

DOI:10.3880/j.issn.1004-6933.2023.04.002

西北地区陆地生态系统未来生态需水量预估

粟晓玲^{1,2}, 刘雨翰¹, 姜田亮¹, 吴海江¹, 刘 轩¹, 梁晓萱¹

(1. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西 杨凌 712100;

2. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西 杨凌 712100)

摘要:采用偏差校正空间分解(BCSD)法对CMIP6的5个GCMs数据进行降尺度处理,基于考虑CO₂浓度影响的Penman-Monteith公式与有效降水计算方法,结合单作物系数法与saxton方程,预估了中等强迫(SSP2-4.5)和高强迫(SSP5-8.5)气候情景下西北地区生态需水量与生态缺水量的变化。结果表明:西北地区未来生态需水量在SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下分别以3.83亿、6.95亿m³/a的趋势上升;21世纪末期(2070—2100年)SSP2-4.5和SSP5-8.5情景下年生态需水量均值分别为5679亿、5881亿m³,年有效降水量均值分别为3985亿、4106亿m³,年生态缺水量均值分别为1732亿、1798亿m³;西北地区整体上处于水分亏缺状态,缺水格点占比为60.2%,主要分布在新疆北部和西部、青海中部以及陕西、甘肃、宁夏的绝大部分区域。

关键词:气候变化;生态需水量;生态缺水量;有效降水量;CMIP6;西北地区

中图分类号:P426.616 **文献标志码:**A **文章编号:**1004-6933(2023)04-0009-10

Prediction of future ecological water demand of terrestrial ecosystem in Northwest China // SU Xiaoling^{1,2}, LIU Yuhang¹, JIANG Tianliang¹, WU Haijiang¹, LIU Xuan¹, LIANG Xiaoxuan¹ (1. College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Yangling 712100, China; 2. Key Laboratory for Agricultural Soil and Water Engineering in Arid Area of Ministry of Education, Northwest A&F University, Yangling 712100, China)

Abstract: Using Northwest China as the research area, the bias correction and spatial disaggregation (BCSD) method was used to downscale the five GCMs data of CMIP6. Based on the Penman Monteith formula considering the impact of CO₂ concentration and the effective precipitation calculation method, combined with the single crop coefficient method and the saxton equation, the changes in ecological water demand and ecological water deficit in Northwest China were estimated under moderate forcing (SSP2-4.5) and high forcing (SSP5-8.5) climate scenarios. The results show that the future ecological water demand in Northwest China is increasing at 3.83×10^8 m³/a and 6.95×10^8 m³/a under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, respectively. In the late 21st century (from 2070 to 2100), under the SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios, the average annual ecological water demand will be 5.679×10^{11} m³ and 5.881×10^{11} m³, respectively, the average annual effective precipitation will be 3.985×10^{11} m³ and 4.106×10^{11} m³, respectively, and the average annual ecological water shortage will be 1.732×10^{11} m³ and 1.798×10^{11} m³, respectively. Northwest China is in a state of water shortage as a whole, with 60.2% of the grid points lacking water, which is mainly distributed in the north and west of Xinjiang, the middle of Qinghai, and most regions of Shaanxi, Gansu, and Ningxia.

Key words: climate change; ecological water demand; ecological water shortage; effective precipitation; CMIP6; Northwest China

在陆地生态系统中,植被是表征生态安全的核心生态因子以及生态演化的承载体,同时也是生态修复以及生态稳定性的主要调控者。植被生态需水量是指维持生态系统发挥正常生态功能所需要的最小水资源量,广义上指生态系统维持水沙、水热、水

盐、生物平衡等需要的最低消耗水量,狭义上指维持植被基本生长并发挥防护功能的耗水量^[1-3]。植被生态需水量是否得到保障直接影响着陆地生态系统的动态平衡和生态功能,研究未来植被生态需水量的变化趋势对区域水资源规划及生态建设与管理具有重

基金项目:国家自然科学基金项目(52079111,51879222)

作者简介:粟晓玲(1968—),女,教授,博士,主要从事水文模拟研究。E-mail: xiaolingsu@nwafu.edu.cn

要意义。

植被生态需水量的研究方法主要包括面积定额法、潜水蒸发法、遥感技术法、水量平衡法、生物量法和 Peman-Monteith (PM) 公式法。其中,由于 PM 公式法理论基础扎实,充分考虑植物生理以及土壤水分等因素,得到了广泛的应用^[4-6]。例如:Pistocchi 等^[7]利用 PM 公式研究了地中海气候条件下杨树、柳树正常生长的需水量,为制定适宜的种植密度提供了理论依据;宋孝玉等^[8]基于 PM 公式定量评价了不同类型草地的生态需水量及缺水程度。联合国政府间气候变化专门委员会 (IPCC) 第六次评估报告的决策者摘要指出,2030—2052 年,全球变暖速度可能达到每 10 a 1.5 °C^[9]。随着全球气温升高,饱和水汽压差增大、水汽含量的增高,从而引起降水和蒸散发的时空变化,加速植被类型的相互转化,导致生态需水量发生变化,进而影响水资源规划方案的制定^[9-10]。

气候模式(global climate models, GCMs)是建立在物理、化学、生物学等基础上,以微分方程表现地球气候系统各个圈层相互作用和反馈过程的地球模拟系统,是量化评估未来气候变化影响的有力工具^[11-12]。第六次国际耦合模式比较项目 (CMIP6) 作为最新的气候研究项目,其 GCMs 数据以及其他子模式试验被广泛应用于诸多领域^[12-14]。近年来已有学者对气候模式数据进行了可信度评价,例如:Energy^[15]基于 10 个 GCMs 以及多模式集合评估了印度海岸线的年平均风速变化,表明多模式集合能够很好地再现风势与风速极值,与 CFSR 再分析数据匹配较好;Zhu 等^[16]基于 CMIP5 与 CMIP6 两种模式对中国区气候极端指数进行了分析,表明 CMIP6 模式能够较好地再现年平均气温、最高最低气温的时空分布格局;王予等^[17]对 CMIP6 在中国区域的极端降水模拟能力进行了评估,表明 CMIP6 较 CMIP5 在旱区平均气候态和气候变率有明显提高,在湿润区能够再现极端降水的空间分布。

中国西北地区位于干旱半干旱区,降水稀少,对人类活动和气候变化的响应十分敏感,土地荒漠化、植被缺水退化、湖泊面积缩小、河道断流现象时有发生,生态环境十分脆弱^[18-20]。本文利用 CMIP6 的 5 个 GCMs 数据,采用偏差校正空间分解 (bias correction and spatial disaggregation, BCSD) 法进行降尺度处理,依据全球土地利用协调数据集 (LUH2) 的土地利用数据,基于考虑 CO₂ 浓度影响的 PM 公式,结合 saxton 方程、单作物系数法以及有效降水量,估算西北地区历史情景 (1981—2014 年)、未来 SSP2-4.5 情景 (2015—2100 年) 与 SSP5-8.5 情景

(2015—2100 年) 下的生态需水量及其变化,以期管理者在气候变化背景下制定区域生态建设和水资源规划提供理论依据。

1 研究区概况与数据处理

1.1 研究区概况

西北地区地处亚欧大陆腹地 (73°15'E ~ 112°58'E, 34°00'N ~ 49°10'N), 包括新疆、宁夏、甘肃、陕西、青海 5 个省级行政区 (图 1), 总面积约 320 万 km²。西北地区降水稀少且分布不均, 呈现由东南向西北递减的趋势, 大部分地区年降水量不足 200 mm, 青海南部可达 400 mm; 蒸发强烈, 水资源严重短缺, 是世界上最干旱的地区之一^[21]。

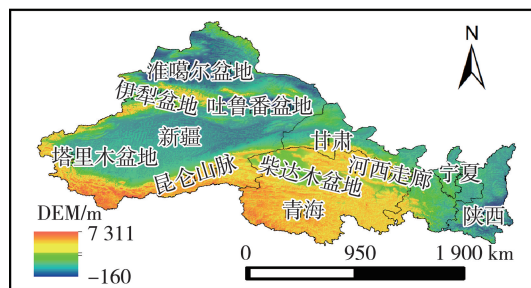


图 1 西北地区概况

Fig. 1 Overview of Northwest China

1.2 数据来源

1.2.1 土地利用数据

利用马里兰大学全球生态实验室为驱动 GCMs 而开发的 LUH2 全球土地利用协调数据集 (<https://luh.umd.edu/index.shtml>), 提取研究区 1981—2014 年和 2015—2100 年的土地利用数据。该数据集基于全球环境数据库 (HYDE) 的历史数据将历史人口估计与人均土地利用轨迹相结合, 生成状态、过渡、管理模式 3 组资料, 通过综合评估模型生成未来不同的共享社会经济路径^[22]的土地利用资料。其中状态资料包括原生林、原生非森林、次生林、次生非森林、城市、牧场、管理牧场、C3 一年生作物、C3 多年生作物、C3 固氮作物、C4 一年生作物和 C4 多年生作物 12 类土地利用类型以及地上生物量、次生年龄等相关资料; 过渡资料包括 12 类土地利用类型的转移过程; 管理模式资料包括灌溉率、淹没率、施肥效果、生物燃料占比等资料, 空间分辨率均为 0.25° × 0.25°, 采用地球系统模型 (earth system model, ESM) 所需格式 (即每种类型所占网格面积比, 称为 FTP 比例), 将土地利用历史重建与未来预估连接起来, 详细资料见文献^[23]。根据白玉锋^[24]对地上乔灌木生物量的研究, 以灌木的地上生物量为阈值, 结合该数据集地上生物量资料将原生非森林与次生非森

林分类为灌木与戈壁,最终合并为草地、C3 作物、C4 作物、林地、灌木和戈壁 6 种土地利用类型。

1.2.2 空间属性数据

空间属性数据包括气象、植被、土壤数据。气象数据包括 GLDA 逐月土壤含水量(0~10 cm,1980—2020 年)、ERA5 再分析数据集(10 m 风速、净辐射,1979—2020 年)和中国气象局提供的 CN05.1 数据集(逐日降水、逐月气温、相对湿度,1961—2017 年),空间分辨率均为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$;植被数据包括 GLOBMAP 全球叶面积指数产品(分辨率为 $8 \text{ km} \times 8 \text{ km}$,1982—2017 年)和来自 GIMMS NDVI3g (<https://nex.nasa.gov/nex/projects/1349/>) 的全球归一化植被指数产品(分辨率为 $1/12^\circ \times 1/12^\circ$,1982—2017 年);土壤数据为来自资源环境科学与数据中心 (<https://www.resdc.cn/Default.aspx>) 的 1:100 万的中国土壤质地颗粒百分比分布图;数字高程 DEM 产品(分辨率为 90 m)来自地理空间数据云 (<https://www.gscloud.cn/#page1/1>)。为了空间分辨率保持一致,借助 R 语言将所有历史数据双线性插值为 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 空间分辨率。

1.2.3 CMIP6 GCMs 模式数据

鉴于 CMIP6 中的 ACCESS-ESM1-5、BCC-CSM2-MR、FIO-ESM-2-0、GFDL-ESM4、MPI-ESM1-2-LR 模式均可提供历史情景、SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下的逐日降水、逐月气温、相对湿度、净辐射、0~10 cm 土柱上层水分、叶面积指数、10 m 风速等数据,因此本文主要考虑这 5 个 GCMs 模式数据 (<https://esgf-node.llnl.gov/projects/cmip6/>)。选用的气候情景分别代表了中等辐射强迫下遵循中度发展(SSP2-4.5)与高辐射强迫下常规发展(SSP5-8.5),具有很好的代表性。两种气候情景下的 CO_2 浓度数据来自美国国家海洋和大气管理局 NOAA (<http://greenhousegases.science.unimelb.edu.au/#!/view>)。

1.3 数据预处理

为解决 GCMs 数据在区域尺度模拟误差较大的问题,采用能够较好重现气象要素变化特征的 BCSD 法^[25]分别对降水、温度、相对湿度、辐射、风速、0~10 cm 土柱上层水分等气候模式数据进行偏差校正,降尺度到 $0.25^\circ \times 0.25^\circ$ 分辨率,并采用多模式集合平均来降低不确定性^[26]。BCSD 法包括偏差校正和空间分解两部分,偏差校正采用的是较为常用的分位数映射法,空间分解采用的是双线性插值法。BCSD 法假定观测数据与 GCMs 数据的累积概率分布一致,通过分位数映射修正 GCMs 数据。将修正后的 GCMs 与升尺度后的观测资料均值的差(商)值作为修正因子,并对修正因子进行双线性插

值得到高分辨率的修正因子,最后基于高分辨率观测资料均值还原到各个时间序列。

2 研究方法

2.1 生态需水量计算

在给定气候条件下,若研究区为耕作与水管理条件良好、无病虫害的标准条件时,生态需水量为植被系数与参考作物蒸散发量的乘积;在干旱半干旱区,降水稀少,土壤含水量不能达到标准条件下的正常阈值,植被发生水分胁迫,生态需水量的计算通过土壤水分限制系数表征其影响^[27]:

$$W_p = K_c K_s ET_0 \quad (1)$$

式中: W_p 为生态需水量; K_c 、 K_s 分别为植被系数和土壤水分限制系数; ET_0 为参考作物蒸散发量。

考虑到未来 CO_2 浓度增加,将导致植被部分气孔关闭,使地表阻力(r_s)增大,影响蒸散发计算结果。而计算 ET_0 的 PM 公式假设 r_s 为常数 70 m/s,因此采用考虑 CO_2 浓度影响的 PM 公式^[28] 计算 ET_0 :

$$ET_0 = \frac{0.408\Delta(R_n - G) + \gamma \frac{900}{T + 273} u_2 (E_s - E_a)}{\Delta + \gamma \{1 + u_2 [0.34 + 2.4 \times 10^{-4} (C_{\text{CO}_2} - 300)]\}} \quad (2)$$

式中: Δ 为饱和水汽压与温度关系曲线的斜率; R_n 为表面净辐射量; G 为土壤热通量; γ 为湿度计常数; u_2 为近地面 2 m 处的风速; E_s 为空气饱和水汽压; E_a 为空气实际水汽压; C_{CO_2} 为大气中二氧化碳浓度。

K_c 的计算采用联合国粮农组织 (FAO) 推荐的单作物系数法,将植被生育期划分为生长初期、快速生长期、生长中期、生长末期 4 个阶段,并以作物生长曲线表示 K_c 的变化。 K_c 的大小与植被类型密切相关,FAO56 作物需水量指南手册^[29] (以下简称“指南手册”)指出同一类作物中不同作物的 K_c 十分相近,考虑到大尺度计算的可行性,本研究依据土地利用类型选择典型作物,以指南手册中不同农作物不同生长阶段 K_c 的典型值为基础,并通过气象要素和覆盖度对其进行修正。其中,生长初期 K_c 值(K_{ci})由区域的蒸发能力、湿润频率以及渗透深度决定,通过查指南手册得到;生长中期 K_c 值(K_{cm})和生长末期 K_c 值(K_{ce})由相对湿度、风速以及地表覆盖度共同修正^[29];其他时期的 K_c 值通过作物生长曲线求得。

K_s 用来表征植被的土壤水分利用能力,由土壤含水量与土壤质地类型决定。考虑到西北地区空间范围广、面积大的情况,采用统一的土壤参数(田间持水量、凋萎含水量)计算 K_s 偏差较大。因此本文基于 saxton 方程^[30] 结合土壤质地颗粒百分

比分布图,求出土水势分别为 10 kPa(田间持水量)、1500 kPa(凋萎含水量)对应的土壤含水量^[31],并以此时的土壤含水量作为土壤参数。 K_s 计算公式为

$$K_s = \begin{cases} 1 & \theta > \theta_c \\ \frac{\theta - \theta_z}{\theta_c - \theta_z} & \theta_z \leq \theta \leq \theta_c \\ 0 & \theta < \theta_z \end{cases} \quad (3)$$

式中 θ 、 θ_z 、 θ_c 分别为土壤含水率、凋萎含水量、临界土壤含水率。 θ_c 通常为田间持水量的 70% ~ 80%,本研究取 75%。

2.2 生态缺水计算

FAO56 将有效降水量定义为能够被植被直接获取的降水量,即降水渗入总量扣除补给地下水与重力下渗后余留的水量。生态需水量与有效降水量的差值即为生态缺水量。采用美国农业部土壤保持局的方法^[32]来计算生态缺水量:

$$P_e = \begin{cases} \frac{P(4.17 - 0.2P)}{4.17} & P \leq 8.3 \text{ mm} \\ 4.17 + 0.1P & P > 8.3 \text{ mm} \end{cases} \quad (4)$$

$$D_p = W_p - P_e \quad (5)$$

式中: P 为日降水量; P_e 为有效降水量; D_p 为生态缺水量。

3 结果与分析

3.1 降尺度数据模拟精度

在每一个空间点上,GCMs 模拟数据与实测数据都存在一组误差。表 1 为多模式集合平均下各要素模拟误差,将 25% 分位数和 75% 分位数视为误差范围,将修正前后误差绝对值比值视为相对变化。降水量、平均气温、最高气温、最低气温、风速、相对湿度、辐射、土壤水相对变化分别为 3.52、2.17、1.97、2.64、3.46、2.65、3.26、3.07 倍;在多模式集合平均情况下,研究区内 5 014 组格点在 1981—2014 年月尺度下,各要素 BCSD 法修正前后的误差频率分布直方图见图 2。整体上,BCSD 法对各要素均有较好的修正效果,能够将误差对称地控制在 0 左右,其中对降水量修正效果最佳,修正后降水量整体误差缩小了 3.52 倍,误差范围控制在 -2.63 ~ 3.62 mm 之间。GCMs 对温度、风速、辐射模拟较好,经过修正后整体误差缩小了 1.97 ~ 3.46 倍;对降水量、相对湿度、土壤水的模拟较差,必须经过误差修正才能保证数据质量,修正后整体误差缩小 3 倍多,有效缩减误差范围。综上所述,BCSD 法能够有效提升 GCMs 的数据精度,能够在保留 GCMs 特点的同时满足精度要求。

表 1 多模式集合平均下各要素模拟误差

Table 1 Simulation error of each element under multi-model ensemble mean

要素	单位	修正前		修正后	
		误差范围	误差绝对值均值	误差范围	误差绝对值均值
降水量	mm	2.96 ~ 27.05	14.62	-2.63 ~ 3.62	4.71
平均气温	℃	-1.97 ~ 1.68	2.35	-0.93 ~ 0.71	1.08
最低气温	℃	-1.33 ~ 2.26	2.29	-0.96 ~ 0.61	1.06
最高气温	℃	-4.49 ~ -0.06	3.38	-1.08 ~ 0.93	1.28
风速	m/s	0.12 ~ 1.36	0.97	-0.22 ~ 0.27	0.28
相对湿度	%	-11.9 ~ 12.6	14.27	-4.26 ~ 4.55	5.39
辐射	MJ/m ²	-0.34 ~ 0.31	1.73	-1.14 ~ 1.21	0.53
土壤水	mm	-1.53 ~ 8.72	6.11	-1.36 ~ 1.49	1.99

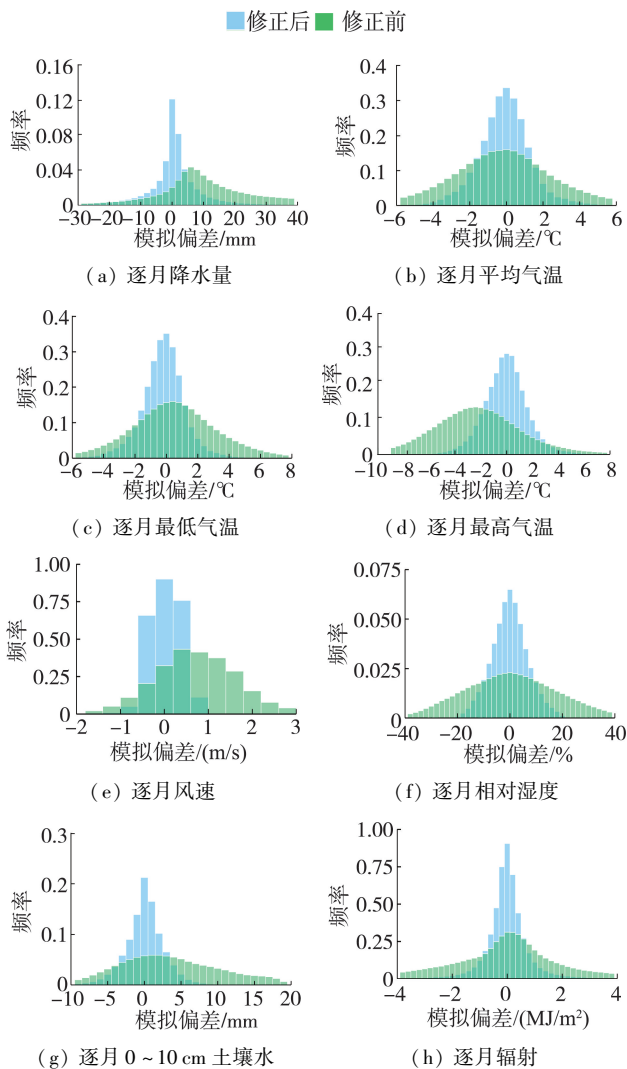


图 2 各要素 BCSD 修正前后的误差频率分布直方图

Fig. 2 Histogram of error frequency distribution before and after BCSD correction for each element

3.2 ET_0 时空变化特征

计算西北地区历史情景、SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景,考虑 CO_2 浓度影响的多模式集合平均下,年均 ET_0 的空间分布和对应情景下 ET_0 的年际及年内变化,结果见图 3 和图 4(*、**、*** 分别表示通过 95%、99%、99.9% 的置信水平,下同)。可

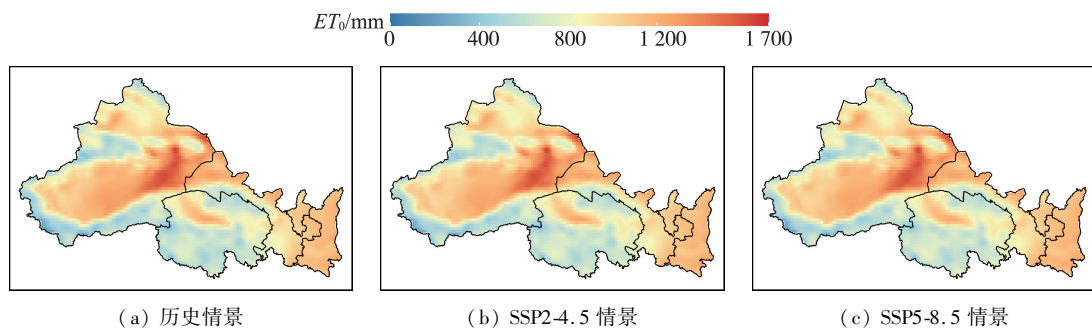


图 3 3 种情景下 ET_0 的时空分布

Fig. 3 Temporal and spatial distribution of ET_0 under three scenarios

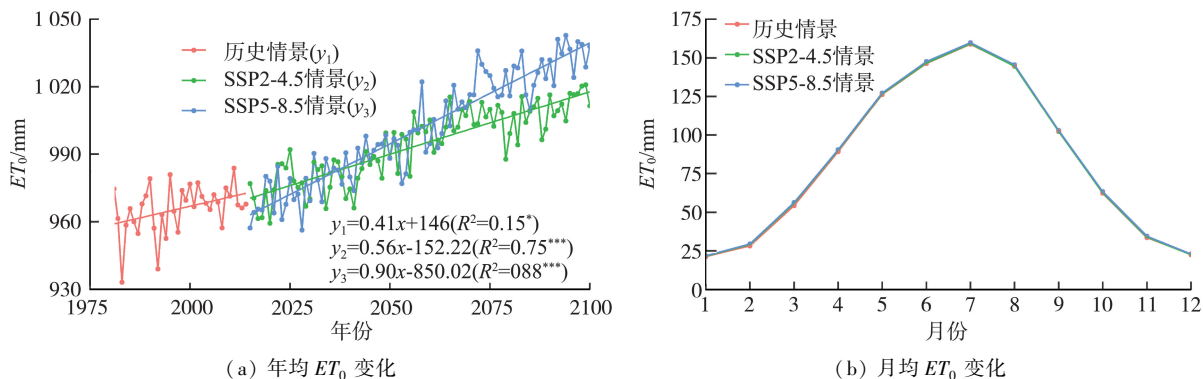


图 4 3 种情景下 ET_0 的年际变化及年内变化

Fig. 4 Interannual and annual changes of ET_0 under three scenarios

见,3 种情景下 ET_0 呈现出基本相同的空间分布特征,历史情景、SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下多年平均 ET_0 分别为 975、1 008、1 017 mm/a。其中以新疆地区的 ET_0 最高(主要集中在新疆东部),可达 1 680 mm/a; 低值主要集中在伊犁盆地、昆仑山脉以及青海南部等地区,最低为 384 mm/a。从空间来看, ET_0 整体上呈现区域差异明显、中间大周边小的分布格局。年际变化上,两种未来情景下 ET_0 均呈现极显著上升趋势,历史情景呈现显著上升趋势,历史情景、SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下 ET_0 每 10a 分别平均上升 4.1、5.6、9.0 mm。年内 ET_0 的分布主要集中于 3—10 月,7 月份达到最大。就排放情景而言,月均 ET_0 由大到小的顺序为:SSP5-8.5 情景、SSP2-4.5 情景、历史情景。

3.3 植被系数时空变化特征

图 5 为 SSP2-4.5 情景下植被系数均值的空间分布,SSP5-8.5 情景类似,不再赘述。图 6 为 SSP2-4.5 情景和 SSP5-8.5 情景下植被系数均值的年际变化。可以看出,植被系数呈现出明显的地域特征,高值区主要集中在陕西、甘肃南部、青海南部和伊犁盆地,这些地区多为林地、耕地、灌木以及草本植物,高温、高风速、高地表覆盖是造成这些区域植被系数较大的主要因素^[29]。 K_{ci} 、 K_{cm} 在未来两种情景下均呈现上升趋势,其中 K_{ci} 在 SSP2-4.5 情景增长速度较快(0.00017 a^{-1}), K_{cm} 在 SSP5-8.5 情景增长速度较快(0.00023 a^{-1})。高辐射强迫产生更高的碳通量,引起未来 CO_2 浓度的持续增大,温室效应持续增强,造成气温进一步升高,在高温和归一化植被

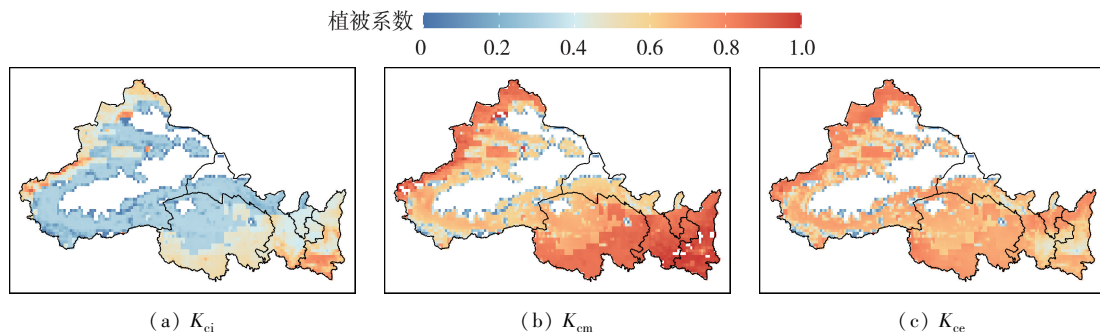


图 5 SSP2-4.5 情景下植被系数均值空间分布

Fig. 5 Spatial distribution of mean vegetation coefficient under SSP2-4.5 scenario

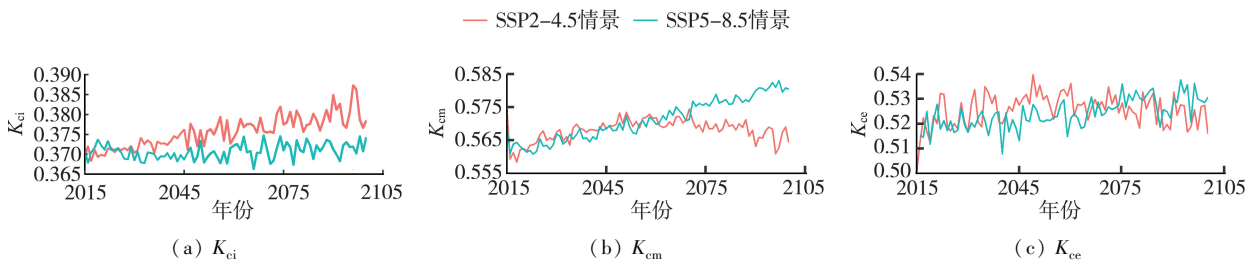


图6 SSP2-4.5情景与SSP5-8.5情景下植被系数均值年际变化

Fig. 6 Interannual variation of mean vegetation coefficient under SSP2-4.5 and SSP5-8.5 scenarios

被指数、全球叶面积指数迅速增大的协同影响下 K_{cm} 继续增大,至21世纪中后期,SSP5-8.5情景相较于SSP2-4.5情景增温差异逐渐明显,使得两种情景下 K_{cm} 差异增大。而对于 K_{ee} ,在未来两种情景下,在地表覆盖度降低与气候变化引起温度升高的增量之间相互抵消从而呈现波动性变化。

3.4 土壤水分限制系数时空变化特征

基于saxton方程计算得到研究期(1981—2100年)的西北地区田间持水量、凋萎含水量、土壤含水率以及土壤水分限制系数均值,空间分布见图7。可见,研究期内西北地区田间持水量(体积含水率)为0.3~0.4,凋萎含水量为0.05~0.15。历史情景的土壤含水率均值为0.05~0.3,高值区(0.2~0.3)主要分布在新疆西北部、青海南部、陕西南部 and 甘肃南部,这些区域的土壤类型主要以壤土为主,黏粒、粉粒、砂粒含量适中,土壤有较好的持水能力以及较强的抗逆性;中值区(0.1~0.2)主要分布在新疆外围以及青海西部,多以砂粒占主要比例的壤砂土与砂壤土为主;低值区(0.05~0.1)则主要分布在塔克拉玛干沙漠的周围,以砂土为主。土壤参

数的确定与黏粒、粉粒、砂粒含量密切相关,含砂量越高的土壤,颗粒粒径越大,持水能力越差,土壤参数相对较低^[21]。土壤水分限制系数与土壤参数空间分布大致相同,范围为0.3~0.6,沙漠地带由于蒸散发强烈,范围为0.2~0.25;陕西南部同样蒸发强烈,较为丰富的降水以及土壤较强的持水能力,使得该部分区域土壤含水量和土壤水分限制系数能够维持在较高的水平。

3.5 不同土地利用类型生态需水量分析

图8为各情景下不同土地利用类型植被生长期的生态需水量,曲线和箱线图分别代表对应植被不同情景下的概率密度曲线和分位数特征。两种未来情景下,西北地区不同土地利用类型的生态需水量均呈现不同程度的增加,灌木的生态需水量最大,最高达到424 mm,其次是C4作物、C3作物、林地、草地。除灌木外,其他土地利用类型的生态需水量不同情景下由大到小顺序为:SSP5-8.5情景、SSP2-4.5情景、历史情景。一定程度上,高辐射强迫对生态需水量有促进作用,但不同土地利用类型下的生态需水量对不同辐射强迫的反应差异明显,表现为箱子分位数的不同。生态需水量受到 K_e 、 K_s 以及 ET_0 的

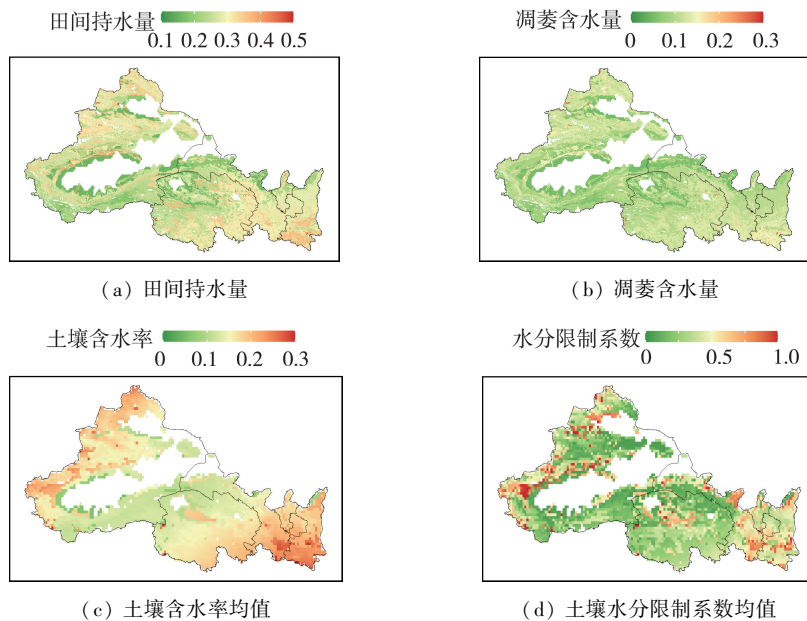


图7 土壤参数和土壤水分限制系数的空间分布

Fig. 7 Spatial distribution of soil parameters and K_s

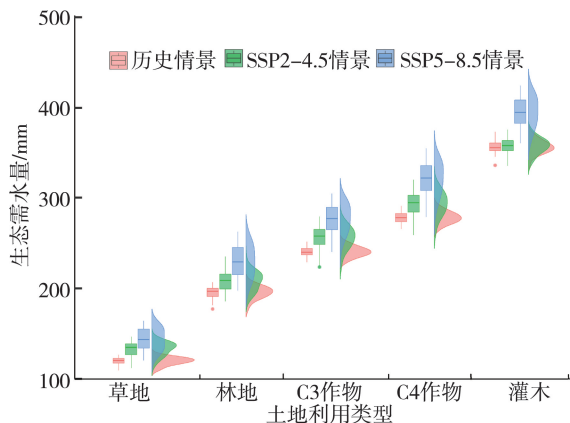


图 8 3 种情景下不同土地利用类型的植被生长期生态需水量

Fig. 8 Ecological water demand of different land

use types in plant growing period under three scenarios

影响,气候变化导致这些影响因素发生变化。至 21 世纪末, ET_0 的平均变化量为 50.4 mm, K_c 的平均变化量为 0.018, K_s 的平均变化量为 0.032。通过对整体标准化处理、消除量纲影响并逐格点多元回归分析 K_c 、 K_s 以及 ET_0 对生态需水量的相对贡献度,将参数回归系数与总回归系数的比值视为相对贡献。 K_c 、 K_s 以及 ET_0 在历史情景下对生态需水量的贡献度分别为 20.5%、37.1%、42.4%,SSP2-4.5 情景下分别为 19.9%、39.8%、40.3%,SSP5-8.5 情景下分别为 19.6%、40.0%、40.4%。可见, ET_0 和 K_s 是未来生态需水量发生变化的主要影响因素。不同地域的 ET_0 差异会影响不同土地利用类型的生态需水量,图 9 为西北地区不同土地利用类型的空间分布,图中颜色深浅代表相应植被占格点的比值大小。可见,林地多处于青海的南部和东北部以及新疆北部和昆仑山脉附近,这部分区域的 ET_0 较低;而灌木、

耕地多位于陕南、甘南以及塔里木盆地北部,这部分区域的 ET_0 较高,这种区域间 ET_0 的差异是导致西北地区林地的生态需水量小于灌木和农作物的主要原因。

3.6 生态需水量时空变化特征

图 10 为 SSP2-4.5 情景下年均生态需水量、有效降水量和生态缺水量的空间分布,加点的区域是研究期内 Sen's 斜率通过 5% 显著性水平的区域,黑点和红点分别表示显著上升和显著下降,图 10(c) 中的正值代表缺水,负值代表不缺水。其中,陕南与甘南的年均生态需水量最大,昆仑山脉以南最小,年均生态需水量分布在 10.7 ~ 795.6 mm 的范围,均值为 223.3 mm,每 10 a 变化范围为 -17.8 ~ 16.3 mm,显著上升格点占比 43.8%,显著下降格点占比 9.6%,多分布于新疆西南部与青海中部地区。年均有效降水量分布在 3.8 ~ 472.8 mm 的范围,均值为 168.6 mm,每 10 a 变化范围为 -6.2 ~ 5.4 mm,显著上升格点占比 45.4%,多分布于青海、甘肃、陕西地区,显著下降格点占比 9.3%。年均生态缺水量与年均有效降水量呈现相似的空间格局,西北地区大部分区域处于缺水状态,缺水格点占比 60.2%,主要分布在新疆北部和西部、青海中部以及陕西、甘肃、宁夏 3 省的绝大部分区域,不缺水格点占比 39.8%,多分布在伊犁盆地、陕西南部、青海的南部和东部以及昆仑山脉南麓。年均生态缺水量分布在 -314.2 ~ 595.6 mm 的范围,均值为 58.6 mm,每 10 a 变化范围为 -15.8 ~ 16.2 mm,显著上升格点占比 29.7%,多位于新疆北部、甘肃中部和北部以及陕西北部,显著下降格点占比 15.2%,多位于新疆南部、青海中部。

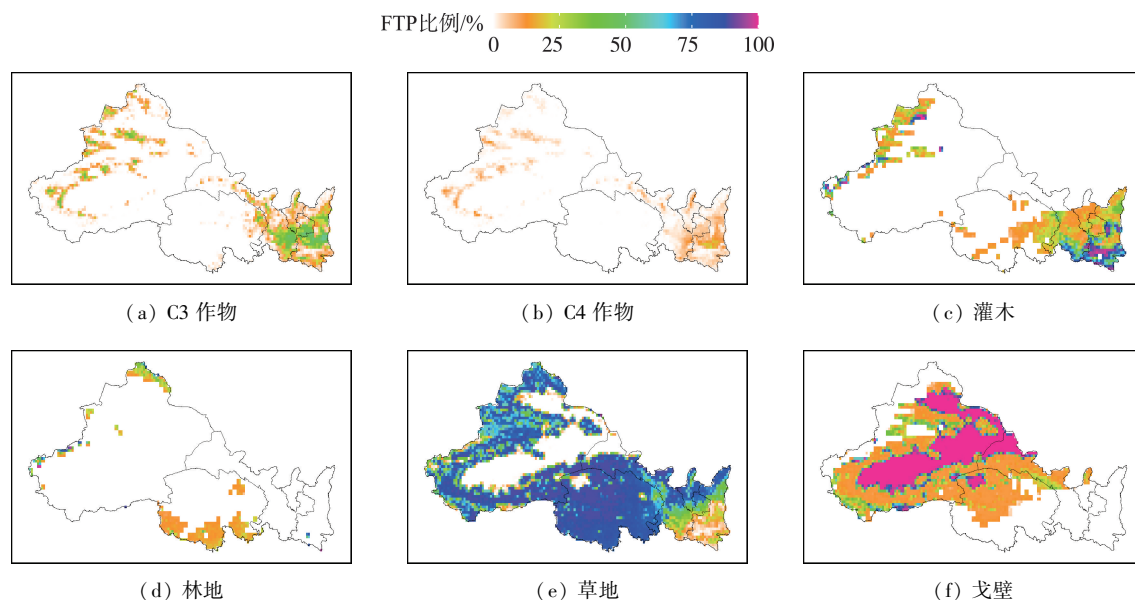


图 9 不同土地利用类型空间分布

Fig. 9 Spatial distribution of land use types

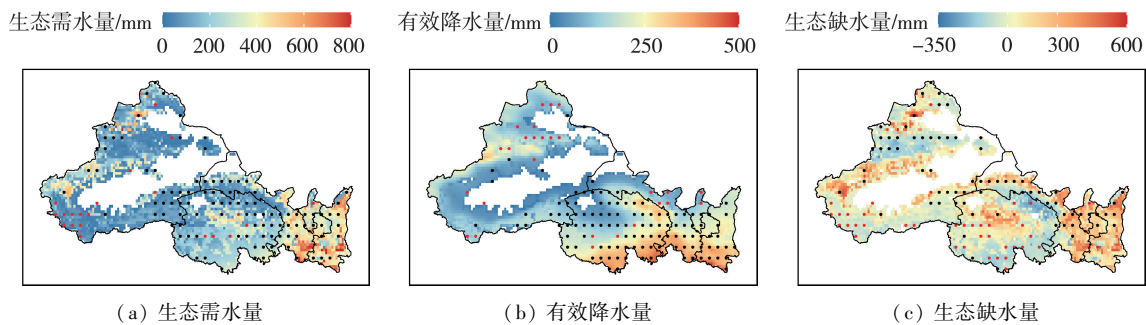


图 10 SSP2-4.5 情景下年均生态需水量、有效降水量、生态缺水量的空间分布

Fig. 10 Spatial distribution of annual ecological water demand, effective precipitation and ecological water shortage under SSP2-4.5 scenario

图 11 为西北地区历史情景、SSP2-4.5 情景以及 SSP5-8.5 情景下生态需水量、有效降水量、生态缺水量的未来变化趋势,其中实线代表不同变量各情景的多模式集合平均结果,阴影代表不确定性范围,方程为对应多模式集合平均的线性拟合结果。生态需水量在 3 种情景下均呈现显著的上升趋势,分别以 11.08 亿、3.83 亿、6.95 亿 m^3/a 的速率增长。历史情景下生态需水量的增加与国家推行植树造林政策有关,林草面积增加了 347.8 万 hm^2 ^[33],致使生态需水量增大。两种未来情景的生态需水量显著高于历史情景,且 2065 年之前两种未来情景生态需水量变化趋势几乎一致,2065 年后 SSP5-8.5 情景更高的辐射强迫引起生态需水量更快速增长。21 世纪末期(2070—2100 年),SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下的生态需水量均值分别达到 5 679 亿、5 881 亿 m^3 ,生态需水量增量(以历史情景为基准期)分别约为 623 亿、714 亿 m^3 。有效降水量保持持续增长,相较于生态需水量,波动性更加强烈,历史情景、SSP2-4.5 情景、SSP5-8.5 情景分别以 4.59 亿、2.16 亿、4.62 亿 m^3/a 的速率增长,整体上由大到小顺序为:SSP5-8.5 情景、SSP2-4.5 情景、历史情景。21 世纪末期(2070—2100 年)SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景有效降水量均值分别达到 3 985 亿、4 106 亿 m^3 ,有效降水量增量(以历史情景为基准期)分别为 135 亿、193 亿 m^3 。生态缺水量在历史情景、SSP2-4.5 情景、SSP5-8.5 情景下呈现不同程度的增长,增速分别为 6.29 亿、1.57 亿、2.46 亿 m^3/a 。在有效降水量与生态需水量的共同影响下,生态缺水量的不确定性累积,波动性增强,线性趋势线的 R^2 较低。21 世纪末期(2070—2100 年)生态缺水量在 SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下分别为 1 732 亿、1 798 亿 m^3 ,生态缺水量增量(以历史情景为基准期)分别为 392 亿、472 亿 m^3 。

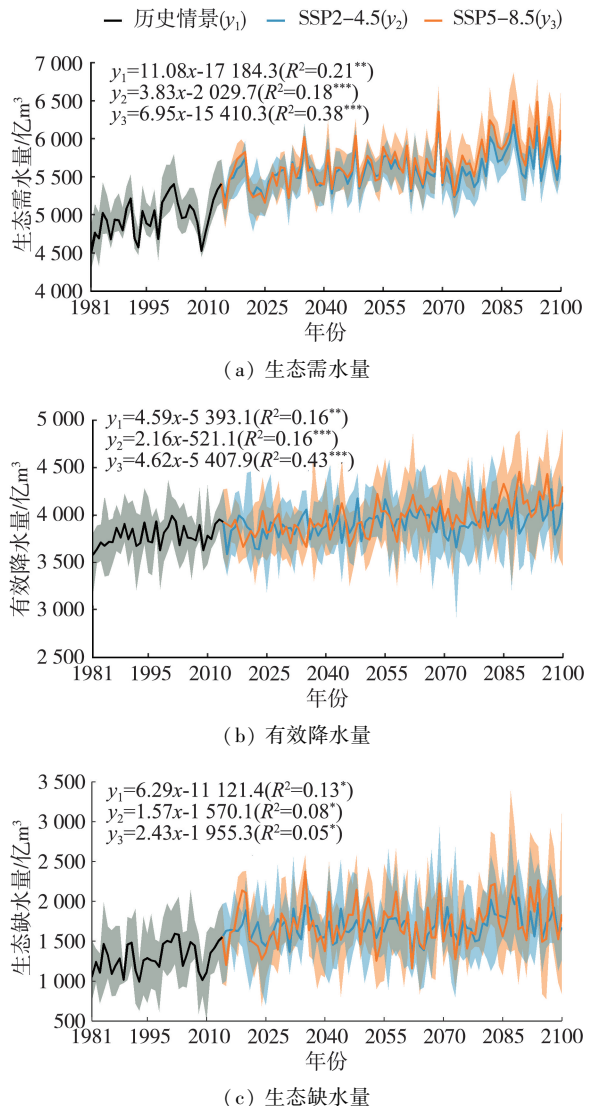


图 11 3 种情景下生态需水量、有效降水量、生态缺水量的预估
Fig. 11 Estimation of ecological water demand, effective precipitation and ecological water shortage under three scenarios

4 讨论

生态需水量方面,本文历史情景植被生长期的生态需水总量为 4 906.7 亿 m^3 ,姜田亮等^[27]对西北

地区天然植被的耗水量计算结果为 5 937 亿 m^3 。本研究结果偏小但相差不大, 主要原因为: 一方面本文计算的是植被生长期(4—10 月)的植被需水量, 并不是全年的生态需水量; 另一方面本文 K_c 的计算使用的是单作物系数法, 相对于植被蒸腾系数(0~1)有更大的范围(0~1.4)。生态缺水量方面, 本文丰水年、平水年、枯水年西北地区单位面积生态缺水量分别为 46.54、54.81、66.8 mm, 宋孝玉等^[8]研究得到鄂托克旗天然草地丰水年、平水年、枯水年单位面积生态缺水量范围为 0~47.15、0~53.19、31.49~85.74 mm。本文结果偏大, 主要原因为: 一方面缺水均值是包括草地、林地、灌木、C3 作物、C4 作物的均值, 并不是单一草地的缺水量, 而草地是西北地区植被的主要组成, 占比 52.7%, 是缺水量的主要贡献项; 另一方面宋孝玉等^[8]计算的是站点数据, 极值现象时有发生, 而本文使用的是栅格数据, 栅格平均抵消了极值, 导致结果小于部分极大值, 因此认为本文结果更可靠。

本文生态需水量预估是基于 GCMs 输出数据得到的, 未来的土地利用类型是适配相应情景所开发的, 虽然不确定性一直是气候模式输出难以避免的问题, 但 GCMs 模拟的气象要素仍是现在能够获得且应用广泛的未来数据, 是探索气候变化影响的主要依据。由于研究时间跨度大, 资料需求多, 本文采用了月尺度资料计算生态需水量, 存在一定偏差; 此外, 如何将 LUH2 土地利用资料转化为土地利用二级分类信息细化未来生态需水量研究, 有待进一步加强。

5 结 论

a. SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下, 西北地区 ET_0 呈现相同的空间分布格局, 整体表现为强烈的上升趋势, 线性增长速率分别为每 10 a 增加 5.6、9.0 mm。

b. 不同土地利用类型生态需水量在未来均呈现不同程度的增加, 所需生态需水量由大到小的顺序为: 灌木、C4 作物、C3 作物、林地、草地。 ET_0 的空间差异是造成这种结果的主要原因, 不同排放情景下生态需水量由大到小的顺序为: SSP5-8.5 情景、SSP2-4.5 情景、历史情景。

c. 西北地区在 1981—2100 年生态需水量处于稳定上升趋势, SSP2-4.5、SSP5-8.5 情景下增长速率分别为 3.83 亿、6.95 亿 m^3/a 。到 21 世纪末, 生态需水增量分别为 623 亿、714 亿 m^3 , 有效降水增量分别为 135 亿、193 亿 m^3 , 生态缺水量呈上升趋势, 主要分布在新疆北部和西部、青海中部以及陕西、甘肃、宁夏 3 省区的绝大部分区域。

参考文献:

- [1] 胡广录, 赵文智. 干旱半干旱区植被生态需水量计算方法评述[J]. 生态学报, 2008, 28(12): 6282-6291. (HU Guanglu, ZHAO Wenzhi. Reviews on calculating methods of vegetation ecological water requirement in arid and semiarid regions[J]. Acta Ecologica Sinica, 2008, 28(12): 6282-6291. (in Chinese))
- [2] 赵文智, 程国栋. 干旱区生态水文过程研究若干问题评述[J]. 科学通报, 2001(22): 1851-1857. (ZHAO Wenzhi, CHENG Guodong. Review on some problems in the study of ecohydrological processes in arid regions[J]. Science Bulletin, 2001(22): 1851-1857. (in Chinese))
- [3] 易雨君, 徐嘉欣, 宋劫, 等. 黄河河口区生态需水量及流量过程核算[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 133-140. (YI Yujun, XU Jiaxin, SONG Jie, et al. Ecological water demand and discharge process calculation in the Yellow River Estuary[J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 133-140. (in Chinese))
- [4] CHI D, WANG H, LI X, et al. Estimation of the ecological water requirement for natural vegetation in the Ergune River basin in Northeastern China from 2001 to 2014[J]. Ecological Indicators, 2018, 92: 141-150.
- [5] DENG X, XU H, YE M, et al. Impact of long-term zero-flow and ecological water conveyance on the radial increment of *Populus euphratica* in the lower reaches of the Tarim River, Xinjiang, China [J]. Regional Environmental Change, 2015, 15(1): 13-23.
- [6] 卞戈亚, 周明耀, 朱春龙. 生态需水量计算方法研究现状及展望[J]. 水资源保护, 2003(6): 46-49. (BIAN Geyu, ZHOU Mingyao, ZHU Chunlong. Research status and prospect of ecological water requirement calculation methods[J]. Water Resources Protection, 2003(6): 46-49. (in Chinese))
- [7] PISTOCCHI C, GUIDI W, PICCIONI E, et al. Water requirements of poplar and willow vegetation filters grown in lysimeter under Mediterranean conditions: results of the second rotation [J]. Desalination, 2009, 246(1/3): 137-146.
- [8] 宋孝玉, 刘雨, 覃琳, 等. 内蒙古鄂托克旗天然草地植被生态需水量研究[J]. 农业工程学报, 2021, 37(3): 107-115. (SONG Xiaoyu, LIU Yu, QIN Lin, et al. Ecological water requirement of natural grassland vegetation in the Otog Banner of Inner Mongolia[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(3): 107-115. (in Chinese))
- [9] IPCC. Global warming of 1.5 [EB/OL]. [2022-03-15]. <https://www.ipcc.ch/sr15/>.
- [10] 石朋, 詹慧婕, 瞿思敏, 等. 黄河源区气象干旱与水文干旱关联性分析[J]. 水资源保护, 2022, 38(3): 80-86. (SHI Peng, ZHAN Huijie, QU Simin, et al. Correlation

- analysis of meteorological and hydrological droughts in Yellow River source region [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(3): 80-86. (in Chinese))
- [11] GISSI E, MANEA E, MAZARIS A D, et al. A review of the combined effects of climate change and other local human stressors on the marine environment[J]. Science of the Total Environment, 2021, 755: 142564.
- [12] 王绍武, 罗勇, 赵宗慈, 等. 气候模式[J]. 气候变化研究进展, 2013, 9(2): 150-154. (WANG Shaowu, LUO Yong, ZHAO Zongci, et al. Climate models[J]. Climate Change Research, 2013, 9(2): 150-154. (in Chinese))
- [13] 邓鹏, 孙善磊, 黄鹏年. 气候变化对鄱阳湖流域径流的影响[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2020, 48(1): 39-45. (DENG Peng, SUN Shanlei, HUANG Pengnian. Influence of climate change on runoff in Poyang Lake Basin [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2020, 48(1): 39-45. (in Chinese))
- [14] YANG Y, RODERICK M L, ZHANG S, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(1): 44-48.
- [15] ENERGY W. Evaluation of wind extremes and wind potential under changing climate for Indian offshore using ensemble of 10 GCMs [J]. Ocean & Coastal Management, 2016, 121: 141-152.
- [16] ZHU H, JIANG Z, LI J, et al. Does CMIP6 inspire more confidence in simulating climate extremes over China? [J]. Advances in Atmospheric Sciences, 2020, 37(10): 1119-1132.
- [17] 王予, 李惠心, 王会军, 等. CMIP6 全球气候模式对中国极端降水模拟能力的评估及其与 CMIP5 的比较[J]. 气象学报, 2021, 79(3): 369-386. (WANG Yu, LI Huixin, WANG Huijun, et al. Evaluation of CMIP6 model simulations of extreme precipitation in China and comparison with CMIP5 [J]. Acta Meteorologica Sinica, 2021, 79(3): 369-386. (in Chinese))
- [18] HUANG J P, YU H P, DAI A G, et al. Drylands face potential threat under 2 °C global warming target [J]. Nature Climate Change, 2017, 7(6): 417-422.
- [19] 张菁, 张珂, 王晟, 等. 陕甘宁三河源区 1971—2017 年极端降水时空变化分析[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2021, 49(3): 288-294. (ZHANG Jing, ZHANG Ke, WANG Sheng, et al. Spatiotemporal variation analysis of extreme precipitation in the Three River Source Area of the Shaanxi Gansu Ningxia Contiguous Region from 1971 to 2017 [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2021, 49(3): 288-294. (in Chinese))
- [20] 栗晓玲, 褚江东, 张特, 等. 西北地区地下水干旱时空演变趋势及对气象干旱的动态响应[J]. 水资源保护, 2022, 38(1): 34-42. (SU Xiaoling, CHU Jiangdong, ZHANG Te, et al. Spatio-temporal evolution trend of groundwater drought and its dynamic response to meteorological drought in Northwest China [J]. Water Resources Protection, 2022, 38(1): 34-42. (in Chinese))
- [21] 郭泽呈, 魏伟, 石培基, 等. 中国西北干旱区土地沙漠化敏感性时空格局[J]. 地理学报, 2020, 75(9): 1948-1965. (GUO Zecheng, WEI Wei, SHI Peiji, et al. Spatiotemporal changes of land desertification sensitivity in the arid region of Northwest China [J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(9): 1948-1965. (in Chinese))
- [22] 张丽霞, 陈晓龙, 辛晓歌. CMIP6 情景模式比较计划 (ScenarioMIP) 概况与评述[J]. 气候变化研究进展, 2019, 15(5): 519-525. (ZHANG Lixia, CHEN Xiaolong, XIN Xiaoge. Short commentary on CMIP6 scenario model intercomparison project (ScenarioMIP) [J]. Climate Change Research, 2019, 15(5): 519-525. (in Chinese))
- [23] HURTT G C, CHINI L, SAHAJPAL R, et al. Harmonization of global land use change and management for the period 850-2100 (LUH2) for CMIP6 [J]. Geoscientific Model Development, 2020, 13(11): 5425-5464.
- [24] 白玉锋. 塔里木河下游乔灌草地上生物量量化研究[D]. 乌鲁木齐: 新疆农业大学, 2016.
- [25] 王林, 陈文. 误差订正空间分解法在中国的应用[J]. 地球科学进展, 2013, 28(10): 1144-1153. (WANG Lin, CHEN Wen. Application of bias correction and spatial disaggregation in removing model biases and downscaling over China [J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(10): 1144-1153. (in Chinese))
- [26] YANG Y, TANG J, XIONG Z, et al. An inter comparison of multiple statistical downscaling methods for daily precipitation and temperature over China: present climate evaluations [J]. Climate Dynamics, 2019, 53(7): 4629-4649.
- [27] 姜田亮, 栗晓玲, 郭盛明, 等. 西北地区植被耗水量的时空变化规律及其对气象干旱的响应[J]. 水利学报, 2021, 52(2): 229-240. (JIANG Tianliang, SU Xiaoling, GUO Shengming, et al. Spatiotemporal variation of vegetation water consumption and its response to meteorological drought in Northwest China [J]. Journal of Hydraulic Engineering, 2021, 52(2): 229-240. (in Chinese))
- [28] YANG Y, RODERICK M L, ZHANG S, et al. Hydrologic implications of vegetation response to elevated CO₂ in climate projections[J]. Nature Climate Change, 2019, 9(1): 44-48.
- [29] Food and Agriculture Organization (FAO). Guidelines: Land evaluation for rainfed agriculture[M]. Rome: FAO Soils Bulletin, 1983.

(下转第 78 页)

- [25] ZHENG Tianyuan,ZHENG Xilai,CHANG Qinpeng,et al. Timescale and effectiveness of residual saltwater desalinization behind subsurface dams in an unconfined aquifer[J]. Water Resources Research, 2021, 57 (2) : 1-18.
- [26] KALERIS V K,ZIOGAS A I. The effect of cutoff walls on saltwater intrusion and groundwater extraction in coastal aquifers [J]. Journal of Hydrology, 2013, 476 (1) : 370-383.
- [27] LU Chunhui, XIN Pei, LI Ling, et al. Steady state analytical solutions for pumping in a fully bounded rectangular aquifer[J]. Water Resources Research, 2015, 51(10):8294-8302.
- [28] 李凤丽,徐嘉璐,张游,等. 母猪河地下水数值模拟和调蓄分析[J]. 中国农村水利水电, 2020, 62(11):204-209. (LI Fengli, XU Jialu, ZHANG You, et al. Research on the numerical simulation and regulation analysis of groundwater reservoir in Muzhu River [J]. China Rural Water and Hydropower, 2020, 62 (11) : 204-209. (in Chinese))
- [29] 崔相飞,周训,徐中平,等. 海岸带咸淡水界面的研究进展[J]. 水文地质工程地质, 2018, 45(2):29-35. (CUI Xiangfei, ZHOU Xun, XU Zhongping, et al. Advances in research on the fresh water-salt water interface in coastal zones[J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2018, 45 (2):29-35. (in Chinese))
- [30] 吴吉春,吴永祥,林锦,等. 黄渤海沿海地区地下水管理与海水入侵防治研究[J]. 中国环境管理, 2018, 10(2):91-92. (WU Jichun, WU Yongxiang, LIN Jin, et al. Study on the groundwater management and seawater intrusion prevention in the coastal areas of the Bohai Sea and the Yellow Sea [J]. Chinese Journal of Environment Management, 2018, 10(2):91-92. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-09-26 编辑:王芳)

+++++
(上接第 18 页)

- [30] 游松财,邸苏闯,袁晔. 黄土高原地区土壤田间持水量的计算[J]. 自然资源学报, 2009, 24 (3) : 545-552. (YOU Songcai, DI Suchuang, YUAN Ye. Study on soil field capacity estimation in the Loess Plateau Region [J]. Journal of Natural Resources, 2009, 24(3):545-552. (in Chinese))
- [31] 李卓,吴普特,冯浩,等. 容重对土壤水分蓄持能力影响模拟试验研究[J]. 土壤学报, 2010, 47 (4) : 611-620. (LI Zhuo, WU Pute, FENG Hao, et al. Simulated experiment on effects of soil bulk density on soil water holding capacity [J]. Acta Pedologica Sinica, 2010, 47 (4):611-620. (in Chinese))
- [32] SMITH M. Cropwat: a computer program for irrigation planning and management [M]. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations, 1992: 20-21.
- [33] 封志明,张蓬涛,杨艳昭. 西北地区的退耕规模、粮食响应及政策建议 [J]. 地理研究, 2003 (1) : 105-113. (FENG Zhiming, ZHANG Pengtao, YANG Yanzhao. The scale of land conversion from farmland to forest or grassland, the grain response to it, and the relevant proposals in Northwest China [J]. Geographical Research, 2003(1):105-113. (in Chinese))
- (收稿日期:2022-07-24 编辑:王芳)

+++++
(上接第 51 页)

- [31] 张桂鑫,田文德,靳满满. 基于 PCA 权重的化工报警阈值优化 [J]. 过程工程学报, 2017, 17 (3) : 588-593. (ZHANG Guixin, TIAN Wende, JIN Manman. Thresholds optimization of chemical alarms based on PCA weight [J]. The Chinese Journal of Process Engineering, 2017, 17(3): 588-593. (in Chinese))
- [32] 刘德海,于倩,马晓南,等. 基于最小偏差组合权重的突发事件应急能力评价模型[J]. 中国管理科学, 2014, 22 (11):79-86. (LIU Dehai, YU Qian, MA Xiaonan, et al. Combination weight model of emergency ability evaluation with minimum deviation [J]. Chinese Journal of Management Science, 2014, 22 (11) : 79-86. (in Chinese))
- [33] WEI Wei, ZHANG Jing, ZHOU Liang, et al. Comparative evaluation of drought indices for monitoring drought based on remote sensing data [J]. Environmental Science and Pollution Research, 2021, 28(16):20408-20425.
- [34] 华悦,叶磊,张海荣,等. 嫩江下游多变量水文干旱特征研究[J]. 水文, 2021, 41(4):88-94. (HUA Yue, YE Lei, ZHANG Hairong, et al. Research on multi-variable hydrological drought characteristics of the lower Nenjiang River Basin [J]. Journal of China Hydrology, 2021, 41(4): 88-94. (in Chinese))
- [35] 孙永罡,宋英华,马旭清,等. 中国气象灾害大典·黑龙江卷 [M]. 北京:气象出版社, 2007.
- (收稿日期:2022-10-03 编辑:王芳)