinese), 36 (6): 1077-1092.
- 邹旭东, 谢正辉, 史学丽, 等. 2004. 2003 年夏季中国地区降水的模拟研究 [J]. 高原气象, 24 (5): 777-783. Zhou Xudong, Xie Zhenghui, Shi Xueli, et al. 2004. The simulation of precipitation in China in summer of 2003 [J]. Plateau Meteorology (in Chinese), 24 (5): 777-783.
- Zunz V, Goosse H, Massonnet F. 2013. How does internal variability influence the ability of CMIP5 models to reproduce the recent trend in southern ocean sea ice extent? [J]. The Cryosphere, 7 (2): 451-468.