



ELSEVIER

Contents lists available at ScienceDirect

Engineering

journal homepage: www.elsevier.com/locate/eng



Research
Environmental Engineering—Article

植被绿度、生产力和降雨利用效率的差异变化是黄河流域生态修复高质量发展发展的特征

于洋^{a,b,*}, 华廷^{c,d}, 陈利顶^e, 张志强^{a,b}, Paulo Pereira^f

^a Jixian National Forest Ecosystem Observation and Research Station, National Ecosystem Research Network of China (CNERN), School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

^b School of Soil and Water Conservation, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China

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

^d Institute of Land Surface System and Sustainable Development, Faculty of Geographical Science, Beijing Normal University, Beijing 100875, China

^e State Key Laboratory of Urban and Regional Ecology, Research Center for Eco-Environmental Sciences, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100085, China

^f Environmental Management Laboratory, Mykolas Romeris University, Vilnius 08303, Lithuania

ARTICLE INFO

Article history:

Received 30 January 2023

Revised 1 July 2023

Accepted 11 July 2023

Available online 14 September 2023

关键词

植被绿度

植被生产力

降雨利用效率

敏感性

黄河流域

摘要

全球范围内,植被的空间范围和演变趋势正发生剧烈变化。植被-水动态是了解水资源有限地区的生态系统结构与功能的关键。持续的卫星观测已经揭示了全球植被广泛变绿的现象,然而植被绿度的增加并不意味着生态系统功能的提升,必须更充分地理解植被和降雨之间复杂的相互作用。本研究利用多套基于卫星数据的衍生指标,包括叶面积指数(LAI)、净初级生产力(NPP)和降雨利用效率(RUE),量化了黄河流域上游、中游和下游植被动态及其与降雨的关系。序列回归方法用于检测NPP对降雨敏感性的趋势。结果表明,自2000年以来,占黄河流域34.53%的地区呈现了一个显著的植被变绿趋势;上游、中游和下游地区分别有20.54%、53.37%和16.73%地区呈现出显著的变绿趋势,NPP呈现出与LAI相似的变化特征。但上游、中游和下游的RUE趋势特征存在显著差异。此外,黄河流域中游有16.86%的区域,其植被对降雨敏感性呈现显著的趋势(14.08%为负趋势,2.78%为正趋势)。整体而言,黄河流域仅有8.41%的区域呈现了LAI、NPP、RUE一致的显著增长态势。最后,本研究根据植被动态及其与降雨间的关联,提出了分区施策的生态恢复方案。本研究揭示了黄河流域中游地区显著的植被绿度和生产力变化,并强调了在黄河流域高质量发展背景之下开展植被-降雨动态研究的重要性,所提出的生态恢复框架将会为决策者开展流域景观格局优化和可持续管理等提供有价值的见解。

© 2023 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

生态恢复是解决土地退化、保护生物多样性、遏制全球变暖以及提高生态系统功能与服务等重要解决方案[1–3]。许多国际和国家层面的政策倡议已逐步认识到生态恢复的重要性,并提出了一系列恢复计划。例如,联合国

计划正式将2021年至2030年间定为“生态系统恢复十年”;非洲的绿色长城项目旨在在撒哈拉南部恢复7000 km的植被带。与此同时,中国政府也实施了大规模的生态恢复计划,以应对土地退化问题[4]。然而,在一些水资源匮乏的地区,盲目的生态恢复可能会加剧碳和水间的权衡,限制恢复成效、效率以及相关的社会福祉[5–6]。

* Corresponding author.

E-mail address: yangyu@bjfu.edu.cn (Y. Yu).

充分的水资源供给是植被可持续生长的前提条件, 植被和水的相互依存关系显著影响陆地和大气系统之间的水、碳和能量交换[7-9]。全球变暖的影响, 包括水汽压差不足的加剧和可能的土壤水分流失导致植被生长愈发受到水分的限制。此外, 遥感观测揭示全球大范围的绿化趋势特征, 意味着植被的水分需求也随之增加[10-11]。这些限制在水资源短缺的干旱地区尤为明显, 这些地区植被水分需求高度依赖降雨, 水分亏缺会显著地影响植被生长和生态恢复成效[12-14]。

近年来, 围绕植被-水关系的研究主要采用样地定位监测实验、遥感和基于过程的生态模型等手段, 探讨了植被对水资源的敏感性[15-16]、干旱对植被恢复的影响[17-18]以及植被对干旱(事件)的恢复力等[19-20]。然而, 尚未充分利用空间显式(spatial-explicit)的植被-水关系直接服务于生态恢复实践。植被-水关系可以作为树种选择、植被干旱适应策略等森林管理等方面的重要参考。因此, 亟需结合降雨利用效率(RUE, 植被生产力与降雨的比值)和植被对降雨敏感性(通过序列线性回归计算[14])等植被-降雨关系特征, 制定恢复策略。此外, 基于MODIS遥感数据的研究显示, 全球45.6%植被区域在植被绿度和生产力方面表现出不一致的趋势[21], 而后的增长率低于前者[22]。通过吸收光合有效辐射量, 植被绿化可以增加生产力[8,23]。然而, 受光能利用率、碳利用效率或叶面积过密等方面的限制[24-25], 这种植被绿度的增长并不意味着生态系统功能的改善。植被绿度与生产力的差异性增长增加了人们对生态恢复能否实现植被绿度与生态功能协同改善的担忧。因此, 需要基于植被绿度、植被生产力和植被-水关系, 来提出更具针对性的生态恢复策略。

中国政府已开展多个大规模的生态恢复项目, 以应对广泛和严重的土地退化及其衍生的高昂的经济成本[4,13,26]。自此, 黄河流域呈现出显著的植被变绿趋势[13,27-28]。黄河流域发挥着重要的生态安全屏障功能, 也是“一带一路”倡议的陆上通道之一。2019年, 中央政府提出推进黄河流域生态保护和高质量发展, 旨在加强区域生态保护和社会发展。然而, 水资源缺乏和脆弱的生态环境可能会削弱这一绿化战略[5]。因此, 将植被-降雨关系的认知纳入区域植被恢复战略, 是理解生态恢复中涉及的生物物理/化学过程并确保生态管理持久性的重要前提[29-30]。

为了更好地理解黄河流域地区植被变绿和植被变稳的关系, 本研究基于2000—2018年叶面积指数(LAI)、净初级生产力(NPP)和降雨数据, 分析植被-降雨关联。

研究主要目的是: ①监测黄河流域不同区域(上游、中游和下游地区)的植被绿度和生产力的空间特征; ②比较黄河流域上游、中游和下游的RUE; ③根据黄河流域植被绿度、生产力的趋势以及植被-降雨关系, 确定生态恢复的关键区域。

2. 材料与方法

2.1. 研究区域

黄河流域总面积为 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$, 流经九个省份, 包括青海省、四川省、甘肃省、宁夏回族自治区、内蒙古自治区、陕西省、山西省、河南省和山东省, 经山东省垦利区汇入渤海(图1)。黄河流域连接着青藏高原、黄土高原和华北平原, 呈“西部高、东部低”的地形特征。黄河流域区域主要呈大陆性气候: 东南部表现为半湿润气候, 西北部为干旱气候[31]。由于黄河流域多样的地貌和栖息地特征, 多种植物物种生长于此。水资源短缺成为区域生态恢复、沙漠化防治及生态安全屏障功能发挥的重要制约因素。20世纪90年代末, 中国政府实施“退耕还林”工程: $16\,000 \text{ km}^2$ 的旱作农田(依靠自然降雨进行作物生产)成功转变为非农作物植被, 形成了明显的“变绿”趋势([32-33], 附录A中的图S1)。在过去的20年里, “退耕还林”工程大规模实施, 以开展脆弱生态系统恢复[34]。

2.2. 数据集

本研究中使用了LAI、NPP、降雨量和行政区划数据。鉴于数据可用性, 使用了从数据MOD17A3产品获得的2000—2018年的逐年NPP数据(单位: $\text{C}\cdot\text{m}^{-2}$), 该数据具有1 km的空间分辨率, 来自数值陆地动态模拟组(NTSG)和美国国家航空航天局(NASA)[35-36]。美国蒙大拿大学NTSG的产品纠正了原有MOD17算法中的MODIS-LAI光合有效辐射输入的错误。2000—2018年的LAI数据源于美国地质调查局(USGS)地球数据中心(https://lpdaac.usgs.gov/product_search/)的MOD15A2H V6产品, 空间分辨率为500 m[37]。为了减轻大气噪声和云污染的影响, 本研究使用最大值合成法[38]将LAI数据合并为年度值。2000—2018年的年降雨数据源于CHIRPS(Climatology Hazards Group InfraRed Precipitation with Station data, 气候灾害组红外与站点结合的降雨数据)[39], 将原始的0.05度分辨率重新采样至1 km分辨率, 以匹配其他植被指数数据。

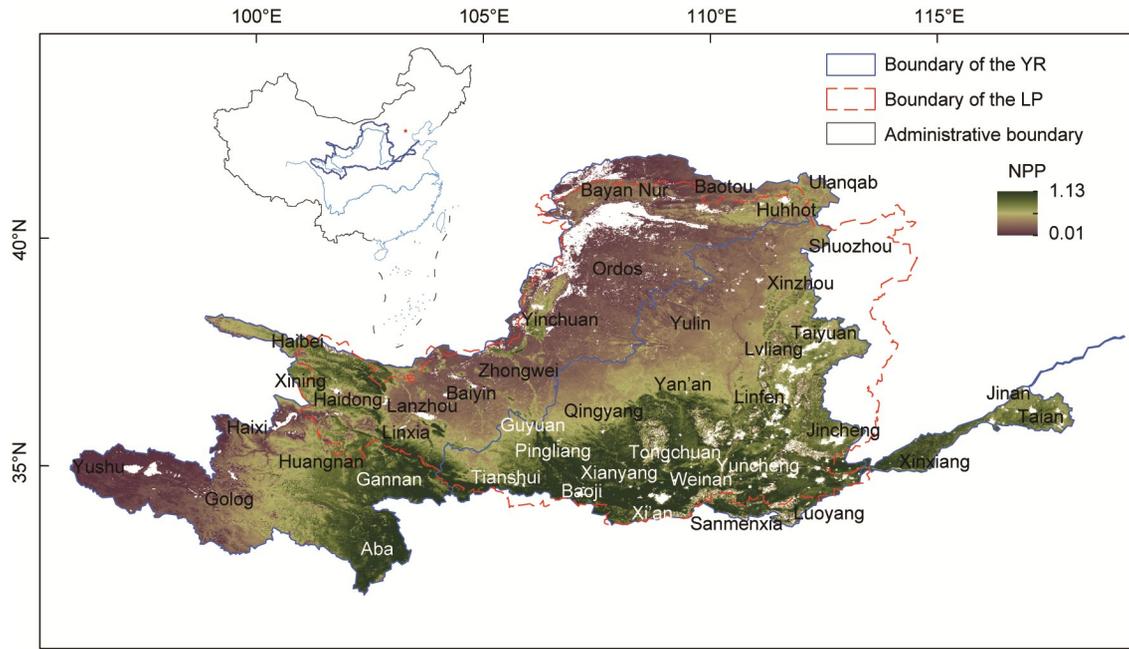


图1. 黄河流域。YR: 黄河; LP: 黄土高原。底图为NPP分布(单位: $\text{kg C}\cdot\text{m}^{-2}$)。

2.3. RUE

用植被NPP与降雨量间的比值计算RUE, 表征植被生产对降雨量的响应, 如等式(1):

$$\text{RUE} = \frac{\text{NPP}}{R} \quad (1)$$

其中, RUE代表单位的降雨利用效率 ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\text{mm}^{-1}$), NPP和R分别代表年度的净初级生产力 ($\text{kgC}\cdot\text{m}^{-2}$) 和降雨量 (mm)。

在干旱和半干旱地区, 降雨是植被生长的主要气候制约因素。因此, RUE通过描述特定生态系统中NPP和降雨量的关系, 以反映生态系统的变化。因此, RUE经常被用于评估生态系统功能与土地退化情况[40–42]。

2.4. NPP对降雨的敏感性

本研究使用基于时空窗口的序列回归方法 (sequential regression method) 来描述植被-降雨的关系 (NPP对降雨的敏感性) (图2) [14,43]。根据文献[43], 最优的移动窗口大小为 7×7 像元, 最优的时间步长为4年 [图2 (b)]。在移动窗口 (7×7) 和选定时间步长 (4年) 内对所有NPP和降雨数据进行线性回归 [图2 (c)], 并将回归方程的斜率赋值给移动窗口的中心像元 [图2 (d)], 以表征各像元的NPP对降雨的敏感性。据此计算, 可获取历年逐像元的NPP对降雨的敏感性特征 [图2 (e)]。当一个时空窗口内超过三分之二的像元植被、降雨数据为空值, 则不进行回归方程及中心像元赋值等操作。随着时空窗口的移动, 可识别出整个研究区域像元尺度下历年植被

对降雨的敏感性。斜率的绝对值越高, 表明NPP对降雨的敏感性越高。斜率大于0, 代表正敏感性; 斜率小于0, 代表负敏感性。正敏感性说明NPP会随着降雨变化的方向而改变方向, 反之亦然。NPP-降雨关系的改变可能表明与可用水资源有关的植被生物物理过程和生态功能发生了变化[43]。

2.5. 统计分析

利用LAI表征植被的绿色度, 用NPP衡量植被生产力。本研究也采用两个基于植被指数的衍生指标: RUE及NPP对降雨敏感性。这两个衍生指标的显著正/负趋势可以分别解释为单位降水下生产力的增加或减少, 反映植被功能的变化。基于最小二乘法逐像元进行线性回归分析, 以识别四项指标的趋势特征。显著趋势被认为在 $p < 0.05$ 水平上。根据植被指标的变化趋势方向和显著性, 分为三类: 显著增加 (+)、显著降低 (-) 或无显著的变化 (0)。该分析步骤将任一指标 (如LAI、NPP和RUE) 所描述的植被特征 (如绿色度、生产力和效率) 的显著变化的空间模式 (显著增加、显著下降) 定义为显著趋势。然后进行逐像元的趋势一致性分析。理想状态是LAI、NPP和RUE都呈现一个显著增加的趋势, 说明该地区植被的绿色度、植被生产力和RUE均显著改善。NPP对降雨的敏感性是本分析的辅助指标, 反映了植被水分利用和功能的变化, 强调植被对环境压力的敏感性正在改变 (即植被的恢复力减少或增加) [44]。本节的状态定义和一致性参照了文献[21]的工作。

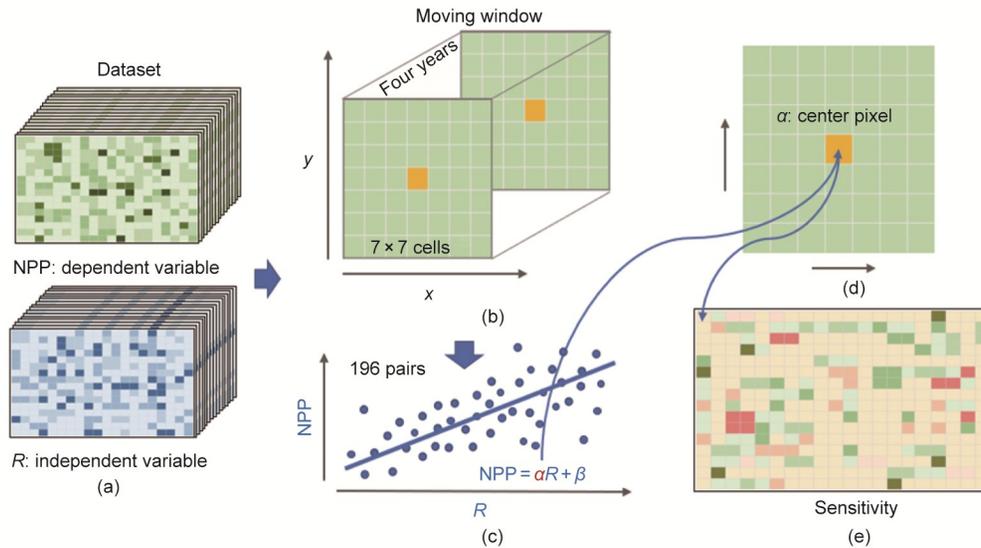


图2. NPP对降水敏感性计算流程。(a) 所需的输入数据。(b) 移动窗口的大小。(c) ~ (d) 基于移动窗口和线性回归计算NPP对降水敏感度的方法。 α 是NPP与降水数据集之间的回归斜率， β 是回归截距。(e) 通过移动窗口确定各像元NPP对降水的年度敏感性。

3. 结果

3.1. 植被绿度和生产力的空间变异

图3显示了黄河流域LAI和NPP的变化特征。根据卫星数据，自2000年来，黄河流域“变绿”的比例显著增加，具体表现为黄河流域34.53%的区域呈现显著变绿。黄河流域上游20.54%的区域呈现显著的变绿趋势，而中游和下游呈现变绿趋势的比例分别为53.37%和16.73%。黄河流域中游区域，面积约占黄河流域的42.95%，包括陕北和内蒙古鄂尔多斯东部，呈现显著的变绿趋势。同时，黄河流域上游、中游和下游的NPP变化趋势与LAI大致相同。结果表明，自2000年以来，黄河流域中游近65%的区域显示出显著的NPP变化趋势，其中63.72%为正趋势，0.65%为负趋势。黄河流域上游（33.75%）和下游（63.72%）NPP的显著增加比例高于LAI（分别为20.54%和53.37%），但下游NPP的显著增加比例（9.68%）低于LAI（16.73%）。

3.2. RUE趋势

图4呈现了黄河流域降雨和RUE的变化趋势。除了黄河上游、鄂尔多斯西部和兰州北部等少数地区，黄河流域大部分地区呈现了降雨量的增长趋势[图4(a)]。平均而言，黄河流域上游、中游、下游的降雨趋势分别为每年2.38 mm、4.60 mm和0.31 mm。大约有16%的中游区域呈现了显著的RUE变化趋势，其中15.09%为正趋势，1.29%为负趋势。与黄河流域中游相比，上游和下游地区中RUE表现出显著变化的面积较小。例如，黄河流域下

游仅约2%的区域表现出显著趋势，其中1.21%为正趋势，0.70%为负趋势。黄河流域上游约12%的区域表现出显著趋势，其中9.98%为正趋势，2.57%为负趋势。上游、中游和下游地区的趋势分布及方向存在显著差异：黄河中游地区表现出最大的正向变化趋势比例（15.09%），其次为上游（9.98%）和下游（1.21%）。其中，黄河流域上游四川西北部地区RUE负趋势的面积比例较大[图4(b)~(i)]，其次就是中游地区的内蒙古西部[图4(b-ii)]和山西部分地区[图4(b-iii)]。

3.3. 植被-降雨敏感性的上游-中游-下游地区差异

黄河流域上游、中游和下游在植被-降雨敏感性的趋势特征（分布和方向）存在明显差异（图5）。在黄河流域上游地区，19.66%的植被-降雨敏感性呈现显著趋势，16.90%的趋势是正向的，还有2.76%为负向的。而在黄河流域下游区域，4.98%的区域呈现了显著的负趋势。但是黄河流域中游的植被-降雨敏感性趋势与上游和下游有所不同。黄河流域中游16.86%的区域表现出显著的植被-降雨敏感性变化趋势，其中14.08%为负趋势，2.78%为正趋势。黄河流域上游和下游的植被-降雨敏感性呈显著负趋势的面积比例大幅低于中游。上游地区植被-降雨敏感性的负趋势主要集中在青海湖的西部[图5(a-i)]；中游地区主要集中在内蒙古北部[图5(a-ii)]和山西省东南部，包括太原、临汾和运城等地[图5(a-iii)~(a-v)]。

3.4. 植被-降雨组合关系中的关键区域识别

图6显示了黄河流域植被绿度、生产力和RUE的变化方向。植被绿度、生产力和RUE均呈现一致的显著上升

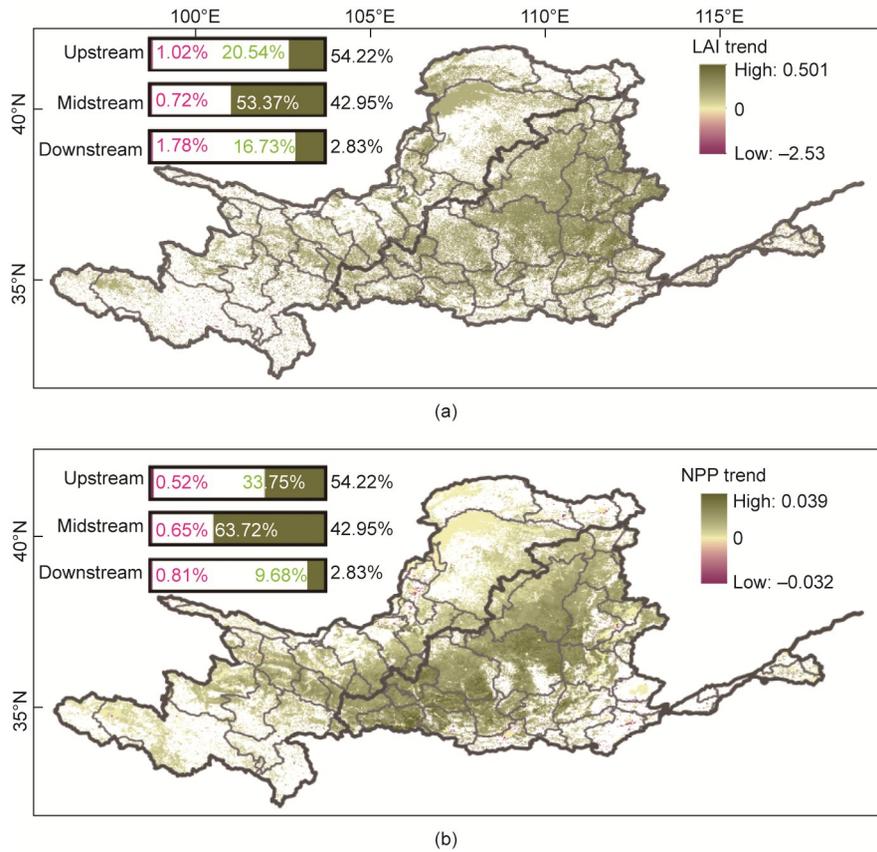


图3. 黄河流域LAI (a) 和NPP (b) (单位: $\text{kg C} \cdot \text{m}^{-2}$) 的显著正、负趋势及其在流域内的百分比分布。黄河流域上游、中游和下游植被绿度(即LAI)和植被生产力(即NPP)显著正趋势(以绿色表示)和显著负趋势(以紫色表示)的比例(%)。柱状图右侧的百分比表示黄河流域上游、中游和下游的面积比例(%)。

的区域占总面积的8.41%，主要分布在中游地区陕西省延安市北部和榆林市南部[图6 (a-vii) ~ (a-viii)]。此外，黄河流域植被绿度和生产力提高但RUE不变的区域占16.55%，主要分布在甘肃省东部(平凉市和庆阳市)和宁夏回族自治区南部。此外，黄河流域植被绿度显著上升但生产力或RUE未显著变化的地区占9.23%，表明植被生长有所增强。该类型在黄河流域中游地区广泛分布，特别是在陕西省西北部，位于绿度和NPP增强的区域附近。然而，黄河流域约有2.26%的区域在这三个指标上均呈现出持续下降的趋势，这些区域主要分布在内蒙古自治区北部和宁夏回族自治区北部[图6 (a-i) ~ (a-iii)]以及黄河流域上游四川省西北部和下游的河南段[图6 (a-v) ~ (a-viii)]。总体而言，植被绿色度和生产力发生变化的区域主要分布在黄河流域的中游地区，且变化幅度较大。

4. 讨论

4.1. 生态工程推动植被绿度和生产力提高

植被恢复是防治水土流失和提升生态管理的重要且高

效的解决方案。自1998年以来，黄河流域作为试点地区，实施了“退耕还林”工程、天然林资源保护工程和三北防护林工程等多项大规模的生态恢复工程，旨在保护、恢复和扩大森林面积、减缓土壤侵蚀。自此，该区域呈现显著的变绿趋势，并且由人类活动所致的生态系统退化已经大幅减少[13,45–46]。与既有工作相似[46]，本研究也证实了黄河流域自2000年以来上、中、下游LAI和NPP呈现显著增加趋势(图3)。强调了政策驱动下的黄土高原呈现大规模变绿的科学事实。统计数据显示，山西、陕西和宁夏地区共有 $4.793 \times 10^4 \text{ km}^2$ 的区域实施了造林措施[47–48]。毫无疑问，生态恢复在促进黄河流域中游植被绿化方面发挥了显著作用。研究表明，在黄河流域上游和中游地区，NPP呈增长比例高于LAI的增长比例(图3)，不少区域LAI和NPP的变化方向并不一致(图6)。当植被在绿度和生产力方面生长不一致时，生态系统的结构和功能将直接受到影响。植被通过增加叶面积，可以更有效地吸收叶绿素和光合有效辐射，从而增加植被的生产力[23]。然而，当植被叶片面积由于自身遮蔽和营养限制到达一定阈值时，光合作用就会减缓[24]。LAI和NPP的驱

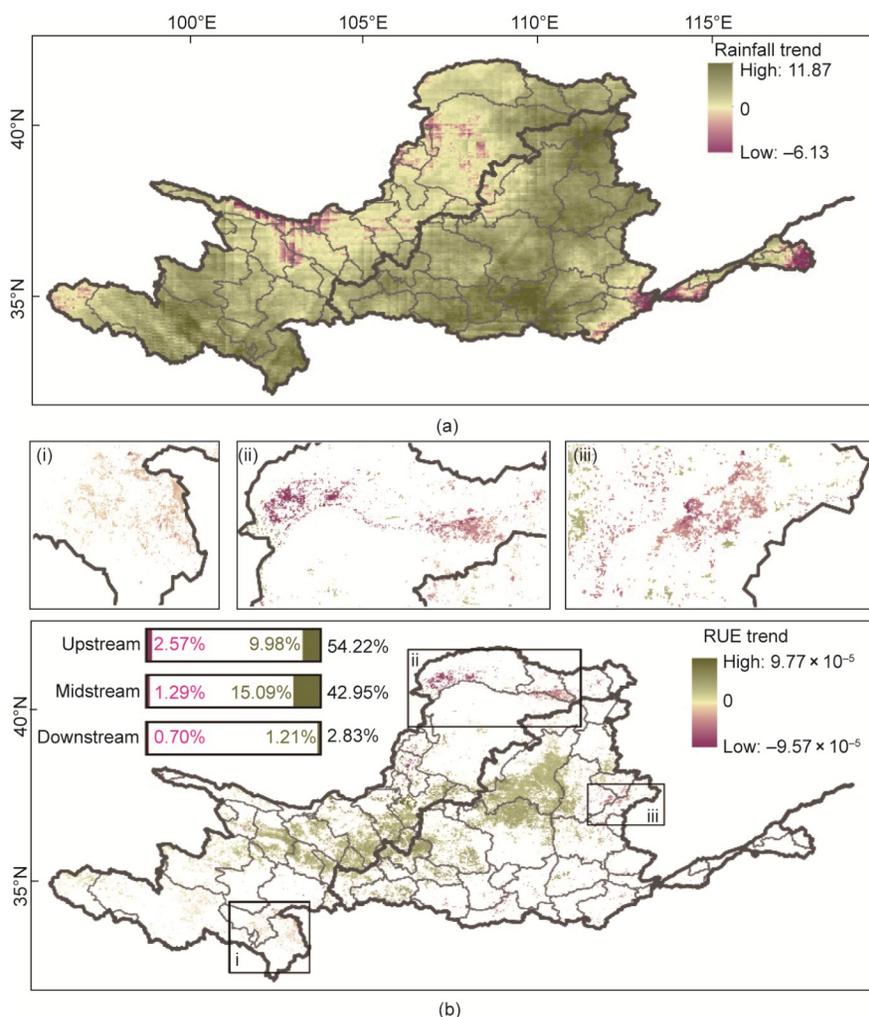


图4. 黄河流域的降水趋势和RUE的显著趋势。(a) 降雨趋势以原始降雨数据分辨率(0.05°)呈现。黄河流域上游、中游和下游地区RUE显著正趋势(绿色)和显著负趋势(紫色)的比例。(b) 黄河流域上游、中游和下游RUE显著正趋势(绿色)和显著负趋势(紫色)的比例以百分比形式标注。(i)~(iii) RUE负趋势的典型区域。柱状图右侧的百分比表示黄河流域上游、中游和下游的面积比例(%)。

动因素差异是一种可能的解释。LAI变化主要受二氧化碳施肥作用的影响,气候变化贡献较小(8%),而后者可以解释28.6%的植被生产力变化[8,49]。先前的研究报道了在潮湿地区NPP和LAI的抛物线关系,以及随着干旱指数降低,绿度和生产力呈现脱钩特征[50–51]。这与生态系统结构和生理学之间的权衡作用在更潮湿的气候中变得更强有关[50]。植被绿度与生产力的脱钩可能还与环境变量(如太阳辐射、水资源可用性和温度)对光能利用率的影响有关[25,52]。除此之外,均匀度被视作协调森林生产力和物种丰富度关系的关键因素[53]。在生态恢复中,通常选择单一树种并均匀种植,这会限制群落的生产力。这一结论也与黄河流域LAI和NPP的差异相一致。另一方面,尽管人工林(如用材林和经济林)能够快速增加植被的绿度,但这种不一致性也与时间尺度密切相关。例如,在黄土高原地区,苹果园种植广泛,并计划进行大规模扩张。苹果树的果实特征占比在不同季节存在显著变化,表现出

较大的季节性波动。

总体而言,生态恢复工作显著增强了黄河流域植被绿度和生产力,中游地区表现出尤为显著的改善。自2000年以来,黄土高原的碳汇潜力增加了约三分之一[48]。植被恢复减少了水土流失和黄河泥沙量,占泥沙总减少量的57% [54]。除了生态效益外,生态恢复还带来了诸多社会效益,包括农业转型的推进和新兴产业(如生态旅游和民俗旅游)的间接促进,正如先前研究所报道的那样[48, 55]。生态恢复政策的实施、生态补偿和粮食补贴使农民收入增加[56]。黄河流域的生态恢复将促进多个联合国可持续发展目标(SDG)的实现,包括SDG1(消除贫困)、SDG6(清洁水和卫生设施)、SDG13(气候行动)和SDG15(陆地生物)。

4.2. 植被-降雨敏感性和其他植被指标之间的不一致趋势
植被绿度、生产力、RUE和敏感性间的差异性变化

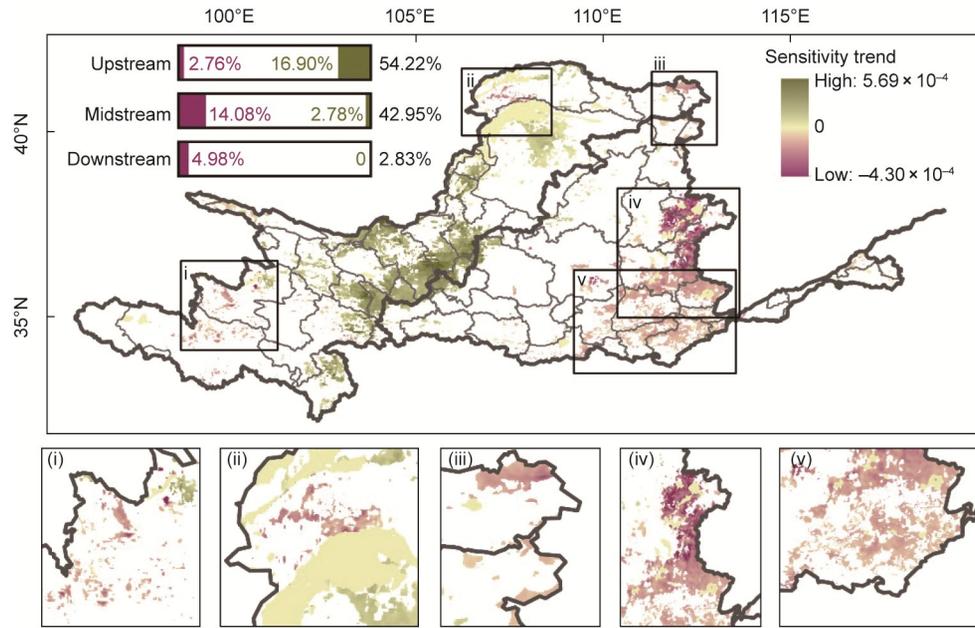


图5. 黄河流域植被对降水的敏感性趋势及其在流域内的百分比分布。(i) ~ (v) 是显著负向趋势的典型区域。总结了黄河流域上游、中游和下游植被对降水敏感度显著正趋势（绿色）和显著负趋势（紫色）的比例（%）。柱状图右侧的百分比表示黄河流域上游、中游和下游的面积比例（%）。

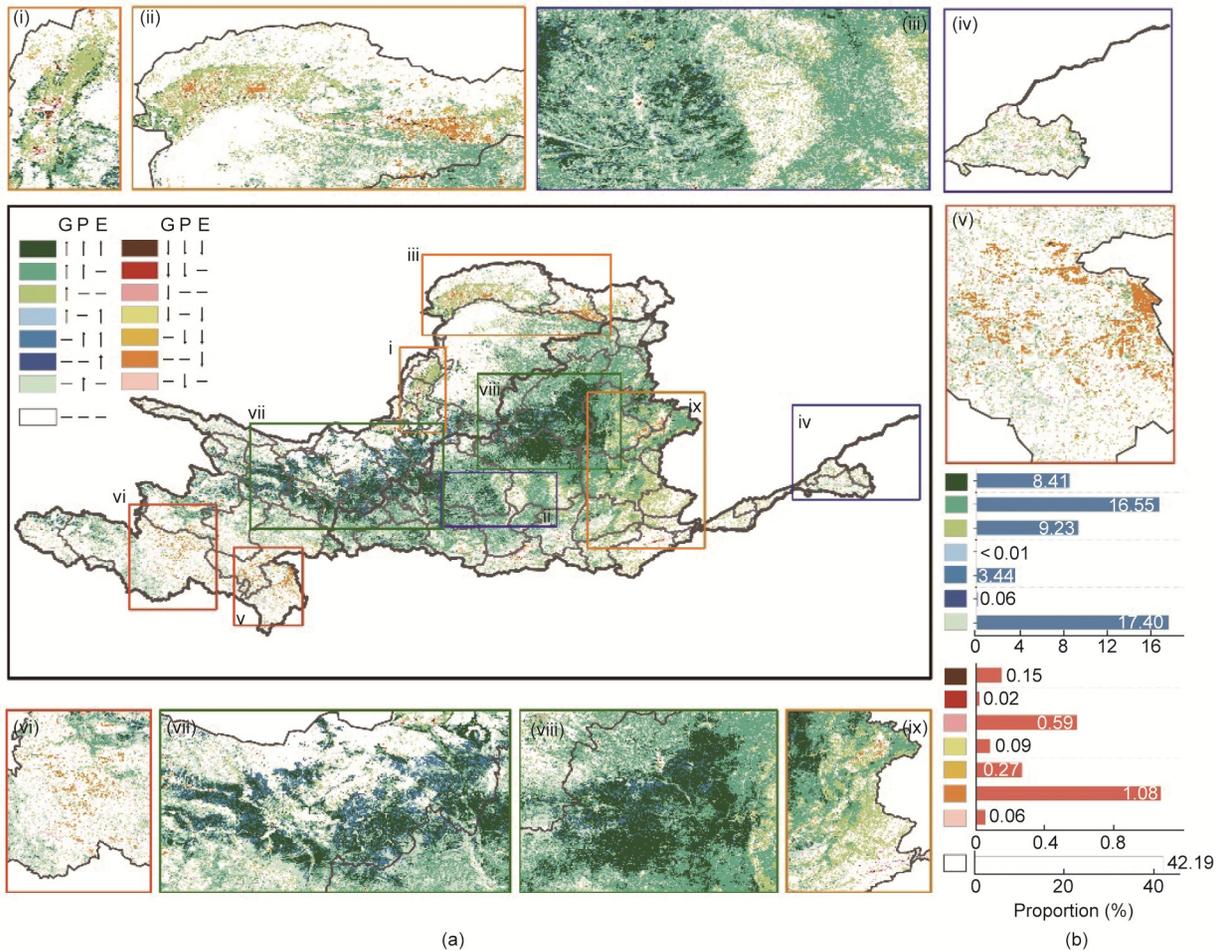


图6. (a) 黄河流域绿色度(G)、生产力(P)和RUE(E)趋势的组合。短横(-)表示无显著变化，而↑和↓分别表示显著增加或减少趋势。(i) ~ (ix) 用矩形标出了在黄河流域中三类指标具有一致增加或减少趋势的代表性区域。(b) 显示了具有显著变化趋势的面积比例，相关图例位于图(a)的左上角。

显示出黄河流域植被生长动态的多样性（图4和图5）。许多研究表明，大规模的绿化推动着RUE的增长，特别是在黄河流域中游区域。甘肃东部和陕西西北部人工林大量种植区域均呈现显著的RUE增加趋势[57–58]。持续的植被绿化进一步增强了植被生产力，在很大程度上加速了植被光合作用的过程，这也意味着陆地植被的蒸腾和呼吸作用相应地有所增加[59]。观测到的趋势可归因于广泛的生态工程实践，发展出了更具生产力的生态系统。这一现象的明显解释是陕西省的绿化版图已经向北扩展了400 km。区域生态环境已经从“整体恶化和局部提升”转变为“整体提升和局部良性循环”。另一方面，分析发现RUE的显著增加的比例（11.93%）均大幅小于NPP（45.94%）和LAI（34.53%）（图3和图4）。尤其是超过四分之一像元表现出植被绿度的显著增加，但RUE并未增加（图6），表明绿化趋势并不意味着RUE的提高。

此外，在整个黄河流域观察到了植被-降雨敏感性的显著的正趋势和负趋势。正趋势表明植被对降雨的响应越来越强；负趋势表明植被对降雨响应减弱，每单位降雨量的生产力下降，这反映植被功能可能受限的趋势。作为植被生产力的主要驱动因素，降雨是植被恢复的主要水源。研究进一步揭示了黄河流域中游的植被变绿最为明显。相反，敏感性显著下降的比例高于显著增加的比例，表明植被对降雨的响应较弱。每单位降雨的植被生产力较低，意味着RUE较低的植被集中分布。一个可能的解释是，黄河流域中游部分地区降雨输入足以满足潜在的碳汇需求，但仍然存在较大缺口。另一方面，在相同降雨条件下，天然林和人工林之间的敏感性趋势在空间上存在差异。黄河流域中游植被-降雨敏感性呈显著负趋势的区域主要分布在山西太行山和吕梁山的中游地区，这些区域存在大规模人工林建设且降雨量较高，是低RUE分布的主要区域。先前的研究报道了植被-降雨敏感性的正趋势与生态系统组成的变化有关[43]，尤其是用灌木取代大型木本植物。然而，一个悬而未决的问题是这种积极的变化是否也会带来可持续的生态系统功能改善，从而有利于生态系统和人类福祉。通过研究植被-降雨敏感性的变化趋势，可以为未来的植被恢复策略，尤其是从水资源可持续利用的角度，提供新的治理思路。先前的研究也表达了对黄土高原生态恢复水资源约束可能达到临界值的担忧[5]。

4.3. 基于植被-降雨关系的生态恢复

在实践中，LAI、NPP和RUE间的关系为黄河流域高质量发展战略的决策和生态恢复规划提供了直观的指导图，进而识别关键的恢复区域。对这三个指标的重新解读

也可以帮助在气候变化背景下为特定地区确定适当的保护策略：LAI（监测和识别绿化特征）、NPP（指示提高低生产力的林）和RUE（表征生态系统对降雨变化的恢复能力）。在LAI、NPP和RUE持续增加的区域（约占黄河流域面积的8.41%），不需要额外的适应性措施或只需要维持当前的管理状态。这些区域表明在生境质量、碳固存、植被稳定性等方面存在积极迹象。但是，LAI、NPP和（或）RUE均呈显著降低趋势主要发生在快速城市化地区，如西安市、西宁市和银川市。因此，在RUE和敏感性呈现一个显著降低趋势的地区（如中游的太行山和山西省吕梁市），平衡城市化和生态保护的权衡是很有必要的。但是，这些地区的降雨量相对稳定，低效林（植被的RUE很低）也广泛分布[图6（a-i）]。管理实践应优先考虑提高森林质量和生态系统服务功能，种植具有特殊功能性状、适应干旱的林种，以改善低效林。考虑到未来气候变化的情景，对黄河流域（尤其是黄河流域中游地区）的低效林进行改造仍然是必要的。

本研究对干旱半干旱生态系统的植被保护和生态恢复具有重要的意义。黄河流域高质量发展是目前的国家战略。根据目前植被绿度、生产力和RUE变化趋势，本研究识别了黄河流域上游、中游和下游的水源涵养区、重点水土保持区和生物多样性保护区，并总结了可能有助于植被恢复实践的四点建议（图7）。首先，建议对绿度和RUE持续增长的区域保持当前状态，应特别采用自然恢复的规划与管理策略。对于RUE降低的地区，应该采取有效措施改善低RUE的森林，特别是在气候变化加速的情况下。此外，在那些绿度减少但RUE保持不变的地区，应该根据地形坡度条件，遴选和种植适宜的林种进行生态恢复。此外，应该对绿度和RUE都降低的地区给予更多关注，加强生计和生态改善之间的平衡。最后，对RUE和绿度变化不显著的地区应进行持续的原位监测。

卫星观测在植被变化监测方面发挥越来越重要的作用，如果仅依赖单一指标来探索驱动机制，那么对区域生态系统变化的认知不确定性可能会加剧。总的来说，研究表明，综合考虑LAI、NPP和RUE的变化趋势，可以用来识别满足黄河流域生态保护和高质量发展要求的区域。基于本研究所绘制的三个指标，基于卫星数据和统计方法的保护规划可以依据黄河流域植被-降雨关系确定优先恢复重点和响应的适应性策略，以恢复黄河流域的生态健康。然而，敏感性评估仅能够捕捉到植被在短时间内对气候扰动的反应，不足以代表未来长期的生态系统属性。

本研究基于植被-降水关系确定了生态恢复的生物物理约束条件，而实际的恢复工作需要将重点从生物物理约

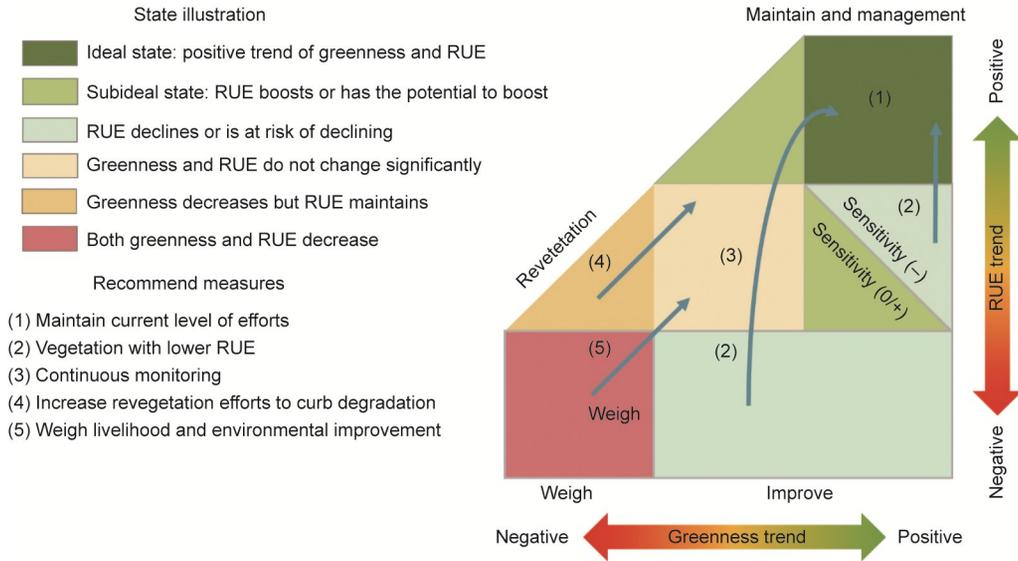


图7. 基于绿度、RUE和敏感度趋势的生态恢复框架。

束进一步拓展到经济约束[60–61]。截至2014年，山西省、陕西省和宁夏回族自治区已就此累计投资超过450亿人民币[48]。此外，一些其他的恢复工程（如黄河流域的天然林资源保护工程和三北防护林体系工程等）也涉及大量经济投资[4]。这些投资也导致了生态系统总产品和间接社会效益的大幅增加[4,48]。根据非洲绿色长城项目的经验，每投资1美元在土地恢复上，在不同的情景下可产生1.1~4.4美元的收益。这对于生态恢复而言是一个乐观的信号，但同时也依赖于一个完善的碳市场来确保可持续的恢复投资[62]。尽管本研究并未考虑经济限制，但基于植被-水关系的生物物理约束可以明确哪些区域的RUE较低，需要进一步优化，哪些区域需要更密切地监视。这可能为更加经济的生态恢复实践提供重要的参考。

4.4. 研究贡献、不足与不确定性

本研究使用了RUE和植被对降雨的敏感性两个指标来描述植被-水关系，在此基础上结合LAI和NPP作为植被绿度和生产力的代理指标，明确地划定了生态恢复的空间布局。本研究强调，在黄河流域高质量发展战略的背景下，研究植被与降雨之间关联对区域生态修复的重要性。本研究的分析结果和提出的生态恢复框架可以为决策者在执行合理的流域格局优化和可持续管理时提供有价值的见解。分析框架也适用于世界上其他已实施或计划实施大规模生态恢复项目的地区。

但是，本研究仍存在一些局限性。一方面，需要结合区域进一步调查LAI、NPP和RUE之间变化不一致的机制解释，特别是不同植被类型间的差异。另一方面，需要考虑社会和经济影响因素（如人口压力或城市发展）对植

被-降雨敏感性的影响，以更全面地理解不同植被指标增长不一致的背后机理。尽管观察到积极趋势，但尚未考虑某些生态系统特性，例如生物多样性丧失或对地下水的影响。此外，本文所提出的基于植被-降雨关系的恢复策略还需要考虑农业用水和生活用水的需求。本研究中所使用的数据中，LAI数据集的分辨率不同于NPP的数据集，这可能会带来一些分析的不确定性。已有研究指出了这些问题和局限性[63]。因此，需要对植被绿度、生产力的驱动因素进行深入研究，以全面理解植被生长不一致背后的机制，为黄河流域生态保护和高质量发展提供参考。

5. 结论

考虑到水资源可得性对生态系统功能的约束，恢复规划应考虑植被生产力对降雨的长期响应。大规模的生态修复举措（如造林）促进了黄河流域大部分地区（尤其是中游）植被绿度的大幅增加和植被生产力的增强。然而，RUE显著正趋势的比例要远低于预期，这表明大规模植被变绿并不等于RUE的总体增加。此外，本研究发现植被-降雨敏感性呈大范围负趋势，特别是在内蒙古北部和山西东南部。这表明单位降雨的植被生产力降低，可能存在低效林和生态系统功能退化的风险，强调了加强森林管理并将植被-水关系纳入保护/恢复规划的紧迫性。结合上述指标，提供了直观的植被恢复规划和决策图，以服务黄河流域高质量发展战略。未来修复实践应优先考虑山西太行山和吕梁山地区RUE和植被-降雨敏感性呈负趋势的低效林进行优化。本研究为理解结构性和功能性植被变化及

其对降雨的功能响应提供了全面深入的见解，这对于在水资源有限的条件下优化生态恢复具有重要意义。

致谢

感谢中央高校优秀青年团队项目(QNTD202303)、国家自然科学基金项目(42177310、42377331)、国家重点研发计划项目(2022YFF1300803)和中国科协优秀中外青年交流计划对本研究的支持。

Compliance with ethics guidelines

Yang Yu, Ting Hua, Liding Chen, Zhiqiang Zhang, and Paulo Pereira declare that they have no conflict of interest or financial conflicts to disclose.

Appendix A. Supplementary data

Supplementary data to this article can be found online at <https://doi.org/10.1016/j.eng.2023.07.012>.

References

- [1] Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services (IPBES). The assessment report on land degradation and restoration. Bonn: IPBES; 2018.
- [2] Strassburg BBN, Iribarrem A, Beyer HL, Cordeiro CL, Crouzeilles R, Jakovac CC, et al. Global priority areas for ecosystem restoration. *Nature* 2020; 586(7831):724–9.
- [3] Sasmito SD, Basyuni M, Kridalaksana A, Saragi-Sasmito MF, Lovelock CE, Murdiyarto D. Challenges and opportunities for achieving Sustainable Development Goals through restoration of Indonesia's mangroves. *Nat Ecol Evol* 2023;7(1):62–70.
- [4] Bryan BA, Gao L, Ye Y, Sun X, Connor JD, Crossman ND, et al. China's response to a national land-system sustainability emergency. *Nature* 2018; 559(7713):193–204.
- [5] Feng X, Fu B, Piao S, Wang S, Ciais P, Zeng Z, et al. Revegetation in China's Loess Plateau is approaching sustainable water resource limits. *Nat Clim Chang* 2016;6(11):1019–22.
- [6] Wang X, Ge Q, Geng X, Wang Z, Gao L, Bryan BA, et al. Unintended consequences of combating desertification in China. *Nat Commun* 2023;14(1): 1139.
- [7] Novick KA, Ficklin D, Stoy P, Williams C, Bohrer G, Oishi A, et al. The increasing importance of atmospheric demand for ecosystem water and carbon fluxes. *Nat Clim Chang* 2016;6(11):1023–7.
- [8] Huang K, Xia J, Wang Y, Ahlström A, Chen J, Cook RB, et al. Enhanced peak growth of global vegetation and its key mechanisms. *Nat Ecol Evol* 2018;2(12): 1897–905.
- [9] Jiao W, Wang L, Smith WK, Chang Q, Wang H, D'Odorica P. Observed increasing water constraint on vegetation growth over the last three decades. *Nat Commun* 2021;12:3777.
- [10] Huang J, Yu H, Guan X, Wang G, Guo R. Accelerated dryland expansion under climate change. *Nat Clim Chang* 2016;6(2):166–71.
- [11] Yuan W, Zheng Y, Piao S, Ciais P, Lombardozzi D, Wang Y, et al. Increased atmospheric vapor pressure deficit reduces global vegetation growth. *Sci Adv* 2019;5(8):eaax1396.
- [12] Zhu Z, Piao S, Myneni RB, Huang M, Zeng Z, Canadell JG, et al. Greening of the Earth and its drivers. *Nat Clim Chang* 2016;6(8):791–5.
- [13] Chen C, Park T, Wang X, Piao S, Xu B, Chaturvedi RK, et al. China and India lead in greening of the world through land-use management. *Nat Sustain* 2019; 2(2): 122–9.
- [14] Abel C, Horion S, Tagesson T, De Keersmaecker W, Seddon AWR, Abdi AM, et al. The human–environment nexus and vegetation–rainfall sensitivity in tropical drylands. *Nat Sustain* 2021;4(1):25–32.
- [15] Li W, Migliavacca M, Forkel M, Denissen JMC, Reichstein M, Yang H, et al. Widespread increasing vegetation sensitivity to soil moisture. *Nat Commun* 2022;13(1):3959.
- [16] Zhang Y, Gentine P, Luo X, Lian X, Liu Y, Zhou S, et al. Increasing sensitivity of dryland vegetation greenness to precipitation due to rising atmospheric CO₂. *Nat Commun* 2022;13(1):4875.
- [17] Konings AG, Saatchi SS, Frankenberg C, Keller M, Leshy V, Anderegg WRL, et al. Detecting forest response to droughts with global observations of vegetation water content. *Glob Chang Biol* 2021;27(23):6005–24.
- [18] Dong B, Yu Y, Pereira P. Non-growing season drought legacy effects on vegetation growth in southwestern China. *Sci Total Environ* 2022;846:157334.
- [19] Anderegg WRL, Konings AG, Trugman AT, Yu K, Bowling DR, Gabbitas R, et al. Hydraulic diversity of forests regulates ecosystem resilience during drought. *Nature* 2018;561(7724):538–41.
- [20] Yao Y, Liu Y, Zhou S, Song J, Fu B. Soil moisture determines the recovery time of ecosystems from drought. *Global Chang Biol* 2023;29(13):3562–74.
- [21] Ding Z, Peng J, Qiu S, Zhao Y. Nearly half of global vegetated area experienced inconsistent vegetation growth in terms of greenness, cover, and productivity. *Earth's Futur* 2020;8(10):1–15.
- [22] Zhang Y, Song C, Band L, Sun G. No proportional increase of terrestrial gross carbon sequestration from the greening Earth. *J Geophys Res Biogeo* 2019; 124(8):2540–53.
- [23] Piao S, Wang X, Park T, Chen C, Lian X, He Y, et al. Characteristics, drivers and feedbacks of global greening. *Nat Rev Earth Environ* 2020;1(1):14–27.
- [24] Street LE, Shaver GR, Williams M, Van Wijk MT. What is the relationship between changes in canopy leaf area and changes in photosynthetic CO₂ flux in arctic ecosystems? *J Ecol* 2007;95(1):139–50.
- [25] Walther S, Guanter L, Heim B, Jung M, Duveiller G, Wolanin A, et al. Assessing the dynamics of vegetation productivity in circumpolar regions with different satellite indicators of greenness and photosynthesis. *Biogeosciences Discuss* 2018;15(20):6221–56.
- [26] Lü Y, Fu B, Feng X, Zeng Y, Liu Y, Chang R, et al. A policy-driven large scale ecological restoration: quantifying ecosystem services changes in the Loess Plateau of China. *PLoS One* 2012;7(2):e31782.
- [27] Tian F, Liu L, Yang J, Wu J. Vegetation greening in more than 94% of the Yellow River Basin (YRB) region in China during the 21st century caused jointly by warming and anthropogenic activities. *Ecol Ind* 2021;125:107479.
- [28] Zhang W, Wang L, Xiang F, Qin W, Jiang W. Vegetation dynamics and the relations with climate change at multiple time scales in the Yangtze River and Yellow River Basin, China. *Ecol Ind* 2020;110:105892.
- [29] Ding Z, Zheng H, Wang J, O'Connor P, Li C, Chen X, et al. Integrating top-down and bottom-up approaches improves practicality and efficiency of large-scale ecological restoration planning: insights from a social–ecological system. *Engineering* 2023;31:50–8.
- [30] Zhao F, Wu Y, Yin X, Alexandrov G, Qiu L. Toward sustainable revegetation in the Loess Plateau using coupled water and carbon management. *Engineering* 2022;15:143–53.
- [31] Lan H, Peng J, Zhu Y, Li L, Pan B, Huang Q, et al. Research on geological and surficial processes and major disaster effects in the Yellow River Basin. *Sci China Earth Sci* 2022;65(2):234–56.
- [32] Li J, Peng S, Li Z. Detecting and attributing vegetation changes on China's Loess Plateau. *Agric For Meteorol* 2017;247:260–70.
- [33] Li Y, Zhang L, Qiu J, Yan J, Wan L, Wang P, et al. Spatially explicit quantification of the interactions among ecosystem services. *Landsc Ecol* 2017; 32(6): 1181–99.
- [34] Yu Y, Zhao W, Martinez-Murillo JF, Pereira P. Loess Plateau: from degradation to restoration. *Sci Total Environ* 2020;738:140206.
- [35] Zhao M, Running SW. Drought-induced reduction in global terrestrial net primary production from 2000 through 2009. *Science* 2010;329(5994):940–3.
- [36] Running S, Zhao M. MOD17A3HGF MODIS/Terra net primary production gap-filled yearly L4 global 500 m SIN Grid V006 [Data set]. Sioux Falls, SD: NASA EOSDIS The Land Processes Distributed Active Archive Center (LP DAAC); 2019.

- [37] Myneni R, Knyazikhin Y, Part T. MOD15A2HMODIS/Terra leaf area index/FPAR 8-Day L4 Global 500m SIN Grid V006. [Data set]. Greenbelt, MD: The level-1 and Atmosphere Archive and Distributed Active Archive Center (LAADS DAAC); 2015.
- [38] Huete A, Didan K, Miura H, Rodriguez EP, Gao X, Ferreira LF. Overview of the radiometric and biophysical performance of the MODIS vegetation indices. *Remote Sens Environ* 2002;83(1–2):195–213.
- [39] Funk C, Peterson P, Landsfeld M, Pedreros D, Verdin J, Shukla S, et al. The climate hazards infrared precipitation with stations—a new environmental record for monitoring extremes. *Sci Data* 2015;2(1):150066.
- [40] Fensholt R, Rasmussen K, Kaspersen P, Huber S, Horion S, Swinnen E. Assessing land degradation/recovery in the African Sahel from long-term Earth observation based primary productivity and precipitation relationships. *Remote Sens* 2013;5(2):664–86.
- [41] Horion S, Prishchepov AV, Verbesselt J, de Beurs K, Tagesson T, Fensholt R. Revealing turning points in ecosystem functioning over the Northern Eurasian agricultural frontier. *Glob Chang Biol* 2016;22(8):2801–17.
- [42] Bernardino PN, De Keersmaecker W, Fensholt R, Verbesselt J, Somers B, Horion S. Global-scale characterisation of turning points in arid and semiarid ecosystem functioning. *Glob Ecol Biogeogr* 2020;29(7):1230–45.
- [43] Abel C, Horion S, Tagesson T, Brandt M, Fensholt R. Towards improved remote sensing based monitoring of dryland ecosystem functioning using sequential linear regression slopes (SeRGS). *Remote Sens Environ* 2019;224:317–32.
- [44] Hodgson D, McDonald JL, Hosken DJ. What do you mean, ‘resilient’? *Trends Ecol Evol* 2015;30(9):503–6.
- [45] Cai H, Yang X, Xu X. Human-induced grassland degradation/restoration in the central Tibetan Plateau: the effects of ecological protection and restoration projects. *Ecol Eng* 2015;83:112–9.
- [46] Cao Y, Xie Z, Woodgate W, Ma X, Cleverly J, Pang Y, et al. Ecohydrological decoupling of water storage and vegetation attributed to China’s large-scale ecological restoration programs. *J Hydrol* 2022;615:128651.
- [47] Wu D, Zhao X, Liang S, Zhou T, Huang K, Tang B, et al. Time-lag effects of global vegetation responses to climate change. *Glob Chang Biol* 2015;21(9):3520–31.
- [48] Wu X, Wang S, Fu B, Feng X, Chen Y. Socio-ecological changes on the Loess Plateau of China after Grain to Green Program. *Sci Total Environ* 2019;678:565–73.
- [49] Chen JM, Ju W, Ciais P, Viovy N, Liu R, Liu Y, et al. Vegetation structural change since 1981 significantly enhanced the terrestrial carbon sink. *Nat Commun* 2019;10(1):4259.
- [50] Hu Z, Piao S, Knapp AK, Wang X, Peng S, Yuan W, et al. Decoupling of greenness and gross primary productivity as aridity decreases. *Remote Sens Environ* 2022;279:113120.
- [51] Pan N, Wang S, Wei F, Shen M, Fu B. Inconsistent changes in NPP and LAI were determined from the parabolic LAI versus NPP relationship. *Ecol Ind* 2021;131:108134.
- [52] Yan D, Scott RL, Moore DJP, Biederman JA, Smith WK. Understanding the relationship between vegetation greenness and productivity across dryland ecosystems through the integration of PhenoCam, satellite, and eddy covariance data. *Remote Sens Environ* 2019;223:50–62.
- [53] Hordijk I, Maynard DS, Hart SP, Lidong M, ter Steege H, Liang J, et al. Evenness mediates the global relationship between forest productivity and richness. *J Ecol* 2023;111(6):1–19.
- [54] Wang S, Fu B, Liang W. Developing policy for the Yellow River sediment sustainable control. *Natl Sci Rev* 2016;3(2):162–4.
- [55] Li Y, Zhang X, Cao Z, Liu Z, Zhi L, Liu Y. Towards the progress of ecological restoration and economic development in China’s Loess Plateau and strategy for more sustainable development. *Sci Total Environ* 2021; 756:143676.
- [56] Chen D, Wei W, Chen L. Effects of terracing practices on water erosion control in China: a meta analysis. *Earth Sci Rev* 2017;173:109–21.
- [57] Tian F, Yang J, Du R, Lin Y, Chen M, Wu J. Sustained vegetation greening enhanced ecosystem water-use efficiency in the Loess Plateau of China in recent 20 years. *Ecol Eng* 2022;184:106768.
- [58] Zheng H, Lin H, Zhu X, Jin Z, Bao H. Divergent spatial responses of plant and ecosystem water-use efficiency to climate and vegetation gradients in the Chinese Loess Plateau. *Glob Planet Change* 2019;181:102995.
- [59] Li T, Xia J, Zhang L, She D, Wang G, Cheng L. An improved complementary relationship for estimating evapotranspiration attributed to climate change and revegetation in the Loess Plateau, China. *J Hydrolo* 2021;592:125516.
- [60] Luedeling E, Börner J, Amelung W, Schifffers K, Shepherd K, Rosenstock T. Forest restoration: overlooked constraints. *Science* 2019;366(6463):315.
- [61] Zeng Y, Sarira TV, Carrasco LR, Chong KY, Friess DA, Lee JSH, et al. Economic and social constraints on reforestation for climate mitigation in Southeast Asia. *Nat Clim Chang* 2020;10(9):842–4.
- [62] Mirzabaev A, Sacande M, Motlagh F, Shyrokaya A, Martucci A. Economic efficiency and targeting of the African Great Green Wall. *Nat Sustain* 2022; 5(1): 17–25.
- [63] Gomes E, Inácio M, Bogdzevič K, Kalinauskas M, Karnauskaitė D, Pereira P. Future scenarios impact on land use change and habitat quality in Lithuania. *Environ Res* 2021;197:111101.