

DOI: 10.5846/stxb202106211643

张佑铭,郎梦凡,刘梦云,谢宝妮,常庆瑞.土地利用转变与海拔高度协同作用黄土高原植被固碳变化特征.生态学报,2022,42(10):3897-3908.

Zhang Y M, Lang M F, Liu M Y, Xie B N, Chang Q R. Vegetation carbon sequestration in the Loess Plateau under the synergistic effects of land cover change and elevations. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(10): 3897-3908.

土地利用转变与海拔高度协同作用黄土高原植被固碳变化特征

张佑铭¹, 郎梦凡¹, 刘梦云¹, 谢宝妮², 常庆瑞^{1,*}

1 西北农林科技大学资源环境学院, 杨凌 712100

2 河北地质大学土地科学与空间规划学院, 石家庄 050031

摘要:全球固碳释碳问题一直是近年来关乎民生的热点话题,区域碳源/碳汇对生态环境的重要性不言而喻。基于 CASA 模型估算黄土高原 1990—2015 年植被净初级生产力的年际变化,并分析土地利用变化、海拔高度及两者协同作用对其综合影响,结果表明:(1)黄土高原 1990—2015 年植被 NPP 与植被固碳总体呈增加趋势,年均 NPP 增速 $2.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年均固碳增速 1.13 TgC/a ,研究区林地年均 NPP ($619.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 远超其他用地类型,固碳效果理想;(2)黄土高原年均 NPP 随高程的增加先降低后升高,年总 NPP 和固碳量随高程增加变化趋势相反;(3)研究区土地利用转变类型中退耕还林的植被固碳效果最好;而林地变为耕地或草地均不能达到固碳目的,此外,更推荐在研究区海拔低于 1500 m 变草为耕,海拔高于 1500 m 退耕还草,海拔高于 3000 m 变耕、草为林。以期为区域尺度的生态环境建设提供一定的参考和科学依据。

关键词:净初级生产力;土地利用转变;海拔高度;协同作用

Vegetation carbon sequestration in the Loess Plateau under the synergistic effects of land cover change and elevations

ZHANG Youming¹, LANG Mengfan¹, LIU Mengyun¹, XIE Baoni², CHANG Qingrui^{1,*}

1 College of Natural Resources and Environment, Northwest Agriculture and Forestry University, Yangling 712100, China

2 School of Land Science and Space Planning, Hebei GEO University, Shijiazhuang 050031, China

Abstract: Global carbon sequestration and release has been a hotspot issue concerning people's livelihood in recent years. The importance of regional carbon sequestration and release to the ecological environment was self-evident. It is of great theoretical and practical significance to use remote sensing data and appropriate estimation model to quantitatively estimate NPP (Net Primary Productivity) and analyze spatio-temporal pattern of vegetation carbon sequestration and carbon release in the Loess Plateau. Based on the CASA (Carnegie Ames Stanford Approach) model, this paper estimated the annual change of the NPP on the loess plateau from 1990 to 2015, and analyzed the comprehensive effects in the process of Land Use/Land Cover Change (LUCC), elevations and their synergistic effects. It found that: (1) vegetation NPP and carbon sequestration showed an increasing trend in the Loess Plateau from 1990 to 2015. The annual average growth rate of NPP was $2.74 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ and the annual average growth rate of carbon sequestration was 1.13 TgC/a . The average annual NPP ($619.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) of forest land in the study area was much higher than that of other land types, which was an ideal means of carbon sequestration. (2) The annual mean NPP of the Loess Plateau increased year by year, but the annual mean annual NPP decreased first and then increased with the increase of elevation, while the annual total NPP and carbon

基金项目:陕西省自然科学基金基础研究计划项目(2017JZ008)

收稿日期:2021-06-21; 网络出版日期:2022-01-11

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: changqr@nwsuaf.edu.cn

sequestration showed opposite trends with the increase of elevation. (3) In the study area, conversion of cropland to forest contributed the most to vegetation carbon sequestration among all land use changes types, meanwhile, the conversion of forest into cropland or grassland could not achieve carbon sequestration. In addition, it is recommended to convert grassland to cropland when the elevation is lower than 1500 m, return cropland to grassland when the elevation is higher than 1500 m, and convert cropland and grassland to forest when the elevation is higher than 3000 m in the study area. The study focuses on the effect of carbon sequestration under the synergistic effect of land use change and elevations. It is concluded that the development and utilization of land in the study area leads to the increase of carbon sequestration, while the ecological return of land leads to the increase of carbon sequestration; Moreover, it is more suitable to convert cropland to forest at low and high altitude regions than at middle altitude in the study area, in order to provide reference and guidance for the ecological environment in the regional scale.

Key Words: net primary productivity; land use change; elevations; synergistic effect

工业革命以来,化石能源的广泛应用导致大量温室气体激增,生态系统在这一背景下逐渐失衡。植被作为区域生态系统中的重要组成部分,在保持水土流失、调节气候及温室气体等方面起到了至关重要的作用^[1]。植被能通过光合作用捕获并封存 CO₂ 来减少其排放,从而达到植被固碳(carbon sequestration, CS)的目的^[2],研究植被固碳对于可持续发展战略的实施具有重要意义。目前世界各国主要通过增加地表植被数量来提高生态系统的自然固碳能力,从而来降低大气中的 CO₂ 浓度。近年来国内外学者尝试用植被总初级生产力^[3](Gross Primary Productivity, GPP)、净初级生产力^[4](Net Primary Productivity, NPP)等植被群落生产能力参数反映其固碳能力,而 NPP 作为判定生态系统碳源碳汇的主要指标,不仅能表征陆地生态系统的质量状况,还能反映植被在自然环境下的生产能力。利用遥感估算 NPP 并结合生态系统服务功能实物量评估模型使植被固碳量的定量计算成为可能^[5-6],而且已经有不少学者在各区域尺度^[7-10]证实了 NPP 时空分异与气候因子的相关性^[11],此外还可能受到地形、植被类型等其他自然因子^[12]和人为因子的影响,不同区域 NPP 的影响因素也不相同。因此,研究区域尺度 NPP 变化对丰富碳源/碳汇研究具有重要意义^[13]。

黄土高原近年来受频繁的人类活动影响,是中国陆地生态系统最脆弱和敏感的区域之一^[14]。黄土高原的人类活动是影响植被 NPP 变化的重要因素^[15]。土地利用/土地覆被变化(LUCC)不仅给黄土高原带来明显的地表结构变化,而且影响以土地为载体的生态系统服务功能,乃至区域生态环境和生态过程^[16]。此外,黄土高原沟壑纵横,其地形分异特征带来的植被垂直分带给不同植被类型 NPP 也造成很大差异,而海拔高度是地形中最基础、最直接的信息,除人为因素外海拔高度能直接或间接影响植被空间生长和分布差异^[12]。因此地表覆被变化以及综合海拔高度响应的研究对于黄土高原生态系统碳循环及周边地区环境保护和生态建设具有重要的指示意义^[11]。目前在黄土高原针对 NPP 的研究已有不少,但前人或局限于某一亚区^[17-18],或研究单一植被类型 NPP^[14, 19],或其气候影响^[20-21],而对黄土高原全区域范围的 NPP 与人为因素造成的土地利用转变之间的响应机制探讨较少,且针对黄土高原随长时间序列的固碳变化情况,以及土地利用转变与地形因子协同作用下的 NPP 变化研究也少有涉及。因此,合理选用黄土高原遥感数据及适宜的模型定量估算 NPP,并分析黄土高原植被碳源碳汇时空格局变化具有重要的理论和实践意义。

本文从自然(海拔高度)和人为(土地利用转变)因子出发,利用 CASA(Carnegie Ames Stanford Approach)模型估算黄土高原 NPP,研究黄土高原在不同土地利用方式及地形分级中多时空尺度植被固碳变化及其影响,并进一步加入土地利用变化以及海拔高度的协同作用定量评估其对 NPP 的影响,可以更好地了解区域尺度生态系统对自然和社会环境变化的反馈能力,以为黄土高原的生态环境建设提供科学依据。

1 研究区概况

黄土高原(100°54'E—114°33'E, 33°43'N—41°16'N)包括中国青海省东北部、甘肃省中东部、宁夏回族自

治区大部、山西省大部、陕西省中北部、河南省西部以及内蒙古自治区省区(图 1), 东西长约 1300 km, 南北长约 750 km, 总面积约 62.4 万 km²。黄土高原地处平原向高原的过渡带, 具有典型的暖温带半干旱大陆性季风气候特征, 且地带性差异特征明显, 自东南到西北依次为半湿润、半干旱、干旱气候, 年平均气温由 15℃ 减小到 3℃, 降水量由 800 mm 向 200 mm 递减, 太阳辐射总量由 5000 MJ/m² 向 6300 MJ/m² 递增, 土壤类型变化顺序为褐土、黑垆土、黄绵土、灰钙土、风沙土^[22]。

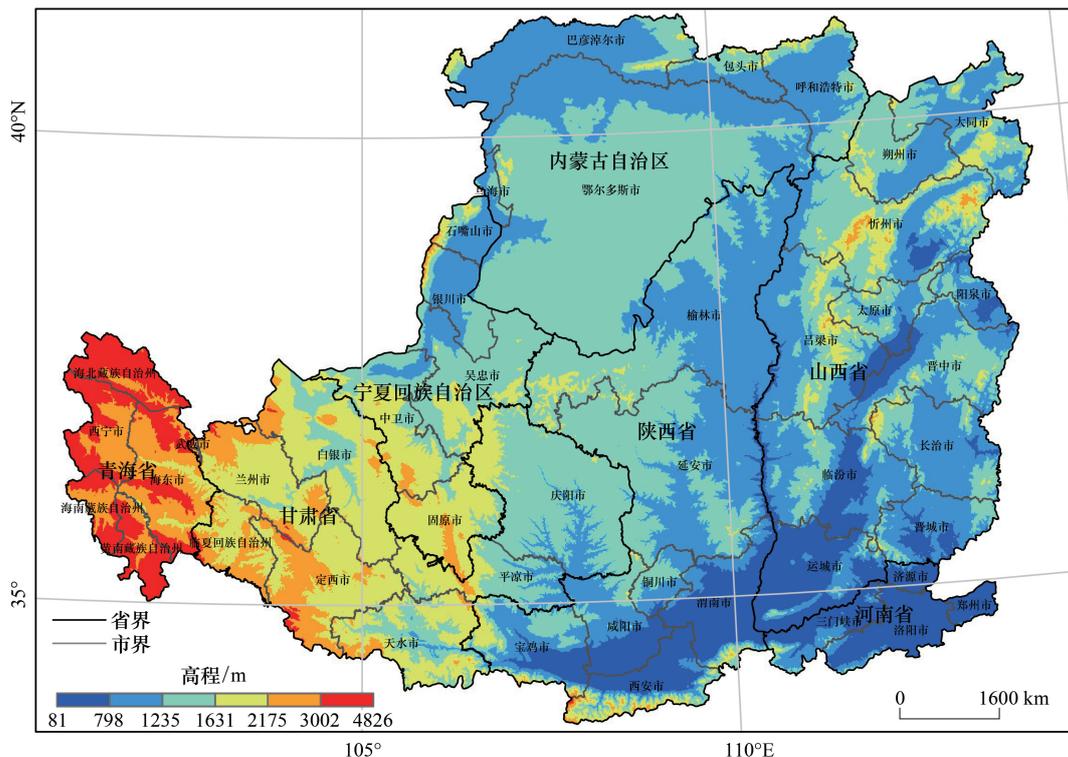


图 1 黄土高原地理位置图

Fig.1 The Geographical location map of the Loess Plateau

2 研究方法

2.1 数据来源与预处理

本研究使用中科院土地利用数据(表 1), 并重分类成六种类型(表 2)。GIMMS(global inventory modeling and mapping studies)NDVI 每半月数据采用最大值合成(maximum value composite, MVC)月 NDVI 数据; 并将研究区及周边 MODIS NDVI 影像拼接, 本研究所获得的两种数据集的 NDVI 数据都经过几何纠正、辐射校正、大气校正等预处理。两种土地利用和 NDVI 数据的重叠时间和重叠区域的数据都通过一致性精度检验, 满足本研究使用^[20, 23-26]。气象数据来自中国气象信息中心, 选取黄土高原及周边 80 个站点地面观测数据, 并用反距离加权法^[27]得到气温、降水、辐射栅格数据。将所有栅格数据集的空间参考系统设置为正轴等积圆锥(Albers)投影, 并将栅格重采样为 1 km, 按研究区边界裁切。

2.2 计算与分析方法

2.2.1 NPP 估算

本研究采用朱文泉改进的 CASA 模型^[28], NPP 估算主要由植被吸收的光合有效辐射和植物光能利用率完成。

$$NPP(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times \gamma \times T_{e1}(x, t) \times T_{e2}(x, t) \times W_e(x, t) \times \varepsilon_{max} \quad (1)$$

式中, $SOL(x, t)$ 即月太阳总辐射量数据集上像元 x 位置在 t 月的数值, 单位为 $MJ\ m^{-2}\ m^{-2}$, $FPAR(x, t)$ 根据

某一植被类型 $NDVI$ 以及 SR 的最大值和最小值线性推导而出^[29], 常数 γ 是由植被在 $0.4\text{--}0.7\ \mu\text{m}$ 波长下所能利用的太阳有效辐射占太阳总辐射的比例确定的, 本实验常数 γ 设定为 0.5 ; 温度和水分胁迫系数 $T_{e1}(x, t)$ 、 $T_{e2}(x, t)$ 、 $W_e(x, t)$ 即由月平均温度、月累计降水量数据集上像元数值所决定; 植被类型的最大光能利用率 ε_{\max} 参数根据文献资料收集得到^[30]。

表 1 数据来源汇总表

Table 1 Summary of the data sets used in this study

数据集 Data set	时间 Period	分辨率 Resolution	来源 Source
土地利用 Land use	1990	1 km	中国科学院资源与环境科学数据中心提供的中国土地利用状况遥感监测数据库 (http://www.resdc.cn)
	2000、2015	300 m	ESA GlobCover 欧空局土地利用 (http://www.esa.int/)
归一化植被指数 NDVI	1990、2000	8 km	GIMMS AVHRR NDVI 中国西部环境与生态科学数据中心 (http://westdc.westgis.ac.cn)
	2015	1 km	MODIS NDVI MYD13A3 Version 6 (https://lpdaac.usgs.gov)
气象数据 Meteorological Data	1990—2015 1月—12月	—	月平均气温、月降水量、月太阳总辐射 中国气象信息中心 (https://data.cma.cn/)
高程 Elevation	—	1 km	黑河计划数据管理中心 (http://westdc.westgis.ac.cn/)

2.2.2 植被固碳估算

根据中国林业科学研究院森林生态环境与保护研究所起草、国家林业局发布的《LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范》^[31]中森林生态系统服务功能实物量评估公式及参数设置一表知:

$$G_{\text{植被固碳}} = 1.63R_{\text{碳}}AB_{\text{年}} \quad (2)$$

式中, $G_{\text{植被固碳}}$ 为植被年固碳量, 单位 t/a ; 1.63 代表森林每积累 $1\ \text{t}$ 干物质, 平均吸收 CO_2 $1.63\ \text{t}$; $R_{\text{碳}}$ 为 CO_2 中碳的含量, 为 27.27% ; A 为林分面积, 单位 km^2 , $B_{\text{年}}$ 为林分净初级生产力, 单位 $\text{t km}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

2.2.3 相关性分析

$$\text{Cor} = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2}} \quad (3)$$

式中, Cor 为相关系数, \bar{X} 、 \bar{Y} 为 X 、 Y 的均值, 相关系数 R 介于 $[-1, 1]$ 之间, 其绝对值越大, 表明变量 X 与变量 Y 的相关性越高; 反之越低。

3 结果与分析

3.1 土地利用时空变化特征

从区域尺度, 黄土高原地表覆盖以农田、草地和林地为主, 分别占总面积 37.34% 、 36.54% 和 22.75% , 其余三类用地占总面积 3.37% 。1990—2015 年黄土高原的农田面积在时间尺度上剧烈减少, 林地持续增长, 草地先剧烈减少后有少许增长, 未利用地呈下降趋势, 水体和居民地均有不同程度增长; 空间尺度上呈现东北—西南条带状分布, 土地利用类型从东南向西北依次为林地、农田、草地、未利用地, 居民地和零星分布在耕地周围(图 2)。近 30 年未利用地减少 $8890\ \text{km}^2$, 其中 69.8% 转化为林草地, 该转变主要分布在研究区北部。空间尺度上植被由东南逐渐向西北覆盖, 其中林地面积增加 $115191\ \text{km}^2$, 增幅 173% , 其次, 农田面积减少 $68036\ \text{km}^2$, 减幅 25% , 未利用地、草地面积减幅为 51% 和 18% 。说明黄土高原用地类型变化明显, 且变化主要发生在耕、林草地之间(表 2)。

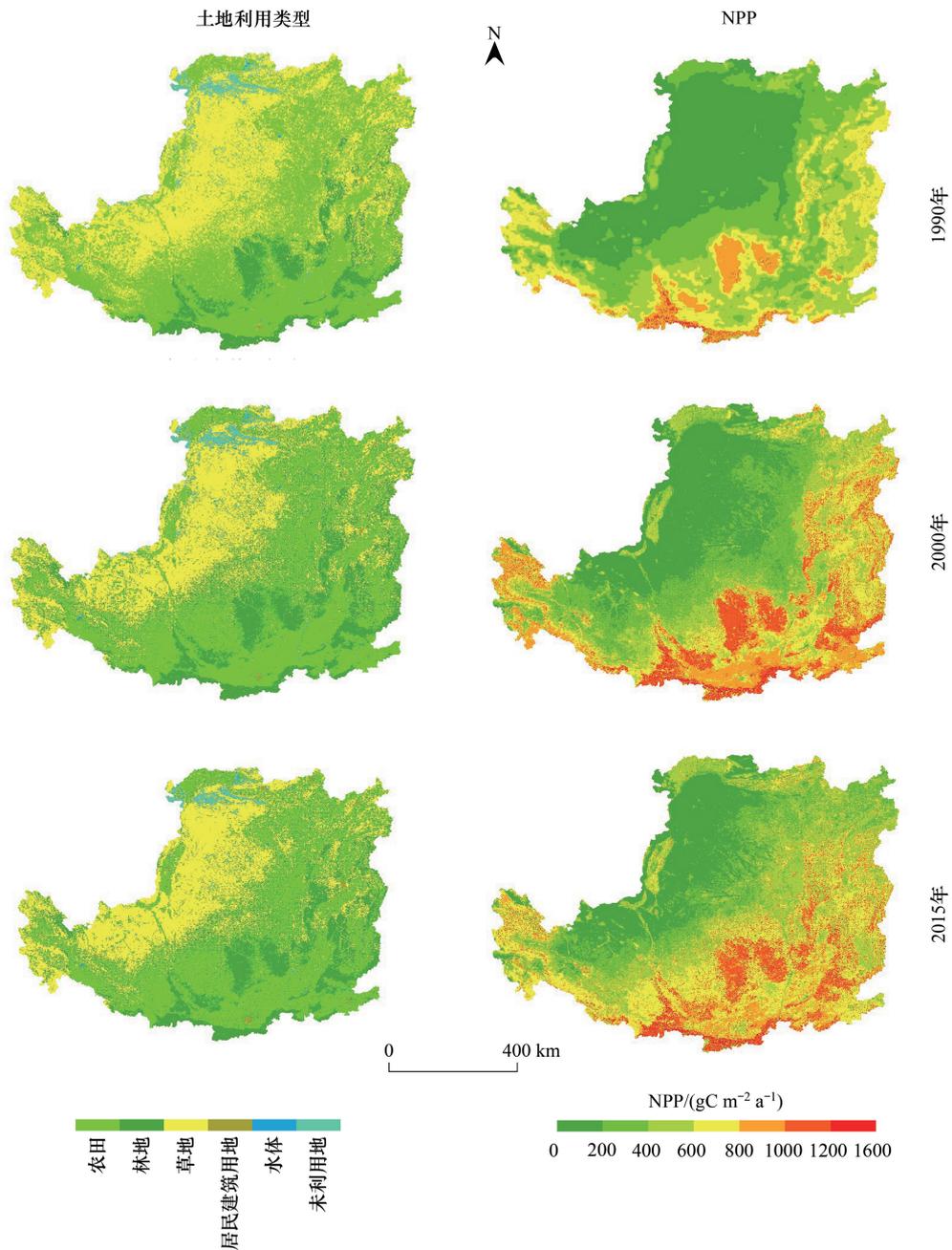


图2 黄土高原 1990—2015 年土地利用与年均净初级生产力 NPP 空间分布图

Fig.2 The spatial distribution of landuse and NPP from 1990 to 2015 in the Loess Plateau

3.2 NPP 时空分布特征

3.2.1 不同用地类型 NPP 时空变化

黄土高原不同用地类型的 NPP 差异较大(表 3)。林地年均 NPP ($619.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$), 远高于农田 ($466.8 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) 和草地 ($293.9 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。1990 年, 农田 NPP 总量最多 (113.4 TgC), 草地次之 (76.1 TgC), 林地较小 (47.7 TgC); 2000 年, 林地年总 NPP 最大 (98.9 TgC), 农田次之 (96.0 TgC), 草地较小 (53.3 TgC), 这与退耕还林还草政策的实施密切相关; 2015 年, 植被覆盖持续上升, 年总 NPP 前三位仍是林地 (119.3 TgC)、农田 (112.9 TgC) 和草地 (71.8 TgC)。整体上, 年均 NPP 高值区落在林地、草地、农田植被分布区, 且 NPP 纹理与土地利用格局总体相似(图 2)。

表 2 黄土高原 1900—2015 年土地利用方式转移矩阵

Table 2 The transfer matrix of land use type in the loess plateau from 1900 to 2015

	2015						1990 年总计 Total in 1990
	农田 Cropland	林地 Forest	草地 Glassland	居民建筑用地 Settlement	水体 Water	未利用地 Unused	
1990 农田/km ²	202503.0	60463.3	9315.3	1904.5	156.3	8.6	274351
林地/km ²	374.4	65945.7	146.8	28.3	0.9	—	66496
草地/km ²	3272.3	54738.8	199697.8	3996.1	268.8	77.3	262051
居民建筑用地/km ²	—	97.0	76.4	1611.7	3.4	—	1789
水体/km ²	4.3	145.1	139.1	323.7	900.7	11.2	1524
未利用地/km ²	161.4	297.1	5912.6	657.7	1958.5	8605.2	17593
2015 年总计/km ²	206315	181687	215288	8522	3289	8702	623803
面积变化/km ²	-68036	115191	-46763	6733	1764	-8890	
变化程度/%	-25	173	-18	376	116	-51	

3.2.2 不同海拔高度下 NPP 时空变化

黄土高原年均 NPP 随高程的增加先降低后升高,年总 NPP 则随高程变化趋势相反(表 4)。近 30 年研究区在 1 至 6 级高程分级下的年均 NPP 分别为:582.49 gC m⁻² a⁻¹、533.89 gC m⁻² a⁻¹、385.92 gC m⁻² a⁻¹、399.63 gC m⁻² a⁻¹、451.80 gC m⁻² a⁻¹和 573.07 gC m⁻² a⁻¹,年总 NPP 分别为 16.50 TgC、41.80 TgC、124.21 TgC、47.83 TgC、25.10 TgC 以及 11.51 TgC。

3.3 土地利用变化对 NPP 及固碳的影响

1990—2000 年黄土高原土地利用变化面积 125940 km²,占研究区面积的 20.19%,NPP 总和 6.02 TgC,植被累计固碳 1.79 TgC。1990—2000 年 NPP 均值增长排列为(表 5):耕地转为林地>未利用地转为林地>耕地转为草地,NPP 减少程度排序:林地转为耕地>林地转为草地>耕地转为未利用地。1990—2000 年数据表明,林地转化为居民建设用地、未利用地,NPP 数值为负,未利用地转化为林地、农田,NPP 数值为正,即一般来说,高等级向低等级用地类型转化会使 NPP 减少,反之则增加。1990—2000 年转变类型面积由大到小为:草地变为农田>草地变为林地>农田变为林地>农田变为草地,而植被固碳总和最大的是农田变为林地(2.42 TgC)以及草地变为林地(0.31 TgC)。从 NPP 均值以及固碳量的角度看,退耕还林还草政策的固碳效果良好,但鉴于初期植被覆盖(尤其草地的不稳定性)以及固化的经济思想等人为因素都会造成固碳成效不明显。2000—2015 年,土地利用转变程度明显减弱,尤其林地得到很好保持,用地类型转变面积 30815 km²,NPP 总和 2.68 TgC,研究区总计固碳 1.19 TgC,用地类型主要变化在农田转变为林地(7447.8 km²)、草地(5058.5 km²)上,固碳变化主要发生在农田与林地(0.51 TgC)、草地(0.21 TgC)上。

3.4 土地利用变化与海拔高度协同作用下 NPP 的变化特征

前文统计了 NPP 在不同土地利用类型、海拔高度及土地利用变化中的变化特征,但在何种海拔高度下适宜进行哪种土地利用转变尚不明确,为探究土地利用转变与海拔高度的协同作用对 NPP 的影响,将两因子叠加后结果显示(图 3,图中坐标轴 1—6 高程分级同表 4):耕、林草地未发生转变部分的年均 NPP 随海拔的增加逐级降低,固碳量随海拔的增加先升高后降低,且在同一高程分级下,耕地转为林地的年均 NPP 最大,如海拔低于 500 m,耕地转为林地的 NPP(197.71 gC m⁻² a⁻¹)>草地转为耕地(113.35 gC m⁻² a⁻¹)>草地转为林地(67.64 gC m⁻² a⁻¹)>耕地转为草地(54.69 gC m⁻² a⁻¹)>林地转为耕地(31.84 gC m⁻² a⁻¹)>林地转为草地(-59.07 gC m⁻² a⁻¹),故相同高程分级中,退耕还林植被固碳效果最优,而林地变为耕地或草地的年均 NPP 值为负,均不能达到固碳目的。此外,耕地转为林地的年均 NPP 随海拔的增加先降低后升高,高海拔(>3000 m)年均 NPP 高于其前两级海拔(1500—3000 m)NPP,而固碳量随海拔增加先升高后降低,证明高海拔虽然较适宜林地种植,但种植条件差、范围小等原因导致固碳效果不理想,因此黄土高原应充分利用 3000 m 以上的区域退耕还林,其效果优于在海拔 1500—3000m 退耕还林。在所研究的六种典型转变方式中,除了退耕还

表 3 黄土高原不同土地利用类型 NPP 数值模拟

Table 3 The numerical simulation of NPP in different land use type in the loess plateau

用地类型 Land cover	1990			2000			2015			均值实测值 Measured value of mean (gC m ⁻² a ⁻¹)			
	面积 Area/ km ²	总和 Sum/ TgC	均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	面积 Area/ km ²	总和 Sum/ TgC	均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	面积 Area/ km ²		总和 Sum/ TgC	均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)
农田 Cropland	274351	113.4	413.3	160.3	218168	96.0	439.9	161.8	206315	112.9	547.1	116.6	239—760 ^[28]
森林 Forest	66496	47.7	711.0	130.4	177534	99.0	520.9	232.0	181687	119.3	626.6	182.2	257—1098 ^[28]
草地 Grassland	262051	76.1	290.5	174.8	206541	53.3	257.8	177.8	215288	71.8	333.4	168.4	233 ^[28]
居民地 Settlement	1789	0.7	381.7	125.9	5536	1.1	195.9	143.2	8522	3.0	356.8	165.8	347 ^[28]
水体 Water	1524	0.5	301.9	151.4	4024	0.6	149.2	123.5	3289	0.8	234.4	155.2	371 ^[28]
未利用地 Unused	17593	2.3	131.0	89.5	12000	1.1	95.4	83.6	8702	1.3	152.1	106.7	0—250 ^[28]
总计 Total	623803	240.7	623803	251.1	623803	309.1	623803	309.1					

表 4 黄土高原不同高程分级 NPP 分布统计

Table 4 The statistics of NPP distribution in different elevation in the Loess Plateau

分级 Classification	高程/m Elevation	面积 Area/km ²	1990			2000			2015		
			均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	总和 Sum/ TgC	均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	总和 Sum/ TgC	均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	标准差 Std/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	总和 Sum/ TgC
1	<500	28326	480.28	85.55	13.60	613.35	119.85	17.37	653.84	138.82	18.52
2	500—1000	78289	458.01	150.46	35.86	523.10	204.19	40.95	620.55	180.51	48.58
3	1000—1500	321845	345.07	223.36	111.06	353.21	249.51	113.68	459.47	247.14	147.88
4	1500—2000	119692	376.60	246.45	45.08	368.40	261.55	44.09	453.90	245.46	54.33
5	2000—3000	55557	429.27	223.22	23.85	421.60	222.96	23.42	504.54	210.89	28.03
6	>3000	20093	560.63	144.15	11.26	572.93	186.53	11.51	585.65	188.28	11.77

表 5 黄土高原转变型用地 NPP 及固碳变化

Table 5 Changes of NPP and carbon sequestration in changed land type in the Loess Plateau

转变类型 Type changed	1990—2000				2000—2015			
	面积 Area/ km ²	NPP 均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	NPP 总和 Sum/ (G gC)	固碳 CS/ (G gC)	面积 Area/ km ²	NPP 均值 Mean/ (gC m ⁻² a ⁻¹)	NPP 总和 Sum/ (G gC)	固碳 CS/ (G gC)
12	55921	97.39	5446.22	2420.85	7448	155.28	1156.49	514.06
13	2487	46.98	116.85	51.94	5081	95.23	483.81	215.06
14	58	19.44	1.12	0.50	1260	-16.87	-21.25	-9.45
15	53	-88.41	-4.71	-2.09	75	-85.63	-6.40	-2.84
16	5	-140.93	-0.73	-0.32	3	35.42	0.12	0.05
21	324	-193.87	-62.76	-27.90	952	26.30	25.04	11.13
23	110	-151.61	-16.66	-7.41	3890	57.27	222.77	99.02
24	12	-90.86	-1.09	-0.49	962	-50.37	-48.44	-21.53
25	—	—	—	—	51	-128.13	-6.49	-2.89
26	—	—	—	—	2	-47.39	-0.08	-0.04
31	1943	26.99	52.44	23.31	977	147.96	144.57	64.26
32	54950	12.54	689.21	306.35	2481	71.07	176.30	78.37
34	3083	-31.60	-97.42	-43.30	1758	29.98	52.71	23.43
35	259	-36.79	-9.54	-4.24	64	-63.21	-4.02	-1.79
36	60	-52.93	-3.18	-1.41	29	37.91	1.11	0.49
41	—	—	—	—	12	173.88	2.09	0.93
42	210	38.63	8.09	3.60	56	177.09	9.88	4.39
43	147	2.29	0.34	0.15	1169	78.55	91.86	40.83
45	9	17.16	0.15	0.07	35	54.18	1.91	0.85
46	—	—	—	—	8	-4.14	-0.03	-0.01
51	3	41.96	0.14	0.06	13	162.20	2.09	0.93
52	154	46.69	7.18	3.19	20	247.70	4.89	2.17
53	141	-16.10	-2.27	-1.01	1002	82.29	82.45	36.65
54	330	-14.39	-4.74	-2.11	103	66.23	6.82	3.03
56	12	-93.69	-1.13	-0.50	13	50.28	0.65	0.29
61	71	39.70	2.83	1.26	59	225.39	13.35	5.94
62	249	68.15	16.97	7.54	5	318.24	1.64	0.73
63	1901	-9.76	-18.55	-8.24	2914	88.02	256.51	114.02
64	629	-17.43	-10.97	-4.88	184	78.22	14.37	6.39
65	2819	-31.43	-88.60	-39.38	191	73.32	13.98	6.21
总计 Total	125940	—	6019.19	2675.54	30815	—	2678.74	1190.70

—: 值很小或为零或统计无意义; 转变类型: 12: 农田-林地, 13: 农田-草地, 14: 农田-居民建筑用地, 15: 农田-水体, 16: 农田-未利用地, 21: 林地-农田, 23: 林地-草地, 24: 林地-居民建筑用地, 25: 林地-水体, 26: 林地-未利用地, 31: 草地-农田, 32: 草地-林地, 34: 草地-居民建筑用地, 35: 草地-水体, 36: 草地-未利用地, 41: 居民建筑用地-农田, 42: 居民建筑用地-林地, 43: 居民建筑用地-草地, 45: 居民建筑用地-水体, 46: 居民建筑用地-未利用地, 51: 水体-农田, 42: 水体-林地, 53: 水体-草地, 54: 水体-居民建筑用地, 56: 水体-未利用地, 61: 未利用地-农田, 62: 未利用地-林地, 63: 未利用地-草地, 64: 未利用地-居民建筑用地, 65: 未利用地-水体

林、变林为耕以及变林为草的年均 NPP 呈现明显正负趋势外, 另外 3 种转变(退耕还草、变草为林和变草为耕)年均 NPP 不稳定, 海拔低于 1500 m, 变草为耕的 NPP 高于退耕还草和变草为林; 海拔高于 1500 m, 变草为耕的 NPP 剧烈降低, 海拔高于 2000 m, 变草为耕的 NPP 值为负, 远低于退耕还草和变草为林, 海拔高于 3000 m, 草地转为林地的 NPP (78.90 gC m⁻² a⁻¹) 远高于退耕还草 (26.62 gC m⁻² a⁻¹) 和变草为耕 (-35.11 gC m⁻² a⁻¹); 而退耕还草的 NPP 除了在研究区低于 500 m 和高于 3000 m 海拔处低于变草为林, 在 500—3000 m 海拔, 退耕还草效果优于变草为林。

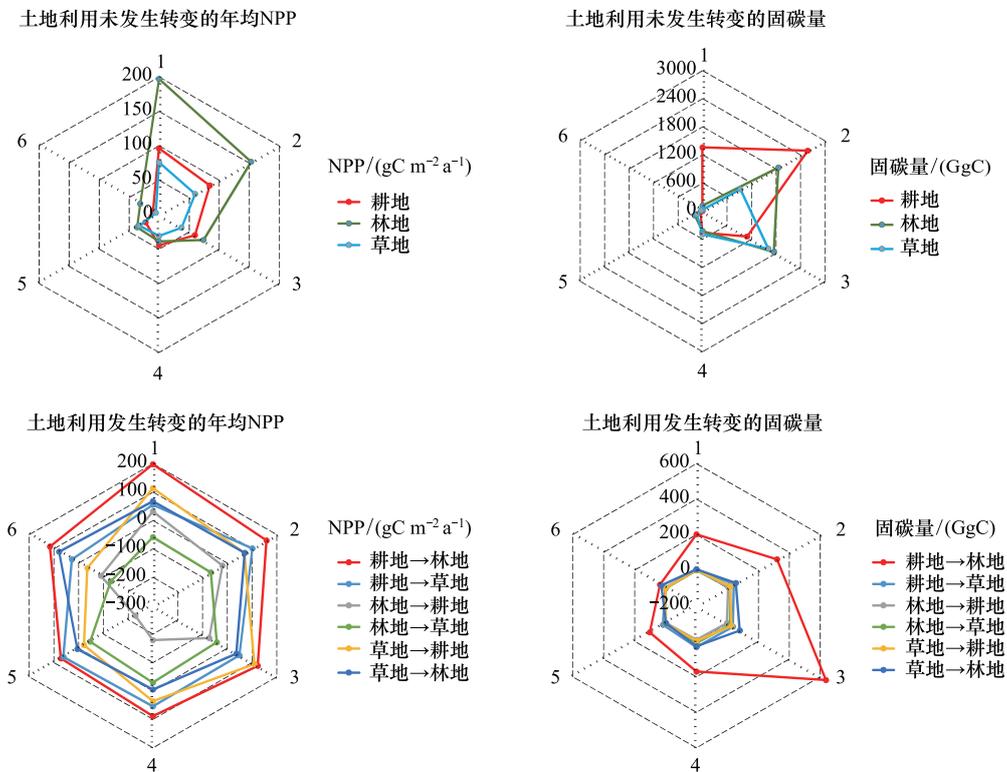


Fig.3 土地利用变化与海拔高度协同作用下 NPP 的变化特征

Fig.3 NPP under the synergistic effects of land use change and elevations

4 讨论

4.1 数据适用性分析

本研究模拟结果与朱文泉^[28]、苑全志^[32]、韩艳飞^[33]、石志华等^[34]学者在全国区域,尤其是黄土高原得出一致结果,说明研究选用数据和模型在黄土高原 NPP 研究中具有可靠性。为探讨其在黄土高原进一步分析的适用性,本研究基于 7 个省(自治区)级行政区将它们 1990、2000 和 2015 年的植被 NPP 与各土地利用类型面积占比、土地利用变化、海拔高度以及两者的协同作用做相关性分析^[9]。结果表明,3 个时期 NPP 与耕地和林地的相关性最高(表 6),呈显著正相关,表明耕地、林地对 NPP 响应显著;其次 1990 年草地和居民建筑用地呈显著的正相关。而其余时期的草地、建设用地、水域和未利用地与 NPP 的无明显相关性,说明本研究得出结果在阐释黄土高原在不同土地利用类型角度的 NPP 时空变化上具有可信度。同时,植被 NPP 与土地利用转变因子的相关系数最高达 0.74,与海拔高度的相关系数达 0.87,植被 NPP 与土地利用变化和海拔高度协同作用的相关性为 0.94,可以看出黄土高原植被 NPP 与双因子协同作用相关性要高于各单因子,且在低海拔比高海拔有更高的相关性(表 6),可能是因为植被在低海拔的覆盖率更高。

表 6 黄土高原植被 NPP 与土地利用类型数据及海拔高度的相关系数

Table 6 Correlations between NPP and land use or elevations in the Loess Plateau

	农田 Cropland	林地 Forest	草地 Grassland	居民建筑用地 Settlement	水体 Water	未利用地 Unused
1990	0.98	0.93	0.63	0.86	0.22	-0.24
2000	0.97	0.99	0.41	-0.03	0.20	-0.23
2015	0.97	0.99	0.49	0.39	0.25	-0.20
高程分级 Elevation class	1	2	3	4	5	6
	0.71	0.87	0.55	0.44	-0.11	-0.30

相关系数绝对值 0.8—1.0 为极强相关,0.6—0.8 为强相关,0.4—0.6 为中等程度相关,0.2—0.4 为弱相关,0—0.2 为极弱相关或无相关

此外,本研究结果异于谢宝妮^[11]、高志强^[35]等得出的结果,表现为整体上略高于 GLO-PEM 遥感模型和 BIOME-BGC、CEVST 过程模型,可能主要与模型选取有关。CASA 光能利用率模型考虑光、温、水、营养物质等的影响,而 CEVST 模型仅考虑气候因素变化的影响,GLO-PEM 包括各种非气候因素如病虫害和火灾影响,BIOME-BGC 所需参数包括多种复杂气象资料,以及土壤和植被中的碳、氮、水等状态参数及分配比率等且忽略了空间异质性因素的影响,这类模型仅在小范围空间,以及空间斑块均质的条件下才能近似适用^[36]。此外,模型参数、时间序列、研究区范围及数据质量的差异都会影响研究结果。

4.2 土地利用变化与海拔高度对植被 NPP 的影响

黄土高原作为我国生态环境最为脆弱的地区之一,除了历史及自然气候环境的变异导致植被遭大量破坏以外,最主要的原因还是在经济快速发展中生产生活建设的人为因素^[37]。人为因素中以开荒种田、开采森林和过度放牧等原因造成的土地利用变化对植被 NPP 以及固碳的扰动很大,其中退耕还林还草的固碳效果显著,反之释碳较多。本研究结果显示,近 30 年黄土高原农田面积占比一直较大,年均固碳 47.7 TgC,森林年均固碳 39.4 TgC,草地年均固碳 29.8 TgC,且植被覆盖度逐年增大(1990 年植被覆盖度 26%,2000 年 28%,2015 年 35%),NPP 呈逐年增加趋势,植被固碳也增多。同时,研究区退耕还林达到的固碳效果较好,年均固碳 79.55 TgC。土地利用转变的确影响生态系统的碳源碳汇,更有学者指出完全可以通过土地利用变化来实现《京都议定书》中设定的每年减少 200 亿吨碳排放的目标^[38]。

海拔高度对 NPP 的响应表现为:随时间序列逐年上升,年均 NPP 随高程的增加先降低后升高,年总 NPP 随高程增加变化趋势相反,这与前人研究^[10, 39]结果一致,黄土高原 NPP 受高程因子变化较大,其原因在于:其气候等环境条件受地形的分异特征变化显著。山地影响陆间水循环,进而控制地表水源分布,使得该区域地表环境变化对地形的依赖程度较高,因此,海拔高度与 NPP 分级特征明显的主要原因是高程通过控制土壤以及水热条件影响植被垂直分布与气候变化,进而影响植被区域分布^[4, 10, 39-41]。

土地利用转变与海拔高度的协同作用对黄土高原植被 NPP 分异特征明显^[17]。研究区两因子叠加后,仍以退耕还林固碳最多(图 3),由于林地的冠层相比耕地和草地对降水有阻截作用,枯枝落叶层具有节流作用,能很好地抵抗降水对地表的冲刷,对地表土壤有一定的稳固作用,导致林地具有较高的土壤保持效应^[42]。但耕地和草地之间的转变在两因子的协同作用下变得不稳定:海拔低于 1500 m,宜变草地为耕地,可能是因为低海拔处人为耕作周期更长,大部分农作物长势均比草地好,且农作物更受到人为培育,而草地借势生长但远不如耕地的固碳效果,因此低海拔农田固碳效果优于草地;而海拔大于 1500 m,中海拔处频繁的农业活动会干扰碳循环,短周期的耕作加速了土壤中的生物活性,导致土壤中 CO₂ 含量升高,在影响碳酸盐的溶解和沉淀的同时影响地上植物的光合作用,进而造成固碳能力的降低;而在中海拔草地受人为活动影响不大,草地群落长期保持自然生长状态,从而导致耕地的固碳能力不如草地,这也与 Hui, A. A. 等^[43]研究结果一致;但随着高程逐级增大,耕地和草地的固碳效果均远不如林地,对气候以及热量等环境条件的需求程度逐渐提高,在高海拔处不易积蓄水分,造成土壤水分含量低,可耕作类型数量下降,不宜于农作物和草地生长,而在高海拔林地生态系统其固碳能力的鲁棒性较高^[44],因此,海拔高的地区耕地和草地的固碳效果不如林地。

综上,植被 NPP 对自然与社会因子的响应关系错综复杂,但显著相关性仍存在于其时空变化上,同时因研究区、尺度和方法等各种因素的不同也会给 NPP 的反演估算带来差异性和不确定性。本研究也仅从自然和社会因子中选取海拔高度、土地利用变化以及两者协同作用的角度分析了黄土高原植被 NPP 的时空分异特征,在 NPP 响应因子的研究中对定量方法与权衡指标的选取值得进一步探索。

5 结论与展望

本文研究了黄土高原 1990—2015 年在土地利用转变与海拔高度协同作用中植被固碳的变化情况,利用 CASA 模型进行 NPP 遥感估算,在此基础上统计并分析土地利用转变及海拔高度的协同作用对植被固碳的综合影响。总体来看:(1)黄土高原年均 NPP 逐年上升,年均 NPP 增速 2.74 gC m⁻² a⁻¹,年均固碳增速

1.13 TgC/a, 研究区林地固碳效果理想(年均 NPP 为 $619.5 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。(2) 土地的开发利用, 即自然生态用地转为商服设施用地, 释碳增多; 恢复自然生态用地, 固碳增多。(3) 黄土高原年均 NPP 随高程的增加先降低后升高, 年总 NPP 和固碳量随高程增加变化趋势相反;(3) 研究区退耕还林的植被固碳效果最好; 而林地变为耕地或草地均不能达到固碳目的, 此外, 研究区低海拔和高海拔相比中海拔地区更适宜退耕还林, 海拔低于 1500 m 宜变草为耕, 海拔高于 1500 m 宜退耕还草, 海拔高于 3000 m 宜变耕、草为林。

不同遥感传感器提供的数据源可能会影响 NPP 估算模型的结果, 而现行方法针对不同传感器获取的遥感影像 NDVI 时间序列插补并不完善, 采用逐像元回归插补或是区域综合插补还需有待研究。关于长时间序列的区域尺度固碳研究, 从 NPP 遥感估算的角度来说, 更高精度、更长时间序列、更快解算速度是未来需要进一步研究的方向。

参考文献 (References):

- [1] 孙红雨, 王长耀, 牛铮, 布和敖斯尔, 李兵. 中国地表植被覆盖变化及其与气候因子关系——基于 NOAA 时间序列数据分析. 遥感学报, 1998, 2(3): 204-210.
- [2] 索安宁, 赵冬至, 张丰收. 我国北方河口湿地植被储碳、固碳功能研究——以辽河三角洲盘锦地区为例. 海洋学研究, 2010, 28(3): 67-71.
- [3] 曾慧卿, 刘琪璟, 冯宗炜, 王效科, 马泽清. 基于 BIOME-BGC 模型的红壤丘陵区湿地松 (*Pinus elliottii*) 人工林 GPP 和 NPP. 生态学报, 2008, 28(11): 5314-5321.
- [4] 魏靖琼. 甘肃省草地 NPP 的模拟估算及影响因素研究[D]. 兰州: 甘肃农业大学, 2012.
- [5] Zhang T, Cao G C, Cao S K, Zhang X G, Zhang J, Han G Z. Dynamic assessment of the value of vegetation carbon fixation and oxygen release services in Qinghai Lake basin. Acta Ecologica Sinica, 2017, 37(2): 79-84.
- [6] 冯源, 田宇, 朱建华, 肖文发, 李奇. 森林固碳释氧服务价值与异养呼吸损失量评估. 生态学报, 2020, 40(14): 5044-5054.
- [7] 张继平, 刘春兰, 郝海广, 孙莉, 乔青, 王辉, 宁杨翠. 基于 MODIS GPP/NPP 数据的三江源地区草地生态系统碳储量及碳汇量时空变化研究. 生态环境学报, 2015, 24(1): 8-13.
- [8] 温宥越, 孙强, 燕玉超, 肖敏志, 宋巍巍, 杨剑. 粤港澳大湾区陆地生态系统演变对固碳释氧服务的影响. 生态学报, 2020, 40(23): 8482-8493.
- [9] 李金珂, 杨玉婷, 张会茹, 黄铝文, 高义民. 秦巴山区近 15 年植被 NPP 时空演变特征及自然与人为因子解析. 生态学报, 2019, 39(22): 8504-8515.
- [10] 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.
- [11] 王钊, 李登科. 2000—2015 年陕西植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 应用生态学报, 2018, 29(6): 1876-1884.
- [12] 王芳, 汪左, 张运. 2000—2015 年安徽省植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素. 生态学报, 2018, 38(8): 2754-2767.
- [13] Piao S L, Fang J Y, Chen A P. Seasonal dynamics of terrestrial net primary production in response to climate changes in China. Acta Botanica Sinica, 2003, 45(3): 269-275.
- [14] 史晓亮, 王馨爽. 黄土高原草地覆盖度时空变化及其对气候变化的响应. 水土保持研究, 2018, 25(4): 189-194.
- [15] 周夏飞, 马国霞, 曹国志, 贾倩, 於方. 2001—2013 年黄土高原植被净初级生产力时空变化及其归因. 安徽农业科学, 2017, 45(14): 48-53.
- [16] 谢红霞, 任志远, 李锐. 陕北黄土高原土地利用/土地覆被变化中植被固碳释氧功能价值变化. 生态学报, 2007, 26(3): 319-322.
- [17] 卞鸿雁. 黄土高原南部地区土地利用变化与生态效应时空动态测评[D]. 西安: 陕西师范大学, 2011.
- [18] Wang K B, Shanguan Z P. Response of vegetation net primary productivity to climate change scenarios in the Loess Plateau of China—a case study of the Yangou watershed. Journal of Earth Environment, 2012, 3(6): 1156-1164.
- [19] 刘洋洋, 王倩, 杨悦, 刚成诚, 章钊颖, 同琳静, 李建龙. 黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素. 应用生态学报, 2019, 30(7): 2309-2319.
- [20] 信忠保, 许炯心, 郑伟. 气候变化和人类活动对黄土高原植被覆盖变化的影响. 中国科学 D 辑: 地球科学, 2007, 37(11): 1504-1514.
- [21] 谢宝妮. 黄土高原近 30 年植被覆盖变化及其对气候变化的响应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2016.
- [22] 张翀, 任志远. 黄土高原地区植被覆盖变化的时空差异及未来趋势. 资源科学, 2011, 33(11): 2143-2149.
- [23] 毛德华, 王宗明, 罗玲, 杨旸. 基于 MODIS 和 AVHRR 数据源的东北地区植被 NDVI 变化及其与气温和降水间的相关分析. 遥感技术与应用, 2012, 27(1): 77-85.
- [24] Brown M E, Pinzon J E, Didan K, Morisette J T, Tucker C J. Evaluation of the consistency of long-term NDVI time series derived from AVHRR,

- SPOT-vegetation, SeaWiFS, MODIS, and Landsat ETM+ sensors. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2006, 44(7): 1787-1793.
- [25] Tucker C J, Pinzon J E, Brown M E, Slayback D A, Pak E W, Mahoney R, Vermote E Y, El Saleous, N. An extended AVHRR 8-km NDVI dataset compatible with MODIS and SPOT vegetation NDVI data. *International Journal of Remote Sensing*, 2005, 26(20): 4485-4498.
- [26] Gitelson A A, Kaufman, Y J. MODIS NDVI optimization to fit the AVHRR data series-spectral considerations. *Remote Sensing of Environment*, 1998, 66(3): 343-350.
- [27] 蔡福, 于贵瑞, 祝青林, 何洪林, 刘新安. 气象要素空间化方法精度的比较研究——以平均气温为例. *资源科学*, 2005, 27(5): 173-179.
- [28] 朱文泉, 潘耀忠, 张锦水. 中国陆地植被净初级生产力遥感估算. *植物生态学报*, 2007, 31(3): 413-424.
- [29] Ruimy A, Saugier B, Dedieu G. Methodology for the estimation of terrestrial net primary production from remotely sensed data. *Journal of Geophysical Research Atmospheres*, 1994, 99(D3): 5263-5283.
- [30] 朱文泉, 潘耀忠, 何浩, 于德永, 扈海波. 中国典型植被最大光利用率模拟. *科学通报*, 2006, 51(6): 700-706.
- [31] 国家林业局. LY/T 1721—2008 森林生态系统服务功能评估规范. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- [32] Yuan Q Z, Wu S H, Zhao D S, Dai E F, Chen L, Zhang L. Modeling net primary productivity of the terrestrial ecosystem in China from 1961 to 2005. *Journal of Geographical Sciences*, 2014, 24(1): 3-17.
- [33] 韩艳飞, 柯长青, 李晶. 近 30 年关天经济区植被净初级生产力对土地利用变化的动态响应. *干旱区资源与环境*, 2014, 28(6): 68-74.
- [34] 石志华, 刘梦云, 吴健利, 常庆瑞, 谢宝妮, 闻熠. 基于 CASA 模型的陕西省植被净初级生产力时空分析. *水土保持通报*, 2016, 36(1): 206-211.
- [35] 高志强, 刘纪远, 曹明奎, 李克让, 陶波. 土地利用和气候变化对区域净初级生产力的影响. *地理学报*, 2004, 59(4): 581-591.
- [36] 赵士洞, 罗天祥. 区域尺度陆地生态系统生物生产力研究方法. *资源科学*, 1998, 20(1): 23-34.
- [37] 徐丽萍. 黄土高原地区植被恢复对气候的影响及其互动效应[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2008.
- [38] Kaiser J. Panel estimates possible carbon 'sinks'. *Science*, 2000, 288(5468): 942-943.
- [39] 姬盼盼, 高敏华, 杨晓东. 中国西北部干旱区 NPP 驱动力分析——以新疆伊犁河谷和天山山脉部分区域为例. *生态学报*, 2019, 39(8): 2995-3006.
- [40] 李国亮, 赵军. 黑河流域上游草地 NPP 分布及其与地形因子的关系分析. *甘肃科技*, 2013, 29(21): 30-32.
- [41] 张静. 陕南土地景观动态与生态风险变化研究[D]. 西安: 陕西师范大学, 2018.
- [42] 薛亚永, 王晓峰. 黄土高原森林草原区退耕还林还草土壤保持效应评估. *干旱地区农业研究*, 2017, 35(5): 122-128.
- [43] An H, Wu X Z, Zhang Y R, Tang Z S. Effects of land-use change on soil inorganic carbon: a meta-analysis. *Geoderma*, 2019, 353: 273-282.
- [44] 金樑, 杜晓光, 侯扶江, 常生华, 王晓娟. 黄土高原山地坡度对退耕农田生态系统自然植被演替初期的影响. *草业科学*, 2007, 24(7): 66-71.