

DOI: 10.20103/j.stxb.202407111625

宋仕燕, 祁旭阳, 田露荷, 陆欣雨, 王颖颖, 吴侗昱, 张添佑. 黄土高原生态系统年总初级生产力响应干旱的时空动态. 生态学报, 2025, 45(10): 4916-4926.

Song S Y, Qi X Y, Tian L H, Lu X Y, Wang Y Y, Wu T Y, Zhang T Y. Response of annual gross primary productivity to different indices of aridity under climate change in the Loess Plateau. Acta Ecologica Sinica, 2025, 45(10): 4916-4926.

黄土高原生态系统年总初级生产力响应干旱的时空动态

宋仕燕, 祁旭阳, 田露荷, 陆欣雨, 王颖颖, 吴侗昱, 张添佑*

西北农林科技大学草业与草原学院, 杨凌 712100

摘要: 黄土高原生态系统是一个巨大的有机碳汇潜力库, 也是响应气候变化敏感的生态脆弱区。水资源供需不平衡引发的不同干旱严重威胁了区域生态系统碳汇功能。不同类型干旱对黄土高原生态系统年总初级生产力 (AGPP) 影响的解析仍然不足。采用黄土高原定位观测站点的 AGPP 数据、遥感估算的 AGPP (2004—2020 年) 和气候要素数据集, 解析了黄土高原生态系统 AGPP 时空动态变化, 探讨了干燥度指数 (AI)、大气饱和水汽压差 (VPD) 和土壤水分 (SM) 的时空动态格局及其与 AGPP 年际变异的响应模式。结果表明: 近 20 年 AGPP 总体增加了 38.30%, 主要植被恢复区的 AGPP 增加了 56.45%, 并且呈现出 AGPP 均值越大的区域增加速率越快的空间分异规律; SM 和 AI 具有显著的增加趋势, VPD 不具有显著的趋势性变化; AGPP 与 SM 和 AI 的年际变异具有显著的线性正相关关系, 而与 VPD 年际变异的相关性不显著。AGPP 与 SM、AI 和 VPD 的年际动态响应关系表明, 在主要植被恢复区和整体区域水文和气象干旱主导了区域生态系统 AGPP 的年际变异, 而大气干旱的影响不明显。研究成果将为区域生态环境建设和提升生态碳汇功能提供科学依据。

关键词: 年总初级生产力; 土壤水分; 大气饱和水汽压差; 干旱; 黄土高原

Response of annual gross primary productivity to different indices of aridity under climate change in the Loess Plateau

SONG Shiyan, QI Xuyang, TIAN Luhe, LU Xinyu, WANG Yingying, WU Tongyu, ZHANG Tianyou*

College of Grassland Agriculture, Northwest Agriculture and Forest University, Yangling 712100, China

Abstract: The Loess Plateau is a vast potential organic carbon pool and is also an ecologically fragile region, exhibiting sensitivity to climate change. Various types of droughts, stemming from the imbalance between water supply and demand, will have a profound and far-reaching impact on the steady enhancement of ecosystem carbon sinks. However, currently, research on the impacts of various types of droughts on the annual gross primary productivity (AGPP) in the Loess Plateau is still in its infancy. In this study, AGPP, soil moisture (SM), and climatic factors were used to analyze the temporal dynamics of AGPP. Additionally, the interannual variations of AGPP in relation to SM, aridity index (AI), and vapor pressure deficit (VPD) were explored for the period from 2004 to 2020 in the Loess Plateau. The results demonstrate that over the past 20 years, the overall growth rate of AGPP has reached 38.30%, and the AGPP in the major vegetation restoration area has increased by 56.45%. The temporal trends of AI and SM exhibited a remarkable inclination to ascend, whereas the temporal trends of VPD did not display any significant directional alterations. The temporal correlation pattern between AGPP and SM, AI, as well as VPD suggested that soil drought preponderantly governed the interannual variation of

基金项目: 陕西省重点研发计划 (2024SF-YBXM-555); 国家自然科学基金项目 (32201344); 中国博士后科学基金 (2023M742858)

收稿日期: 2024-07-11; 网络出版日期: 2025-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: t_youzhang@nwafu.edu.cn.

AGPP, while the influence of atmospheric drought remained relatively inconspicuous in the Loess Plateau. The research outcomes will supply a theoretical and practical foundation for the construction of the regional ecological environment and the enhancement of the ecological carbon sink.

Key Words: annual gross primary productivity; soil moisture; vapor pressure deficit; drought; the Loess Plateau

黄土高原位于温带半湿润和半干旱过渡区,是我国过去生态退化、生物多样性丧失和水土流失等生态环境问题集中体现的突出区域,也是近 20 年来植被生态恢复工程成效显著的典型示范区^[1]。退耕还林还草、退牧还草和天然林保护等生态环境改善措施取得了显著成效,植被盖度从 2001 年的 43.62% 扩增到了 2020 年的 62.83%^[2],水土保持率上升为 63.44%^[3]。然而,植被恢复过程中植被绿度与恢复力并不同步发生^[3],高耗水植物的引入、高密度种植方式和植被总量的持续增加导致生态系统需水量快速增加^[4]。随着黄土高原土壤干层面积的扩张和植被大规模的持续增长,生态系统供需水矛盾日渐突出^[3-5],植被恢复已经趋近于水资源植被承载力的阈值^[6],水资源短缺已经成为限制生态系统碳汇的主要因素。干旱是衡量生态系统供需水不平衡特征的参数,被广泛用于气候变化与生态环境响应和适应的研究领域^[7]。因此,阐明生态系统生产力响应干旱的时空变异模式及其影响因素,对生态系统水土保持、生物多样性维持和碳汇等功能提升具有重要意义。

根据干旱发生的条件以及描述干旱的因素不同,可以分为水文干旱、大气干旱和气象干旱等不同的类型^[8]。干燥度指数(AI)、土壤水分(SM)和饱和水汽压差(VPD)分别对应气象干旱、水文干旱和大气干旱,这些指标对塑造生态系统功能起着关键作用^[9-10]。AI 指示的气象干旱是应用最为广泛的干旱参数,相关研究表明全球陆地正在经历快速旱化,表现为干旱区的面积不断扩张和干旱程度的持续加剧^[11]。在全球范围内,温度和 VPD 都为升高趋势,预计未来这一趋势还将加速^[12]。然而,全球植被和 SM 的动态监测表明,干旱区的植被生产力和土壤含水量都在显著提高^[13-14]。地面观测数据、遥感资料和地球系统模型发现,水文干旱、气象干旱和大气干旱等指示参数具有不同的时空动态特征,并且与生态系统生产力具有不同的响应过程^[7]。因此,揭示不同干旱指标与生态系统生产力年际变异的响应模式,可以理解生态系统不同界面水分胁迫对生产力的影响。

SM 直接影响植物根系对养分和水分的吸收利用,而 VPD 会通过改变气孔大小作用于植物的光合作用和蒸腾作用^[15]。AI 可以通过地表蒸散发分别调节 SM 和 VPD 之间的耦合关系,从而改变植物根系和冠层对水分的利用效率^[7]。中外学者利用遥感资料、模型数据和涡度相关的定位观测等数据解析了不同类型干旱对植被生产力的影响。研究发现大气和土壤干旱的过程高度耦合,土壤水分—植被生长—大气干旱之间存在的非线性关系,从而导致不同干旱类型具有明显的区域特征^[10]。此外,过去多数研究仅从单一干旱指标解析干旱对植被生产力的影响,而对 SM、AI 和 VPD 三者之间如何影响植被生产力的研究较少。利用叶绿素荧光遥感(SIF)数据的研究表明,SM 主控了全球多数面积的植被生产力^[16],而通量观测和模型模拟的数据发现 VPD 主控了全球大多数通量塔的植被生产力^[17]。不同植物物种对 VPD 和 SM 年际动态的生理生态响应也存在很大差异^[18-19],导致在不同区域生产力与 VPD 和 SM 呈现出增加、减小和不显著的多种响应模式^[20-21]。因此,探究黄土高原主要植被恢复区 AGPP 对 VPD、SM 和 AI 年际变异的响应关系,可以有效反映土壤—植被—大气之间的相互作用关系,为深入理解植被恢复过程中不同形式干旱对生态系统碳汇功能的影响。

本研究以黄土高原定位观测数据,长时间序列的 AGPP 和 SM 遥感数据以及气候要素数据为基础,探究植被恢复区和整体区域 AGPP 及不同干旱指数的时空动态特征,揭示 AGPP 响应 VPD、SM 和 AI 的时空变异模式及其作用机制,深入理解生态系统的碳水循环过程及其平衡关系,为巩固生态系统碳汇和提升生态系统稳定性提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄土高原位于黄河中段($107^{\circ}28'E-111^{\circ}15'E, 35^{\circ}21'N-39^{\circ}34'N$),包括青海、甘肃、宁夏、内蒙古、山西、陕西、河南七省,面积约占国土面积的 6.7%(图 1)。该区域主要受温带大陆性季风气候的影响,多年平均温度为 $4-14^{\circ}C$,多年平均降水量 $200-750\text{ mm}$,横跨了半湿润、半干旱以及干旱区。黄土高原地形复杂,地势起伏大、沟壑纵横、地形复杂,大部分地区在海拔在 $800-2000\text{ m}$ 之间。气候带和植被类型由西北向东南呈明显的地带性分异规律。黄土高原主要植被恢复区位于黄土高原腹地,是干旱和半干旱区域的交界处(图 1)^[22]。主要植被恢复区的造林主要采用刺槐、杨树等速生耗水的物种为主要建群种,林分结构过于简单,导致生物多样性和生态功能的表现欠佳^[3]。

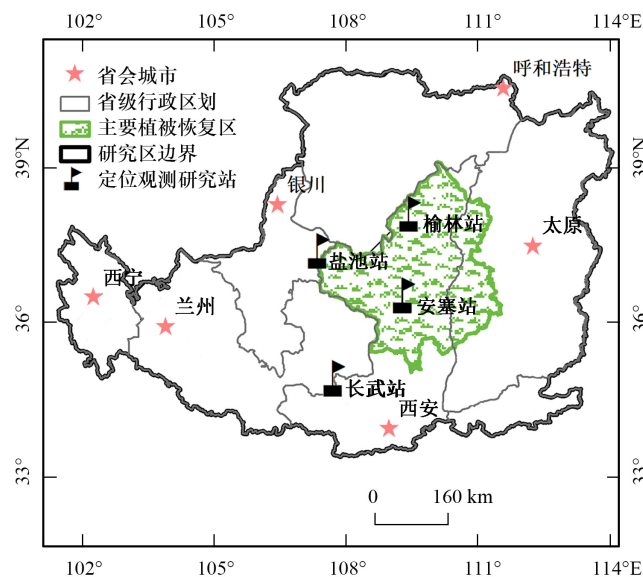


图 1 研究区示意图

Fig.1 Schematic diagram of the study area

1.2 数据来源

1.2.1 长时间时空连续和长期定位观测的 AGPP 数据

本研究采用的 AGPP 数据源自中国科学数据的 2004—2020 年中国陆地生态系统 AGPP 数据集(<http://www.csdata.org/p/858/#dataset-profile>),该数据集是基于 ChinaFLUX 长期联网观测和文献公开发表的 AGPP 观测数据集,结合气候、土壤和生物栅格数据,采用随机森林回归树的方法,实现了从站点向中国全域尺度扩展生成的 AGPP 数据集。数据空间分辨率约为 1 km ,时间跨度为 2004—2020 年,在中国区域的估算精度达到 85%^[23]。本研究采用了长武农田站(2005—2009)、安塞灌丛站(2016、2018 和 2019)、安塞草地站(2012、2013 和 2019)、榆林草地站(2011—2015)、盐池草地站(2012—2016)观测的 AGPP 数据,验证了在黄土高原区域估算植被 AGPP 的精度达到 90%(图 2)。

1.2.2 气候要素和 SM 数据

本文使用的气候数据包括温度、降水、潜在蒸散发(PET)和相对湿度(RH)数据。其中温度、降水和 PET 数据产品分别源自国家青藏高原科学数据中心的逐月平均气温、降水量和在蒸散发的数据集(<https://data.tpdc.ac.cn/home>),其空间分辨率为 1 km ,涵盖了 1901 年至今的数据^[24-25]。RH 数据产品源自国家地球系统科学数据中心的 1 km 分辨率月相对湿度数据集(<http://www.geodata.cn>),该数据是利用中国地面 824 个基准、基本气象台站相对湿度的月值资料,采用 ANUSPLIN 软件的薄盘样条法(TPS)进行空间插值,并综合全

国 1 km 分辨率的地形图数据生成^[26]。

SM 数据源自地球与环境科学数据平台 (PANGAEA) 的 2003—2020 全球表层土壤水分数据集 (<https://doi.pangaea.de/10.1594/PANGAEA.940004>)。该数据以全球公认的 11 种微波遥感表层土壤水分产品为基础,融合了 9 个影响反演过程的主要因子,采用神经网络计算方法研发的数据集,空间分辨率为 0.1°,时间分辨率为 10 d^[14]。本文采用双线性内插方法将 AGPP、SM、AI 和 VPD 重采样到 0.05°,同时均采用算术平均计算得到年值,时间跨度为 2004—2020 年。

1.2.3 干旱指标计算

本文采用气候数据中的降水和潜在蒸散发计算得出 AI,温度和相对湿度数据计算得出 VPD。AI 定义为降水 (AP, mm) 与潜在蒸散发 (PET, mm) 的比值^[27]:

$$AI = AP / PET \quad (1)$$

VPD 是在给定某一空气温度时的饱和水汽压 (SVP, kPa) 与实际水汽压 (AVP, kPa) 的差值,广泛用于评估大气干旱状况的指标, SVP 可直接由温度 (T , °C) 计算得到^[28]:

$$SVP = 0.6108 e^{12.27 \times (T / (T + 237.3))} \quad (2)$$

式中, T 为温度; SVP 为饱和水汽压。实际水汽压 AVP (kPa) 则根据相对湿度 (RH) 计算:

$$AVP = SVP \times RH / 100 \quad (3)$$

最终计算得到 VPD:

$$VPD = SVP - AVP \quad (4)$$

1.3 分析方法

1.3.1 AGPP、AI、VPD 和 SM 的年际动态变化

本文采用一元线性回归法对黄土高原 AGPP、AI、VPD 和 SM 的年际动态进行分析,趋势线斜率 (β) 表示年际变化趋势^[29]:

$$y = \alpha + \beta x + \varepsilon \quad (5)$$

式中, y 表示 AGPP、AI、VPD 和 SM, x 为年份; α 为方程的截距; ε 为方程的残差; β 为斜率, 表示年际变化趋势。 β 大于 0 表示上升趋势; β 小于 0 表示下降趋势, 利用 t 检验对 β 进行显著性检验, 通过 95% 置信水平表示趋势显著。

1.3.2 AGPP、AI、VPD 和 SM 的年际动态变化趋势

本文采用 Theil-Sen Median 趋势法分析 AGPP、AI、VPD 和 SM 栅格尺度的年际变化特征, 计算公式为^[30]:

$$\beta = \text{median} \left(\frac{x_i - x_j}{i - j} \right) \quad (\forall i < j) \quad (6)$$

式中, x_i 和 x_j 分别为第 i 年和第 j 年的值。 β 大于 0 表示上升趋势; β 小于 0 表示下降趋势。

1.3.3 线性相关性

采用一般线性回归模型分析黄土高原 AI、VPD 和 SM 与 AGPP 的响应关系, 计算公式如下^[31]:

$$Y = \alpha + \beta X_i + \varepsilon \quad (7)$$

式中, Y 表示 AGPP; X_i 表示 AI、VPD 和 SM。

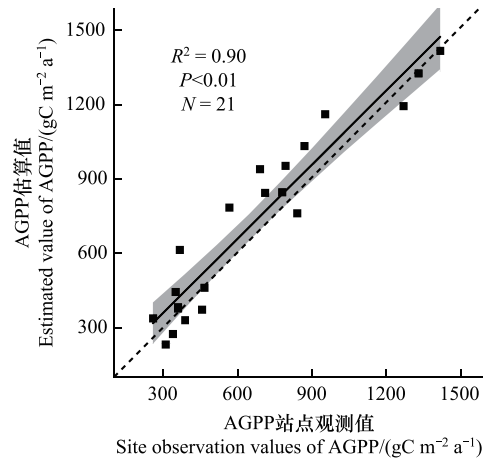


图 2 AGPP 定位观测数据与遥感估算数据的相关性

Fig.2 Correlation between AGPP observation data and remote sensing estimation data

阴影表示 95% 的置信区间

2 结果与分析

2.1 AGPP 的空间分布和年际动态特征

黄土高原整体 AGPP 多年平均值呈现出自东南向西北方向递减的分异规律(图 3)。整体 AGPP 多年平均值具有较大的空间分异特征,空间变异范围为 0—2160.13 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,平均值为 657.58 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,标准偏差为 421.87 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,偏度为 0.87 的正偏态分布特征(图 3)。主要植被恢复区 AGPP 多年平均值的频率分布具有明显的积聚性特征,空间变异范围为 133.49—2022.74 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,平均值为 673.98 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,标准差为 369.90 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,偏度为 1.31 的正偏态分布特征(图 3)。主要植被恢复区 AGPP 多年平均值同样呈现出自南向北逐渐递减的分异规律,其平均值大于黄土高原整体区域的平均值(图 3)。

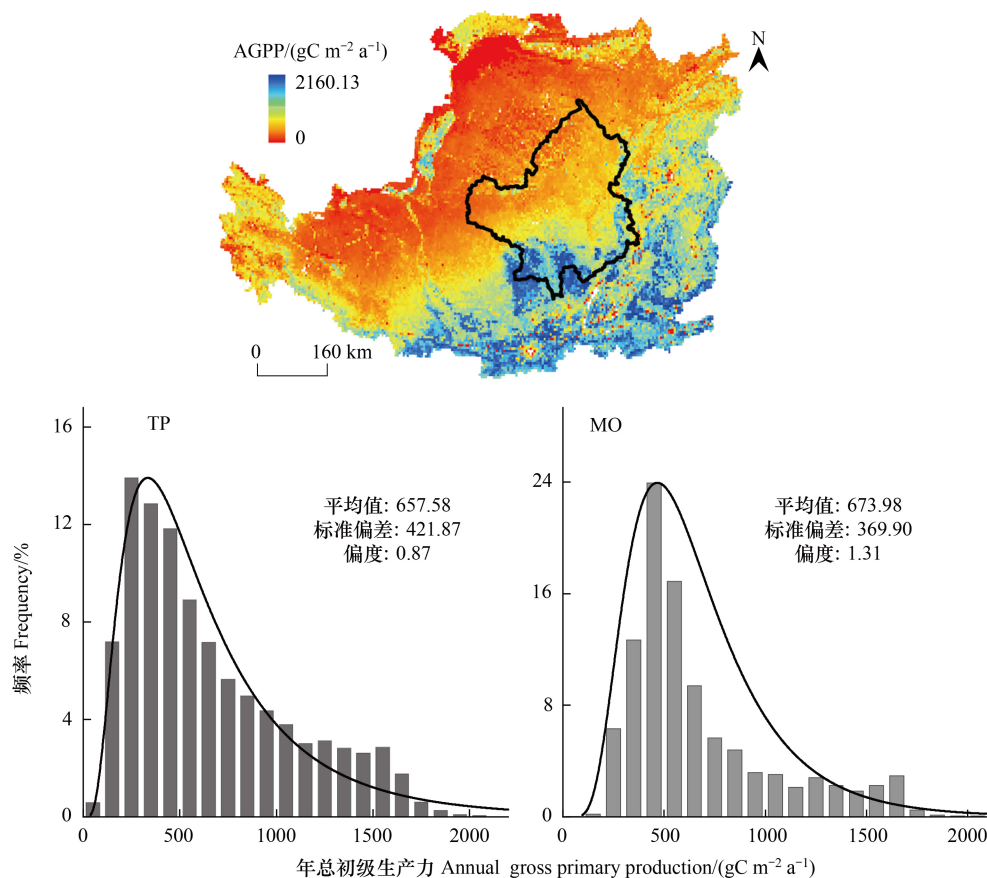


图 3 2004—2020 年 AGPP 平均值的空间格局及黄土高原整体 (TP) 和主要植被恢复区 (MO) 的统计特征

Fig.3 Spatial patterns and statistical characteristics of the average AGPP of TP and MO from 2004 to 2020

2004—2020 年,黄土高原整体 AGPP 年际动态为增加的变化趋势,从 583.47 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 增加到了 806.95 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,增加速率为 15.75 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ ($P < 0.001$),增加幅度为 223.48 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,增加了 38.30% (图 4)。在主要植被恢复区,AGPP 的增加速率大于整体区域,从 551.72 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 增加到了 863.20 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,增加速率为 23.08 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,增加幅度为 311.48 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,增加了 56.45% (图 4)。自 2009 年以后,主要植被恢复区的 AGPP 的平均值开始大于黄土高原区域平均值。近 20 年,黄土高原植被变化速率范围为 -40.8—60.0 $\text{g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$,整体和主要植被恢复区 AGPP 呈显著增加趋势的面积分别占比为 83% 和 95%,而下降的面积仅占 0.6% 和 0.3% (图 4)。

2.2 干旱指标的年际动态及其空间变化特征

过去 20 年,黄土高原 SM、AI 和 VPD 年际动态的整体变化趋势及其空间格局存在很大差异(图 5)。在整

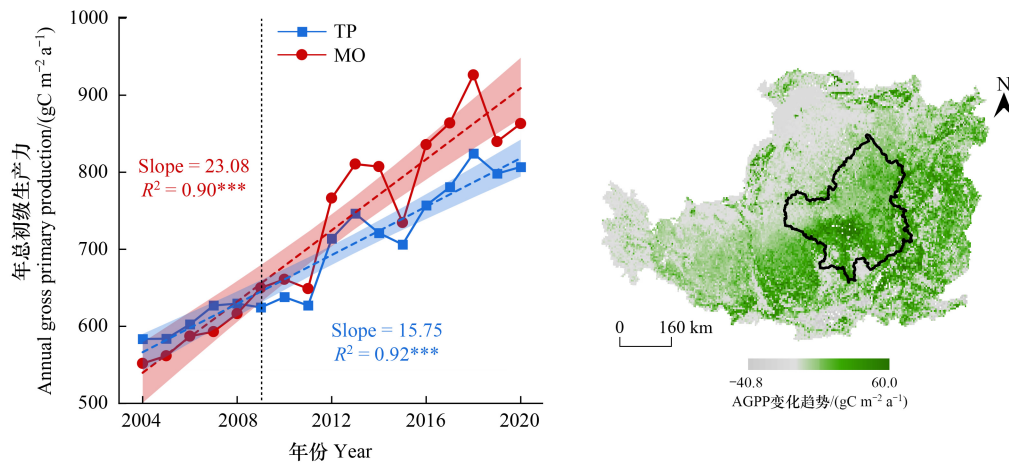


图4 2004—2020年AGPP的时间动态及变化趋势的空间特征

Fig.4 Spatial features of the temporal dynamics and trends in AGPP from 2004 to 2020

阴影表示 95%的置信区间

体区域和主要植被恢复区, SM 的年际动态都为显著增加的趋势 ($Slope = 0.001 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ a}^{-1}$, $P < 0.01$), 并且整体区域 SM 的平均值均大于主要植被恢复区, 变化趋势范围为 $-0.009 \sim 0.004 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3} \text{ a}^{-1}$ (图5)。在整体区域, SM 显著增加的面积占 59%, 而显著减小的面积占 1%。在主要植被恢复区, SM 显著增加的面积占 63% (图5)。在整体区域和主要植被恢复区, AI 为显著增加的变化趋势, 增加速率分别为 0.005 ($P < 0.05$) 和 0.006 ($P < 0.05$), 显著增加的面积分别占 32% 和 55% (图5)。在整体区域 VPD 年际动态的变化趋势显著减小和增加的面积分别占 12% 和 8%, 在主要植被恢复区显著减小的面积占 32% (图5)。

2.3 AGPP 与 SM 、 VPD 和 AI 的年际变异关系及驱动因素

在 2004—2020 年, 黄土高原整体区域和主要植被恢复区 AGPP 与 SM 和 AI 都具有显著的相关性, 而 AGPP 与 VPD 不具有显著的响应关系 (图6)。AGPP 与 SM 的年际变异为显著的正相关线性变化关系, 并且植被恢复区 AGPP 与 SM 相关性更强 (图6)。AGPP 与 AI 的相关性和 AGPP 与 SM 关系相似, 也为显著的正相关线性变化关系, 并且植被恢复区 AGPP 与 AI 的相关性更强 (图6)。相比较而言, AGPP 与 SM 的相关性比与 AI 的相关性更强, AGPP 的年际动态主要受 SM 的调控。

利用 AGPP 与 SM 、 AI 和 VPD 年际变异的偏相关分析得出, 在整体区域 SM 、 AI 和 VPD 促进 AGPP 的面积分别占 16%、31% 和 3%, 在主要植被恢复区分别占 25%、39% 和 10% (图7)。 SM 、 AI 和 VPD 为整体区域 AGPP 增加的贡献度分别占 24%、10% 和 7%, 而对主要植被恢复区贡献度分别占 31%、15% 和 4% (图7)。综上所述, 黄土高原 AGPP 的增加主要受 SM 和 AI 调控, 受 VPD 的影响不明显。

3 讨论

3.1 黄土高原生态系统 AGPP 年际动态变化

本研究发现, 过去 20 年黄土高原生态系统 AGPP 快速增加, 与 2004 年相比 AGPP 整体平均增加了 38.30%, 而主要植被恢复区增加了 56.45% (图4)。主要植被恢复区的增加速率明显大于区域的平均增速, 表明生态恢复区发挥了重要的碳汇功能。已有研究表明, 黄土高原植被盖度从 2001 年 43.62% 扩增至 2020 年的 62.83%, 是全国植被增绿最为显著的区域^[2-4]。此外, 在 2004—2015 年间, 黄土高原生态系统 AGPP 呈显著的增加趋势, 并且水分利用效率也在同步增加, 表明区域植被的增加加速了植被耗水^[32]。2004 与 2015 年的土地利用变化数据对比表明, 耕地与未利用地面积分别减少了 1.67% 和 0.57%, 而林地和草地面积分别增加了 0.55% 和 0.08%^[33]。黄土高原植被盖度和叶面积指数的研究也表明, 植被盖度和叶面积指数的快速增

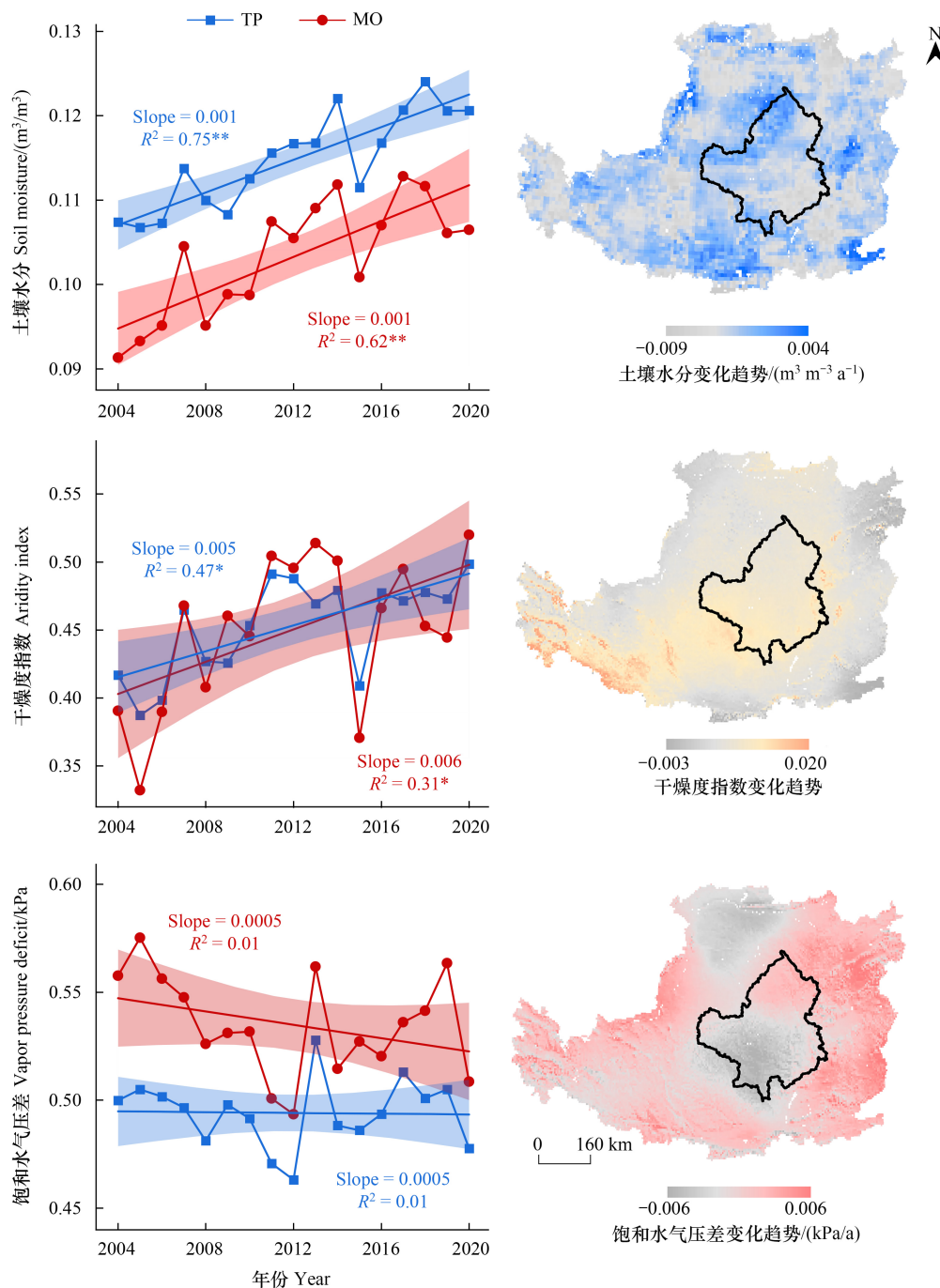


图5 2004—2020年SM、AI和VPD的时间动态和变化趋势的空间格局

Fig.5 Spatial features of the temporal dynamics and trends in SM, AI, and VPD from 2004 to 2020

阴影表示 95% 的置信区间

加,显著提高了区域植被的光合能力,促进了生态系统生产力^[34—35]。

主要植被恢复区 AGPP 的增加速率大于整体区域,并自 2009 年后主要植被恢复区 AGPP 大于整体区域 (图 4)。退耕还林还草工程促进了黄土高原区域 AGPP 的增加,退耕区域 AGPP 的增加速率明显高于未退耕区^[33]。人工植树造林和植被恢复引起的土地利用变化导致植物功能群的改变,直接改变了区域生态系统碳汇能力。随着植被的快速恢复,植被群落正向演替生成的枯落物累积和分解会有效增加土壤有机质含量^[36],群落演替激发土壤有机质含量增加的正反馈机制会增速植被恢复过程,有利于提升区域碳汇功能^[37]。与此

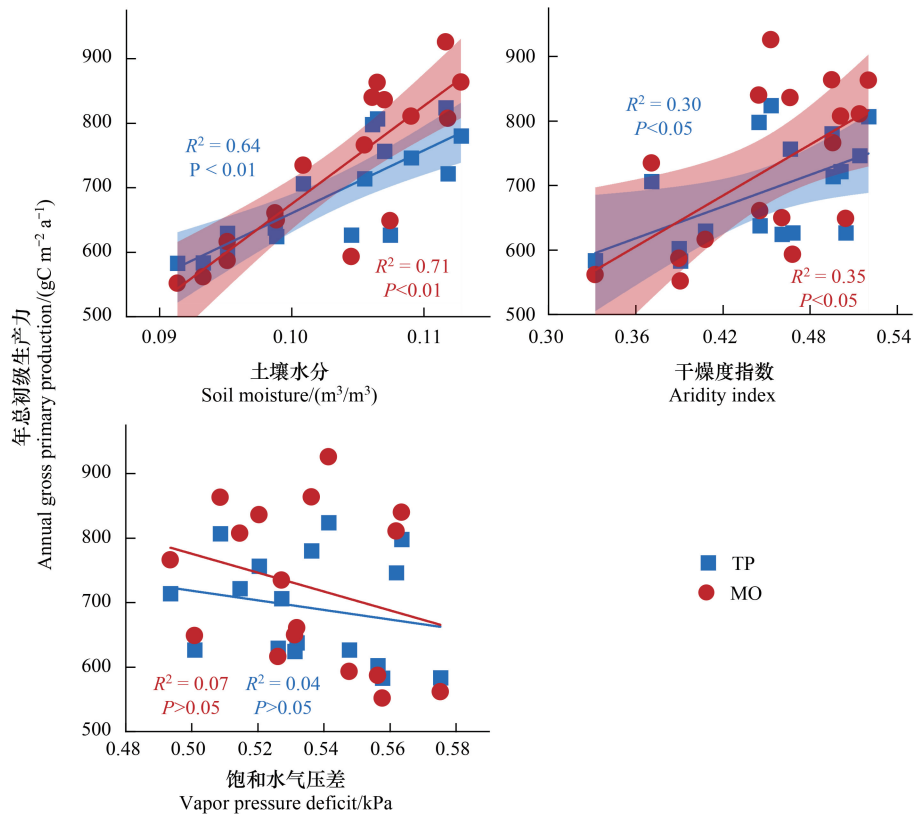


图6 2004—2020年SM、AI和VPD与AGPP年际变异的响应关系

Fig.6 Response relationships of interannual variability of SM, AI, and VPD to AGPP from 2004 to 2020

阴影表示 95% 的置信区间

同时,人工植树造林和植被恢复会改变区域气候和能量平衡,森林面积大幅增加产生了加热效应,而植被恢复导致蒸散发增加起到了降温作用^[38],并且植被恢复有助于局地降水量的增加^[39],从而增强生态系统的碳汇功能。

3.2 不同干旱对生态系统 AGPP 的影响

黄土高原植被恢复引起的 AGPP 快速增加,显著改变了区域物质和能量的循环模式。有研究指出,黄土高原水资源能够承载的植被净初级生产力已经接近最大阈值,水资源短缺成为阻碍区域可持续发展的关键^[3]。SM、AI 和 VPD 可以从植物根系吸收水分和植被冠层气孔水势等不同方面反映干旱对生态系统生产力的影响^[12]。在土壤和空气水分亏缺条件下,植物会通过气孔缩小或关闭减少水分流失,从而共同调控植物蒸腾、光合和呼吸等代谢过程^[40]。SM 和 AI 与 AGPP 的年际变异有显著的正相关关系,并且主要植被恢复区的 AGPP 与 SM 和 AI 的相关性更强。AI 的增加可以有效补给土壤水分,或者通过减少土壤水分的流失促进植被生产力。SM 是植物生长所需水分的直接来源和运输营养物质的载体,不断增加植被覆盖度会增强植物的蒸腾作用和树冠截留蒸发,但同时会减少土壤水分蒸发^[41]。植被覆盖度增大导致增加的蒸散量会被土壤蒸发减少的蒸散量在一定程度上抵消,从而提高水分利用效率,有效提升黄土高原生态系统的光合能力^[22]。然而,也有研究表明退耕还林还草引起的土地利用变化会导致土壤水分的减少,加速土壤的干旱^[42]。黄土高原人工植树造林和植被恢复有助于水土保持,从而与植被生长形成正反馈的循环模式。与此同时,植被增加与土壤水分消耗之间非平衡的增强可能引发新的生态风险。

VPD 对植物叶片的气孔导度有直接影响,VPD 增加能够促进叶片表面的气孔张开,有利于植被更好地吸收水分以进行光合作用和正常生理活动。VPD 还与植物液流、水分利用效率等有显著的相关关系^[22]。本研

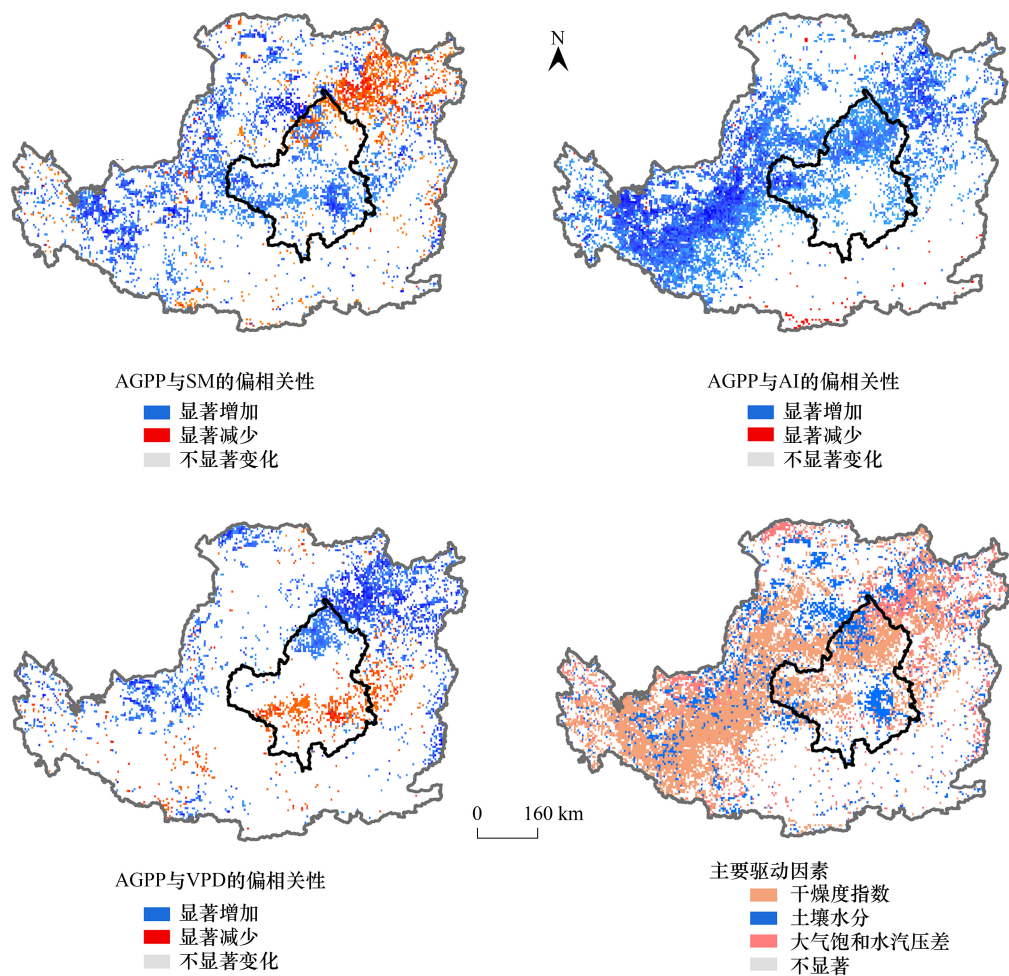


图7 2004—2020年SM、AI和VPD与AGPP与年际变异的偏相关,以及对AGPP年际变异贡献最大的驱动因素
Fig.7 Partial correlation coefficients of SM , AI and VPD , and contributes of factors to AGPP from 2004 to 2020

究发现在黄土高原区域尺度 VPD 与 AGPP 的响应关系并不显著,大气水分亏缺对植被生产力的影响有限。有研究表明,VPD 超过一定阈值时会导致植物降低气孔开度以阻止过多的水分流失,从而抑制植物的生长^[43]。VPD 的促进和抑制作用相互抵消会导致 AGPP 与 VPD 年际变异响应关系不显著。

3.3 不足与展望

黄土高原的地形复杂,丘陵沟壑作为植被恢复的典型区域,其水循环的各组分具有很强的空间异质性。在植被恢复过程中,水资源已经成为限制植被恢复成效的重要因素。本研究采用时空连续的 AI、VPD 和 SM 数据解析了不同干旱对 AGPP 时空动态的影响,尤其对比分析了主要植被恢复区和其它区域的响应特征。土壤水分作为直接作用植物生长的要素之一,表层和深层土壤水分会分别在短期和长期时间尺度上影响植被的恢复上限,然而缺乏高精度长时间序列的土壤不同深度水分数据,对于深层土壤水分潜在影响的研究仍然不足,未来研究需要结合土壤分层含水量的样点数据,同化生成长时间序列土壤多层水分数据,加强不同深度土壤水分对植被生长的作用强度和时间效应,提高土壤水分影响植被恢复过程的理论认知。除此之外,黄土高原植被恢复区具有复杂的地貌特征,需要加强不同地形结构的干旱变化及其对植被生长的影响,为植被恢复和碳汇功能的稳定提升提供参考。

4 结论

黄土高原是植被恢复建设取得显著成效的典型区域,水资源短缺引发的不同类型干旱会对生态系统碳汇

功能提升带来机遇与挑战。气候变化和人类活动影响下,揭示不同类型干旱对生态系统碳水循环的影响显得愈发重要。研究利用黄土高原长时间序列的 AGPP 和气候要素数据,明确了生态系统 AGPP 的时空格局,并揭示了 AGPP 响应 SM 、 AI 和 VPD 的年际变异模式。近 20 年,黄土高原生态系统的 AGPP 总体为增加趋势,主要植被恢复区的 AGPP 增加速率高于区域平均值,并且呈现出生产力越大增加速率越快的空间格局,表明生态修复措施提升生态系统碳汇功能的成效显著。 SM 和 AI 可以显著促进 AGPP 的增加,并且主要植被恢复区 AGPP 响应 SM 和 AI 更敏感,而 VPD 与 AGPP 年际变异不具有显著的相关性,对生态系统碳汇功能的影响不明显。在未来黄土高原人工植树造林和植被恢复的研究中,要重视不同深度土壤水分消耗与植被增长的相互作用关系,同时更需要加强植被规模增加引发生态灾变潜在风险的土壤水分临界阈值,为生态环境建设和高质量发展提供可靠支撑。

参考文献 (References):

- [1] 杨阳, 张萍萍, 吴凡, 周媛媛, 宋怡, 王云强, 安韶山. 黄土高原植被建设及其对碳中和的意义与对策. 生态学报, 2023, 43(21): 9071-9081.
- [2] 姚楠, 董国涛, 薛华柱. 基于 Google Earth Engine 的黄土高原植被覆盖度时空变化特征分析. 水土保持研究, 2024, 31(1): 260-268.
- [3] Wang Z Z, Fu B J, Wu X T, Li Y J, Feng Y H, Wang S, Wei F L, Zhang L W. Vegetation resilience does not increase consistently with greening in China's Loess Plateau. Communications Earth & Environment, 2023, 4: 336.
- [4] 傅伯杰, 刘彦随, 曹智, 王壮壮, 武旭同. 黄土高原生态保护和高质量发展现状、问题与建议. 中国科学院院刊, 2023, 38(8): 1110-1117.
- [5] Hu Z M, Yu G R, Fu Y L, Sun X M, Li Y N, Shi P L, Wang Y F, Zheng Z M. Effects of vegetation control on ecosystem water use efficiency within and among four grassland ecosystems in China. Global Change Biology, 2008, 14(7): 1609-1619.
- [6] Feng X M, Fu B J, Piao S L, Wang S, Ciais P, Zeng Z Z, Lü Y H, Zeng Y, Li Y, Jiang X H, Wu B F. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. Nature Climate Change, 2016, 6: 1019-1022.
- [7] Lian X, Piao S L, Chen A P, Huntingford C, Fu B J, Li L Z, 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: 232-250.
- [8] Zhang Y, Zhang Y J, Lian X, Zheng Z T, Zhao G, Zhang T, Xu M J, Huang K, Chen N, Li J, Piao S L. Enhanced dominance of soil moisture stress on vegetation growth in Eurasian drylands. National Science Review, 2023, 10(8): nwad108.
- [9] Berdugo M, Delgado-Baquerizo M, Soliveres S, Hernandez-Clemente R, Zhao Y C, Gaitán J J, Gross N, Saiz H, Maire V, Lehman A, Rillig M C, Solé R V, Maestre F T. Global ecosystem thresholds driven by aridity. Science, 2020, 367(6479): 787-790.
- [10] Zhong Z Q, He B, Wang Y P, Chen H W, Chen D L, Fu Y S, Chen Y N, Guo L L, Deng Y, Huang L, Yuan W P, Hao X M, Tang R, Liu H M, Sun L Y, Xie X M, Zhang Y F. Disentangling the effects of vapor pressure deficit on northern terrestrial vegetation productivity. Science Advances, 2023, 9(32): eadf3166.
- [11] 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: 166-171.
- [12] 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, 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.
- [13] 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: 122-129.
- [14] Chen Y Z, Feng X M, Tian H Q, Wu X T, Gao Z, Feng Y, Piao S L, Lv N, Pan N Q, Fu B J. Accelerated increase in vegetation carbon sequestration in China after 2010: a turning point resulting from climate and human interaction. Global Change Biology, 2021, 27(22): 5848-5864.
- [15] Gupta A, Rico-Medina A, Caño-Delgado A I. The physiology of plant responses to drought. Science, 2020, 368(6488): 266-269.
- [16] 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.
- [17] Lu H B, Qin Z C, Lin S R, Chen X Z, Chen B Z, He B, Wei J, Yuan W P. Large influence of atmospheric vapor pressure deficit on ecosystem production efficiency. Nature Communications, 2022, 13(1): 1653.
- [18] Cernusak L A, Goldsmith G R, Arend M, Siegwolf R T. Effect of vapor pressure deficit on gas exchange in wild-type and abscisic acid-insensitive plants. Plant Physiology, 2019, 181(4): 1573-1586.

- [19] Grossiord C, Buckley T N, Cernusak L A, Novick K A, Poulter B, Siegwolf R T, Sperry J S, McDowell N G. Plant responses to rising vapor pressure deficit. *New Phytologist*, 2020, 226(6): 1550-1566.
- [20] 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.
- [21] Fu Z, Ciais P, Prentice C I, Gentile P, Makowski D, Bastos A, Luo X Z, Green J K, Stoy P C, Yang H, Hajima T. Atmospheric dryness reduces photosynthesis along a large range of soil water deficits. *Nature Communications*, 2022, 13(1): 989.
- [22] Zheng H, Lin H, Zhou W J, Bao H, Zhu X J, Jin Z, Song Y, Wang Y Q, Liu W Z, Tang Y K. Revegetation has increased ecosystem water-use efficiency during 2000—2014 in the Chinese Loess Plateau: Evidence from satellite data. *Ecological Indicators*, 2019, 102: 507-518.
- [23] 范仁雪, 朱先进, 陈智, 于贵瑞, 张维康, 韩朗, 王秋风, 陈世革, 刘绍民, 王辉民, 闫俊华, 谭俊磊, 张法伟, 赵风华, 李英年, 张一平, 石培礼, 朱教君, 吴家兵, 赵仲辉, 郝彦宾, 沙丽清, 张玉翠, 姜世成, 顾峰雪, 吴志祥, 张扬建, 周莉, 唐亚坤, 贾丙瑞, 李玉强, 宋清海, 董刚, 高艳红, 蒋正德, 孙聘, 王建林, 何其华, 李新虎, 王飞, 魏文学, 邓正苗, 郝翔翔, 李彦, 刘晓利, 章熙锋, 朱治林. 2000—2020 年中国陆地生态系统年总初级生产力数据集. *中国科学数据*, 2023, 8(2): 160-172.
- [24] Ding Y X, Peng S Z. Spatiotemporal change and attribution of potential evapotranspiration over China from 1901 to 2100. *Theoretical and Applied Climatology*, 2021, 145(1): 79-94.
- [25] Peng S Z, Ding Y X, Liu W Z, Li Z. 1 km monthly temperature and precipitation dataset for China from 1901 to 2017. *Earth System Science Data*, 2019, 11(4): 1931-1946.
- [26] Sun W Y, Song X Y, Mu X M, Gao P, Wang F, Zhao G J. Spatiotemporal vegetation cover variations associated with climate change and ecological restoration in the Loess Plateau. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2015, 209: 87-99.
- [27] Zhou W X, Li C J, Fu B J, Wang S, Ren, Z B, Stringer L C. Changes and drivers of vegetation productivity in China's drylands under climate change. *Environmental Research Letters*, 2024, 19: 114001.
- [28] 袁瑞瑞, 黄萧霖, 郝璐. 近 40 年中国饱和水汽压差时空变化及影响因素分析. *气候与环境研究*, 2021, 26(4): 413-424.
- [29] 郑周涛, 张扬建. 1982—2018 年青藏高原水分利用效率变化及归因分析. *植物生态学报*, 2022, 46(12): 1486-1496.
- [30] 黄森旺, 李晓松, 吴炳方, 裴亮. 近 25 年三北防护林工程区土地退化及驱动力分析. *地理学报*, 2012, 67(5): 589-598.
- [31] 张心竹, 王鹤松, 延昊, 艾金龙. 2001—2018 年中国总初级生产力时空变化的遥感研究. *生态学报*, 2021, 41(16): 6351-6362.
- [32] Cao R C, Hu Z M, Jiang Z Y, Yang Y T, Zhao W, Wu G N, Feng X M, Chen R R, Hao G C. Shifts in ecosystem water use efficiency on China's Loess Plateau caused by the interaction of climatic and biotic factors over 1985—2015. *Agricultural and Forest Meteorology*, 2020, 291: 108100.
- [33] 尤南山, 董金玮, 肖桐, 刘纪远, Xiao X M. 退耕还林还草工程对黄土高原植被总初级生产力的影响. *地理科学*, 2020, 40(2): 315-323.
- [34] 贺洁, 何亮, 吕渡, 程卓, 薛帆, 刘宝元, 张晓萍. 2001—2020 年黄土高原光合植被时空变化及其驱动机制. *植物生态学报*, 2023, 47(3): 306-318.
- [35] Hu Z M, Shi H, Cheng K L, Wang Y P, Piao S L, Li Y, Zhang L, Xia J Y, Zhou L, Yuan W P, Running S, Li L H, Hao Y B, He N P, Yu Q, Yu G R. Joint structural and physiological control on the interannual variation in productivity in a temperate grassland: a data-model comparison. *Global Change Biology*, 2018, 24(7): 2965-2979.
- [36] An S S, Darboux F, Cheng M. Revegetation as an efficient means of increasing soil aggregate stability on the Loess Plateau (China). *Geoderma*, 2013, 209: 75-85.
- [37] Yang Y, Dou Y X, Cheng H, An S S. Plant functional diversity drives carbon storage following vegetation restoration in Loess Plateau, China. *Journal of Environmental Management*, 2019, 246: 668-678.
- [38] Xiao J F. Satellite evidence for significant biophysical consequences of the "Grain for Green" program on the Loess Plateau in China. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*, 2014, 119(12): 2261-2275.
- [39] 张宝庆, 田磊, 赵西宁, 吴普特. 植被恢复对黄土高原局地降水的反馈效应研究. *中国科学: 地球科学*, 2021, 51(7): 1080-1091.
- [40] López J, Way D A, Sadok W. Systemic effects of rising atmospheric vapor pressure deficit on plant physiology and productivity. *Global Change Biology*, 2021, 27(9): 1704-1720.
- [41] Piao S L, Friedlingstein P, Ciais P, de Noblet-Ducoudre 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.
- [42] Wang Y Q, Hu W, Sun H, Zhao Y L, Zhang P P, Li Z M, Zhou Z X, Tong Y P, Liu S Z, Zhou J X, Huang M B, Jia X X, Clothier B, Shao M A, Zhou W J, An Z S. Soil moisture decline in China's monsoon loess critical zone: More a result of land-use conversion than climate change. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 2024, 121(15): e2322127121.
- [43] 闫敏, 李增元, 田昕, 陈尔学, 谷成燕. 黑河上游植被总初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应. *植物生态学报*, 2016, 40(1): 1-12.