

未来气候情景内蒙古蒸散和产水量的变化特征

赵晓涵¹, 张方敏¹, 卢琦², 李云鹏³

(1.南京信息工程大学应用气象学院,江苏省农业气象重点实验室,南京 210044;

2.中国林业科学院荒漠化研究所,北京 100091;3.内蒙古自治区生态与农业气象中心,呼和浩特 010051)

摘要: 评估预测区域蒸散变化趋势及其影响因素对于干旱半干旱区的可持续发展至关重要。基于 4 种来自 CMIP 5 的全球气候模式数据和 CLM 4.5 模型,研究了在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下内蒙古地区 2020—2099 年的蒸散和产水量的时空变化特征及其影响因素。结果表明:在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下,未来内蒙古蒸散分别以 0.37,0.69 mm/a 速度增加($p<0.05$),呈西低东高分布。2 种情景下产水量均无明显变化趋势($p>0.05$),但是存在明显显著的空间差异。空间上看,到 21 世纪末,在 RCP 6.0 情景下,全境产水量大部分地区呈增加趋势,在南部温带半干旱和半湿润区增加超过 10 mm/a;但是在 RCP 8.5 情景下产水量减少区域占全境的 46.32%,特别是干旱半干旱区和半湿润区产水量显著减少。蒸散影响因子存在较大区域差异,干旱半干旱区蒸散变化的主要影响因素是降水,半湿润区蒸散变化受降水和温度的共同影响,湿润区蒸散变化由温度主导;且在更高的升温情景下,增温影响进一步增加。同时,植被也是蒸散重要的影响因子,但其影响程度小于气候因子。

关键词: 产水量; 蒸散; 气候变化; 水资源

中图分类号: S152.7

文献标识码: A

文章编号: 1009-2242(2022)04-0151-09

DOI: 10.13870/j.cnki.stbcxb.2022.04.020

Characteristics of Evapotranspiration and Water Availability in Inner Mongolia Under Future Climate Scenarios

ZHAO Xiaohan¹, ZHANG Fangmin¹, LU Qi², LI Yunpeng³

(1.Jiangsu Key Laboratory of Agricultural Meteorology, College of Applied Meteorology, Nanjing

University of Information Science and Technology, Nanjing 210044; 2.Institute of Desertification, Chinese

Academy of Forestry, Beijing 100091; 3.Inner Mongolia Ecology and Agricultural Meteorology Center, Hohhot 010051)

Abstract: It is vital to evaluate and predict regional water resource variation and its influencing factors for sustainable development of arid and semi-arid areas. Based on four global climate models of CMIP5 and CLM 4.5, the temporal and spatial characteristics of evapotranspiration and water availability were studied in Inner Mongolia under two Representative Concentration Pathways (RCPs) from 2020 to 2099. The results showed that under RCP 6.0 and RCP 8.5 scenarios, the future evapotranspiration in Inner Mongolia would increase at a rate of 0.37 mm/a and 0.69 mm/a, respectively ($p<0.05$), decreasing from east to west. Water availability in Inner Mongolia did not show a significantly trend under the two scenarios ($p>0.05$), but there were significant spatial differences. From a spatial perspective, water availability in most areas showed an increasing trend and increased by more than 10 mm/a in the southern semi-arid and semi-humid regions of temperate zone by 2090s; however, the area with reduced water availability accounted for 46.32% of the entire territory under the RCP 8.5 scenario, especially in the arid, semi-arid and semi-humid areas. There were great regional differences influencing of driving factors in evapotranspiration. Precipitation was the main influencing factor of evapotranspiration changes in arid and semi-arid area. The changes in semi humid area were jointly affected by precipitation and temperature. The changes in humid area were dominated by temperature and in the higher heating scenario, the effect further increased with temperature increased. At the same time, vegetation was also an

收稿日期: 2021-12-13

资助项目: 国家重点研发计划项目(2018YFC1506606); 江苏省优秀青年基金项目(BK20170102)

第一作者: 赵晓涵(1995—), 女, 山东东营人, 博士研究生, 主要从事气象生态遥感研究。E-mail: zhxxhmw@163.com

通信作者: 张方敏(1983—), 女, 教授, 主要从事气象生态遥感与应用气象研究。E-mail: fmin.zhang@nuist.edu.cn

important factor affecting evapotranspiration with less than climate factor.

Keywords: water availability; evapotranspiration; climate change; water resources

政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告第一工作组报告^[1-2]指出,自工业革命以来(1850—1900年)全球地表平均温度已上升约1℃;未来20年全球升温预计将达到或超过1.5℃;升温往往伴随着气候变化风险,气候变化正在加剧水循环,这加剧了区域性干旱和强降水事件的发生。而陆地升温将增加蒸散发(蒸散)和大气蒸发需求,进而影响区域可用水量并导致区域性干旱事件^[2]。蒸散是水文循环的重要组成部分,是地表水分的主要耗散方式,约有60%的降水通过蒸散返还到大气^[3]。未来蒸散变化趋势可能导致水循环的整体加强或减弱,进而引起水资源在时空的重新分配和区域水资源储量的改变^[4-5]。随着对全球变暖的深入研究,气候变化将如何影响水资源得到广泛关注,尤其是在水资源匮乏的干旱半干旱地区^[6],这些问题在水资源管理的决策过程中发挥着重要作用。

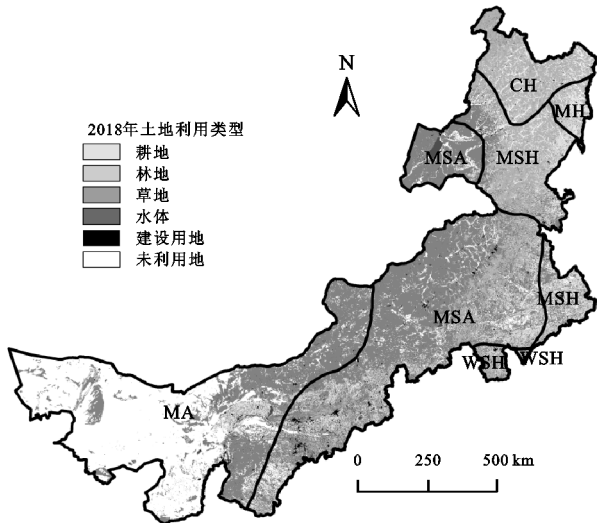
内蒙古是中国典型的气候过渡带和气候敏感地区,水资源时空分布不均且亏缺严重^[7],生态系统的高度脆弱性使其对气候变化和干扰十分敏感。在过去的20年里,由于快速的气候变化和广泛的人为干扰,内蒙古区域面临着由于蒸散迅速增加而耗水量增大的严峻局面^[8]。从区域水资源的角度来看,降水的增速慢于蒸散^[9-10],预计未来升温导致的蒸散水损耗将是内蒙古水资源状况改善的严重制约因素,因此,评估未来不同气候情景下未来的蒸散趋势,可以深入了解气候变化如何影响未来的水供应,并有助于了解该地区未来的水文、生态及其对全球气候系统的反馈^[11]。

现有未来气候变化对水循环的影响研究主要集中在大气降水^[12]、地表水文过程^[11,13]等,而对蒸散及其影响机制的研究则较少。同时,陆面过程是模拟陆地水循环变化不确定性的重要来源^[2]。CLM(community land model)模式是目前较为完善的陆面过程模式之一,它包含生物地球物理、水文学、生物地球化学和植被动力学的复杂过程,能够在不同空间尺度下较好地模拟水循环过程,已有大量研究者^[14-15]证实了在内蒙古地区的可用性。因此,本研究将利用CMIP5耦合气候模式和CLM 4.5的模拟结果,探讨未来不同气候情景下内蒙古地区蒸散的时空变化特征及其主要影响因素,以及未来内蒙古区域水资源变化,以期为内蒙古地区未来水资源综合利用及合理配置提供科学支撑。

1 研究方法 with 数据来源

1.1 研究区概况

内蒙古自治区位于中国西北部(97.27°—126.07°E, 37.40°—53.38°N),是我国典型的农牧带过渡区,东部以森林和耕地为主,西部和中部存在大量未利用荒地、沙漠和草地^[16],是对气候变化最敏感地区之一。受距海远近及地形地貌影响,内蒙古存在西部干旱半干旱气候到东部湿润半湿润气候的干湿气候过渡带,近60年内蒙古年降水在216.30~431.00 mm/a,以0.047 mm/a增速递增,空间上呈东北—西南递减趋势^[9]。本文依据中国气象局编绘的中国气候区划图(<http://www.resdc.cn>),将内蒙古划分为6个气候区(图1)。



注:CH 为寒温带湿润气候区;MH 为中温带湿润气候区;MSH 为中温带半湿润气候区;WSH 为暖温带半湿润气候区;MSA 为中温带半干旱气候带;MA 为中温带干旱气候区。

图 1 研究区位置及土地利用类型分布

1.2 数据来源与处理

气候模式数据选用CMIP5中4个全球气候模式^[12](表1)在未来不同典型浓度路径RCP(representative concentration pathways)情景下日尺度温度和降水模拟结果,空间分辨率为0.5°。该数据经过跨部门影响模型比较计划ISI-MIP(the inter-sectoral impact model inter-comparison project, <https://www.isimip.org>)的空间降尺度处理和偏差校正处理^[17]。气候数据集的验证数据来自于国家气象科学数据中心(<http://data.cma.cn>)的内蒙古地区112个气象站点2006—2010年温度和降水数据。通过对比发现,模式能很好地模拟历史降水、温度和观测数据,均呈现较好的正相关线性关系,决定系数(R^2)高于0.81。因此,偏差校正后的气候模式数据在内蒙古地区具有较好的精度。

RCP 是 IPCC 发布的温室气体排放情景,主要包括 4 种排放情景,分别为 RCP 2.6、RCP 4.5、RCP 6.0 和 RCP 8.5^[18]。由于内蒙古地区在 1960—2016 年升温速度明显高于全球增温水平^[9,19],截至 2020 年升温较工业化前已超过或接近 1.5℃,或较基准期已超过 0.89℃,本研究选择 RCP 6.0 和 RCP 8.5 2 种升温较快的高排放情景代表未来内蒙古地区的可能气候变化情景。

表 1 所用全球模式基本信息

模式名称	研究单位
GFDL-ESM2M	美国地球物理流体动力实验室
MIROC5	日本海洋地球科学技术处
IPSL-CM5A-LR	皮埃尔—西蒙·拉普拉斯研究所
HadGEM2-ES	哈德莱气候预测与研究中心

以 4 种全球气候模式数据作为强迫,选取 CLM 4.5 模型在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下 2020—2099 年期间内蒙古地区的叶面积指数(LAI)、蒸腾、土壤蒸发和蒸散发(后简称蒸散)模拟结果来探究不同气候情景下内蒙古蒸散和水资源变化,空间分辨率为 0.5°。首先,对比被广泛应用的 MODIS LAI 数据集(GLOBMAP LAI V3 数据)^[20]和 CLM 模型输出的 LAI 数据集 2006—2018 年在

内蒙古区域 LAI 特征发现,CLM 模型 LAI 和 MODIS LAI 相关性好, R^2 均高于 0.93,其变化能够表征内蒙古区域 LAI 的变化;其次,采用来自 ChinaFlux^[21]及 2000—2010 年中国典型陆地生态系统实际蒸散量和水分利用效率数据集^[22]的 7 个站点包含 4 种生态系统类型的站点数据(表 2)验证 CLM 模型蒸散的模拟精度,结果表明,CLM 模拟蒸散发结果与观测相比存在一定的偏差,但是模拟结果与观测值存在较好的线性关系,多模式平均蒸散的性能在各方面的比较中均优于单模式蒸散, R^2 达 0.98(图 2)。因此,本文采用多模式平均结果进行分析。

在 RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下,CLM 4.5 模拟结果在以森林为主要植被的湿润区(寒温带湿润气候区 CH 和中温带湿润气候区 MH,缩写为 H)蒸腾蒸散比分别为 0.62 和 0.61;在以森林、耕地和草地混杂的半湿润区(中温带半湿润气候区 MSH 和暖温带半湿润气候区 WSH,缩写为 SH)和半干旱区(MSA)蒸腾蒸散比为 0.37~0.45;在植被稀少的干旱区(MA)比值为 0.20;与前人^[23-24]研究基本一致,因此认为数据具有较好的可信度。

表 2 蒸散观测站点基本信息

编号	站点	观测时间	纬度(N)/(°)	经度(E)/(°)	生态系统类型	站点描述
1	DLC	2006	42.05	116.28	农田	多伦农田
2	KBQD	2006	40.38	108.55	荒漠	库布齐荒漠
3	KBQF	2006	40.54	108.69	森林	库布齐森林
4	SNTZ	2008—2009	44.08	113.57	草地	苏尼特左旗
5	XFS	2006	44.13	116.33	草地	锡林浩特围封典型草原
6	DL	2006—2013	42.53	116.23	草地	多伦草原
7	XLHT	2006—2013	43.55	116.68	草地	锡林浩特围封典型草原

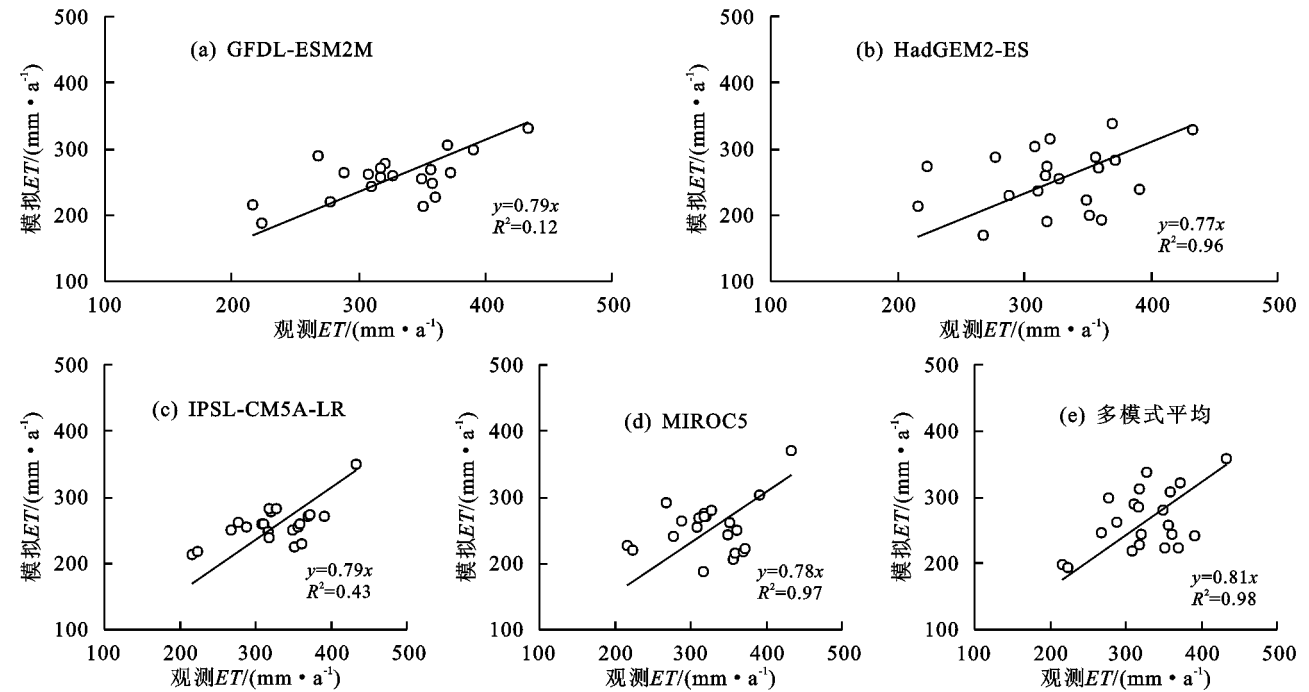


图 2 CLM 模拟蒸散与站点数据的对比

1.3 产水量

在像元水平,根据 CLM 4.5 模拟的逐日蒸散计算年度蒸散结果。假设土壤水和地下水储量的变化可以忽略不计^[25],基于地表水平衡法,计算产水量方法为:

$$WY=PRE-ET$$

式中:WY、PRE 和 ET 分别为产水量(mm/a)、年降水量(mm)和年蒸散量(mm)。日益增长的水资源需求(气候驱动和管理驱动)使得越来越多的研究由单一要素研究转变为对水量平衡及供需方面的综合性研究^[26]。产水量可视作供人类使用的地表水总量,已有研究^[5,26-27]使用该方法来评估中尺度或大尺度的可用水量,因此,本研究选用该指数以表征未来研究区水资源变化情况。

2 结果与分析

2.1 未来不同气候情景下气候变化特征

在 RCP 6.0 情景下,预计内蒙古气温在 2040 年

之后出现较为稳定的 1.5℃ 升温,在 2050 年后升温达 2.0℃;而在 RCP 8.5 情景下,预计内蒙古区域气温将在 2040—2049 年期间上升 2.0℃,在 2050 年后升温超过 3.0℃。RCP 6.0 情景下,降水和温度平均以 0.42 mm/a 和 0.04℃/a 的速度增长($p<0.05$)。RCP 8.5 的情景下,降水和温度的平均增长率分别为 0.77 mm/a 和 0.07℃/a($p<0.05$)(图 3)。2 种情景,降水呈西低东高分布,温度表现为西南和东南高东北低的分布(图 4)。到 21 世纪末(2090s),内蒙古大部分地区降水呈递增趋势,其中东部增幅大;内蒙古的西部(MA 北部)表现为递减趋势。到 2090s,内蒙古全境升温均达 2℃ 以上,RCP 8.5 情景明显增温高于 RCP 6.0 情景;RCP 8.5 情景下,内蒙古全境(除南部 MSA 西南角外)升温达 4℃ 以上。总体上,2020—2099 年,内蒙古地区气候整体上呈现暖湿化趋势。

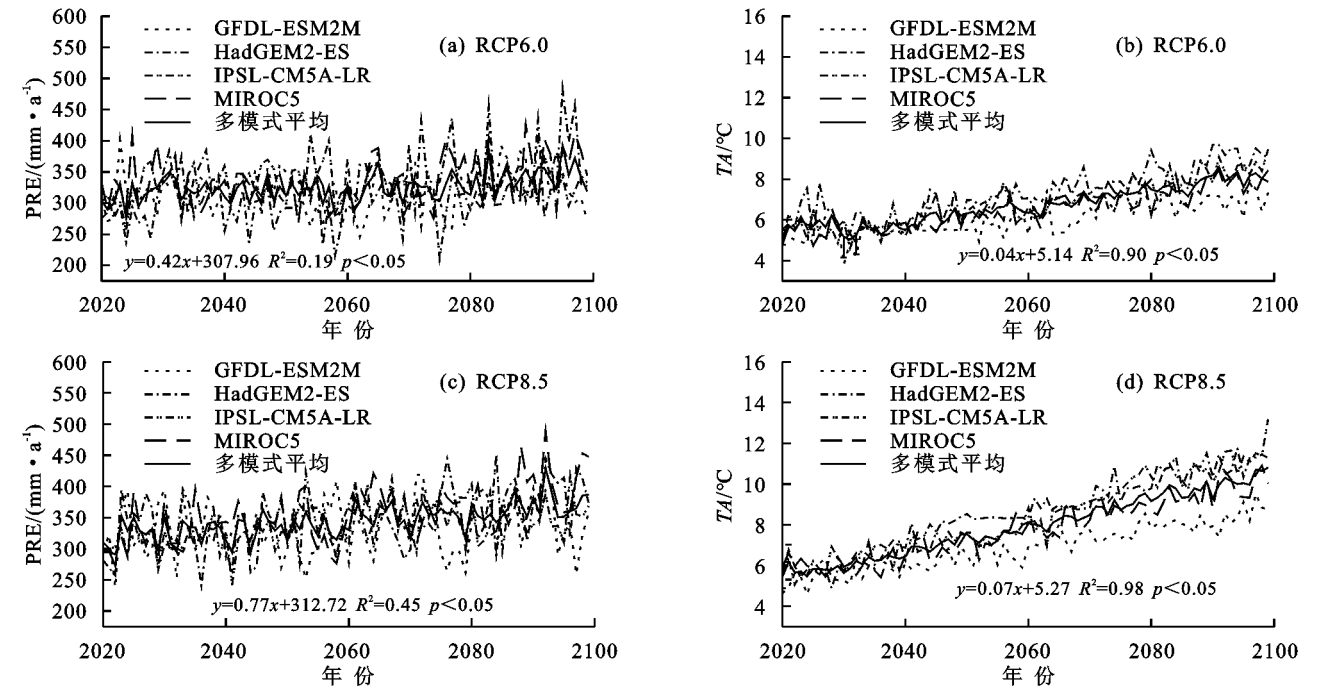


图 3 2020—2099 年不同气候情景降水(PRE)和温度(TA)的时间变化

2.2 未来不同气候情景下蒸散的时空变化

2.2.1 2 种情景下蒸散的时空变化 2020—2099 年内蒙古地区蒸散呈增加趋势。RCP 6.0 情景下蒸散增长速率低于 RCP 8.5,分别为 0.37 mm/a($p<0.05$, $R^2=0.36$)和 0.69 mm/a($p<0.05$, $R^2=0.62$)。2 种情景下,未来蒸散均呈西低东高分布(图 5)。到 2090s 蒸散的变化趋势有明显的区域分异,内蒙古大部分地区蒸散呈递增趋势,其中东部增幅大,但是内蒙古的西部(MA 北部)表现为递减趋势。在 RCP 6.0 情景下,MA 北部蒸散呈减少趋势,占全境的 3.29%;MA 蒸散增幅偏小,多低于 30 mm/a,而内蒙古东部区域增幅大,其中 MSA 东南部、MSH 和 WSH 蒸散增幅高于 60 mm/a,占全境的 9.88%。在

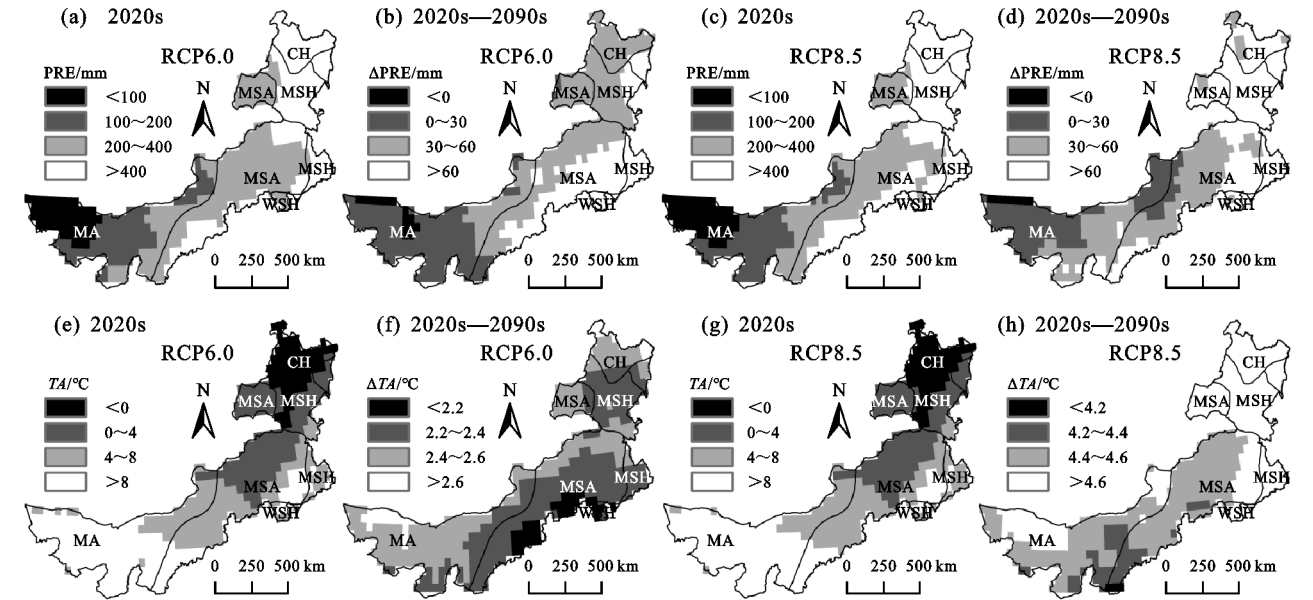
RCP 8.5 情景下,MA 北部有 1.93% 区域蒸散存在减少趋势;内蒙古东部和北部蒸散增加明显,其中 MSA 南部和东部、MSH、MH、CH 和 WSH 蒸散增幅高于 60 mm/a,占全境的 37.21%。

2.2.2 不同升温情况下蒸散及分量变化 由于蒸腾和土壤蒸发对气候变化的响应存在差异,为了探究在不同程度升温条件下蒸散及蒸腾和土壤蒸发的变化,选取 2040—2049 年和 2060—2069 年的年均值分别表征 RCP 6.0 情景下升温 1.5,2℃ 及 RCP 8.5 情景下升温 2,3℃ 的情况。

在 RCP 6.0 情景下,升温 1.5℃ 期间平均蒸散为 297.76 mm/a,升温达 2.0℃ 期间平均蒸散为 298.63 mm/a,蒸发增加弥补蒸腾的减少,主导蒸散变化;

而在 RCP 8.5 情景下,升温 2.0℃ 期间平均蒸散为 304.76 mm/a,升温 3.0℃ 期间平均蒸散为 319.81 mm/a(表 3)。在 MA,升温 1.5~2℃ 时蒸散增加 2.42 mm/a,60.33% 变化由蒸腾主导;升温 2~3℃ 时蒸散增加 10.75 mm/a,66.88% 变化由蒸发主导。在 MSA,升温 1.5,2℃ 时蒸散减少-3.97 mm/a,其中蒸腾减少-9.01 mm/a 主导蒸散的变化(66.31%);升温 2~3℃ 时蒸散增加 18.99 mm/a,蒸发为主导因素占 51.63%。在 H,升温 1.5~2℃ 时蒸散增加 13.18

mm/a,62.66% 变化由蒸腾主导;升温 2~3℃ 时蒸散增加 14.76 mm/a,73.33% 变化由蒸腾主导。在 SH,升温 1.5~2℃ 时蒸散增加 30.95 mm/a,其中蒸腾减少-5.95 mm/a,蒸发增加 6.95 mm/a 主导蒸散的变化(53.86%);升温 2~3℃ 时蒸散增加 18.96 mm/a,蒸发为主导分量占 53.11%。可以发现,在 2 种升温情景,MSA 和 MA 区域蒸散由蒸腾主导变为蒸发主导,SH 区域 2 种分量贡献接近,H 区域蒸散主导因素为蒸腾。



注:2020s 和 2090s 分别代表 21 世纪 20 年代和 21 世纪末。

图 4 2020—2099 年不同气候情景降水(PRE)和温度(TA)的空间分布及变化

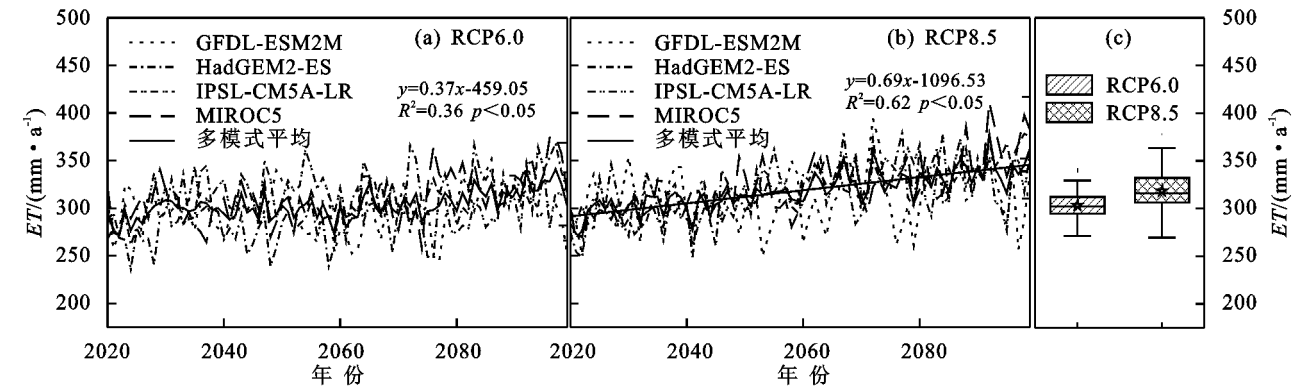


图 5 2020—2099 年不同气候情景下蒸散(ET)的时间变化

气候区	RCP 6.0				RCP 8.5			
	升温 1.5℃	升温 2.0℃	T 占比/%	E 占比/%	升温 2.0℃	升温 3.0℃	T 占比/%	E 占比/%
MA	160.06	162.48	60.33	13.53	163.46	174.20	26.38	66.88
MSA	362.40	381.39	-66.31	33.69	362.40	381.39	42.69	51.63
H	393.67	406.84	62.66	7.62	412.28	427.04	73.33	5.80
SH	422.16	423.11	46.14	53.86	437.32	456.28	-48.21	53.11
总区	297.76	298.63	-49.84	50.16	304.76	319.81	44.11	45.74

注:ET、T 和 E 分别表征蒸散、蒸腾和蒸发(mm/a);占比指分量变化在蒸散变化的占比(由于蒸散包含冠层截留水蒸发等,导致两者之和不为 100%)。

2.3 未来不同气候情景下产水量的时空变化

RCP 6.0 情景下,升温 1.5 ℃ 期间产水量为 19.89 mm/a,升温 2.0 ℃ 期间平均产水量为 19.58 mm/a;RCP 8.5 情景下,升温 2.0 ℃ 期间产水量为 23.14 mm/a,升温 3.0 ℃ 期间平均产水量为 24.25 mm/a(表 4)。但 2 种气候情景下,产水量表现出明显年际波动,但总体上产水量无明显变化趋势($p>0.05$)(图 6)。在 RCP 6.0 情景下,产水量以 0.05 mm/a($p>0.05$, $R^2=0.01$)速度增长;在 RCP 8.5 的情景下,产水量增长速度是 RCP 6.0 情景的 1.7 倍,高达 0.08 mm/a($p>0.05$, $R^2=0.02$)。

空间上,RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下产水量表现出明显的空间异质性(图 7)。在 2020s,RCP 6.0 情景产水量在-208.32~186.28 mm/a,低值发生在 MA 和 MSA 区域,高值发生在研究区东北区域;RCP 8.5 情景产水量在-189.15~207.84 mm/a,由西向东呈递增趋势。到 2090s 2 种情景下产水量空间变化存在明显区别,在 RCP 8.5 情景下,内蒙古地区 MSA 和 WSH 区域开始出现产水量减少情况。RCP 6.0 情景下内蒙古大部分地区

产水量呈递增趋势,仅有 15.12% 区域存在减少趋势,零星分布于 MA、MSA 和 CH;内蒙古东部增幅最大,其中 MSH 东部和南部、WSH 和 MSA 东部产水量增幅高于 10 mm/a,占全境的 36.43%。在 RCP 8.5 情景下,产水量减少区域占全境的 46.32%,主要分布于 MA 东部、MSA 西部、MSH 东部和 WSH 区域,其中低于 10 mm/a 的区域占全境的 9.50%,内蒙古西部和北部产水量呈增加趋势,主要分布于 MA 西部、MSA 东部、MSH 和 CH 区域,其中高于 10 mm/a 的区域占全境的 18.41%。

表 4 不同升温情况下产水量变化

气候区	RCP 6.0			RCP 8.5		
	单位: mm/a					
	升温 1.5 ℃	升温 2.0 ℃	变化量	升温 2.0 ℃	升温 3.0 ℃	变化量
MA	0.24	-0.70	-0.94	-0.91	0.72	1.63
MSA	7.14	7.77	0.62	11.49	11.72	0.23
H	110.32	113.00	2.68	117.80	121.79	3.98
SH	27.40	23.26	-4.14	36.62	32.85	-3.76
总区	19.90	19.58	-0.31	23.14	24.25	1.12

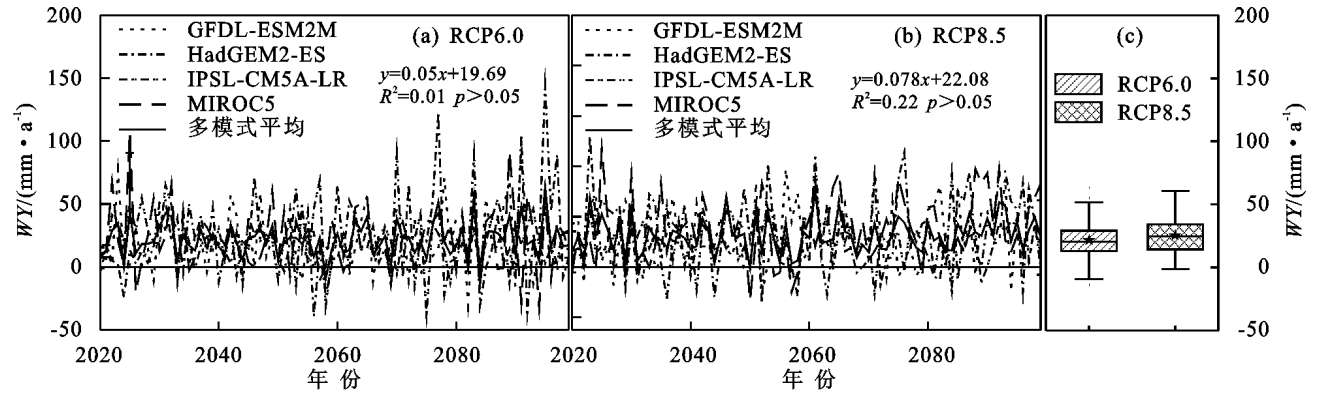
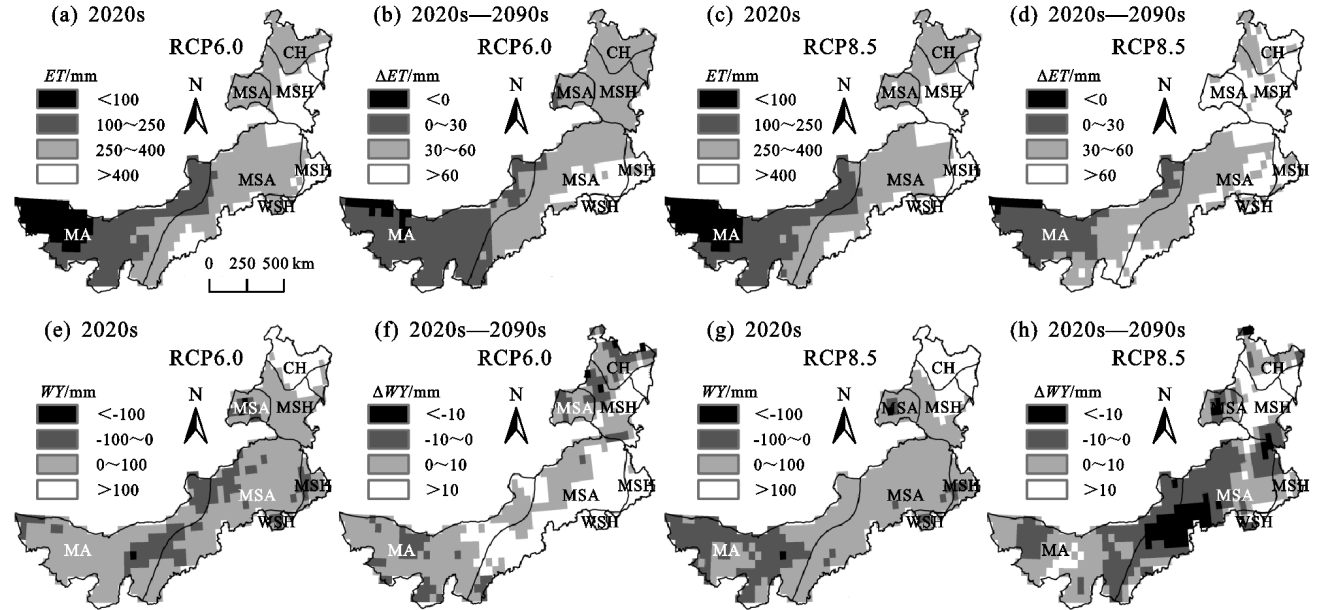


图 6 2020—2099 年不同气候情景下产水量(WY)的时间变化



注:2020s 和 2090s 分别代表 21 世纪 20 年代和 21 世纪末。
图 7 2020—2099 年不同气候情景蒸散(ET)和产水量(WY)的空间分布及变化

2.4 蒸散变化的气候驱动因素分析

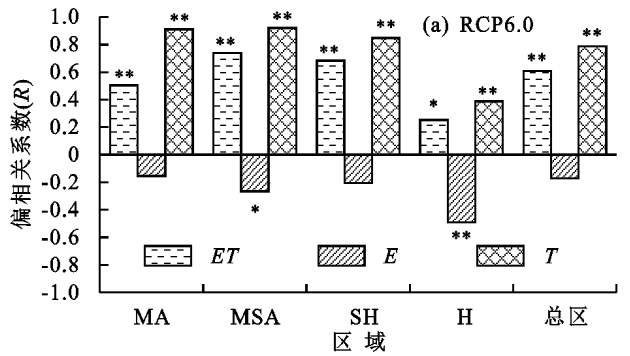
由于产水量是降水和蒸散 2 个要素计算得出,其变化受区域蒸散直接影响,因此,选取年降水量作为水分输入的代表,年平均气温作为能量供应的代表,探讨了未来不同升温情景下内蒙古气候变化对蒸散的影响(表 5)。

表 5 内蒙古各气候区蒸散与气象因子的相关系数

气候区	RCP 6.0		RCP 8.5	
	TA	PRE	TA	PRE
MA	0.09	0.94 **	0.41 **	0.95 **
MSA	0.24 *	0.77 **	0.36 **	0.81 **
SH	0.62 **	0.61 **	0.70 **	0.63 **
H	0.82 **	0.11	0.91 **	0.33 **
总区	0.46 **	0.77 **	0.54 **	0.74 **

注:“**”表示相关性达 0.01 显著水平;“*”表示相关性达 0.05 显著水平;TA、PRE 和 ET 分别表征温度、降水和蒸散。

整个区域上,2 种情景下蒸散与降水和温度均达到极显著正相关关系,但与降水的相关系数(0.74~0.77)远大于温度(0.46~0.54),但不同区域存在一定差异。MA、MSA 和 SH 和 RCP 8.5 情景下 H 区域蒸散与降水呈极显著正相关关系,相关系数为 0.33~0.95;SH、H 和 RCP 8.5 情景的 MA 和 MSA 区域蒸散与温度呈极显著正相关关系,相关系数为 0.36~0.91;在 RCP 6.0 情景下 MSA 区域蒸散与温度存在显著



注: * 表示 $p < 0.05$; ** 表示 $p < 0.01$ 。

图 8 内蒙古各气候区蒸散、蒸腾和蒸发与 LAI 的偏相关系数

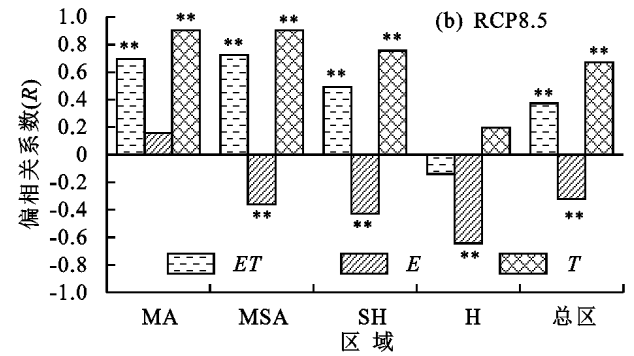
3 讨论

在不同气候情景下,未来内蒙古暖湿化加剧,蒸散呈显著增加,水循环加剧将进一步影响区域水资源。整体上,内蒙古可利用水资源未出现明显变化,但当升温达到 2~3℃后,部分区域(MA、MSA 和 WSH)出现可利用水资源减少的情况(图 6 和表 5)。Chen 等^[28]基于 22 种全球气候模式和区域气候模式指出,全球变暖对 21 世纪末我国南方部分地区的干旱情况增加;马丹阳等^[29]发现,在 RCP 8.5 情景下中国未来存在湿润区显著减少、干湿过渡区显著扩张的干湿分布格局,与研究特征描述一致,持续升温可能将加剧干旱半干旱区的水资源

正相关关系($R = 0.24$)。在越干旱的区域降水对蒸散影响更大,降水的增加在一定程度上减缓干旱半干旱区域的干旱,但在升温情景下呈现显著的水循环加速。对比 2 种情景可以发现,在更高的升温情景下,增温造成的影响进一步增大,尤其是在 MA 和 MSA 区域,蒸发速度显著增加(表 5),蒸散支出增加快于降水收入增加,部分区域产水量减少,未来该区域可能出现更严重的水资源危机。

2.5 植被对蒸散变化的影响

在未来情境下,内蒙古植被呈显著绿化趋势,为了明确植被对蒸散变化的影响,本文计算了 LAI 与蒸散、蒸腾和蒸发的偏相关关系(图 8)。整个区域上,RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下 LAI 与蒸散、蒸腾达到极显著正相关关系($R = 0.61, 0.37, p < 0.01$),在更高的 RCP 8.5 升温情景下,LAI 阻碍了裸土蒸发($R = -0.32, p < 0.01$)。在 H 区域,RCP 6.0 情景下 LAI 增加仍有利于蒸散的增加,到 RCP 8.5 情景下 LAI 对蒸散影响不显著;其余区域 LAI 增加导致蒸散的增加($p < 0.01$)。在所有区域,LAI 增加导致更多的蒸腾耗水。而对蒸发,由于 MA 区域植被较为稀疏,RCP 6.0 和 RCP 8.5 情景下 LAI 的增加对蒸发的影响不显著($p > 0.05$);但在其他区域,对比 2 种情景 LAI 增加不利于蒸发,在 RCP 8.5 情景下这种影响均达到极显著水平($p < 0.01$)。



匮乏并影响半湿润区的水资源。

蒸散作为水资源主要的耗散项,对水资源高效利用具有重要意义。内蒙古干旱半干旱区降水对蒸散变化起主导作用^[10],在半湿润区降水和温度影响地位相当,在湿润区域温度变化主导了蒸散变化。在越干旱的区域降水对蒸散影响更大,降水的增加在一定程度上减缓干旱半干旱区域的干旱加剧,但到达更高的升温情景时,增温影响进一步增大,增温造成的大气水分亏缺加大水汽梯度,蒸散耗散不断增加^[30],造成区域水循环加速,蒸散开始受到降水的限制。水资源的变化主要取决于降水和蒸散的变化速度,Hun-

tington^[4]指出,全球升温导致水循环加速,加剧水资源的不确定性。蒸散加剧导致水循环加速,进而加剧未来极端天气事件的强度和频率;苏布达等^[31]基于 1961—2100 年多模式结果研究发现,未来中国实际蒸散持续增加将导致加剧极端干旱事件。

同时,在升温 and 降水增加的气候变化影响下,未来内蒙古植被绿化趋势明显。植被对蒸散的影响十分复杂,植被受气候变化和自身调节作用共同影响蒸腾耗水量,并作为重要的环境因子,影响地表温度、湿度、粗糙度等以影响蒸发。在以森林为主的湿润区,植被通过加速蒸腾的冷却作用应对高温,但在 RCP 8.5 情景下,一方面植被绿化趋势对蒸腾的影响减小,这可能由于蒸散对植被绿化的敏感度随辐射增加而降低^[32];另一方面,这可能由极端高温导致的气孔闭合导致^[33],但由于 LAI 的增加,总体蒸腾仍然呈增加趋势;且由于森林对地面的遮挡作用,蒸发所占比例很小,植被增加虽然不利于土壤蒸发但受高温影响,空气水汽梯度增加,土壤蒸发仍呈上升趋势。在干旱半干旱区,草地对气候变化十分敏感,高温和水分短缺导致部分气孔闭合以维持自身生长^[34],持续升温导致蒸发所占比例增加,蒸发造成的水分耗散高于植被蒸腾,在 RCP 8.5 情景下蒸散支出增加快于降水收入增加,部分区域产水量减少,未来该区域可能出现更严重的水资源危机。植被由于其自我调节能力,对应对未来气候变化具有重要的作用。虽然有研究者^[26-27]指出植被绿化有利于年蒸散量,但对产水量有负向影响,加剧了缺水地区的水资源短缺,但植被的存在一定程度上抑制土地蒸发导致的无效耗水量,因此,在干旱半干旱区,科学的生态工程能够在一定程度上提供水资源有效利用率,以缓解水资源短缺。由于在本次研究中没有考虑由于生态政策等造成的植被绿化导致的水资源变化,因此,如何平衡植被对蒸腾和蒸发的影响和生态系统与人类的需水矛盾,植被对于区域水资源的影响还需进一步探究。

4 结论

(1)未来内蒙古地区升温快于全球平均水平,在 RCP 6.0 情景下,气温在 2040 年之后出现较为稳定的 1.5℃升温,在 2050 年后升温达 2.0℃;而在 RCP 8.5 情景下,内蒙古区域气温将在 2040—2049 年期间上升 2.0℃,在 2050 年后升温超过 3.0℃。

(2)整体上,未来内蒙古地区蒸散均呈西低东高分布,蒸散呈显著增加趋势,RCP 8.5 情景下增速快于 RCP 6.0 情景。降水补充一定程度上抵消蒸散耗水,产水量并无明显增加趋势;到 21 世纪末,在 RCP

6.0 情景下,全境产水量大部分地区呈增加趋势,在南部半干旱和半湿润区增加超过 10 mm/a;但是在 RCP 8.5 情景下干旱半干旱区和半湿润区产水量呈减少趋势,减少区域占全境的 46.32%。

(3)内蒙古干旱半干旱区降水对蒸散变化起主导作用,在半湿润区降水和温度影响地位相当,在湿润区域温度变化主导蒸散变化。植被是区域蒸散的重要影响因子,其影响是由对蒸腾和蒸发的影响共同决定的。RCP 6.0 情景下降水对产水量增加贡献更大,干旱区受降水和蒸散的共同影响。在 RCP 8.5 情景下,干旱半干旱区和半湿润区产水量蒸散影响显著。持续升温加剧蒸散耗散,并进一步加剧干旱区的水资源匮乏,影响半湿润区的水资源。

参考文献:

- [1] IPCC. Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change[R].Cambridge and New York: Cambridge University Press,2021.
- [2] 姜大膀,王晓欣.对 IPCC 第六次评估报告中有关干旱变化的解读[J].大气科学学报,2021,44(5):650-653.
- [3] Liang W, Bai D, Wang F Y, et al. Quantifying the impacts of climate change and ecological restoration on streamflow changes based on a Budyko hydrological model in China's Loess Plateau[J].Water Resources Research,2015,51(8):6500-6519.
- [4] Huntington T G. Evidence for intensification of the global water cycle: Review and synthesis[J]. Journal of Hydrology,2006,319(1):83-95.
- [5] Qu Y, Zhuang Q L. Evapotranspiration in North America: Implications for water resources in a changing climate[J].Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change,2020,25(1):205-220.
- [6] 高继卿,杨晓光,董朝阳,等.气候变化背景下中国北方干湿区降水资源变化特征分析[J].农业工程学报,2015,31(12):99-110.
- [7] 尹默雪,赵先贵.基于水足迹理论的内蒙古 1990—2016 年水资源评价[J].干旱区资源与环境,2018,32(6):120-125.
- [8] 牛忠恩,胡克梅,何洪林,等.2000—2015 年中国陆地生态系统蒸散时空变化及其影响因素[J].生态学报,2019,39(13):4697-4709.
- [9] 马梓策,于红博,张巧凤,等.内蒙古地区 1960—2016 年气温和降水特征及突变[J].水土保持研究,2019,26(3):114-121.
- [10] 安莉娟.1971—2010 年内蒙古干湿变化特征及对水资源影响[J].冰川冻土,2016,38(3):732-740.

- [11] 王国庆,乔翠平,刘铭璐,等.气候变化下黄河流域未来水资源趋势分析[J].水利水运工程学报,2020,180(2):1-8.
- [12] 张奇谋,陈思,陈松生,等.不同RCP情景下未来汉江流域气象干旱变化趋势预估研究[J].长江流域资源与环境,2019,28(6):1470-1480.
- [13] 查芊郁,高超,杨茹,等.全球升温1.5℃和2.0℃情景下淮河上游干流径流量研究[J].气候变化研究进展,2018,14(6):583-592.
- [14] 张超,宋海清,吴国周,等.NCAR/CLM系列陆面模式对内蒙古地表温度的模拟评估[J].中国生态农业学报,2017,25(2):299-308.
- [15] 朱昱作.西北农牧交错带地表水热过程的观测和CLM模拟研究[D].兰州:兰州大学,2019.
- [16] 徐新良,刘纪远,张树文,等.中国多时期土地利用土地覆被遥感监测数据集(CNLUCC)[DS].中国科学院资源环境科学数据中心数据注册与出版系统(<http://www.resdc.cn/DOD>),2018.
- [17] Frieler K, Lange S, Piontek F, et al. Assessing the impacts of 1.5℃ global warming-simulation protocol of the Inter-Sectoral Impact Model Intercomparison Project (ISIM2B)[J]. Geoscientific Model Development, 2017, 10(12):4321-4345.
- [18] Vuuren D, Edmonds J, Kainuma M, et al. The representative concentration pathways: An overview[J]. Climatic Change, 2011, 109(1):5-31.
- [19] Ma X F, Zhao C Y, Tao H, et al. Projections of actual evapotranspiration under the 1.5℃ and 2.0℃ global warming scenarios in sandy areas in Northern China[J]. Science of the Total Environment, 2018, 645:1496-1508.
- [20] Liu Y, Liu R G, Chen J M. Retrospective retrieval of long-term consistent global leaf area index (1981—2011) from combined AVHRR and MODIS Data[J/OL]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2012, 117(G4). <https://doi.org/10.1029/2012JG002084>.
- [21] Tian D S, Niu S L, Pan Q M, et al. Nonlinear responses of ecosystem carbon fluxes and water-use efficiency to nitrogen addition in Inner Mongolia grassland[J]. Functional Ecology, 2016, 30(3):490-499.
- [22] 郑涵,于贵瑞,朱先进,等.2000—2010年中国典型陆地生态系统实际蒸散量和水分利用效率数据集[DB].中国科学数据(中英文网络版),2019,4(1):59-72.
- [23] Niu Z E, He H L, Zhu G F, et al. A spatial-temporal continuous dataset of the transpiration to evapotranspiration ratio in China from 1981—2015[J]. Scientific Data, 2020, 7(1):e369.
- [24] 任小丽,路倩倩,何洪林,等.中国东部南北样带森林生态系统蒸腾与蒸散比值(T/ET)时空变化[J].地理学报,2019,74(1):63-75.
- [25] Hare F K. Long-term annual surface heat and water balances over Canada and the United States South of 60°N: Reconciliation of precipitation, run-off and temperature fields[J]. Atmosphere Ocean, 1980, 18(2):127-153.
- [26] Bai P, Liu X M, Zhang Y Q, et al. Assessing the impacts of vegetation greenness change on evapotranspiration and water yield in China[J]. Water Resources Research, 2020, 56(10):e2019WR027019.
- [27] Liu Y B, Xiao J F, Ju W M, et al. Recent trends in vegetation greenness in China significantly altered annual evapotranspiration and water yield[J]. Environmental Research Letters, 2016, 11(9):e94010.
- [28] Chen H P, Sun J Q, Chen X L. Future changes of drought and flood events in China under a global warming scenario[J]. Atmospheric and Oceanic Science Letters, 2013, 6(1):8-13.
- [29] 马丹阳,尹云鹤,吴绍洪,等.中国干湿格局对未来高排放情景下气候变化响应的敏感性[J].地理学报,2019,74(5):857-874.
- [30] Li S J, Wang G J, Sun S L, et al. Long-term changes in evapotranspiration over China and attribution to climatic drivers during 1980—2010[J]. Journal of Hydrology, 2021, 595(1/4):e126037.
- [31] 苏布达,周建,王艳君,等.全球升温1.5℃和2.0℃情景下中国实际蒸散发时空变化特征[J].中国农业气象,2018,39(5):293-303.
- [32] Lu J, Wang G J, Li S J, et al. Projected land evaporation and its response to vegetation greening over China under multiple scenarios in the Cmp6 Models[J]. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 2021, 126(9):e2021JG006327.
- [33] Massmann A, Lin C J, Gentile P. When does vapor pressure deficit drive or reduce evapotranspiration[J]. Journal of Advances in Modeling Earth Systems, 2019, 11:3305-3320.
- [34] Liu Y L, Kumar M, Katul G G, et al. Plant hydraulics accentuates the effect of atmospheric moisture stress on transpiration[J]. Nature Climate Change, 2020, 10:691-695.