

中亚五国未来棉花和冬小麦作物需水量模拟预测 数据集 (2020–2100)

田 静

中国科学院地理科学与资源研究所陆地水循环及地表过程重点实验室, 北京 100101

摘 要: 中亚五国地处亚洲中部, 是世界最大的干旱和半干旱区之一, 水资源匮乏严重, 农业灌溉用水是最主要的水资源利用方式, 因此研究未来主要农作物的作物需水量对探究中亚地区农业水资源的发展极其重要。本研究基于 CMIP5 (Fifth Coupled Model Intercomparison Project) 的 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景, 利用作物系数法估算 2020–2100 年中亚五国棉花和冬小麦的作物需水量, 生成了 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集。数据的时间跨度为 2020–2100 年, 时间分辨率为 1 年, 空间分辨率为 0.5 度, 数据格式为.tif。

关键词: 中亚五国; 棉花和冬小麦; 未来作物需水量; RCP2.6 情景; RCP4.5 情景

DOI: 10.3974/geodp.2020.02.03

数据可用性声明:

本文关联数据已出版, 可获取: 田静. RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集 (2020–2100) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.01.04.V1.

1 前言

中亚五国地处亚洲中部, 主要包括哈萨克斯坦、吉尔吉斯斯坦、塔吉克斯坦、乌兹别克斯坦和土库曼斯坦。这里是世界最大的干旱和半干旱区之一, 降水稀少, 蒸发量大, 水资源十分匮乏。根据世界银行月降雨数据库的数据 (<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/>), 2000–2016 年中亚五国平均年降雨量从多到少依次为塔吉克斯坦 523 mm, 吉尔吉斯斯坦 414 mm, 哈萨克斯坦 270 mm, 乌兹别克斯坦 211 mm, 土库曼斯坦 155 mm。除了能源产业外, 农业在中亚五国经济发展中占重要地位。

中亚五国的灌溉农田主要分布在整个区域的南部和东南部。根据欧空局 CCI (Climate Change Initiative) 2015 年土地利用数据产品 (<https://www.esa-landcover-cci.org/>), 五国灌溉农田面积从多到少依次为哈萨克斯坦 86,269 km², 乌兹别克斯坦 81,198 km², 土库曼斯坦 40,233 km², 吉尔吉斯斯坦 32,178 km², 塔吉克斯坦 14,283 km²。在作物种植结构上, 根据联合国粮农组织 FAO 的统计数据 (<http://www.fao.org/faostat/en/#data>), 2015 年中亚五国小麦和棉花的种植面积占整个作物种植面积的 93%。灌溉是农业生产的最重要手段, 是中亚

收稿日期: 2020-01-16; 修订日期: 2020-06-01; 出版日期: 2020-06-25

基金项目: 中国科学院 (XDA20040302)

作者信息: 田静 AAO-7972-2020, 中国科学院地理科学与资源研究所, tianj.04b@igsrr.ac.cn

数据引用方式: [1] 田静. 中亚五国未来棉花和冬小麦作物需水量模拟预测数据集 (2020–2100) [J]. 全球变化数据学报, 2020, 4(2): 117–124. DOI: 10.3974/geodp.2020.02.03.

[2] 田静. RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集 (2020–2100) [J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.01.04.V1.

地区最主要的水资源利用方式^[1]。据统计，中亚地区的农业灌溉用水量超过其两大河流阿姆河和锡尔河总取水量的 90%^[2-3]。可见农业灌溉用水的变化对该地区的水资源影响显著，而决定农业灌溉用水量的关键是作物需水量^[4]。

本研究基于 CMIP5 (Fifth Coupled Model Intercomparison Project) 的 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景，利用作物系数法估算 2020–2100 年中亚五国主要农作物棉花和冬小麦的作物需水量，从而为探究中亚地区未来农业水资源的发展，为“一带一路”战略背景下我国与中亚五国的未来农业合作发展提供参考信息。

2 数据集元数据简介

《RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集（2020–2100）》^[5] 的名称、作者、地理区域、数据年代、时间分辨率、空间分辨率、数据集组成、数据出版与共享服务平台、数据共享政策等信息见表 1。

表 1 《RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集（2020–2100）》元数据简表

条 目	描 述
数据集名称	RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集（2020–2100）
数据集短名	IrriWaterRe_CottonWheat_CenAsia_2020-2100
作者信息	田静 AAO-7972-2020, 中国科学院地理科学与资源研究所, tianj.04b@igsnrr.ac.cn
地理区域	中亚五国
数据年代	2020–2100 年
时间分辨率	1 年
空间分辨率	0.5 度
数据格式	.tif
数据量	2.16 MB（压缩后）
数据集组成	RCP2.6 和 RCP4.5 情景下 2020–2100 年逐年棉花、冬小麦作物需水量
基金项目	中国科学院（XDA20040302）
数据计算环境	ENVI（5.1）和 IDL（8.3），中国科学院地理科学与资源研究所内共享平台
出版与共享服务平台	全球变化科学研究数据出版系统 http://www.geodoi.ac.cn
地址	北京市朝阳区大屯路甲 11 号 100101，中国科学院地理科学与资源研究所
数据共享政策	全球变化科学研究数据出版系统的“数据”包括元数据（中英文）、通过《全球变化数据仓储电子杂志（中英文）》发表的实体数据和通过《全球变化数据学报（中英文）》发表的数据论文。其共享政策如下：（1）“数据”以最便利的方式通过互联网系统免费向全社会开放，用户免费浏览、免费下载；（2）最终用户使用“数据”需要按照引用格式在参考文献或适当的位置标注数据来源；（3）增值服务用户或以任何形式散发和传播（包括通过计算机服务器）“数据”的用户需要与《全球变化数据学报》（中英文）编辑部签署书面协议，获得许可；（4）摘取“数据”中的部分记录创作新数据的作者需要遵循 10% 引用原则，即从本数据集中摘取的数据记录少于新数据集总记录量的 10%，同时需要对摘取的数据记录标注数据来源 ^[6]
数据和论文检索系统	DOI, DCI, CSCD, WDS/ISC, GEOSS, China GEOSS, Crossref

3 数据研发方法

3.1 算法原理

本研究使用联合国粮农组织 FAO 的作物需水量计算方法，如式(1)所示。作物需水量的单位为 mm。

$$IWR = \frac{ET - P_e}{I_e}$$

(1)

式中, P_e 为有效降雨 (mm), 表示被作物实际利用的降雨量, 本文采用 USDA 的方法计算, 见式(2); ET 为作物实际蒸散发 (mm), 利用作物系数法计算而得, 见式(3); I_e 是灌溉效率, 表示被作物实际利用的灌溉水量与实际抽取的水量的比值。根据 Rost 等^[7]在全球尺度上对灌溉效率的研究, 中亚地区灌溉效率为 56.6%。

$$P_e = \begin{cases} P \times (125 - 0.2 \times P) / 125, & P < 250 \text{ mm} \\ 125 + 0.1 \times P, & P \geq 250 \text{ mm} \end{cases} \quad (2)$$

式中, P 是月降雨量 (mm)。

作物实际蒸散发的计算采用作物系数与参考蒸散发的方法计算得到:

$$ET = K_c \times ET_0 \quad (3)$$

式中, K_c 是作物系数, 本研究使用 SIC-ICWC (Scientific Information Centre of Interstate Commission on Water Coordination in Central Asia) 给出的中亚地区棉花和冬小麦在四个生长阶段的作物系数^[8-9], 见表 2; ET_0 是作物参考蒸散发 (mm day^{-1}), 由式(4)计算得到^[10]。该方法是对 FAO 提出的作物参考蒸散发的改进, 特别考虑了大气 CO_2 浓度对作物蒸腾的影响。

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} U_2 (e_s - e_a)}{\Delta + \gamma [1 + U_2 (0.34 + 2.4 \times 10^{-4} ([\text{CO}_2] - 300))]} \quad (4)$$

式中, Δ 是水汽压随温度变化的斜率 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); R_n 是净辐射 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$); G 是土壤热通量 ($\text{MJ m}^{-2} \text{day}^{-1}$); γ 是干湿表常数 ($\text{kPa} \cdot ^\circ\text{C}^{-1}$); T 是日平均气温 ($^\circ\text{C}$); U_2 是 2 m 高度的日平均风速 (m s^{-1}); e_s 是饱和水汽压 (kPa); e_a 是实际水汽压 (kPa); $[\text{CO}_2]$ 是大气 CO_2 浓度 (ppm)。各变量的具体计算方法参见 FAO 灌溉和排水 NO.56 手册^[11]。

表 2 中亚地区冬小麦和棉花在四个生长阶段及作物系数 K_c 值

作物生育期	种植和收割日期		生长阶段天数		作物系数	
	棉花	冬小麦	棉花	冬小麦	棉花	冬小麦
种植期	4 月初	10 月中	30	30	0.55	0.65
发育期			50	140	0.55	0.65
生长中期			55	40	0.95–1.15	1.15
收获期	10 月初	6 月初	45	30	0.65	0.65

3.2 技术路线

本数据集的制作主要包括如下几个步骤 (图 1): 获取 CMIP5 经过偏差纠正的 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下, 15 个气候模式估算的月平均日最高气温、月平均日最低气温和月降雨量; 查阅文献获取中亚地区棉花和冬小麦生长和作物系数信息; 分别计算 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下的 15 个模式月平均日最高气温、月平均日最低气温和月降雨量的平均值; 根据月降雨量信息计算月有效降雨; 根据月平均日最高气温和月平均日最低气温计算棉花和冬小麦的参考作物蒸散发; 结合作物系数和参考作物蒸散发计算棉花和冬小麦的实际蒸散发; 利用实际蒸散发、有效降雨和灌溉系数最后获得作物需水量。

需要指出的是本研究假设了一种极端种植情况, 即中亚地区全部种植棉花或者全部种植冬小麦。这种假设得到的结果有助于分析整个中亚棉花和冬小麦未来作物需水量的空间

规律，并可与未来农业用地预测结果结合用于更确切地分析灌溉总需水量的情况。

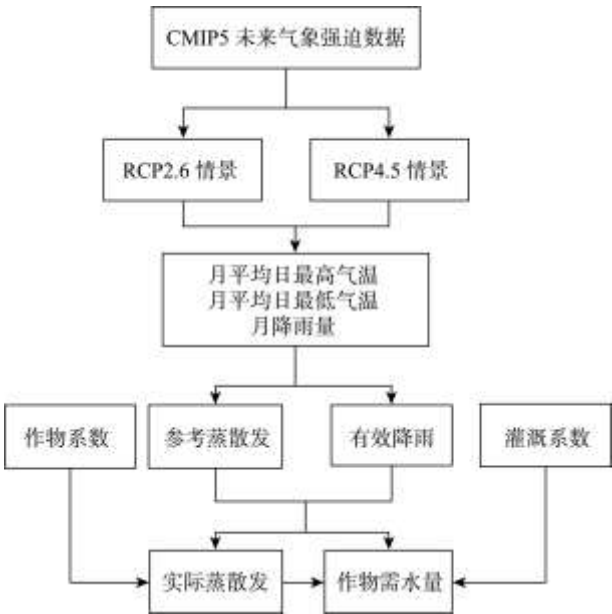


图 1 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集

4 数据结果与验证

4.1 数据集组成

本数据集由四部分文件组成：

- (1) RCP2.6 情景下 2020–2100 年逐年棉花作物需水量；
- (2) RCP4.5 情景下 2020–2100 年逐年棉花作物需水量；
- (3) RCP2.6 情景下 2020–2100 年逐年冬小麦作物需水量；
- (4) RCP4.5 情景下 2020–2100 年逐年冬小麦作物需水量。

文件采用统一的命名方式，见表 3：

表 3 《RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集》组成文件简表

文件夹名	文件命名方式	数据描述	数据格式	文件个数	数据量
CottonRCP26	CA_yearly_CottonIWR_ CO2_RCP26_年_NAN.tif	WGS84 地理投影 空值区设置为 NAN	.tif	81	1.1 MB
CottonRCP45	CA_yearly_CottonIWR_ CO2_RCP45_年_NAN.tif	WGS84 地理投影 空值区设置为 NAN	.tif	81	1.1 MB
WheatRCP26	CA_yearly_WheatIWR_ CO2_RCP26_年_NAN.tif	WGS84 地理投影 空值区设置为 NAN	.tif	81	1.1 MB
WheatRCP45	CA_yearly_WheatIWR_ CO2_RCP45_年_NAN.tif	WGS84 地理投影 空值区设置为 NAN	.tif	81	1.1 MB

4.2 数据结果

- (1) RCP2.6 和 RCP4.5 情景下未来棉花作物需水量

RCP2.6 和 RCP4.5 情景下，未来棉花作物需水量在空间分布上都呈现由西南向北部和

东部逐渐减小的特征（图 2–3）。土库曼斯坦最高，其次为乌兹别克斯坦。塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦最低，哈萨克斯坦北部也有较低的作物需水量，且在 2020–2100 年间这种空间分布格局保持不变，数量级从 532 mm 到 2,286 mm 之间变化。与土库曼斯坦和乌兹别克斯坦相比，塔吉克斯坦、吉尔吉斯斯坦和哈萨克斯坦北部在棉花生长季较高的降雨量是这些地区具有较低作物需水量的主要原因。根据作物需水量的计算方法可知，气象条件（主要包括降雨、气温、风速和辐射）的空间特征基本决定了作物需水量的空间特征，RCP2.6 和 RCP4.5 情境下气象条件的空间分布特征基本一致，因此所得到的作物需水量的空间分布格局基本保持不变。

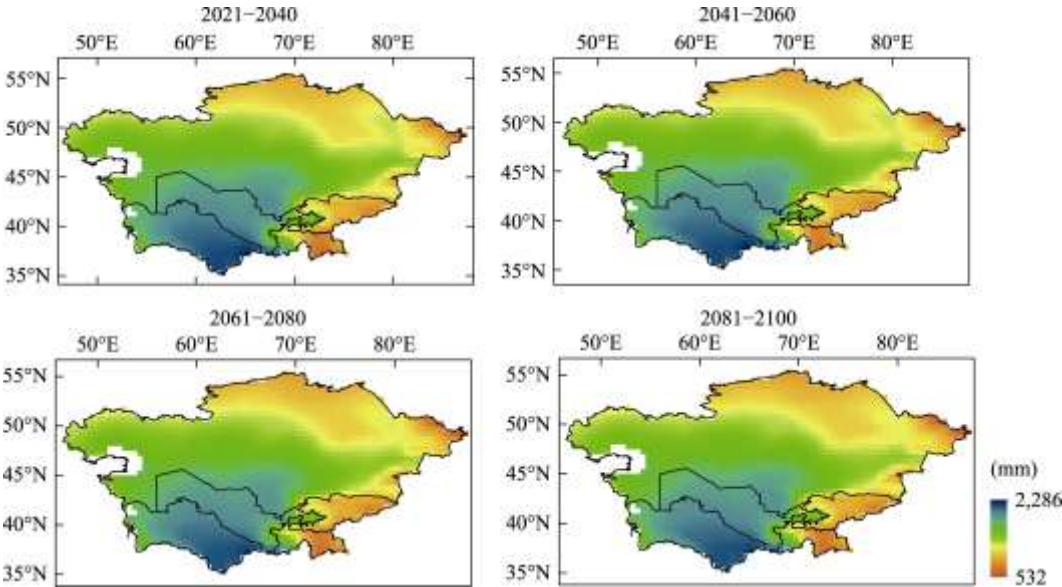


图 2 RCP2.6 情景下 4 个时段中亚五国棉花作物需水量空间分布图

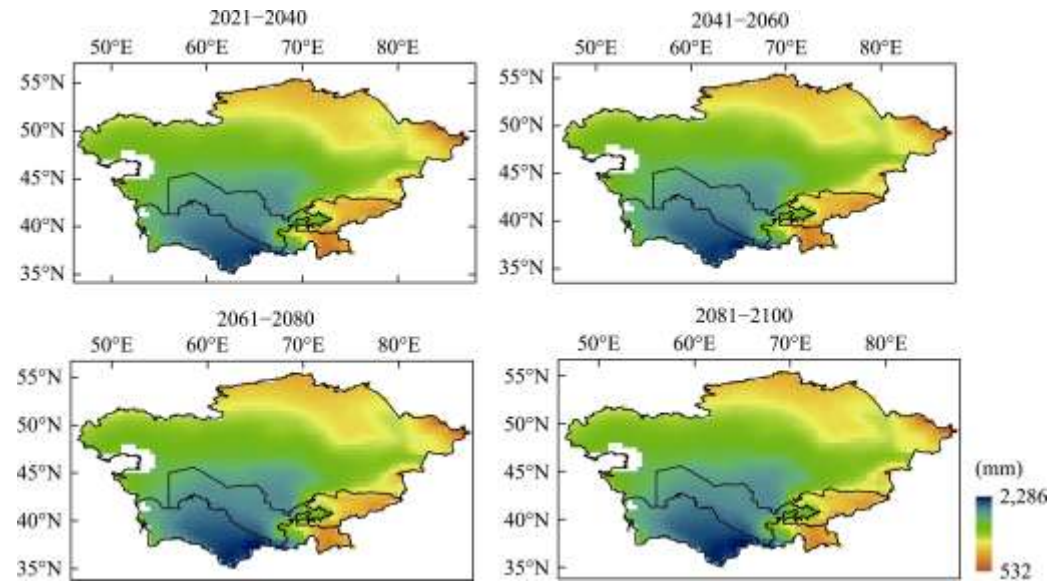


图 3 RCP4.5 情景下 4 个时段中亚五国棉花作物需水量空间分布图

(2) RCP2.6 和 RCP4.5 情景下未来冬小麦作物需水量

RCP2.6 和 RCP4.5 情景下, 未来冬小麦作物需水量在空间分布上与棉花相同, 也呈现由西南向北部和东部逐渐减小的特征(图 4-5)。土库曼斯坦最高, 其次为乌兹别克斯坦。塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦最低, 且在 2020-2100 年间这种空间分布格局保持不变, 数量级从 -329 mm 到 1,440 mm 间变化。负值表示有效降雨量大于作物需水量, 即降雨就可以满足作物生长的需要。与棉花相比, 显然冬小麦的作物需水量较小。塔吉克斯坦在冬小麦生长季较高的降雨量甚至大于作物耗水量, 因此存在作物需水量的负值。RCP2.6 和 RCP4.5 情境下气象条件的空间分布特征基本一致, 因此所得到的作物需水量的空间分布格局基本保持不变。

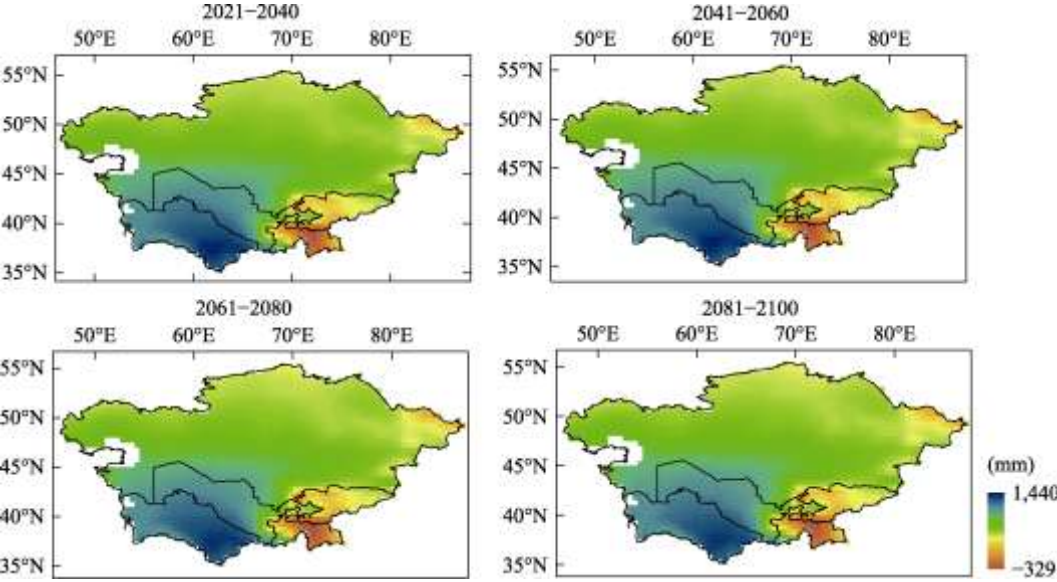


图 4 RCP2.6 情景下四个时段中亚五国冬小麦作物需水量空间分布图

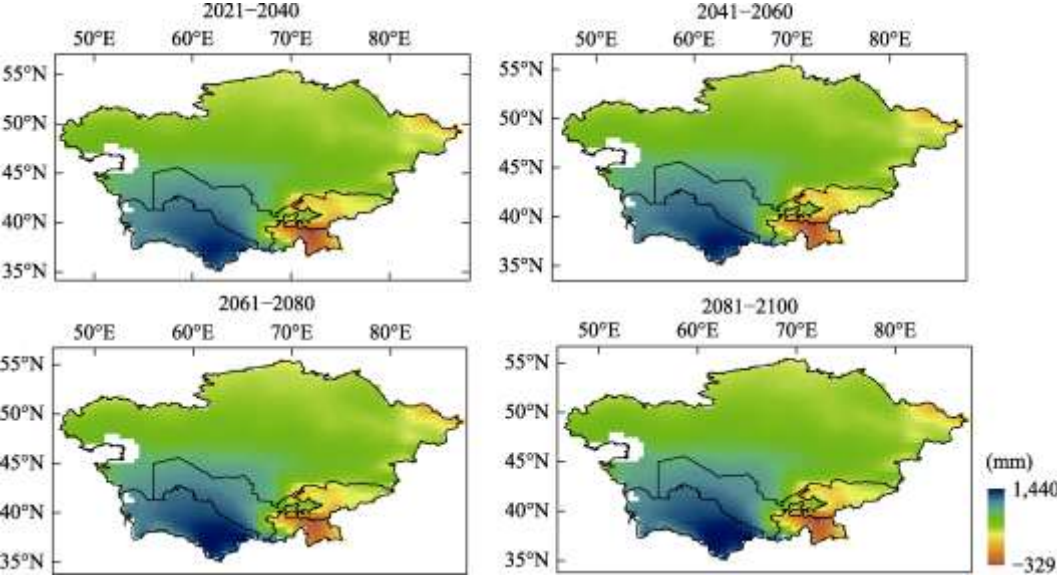


图 5 RCP4.5 情景下四个时段中亚五国冬小麦作物需水量空间分布图

（3）RCP2.6 和 RCP4.5 情景下未来棉花和冬小麦作物需水量的变化趋势

利用 Mann-Kendall 检验方法，本研究分析了 2020–2100 年未来棉花和冬小麦作物需水量的变化趋势。图 6 给出了通过 0.05 水平检验的变化趋势斜率图。在 RCP2.6 情景下，棉花的作物需水量在哈萨克斯坦中东部和东北部，以及土库曼斯坦的东部存在显著下降趋势，其他地区变化不明显。而在 RCP4.5 情景下，整个中亚地区棉花的作物需水量都呈增加趋势，尤其在塔吉克斯坦。对于冬小麦而言，RCP2.6 情景下哈萨克斯坦东北部存在显著下降趋势，其他地区变化不明显。RCP4.5 情景下，除了中亚东部，东南部及北部的少部分地区，整个中亚地区几乎都呈现增加趋势，中亚南部增加最明显。可见，棉花和冬小麦在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下作物需水量变化趋势差异较大，这主要是由于两种气候变化情景的差异导致的。RCP2.6 情景是辐射强度至 21 世纪中期先增加至 3.1 W m^{-2} ，之后逐渐下降，至 2100 年辐射强度水平为 2.6 W m^{-2} 。RCP4.5 情景是辐射强度逐渐增加，至 2100 年达到 4.5 W m^{-2} 。因此在这两种情景下气象要素随时间变化趋势不同，导致了作物需水量的变化趋势差异。

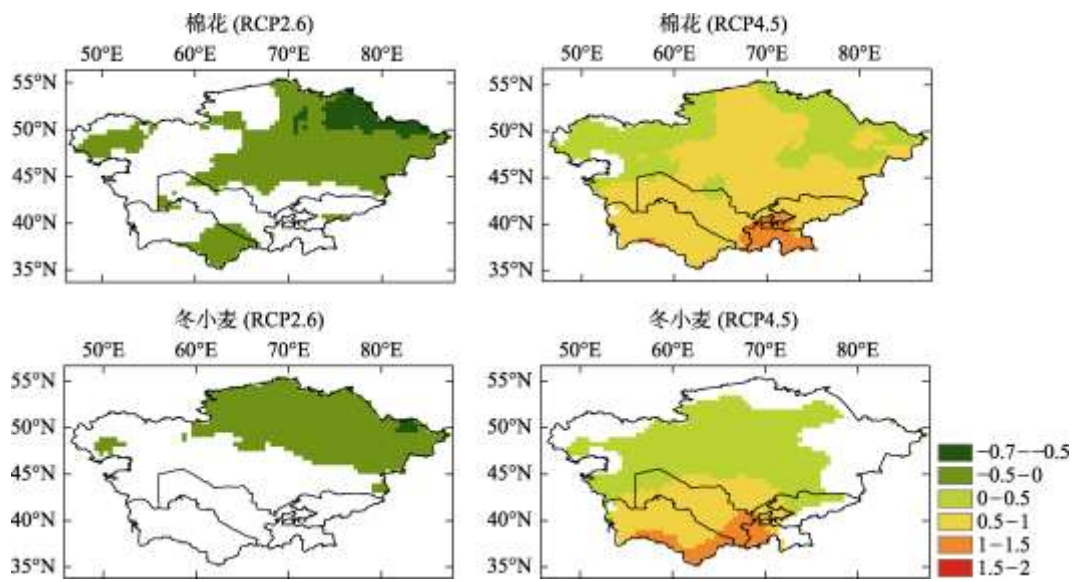


图 6 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下 2020–2100 年棉花和冬小麦作物需水量变化趋势斜率图（0.05 水平检验）

5 讨论和结论

本文基于 CMIP5 的 RCP2.6 和 RCP4.5 气候变化情景，利用作物系数法估算了 2020–2100 年中亚五国主要农作物棉花和冬小麦的作物需水量，生成了 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集。需要说明的是本研究是在假定中亚地区全部种植棉花或者全部种植冬小麦这种极端情况下对作物需水量的估算，这主要是因为难以预测未来几十年棉花和冬小麦的具体种植情况，这种假设更有助于分析作物需水量在整个中亚地区的变化情况。本数据集的时间跨度为 2020–2100 年，时间分辨率为 1 年，空间

分辨率为 0.5 度,数据格式为.tif。该数据集反映了中亚五国未来 80 年主要农作物棉花和冬小麦的时空格局及变化规律。数据分析结果显示:(1) RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,未来棉花作物需水量在空间分布上都呈现由西南向北部和东部逐渐减小的特征,土库曼斯坦最高,其次为乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦最低,哈萨克斯坦北部也有较低的作物需水量;(2) 两种气候变化情景下,未来冬小麦作物需水量在空间分布上与棉花相同,也呈现由西南向北部和东部逐渐减小的特征,土库曼斯坦最高,其次为乌兹别克斯坦,塔吉克斯坦和吉尔吉斯斯坦最低;(3) 2020–2100 年间, RCP2.6 和 RCP4.5 情景下,棉花和冬小麦各自的空间分布格局基本不变;(4) 棉花和冬小麦在 RCP2.6 和 RCP4.5 情景下作物需水量变化趋势差异较大。RCP2.6 情景下棉花和冬小麦作物需水量只在中亚东北部呈显著下降趋势,其他区域无明显变化。而在 RCP4.5 情景下,两种作物需水量几乎在整个中亚地区都呈显著增加趋势。这主要是由于两种气候变化情景的差异导致的。本研究为探究中亚地区未来农业水资源的发展,为“一带一路”战略背景下我国与中亚五国的未来农业合作发展提供了参考信息。

参考文献

- [1] 杨胜天,于心怡,丁建丽等. 中亚地区水问题研究综述[J]. 地理学报, 2017, 72(1): 79–93.
- [2] 邓铭江,龙爱华,章毅等. 中亚五国水资源及其开发利用评价[J]. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1347–1356.
- [3] Yuldasheva, G., Hashimova, U., Callahan, J. Current trends in water management in Central Asia [J]. *Peace and Conflict Review*, 2010, 5: 1–11.
- [4] Tian, J., Zhang, Y. Q. Detecting changes in irrigation water requirement in Central Asia under CO₂ fertilization and land use changes [J]. *Journal of Hydrology*, 2020, 48: 124315.
- [5] 田静. RCP2.6 和 RCP4.5 情景下中亚五国棉花和冬小麦逐年需水量数据集(2020–2100)[J/DB/OL]. 全球变化数据仓储电子杂志, 2020. DOI: 10.3974/geodb.2020.01.04.V1.
- [6] 全球变化科学研究数据出版系统. 全球变化科学研究数据共享政策[OL]. DOI: 10.3974/dp.policy. 2014.05 (2017 年更新).
- [7] Rost, S., Gerten, D., Bondeau, A., et al. Agricultural green and blue water consumption and its influence on the global water system [J]. *Water Resources Research*, 2008, 44: 10.1029/2007wr006331.
- [8] Stulina, G. Recommendations on hydromodule zoning and crop irrigation rate [Z]. SIC ICWC, Tashkent, 2010.
- [9] Conrad, C., Rahmann, M., Machwitz, M., et al. Satellite based calculation of spatially distributed crop water requirements for cotton and wheat cultivation in Fergana Valley, Uzbekistan [J]. *Global and Planetary Change*, 2013, 110: 88–98.
- [10] Yang, Y. T., Roderick, M. L., Zhang, S. L., et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections [J]. *Nature Climate Change*, 2019, 9: 44–48.
- [11] Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., et al. FAO irrigation and drainage No.56: crop evapotranspiration [Z].