

DOI: 10.5846/stxb202109072527

王亚萍, 王帅, 丁婧祎, 赵文武, 尹嘉敏. 气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述. 生态学报, 2023, 43(2): 475-486.

Wang Y P, Wang S, Ding J Y, Zhao W W, Yin J M. A review on the changes in wetting and drying over land under global climate change: trend, mechanism, and prospect. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(2): 475-486.

气候变化背景下全球陆地干湿变化研究综述

王亚萍¹, 王 帅^{1,2,*}, 丁婧祎¹, 赵文武¹, 尹嘉敏²

1 北京师范大学地理科学学部 地表过程与资源生态国家重点实验室, 北京 100875

2 河套学院巴彦淖尔生态治理与绿色发展院士专家工作站, 巴彦淖尔 015000

摘要: 气候变化背景下, 全球水循环加剧, 出现了大气变干与植被变绿等陆地干湿变化趋势的解耦现象, 旱区面积变化也存在争议。为回答上述问题, 在梳理常见干湿指标变化趋势与驱动因素的基础上, 根据指标变化方向对其进行归类, 然后从机理角度解析影响不同指标趋势耦合或解耦的关键要素, 并提出未来干湿变化研究展望。结果表明, 气候变化背景下, 饱和水汽压差、干燥度指数和土壤水分指标显著变干, 植被绿度和生产力显著变湿(增加), 降水、径流、陆地水储量和其他复合指标区域分异明显, 但整体趋势不显著。二氧化碳浓度增加、气温升高和土地利用变化是导致不同指标趋势分异的重要因素, 不同指标的趋势分异也解释了旱区面积评估在不同维度上的差异。未来研究中应开展干湿变化的综合评估, 其综合性主要体现在以下四个方面: 1) 关注大气-生态-水文多维度评估; 2) 解析自然与人类双重压力下, 不同维度要素间的关联、互馈过程, 及其对系统干湿演变的促进、限制与调节作用; 3) 重视干湿演变过程中的极端灾害事件和空间上以旱区为代表的气候变化敏感性区域; 4) 构建以脆弱性评估与适应性治理为核心的气候变化应对路径。

关键词: 气候变化; 全球变暖; 干湿演变; 大气-土壤-径流-植被多维度评估; 旱区

A review on the changes in wetting and drying over land under global climate change: trend, mechanism, and prospect

WANG Yaping¹, WANG Shuai^{1,2,*}, DING Jingyi¹, ZHAO Wenwu¹, YIN Jiamin²

1 State Key Laboratory of Earth Surface Processes and Resource Ecology, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

2 Hetao College Bayannur Ecological Governance and Green Development Academician Expert Workstation, Bayannur 015000, China

Abstract: Under global climate change, the hydrological cycle intensifies and the wetting and drying over land is decoupled with atmospheric drying and vegetation greening. This triggers a hot debate on the changes in dryland area. To clarify that, we summarized trends of some widely-used aridity indicators, as well as their driving factors. We then classified these indicators into different groups based on their trends to explore the underlying mechanism of the coupled and decoupled trends among indicators. At last we provided prospect of future research on wetting and drying under climate change. Our results showed that among aridity indicators, vapor pressure deficit, aridity index, and soil moisture presented significant drying trends, vegetation greenness and productivity showed obvious wetting trends, while precipitation, runoff, terrestrial water storage and other composite indices showed great regional discrepancy but overall insignificant trends. Increasing CO₂ concentration, higher temperature, and human direct activities such as land use/cover change are the major factors causing differentiation among trends of the indicators, which accounts for the contradiction in dryland change (expanding or shrinking) in studies using various indicators. Therefore, a comprehensive assessment of changes in wetting and drying for

基金项目: 国家自然科学基金项目(41991230); 内蒙古自治区社会科学院 2021 年度课题(2021SKF054); 河套学院巴彦淖尔生态治理和绿色发展院士专家工作站建设(YSZ2018-1); 科技兴蒙项目(NMKJXM202109)

收稿日期: 2021-09-07; **网络出版日期:** 2022-09-23

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: shuaiwang@bnu.edu.cn

terrestrial land is essential in the future by focusing on four priorities: 1) multiple dimensions assessment including meteorology, ecology and hydrology; 2) interactive relationships (such as promotion, limitation and regulation) among multi-dimensional elements and their impact on wetting-drying changes under the double natural and human pressures; 3) the occurrence of extreme events (such as drought, flood, and heat wave) and the areas (such as semi-arid regions) sensitive to climate change in the process of wetting-drying; and 4) the possible solution to global climate change based on vulnerability assessment and adaptive governance.

Key Words: climate change; global warming; wetting and drying; multi-dimensional assessment of atmosphere-soil-runoff-vegetation; dryland

气候变化背景下,大气环流异常,水热条件发生改变,植被生理生态产生响应和反馈^[1-2]。基于降水、径流、植被等多种气象水文生态要素及其耦合互馈关系,大量研究在全球与区域尺度探讨气候变化导致的陆地干湿变化格局、机理与生态效应等^[3-12]。然而,地球多圈层相互作用的复杂性与区域地表的异质性导致表征干湿指标的多样性和基于不同指标开展干湿变化研究结果的争议性。

常见指标包括:饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)、降水(Precipitation, P)、干燥度指数(Aridity index, AI)、土壤水(Soil moisture, SM)、径流(Runoff, R)和植被绿度(Vegetation greenness, VG)等。已有研究发现,全球整体在变干(VPD, AI 和 SM)^[13-14],但径流略有增加^[5, 15]或减少^[16-17],植被则以变绿为主^[1, 18]。这种不同指标表征干湿变化趋势不一致(甚至是相悖)的现象,也引发了关于旱区面积扩张或者缩减问题的争议^[6, 19-20]。如 Huang 等^[13]基于 AI ,发现与 1961—1990 年相比,旱区面积在 21 世纪末将增加 11%—23%; Berg 等^[4]基于生态水文指标,却得出“与 1971—2000 年相比,旱区面积在 21 世纪末不会扩张”的结论。

工业革命以来,温室气体排放增加,大气二氧化碳浓度上升,导致全球在气温、辐射、降水、植被等多维度发生不同变化。首先,热力学理论表明,气温上升将导致环流过程中大气含水量和传输增加,干旱区将变得更干,湿润区将变得更湿,也就是广为流传的 DDWW 格局(Dry get drier and wet get wetter)^[21]。然而,考虑海陆气温的水平梯度差和相对湿度变化等因素,基于降水、干燥度指数和可利用水量(降水-蒸散发)等指标的观测数据和多模式模拟结果表明 DDWW 格局更适用于海洋,而非陆地,且陆地的干湿变化幅度小于海洋和基于热力学理论的计算结果^[21-22]。也有研究从升温导致的环流异常和陆气互馈等角度探讨了湿润区没有变得更湿和干旱区没有变得更干的物理机制^[3, 23]。从干湿变化的生态效应来看,二氧化碳浓度增加对植被生产力的肥化作用,与气温升高、VPD 增加导致的植被叶片气孔关闭的节水效应可能在一定程度上抵消了缺水(变干)对旱区植被生长的限制,使得植被在更干背景下反而变绿(变湿)^[6]。

综上,气候变化背景下,水热条件随气象-生态-水文过程传递而改变,干湿状况亦呈现不同响应。为厘清陆地干湿变化争议,本文尝试对多种干湿指标逐一进行梳理,总结其趋势特征与驱动因素,并按照各指标表征的干湿变化异同进行归类对比,然后从机理角度解释指标分异与矛盾表象背后的“实质”统一,并提出干湿变化研究应关注的重点问题,以期对未来相关研究有所裨益。

1 多指标干湿变化趋势及驱动

1.1 大气指标

1.1.1 饱和水汽压差

饱和水汽压差(Vapor pressure deficit, VPD)指空气中饱和水汽压(受温度控制)与实际水汽压之间的差值。VPD 可用来表征大气从陆表获取水分的能力,一般认为,VPD 越大,大气需水能力越强。第五次国际耦合模式比较计划(the Coupled Model Intercomparison Project Phase 5, CMIP5)的模式输出结果表明,随温度上升,全球 VPD 在过去几十年里发生明显增长,且增长趋势在 21 世纪仍将持续^[14]。从时间上看,与 1982—1986 年相比,2011—2015 年的生长季 VPD 均值增加约 11.26%,且 VPD 增长速率在 20 世纪 90 年代之后明显

加快,是之前的 1.66—17 倍^[14];从空间上看,旱区 VPD 增长速率高于湿润区大约 25%,增长显著区域包括北非、中东和北美洲南部等,下降区域则主要位于非洲中部、美国东南和南美西部^[6, 24]。综上,尽管 VPD 变化速率与方向存在时空异质,全球多数区域大气正在变干。

大气变干,即 VPD 增加,由温度上升导致的饱和水汽压增加和环流过程中水-气与陆-气交互导致的实际水汽压下降共同引发^[14]。变暖背景下,根据克劳修斯-克拉佩龙(Clausius-Clapeyron)方程,温度增加导致饱和水汽压以 7%/K 的速率上升。此外,受海洋蒸发和陆地蒸散发下降影响,实际水汽压在 20 世纪发生明显下降^[14, 25]。海洋蒸发是大气水汽的主要来源(85%),在海洋表面增温停滞限制下,海洋整体蒸发量在 1998 年前后由上升转变为下降,且大约 76%海域的蒸发量在 1999 年开始减少;剩余 15%的大气水汽由陆地蒸散发提供,但受土壤水分供给减少限制,全球陆地蒸散发在 20 世纪末也呈下降趋势^[25]。故 20 世纪末海陆蒸散发的减少导致了 VPD 增速在这一时期的明显加快。

1.1.2 降水

目前常用降水(Precipitation, P)数据集包括基于地面站点实测的、与遥感相关的和再分析数据集。不同数据集构建原理不同,受限于站点时空分布、数据同化算法和遥感反演模型等数据重建技术,降水数据的不确定性较大,不同数据集的年降水量差异幅度可达 300mm^[26],但整体趋势特征相对一致。

降水在过去几十年以波动为主,全球整体未表现明显增加或减少趋势,仅在局部区域显著变化。基于站点实测的 GPCP(the Global Precipitation Climatology Centre)数据集,1901 年以来,降水在北半球中高纬地区和澳洲增加,在热带和亚热带局部区域(如北非、南亚一带)减少,降水增加区域面积大于减少区域;与其他长时间序列数据集(如 NOAA 的降水重建数据 RECONS 和 NASA 的 AMIP 输出数据)相比,降水趋势空间分布差异主要体现在南美,GPCC 数据集在南美同时存在降水增加和减少区域,RECONS 以增加为主,AMIP 则以减少为主^[27]。此外,降水时间序列长度和阶段选取不同,也会影响区域降水趋势的识别^[27—28]。

气候变化背景下降水变率的响应同样值得关注^[29]。降水变率指降水事件可能的波动或振荡范围;变率越大,异常降水发生越频繁、降水的时空不均匀性越强,极端灾害事件发生概率越大^[30]。已有研究表明,全球范围内,约 2/3 观测站点极端降水(如日最大降水量)的发生频率在增加,其中季风区极端降水,或者说降水变率增加更明显^[31—32]。

大气系统的年代际振荡、温室气体排放和气溶胶变化等均影响全球及局部降水变异,其中年代际振荡多在十年或数十年的时间尺度上主导降水波动,温室气体和气溶胶浓度变化则影响降水长期趋势。海表温度(Sea surface temperature, SST)变化引发的大气环流异常使得局部降水条件发生变化,进而引发降水变异;SST 多呈代际或者多年代际的规律性振荡,因此长时间序列降水变化也存在年代际波动^[29]。但是不同海气交互现象对降水异常发生的区域、方向和作用机理不同,如厄尔尼诺-南方涛动(El Niño-Southern Oscillation, ENSO)和太平洋年代际振荡(Pacific Decadal Oscillation, PDO)影响热带区域降水异常,甚至延伸至北半球中高纬区域,尽管存在区域差异,厄尔尼诺事件发生时期,全球降水整体略有增加,拉尼娜则为减少;大西洋多年代际振荡(Atlantic Multidecadal Oscillation, AMO)的作用范围主要位于泛大西洋区域,导致北美东部和南美南部降水减少、南美北部和热带非洲降水异常增加^[27—28, 33]。

温室气体排放通过辐射强迫、温度等改变大气环流及水汽传输,使得降水量整体增加和降水极端性增强的物理过程相对可预测。Dai 等^[29]基于以中低代表性浓度路径排放情景(RCP4.5)为驱动的 CMIP5 模型预测了 21 世纪末全球降水变化量(与 20 世纪末相比)的空间分布,结果表明,降水在北半球高纬度和赤道辐合带(Inter Tropical Convergence Zone, ITCZ)增加,其中强降水增加 30%—80%;降水在亚热带地区减少,具体表现为降水频率(尤其是小到中雨频率)的减少和无雨天数的增加。Liang 等^[34]以东亚为例,发现降水总量随全球变暖的变化速率存在季节分异,降水夏季随气温变化速率(大约 3%/k)小于冬季(大约 7%/k)。Zhang 等^[30]利用英国气象局参数扰动大样本集合模拟和预估试验,证明了从天到月、季节和年际等各个时间尺度上,降水变率均将随全球增温而增强,其中气候湿润区变率更大。整体来说,陆地平均降水量和降水变率均随

温度升高而增加,增加幅度分别大约为 1.7%/K 和 4%/K—5%/K^[35—36]。

气溶胶是悬浮在大气中的颗粒物,通过吸收或散射太阳辐射和改变成云特性等影响降水变化,其对降水变异的影响程度低于大气系统的年代际振荡和温室气体排放。通过气溶胶-气候耦合模型,Zhao 等^[37—38]发现工业革命以来,人类活动排放气溶胶的增加使得全球陆地年均降水量每天减少约 0.18mm。此外,典型吸收性气溶胶(黑碳)和典型散射性气溶胶(硫酸盐)对气候变化和 ITCZ 平均位置的影响方式存在差异,尽管前者具有增暖效应,造成 ITCZ 北移,后者具有冷却效应,造成 ITCZ 南移,两者均导致降水减少。但由于气溶胶生命周期较短、排放局地性较强,成云作用机制尚不明晰,其对辐射及气候的影响仍存在较大不确定性^[39]。

1.1.3 干燥度指数

干燥度指数(Aridity index, *AI*)指降水(Precipitation, *P*)与潜在蒸散发(Potential evapotranspiration, *PET*)比值,位于 0—1 之间,通常将 0.65 作为旱区与湿润区的分界,并将旱区进一步划分为极端干旱($AI < 0.05$)、干旱($0.05 \leq AI < 0.2$)、半干旱($0.2 \leq AI < 0.5$)和干旱半湿润($0.5 \leq AI < 0.65$)区^[13, 40]。

过去几十年来,全球 *AI* 发生明显下降,以 *AI* 表征的旱区面积不断扩张,且这一趋势在 21 世纪仍将延续。但是,受数据来源和研究阶段等限制,*AI* 变干幅度和旱区扩张面积大小差异较大。以长时间序列的观测数据和 CMIP5 模式数据为例,1948—2005 年,全球 *AI* 观测值平均减少 -0.050,变干区域面积占全球陆地 66%;模式 *AI* 值平均减少 -0.012,变干面积占全球陆地 59%^[13]。Ji 等^[41]也发现,这一时期基于观测数据的旱区扩张面积为 $2.61 \times 10^6 \text{ km}^2$,比基于 CMIP5 模型评估结果($0.55 \times 10^6 \text{ km}^2$)的 4 倍还多。这可能与 CMIP5 中多模式集合对旱区降水量高估、且多模式对旱区部分区域降水量空间分布模拟存在较大不一致有关^[41]。Huang 等^[13]以历史观测数据为基准,对模式模拟的 *AI* 数据进行校准,校准后结果表明 RCP4.5(RCP8.5)情景下,旱区面积持续扩张,至 2100 年其面积占全球陆地的 50%(56%);与 1961—1990 年的 45.5%相比,旱区面积增加约 11%(23%)。然而,Pan 等^[42]以 1901—2017 年为研究阶段,发现全球 *AI* 先增加后减少,即旱区面积先缩减后扩张,其转折点出现在 20 世纪中期,且这之后 *PET* 增加对 *AI* 减少的贡献超过降水。

PET 指水分充足条件下下垫面的蒸散发量,其估算方法对基于 *AI* 的全球变干幅度有较大影响。常见 *PET* 估算方法可分 3 种:基于温度(如 Thornthwaite 算法)、基于辐射(如 Priestley-Taylor 方法)和基于物理过程的综合方法(如 Penman-Monteith 方法,简称 PM 公式)。一般认为,PM 公式综合考虑辐射、湿度、风速等多种变量,较另外两种方法更能代表下垫面实际蒸散发能力^[43]。但是,传统 PM 公式假定下垫面气孔阻抗为定值,与已有研究发现的“植被气孔导度随二氧化碳浓度升高而下降,使得气孔阻抗增加”不符,这样可能导致 *PET* 被高估^[44]。Lian 等^[6]基于改进后的 PM 公式,即修正了二氧化碳浓度对气孔阻抗的影响,发现 1948—2016 年间旱区扩张面积将减少约 40%。实际上,尽管模型估算结果表明 20 世纪 50 年代以来,*PET* 总体呈上升趋势,但蒸发皿观测值在大多数区域有所下降^[45]。学界将这一现象称为“蒸发悖论”,其背后机理相对复杂,有待深入探讨^[46]。

1.2 土壤指标

作为连接陆气水热交换的关键组分,土壤含水量对蒸散发过程、植被生长及生态系统健康具有重要意义。由于大范围连续实测数据较难获得,微波遥感、基于观测的数据同化和陆表模型模拟是大规模土壤含水量动态监测的常用数据来源^[6]。其中遥感方法受探测深度和地表覆盖植被密度限制,传感器只能监测土壤表面含水量,且不同传感器对植被敏感性有差异,故已有研究多基于融合产品开展表层土壤含水量评估^[47]。同化数据和陆表模型输出可包含不同深度土壤含水量,但数据集或模型之间差异较大,土壤含水量(包括所有深度土壤水分)趋势有正有负^[6]。

整体来说,全球土壤含水量在减少,且表层土壤变干幅度高于深层,这种现象与 VPD 升高导致的表层土壤水更多用于蒸散发有关。Feng 等^[48]基于欧空局发布的土壤含水量数据集(www.esa-soilmoisture-cci.org)发现,1979—2013 年间全球陆表约 30% 区域土壤含水量发生明显变化,其中含水量下降区域面积占比(22.16%)高于含水量上升区域(7.14%)。进一步,Berg 等^[49]基于 RCP8.5 情景下的 CMIP5 多模式集合分析

了不同深度土壤含水量的变化趋势,发现与 1976—2005 年相比,2070—2099 年土壤水变干幅度与范围均随土壤深度增加而减弱,土壤含水量下降与上升的面积比由表层土壤的 70%:30% 下降至 0—3 m 深土壤的 58%:42%,以致美国北部和中亚等区域土壤表层含水量变化(下降)与所有层土壤含水量(上升)呈现完全相反趋势。这一变化主要由降水补给与蒸散发消耗的季节不对称所致。以北半球中高纬度为例,在气温升高、VPD 增加背景下,北半球夏季蒸散发的增加量超过降水变化量,即土壤通过降水下渗获得的水分补给不足以弥补蒸散发增加导致的水分亏缺;同时由于土壤表层是蒸散发的主要水分来源,浅层土壤含水量下降更加明显。另一方面,冬季降水增加幅度大于蒸散发变化量,土壤水分得到补给,但受重力影响,降水补给水分更容易下渗至土壤深层。综上,深层土壤夏季消耗少、冬季补给多,浅层土壤与之相反,故年际尺度上,浅层土壤受升温影响较大,变干趋势较深层土壤更为明显^[49]。

1.3 径流指标

径流常以流域为基础单元进行估算,流域出口处水量即代表整个流域的径流量(m^3),径流量与流域面积比值为径流深(mm)。径流年际变异明显、区域分异较大,但整体趋势不显著。一套覆盖全球约 80% 汇流面积(不包括内流区)的月径流实测数据集(1948—2004 年)表明,流量最大的前 200 条河流中,年径流发生显著变化的河流仅占大约 1/3,其中下降趋势河流数(45 条)大于上升(19 条)^[16];数据集包含的 900 多条河流里,503 条径流下降(120 条显著),408 条增加(51 条显著)^[17]。但是 Li 等^[50]研究认为径流显著增加河流数量(12%)略大于减少(11%);以模式输出为驱动的陆表模型也表明 20 世纪以来全球径流在增加,且增加趋势将持续至 21 世纪末^[5, 15, 51]。观测与模型结果在径流趋势的空间分异上呈现较好一致性,即高纬度区域河流径流以增加为主,中低纬度减少较多,与降水趋势相对一致^[16, 51]。

降水、土地利用变化、二氧化碳排放和水利设施等人类活动影响径流年际变异、整体趋势和季节分配等特征。Dai 等^[16]和 Su 等^[17]从统计角度验证了 ENSO 等大气指数与径流年代际变化的强相关;Gedney 等^[5]和 Piao 等^[15]将降水等作为陆表模型的重要驱动,较好重现了径流的年际变异。二氧化碳浓度增加与植被生长的交互作用则通过蒸腾影响径流的长期趋势:1)二氧化碳浓度增加导致植被气孔关闭,其“节水”效应使得蒸腾下降,径流增加;2)二氧化碳浓度增加的“肥化”作用使得植被生产力增加,蒸腾也随之增加,故径流下降。“节水”效应与“肥化”作用对径流趋势的作用方向相反,两者对径流影响的相对强弱有待商榷^[5, 15]。土地利用变化对径流趋势影响更大。尽管存在干湿差异和尺度分异,一般认为大规模毁林(造林)增加(减少)区域产流;灌溉用地增加则需消耗更多水资源,造成径流减少^[15, 52]。此外,大坝等水利设施的建造增强了人类对可利用水资源的调控能力,社会经济用水在逐步增加的同时,径流在减少^[53]。径流的季节分配则由于水库的旱涝调蓄作用更加均匀,年内变异减弱^[54]。

1.4 植被指标

植被生长受水热条件限制,其生长状况是生态系统干湿变化和健康与否的直接体现,一般从绿度和总初级生产力(Gross primary production, GPP)两个维度衡量。根据植被在不同波段的光谱特征,基于多光谱遥感卫星数据构建了标准化植被指数(Normalized difference vegetation index, NDVI),指数越接近于 1,植被越绿;但由于其物理意义不明确,且存在过饱和现象,叶面积指数(Leaf area index, LAI)成为更常用绿度指标。Zhu 等^[1]基于 GIMMS、GLOBMAP 和 GLASS 三套 LAI 数据发现,1982—2009 年间,全球 25%—50% 区域植被在生长季显著变绿,变棕区域面积低于 4%。GPP 指在单位时间和单位面积上,绿色植物通过光合作用固定的有机碳总量,是评估生态系统固碳能力的重要指标。GPP 数据来源包括涡度-协方差通量站点实测,日光诱导叶绿素荧光(Solar-induced chlorophyll fluorescence, SIF)遥感反演,基于 LAI、光合有效辐射和光能利用效率的经验方程,和陆表植被模型等。与绿度指标相比,植被 GPP 估算存在较大不确定性,但整体趋势一致,即 20 世纪 80 年代以来全球植被持续变绿、生产力在增加^[55—56]。

过去几十年来,二氧化碳的肥化作用是全球植被变绿和生产力增加的主要驱动,气候和土地覆被变化对局部地区植被生长也有较大影响。以 1982—2009 年的全球 LAI 为例^[1],二氧化碳、气候变化和土地覆被变化

分别贡献植被变绿趋势的 70%、8% 和 4%。其中二氧化碳浓度增加的肥化作用在热带森林表现最为明显,旱区则受二氧化碳浓度增加导致气孔关闭产生的节水效应影响较大;气候变化通过升温、辐射等改善北半球高纬度和青藏高原地区的水热条件,使得光合作用加强、生长季延长^[57],并通过降水增加影响萨赫勒和南非地区的植被变绿;土地覆被受人类活动直接影响,如中国、印度等通过农作物种植和生态恢复等土地管理措施主导近 20 年来的全球变绿^[18]。对于 GPP 而言,其增长趋势受二氧化碳浓度、LAI 和光合有效辐射 (Photosynthetic active radiation, PAR) 增加共同促进,土壤水分 (Soil moisture, SM) 和饱和水汽压差 (Vapor pressure deficit, VPD) 的限制作用则通过光能利用效率 (Light use efficiency, LUE) 降低抵消部分增长^[58–59]。

一般认为,植被变绿伴随着生态系统生产力的增加,但是水热限制的敏感性分异使得两者趋势在速率和空间上并不匹配。首先 Zhang 等^[60]发现植被绿度增长速度 ($0.23\%/a$, $p < 0.001$) 快于 GPP ($0.08\%/a$, $p = 0.07$);其次 LAI 趋势结果表明,热带区域植被绿度增速最快^[61],但是 Ahlström 等^[62]和 Poulter 等^[63]却发现尽管热带森林拥有更多碳汇,半干旱区主导全球生产力的年际变异和趋势,即主导绿度与生产力变异的区域分布并不一致。一项关于亚马逊流域森林应对极端干旱的研究也表明植被绿度与生产力存在解耦关系,表现为植被光合大幅下降的同时绿度略有增加^[64]。植被绿度和生产力对水热条件的敏感性差异是这一现象存在的主要原因。根据上段分析,除两者共有影响因素之外,与植被绿度相比,生产力受 LUE 影响较大,LUE 甚至主导陆地碳汇变异^[65],故变暖或干旱背景下水压力 (包括 SM 和 VPD) 增加导致的 LUE 降低对生产力抑制作用较强,使得植被绿度增加趋势高于生产力^[64]。LUE 在半干旱区与热带区域对 SM 和 VPD 的响应差异则决定了半干旱区对全球生产力变异的主导作用。尽管 SM 与 VPD 通过陆气互馈存在强耦合,越来越多研究证明,相较于 VPD,SM 是全球生产力变异的主导因子^[65–66],而旱区 LUE 对 SM 的敏感性高于 VPD,湿润区与之相反^[66–67],故旱区主导全球生产力变异。

1.5 综合指标

1.5.1 陆地水储量

陆地水储量 (Terrestrial water storage, TWS) 指陆地地表与地下储存水量之和,包括冰雪、冠层、河流、湖泊、水库、湿地、土壤水和地下水等,是反映气象、水文、生态和人类等多要素影响下可利用水资源量的综合评估指标^[68–69]。由于冠层、地下水等组分难以直接测量,故基于水量平衡法和组分相加法的陆地水储量估算局限较大;基于重力恢复与气候试验 (Gravity Recovery and Climate Experiment, GRACE) 卫星的遥感反演法认可度相对较高^[70]。GRACE 卫星数据表明,2002—2016 年期间,陆地水储量整体未表现明显趋势,其中北半球高纬度和热带湿润区所在低纬度有所减少,中纬度增加,与陆表模型模拟的降水变化大致符合^[69]。

整体来看,陆地水储量的空间分异格局受气候驱动,但存在受人类活动影响较大的局部热点区域。Rodell 等^[69]基于 GRACE 卫星观测数据在全球尺度上共识别出 34 个趋势发生明显变化的区域,并从自然变异、气候变化和人类直接影响等角度分别探讨和预测这些区域水储量过去发生变化的原因和未来可能的变化趋势。较典型案例包括:气温升高、冰雪融化导致的极地 (及其附近区域) 水储量下降 (上升),地下水过度开采导致的灌区水储量下降,水库建造导致的局部水储量上升,和水资源相对匮乏、但用水需求较大的内流区普遍面临的水储量显著下降。有研究表明,在中高代表性浓度路径的排放情景下 (RCP6.0),全球大约 2/3 区域的陆地水储量在 21 世纪末有所下降,其他区域为增加。气候驱动贡献陆地水储量整体变化的大约 90%,水土管理措施和社会经济因素影响较弱,但在局部区域会促进或减缓气候因素引发的变异;此外,土壤水分对旱区陆地水储量影响较大,对湿润区或冰雪覆盖区域影响较小^[68]。

1.5.2 其他气象-生态-水文复合指标

复合指标包括可利用水量、生态水文指数和气象-生态-水文综合评估框架等^[3–4, 21, 71]。可利用水量指降水供给与蒸散发消耗之差,若陆地水储量保持稳定,可利用水量变化格局与径流相似^[22]。根据 RCP8.5 情景下 CMIP5 的模拟结果,尽管中高纬和赤道局部地区在变湿,中低纬在变干,全球超 3/4 区域可利用水量在 21 世纪末并没有发生显著变化,仅高纬度等区域 (19.5%) 可利用水量明显增加,地中海和南非巴塔哥尼亚等地

区(3.3%)显著减少^[72]。生态水文指数(Ecohydrological index, EI)以叶面积指数和土壤水分与蒸腾关系的差值为基础,即 $EI = LAI - (a \times \text{cor}(SM, \text{Tran}) + b)$, 其中参数 a 和 b 根据当 $EI < 0$ 时,干燥度指数 $AI < 0.65$ 推算^[4]。但是基于 EI 的全球旱区面积评估结果与 AI 不同,旱区面积整体并没有表现出明显的扩张趋势,即局部扩张与缩减大致相当。气象-生态-水文综合评估框架由 Roderick 等^[71] 提出,该研究从气象、水文和生态视角出发,首先估算了陆地降水、蒸散和径流随温度升高的变化速率(+1.3%/K、+0.4%/K 和+3.4%/K),然后将其与二氧化碳浓度加倍的情况下的植被净光合吸收速率(40%)对比,认为气候变化背景下陆地并未随温度升高而变干。整体来看,包含多角度的复合指标对于陆地干湿响应的评估结果更为温和,即明显变化区域较少。尽管有研究表明复合指标评估结果的不确定性随指标涉及数据增多而变大,这种评估方式依然为认识陆地干湿变化提供了更加全面且系统的视角^[71]。

2 多指标耦合、解耦及机理解释

气候变化背景下陆气互馈与人类活动交错影响,使得基于单一指标的干湿变化研究难以表征复杂地球多层过程对全球气候变化的响应。按照各指标在全球整体的变化趋势,可将干湿变化指标分为:1)受温度及大气需水增加主导的显著变干,如饱和水汽压差、干燥度指数和土壤含水量(尤其是表层土壤含水量);2)区域分异明显,但整体变化不显著,如降水、径流和陆地水储量等综合指标;3)受二氧化碳浓度、植被生理响应和人类活动主导的显著变湿,如植被绿度和生产力增长。

升温和二氧化碳浓度增加是导致多指标耦合与解耦的关键因素(图1)。随温度升高,水循环加剧,大气需水量增加,从干湿指标来看,体现为饱和水汽压差(VPD)和潜在蒸散发(PET)呈明显上升趋势。水循环加剧也导致降水整体性增多,但由于 ENSO 等大气信号异常使得降水年代际波动幅度超过气候变化影响下的整体增加,且受大气环流控制,降水变化区域分异较大,因此整体趋势并不明显。干燥度指数(AI)受降水和 PET 共同影响,由于 PET 变化速率高于降水,故 AI 的显著变干受 PET 主导,与 VPD 保持一致。二氧化碳浓度则通过促进植被生长,增加土壤耗水和蒸腾,使得农业-生态指标中的土壤水与植被绿度(生产力)解耦。具体来说,二氧化碳浓度增加有助于光合效率提升,对植被有肥化作用;对于水分限制区域,二氧化碳浓度增加和升温均促使植被通过关闭气孔避免叶片失水和 pH 过低,进而使得该区域水分利用效率提升、水压力得到

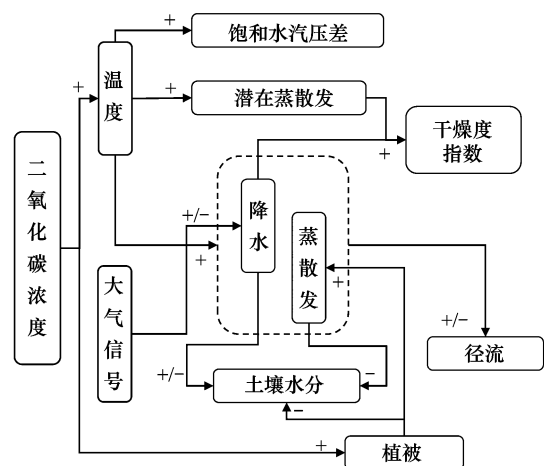


图1 气候变化背景下陆地多维度干湿变化

Fig.1 Multi-dimensional wetting and drying change over land with global climate change

缓解、植被承载力增加;但植被变绿(生产力增加)与大气需水量增加对实际蒸散发的促进作用共同使得土壤含水量下降,尤其是受蒸散发影响较大的表层土壤水。径流和陆地水储量受降水影响较大,尽管升温和植被变绿使得降水分配向蒸散发倾斜,两者整体并未呈现明显趋势,仅在局部区域显著上升或下降。可利用水量等复合指标则由于同时考虑降水、蒸散发和植被等多变量,单要素的变干或变湿趋势相互抵消,故呈现不显著变化。

除温室气体排放引发全球变暖等气候变化之外,人类活动对生态水文过程的直接干预也加剧不同要素干湿变化的解耦,尤其是区域尺度土地利用变化导致的植被增加与土壤水、径流等水文条件的不匹配。21 世纪以来,中国和印度主导全球变绿,其中农田分别贡献中国和印度叶面积净增加量的 32% 和 82%^[18]。农田扩张,尤其是灌区面积增长,意味着农业需水增加,当地水储量,尤其是地下水或径流将显著减少。以中国华北

平原、黄河流域和印度恒河、印度河以及布拉马普特拉河流域等农田广泛分布区域为例,均出现了由于地下水超采或径流减少而呈现出的水储量明显下降现象^[69, 73-74]。此外,森林贡献中国叶面积净增加量的 42%,这可能与我国实施的多项大规模生态保护工程有关^[18]。政府部门调查数据显示,1999—2013 年,中国造林面积增加 30%,森林覆盖率提升 19%;Lu 等^[75]等评估了中国六项大规模生态工程实施区域的碳储量变化,认为这些区域 56%的碳储量增加(74TgC/a)应归因于生态工程的实施;Tong 等^[76]也证实了生态工程对中国南方喀斯特生态系统生产力的提升作用。然而,生态工程在促进植被变绿、固碳能力提升的同时,导致区域蒸散发增加、土壤含水量下降、径流减少,甚至出现土壤干层、河流断流等^[53, 77-80]。

结合气候变化与人类活动,从机理角度探讨气候变化背景下的陆地干湿演化,有助于理解要素之间的耦合关系与互馈机理,避免由于不同要素趋势差异引发的干湿争论。以旱区面积变化为例,其扩张或者缩减取决于对旱区定义的理解和对旱区与湿润区划分标准的选取。Lian 等^[6]和 Zhang 等^[19]均从气象、水文和农业生态等多角度评估了旱区面积在过去几十年甚至未来百年的变化趋势,发现根据干燥度指数(AI)划分的旱区面积在扩张,但根据植被绿度划分的旱区面积在缩减。故旱区问题的根本在于面临水压力区域的识别,即该区域的水分补给能否满足当前大气需水量^[81]、该区域植被生长是否受水分胁迫^[82]、该区域社会生态系统水安全能否得到保障^[83]。

3 干湿变化研究展望

变暖背景下陆地生态系统干湿变化综合评估不仅需要强调大气、土壤、径流、植被等地球多圈层、多维度过程,还应关注不同圈层要素间的关联机制,即自然变异、温室气体排放和其他人类活动影响下大气、水文和生态等多要素间的作用机理与互馈过程,进而探讨水热条件限制下的社会生态系统的干湿演变特征(包括平均态、趋势、变异、极值和区域敏感性分异等),以及社会生态系统在自然与人类双重压力下(即可能面临风险)的脆弱性与适应能力等(图 2)。

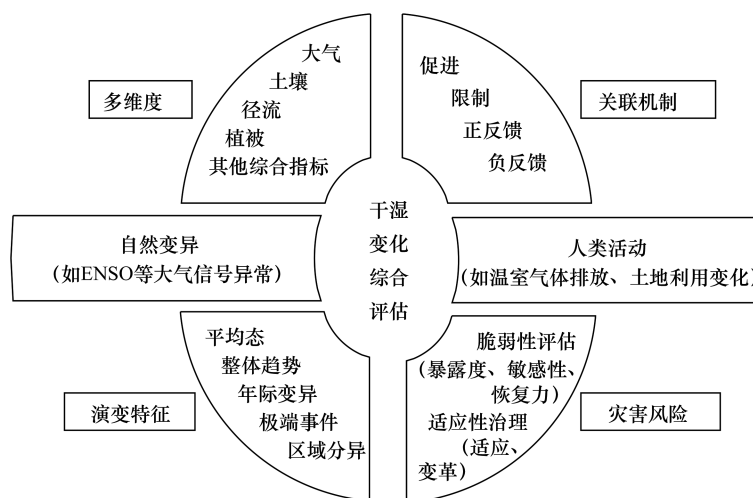


图 2 气候变化背景下陆地干湿变化综合评估框架

Fig.2 Comprehensive assessment framework of wetting and drying change over land with global climate change

干湿变化综合评估的根本在于理解多维度、多圈层要素间的关联机制,尤其是大气-土壤-径流-植被多要素之间的互馈响应及其对系统干湿演变的促进与限制作用。目前还存在较多尚不明晰的交互过程,如土壤水与饱和水汽压差的互馈机理^[3, 66],土壤水减少和饱和水汽压差增加的限制下植被变棕与目前变暖背景下植被变绿之间的权衡^[14, 82],养分循环(如氮元素)对植被生长的影响途径^[61, 84-85],以及植被变绿、生长季延长、生态恢复等对局部水热条件(如温度、降水、土壤水和径流)的反馈机理等^[86-88]。理解多要素之间的互

馈、促进与限制机制有助于全面认识并准确预测气候变化背景下陆地干湿演变趋势、阈值等特征,进而为生态系统的可持续性提供科学支撑。

除干湿变化整体趋势之外,极端事件和干湿变化的区域分异(尤其是以旱区为代表的变暖敏感性区域)也是社会生态系统可持续发展面临的严峻挑战,脆弱性评估和适应性治理可能为应对这一挑战提供解决途径。由降水或温度极值等引发的极端事件和由空间分异导致的区域敏感性差异是未来研究关注重点。CMIP6 模型输出和政府间气候变化专门委员会(IPCC)第六次评估报告均指出,随着全球变暖,干旱、洪水等极端气候事件发生频率增加、强度变大、影响范围更广,其中受极端干旱影响的地区和人口比例将由 20 世纪末的 3% 增加至 21 世纪末的大约 7% 和 8%^[31, 51, 68, 89-90];复合极端事件(如土壤-大气干旱复合和干旱-热浪复合)的频率与强度也将在未来进一步加强^[91-92]。此外,未来 78% 的旱区扩张将发生在面临巨大人口、生态与社会经济压力的发展中国家,意味着该区域的土地管理与适应将面对更大风险与挑战^[13]。故基于暴露度、敏感性和恢复力的脆弱性评估^[93-94]和综合考虑系统适应与变革能力的适应性治理^[95-96]有助于变暖背景下社会生态系统的风险应对,进而为自然与人类双重压力下的旱区可持续发展提供科学认知与理论支撑。

参考文献(References):

- [1] Zhu Z C, Piao S L, Myneni R B, Huang M T, Zeng Z Z, Canadell J G, Ciais P, Sitch S, Friedlingstein P, Armeth A, Cao C X, Cheng L, Kato E, Koven C, Li Y, Lian X, Liu Y W, Liu R G, Mao J F, Pan Y Z, Peng S S, Peñuelas J, Poulter B, Pugh T A M, Stocker B D, Viovy N, Wang X H, Wang Y P, Xiao Z Q, Yang H, Zaehle S, Zeng N. Greening of the earth and its drivers. *Nature Climate Change*, 2016, 6(8): 791-795.
- [2] 秦大河,陈振林,罗勇,丁一汇,戴晓苏,任贾文,翟盘茂,张小曳,赵宗慈,张德二,高学杰,沈永平. 气候变化科学的最新认知. *气候变化研究进展*, 2007, 3(2): 63-73.
- [3] Zhou S, Williams A P, Lintner B R, Berg A M, Zhang Y, Keenan T F, Cook B I, Hagemann S, Seneviratne S I, Gentile P. Soil moisture-atmosphere feedbacks mitigate declining water availability in drylands. *Nature Climate Change*, 2021, 11(1): 38-44.
- [4] Berg A, McColl K A. No projected global drylands expansion under greenhouse warming. *Nature Climate Change*, 2021, 11(4): 331-337.
- [5] Gedney N, Cox P M, Betts R A, Boucher O, Huntingford C, Stott P A. Detection of a direct carbon dioxide effect in continental river runoff records. *Nature*, 2006, 439(7078): 835-838.
- [6] Lian X, Piao S L, Chen A P, Huntingford C, Fu B J, Li L Z X, Huang J P, Sheffield J, Berg A M, Keenan T F, McVicar T R, Wada Y, Wang X H, Wang T, Yang Y T, Roderick M L. Multifaceted characteristics of dryland aridity changes in a warming world. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2021, 2(4): 232-250.
- [7] 夏军,谈戈. 全球变化与水文科学新的进展与挑战. *资源科学*, 2002, 24(3): 1-7.
- [8] 胡子瑛,周俊菊,张利利,魏伟,曹建军. 中国北方气候干湿变化及干旱演变特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 1908-1919.
- [9] 白晓兰,魏加华,解宏伟. 三江源区干湿变化特征及其影响. *生态学报*, 2017, 37(24): 8397-8410.
- [10] 莫兴国,林忠辉,刘苏峡. 气候变化对无定河流域生态水文过程的影响. *生态学报*, 2007, 27(12): 4999-5007.
- [11] 何宝忠,丁建丽,李焕,刘博华,陈文倩. 新疆植被物候时空变化特征. *生态学报*, 2018, 38(6): 2139-2155.
- [12] 叶许春,杨晓霞,刘福红,吴娟,刘佳. 长江流域陆地植被总初级生产力时空变化特征及其气候驱动因子. *生态学报*, 2021, 41(17): 6949-6959.
- [13] Huang J P, Yu H P, Guan X D, Wang G Y, Guo R X. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nature Climate Change*, 2016, 6(2): 166-171.
- [14] Yuan W P, Zheng Y, Piao S L, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y P, Ryu Y, Chen G X, Dong W J, Hu Z M, Jain A K, Jiang C Y, Kato E, Li S H, Lienert S, Liu S G, Nabel J E M S, Qin Z C, Quine T, Sitch S, Smith W K, Wang F, Wu C Y, Xiao Z Q, Yang S. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Science Advances*, 2019, 5(8): eaax1396.
- [15] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, De Noblet-Ducoudré N, Labat D, Zaehle S. Changes in climate and land use have a larger direct impact than rising CO₂ on global river runoff trends. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2007, 104(39): 15242-15247.
- [16] Dai A G, Qian T T, Trenberth K E, Milliman J D. Changes in continental freshwater discharge from 1948 to 2004. *Journal of Climate*, 2009, 22(10): 2773-2792.
- [17] Su L, Miao C Y, Kong D X, Duan Q Y, Lei X H, Hou Q Q, Li H. Long-term trends in global river flow and the causal relationships between river flow and ocean signals. *Journal of Hydrology*, 2018, 563: 818-833.
- [18] Chen C, Park T, Wang X H, Piao S L, Xu B D, Chaturvedi R K, Fuchs R, Brovkin V, Ciais P, Fensholt R, Tømmervik H, Bala G, Zhu Z C,

- Nemani R R, Myneni R B. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nature Sustainability*, 2019, 2(2): 122-129.
- [19] Zhang C C, Yang Y T, Yang D W, Wu X C. Multidimensional assessment of global dryland changes under future warming in climate projections. *Journal of Hydrology*, 2021, 592: 125618.
- [20] 陈亚宁, 李玉朋, 李稚, 刘永昌, 黄文静, 刘西刚, 冯梅青. 全球气候变化对干旱区影响分析. *地球科学进展*, 2022, 37(2): 111-119.
- [21] Byrne M P, O’Gorman P A. The response of precipitation minus evapotranspiration to climate warming: why the “wet-get-wetter, dry-get-drier” scaling does not hold over land. *Journal of Climate*, 2015, 28(20): 8078-8092.
- [22] Greve P, Orlowsky B, Mueller B, Sheffield J, Reichstein M, Seneviratne S I. Global assessment of trends in wetting and drying over land. *Nature Geoscience*, 2014, 7(10): 716-721.
- [23] Vecchi G A, Soden B J, Wittenberg A T, Held I M, Leetmaa A, Harrison M J. Weakening of tropical Pacific atmospheric circulation due to anthropogenic forcing. *Nature*, 2006, 441(7089): 73-76.
- [24] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, Novick K A, Poulter B, Siegwolf R T W, Sperry J S, McDowell N G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [25] Jung M, Reichstein M, Ciais P, Seneviratne S I, Sheffield J, Goulden M L, Bonan G, Cescatti A, Chen J Q, De Jeu R, Dolman A J, Eugster W, Gerten D, Gianelle D, Gobron N, Heinke J, Kimball J, Law B E, Montagnani L, Mu Q Z, Mueller B, Oleson K, Papale D, Richardson A D, Rouspard O, Running S, Tomelleri E, Viovy N, Weber U, Williams C, Wood E, Zaehle S, Zhang K. Recent decline in the global land evapotranspiration trend due to limited moisture supply. *Nature*, 2010, 467(7318): 951-954.
- [26] Sun Q H, Miao C Y, Duan Q Y, Ashouri H, Sorooshian S, Hsu K L. A review of global precipitation data sets: data sources, estimation, and intercomparisons. *Reviews of Geophysics*, 2018, 56(1): 79-107.
- [27] Gu G J, Adler R F. Spatial patterns of global precipitation change and variability during 1901-2010. *Journal of Climate*, 2015, 28(11): 4431-4453.
- [28] Adler R F, Gu G J, Sapiano M, Wang J J, Huffman G J. Global precipitation: means, variations and trends during the satellite era (1979-2014). *Surveys in Geophysics*, 2017, 38(4): 679-699.
- [29] Dai A G, Zhao T B, Chen J. Climate change and drought: a precipitation and evaporation perspective. *Current Climate Change Reports*, 2018, 4(3): 301-312.
- [30] Zhang W X, Furtado K, Wu P L, Zhou T J, Chadwick R, Marzin C, Rostron J, Sexton D. Increasing precipitation variability on daily-to-multiyear time scales in a warmer world. *Science Advances*, 2021, 7(31): eabf8021.
- [31] Sun Q H, Zhang X B, Zwiers F, Westra S, Alexander L V. A global, continental, and regional analysis of changes in extreme precipitation. *Journal of Climate*, 2021, 34(1): 243-258.
- [32] Zhang W X, Zhou T J. Significant increases in extreme precipitation and the associations with global warming over the global land monsoon regions. *Journal of Climate*, 2019, 32(24): 8465-8488.
- [33] 马柱国, 符淙斌. 20 世纪下半叶全球干旱化的事实及其与大尺度背景的联系. *中国科学 D 辑: 地球科学*, 2007, 37(2): 222-233.
- [34] Liang W G, Zhang M H. Summer and winter precipitation in East Asia scale with global warming at different rates. *Communications Earth & Environment*, 2021, 2(1): 150.
- [35] Fu Q, Feng S. Responses of terrestrial aridity to global warming. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 2014, 119(13): 7863-7875.
- [36] Pendergrass A G, Knutti R, Lehner F, Deser C, Sanderson B M. Precipitation variability increases in a warmer climate. *Scientific Reports*, 2017, 7(1): 17966.
- [37] Zhao S Y, Zhang H, Wang Z L, Jing X W. Simulating the effects of anthropogenic aerosols on terrestrial aridity using an aerosol-climate coupled model. *Journal of Climate*, 2017, 30(18): 7451-7463.
- [38] Zhao S Y, Suzuki K. Differing impacts of black carbon and sulfate aerosols on global precipitation and the ITCZ location via atmosphere and ocean energy perturbations. *Journal of Climate*, 2019, 32(17): 5567-5582.
- [39] 石广玉, 王标, 张华, 赵剑琦, 檀赛春, 温天雪. 大气气溶胶的辐射与气候效应. *大气科学*, 2008, 32(4): 826-840.
- [40] 黄建平, 季明霞, 刘玉芝, 张镭, 龚道溢. 干旱半干旱区气候变化研究综述. *气候变化研究进展*, 2013, 9(1): 9-14.
- [41] Ji M X, Huang J P, Xie Y K, Liu J. Comparison of dryland climate change in observations and CMIP5 simulations. *Advances in Atmospheric Sciences*, 2015, 32(11): 1565-1574.
- [42] Pan N, Wang S, Liu Y X, Li Y, Xue F, Wei F L, Yu H P, Fu B J. Rapid increase of potential evapotranspiration weakens the effect of precipitation on aridity in global drylands. *Journal of Arid Environments*, 2021, 186: 104414.
- [43] Sheffield J, Wood E F, Roderick M L. Little change in global drought over the past 60 years. *Nature*, 2012, 491(7424): 435-438.
- [44] Milly P C D, Dunne K A. Potential evapotranspiration and continental drying. *Nature Climate Change*, 2016, 6(10): 946-949.
- [45] 丛振涛, 倪广恒, 杨大文, 雷志栋. “蒸发悖论”在中国的规律分析. *水科学进展*, 2008, 19(2): 147-152.
- [46] 蒋冲, 王飞, 刘思洁, 穆兴民, 李锐, 刘焱序. “蒸发悖论”在秦岭南北地区的探讨. *生态学报*, 2013, 33(3): 844-855.
- [47] Dorigo W, De Jeu R, Chung D, Parinussa R, Liu Y, Wagner W, Fernández-Prieto D. Evaluating global trends (1988-2010) in harmonized multi-

- satellite surface soil moisture. *Geophysical Research Letters*, 2012, 39(18): L18405.
- [48] Feng H H, Zhang M Y. Global land moisture trends: drier in dry and wetter in wet over land. *Scientific Reports*, 2016, 5: 18018.
- [49] Berg A, Sheffield J, Milly P C D. Divergent surface and total soil moisture projections under global warming. *Geophysical Research Letters*, 2017, 44(1): 236-244.
- [50] Li L, Ni J R, Chang F, Yue Y, Frolova N, Magritsky D, Borthwick A G L, Ciais P, Wang Y C, Zheng C M, Walling D E. Global trends in water and sediment fluxes of the world's large rivers. *Science Bulletin*, 2020, 65(1): 62-69.
- [51] Cook B I, Mankin J S, Marvel K, Williams A P, Smerdon J E, Anchukaitis K J. Twenty-first century drought projections in the CMIP6 forcing scenarios. *Earth's Future*, 2020, 8(6): e01461.
- [52] Jackson R B, Jobbagy E G, Avissar R, Roy S B, Barrett D J, Cook C W, Farley K A, Le Maitre D C, McCarl B A, Murray B C. Trading water for carbon with biological carbon sequestration. *Science*, 2005, 310(5756): 1944-1947.
- [53] Wang Y P, Zhao W W, Wang S, Feng X M, Liu Y X. Yellow River water rebalanced by human regulation. *Scientific Reports*, 2019, 9: 9707.
- [54] Chai Y F, Yue Y, Zhang L, Miao C Y, Borthwick A G L, Zhu B Y, Li Y T, Dolman A J. Homogenization and polarization of the seasonal water discharge of global rivers in response to climatic and anthropogenic effects. *Science of the Total Environment*, 2020, 709: 136062.
- [55] Anav A, Friedlingstein P, Beer C, Ciais P, Harper A, Jones C, Murray-Tortarolo G, Papale D, Parazoo N C, Peylin P, Piao S L, Sitch S, Viovy N, Wiltshire A, Zhao M S. Spatiotemporal patterns of terrestrial gross primary production: a review. *Reviews of Geophysics*, 2015, 53(3): 785-818.
- [56] Campbell J E, Berry J A, Seibt U, Smith S J, Montzka S A, Launois T, Belviso S, Bopp L, Laine M. Large historical growth in global terrestrial gross primary production. *Nature*, 2017, 544(7648): 84-87.
- [57] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, Viovy N, Demarty J. Growing season extension and its impact on terrestrial carbon cycle in the Northern Hemisphere over the past 2 decades. *Global Biogeochemical Cycles*, 2007, 21(3): GB3018.
- [58] Zheng Y, Shen R Q, Wang Y W, Li X Q, Liu S G, Liang S L, Chen J M, Ju W M, Zhang L, Yuan W P. Improved estimate of global gross primary production for reproducing its long-term variation, 1982-2017. *Earth System Science Data*, 2020, 12(4): 2725-2746.
- [59] Chen J M, Ju W M, Ciais P, Viovy N, Liu R G, Liu Y, Lu X H. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nature Communications*, 2019, 10(1): 4259.
- [60] Zhang Y L, Song C H, Band L E, Sun G. No proportional increase of terrestrial gross carbon sequestration from the greening earth. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2019, 124(8): 2540-2553.
- [61] Piao S L, Wang X H, Park T, Chen C, Lian X, He Y, Bjerke J W, Chen A P, Ciais P, Tømmervik H, Nemani R R, Myneni R B. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nature Reviews Earth & Environment*, 2019, 1(1): 14-27.
- [62] Ahlström A, Raupach M R, Schurgers G, Smith B, Arneth A, Jung M, Reichstein M, Canadell J G, Friedlingstein P, Jain A K, Kato E, Poulter B, Sitch S, Stocker B D, Viovy N, Wang Y P, Wiltshire A, Zaehle S, Zeng N. The dominant role of semi-arid ecosystems in the trend and variability of the land CO₂ sink. *Science*, 2015, 348(6237): 895-899.
- [63] Poulter B, Frank D, Ciais P, Myneni R B, Andela N, Bi J, Broquet G, Canadell J G, Chevallier F, Liu Y Y, Running S W, Sitch S, Van Der Werf G R. Contribution of semi-arid ecosystems to interannual variability of the global carbon cycle. *Nature*, 2014, 509(7502): 600-603.
- [64] Yang J, Tian H Q, Pan S F, Chen G S, Zhang B W, Dangal S. Amazon drought and forest response: largely reduced forest photosynthesis but slightly increased canopy greenness during the extreme drought of 2015/2016. *Global Change Biology*, 2018, 24(5): 1919-1934.
- [65] Humphrey V, Berg A, Ciais P, Gentile P, Jung M, Reichstein M, Seneviratne S I, Frankenberg C. Soil moisture-atmosphere feedback dominates land carbon uptake variability. *Nature*, 2021, 592(7852): 65-69.
- [66] Liu L B, Gudmundsson L, Hauser M, Qin D H, Li S C, Seneviratne S I. Soil moisture dominates dryness stress on ecosystem production globally. *Nature Communications*, 2020, 11(1): 4892.
- [67] Stocker B D, Zscheischler J, Keenan T F, Prentice I C, Seneviratne S I, Peñuelas J. Drought impacts on terrestrial primary production underestimated by satellite monitoring. *Nature Geoscience*, 2019, 12(4): 264-270.
- [68] Pokhrel Y, Felfelani F, Satoh Y, Boulange J, Burek P, Gädeke A, Gerten D, Gosling S N, Grillakis M, Gudmundsson L, Hanasaki N, Kim H, Koutroulis A, Liu J G, Papadimitriou L, Schewe J, Schmied H M, Stacke T, Telteu C E, Thiery W, Veldkamp T, Zhao F, Wada Y. Global terrestrial water storage and drought severity under climate change. *Nature Climate Change*, 2021, 11(3): 226-233.
- [69] Rodell M, Famiglietti J S, Wiese D N, Reager J T, Beaudoing H K, Landerer F W, Lo M H. Emerging trends in global freshwater availability. *Nature*, 2018, 557(7707): 651-659.
- [70] Deng S S, Liu S X, Mo X G. Assessment of three common methods for estimating terrestrial water storage change with three reanalysis datasets. *Journal of Climate*, 2020, 33(2): 511-525.
- [71] Roderick M L, Greve P, Farquhar G D. On the assessment of aridity with changes in atmospheric CO₂. *Water Resources Research*, 2015, 51(7): 5450-5463.
- [72] Greve P, Seneviratne S I. Assessment of future changes in water availability and aridity. *Geophysical Research Letters*, 2015, 42(13): 5493-5499.
- [73] 王浩, 贾仰文, 王建华, 秦大庸, 周祖昊, 仇亚琴, 严登华. 人类活动影响下的黄河流域水资源演化规律初探. *自然资源学报*, 2005, 20

- (2): 157-162.
- [74] 冯伟, 王长青, 穆大鹏, 钟敏, 钟玉龙, 许厚泽. 基于 GRACE 的空间约束方法监测华北平原地下水储量变化. 地球物理学报, 2017, 60(5): 1630-1642.
- [75] Lu F, Hu H F, Sun W J, Zhu J J, Liu G B, Zhou W M, Zhang Q F, Shi P L, Liu X P, Wu X, Zhang L, Wei X H, Dai L M, Zhang K R, Sun Y R, Xue S, Zhang W J, Xiong D P, Deng L, Liu B J, Zhou L, Zhang C, Zheng X, Cao J S, Huang Y, He N P, Zhou G Y, Bai Y F, Xie Z Q, Tang Z Y, Wu B F, Fang J Y, Liu G H, Yu G R. Effects of national ecological restoration projects on carbon sequestration in China from 2001 to 2010. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2018, 115(16): 4039-4044.
- [76] Tong X W, Brandt M, Yue Y M, Horion S, Wang K L, Keersmaecker W D, Tian F, Schurgers G, Xiao X M, Luo Y Q, Chen C, Myneni R, Shi Z, Chen H S, Fensholt R. Increased vegetation growth and carbon stock in China karst via ecological engineering. *Nature Sustainability*, 2018, 1(1): 44-50.
- [77] 黄奕龙, 傅伯杰, 陈利顶. 黄土高原水土保持建设的环境效应. 水土保持学报, 2003, 17(1): 29-32.
- [78] 杨荣金, 傅伯杰, 刘国华, 马克明. 黄土丘陵沟壑区生态环境建设中的水问题——以延河流域为例. 环境科学, 2004, 25(2): 37-42.
- [79] 宁珍, 高光耀, 傅伯杰. 黄土高原流域水沙变化研究进展. 生态学报, 2020, 40(1): 2-9.
- [80] 安善涛, 焦磊, 梁伟, 严建武, 张为彬, 金朝, 纪秋磊, 王凤娇, 杨盼. 基于多源数据的黄土高原陆地水循环结构变化分析. 生态学报, 2021, 41(17): 6800-6813.
- [81] Huang J, Li Y, Fu C, Chen F, Fu Q, Dai A, Shinoda M, Ma Z, Guo W, Li Z, Zhang L, Liu Y, Yu H, He Y, Xie Y, Guan X, Ji M, Lin L, Wang S, Yan H, Wang G. Dryland climate change: recent progress and challenges. *Reviews of Geophysics*, 2017, 55(3): 719-778.
- [82] Feng X M, Fu B J, Zhang Y, Pan N Q, Zeng Z Z, Tian H Q, Lyu Y H, Chen Y Z, Ciais P, Wang Y P, Zhang L, Cheng L, Maestre F T, Fernández-Martínez M, Sardans J, Peñuelas J. Recent leveling off of vegetation greenness and primary production reveals the increasing soil water limitations on the greening earth. *Science Bulletin*, 2021, 66(14): 1462-1471.
- [83] Stringer L C, Mirzabaev A, Benjaminsen T A, Harris R M B, Jafari M, Lissner T K, Stevens N, Tirado-Von Der Pahlen C. Climate change impacts on water security in global drylands. *One Earth*, 2021, 4(6): 851-864.
- [84] 吕超群, 田汉勤, 黄耀. 陆地生态系统氮沉降增加的生态效应. 植物生态学报, 2007, 31(2): 205-218.
- [85] 宋长春, 宋艳宇, 王宪伟, 郭跃东, 孙丽, 张新厚. 气候变化下湿地生态系统碳、氮循环研究进展. 湿地科学, 2018, 16(3): 424-431.
- [86] Li Y, Piao S L, Li L Z X, Chen A P, Wang X H, Ciais P, Huang L, Lian X, Peng S S, Zeng Z Z, Wang K, Zhou L M. Divergent hydrological response to large-scale afforestation and vegetation greening in China. *Science Advances*, 2018, 4(5): eaar4182.
- [87] Lian X, Piao S L, Li L Z X, Li Y, Huntingford C, Ciais P, Cescatti A, Janssens I A, Peñuelas J, Buermann W, Chen A P, Li X Y, Myneni R B, Wang X H, Wang Y L, Yang Y T, Zeng Z Z, Zhang Y Q, McVicar T R. Summer soil drying exacerbated by earlier spring greening of northern vegetation. *Science Advances*, 2020, 6(1): eaax0255.
- [88] Forzieri G, Alkama R, Miralles D G, Cescatti A. Satellites reveal contrasting responses of regional climate to the widespread greening of earth. *Science*, 2017, 356(6343): 1180-1184.
- [89] 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. 大气科学学报, 2021, 44(5): 650-653.
- [90] 朴世龙, 张新平, 陈安平, 刘强, 连旭, 王旭辉, 彭书时, 吴秀臣. 极端气候事件对陆地生态系统碳循环的影响. 中国科学: 地球科学, 2019, 49(9): 1321-1334.
- [91] Zhou S, Zhang Y, Williams A P, Gentile P. Projected increases in intensity, frequency, and terrestrial carbon costs of compound drought and aridity events. *Science Advances*, 2019, 5(1): eaau5740.
- [92] Ciais P, Reichstein M, Viovy N, Granier A, Ogée J, Allard V, Aubinet M, Buchmann N, Bernhofer C, Carrara A, Chevallier F, De Noblet N, Friend A D, Friedlingstein P, Grünwald T, Heinesch B, Keronen P, Knohl A, Krinner G, Loustau D, Manca G, Matteucci G, Miglietta F, Ourcival J M, Papale D, Pilegaard K, Rambal S, Seufert G, Soussana J F, Sanz M J, Schulze E D, Vesala T, JValentini R. Europe-wide reduction in primary productivity caused by the heat and drought in 2003. *Nature*, 2005, 437(7058): 529-533.
- [93] 郑菲, 孙诚, 李建平. 从气候变化的新视角理解灾害风险、暴露度、脆弱性和恢复力. 气候变化研究进展, 2012, 8(2): 79-83.
- [94] 方修琦, 殷培红. 弹性、脆弱性和适应——IHDP 三个核心概念综述. 地理科学进展, 2007, 26(5): 11-22.
- [95] Barnes M L, Wang P, Cinner J E, Graham N A J, Guerrero A M, Jasny L, Lau J, Sutcliffe S R, Zamborain-Mason J. Social determinants of adaptive and transformative responses to climate change. *Nature Climate Change*, 2020, 10(9): 823-828.
- [96] 宋爽, 王帅, 傅伯杰, 陈海滨, 刘焱序, 赵文武. 社会—生态系统适应性治理研究进展与展望. 地理学报, 2019, 74(11): 2401-2410.