

DOI: 10.5846/stxb202104271113

郭睿妍, 田佳, 杨志玲, 杨泽康, 苏文瑞, 刘文娟. 基于 GEE 平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征. 生态学报, 2022, 42(13): 5437-5445.

Guo R Y, Tian J, Yang Z L, Yang Z K, Su W R, Liu W J. Spatio-temporal variation characteristics of forest net primary productivity in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine cloud platform. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(13): 5437-5445.

基于 GEE 平台的黄河流域森林植被净初级生产力时空变化特征

郭睿妍, 田佳*, 杨志玲, 杨泽康, 苏文瑞, 刘文娟

宁夏大学农学院, 银川 750021

摘要: 黄河流域是我国重要的生态屏障, 研究黄河流域森林植被净初级生产力 (Net Primary Productivity, NPP) 的时空变化特征及驱动机制, 对解释黄河流域森林碳汇/源变化具有重要意义。基于 Google Earth Engine (GEE) 云平台, 利用 MOD17A3H V6 NPP 数据、MCD12Q1 V6 土地覆盖类型数据、ECMWF/ERA5 气象数据和 USGS/SRTMGL1_003 高程数据, 采用岭回归分析、Hurst 指数和冗余分析 (Redundancy Analysis, RDA) 对黄河流域 2001—2019 年森林 NPP 的时空变化特征及影响因子进行分析。结果表明: (1) 2001—2019 年, 黄河流域森林平均总面积为 3.66 万 km², 其中阔叶林、针叶林、混交林平均面积分别为: 2.64 万 km²、0.01 万 km² 和 1.01 万 km², 森林 NPP 年总量呈线性增加趋势, 其均值为 8.99Tg C, 年均增速为 0.36Tg C/a, 19a 增长率为 173.60%; 不同森林类型的 NPP 年总量均值分别为: 4.79Tg C (阔叶林)、6.04×10⁻⁵Tg C (针叶林) 和 0.64Tg C (混交林), 年均增速为: 阔叶林 (0.16Tg C/a) > 混交林 (0.04Tg C/a) > 针叶林 (6.98×10⁻⁶Tg C/a)。 (2) 2001—2019 年, 黄河流域森林年均 NPP 呈线性增加趋势, 其均值为 241.58g C m⁻² a⁻¹, 年均增速为 7.18g C m⁻² a⁻¹, 19a 增长率为 108.63%; 不同森林类型的年均 NPP 均值分别为: 178.48g C m⁻² a⁻¹ (阔叶林)、0.60g C m⁻² a⁻¹ (针叶林) 和 62.49g C m⁻² a⁻¹ (混交林), 年均增速为: 阔叶林 (4.75g C m⁻² a⁻¹) > 混交林 (2.39g C m⁻² a⁻¹) > 针叶林 (0.04g C m⁻² a⁻¹)。 (3) 黄河流域森林 NPP 呈增加趋势的面积占 94.50%, 其中显著增加的面积占 73.29%; 呈减少趋势的面积占 5.50%, 其中显著减少的面积占 1.57%。阔叶林 NPP 显著增加的面积最高 (76.78%), 其次为混交林 (60.84%), 针叶林最少 (56.76%)。 (4) 黄河流域森林 NPP 的 Hurst 指数 (H) 介于 0.38—1.00 之间, 平均值为 0.87, 其中 H≥0.5 的像元数约占 99.34%, 黄河流域森林 NPP 在未来一段时间内仍保持持续增加趋势。 (5) 归因分析表明环境因子对黄河流域森林 NPP 时空变化的总解释率为 55.80%, 显著影响的环境因子为经度 (35.50%)、降水 (8.00%)、气温 (6.50%) 和纬度 (5.40%)。2001—2019 年黄河流域森林 NPP 呈增加趋势, 且呈现较强的可持续性; GEE 云平台结合冗余分析可及时、高效获取黄河流域森林 NPP 的时空变化并对其进行归因分析。

关键词: 森林 NPP; 时空变化; 冗余分析 (RDA); Google Earth Engine (GEE); 黄河流域

Spatio-temporal variation characteristics of forest net primary productivity in the Yellow River Basin based on Google Earth Engine cloud platform

GUO Ruiyan, TIAN Jia*, YANG Zhiling, YANG Zekang, SU Wenrui, LIU Wenjuan

School of Agriculture, Ningxia University, Yinchuan 750021, China

Abstract: The Yellow River Basin is an important ecological barrier in China. To study the spatio-temporal variation characteristics and driving mechanisms of the Net Primary Productivity (NPP) of forest is of great significance to explain the change of forest carbon sink and source in the Yellow River Basin. Based on Google Earth Engine (GEE) cloud platform, MOD17A3H V6 NPP data, MCD12Q1 V6 land cover data, ECMWF/ERA5 weather data, USGS/SRTMGL1_003

基金项目: 国家自然科学基金 (31960330); 宁夏自然科学基金 (2020AAC03112)

收稿日期: 2021-04-27; **网络出版日期:** 2022-03-18

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: yuhudie63@qq.com

elevation data, and ridge regression analysis, Hurst index, redundancy analysis (RDA) were used to analyze the spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of the forest NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2019. The results showed that (1) from 2001 to 2019, the average total area of forest in the Yellow River Basin was 36600 km², of which the average area of broadleaf forest, coniferous forest and mixed forest was 26400 km², 100 km² and 10100 km². The annual total forest NPP showed a linear increasing trend, with an average value of 8.99 Tg C, an average annual growth rate of 0.36 Tg C/a, and a 19-year growth rate of 173.60%. The averagely annual total NPP of different forest types were: 4.79 Tg C (broadleaf forest), 6.04×10^{-5} Tg C (coniferous forest) and 0.64 Tg C (mixed forest), and the averagely annual growth rate were: broadleaf forest (0.16 Tg C/a) > mixed forest (0.04 Tg C/a) > coniferous forest (6.98×10^{-6} Tg C/a). (2) From 2001 to 2019, the annual average NPP of the forest in the Yellow River Basin increased linearly, with an average value of 241.58 g C m⁻² a⁻¹, an average annual growth rate of 7.18 g C m⁻² a⁻¹, and a 19-year growth rate of 108.63%. The mean annual average NPP of different forest types were 178.48 g C m⁻² a⁻¹ (broadleaf forest), 0.60 g C m⁻² a⁻¹ (coniferous forest) and 62.49 g C m⁻² a⁻¹ (mixed forest), and the averagely annual growth rate were: broadleaf forest (4.75 g C m⁻² a⁻¹) > mixed forest (2.39 g C m⁻² a⁻¹) > coniferous forest (0.04 g C m⁻² a⁻¹). (3) The area of forest NPP showed an increasing trend in the Yellow River Basin accounting for 94.50%, of which 73.29% was significantly increased; the area showed a decreasing trend accounting for 5.50%, of which the area with a significant decrease accounted for 1.57%. The area of the significantly increased of the broadleaf forest NPP was the highest (76.78%), followed by mixed forest (60.84%) and coniferous forest (56.76%). (4) The Hurst index (H) of the forest NPP in the Yellow River Basin was between 0.38—1.00, with an average value of 0.87. Among them, the amount of $H \geq 0.5$ accounted for about 99.34%, and the forest NPP in the Yellow River Basin would continue to increase in the future. (5) Attribution analysis showed that the total interpretation rate of the environmental factors on the spatio-temporal variation of the forest NPP in the Yellow River Basin was 55.80%, and the environmental factors that had significant effects were longitude (35.50%), precipitation (8.00%), temperature (6.50%) and latitude (5.40%). From 2001 to 2019, the forest NPP of the Yellow River Basin increased and showed strong sustainability. The GEE cloud platform combined with redundant analysis can timely and efficiently obtain the spatio-temporal variation of the forest NPP of the Yellow River Basin and perform an attribution analysis.

Key Words: forest NPP; spatial-temporal variation; redundancy analysis; Google Earth Engine; Yellow River Basin

联合国政府间气候变化专门委员会(Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC)评估报告 6 (AR6)中指出:自 1750 年以来,由于人类大量开采矿物资源和滥用森林资源导致大气中 CO₂等吸热性强的温室气体逐年增加,温室气体 CO₂、CH₄和 N₂O 的浓度均已大幅度增长,分别为 47%、156%和 23%,由此引发全球变暖等一系列气候问题,并破坏了生物圈的平衡^[1]。目前,碳汇是全球气候变化研究的热点^[2],森林作为陆地生态系统中最大的碳库,对全球碳循环具有重要意义,而植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)与碳汇呈强相关关系,是判定森林碳汇/源的重要指标^[3]。黄河流域作为我国重要的生态屏障和经济地带,承载着国家生态安全和社会经济发展的重要使命,我国已将黄河流域生态保护和高质量发展定为重大国家战略,健康稳定的森林是实现流域高质量发展的基础^[4-5],研究黄河流域森林 NPP 时空变化对解释黄河流域森林碳汇/源的变化具有重要意义,探索森林 NPP 与环境因子的关系可为黄河流域森林经营与管理提供科学参考。

模型模拟法是目前应用最为广泛的 NPP 估算方法,随着遥感技术的发展,使得基于遥感数据估算 NPP 的模型得到快速广泛的发展,如 CASA 模型、BEPS 模型和 BIOME-BGC 模型等^[3,6]。本文选用美国国家宇航局(NASA)的 MOD17A3H 产品,它是基于 Running 等^[7]通过 BIOME-BGC 模型(生物地球化学过程模型)估算的全球陆地植被净初级生产力数据,在区域尺度和大尺度的植被生长研究中应用广泛^[7-8],国内众多学者利用 MOD17A3H 数据对全国和部分区域的植被 NPP 进行了估算研究,并进一步验证了该数据的可靠性,如李

登科等^[9]、刘琳等^[10]和国志兴等^[11]在全国和区域的尺度上,分别对植被 NPP 的时空变化特征和其与环境因子的关系进行了探讨,并进一步验证了该数据的精度。目前,黄河流域森林 NPP 的研究相对较少且都集中在植被层面,贺振等^[12]和张懿铨等^[13]分别对黄河流域和黄河源头青藏高原高寒地区的植被 NPP 进行了时空变化特征的分析,但缺少对影响植被 NPP 变化的因素的归因分析;陈强等^[14]基于 MODIS-NDVI 数据构建 CASA 模型分析了黄河流域植被 NPP 的时空变化,但只针对影响植被 NPP 变化的气候因子进行分析;田智慧等^[15]对黄河流域植被 NPP 时空变化特征及其驱动因素的影响作用进行探讨,但主要考虑了气候和土地利用变化的影响作用,并未涉及地理位置和地形因子的影响。通过查阅相关资料,目前基于 GEE 平台的针对黄河流域森林 NPP 的时空变化特征及其归因的研究还未见报道。

因此,本文将基于 Google Earth Engine(GEE)遥感云平台,利用黄河流域 2001—2019 年的 MOD17A3H V6 NPP 数据、MCD12Q1 V6 土地覆盖类型数据、ECMWF/ERA5 气象数据和 USGS/SRTMGL1_003 高程数据,采用岭回归分析、Hurst 指数和冗余分析,对黄河流域 2001—2019 年森林 NPP 的时空变化规律进行探讨,定量分析各环境因子对森林 NPP 的影响作用。研究结果可为黄河流域森林碳汇/源时空变化研究提供数据支持,也可科学制定流域内森林经营管理方案提供依据。

1 研究区概况

黄河流域介于 32°N—42°N 和 95°E—119°E 之间,流域横跨青海、四川、甘肃、宁夏、内蒙古、陕西、山西、河南及山东 9 省(图 1),面积约 80 万 km²。黄河流域幅员辽阔,地貌差别较大,从西到东横跨青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原 4 个地貌单元^[16]。域内气候差异显著,以温带季风气候为主,年均气温 12—14℃,降水时空分布不均、年际差异较大,年均降水量 200—600mm。黄河流域植被的分布趋同于降水的分布,从西到东依次为稀疏灌木草原、草原、阔叶林和农作物,域内土壤种类丰富,主要有草甸土、栗钙土、黄绵土和棕壤等^[17]。

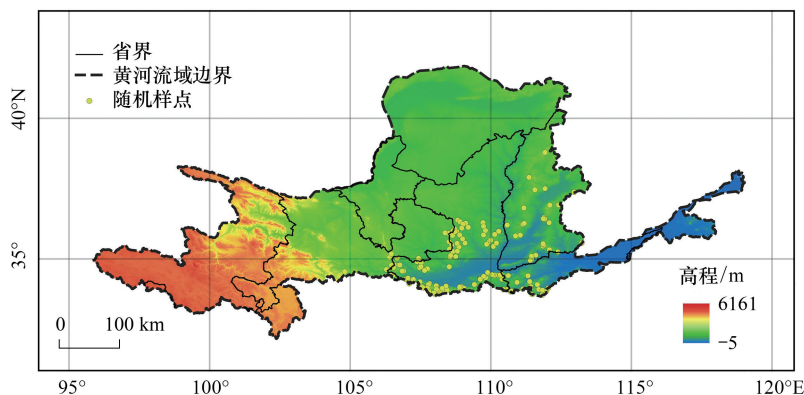


图 1 黄河流域位置

Fig.1 Location of the Yellow River Basin

2 数据与方法

2.1 数据来源

本研究中所采用的遥感数据产品均来自于 GEE 自带的数据库。NPP 数据源于 MOD17A3H V6 产品,该产品提供有关 500m 空间分辨率下的年度净初级生产力(NPP)的信息,该数据广泛应用于生态系统碳循环的研究。土地覆盖类型数据利用 MCD12Q1 V6 数据,它是由 MODIS Terra 和 Aqua 地表反射数据,采用监督分类得到的空间分辨率为 500m 的全球土地覆盖产品。气象数据来自 ECMWF/ERA5,该数据可提供每月的温

度、降雨等数据,空间分辨率为 0.25° 。高程数据为 USGS/SRTMGL1_003,空间分辨率为 30m。

2.2 数据处理

在 GEE 云平台上基于黄河流域矢量边界,根据每年的土地利用类型对流域内森林 NPP 分针叶林、阔叶林和混交林从 2001—2019 年进行逐年提取。其中,流域上游是以耐寒的云冷杉为主的高山针叶林,流域中游甘肃、宁夏地区以混交林为主,黄土高原东部和南部山地则以落叶阔叶林为主^[18-19]。针叶林、混交林、阔叶林的分类采用 MCD12Q1 V6 数据中的 IGBP(International Geosphere-Biosphere Programme)分类系统,利用该分类系统对 MOD17A3H V6 NPP 数据进行森林类型掩膜并提取森林 NPP^[20]。在此基础上利用岭回归(ridge regression)分析森林 NPP 年变化趋势,并统计变化趋势的显著性。利用重标极差法计算黄河流域森林 NPP 的 Hurst 指数^[21],从而判断森林 NPP 变化趋势的持续性。在 19a 的森林 NPP 数据上均匀布设 150 个随机样点,分别对这 150 个点的 NPP 值、经纬度、温度、降水、高程、坡度和坡向进行提取。利用 Canoco 5 软件进行 RDA 分析,定量分析各环境因子对森林 NPP 时空变化的解释率。

3 结果与分析

3.1 黄河流域森林 NPP 时间变化特征

3.1.1 NPP 年总量变化

图 2 可见,2001—2019 年黄河流域森林 NPP 年总量整体呈线性增加的趋势,其值在 $3.94\text{--}12.51\text{Tg C}$ 内波动,年均 NPP 总量为 8.99Tg C ,年均增速为 0.36Tg C/a ,19a 增长率为 173.60%。此外,2001—2019 年森林面积从 3.17 万 km^2 增加到 4.07 万 km^2 ,年均增加 0.05 万 km^2 ,19a 森林面积增长率 29.97%。对于不同的森林类型,NPP 年总量均呈显著的线性增加趋势(图 3),NPP 年总量平均值分别为: 4.79Tg C (阔叶林)、 $6.04 \times 10^{-5}\text{Tg C}$ (针叶林)和 0.64Tg C (混交林),年均增速排序为:阔叶林(0.16Tg C/a)>混交林(0.04Tg C/a)>针叶林($6.98 \times 10^{-6}\text{Tg C/a}$),19a 增长率分别为:141.40%(阔叶林)、839.37%(针叶林)和 292.31%(混交林)。从不同森林类型面积距平的变化趋势(图 3)可知,针叶林和混交林的面面积变化趋势相同,都呈显著增加的趋势,增速分别为 4.88×10^{-4} 万 km^2/a 和 0.02 万 km^2/a ,而阔叶林的面面积变化则为波动变化,2001—2011 年为波动上升阶段,上升速率为 0.05 万 km^2/a ,2011—2016 年为下降阶段,下降速率为 0.02 万 km^2/a ,2016 年后阔叶林面积以 0.04 万 km^2/a 的速率上升。

3.1.2 年均 NPP 变化

由图 4 可知,2001—2019 年黄河流域森林年均 NPP 呈线性增加的趋势,其值在 $125.57\text{--}315.16\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ 内波动,年均 NPP 的平均值为 $241.58\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$,年均增速为 $7.18\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$,19a 增长率为 108.63%。对于不同的森林类型,年均 NPP 都呈线性增加的趋势(图 5),年均 NPP 的平均值分别为 $178.48\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ (阔叶林)、 $0.60\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ (针叶林)和 $62.49\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$ (混交林),年均增速排序为:阔叶林($4.75\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$)>混交林($2.39\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$)>针叶林($0.04\text{g C m}^{-2}\text{a}^{-1}$),19a 增长率分别为:97.03%(阔叶林)、262.99%(针叶林)和 140.66%(混交林)。此外,由表 1 可以看出,不同森林类型的年均 NPP 具有极显著差异($F=588.99$),多重比较分析表明,阔叶林、针叶林和混交林年均 NPP 两两之间差异显著。

3.2 黄河流域森林 NPP 的空间变化特征

从图 6 可以看出,黄河流域的陕西中部(如子午岭、黄龙山等区域)、南部(如秦岭北麓、六盘山、吴山等区

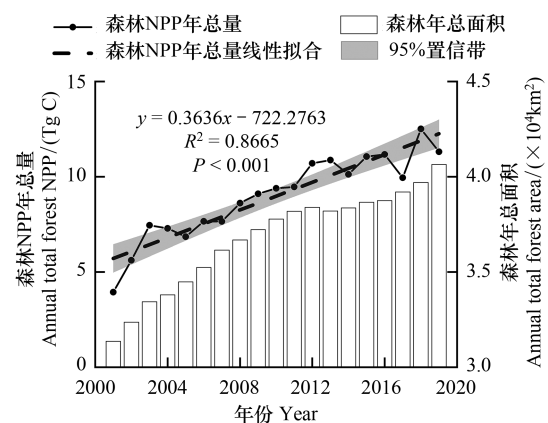


图 2 黄河流域森林植被净初级生产力(NPP)年总量变化

Fig. 2 Variation in the annual total net primary productivity (NPP) of forest in the Yellow River Basin

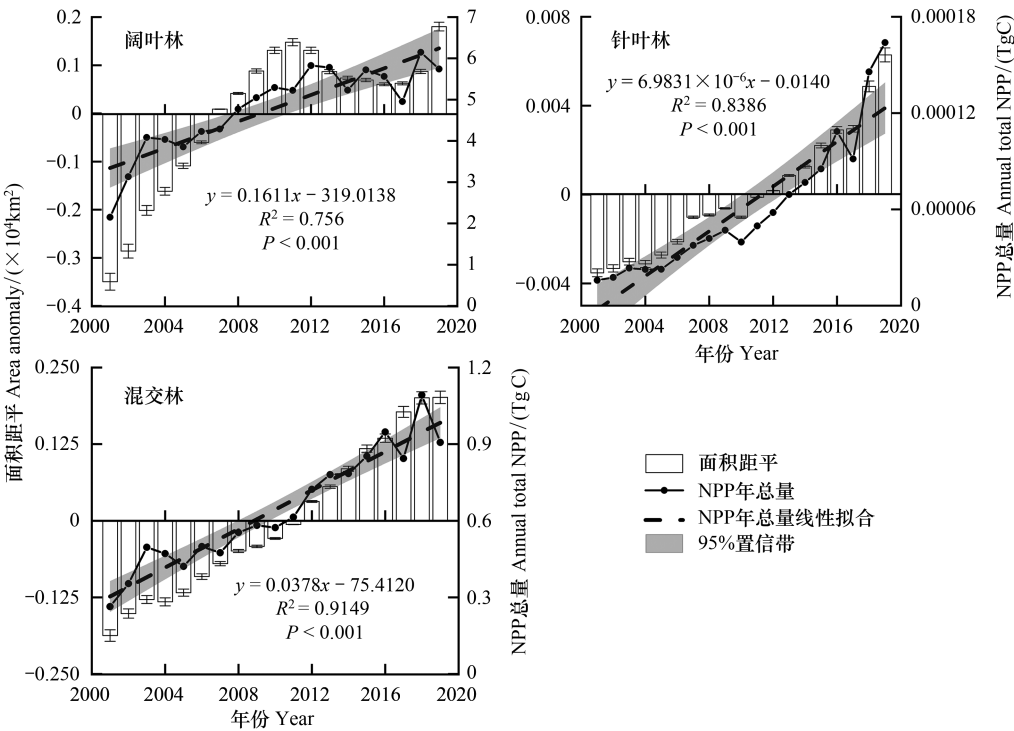


图3 黄河流域不同森林类型 NPP 年总量变化

Fig.3 Variation in the annual total NPP of different forest types in the Yellow River Basin

域)及山西吕梁山等山地丘陵地区,森林 NPP 增加较快;而山西中部(如中条山等区域)和河南西北部(如伏牛山、小秦岭等区域),森林 NPP 增长较慢;山西东南部与河南交界处以及甘南藏族自治州等山地丘陵地区,森林 NPP 缓慢减少,可见黄河流域森林 NPP 的空间变化具有明显的异质性。根据图 7 的统计结果,黄河流域森林 NPP 呈增加趋势的面积为 94.50%,其中显著增加的面积占 73.29%;森林 NPP 呈减少趋势的面积为 5.50%,其中显著减少的面积占 1.57%。对比来看,黄河流域森林 NPP 呈增加趋势的面积比减少的面积多出 89%,整体上呈增加趋势。各森林类型的 NPP 变化趋势面积百分比统计如图 8 所示,阔叶林 NPP 增加趋势显著的面积百分比最高(76.78%),其次为混交林(60.84%),针叶林最少(56.76%)。

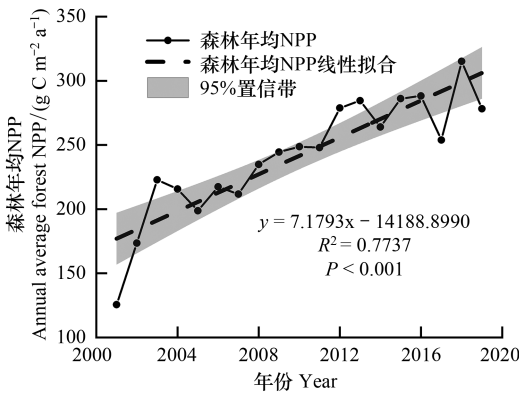


图4 黄河流域森林年均 NPP 变化

Fig.4 Variation in annual average NPP of forest in the Yellow River Basin

表 1 黄河流域不同森林类型年均 NPP 的单因素方差分析结果

Table 1 Results of one-way analysis of variance of annual average NPP of different forest types in the Yellow River Basin					
	平方和 Sum of squares	df	均方 Mean square	F	P
组内 Between groups	388458.09	2	194229.05	588.99	<0.01
组间 Within groups	17807.35	54			
总计 Total	406265.44	56			

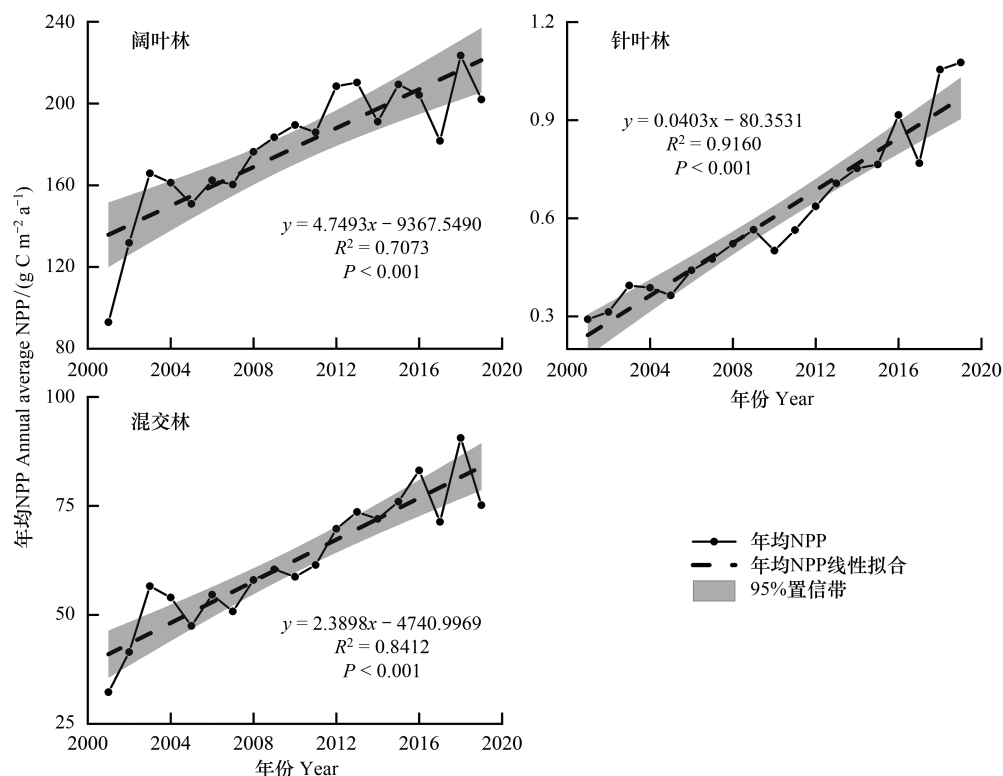


图5 黄河流域不同森林类型年均 NPP 变化

Fig.5 Variation in annual average NPP of different forest types in the Yellow River Basin

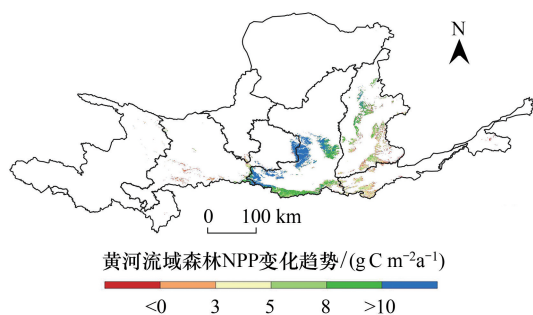


图6 黄河流域森林 NPP 变化趋势

Fig.6 Forest NPP change trend of the Yellow River Basin

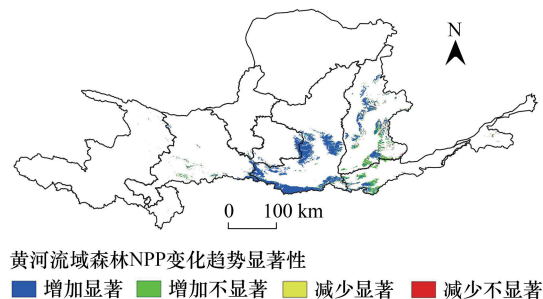


图7 黄河流域森林 NPP 变化趋势显著性

Fig.7 Significance of forest NPP change trend of the Yellow River Basin

3.3 黄河流域森林 NPP 的可持续性分析

对 2001—2019 年间黄河流域森林 NPP 进行逐像元的 Hurst 指数分析,结果如图 9 所示,黄河流域森林 NPP 的 Hurst 指数介于 0.38—1.00 之间,平均值为 0.87,其中 $H < 0.5$ 的像元数仅占 0.66%,即呈弱反持续性 ($0.25 \leq H < 0.5$); $H \geq 0.5$ 的像元数约占 99.34%,其中, $H \geq 0.5$ 的像元内仅有 10.66%的像元呈弱持续性 ($0.5 < H \leq 0.75$),剩余 89.34%的像元则呈强持续性 ($0.75 < H \leq 1$)。从图 9 还可知,强持续性的区域主要分布在陕西的中部和南部的山区。综合分析,未来黄河流域森林 NPP 的变化趋势与 2001—2019 年间的变化趋势基本相同且具有较强的持续性,流域内森林 NPP 在未来一段时间内仍保持持续增加的趋势。

3.4 黄河流域森林 NPP 时空变化归因分析

将环境因子分为地理位置因子(纬度、经度)、地形因子(高程、坡度和坡向)和气候因子(气温、降水)

3 类,解释各种环境因子对于森林 NPP 的影响。如图 10 所示,环境因子对黄河流域森林 NPP 的时空变化特征的总体解释率为 55.80%,剩余未解释部分可能由于林木本身的生物学特性,土壤及人为因素等造成。在所选的 3 类环境因子中,地理位置对于森林 NPP 时空变化的解释率最高(21.19%),其次为气候因子(13.41%),地形因子的解释率小于 0。在多因子的协同解释率中,地理位置和气候因子之间的协同解释率最高(11.54%),略低于气候因子的独立解释率。而 3 类环境因子共同解释的部分只有 6.59%,表明所选的环境因子对森林 NPP 时空变化的效应不是同等的,某些因素起主导作用。另外,由表 2 可知,各环境因子对黄河流域森林 NPP 时空变化的解释率排序为:经度(35.50%)>降水(8.00%)>气温(5.40%)>纬度(6.50%)>坡向(0.4%)>坡度(<0.10%)>高程(<0)。其中,经度、降水、气温和纬度因素在 0.05 水平上显著,表明其对森林 NPP 变化的影响作用较强。其余 3 个因素的影响未达到显著水平。

4 讨论

4.1 黄河流域森林 NPP 持续增加的原因

2001—2019 年,黄河流域森林 NPP 年总量与年均值总体呈显著上升趋势(图 2、图 4),增速分别为 0.36Tg C/a 和 $7.18\text{g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。黄河流域森林 NPP 空间变化的分析也表明,森林 NPP 呈增加趋势的面积达到 94.50%,其中显著增加的面积达 73.29%(图 6、图 7);对增加趋势的可持续进行 Hurst 分析,结果表明,未来

黄河流域森林 NPP 的变化趋势与 2001—2019 年间的变化趋势基本相同,即仍保持持续增加的趋势(图 9)。为了探索黄河流域森林 NPP 持续增加的原因,本文对可能影响森林 NPP 时空变化的环境因子进行 RDA 归因分析,通过分析发现经度、降水、气温和纬度是影响森林 NPP 变化的显著环境因子(图 10、表 2)。研究证明,森林植被的经度地带性是受沿经度梯度方向的水分和热量条件差异而产生^[22],水热条件向好的区域,森林的生长季相应延长,森林 NPP 随之升高^[23]。气候的形成受地理位置影响,经度对气候的影响主要通过经度确定的地形等要素对太阳辐射和大气环流产生不同的影响作用,进而影响区域气候的变化^[24];纬度对气候的影响则是通过对太阳高度和太阳辐射的影响进而造成气候的地带性分布。气温升高在一定程度上可以提高植被光合作用速率和水分利用效率,加速森林生态系统的物质循环,从而使得森林 NPP 增加;降水量增加,土壤湿度上升,水分胁迫作用相应下降,有利于森林干物质的积累,森林 NPP 增加^[25]。

4.2 GEE 云平台结合 RDA 分析森林 NPP 时空变化及归因的优势

相较于传统的 GIS 处理体系,GEE 云平台以其拥有的不断更新的庞大数据库和强大的数据处理和空间分析能力,为在大尺度分析遥感数据提供了巨大的可能性^[26]。通过 GEE 云平台专用的高性能计算(HPC)基础架构,研究人员可以轻松、快捷的获取长时间序列的全球遥感数据^[27],通过访问 Internet 的应用程序编程界面以及相关的基于 Web 的交互式开发环境来访问和控制空间分析功能,不受图像带、投影和分辨率等的影

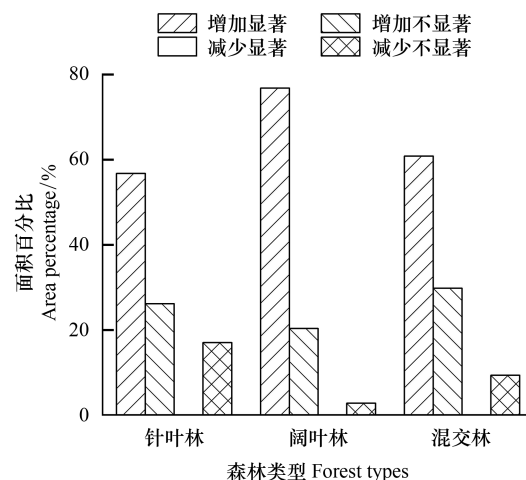


图 8 黄河流域不同森林类型 NPP 变化趋势显著性面积百分比
Fig.8 Percentage of areas with significant change trend of forest NPP in different forest types in the Yellow River Basin

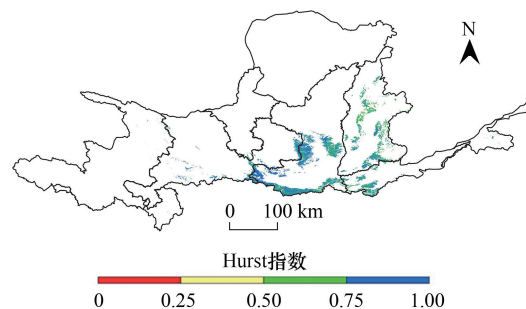


图 9 黄河流域森林 NPP 的 Hurst 指数
Fig.9 Hurst index of forest NPP in the Yellow River Basin

表 2 不同环境因子对黄河流域森林 NPP 的影响

Table 2 Impact of different environmental factors on forest NPP in the Yellow River Basin

环境因子 Environmental factors	解释率/% Interpretation	F	P	环境因子 Environmental factors	解释率/% Interpretation	F	P
经度 Longitude	35.50	86.80	0.002	坡向 Aspect	0.40	1.30	0.296
降水 Precipitation	8.00	21.20	0.002	坡度 Slope	<0.10	<0.10	0.866
气温 Temperature	6.50	23.40	0.002	高程 Elevation	<0	0	1.000
纬度 Latitude	5.40	15.90	0.002				

响,可以快速进行模型制作和结果可视化^[28],因此,GEE 为黄河流域森林 NPP 的长时序分析提供了一种新颖的准确评估方法。一般研究 NPP 时空变化归因的方法有最小二乘法^[29]、逐步回归分析法^[30]、SVD 分析法^[31]和相关系数法^[11]等。其中,最小二乘法和逐步回归分析法仅能用于单个响应变量且自变量必须独立,SVD 分析法和相关系数分析法则可表达两个变量对于 NPP 变化的影响作用;而 RDA 分析法可以有效针对多个自变量因子(环境因子)进行检验,得出影响响应变量(NPP)的因子(组)同时给出解释能力(方差)^[32],因此,RDA 分析法在探究黄河流域森林 NPP 时空变化的归因上更有优势。综上,将 GEE 云平台与 RDA 分析相结合优势明显,可以快速、高效的获取森林 NPP 的时空变化并对其进行归因,在黄河流域森林碳汇研究中有着广阔的应用前景。

4.3 不足与展望

本文采用了 2001—2019 年的 MCD12Q1 V6 数据集 中的 IGBP 土地利用分类系统,IGBP 分类系统在全球的土地利用分类精度上达到 73.6%^[33],该分类系统在黄河流域西北地区没有识别到森林,存在一定的缺陷,但是并不影响本文关于黄河流域森林 NPP 时空变化特征及归因研究的结论正确性,不过可在未来的研究中找寻分类精度更高的产品。本文中环境因子对黄河流域森林 NPP 时空变化的影响只有 55.80%,其余未解释部分可能由于土壤因素和人类活动引起。故而在未来的研究中考虑加入土壤和人为因素对黄河流域森林 NPP 变化的影响作用。

5 结论

- (1)黄河流域 2001—2019 年森林 NPP 年总量与年均 NPP 均呈现出线性增加的趋势,增速分别为 0.36Tg C/a 和 7.18g C m⁻² a⁻¹,其中以阔叶林的增速最快,混交林和针叶林次之,阔叶林、混交林和针叶林年均 NPP 具有极显著差异。
- (2)黄河流域森林 NPP 的空间变化具有明显的区域差异,陕西省中部的子午岭、黄龙山、南部的秦岭北麓、六盘山、吴山及山西吕梁山等山地丘陵地区,森林 NPP 增加较快,其它区域则增加较慢或有减少,但整体

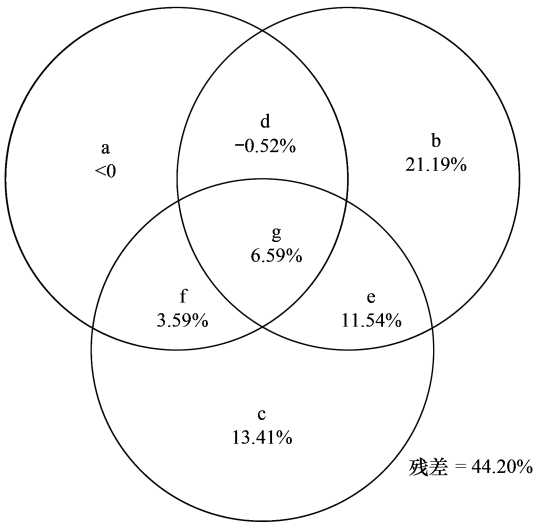


图 10 不同环境因子组对黄河流域森林 NPP 的影响

Fig. 10 Impact of different environmental - factor groups on forest NPP in the Yellow River Basin

a.地形因子的独立解释率 Independent interpretation of topographic factors;b.地理位置的独立解释率 Independent interpretation of geographical location;c.气候因子的独立解释率 Independent interpretation of meteorological factors;d.地形和地理位置的协同解释率 Synergic interpretation of topographic and geographical location factors;e.地理位置和气候因子的协同解释率 Synergic interpretation of geographical location and meteorological factors;f.地形和气候因子的协同解释率 Synergic interpretation of topographic and meteorological factors;g.三类因素的综合解释率 Comprehensive interpretation of 3 factors

上黄河流域森林 NPP 呈增加趋势,且呈现较强的可持续性。

(3) 影响黄河流域森林 NPP 时空变化的主要环境因子是经度、降水、气温和纬度,其中经度影响最大,降水、气温和纬度次之。但是,环境因子也只能解释黄河流域森林 NPP 时空变化的 55.80%,其余未解释的部分还需要进一步的研究。今后可增加土壤和人类活动对森林 NPP 变化的影响研究。

(4) 遥感大数据平台 GEE 结合冗余分析(RDA)可以快速、高效的获取黄河流域森林 NPP 的时空变化并对其进行归因分析,在黄河流域森林碳汇研究中有着广阔的应用前景。

参考文献(References):

- [1] 樊星,秦圆圆,高翔. IPCC 第六次评估报告第一工作组报告主要结论解读及建议. 环境保护, 2021, 49(Z2): 44-48.
- [2] Pan Y, Birdsey R A, Fang J, Houghton R, Kauppi P E, Kurz W A, Phillips O L, Shvidenko A, Lewis S L, Canadell J G, Ciais P, Jackson R B, Pacala S W, McGuire A D, Piao S, Rautiainen A, Sitch S, Hayes D. A large and persistent carbon sink in the world's forests. *Science*, 2011, 333(6045): 988-993.
- [3] Field, Behrenfeld, Randerson, Falkowski. Primary production of the biosphere: integrating terrestrial and oceanic components. *Science*, 1998, 281(5374): 237-240.
- [4] 蔡茂,郑云峰,孙永涛,卢佳,王柏昌,尹准生. 黄河流域天然林保护建设成效与存在问题研究. 华东森林经理, 2020, 34(S1): 87-90.
- [5] 连煜. 黄河资源生态问题及流域协同保护对策. 民主与科学, 2018(6): 20-23.
- [6] 卫亚星,王莉雯. 应用遥感技术模拟净初级生产力的尺度效应研究进展. 地理科学进展, 2010, 29(4): 471-477.
- [7] Running S W, Nemani R, Glassy J M, Thornton P E. MODIS daily photosynthesis (PSN) and annual net primary production (NPP) product (MOD17). Algorithm Theoretical Basis Document, 1999: 9-40.
- [8] Cui T X, Wang Y J, Sun R, Qiao C, Fan W J, Jiang G Q, Hao L, Zhang L. Estimating vegetation primary production in the Heihe river basin of China with multi-source and multi-scale data. *PLoS One*, 2016, 11(4): e0153971.
- [9] 李登科,王钊. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析. 生态环境学报, 2018, 27(3): 397-405.
- [10] 刘琳,李月臣,朱翠霞,杨扬,李琼瑶. 2001 年—2010 年重庆地区植被 NPP 时空变化特征及其与气候因子的关系. 遥感信息, 2013, 28(5): 99-108.
- [11] 国志兴,王宗明,张柏,刘殿伟,杨桃,宋开山,李方. 2000 年—2006 年东北地区植被 NPP 的时空特征及影响因素分析. 资源科学, 2008, 30(8): 1226-1235.
- [12] 贺振,王珍,厉玲玲,贺俊平. 黄河流域植被 NPP 时空变化特征分析. 商丘师范学院学报, 2013, 29(6): 69-73.
- [13] 张德铨,祁威,周才平,丁明军,刘林山,高俊刚,摆万奇,王兆锋,郑度. 青藏高原高寒草地净初级生产力(NPP)时空分异. 地理学报, 2013, 68(9): 1197-1211.
- [14] 陈强,陈云浩,王萌杰,蒋卫国,侯鹏,李营. 2001—2010 年黄河流域生态系统植被净第一性生产力变化及气候因素驱动分析. 应用生态学报, 2014, 25(10): 2811-2818.
- [15] 田智慧,张丹丹,赫晓慧,郭恒亮,魏海涛. 2000—2015 年黄河流域植被净初级生产力时空变化特征及其驱动因子. 水土保持研究, 2019, 26(2): 255-262.
- [16] 李晓琴,田莹,余珍凤. 黄河流域水土流失遥感监测. 国土资源遥感, 2009, 21(4): 57-61, 67.
- [17] 李夫星,陈东,汤秋鸿. 黄河流域水文气象要素变化及与东亚夏季风的关系. 水科学进展, 2015, 26(4): 481-490.
- [18] 杨国靖,丁永建. 近 60 年西北地区森林资源变化分析与思考. 国土资源情报, 2018(2): 6-12.
- [19] 宋绪忠,王成,杨镇华,杨华. 黄河下游滩地以林为主综合开发研究. 人民黄河, 2007, 29(12): 12, 14.
- [20] Loveland T R, Reed B C, Brown J F, Ohlen D O, Zhu Z, Yang L, Merchant J W. Development of a global land cover characteristics database and IGBP DISCover from 1 km AVHRR data. *International Journal of Remote Sensing*, 2000, 21(6/7): 1303-1330.
- [21] 袁全勇,杨阳,李春,阚威,叶柯华. 基于 Hurst 指数的风速时间序列研究. 应用数学和力学, 2018, 39(7): 798-810.
- [22] 穆少杰,李建龙,周伟,杨红飞,章超斌,居为民. 2001—2010 年内蒙古植被净初级生产力的时空格局及其与气候的关系. 生态学报, 2013, 33(12): 3752-3764.
- [23] 张筠,张春华,张安定,方美红,吴孟泉,林哲,张奕昂,宋晓林. 水热波动和土地覆盖变化对东北地区植被 NPP 的相对影响. 生态学报, 2020, 40(21): 7733-7744.
- [24] 毛政旦. 关于气候的概念及气候学与地理学的关系问题. 地理研究, 1982, 1(3): 1-10.
- [25] 徐雨晴,肖风劲,於翔. 中国森林生态系统净初级生产力时空分布及其对气候变化的响应研究综述. 生态学报, 2020, 40(14): 4710-4723.
- [26] Patel N N, Angiuli E, Gamba P, Gaughan A, Lisini G, Stevens F R, Tatem A J, Trianni G. Multitemporal settlement and population mapping from Landsat using Google Earth Engine. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 2015, 35: 199-208.
- [27] Ravanelli R, Nascetti A, Cirigliano R, di Rico C, Leuzzi G, Monti P, Crespi M. Monitoring the impact of land cover change on surface urban heat island through google earth engine: proposal of a global methodology, first applications and problems. *Remote Sensing*, 2018, 10(9): 1488.
- [28] Gorelick N, Hancher M, Dixon M, Ilyushchenko S, Thau D, Moore R. Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 2017, 202: 18-27.
- [29] 陈福军,沈彦俊,李倩,郭英,徐丽梅. 中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究. 地理科学, 2011, 31(11): 1409-1414.
- [30] 谢宝妮,秦占飞,王洋,常庆瑞. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素. 农业工程学报, 2014, 30(11): 244-253.
- [31] 刘刚,孙睿,肖志强,崔天翔. 2001—2014 年中国植被净初级生产力时空变化及其与气象因素的关系. 生态学报, 2017, 37(15): 4936-4945.
- [32] 高惠璇. 两个多重相关变量组的统计分析(1)(典型相关与典型冗余分析). 数理统计与管理, 2002, 21(1): 57-64.
- [33] Yang Y K, Xiao P F, Feng X Z, Li H X. Accuracy assessment of seven global land cover datasets over China. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 2017, 125: 156-173.