氣候與環境研究
Climatic and Environmental Research

# 我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应

梁红 魏科 马骄

**Climate Effect Assessment of Ideal Large-Scale Solar and Wind Power Farms in Northwest China**

LIANG Hong WEI Ke MA Jiao

在线阅读 View online: https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126

## 您可能感兴趣的其他文章 Articles you may be interested in

### 青藏高原季风对我国西北干旱区气候的影响

The Effect of Tibetan Plateau Monsoon on the Climate in the Arid Area of Northwest China

气候与环境研究. 2018, 23(3): 311 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17024

### 珠海凤凰山森林下垫面干季和湿季气象要素的对比分析与动量和感热交换系数的参数化研究

Comparison of Meteorological Elements in Dry and Wet Seasons and Parameterization of Momentum and Sensible Heat Exchange Coefficients near the Underlying Surface of the Zhuhai Phoenix Mountain Forest

气候与环境研究. 2020, 25(5): 457 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19027

### 短期大规模人口流动对上海市城市热岛效应的影响

Effects of Short-Term Massive Human Migration during the Chinese New Year on the Urban Heat Island Effect in Shanghai

气候与环境研究. 2017, 22(6): 708 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2017.17041

### 土壤湿度对不规则起伏地表雷电垂直电场传播影响的研究

The Propagation Effect of Soil Moisture on Lightning Vertical Electric Field over Irregular Terrain

气候与环境研究. 2017, 22(1): 89 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16025

### 山东半岛风电爬坡事件的识别与天气分析研究

A Study on the Identification and Synoptic Analysis of Wind Ramp Events in Shandong Peninsula

气候与环境研究. 2017, 22(1): 97 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2016.16034

### 基于数值模拟和统计拟合分析华北冬季一次大范围重污染过程的形成机理

Formation Mechanism of a Large-Scale Heavy Pollution Process in North China in Winter Based on Numerical Simulation and Statistical Fitting

气候与环境研究. 2020, 25(2): 185 https://doi.org/10.3878/j.issn.1006-9585.2019.19006

关注微信公众号，获得更多资讯信息

梁红, 魏科, 马骄. 2021. 我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应 [J]. 气候与环境研究, 26(2): 123−141. LIANG Hong, WEI Ke, MA Jiao. 2021. Climate Effect Assessment of Ideal Large-Scale Solar and Wind Power Farms in Northwest China [J]. Climatic and Environmental Research (in Chinese), 26 (2): 123−141. doi:10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126

# 我国西北大规模太阳能与风能发电场建设产生的可能气候效应

梁红 [1, 2, 3] 魏科 [1] 马骄 [1, 4]

1 中国科学院大气物理研究所季风系统研究中心，北京 100190
2 云南大学大气科学系，昆明 650091
3 中山大学海洋科学学院，广州 510275
4 中国科学院大学，北京 100049

**摘 要** 作为取之不尽的清洁能源，太阳能和风能将是未来潜力最大的可再生能源，是解决全球变暖、能源短缺、环境恶化等问题的有效途径。然而太阳能和风能的能量密度偏小，大规模建设太阳能和风能发电场将改变大面积的地表属性，有可能通过陆气相互作用过程，改变局地和区域气候，甚至有可能通过遥相关过程，产生更大的气候影响。本文利用 RegCM4.5 区域数值模式，模拟了在我国西北干旱和半干旱区域建设太阳能和风力发电场的气候效应，分析表明：（1）在西北地区大规模建立太阳能和风能发电场将导致局地地面净短波辐射增加，地表感热通量升高，近地面气温升高，增加新疆西部地区、河西走廊地区和我国黄淮等地的降水量，而华北部分地区降水减少。（2）地表反照率对气候的影响大于地表粗糙度对气候的影响，因此太阳能利用导致的气候效应大于风能利用的影响。（3）反照率改变导致低层形成气旋性环流，我国中部地区出现南风异常，西北地区产生异常东风；在高层形成反气旋环流，可以影响我国大部分地区。（4）当只在西北地区 20% 的面积上建立太阳能和风能发电场时，局地近地面气温不会产生明显的改变，河西走廊地区的降水稍有增加，环流的改变较弱，基本不会有显著的气候影响。

**关键词** RegCM4.5 模式 太阳能发电场 风力发电场 气候影响 陆气相互作用
**文章编号** 1006-9585(2021)02-0123-19 **中图分类号** P461.8 **文献标识码** A
**doi:**10.3878/j.issn.1006-9585.2020.19126

# Climate Effect Assessment of Ideal Large-Scale Solar and Wind Power Farms in Northwest China

LIANG Hong[1, 2, 3], WEI Ke[1], and MA Jiao[1, 4]

1 *Center for Monsoon System Research*, *Institute of Atmospheric Physics*, *Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100190
2 *Department of Atmospheric Sciences*, *Yunnan University*, *Kunming* 650091
3 *School of Marine Sciences*, *Sun Yat-sen University*, *Guangzhou* 510275
4 *University of Chinese Academy of Sciences*, *Beijing* 100049

**Abstract** Solar energy and wind energy show the greatest potential as sources of renewable energy when it comes to large-scale development and utilization for satisfying energy demands, reducing $CO_2$ emissions, and solving the climate

**收稿日期** 2019-08-24；**网络预出版日期** 2020-05-29
**作者简介** 梁红，女，1997 年出生，硕士，主要研究领域为东亚季风和大气动力学。E-mail: liangh65@mail2.sysu.edu.cn
**通讯作者** 魏科，E-mail: weike@mail.iap.ac.cn
**资助项目** 国家自然科学基金国际合作（NSFC-ISF）项目 41961144025
**Funded by** National Natural Science Foundation of China (Grant 41961144025)

change problem. However, the energy density of solar and wind energy is relatively low. The conversion of energy structures from being fossil fuel dependent to utilizing clean energy from solar and wind energy requires the construction of solar and wind farms over a very large region. Consequently, this may lead to changes in the local and regional climates through the land–air interaction process and even produce remote climate impact through the teleconnection process. Using the RegCM 4.5 regional climate model, this study simulates the climatic effects of building solar and wind farms in arid and semi–arid regions of Northwest China. Results show that: (1) large-scale establishment of solar and wind power plants across Northwest China will lead to an increase in the net shortwave radiation, sensible heat flux, and near-surface temperatures. Precipitation increases in the western Xinjiang Province, Hexi Corridor, and Huang–Huai valley. (2) The influence of surface albedo on climate is greater than that of surface roughness, suggesting that the climatic effect caused by solar energy utilization is greater than that caused by wind energy. (3) Albedo changes cause cyclonic circulation at the lower levels, leading to a southerly anomaly in central China and an easterly anomaly in Northwest China. At the upper levels, an anticyclonic circulation is caused, which can affect most of China. (4) When solar and wind power plants are built on 20% of the area of Northwest China, no significant change can be caused in the local near-surface temperature. Though the precipitation increases slightly in the Hexi Corridor region, the regional and remote circulation changes are very weak and the climate effect is negligible.

**Keywords** Solar farms, Wind farm, Climate effect, RegCM4.5 model, Land–air interaction

## 1 引言

伴随着全球变暖、能源短缺、环境恶化等问题，开发利用可再生能源已成为全人类急需解决的问题。太阳能作为一种最有潜力的可再生能源，以其优质的资源属性，受到了全球的关注，开发利用太阳能被认为是解决能源危机与气候问题的有效途径，因此各国纷纷加大了对太阳能资源的开发与利用（UNDP, 2000; Chu and Majumdar, 2012; Creutzig et al., 2017）。为改变以化石能源为主导的能源结构，我国将开发利用太阳能与风能提升到我国能源发展战略地位，并进行重点与优先发展。2010 年我国的太阳能光伏面板的装机容量尚不足 1 GW（1 GW=$10^9$ W），2017 年底即达到 130 GW（CNREC, 2018; Enerdata, 2020），为执行《巴黎协定》的承诺，将 2100 年的全球增温控制在 2°C 之内，我国的可再生能源的装机容量还会进一步大幅增长，预计到2035 年，太阳能装机容量将达到 1.96 TW（1 TW=$10^{12}$ W），而到 2050 年，将达到 2.8 TW（CNREC, 2018）。

我国太阳能资源丰富，利用潜力巨大，全国太阳能年平均辐射量为 5749 MJ，总量为 $5\times10^{16}$ MJ，相当于 $2.4\times10^4$ 亿吨标准煤燃烧产生的能量（沈义, 2014），而 2018 年我国能源消费总量为 46.4 亿吨标准煤（国家统计局, 2019），远小于全国太阳能辐射总量。可见，如果合理地开发利用太阳能资源，完全可以满足我国的能源需求。近年来随着我国光伏发电技术的不断提高，发电成本也在迅速下降，这更使得大规模太阳能光伏发电的应用成为现实。

我国西北地区有开发利用太阳能资源的优势，这一地区海拔高，水汽少，云层薄，年日照时数为在 3200 h 以上，年辐射总量达 6690～8360 MJ $m^{-2}$ $a^{-1}$，为全国太阳能资源储量丰富区（陈少勇等, 2010; 李柯和何凡能, 2010; 张飞民等, 2018），且西北地区人口密度较小，可用来建立太阳能和风能的发电场面积充足，对农田和城市等人类土地利用的竞争较小，因此，选择西北地区大规模建立太阳能发电场是可行而合理的。在西北区域大规模建立太阳能发电场不仅可以满足我国的能源需求，还可以缓解使用化石能源带来的全球变暖等问题，并进一步保障能源供应安全，缓解环境污染问题。

我国风能资源储量丰富，总储量为 $3226\times10^{11}$ W，实际可开发量为 $253\times10^{11}$ W，西北大部分地区风能资源容量因子大于 0.4，也为优质风能资源分布区，在我国具备大规模开发的条件（薛桁等, 2001）。近年来我国风电发展速度非常快，已成为全球风电大国，风电是国内仅次于火电、水电的第三大电源（CNREC, 2018; Enerdata, 2020）。

然而太阳能与风能的能量密度小，需要较大的集能面积，大规模建设太阳能和风能发电场将改变大面积的地表属性（地表概念包括原下垫面、太阳能光伏板和风力涡轮机等在内），有可能通过陆气相互作用过程，改变局地和区域气候，甚至有可能通过遥相关过程，产生更大的气候影响。有研究表明，大规模建立太阳能发电场可以影响局部区域或

周边区域的气候（Arking, 2005; Ureña-Sánchez et al., 2012; Curran, 2015; Hu et al., 2016; Li et al., 2018）。Hu et al.（2016）研究发现，理想化的大规模太阳能光伏板的安装（主要集中在沙漠地区和城市地区）足以为人类产生足够的电力，并且通过重新分配入射的太阳辐射，改变局部辐射平衡，导致大气环流的变化，从而影响区域和全球气候。Li et al.（2018）指出，在撒哈拉沙漠及周边地区大规模建立风力和太阳能发电场会造成显著的区域变暖和降水量的增加（最高平均温度增加 1.28 K，最低平均温度增加 0.97 K，降水增加 50%），区域降水的增加又会使地表植被覆盖率进一步增加，减小地表反照率，从而形成反照率—降水—植被反馈的正反馈机制，对当地气候产生重要的影响。Taha（2001）研究发现，在洛杉矶地区部署太阳能光伏板会影响城市气候，降低城市的环境温度，制冷效果可达 0.2°C；但是如果在已经应用了冷屋顶技术的城市（城市区域普遍为高反射性屋顶和路面）高密度部署太阳能光伏板时，可能会出现小于 0.1°C 的增温，温度的增加或减少幅度与太阳能光伏板的转换效率有关。

我国西北地区地处欧亚大陆腹地，大部分为干旱—半干旱区域，陆气相互作用强烈，可以通过陆气相互作用过程，改变局地和区域气候，甚至有可能通过遥相关过程，产生更大的气候影响（周连童和黄荣辉, 2008; Chen et al., 2009; 赵靖川和刘树华, 2015）。另一方面，西北干旱与半干旱区生态系统对于气候变化和人为影响十分敏感，大规模建立太阳能与风能发电场可能会对局地气候产生较大的影响。因此，在大规模发展太阳能与风能发电场之前，需要探究其是否会影响局地气候和大气环流？是否会通过遥相关影响其他区域气候？这对于太阳能与风能产业的健康发展具有重要的现实意义。

## 2 资料方法与试验设计

### 2.1 RegCM4.5 模式的选择与介绍

区域气候受到地形、水体、城市、生态系统等的影响和控制，通常会有一定的复杂性和不确定性，而全球模式存在时空分辨率不高、物理过程简单等局限性，对区域尺度的气候的模拟能力不高。区域气候模式不但可以较好地模拟出区域气候的变化，还可以用来研究边界条件的改变对区域气候所造成的影响。目前常用的区域气候模式有：NCEP-RSM、MRI-RSM、RegCM、RAMS 等。其中 RegCM 模式是最早的区域气候模式之一，由国际理论物理中心 ICTP（the Abdus Salam International Centre for Theoretical Physics）发展。从 20 世纪 80 年代起，Dickinson et al.（1989）在中尺度模型版本 4（MM4）的基础上建立起来的第一代 RegCM1，随着参数化方案的改进和模式输入数据的不断改进，其模拟性能不断的提高，到现在已经在发展到第四代 RegCM4，RegCM4 及以后的各版本相比于 RegCM3 的改进之处包括增加了海表温度的计算，改进了对灰尘与气体化学成分的处理等，在模拟和预测东亚及中国地区气候方面也取得了较好的效果，其模拟性能也在不断提高。RegCM 系列模式已经成为区域气候研究方面的一个重要工具，广泛应用在各种区域气候研究中（Gu et al., 2012; Gao et al., 2013; 卫翔谦等, 2016; Gao and Giorgi, 2017）。因此本次研究中，选用 RegCM 区域气候模式来研究中国及周边地区的气候变化。

本次研究中使用 RegCM 模式的 4.5 版本，模式运行包括 4 个部分：地表（terrain）、初始条件及边界条件（ICBC）、主程序、后处理（postprocessor）部分，其中地表部分、初始条件及边界条件部分为预处理过程，即将地表状况、初始条件及边界条件、驱动场数据从经纬度网格上水平内插到高分辨率模式网格上，同时垂向内插到模式所需的 $\sigma$ 坐标上。后处理部分将模式结果分类输出，分为大气状态变量、地表诊断变量、辐射变量三类。本次研究中选用的陆面模型为 BATS（Biosphere–Atmosphere Transfer Scheme）生物—大气传输方案 1e 版本，它主要用于描述植被和土壤对大气—地表之间水汽交换、能量、动量等的影响，它与 RegCM4 模式的耦合可以较好地模拟气温、降水等气象要素。研究表明（邹靖和谢正辉, 2012; 朱涛等, 2014）：采用 BATS1e 模拟的降水量、雨带位置和温度空间分布型都比 CLM3.5 模式更接近观测事实，因此在研究中国区域气候中有广泛的应用（张冬峰等, 2007; Chen et al., 2009; 高学杰等, 2010; Gao and Giorgi, 2017）。BATS 模型包括一个植被层、一个地表土壤层或者根区层、一个深土壤层、一个雪层。模型的植被或土地覆盖类型共分为 22 种，如下表所示，插值后模式中每个格点都将指定为 22 种类型中的一种，每种类型都有其对应的初始物理参数。土壤

类型分为沙土、肥沃沙土、沙质壤土、淤泥壤土、淤泥、壤土、粘土、基岩等17种。土壤颜色由浅到深分为8种。

### 2.2 资料

模式的预处理部分采用全球陆地覆盖特征化数据库（GLCC）和美国地质勘探局（USGS）的GTOPO30地形资料（分辨率约为1 km），将其从经纬度网格上水平内插到高分辨率区域上，同时垂向内插到模式所需的$\sigma$坐标上，用于产生地表terrain文件。GLCC是从1 km高级高分辨率辐射数据AVHRR中导出，并且该数据基于BATS方案定义的22种植被或陆面覆盖类型。

本次研究采用欧洲中期数值预报中心（ECMWF）提供的ERA40再分析资料（Uppala et al., 2005）作为驱动模式的初始场和边界场，并用于模式模拟效果的验证。数据包括温度、位势高度、相对湿度、风场$u$分量、风场$v$分量5种变量的月平均气候场资料，时间为1991年12月至2002年1月，时间分辨率为6 h，空间分辨率为2.5°（纬度）×2.5°（经度）。用于模式模拟效果验证的资料为1992年1月至2002年1月ERA40再分析资料的月平均气候场资料（包括近地面气温和总降水），空间分辨率为0.25°（纬度）×0.25°（经度），时间分辨率为6 h。

**表1 BATS1e模型中的土地覆盖类型**

**Table 1 Land use types in BATS1e model**

| 编号 | 土地覆盖类型 |
|---|---|
| 1 | 农作物/混合农业 |
| 2 | 矮草 |
| 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 | 苔原 |
| 10 | 灌溉作物 |
| 11 | 半沙漠 |
| 12 | 冰盖/冰川 |
| 13 | 沼泽 |
| 14 | 内陆水域 |
| 15 | 海洋 |
| 16 | 常绿灌木 |
| 17 | 落叶灌木 |
| 18 | 混合林地 |
| 19 | 森林 |
| 20 | 水陆混合地 |
| 21 | 城市 |
| 22 | 半城市 |

### 2.3 地表物理参数的试验方案

#### 2.3.1 对地表反照率的修改

一般而言，太阳能光伏板反照率（$e_{PV}$）约为10%（Li et al., 2018），在光伏板吸收的太阳能中，有一部分会转换成电能进行输送，目前大多数太阳能光伏板的转换效率（$t_{PV}$）约为15%（Taha, 2013; 郝玺等, 2017; Li et al., 2018），这15%的能量不能被地表吸收。因此，定义“有效地表反照率$e$”（Taha, 2013; Li et al., 2018）来描述存在太阳能光伏板时，被反射和转换传输的能量比例：

$$e = (\alpha + \beta), \tag{1}$$

$$\alpha = e_{PV}, \tag{2}$$

$$\beta = (1 - e_{PV})t_{PV}, \tag{3}$$

其中，$\alpha$为太阳能光伏板反射的能量，$\beta$为太阳能光伏板转换的电能。取太阳能光伏板的反照率为10%，转换效率为15%，则光伏板接收到的短波辐射占入射短波辐射的90%，转换为的电能占入射短波辐射的90%×15%=13.5%，则“有效地表反照率$e$”为10%+13.5%=23.5%，这部分能量不直接加热大气。因此在我国西北地区大规模建设太阳能发电场之后，可以引起原来的荒漠陆地反照率从约0.4降低到0.235，降低幅度约为0.165。

模式中的地表反照率由植被反照率，土壤反照率，积雪反照率三项加权平均而得到，所以理论上要修改这三项来达到修改总地表反照率的目的。

（1）植被反照率的修改：太阳短波辐射的范围是0.15～4 μm，其中<0.4 μm的部分主要为紫外线（约占总能量的7%），0.4～0.76 μm为可见光波段（约占总能量的50%），0.76～4 μm主要为近红外波段（约占总能量的43%），试验中同时修改模式中“植被对<0.7 μm波段的太阳辐射的反照率”和“植被对>0.7 μm波段的太阳辐射的反照率”这两个物理参数。基于此种计算方法，我们将“植被对≤0.7 μm波段的太阳辐射的反照率”和“植被对>0.7 μm波段的太阳辐射的反照率”均修改为23.5%。

（2）土壤反照率的修改：模式中土壤的反照率取决于土壤颜色和土壤湿度这两项，试验中加了

太阳能光伏板对土壤湿度无影响，所以只需修改土壤颜色。模式中土壤颜色按深浅程度分为 1～8，数字越大颜色越深，越深反照率越小，参照沙漠地区反照率降幅约为 0.165，将沙漠和半沙漠的土壤颜色由原来的 1 和 2 分别改为 8，引起的反照率降幅约为 0.12～0.14 左右。本次试验的试验区域的地表覆盖类型大部分为沙漠或半沙漠，在这两种地表上，植被覆盖较少，本文针对只修改植被和只修改土壤反照率的数值试验结果表明，在西北沙漠和半沙漠区域建立大规模太阳能影响主要来自于土壤反照率的变化（图略）。

（3）积雪反照率未作修改。

#### 2.3.2　对地表粗糙度的修改

由于风力发电机组中的风轮等装置具有一定的高度，所以在沙漠或半沙漠中大规模建立风力发电场会增加地表的粗糙度，将沙漠或半沙漠区域的粗糙度提高为原来的 4 倍（Li et al., 2018），能够较为合理地模拟部署风力涡轮机板之后的地表粗糙度，因此将沙漠的地表粗糙度由原来的 0.005 修改为 0.02，将半沙漠的地表粗糙度由原来的 0.03 修改为 0.12。

#### 2.3.3　沙漠和半沙漠区域 20% 面积的实现

只在西北地区沙漠和半沙漠区域的 20% 面积上部署太阳能光伏板时，地表反照率=20%×$m$+80%×$n$，其中 $m$ 为敏感试验中修改后的有效地表反照率，$n$ 为未作修改的地表反照率（Millstein and Menon, 2011），两者加权平均后的数值为在沙漠和半沙漠区域 20% 面积上部署太阳能光伏板时的地表反照率。地表粗糙度=20%×$k$+80%×$l$，其中，$k$ 为敏感试验中修改后的地表粗糙度，$l$ 为未作修改的地表粗糙度（Millstein and Menon, 2011），两者加权平均后的数值为在沙漠和半沙漠区域 20% 面积上部署太阳能光伏板时的地表粗糙度。

### 2.4　试验设计

本研究的数值模拟的范围为（11°N～58°N，60°E～145°E），包括整个中国大陆以及周边地区。考虑到地形、海拔高度、地表植被覆盖类型、土壤类型以及建立太阳能发电场的可行性，模拟范围包括塔克拉玛干沙漠、河西走廊和内蒙古西部区域（图 1b），面积约为 200×$10^4$ $km^2$。在此区域内的主要土地覆盖类型为沙漠或者半沙漠，太阳能和风能资源丰富，适合大规模建立太阳能与风能发电场，模式运行时间为 1991 年 12 月 1 日至 2002 年 1 月 1 日，其中 1991 年 12 月作为初始化阶段，不做分析。

研究中 RegCM4.5 模式的水平分辨率设置为 60 km，积分步长为 120 s，区域中心经纬度为（36°N，102°E），网格格点数为 95（经向）×80（纬向），水平网格为 Arakawa-Lamb B 型交错网格，模式垂直方向非均匀的分为 18 层，垂直方向为 $\sigma$ 坐标，模式顶层气压设置为 5 hPa，投影方式选择兰勃脱投影，模式的物理参数化方案采用：指数松弛横向边界条件方案、Holtslag PBL 行星边界层方案、Arakawa&Schubert 积云对流参数化方案、SUBEX 显式水汽方案、Zeng 海洋通量方案、RRTM 长波辐射方案、BATS 陆面方案等。

本次研究共设置 1 组参照试验和 4 组敏感试验，运行时段为同一时间段（1991～2002 年）。如图 1 所示，8 和 11 分别为沙漠和半沙漠两种土地覆盖类型，本研究中设置两种新的土地类型，分别为类型 23（沙漠—太阳能—风能发电场）和 24（半沙漠—太阳能—风能发电场），敏感试验中分别把 8 和 11 的土地类型替换为 23 和 24。具体试验方案如下：

（1）参照试验：试验运行时间段为 1991 年 12 月 1 日至 2001 年 1 月 1 日，其中 1991 年 12 月作为初始化阶段，不做分析，对模式的陆面部分不作任何修改。

（2）太阳能发电场试验（S1，敏感试验 1）：建立太阳能发电场时需部署大面积的太阳能光伏板，这会导致地表反照率的改变。因此在参照试验的基础上，在划定的西北地区范围内，在模式陆面模型中，对沙漠和半沙漠区域的地表反照率参数进行修改，其他不做改变。

（3）风力发电场试验（W1，敏感试验 2）：大规模建设风能发电场会导致地表粗糙度的改变。因此在参照试验的基础上，在划定的西北地区范围内，在模式陆面模型中，对沙漠和半沙漠区域的地表粗糙度参数进行修改，其他不做改变。

（4）太阳能+风能发电场试验 1（SW1，敏感试验 3）：在参照试验的基础上，在划定的西北地区范围内，在陆面模型中，对沙漠和半沙漠区域的地表反照率参数和地表粗糙度参数同时进行修改，其他不做改变。

（5）太阳能+风能发电场试验 2（SW2，敏感试验 4）：由于在实际中不可能将西北地区的所有

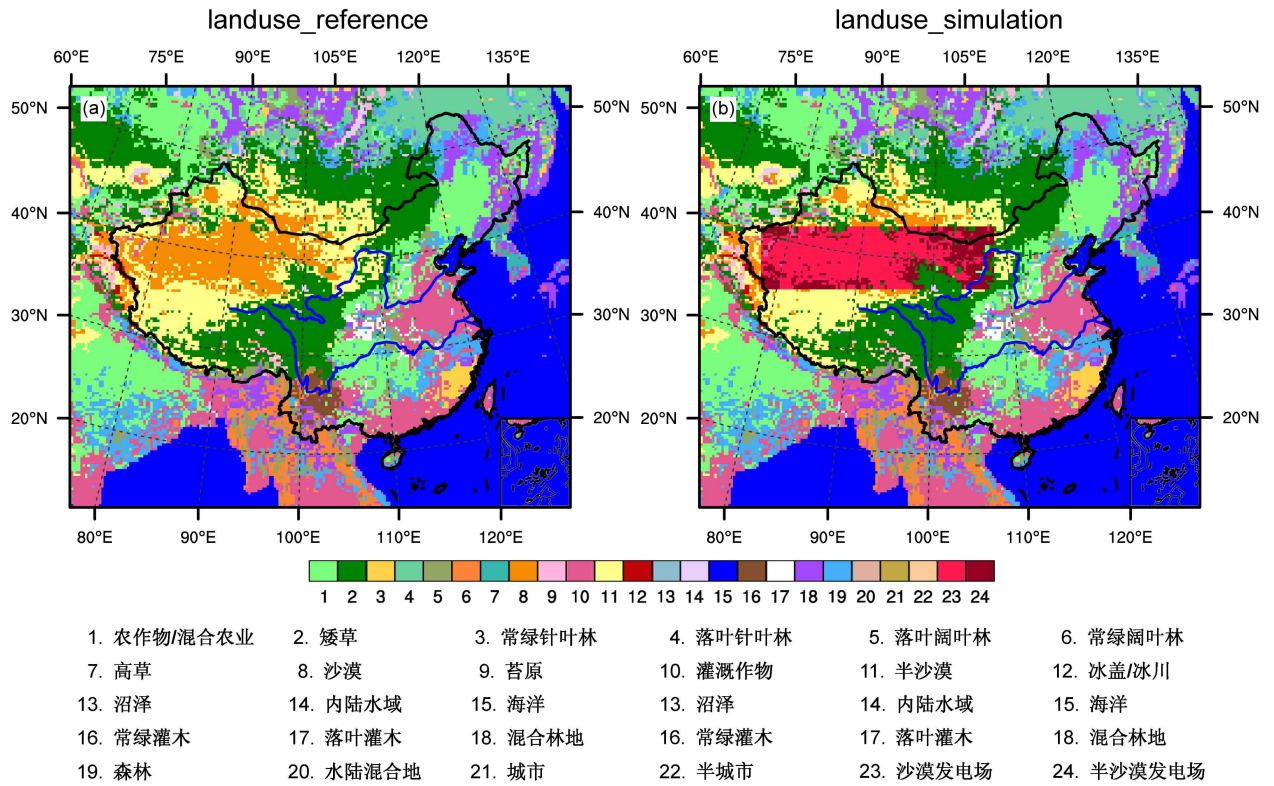


图 1 中国及周边地区的土地覆盖类型：（a）参照试验；（b）敏感试验

Fig. 1 Land use classification in China and surrounding regions: (a) Control run experiments; (b) sensitivity run experiments

面积全部部署太阳与风能能光伏板，所以考虑在沙漠和半沙漠区域 20% 的面积上进行部署。因此在敏感试验 3 的基础上，在划定的西北地区范围内，在陆面模型中，对沙漠和半沙漠区域 20% 面积上的地表反照率参数和地表粗糙度参数同时进行修改，其他不做改变。

对风力发电限制的研究表明，为了避免风力涡轮机的尾流效应对发电量的减少，装机容量保持在 1.0 W/m$^2$ 是安全的上限（Miller et al., 2015; Li et al., 2018），试验区域面积$A = 200\times10^4$ km$^2$，因此可以产生装机总容量为 2.0 TW，对风能丰富地区的新装风机的典型容量系数约为 0.35，因此这一区域可以产生约 0.7 TW 的风能。我国西北区域年平均日照强度约为$S = 250$ W/m$^2$（陈少勇等, 2010），按照目前的技术条件，太阳能光伏板的反照率约为$\alpha = 10\%$，电力转换效率为$\eta = 15\%$，则转换为电能的部分占入射短波辐射的比例为$\eta\times(1-\alpha) = 13.5\%$，因此这一区域总的太阳辐射潜能为$S\times\eta\times(1-\alpha)\times A = 67.5$ TW，如果按照敏感试验 4，在这一区域$\rho = 20\%$的面积上部署太阳能光伏板，则太阳能潜能为$S\times\eta\times(1-\alpha)\times\rho\times A$ =13.5 TW，与之对照，中国 2018 年总的能源消费量约为 4.2 TW（国家统计局, 2019; Enerdata, 2020），因此在西北区域大范围部署太阳能和风能发电场，完全可以满足目前以及很长一段时间中国的能源需求。

## 3 对模式模拟能力的验证

本文采用 RegCM4.5 模式进行区域气候的模拟，此模式广泛应用在中国区域的气候研究中（张冬峰等, 2007; Chen et al., 2009; 高学杰等, 2010; Gu et al., 2012; Gao et al., 2013; Gao and Giorgi, 2017），模拟能力得到了广泛的认可。以下主要对模拟的年平均气温和年平均降水与再分析资料进行比较，表明模式能够比较合理准确地模拟气候平均状态，对位势高度和风场的分析也证实了模式的模拟能力（图略）。

从图 2 可以看出，RegCM4.5 模式准确地模拟出了中国的 4 个温度偏高中心：四川盆地、华东地区、华南沿海和新疆南疆盆地。相比于 ERA40 再分析资料，模式模拟的年平均气温在西藏地区稍偏高，新疆中南部的高值区范围稍偏大，其他地区模拟地较为准确，且模式对区域气候细节部分的刻画能力较好，对四川盆地、新疆吐鲁番盆地、河西走廊等特殊地形区域都有较为细致的的模拟能力。总

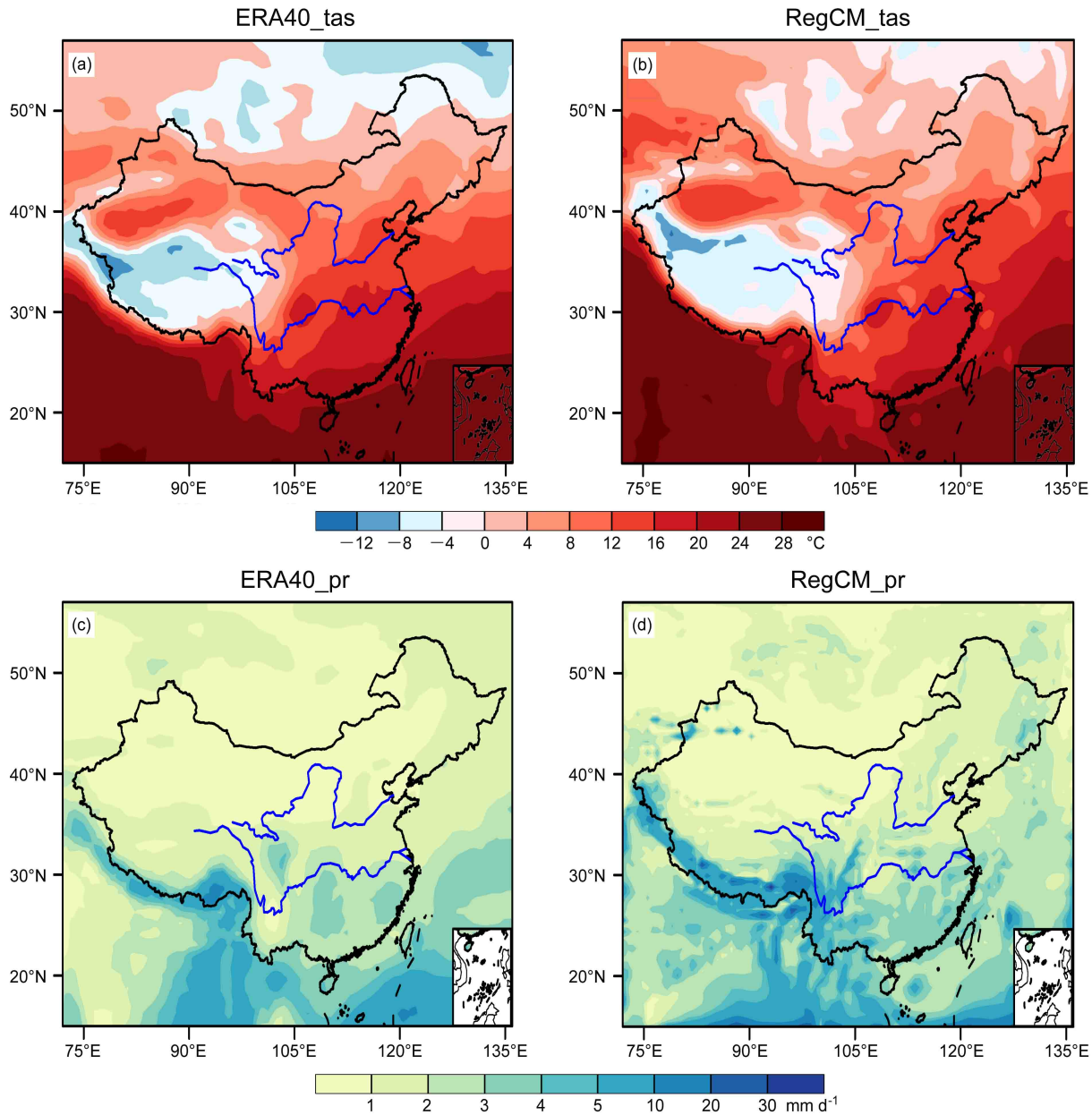


图 2　1992～2002 年中国及周边地区年平均（a、b）气温和（c、d）降水量：（a、c）ERA40 再分析资料；（b、d）RegCM4.5 参照试验模拟结果

Fig. 2　Annual mean (a, b) surface air temperature and (c, d) precipitation in China and surrounding regions during 1992–2002: (a, c) ERA40 data; (b, d) RegCM4.5 control run

体来看，RegCM4.5 模式模拟的年平均气温的时空分布是合理的。

模式模拟的东南沿海地区为夏季降水大值区，西北地区降水量较小，全国大部分区域的降水量在 1 mm/d 以上。相比于 ERA40 再分析资料，模式模拟的降水量在西藏南部、云贵高原、四川等地偏大，这一模拟结果与高学杰等人的研究结果一致（Gao et al., 2013），在东北、华北、东南沿海地区也偏大，但偏差程度较小，其他地区的模拟较为准确。总体来看，RegCM4.5 模式模拟的年平均降水在地形较为复杂的地区偏差较大，这可能说明区域模式对地形降水比较敏感，区域模式的精细地形，更有利于模拟与地形相关的区域降水。

## 4　对气温和辐射的影响

### 4.1　近地面气温变化

如图 3 所示，太阳能发电场试验（S1，敏感试验 1）中，在划定的西北地区范围内，局地近地面气温有 0.3～1.8°C 的升高，其中新疆西南部的打点

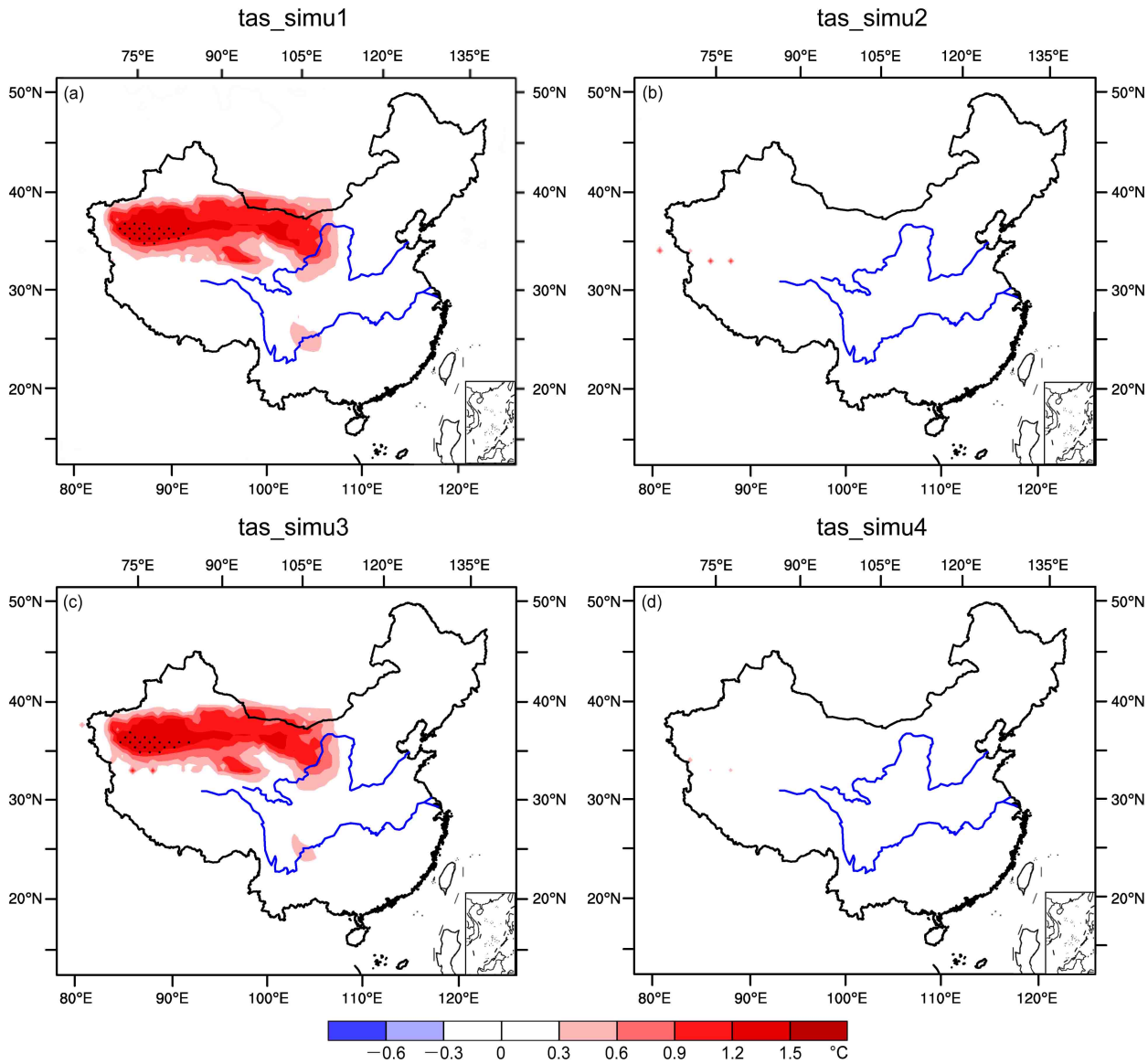


图 3 敏感试验减去参照试验年平均气温的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 3 Difference of surface air temperature between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

区域代表该区域通过了 90% 的信度检验，但全国其他地区的近地面气温改变较小，变化范围在 0.3°C 之内。夏季和冬季的近地面气温的改变趋势相同，但在数值上冬季大于夏季，冬季气温升高范围为 0.6～2.4°C，夏季气温升高范围为 0.3～1.2°C（图略）。风力发电场试验（W1，敏感试验 2）中，无论是局地还是全国范围内，近地面气温的改变均在 0.3°C 之内，这一数值和增幅与之前对于河西走廊酒泉大型风电场影响的评估（胡菊, 2012）类似，可见，在西北地区大规模建立风能发电场虽然可以引起近地表面温度增加，但是增幅有限。

太阳能+风能发电场试验 1（SW1，敏感试验 3）可看出在西北地区的沙漠和半沙漠区域同时理想化地建立太阳能和风能发电场之后，近地面气温改变较大，上升 0.3～1.8°C，但是当只在西北地区沙漠和半沙漠上区域的 20% 面积上同时建立太阳能和风能发电场时（敏感试验 4），近地面气温的改变较小。在实际情况中，受地形、土地利用等方面的限制，我们无法做到将沙漠和半沙漠区域全部建立发电场，只能部署其中一部分面积，在西北 20%

的面积上建立起大规模太阳能和风能发电场不会导致气温变化。

### 4.2　地面辐射变化

#### 4.2.1　地面净短波辐射变化

如图 4 所示，由敏感试验 1 可以看出，在西北地区大规模建立太阳能发电场后，地面净短波辐射在局部地区呈现 4～24 W/m$^2$ 的增加。主要是由于在该区域建立太阳能发电场之后，地表反照率减小，地面反射的太阳直接辐射和太阳散射辐射均减少，从而使地面净短波辐射增加。全国其他地区的改变较小。与夏季相比，冬季的太阳短波辐射弱，所导致的改变量也较小，夏季地面净短波辐射在局部地区有 4～28 W/m$^2$ 的增加，冬季地面净短波辐射在局部地区有 4～12 W/m$^2$ 的增加（图略）。敏感试验 2 中，建立风能发电场对辐射量的影响较小，所以地面净短波辐射的改变较小。敏感试验 4 与敏感试验 3 和相比，局部地区地面净短波辐射的增幅由 4～24 W/m$^2$ 下降为 4 W/m$^2$ 以内，因此，在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上同时建立太阳能和风能发电场时，地面净短波辐射的改变不大。

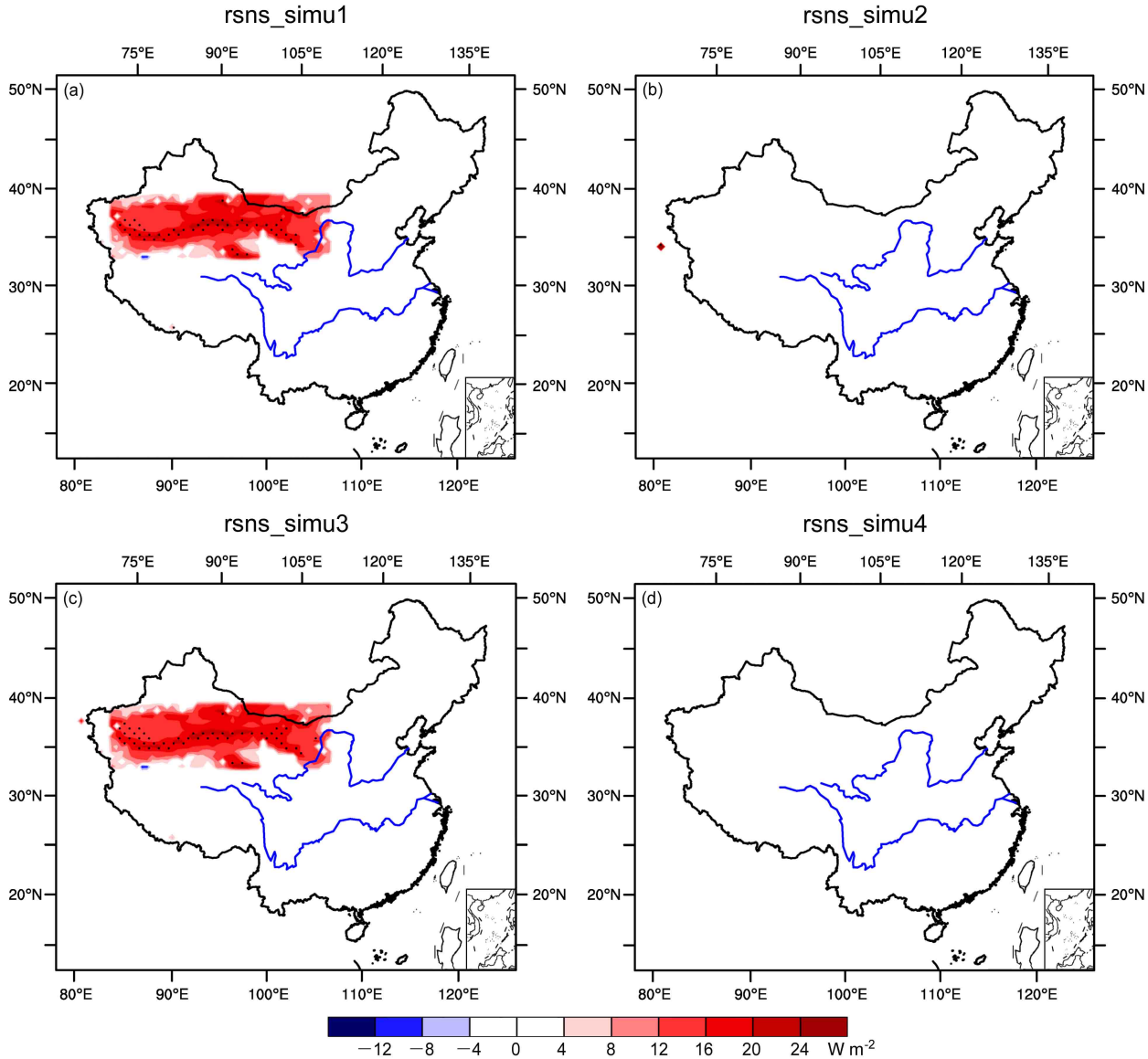


图 4　敏感试验减去参照试验年平均地面净短波辐射的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 4　Difference of surface net shortwave radiation between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

4.2.2 地面净辐射变化

地面吸收太阳短波辐射和大气逆辐射，同时发射长波辐射。地面接收辐射与支出辐射之差即为地面辐射差额，或地面净短波辐射加地面净长波辐射，即为地面净辐射。由图 5 可以看出，在敏感试验 1 和敏感试验 3 中，随着地面净短波辐射的增加，局部地区地面净辐射也有 4～16 W/m$^2$ 的增加，但增幅并没有地面净短波辐射的增幅大。原因是在部署太阳能光伏板之后，局部地区地面发射的长波辐射也会有 4～8 W/m$^2$ 的增加（图略）。敏感试验 2 中，建立风能发电场之后，地面净辐射的改变较小，表明风力发电场导致的地表粗糙度的改变，并不会反馈到净辐射变化上。敏感试验 4 相比于敏感试验 3，在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上同时建立太阳能和风能发电场时，局部地区和全国地区地面净辐射的改变均较小，在 4 W/m$^2$ 之内，并没有明显的通过信度检验的区域。

4.2.3 地表感热通量变化

地面除了发出长波辐射加热大气以外，还以感热的形式向大气输送热量。如图 6 所示，在敏感试

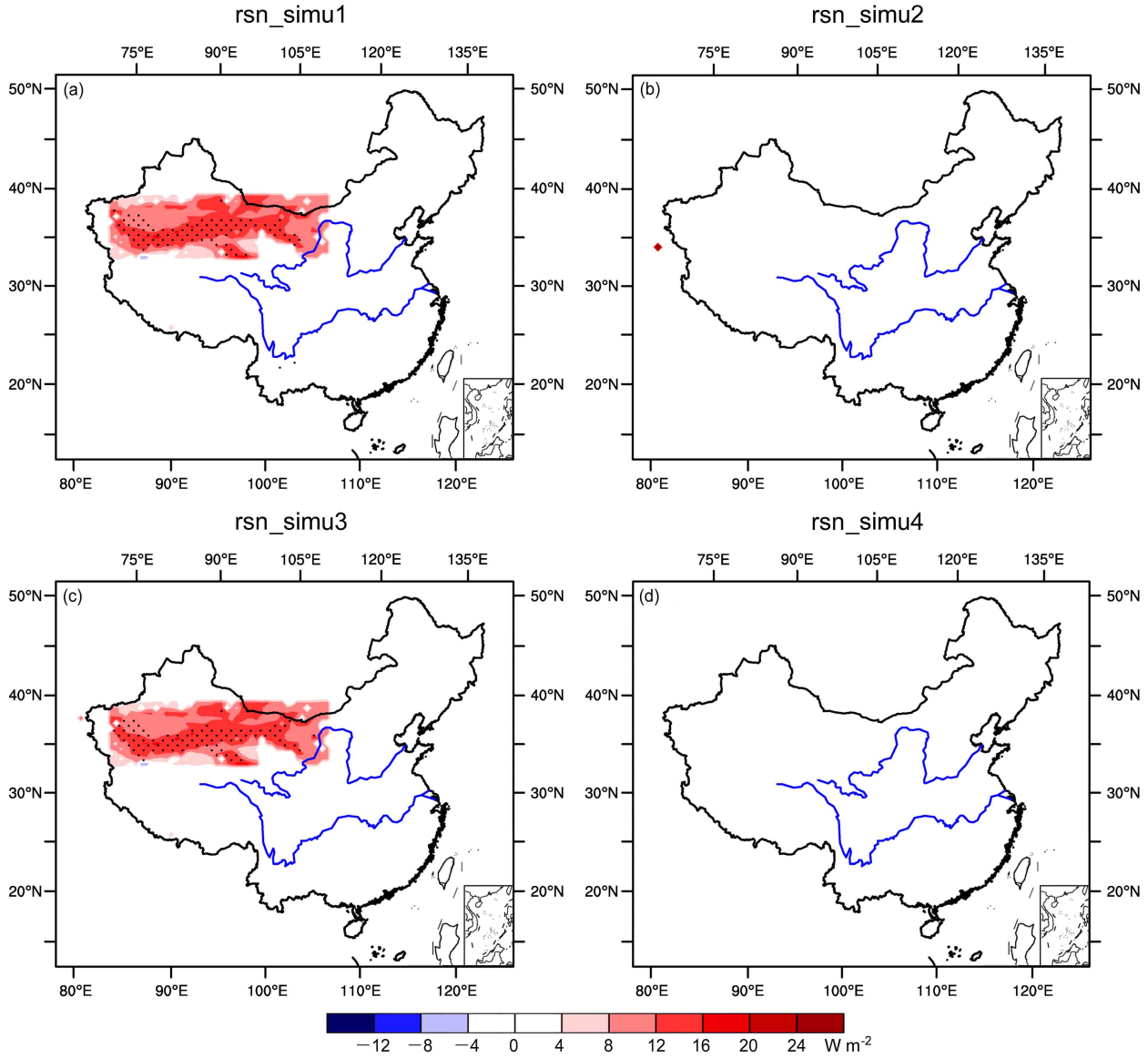


图 5 敏感试验减去参照试验年平均地面净辐射的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 5 Difference of surface net radiation between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

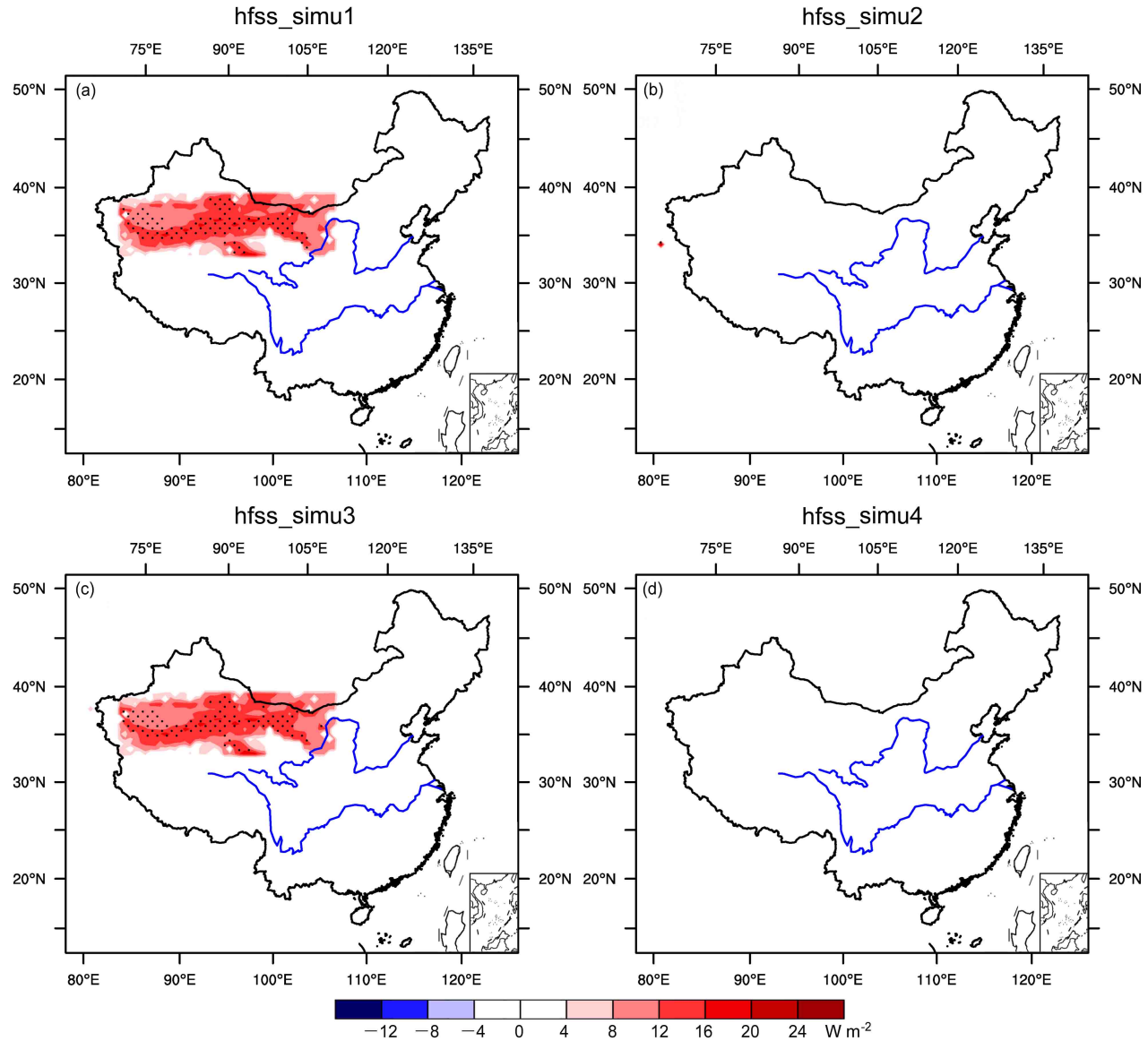


图 6　敏感试验减去参照试验年平均地表感热通量的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 6　Difference of surface sensible heat flux between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

验 1 中，建立太阳能发电场的区域，感热通量增加了 4～16 W/m$^2$，原因是在建立太阳能发电场的区域地表反射太阳短波辐射减少，吸收的太阳短波辐射增加，导致地面净短波辐射增加，地面净辐射增加，导致地气温差变大，因此地表感热通量也随之升高。敏感试验 2 中，由于地表温度变化幅度小，使得地表感热通量变化幅度也较小。

敏感试验 4 与敏感试验 3 相比，在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上同时建立太阳能和风能发电场时，局部地区和全国地区的感热通量的改变均较小，在 4 W/m$^2$ 之内，并且没有明显的信度显著区域。

## 5　对降水和环流场的影响

### 5.1　总降水及对流降水变化

#### 5.1.1　总降水变化

如图 7 所示，敏感试验 1 中在西北地区建立太阳能发电场后，局地总降水呈现增加趋势，增幅为 10%～40%，其中新疆西部及甘肃中部的总降水

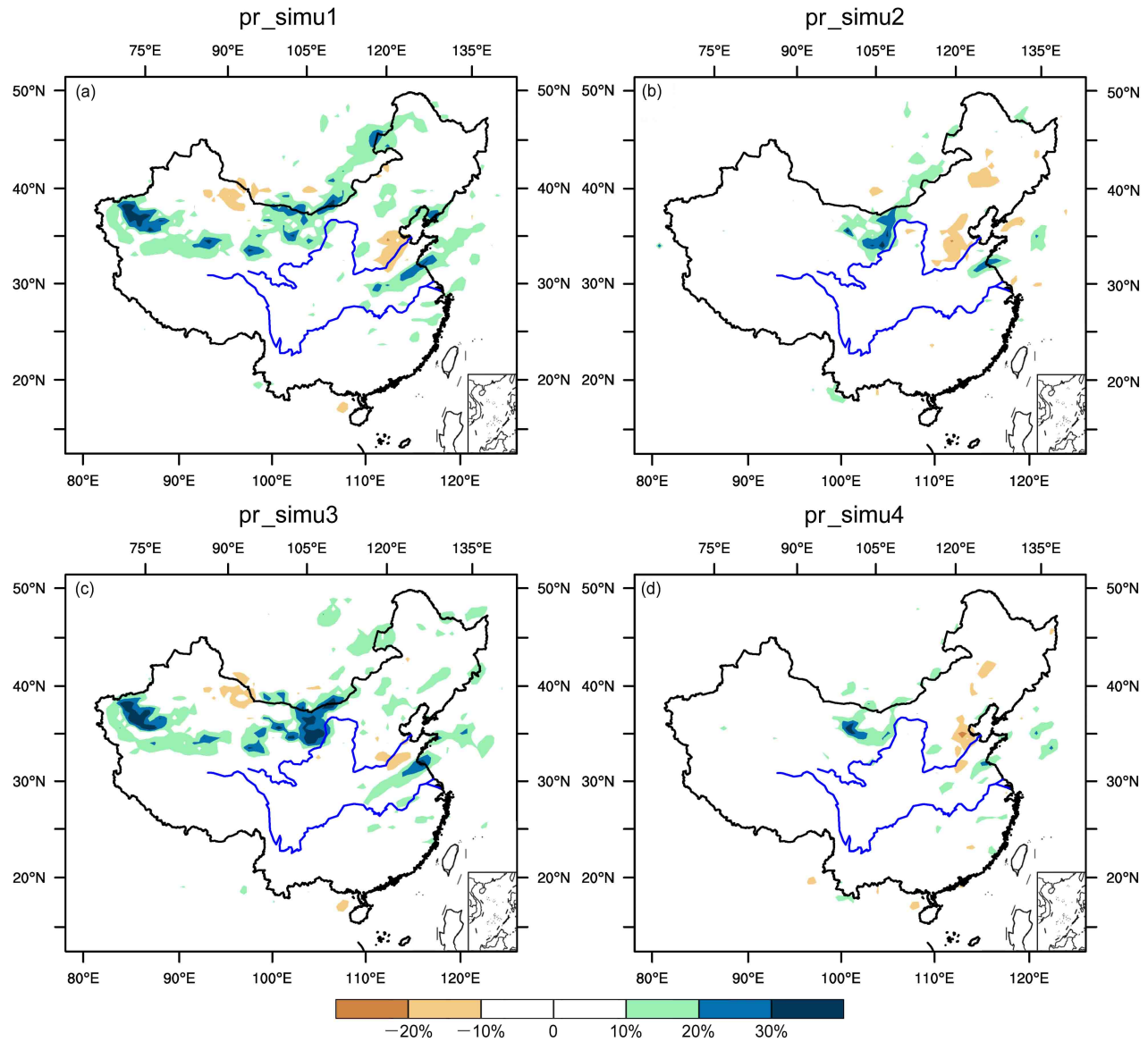


图 7 敏感试验减去参照试验年平均总降水量变化的百分比：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 7 Percentage of annual precipitation change between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

增幅达到 30% 以上，是总降水增加最明显的地方。此外，大规模建立太阳能场所引起的总降水变化不局限于试验区域，也有明显的非局地影响，并以降水增加为主。这种结果与沙漠化扩展所引起气候效应相反（张志富等, 2006），当沙漠化扩展时，导致相关区域反照率增加，引起我国夏季降水减少，这表明东亚区域降水对西北区域反照率的影响有一定的线性关系。降水变化在江苏北部、安徽北部出现 20%～30% 的总降水增加，仅有华北地区小片区域出现 10%～20% 的总降水减少，。在敏感试验 2 中，建立风能发电场改变地表粗糙度后，河西走廊地区有 10%～30% 的总降水增加，但其对总降水的影响程度不及敏感试验 1，华北、东北部分地区的总降水有小幅度减小。

敏感试验 3 中，同时建立太阳能和风能发电场时，新疆西部及河西走廊地区的总降水均有 10%～40% 的增加，河西走廊地区的总降水增幅较敏感试验 1 有所升高，增幅在 30% 以上的区域比敏感试验 1 中的区域多。敏感试验 4 中，在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上同时建立太阳能和风

能发电场时，局地总降水的改变较小，保持在10% 以内，河西走廊地区的增幅较大，华北地区仍存在总降水的减少。因此，在最接近实际情况的敏感试验 4 中，大规模建立太阳能和风能发电场对河西走廊地区的总降水影响较大。

5.1.2　对流降水变化

如图 8 所示，敏感试验 1 中在西北地区建立太阳能发电场后，局地对流降水呈现增加趋势，增幅为 10%～40%，其中新疆西部及甘肃中部的对流降水增加最明显。华北部分地区出现 10%～30% 的对流降水减少。在敏感试验 2 中，建立风能发电场后，局部地区和其他地区的对流降水的改变不大。敏感试验 3 中，在西北地区沙漠和半沙漠区域上同时建立太阳能和风能发电场时，新疆西部地区的对流降水均有 10%～40% 的增加，河西走廊地区的对流降水增幅较敏感试验 1 有所减少，增幅在30% 以上的区域比敏感试验 1 中的区域少，华北、东北地区对流降水减小。

敏感试验 4 中，在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上同时建立太阳能和风能发电场时，

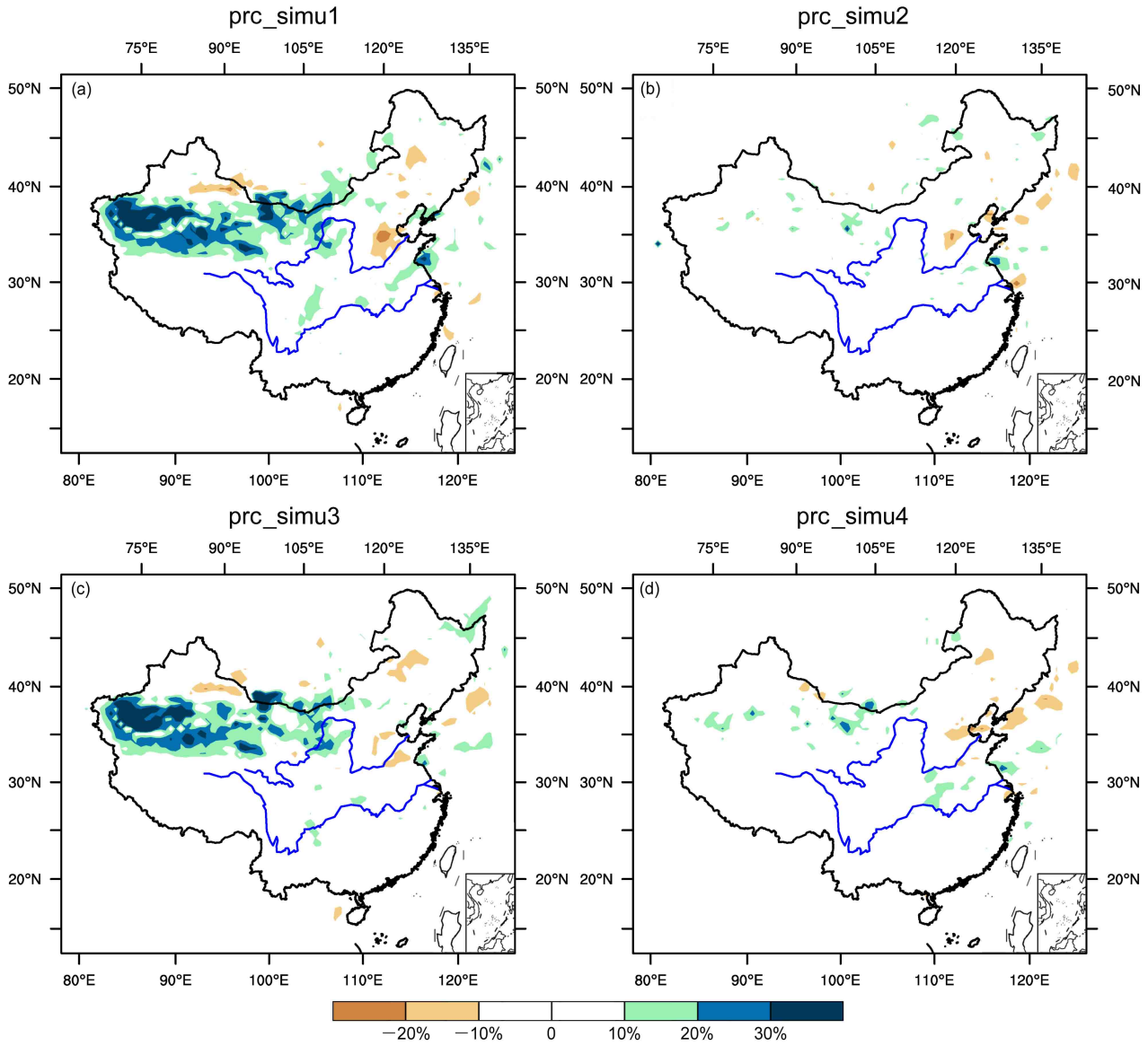


图 8　敏感试验减去参照试验年平均对流降水量变化的百分比：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 8　Percentage of annual convective precipitation change between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

局地对流降水增加的幅度较小，保持在 20% 范围内，因此，在最接近实际情况的敏感试验 4 中，大规模建立太阳能和风能发电场对对流降水的影响不大。

### 5.2 环流变化分析

大气环流可以直接影响降水，而大规模建立太阳能和风能发电场所导致的下垫面物理参数的变化会影响大气环流，进而改变降水。在敏感试验 1（图 9a）显示出试验区域的环流变化情况，可以发现新疆、甘肃及内蒙西部地区出现异常东风，有利于水汽向西部区域输送，局地风场异常导致低层大气辐合，有利于水汽的上升，同时，局部地区及西南地区的位势高度有 2～8 gpm 的下降，有利于低层的低压发展和水汽辐合，增加降水。敏感试验 2 中（图 9b），局地风场的改变较小。

敏感试验 3（图 9c）与敏感试验 1（图 9a）的环流形势较为相似，但在东北、华北部分地区出现异常的反气旋性环流异常，导致低层大气辐散，不

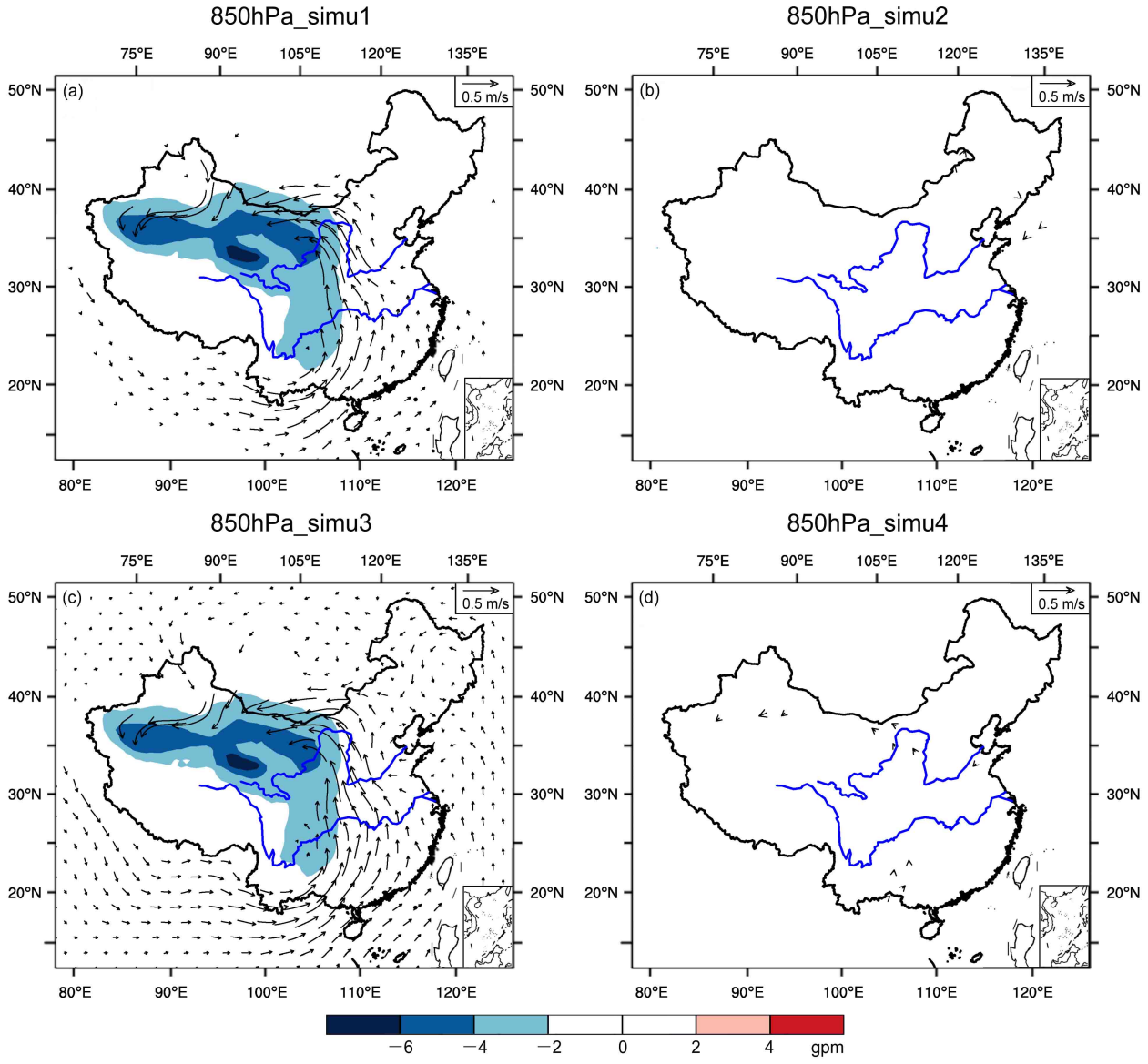


图 9 敏感试验减去参照试验 850 hPa 的年平均风矢量（矢量）及位势高度场（填色）的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 9 Difference of 850-hPa wind (vector) and geopotential height (shading) between sensitivity experiments and the reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

利于水汽的上升对流，这与东北、华北部分地区降水的减少对应。敏感试验 4 与敏感试验 3 相比，850 hPa 的风速变化较小，位势高度场的变化也较小。

在 500 hPa 环流变化中，敏感试验 1（图 10a）在局地上空出现异常反气旋环流，反气旋环流范围影响中国大部分范围及东部沿海区域，敏感试验 2（图 10b）中局地风场和位势高度场的改变均较小。敏感试验 3（图 10c）与敏感试验 1（图 10a）较为接近，敏感试验 4（图 10d）与敏感试验 3 相比，风速没有明显的变化。

在 200 hPa 敏感试验 1（图 11a）中大部分地区处于异常的反气旋性环流中，位势高度有小幅度的升高。敏感试验 2（图 11b）中并无明显的环流变化特征，敏感试验 3（图 11c）中的反气旋性异常环流与敏感试验 1 相似，敏感试验 4（图 11d）相比于敏感试验 3，位势高度异常减小，风场的环流异常值减小，但是依然显示出反气旋的特征，反

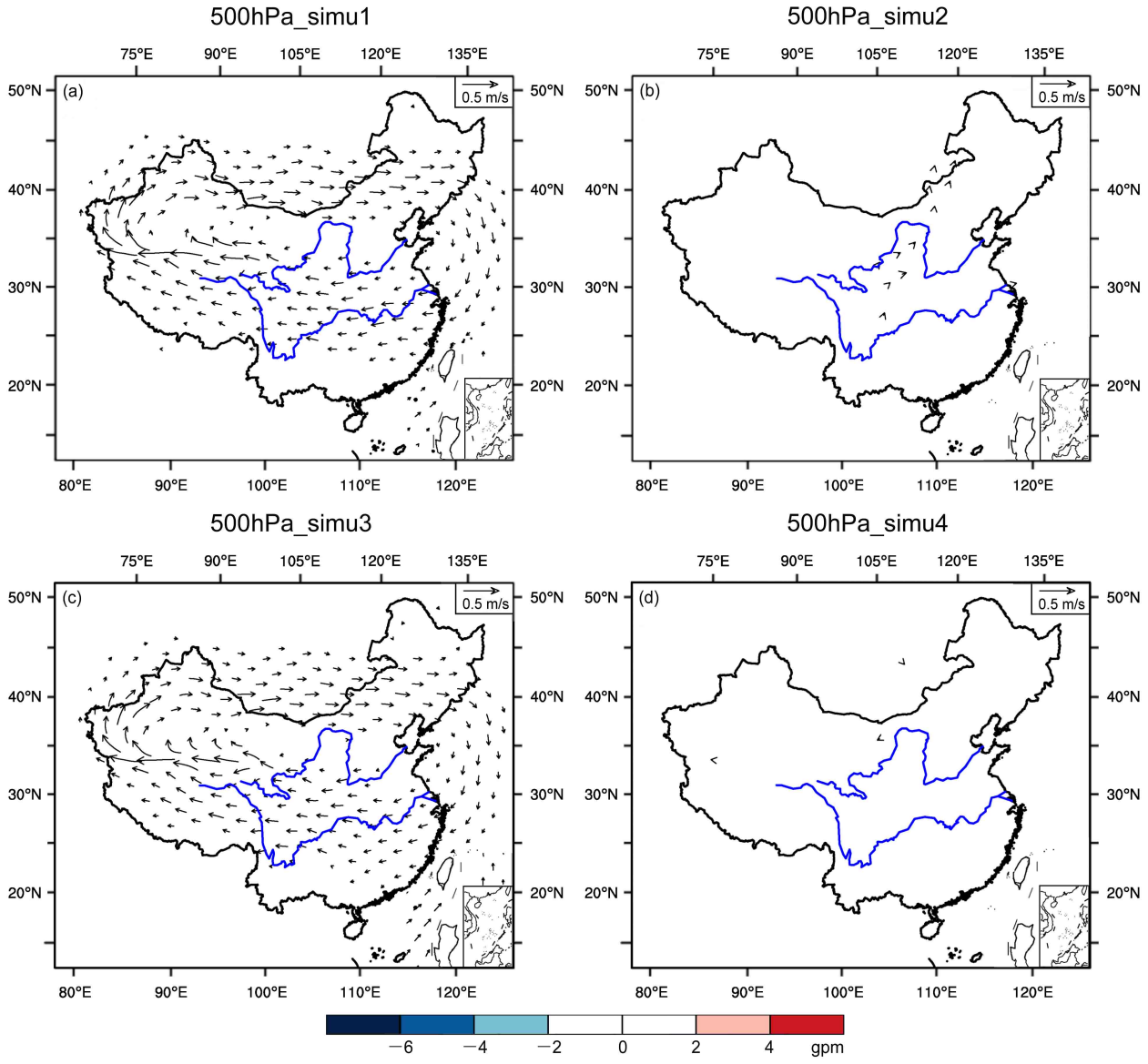


图 10　敏感试验减去参照试验 500 hPa 的年平均风矢量（矢量）及位势高度场（填色）的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 10　Difference of 500-hPa wind (vector) and geopotential height (shading) between sensitivity experiments and reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

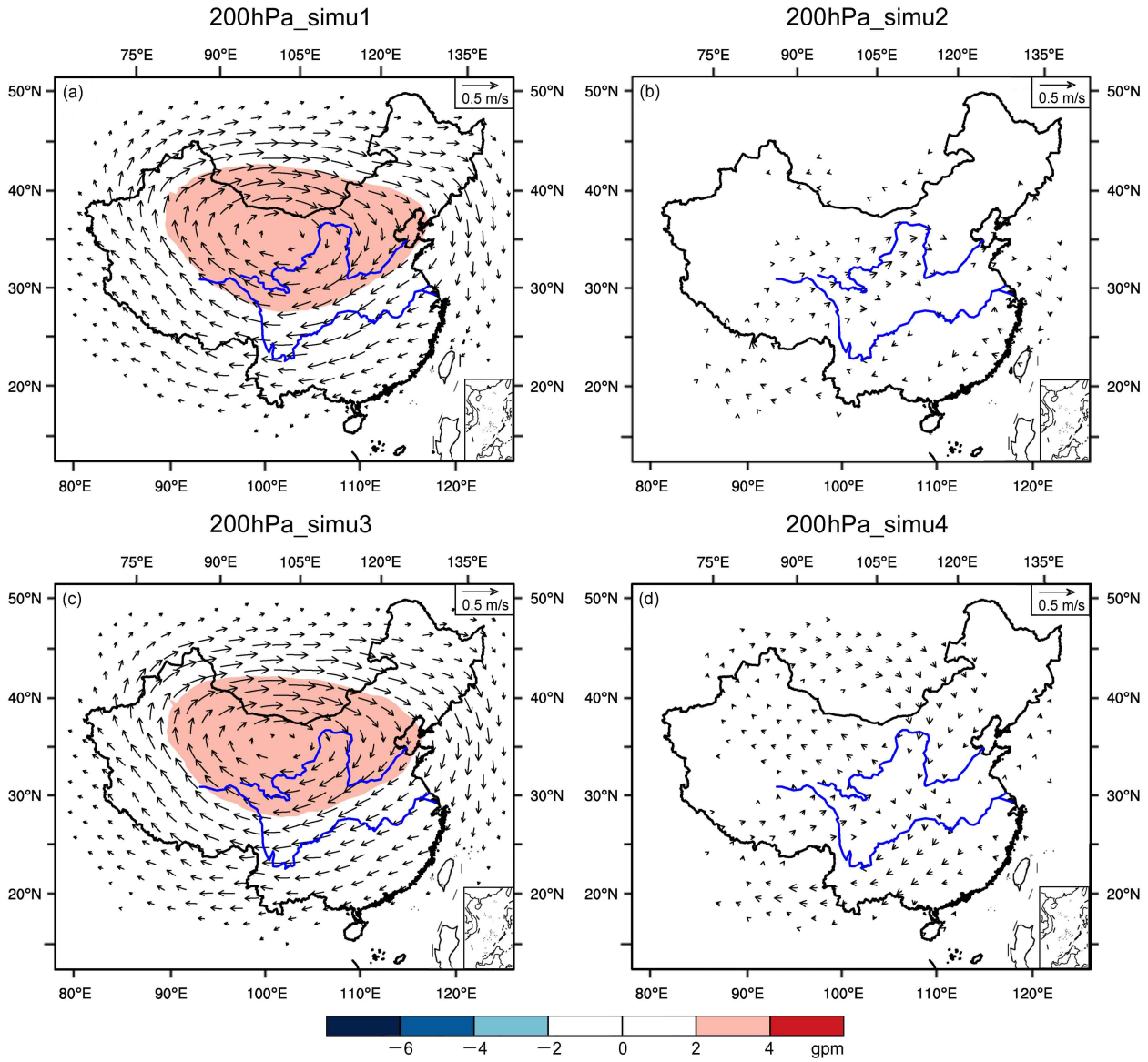


图 11 敏感试验减去参照试验 200 hPa 的年平均风矢量（矢量）及位势高度场（填色）的差值：（a）太阳能发电场试验（敏感试验 1）；（b）风力发电场试验（敏感试验 2）；（c）太阳能+风能发电场试验 1（敏感试验 3）；（d）太阳能+风能发电场试验 2（敏感试验 4）。打点地区代表达到 90% 信度水平

Fig. 11 Difference of 200-hPa wind (vector) and geopotential height (shading) between sensitivity experiments and reference experiment: (a) Solar farm experiment (sensitivity experiment 1); (b) wind farm experiment (sensitivity experiment 2); (c) solar and farm experiment 1 (sensitivity experiment 3); (d) solar and farm experiment 2 (sensitivity experiment 4). The regions above the 90% confidence level are shaded with dots

气旋中心主要集中在内蒙古北部国界线附近，西北大部分区域有异常东风。

综合各个层次的环流场和位势高度场，在西北地区沙漠和半沙漠区域大规模建立太阳能场后，地表反照率降低，地表粗糙度增加，导致局地净辐射增强，近地面气温升高。低层温度增加导致大气不稳定度增强，中低层位势高度下降，使中低层上空呈现异常的气旋性环流，高层上空呈现异常的反气旋性环流，有利于中低层大气辐合，高层大气辐散。这有利于局地及周围地区的水汽在试验区域上空汇合，产生降水，导致局部地区的降水增加，并可以通过陆气相互作用对我国华北和东北区域的降水产生影响（周连童和黄荣辉, 2008）。

## 6 结论

本文模拟了在西北地区大规模建立太阳能发电场后的情况，并对近地面气温、降水、地面净短波

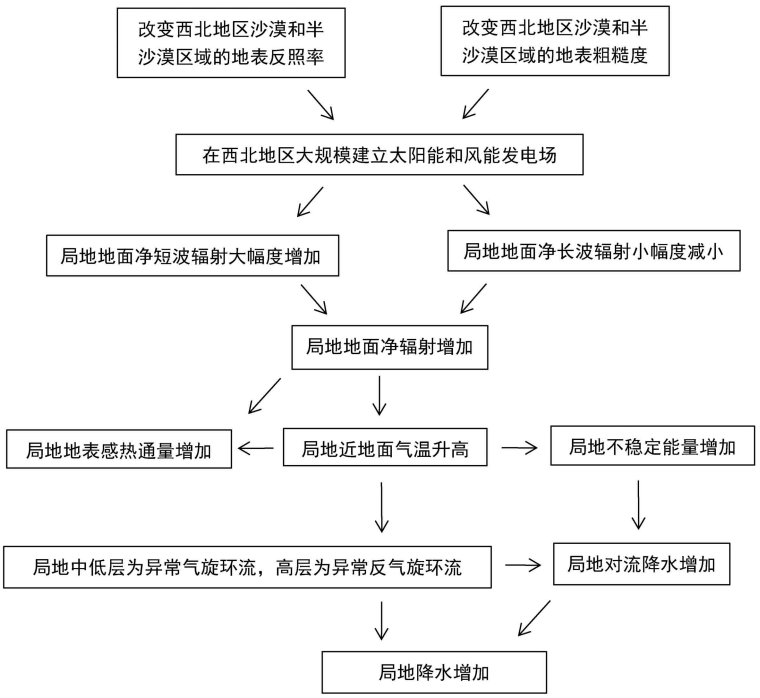


图 12　在我国西北地区大规模建立太阳能发电场引起局地和区域环流变化的过程机理

Fig. 12　Schematic of the influence of solar farms on local and regional circulation in Northwest China based on the results presented in this study

辐射、地面净辐射、地面感热通量、环流场等进行了分析探讨，所产生的气候效应的机理如图 12 所示，得到的主要结论有：

（1）RegCM4.5 模式对我国气温和降水的气候态模拟都与 ERA40 再分析资料较为接近，因此可以用 RegCM4.5 模式对该时段我国及周边地区的气候进行模拟。

（2）在西北地区大规模建立太阳能和风能发电场后，西北地区局地地表反照率减小，地表粗糙度增加，地面净短波辐射增加，地面净辐射增加，近地面气温升高，地表感热通量升高，其他地区变化较小。新疆南部、河西走廊和内蒙西部地区降水有所增加，华北地区降水量有小幅度减少，而黄淮地区降水有所增加。

（3）在西北地区大规模建立太阳能和风能综合发电场时，地表反照率对局地近地面气温、地面净辐射以及感热通量的影响大于地表粗糙度的影响。即地表反照率的改变是建立太阳能和风能发电场后的主要改变因素。

（4）在西北地区沙漠和半沙漠区域 20% 面积上建立太阳能与风能发电场时，局地近地面气温及降水的变化幅度都很小，气候影响有限。

值得注意的是，随着未来太阳能发电技术的不断提高，太阳能光伏板的转换效率将会逐渐改善和提高。当转换效率提高到一定程度时，所产生的气候效应可能会发生变化，甚至可能完全相反。因此大规模应用太阳能新技术的气候学效应需要结合太阳能光伏板技术的改变，进一步深入讨论。

## 参考文献（References）

Arking A. 2005. Effects of bias in solar radiative transfer codes on global climate model simulations [J]. Geophys. Res. Lett., 32(20): L20717. doi:10.1029/2005GL023644

陈少勇, 邢晓宾, 张康林, 等. 2010. 中国西北地区太阳总辐射的气候特征 [J]. 资源科学, 32(8): 1444−1451.　Chen Shaoyong, Xing Xiaobin, Zhang Kanglin, et al. 2010. Climatic characteristics of gross solar radiation over northwestern China [J]. Resources Science (in Chinese) (in Chinese), 32(8): 1444−1451.

Chen W, Zhu D Q, Liu H Z, et al. 2009. Land−air interaction over arid/semi−arid areas in China and its impact on the East Asian summer monsoon. Part I: Calibration of the land surface model (bats) using multicriteria methods [J]. Adv. Atmos. Sci., 26(6): 1088. doi:10.1007/s00376-009-8187-3

Chu S, Majumdar A. 2012. Opportunities and challenges for a sustainable energy future [J]. Nature, 488(7411): 294−303. doi:10.1038/nature11475

CNREC. 2018. China renewable energy outlook 2018 [R]. China National Renewable Energy Centre.

Creutzig F, Agoston P, Goldschmidt J C, et al. 2017. The underestimated potential of solar energy to mitigate climate change

[J]. Nature Energy, 2(9): 17140. doi:10.1038/nenergy.2017.140

Curran L. 2015. The impact of trade policy on global production networks: The solar panel case [J]. Review of International Political Economy, 22(5): 1025−1054. doi:10.1080/09692290.2015.1014927

Dickinson R E, Errico R M, Giorgi F, et al. 1989. A regional climate model for the western United States [J]. Climatic Change, 15: 383−422. doi:10.1007/BF00240465

Enerdata. 2020 (2020-12-20). Global energy statistical yearbook 2020 [EB/OL]. https://yearbook.enerdata.net.

Gao X J, Giorgi F. 2017. Use of the regcm system over East Asia: Review and perspectives [J]. Engineering, 3(5): 766−772. doi:10.1016/J.ENG.2017.05.019

高学杰, 石英, Giorgi F. 2011. 中国区域气候变化的一个高分辨率数值模拟 [J]. 中国科学: 地球科学, 54(3): 462−472. Gao Xuejie, Shi Ying, Giorgi F. 2011. A high resolution simulation of climate change over China [J]. Science China Earth Sciences, 54(3): 462−472. doi:10.1007/s11430-010-4035-7

Gao X J, Wang M L, Giorgi F. 2013. Climate change over china in the 21st century as simulated by BCC_CSM1.1-RegCM4.0 [J]. Atmos. Oceanic Sci. Lett., 6(5): 381−386. doi:10.3878/j.issn.1674-2834.13.0029

Gu H H, Wang G L, Yu Z B, et al. 2012. Assessing future climate changes and extreme indicators in East and South Asia using the RegCM4 regional climate model [J]. Climatic Change, 114(2): 301−317. doi:10.1007/s10584-012-0411-y

国家统计局. 2019(2019-07-20). 中华人民共和国国家统计局年度数据 [EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/. National Bureau of Statistics. 2019(2019-07-20). Annual data of national bureau of statistics of China (in Chinese) [EB/OL]. http://data.stats.gov.cn/.

郝玺, 邱选兵, 魏计林. 2017. 太阳能电池板转换效率测量 [J]. 太原科技大学学报, 38(5): 369−372. Hao Xi, Qiu Xuanbing, Wei Jilin. 2017. Test of solar cells conversion efficiency [J]. Journal of Taiyuan University of Science and Technology (in Chinese) (in Chinese), 38(5): 369−372.

Hu A X, Levis S, Meehl G A, et al. 2016. Impact of solar panels on global climate [J]. Nature Climate Change, 6(3): 290−294. doi:10.1038/nclimate2843

胡菊. 2012. 大型风电场建设对区域气候影响的数值模拟研究 [D]. 兰州大学硕士学位论文. Hu Ju. 2012. Numerical simulation research on impact of large-scale wind farms on regional climate [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University.

李柯, 何凡能. 2010. 中国陆地太阳能资源开发潜力区域分析 [J]. 地理科学进展, 29(9): 1049−1054. Li Ke, He Fanneng. 2010. Analysis on mainland China's solar energy distribution and potential to utilize solar energy as an alternative energy source [J]. Progress in Geography(inChinese)(inChinese)29(9):1049−1054doi:10.11820/dlkxjz.2010.09.004

Li Y, Kalnay E, Motesharrei S, et al. 2018. Climate model shows large-scale wind and solar farms in the Sahara increase rain and vegetation [J]. Science, 361(6406): 1019−1022. doi:10.1126/science.aar5629

Miller L M, Brunsell N A, Mechem D B, et al. 2015. Two methods for estimating limits to large-scale wind power generation [J]. Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America, 112(36): 11169−11174. doi:10.1073/pnas.1408251112

Millstein D, Menon S. 2011. Regional climate consequences of large-scale cool roof and photovoltaic array deployment [J]. Environmental Research Letters, 6(3): 034001. doi:10.1088/1748-9326/6/3/034001

沈义. 2014. 我国太阳能的空间分布及地区开发利用综合潜力评价 [D]. 兰州大学硕士学位论文, 2014. Shen Yi. 2014. The spatial distribution of solar energy and the comprehensive potential evaluation of regional exploitation and utilization in China [D]. M. S. thesis (in Chinese), Lanzhou University, 2014.

Taha H. 2001. Potential Impacts of Climate Change on Tropospheric Ozone in California: A Preliminary Episodic Modeling Assessment of the Los Angeles Basin and the Sacramento Valley [M]. Berkeley: Lawrence Berkeley National Laboratories.

Taha H. 2013. The potential for air-temperature impact from large-scale deployment of solar photovoltaic arrays in urban areas [J]. Solar Energy, 91: 358−367. doi:10.1016/j.solener.2012.09.014

UNDP. 2000. World Energy Assessment: Energy and the Challenge of Sustainability [M]. New York: United Nations Development Programme, 558pp.

Uppala S M, KÅllberg P W, Simmons A J, et al. 2005. The ERA-40 re-analysis [J]. Quart. J. Roy. Meteor. Soc., 131(612): 2961−3012. doi:10.1256/qj.04.176

Ureña-Sánchez R, Callejón-Ferre Á J, Pérez-Alonso J, et al. 2012. Greenhouse tomato production with electricity generation by roof-mounted flexible solar panels [J]. Scientia Agricola, 69(4): 233−239. doi:10.1590/s0103-90162012000400001

卫翔谦, 左洪超, 武利阳, 等. 2016. RegCM4.3 气候模式引入新的海洋湍流参数化方案对中国夏季降水模拟的影响 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 52(5): 644−651. Wei Xiangqian, Zuo Hongchao, Wu Liyang, et al. 2016. The impact of new ocean turbulence parameterization scheme introduced into RegCM4.3 climate model on the summer precipitation simulation in China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese) (in Chinese), 52(5): 644−651. doi:10.13885/j.issn.0455-2059.2016.05.013

薛桁, 朱瑞兆, 杨振斌, 等. 2001. 中国风能资源贮量估算 [J]. 太阳能学报, 22(2): 167−167. Xue Heng, Zhu Ruizhao, Yang Zhenbin, et al. 2001. Assessment of wind energy reserves in China [J]. Acta Energiae Solaris Sinica (in Chinese) (in Chinese), 22(2): 167−167. doi:10.3321/j.issn:0254-0096.2001.02.010

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) (in Chinese), 23(5): 444−452. doi:10.3969/j.issn.1004-4965.2007.05.004

张飞民, 王澄海, 谢国辉, 等. 2018. 气候变化背景下未来全球陆地风、光资源的预估 [J]. 干旱气象, 36(5): 725−732. Zhang Feimin, Wang Chenghai, Xie Gehui, et al. 2018. Projection of global wind and solar energy over land under different climate change scenarios during 2020−2030 [J]. Journal of Arid Meteorology (in Chinese) (in

Chinese), 36(5): 725−732. doi:10.11755/j.issn.1006-7639(2018)-05-0725

张志富, 王澄海, 邱崇践. 2006. 荒漠化扩展对我国区域气候变化影响的数值模拟 [J]. 兰州大学学报 (自然科学版), 42(6): 22−26. Zhang Zhifu, Wang Chenghai, Qiu Congjian. 2006. Simulation of the impact of desertification on the regional climate changes in China [J]. Journal of Lanzhou University (Natural Sciences) (in Chinese) (in Chinese), 42(6): 22−26. doi:10.3321/j.issn:0455-2059.2006.06.005

赵靖川, 刘树华. 2015. 植被变化对西北地区陆气耦合强度的影响 [J]. 地球物理学报, 58(1): 47−62. Zhao Jingchuan, Liu Shuhua. 2015. Research on the impact of vegetation change on land−atmosphere coupling strength in Northwest China [J]. Chinese J. Geophys. (in Chinese) (in Chinese), 58(1): 47−62. doi:10.6038/cjg20150105

周连童, 黄荣辉. 2008. 中国西北干旱、半干旱区感热的年代际变化特征及其与中国夏季降水的关系 [J]. 大气科学, 32(6): 1276−1288. Zhou Liantong, Huang Ronghui. 2008. Interdecadal variability of sensible heat in arid and semi−arid regions of Northwest China and its relation to summer precipitation in China [J]. Chinese Journal of Atmospheric Sciences (in Chinese) (in Chinese), 32(6): 1276−1288. doi:10.3878/j.issn.1006-9895.2008.06.04

朱涛, 陈海山, 高楚杰. 2014. RegCM3.0 与 RegCM4.0 对中国区域多雨年夏季气候模拟的对比分析 [J]. 气象与减灾研究, 37(2): 1−10. Zhu Tao, Chen Haishan, Gao Chujie. 2014. Comparative analysis between the simulated regional climates in China rainy summer by RegCM3.0 and RegCM4.0 [J]. Meteorology and Disaster Reduction Research (in Chinese) (in Chinese), 37(2): 1−10.

邹靖, 谢正辉. 2012. RegCM4 中陆面过程参数化方案对东亚区域气候模拟的影响 [J]. 气象学报, 70(6): 1312−1326. Zou Jing, Xie Zhenghui. 2012. The effects of the land−surface process parameterization of the RegCM4 on climate simulation in East Asia [J]. Acta Meteor. Sinica (in Chinese) (in Chinese), 70(6): 1312−1326. doi:10.11676/qxxb2012.110