

张振东,常军.2001—2018年黄河流域植被NPP的时空分异及生态经济协调性分析[J].华中农业大学学报,2021,40(2):166-177.
DOI:10.13300/j.cnki.hnlkxb.2021.02.018

2001—2018年黄河流域植被NPP的时空分异及生态经济协调性分析

张振东,常军

山东师范大学地理与环境学院,济南 250358

摘要 基于 NDVI、LSWI、土地利用数据以及气象和统计数据,借助 CASA-VPM 模型和生态经济协调耦合度模型分析了黄河流域 2001—2018 年植被 NPP 时空分异特征;探讨了生态和经济发展现状,并以此对生态经济协调耦合度做出评价。结果表明:2001—2018 年黄河流域植被 NPP 年平均值为 $288.33 \text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,且持续波动增加,空间上呈现出南高北低,平原、盆地高,高原、山地低的分布特征;不同植被类型月平均 NPP 变化呈现出周期性单峰型变化的特征且不同植被类型随时间变化的趋势和周期相同,但变化幅度和变化速率具有明显的区分度;研究区年总生态价值和经济价值拟合后分别呈现出“U”型和线性的变化特征,且后者增长速率远大于前者,空间上冷点区主要分布在西北部山地与高原边缘过渡地区,热点区域则主要位于黄河流域的“金三角”地带;研究区生态经济协调耦合度呈现出“大分散,小聚集”的条带状空间分布特征且以“W”型曲线不断上升,经济发展水平是流域生态经济协调耦合度的主导因素。

关键词 黄河流域;生态经济;生态环境;协调发展;绿色产业;绿色能源;绿色消费;协调耦合度模型;NPP

中图分类号 F 062.2; K 909 **文献标识码** A **文章编号** 1000-2421(2021)02-0166-12

生态环境与社会经济的稳定和发展有着密切的联系,随着经济发展步伐不断加快,两者的矛盾已经成为可持续发展的突出问题,而协调性研究是可持续发展研究的重要方面,也是地理学和相关学科解释区域系统各个要素过程、模型和机制的重要途径。因此,区域生态保护和经济发展的协调性评价是近年来诸多学者研究的热点^[1-2]。2019 年习近平总书记将黄河流域生态保护和高质量发展上升为重大国家战略,强调黄河流域是我国重要的生态屏障和经济地带。植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)是指绿色植被在单位时间和面积上通过光合作用产生的全部有机物扣除异养呼吸所消耗的有机量后的剩余部分^[3],是维持区域生态环境的物质基础。植被 NPP 不仅能直观反映区域生态环境的生产能力和质量状况,也是判定区域生态系统结构和调节生态过程的主要因子,为区域生态环境的动态监测和评估提供高质量的综合信息^[4-5]。在此背景下,探究黄河流域植被净初级生产力的时空

分异规律,并以此对黄河流域生态经济协调度做出定量评价对我国生态、经济和社会可持续发展和黄河流域生态保护和高质量发展的重大国家战略的实施具有重要的理论和现实意义。

黄河流域作为陆地、河流和人类社会三大系统相互影响最为深刻的地区之一,包含典型而又复杂的协调性问题^[6]。目前,对中国各级各类生态环境和社会经济发展协调性的研究主要分为两方面:一方面是对不同尺度、类型区位条件下生态经济协调性的适应机制及评价方法的研究^[7-8],如陈端吕等^[9]以环洞庭湖区生态经济系统为研究对象,通过构建评价指标体系探讨了系统因子对于生态环境与社会经济协调的调控适应机制;于忠华等^[2]和王娜^[7]则利用生态环境和经济发展的典型指标对不同城市生态和经济的协调性作出定性评价;而目前对生态经济协调性的定量评价则主要以现有植被 NPP 成果为基础计算研究区生态价值总量,构建生态经济协调耦合度模型^[10-12]。另一方面则是在社会发展的不

收稿日期:2020-09-19

基金项目:国家社会科学基金项目(18BJY086);山东省自然科学基金项目(ZR2012DM009)

张振东,E-mail:zzd642971178@163.com

通信作者:常军,E-mail:changj@163.com

同领域的应用背景下对生态经济协调性进行评价及动态监测^[2,6,13-14],如经济发展、农业发展及乡村振兴等领域^[15-17]。但是,在研究区尺度和类型选择上,主要以省、市、县和地区等小范围行政区划为主,对大时空尺度整体地貌单元如黄河流域的研究较少;且生态经济协调性评价指标的选择和体系的构建也存在一定的主观性,只能反映生态环境的部分特征,导致不同研究测算结果差异较大;另外,在数据源的选择上,现有NPP产品没有充分考虑不同研究区土地利用类型的差异性,精度较低^[10]。而植被在光合作用下合成NPP的过程总是伴随着区域生态环境中固碳、释氧和有机物固定三项主要的生态过程,利用植被NPP的估算结果和光合作用方程结合区域经济发展现状将三项生态过程的物质量进行估算并换算为价值量,可以使不同生态过程的量纲统一起来^[11],且遥感数据更新快、参数少,方便对大范围研究区进行长时间尺度的观测,较好地弥补了上述研究中的不足。因此,本研究综合利用CASA(carnege ames stanford approach)和VPM(vegetation photosynthesis model)模型(CASA-VPM模型),对黄河流域植被NPP进行反演,探究2001—2018年黄河流域NPP的时空分异特征;并以此为基础构建生态经济协调耦合度模型,对黄河流域生态经济协调耦合程度进行定量分析,旨在为黄河流域生态环境保护和经济的可持续发展提供理论依据。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

黄河作为中国第二长河,分别由位于青藏高原巴颜克拉山的查哈西拉山和各姿各雅山支脉以及星宿海西的约古宗列曲三源汇聚而成。流域范围为E95°53'45"~119°12'48",N32°9'33"~41°50'20",南北方向长约1 444 km,东西方向长约2 324 km,流域面积约 $7.95 \times 10^5 \text{ km}^2$,约占陆地国土总面积的8.3%。流域内地势西高东低,地貌差异悬殊^[18],主要划分为青藏高原、内蒙古高原、黄土高原和黄淮海平原4个地貌单元;海拔落差大,海拔高程为-8~6 241 m。黄河流域土地覆被类型主要以草地、农作物、阔叶林、稀疏植被为主,分别占流域面积的69.18%、19.79%、6%、2.73%,其他植被类型仅占2.3%。黄河流域总人口约4.2亿,2018年流域GDP约占全国的26.5%,随着新型城镇化和第二/三产业的发展,流域内生态环境保护与经济发展的矛盾日

益突出,严重制约了黄河流域生态经济的可持续发展。

1.2 数据来源及处理

1)遥感数据。NDVI和地表反射率数据均来自美国国家航空航天局网站(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。选取2001、2005、2010、2015、2018五年MOD13A1产品575景,时间分辨率为16 d,空间分辨率为500 m;选取MOD09A1产品(近红外波段和短波红外波段)1 140景,时间分辨率为8 d,空间分辨率为500 m。利用MRT(MODIS reprojection tool)选取适合研究区的兰伯特投影对数据进行镶嵌及投影变换;进行掩膜处理后运用最大值合成法(MVC)得到研究区月周期的NDVI和地表反射率数据。

2)土地覆被数据。土地覆被数据来自MODIS三级土地覆盖类型产品MCD12A1,根据研究区植被类型实际分布情况,最终选取植被功能型(肺功能)方案将研究区土地覆被类型划分为7种:草地、农作物、阔叶林(常绿阔叶林、落叶阔叶林)、针叶林(常绿针叶林、落叶针叶林)、灌木、混交林、稀疏植被。

3)气象数据。从中国气象数据网(<http://data.cma.cn/>)获取研究区2001、2005、2010、2015和2018年92个气象站点(研究区内84个)月平均气温、月平均降水量和日照时数的日值数据后采用克里格(Kriging)插值法得到空间分辨率为500 m的研究区月平均气温、月平均降水量、月日照百分率的栅格数据集。

4)其他数据。人均和各地级市GDP来源于各省统计年鉴,并以2018年为基准年,进行可比价变换后利用ArcGIS生成栅格数据集;矢量边界数据从国家特殊环境、特殊功能观测研究台站共享服务平台(<http://www.crensed.ac.cn/>)获取;DEM数据来源于美国国家航空航天局的全球DEM数据集(<http://ladsweb.nascom.nasa.gov/>)。

1.3 研究方法

研究技术路线如图1所示,将CASA与VPM模型相结合,计算黄河流域植被NPP,分析研究区植被NPP的时空分异特征;利用植被NPP,结合研究区各项社会经济数据构造黄河流域生态经济协调耦合度模型,对研究区生态、经济及两者的协调性作出定量评价。

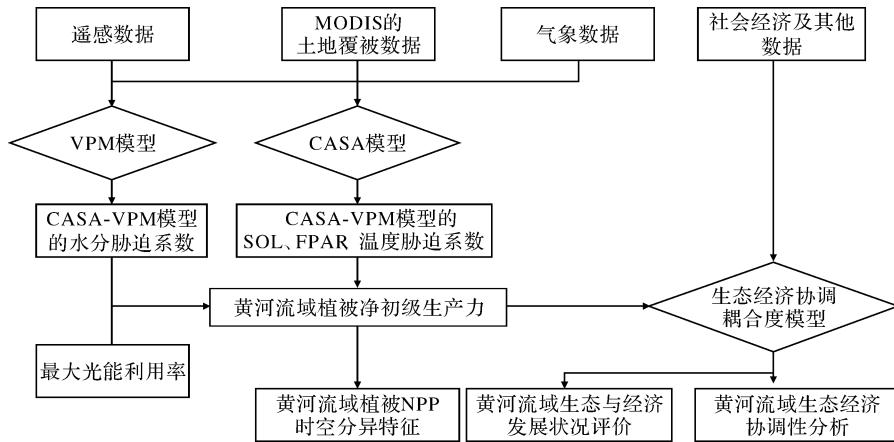


图 1 植被 NPP 模拟及生态经济协调性分析建模流程

Fig.1 Vegetation NPP simulation and ecological economic coordination analysis modeling process

1) CASA-VPM 模型的构建。CASA-VPM 模型是在利用原始 CASA 模型反演太阳总辐射能 (L_{SO})、光合有效辐射吸收比例 (R_{FPA})、光能利用率 (ϵ) 中温度胁迫系数 $T_{\epsilon 1}, T_{\epsilon 2}$ 等参数的基础上, 引入 VPM 模型计算 ϵ 的水分胁迫系数 W_{ϵ} , 利用地表水分指数 (I_{LSW}) 代替区域实际蒸散模型^[19]。CASA-VPM 模型的优势是利用遥感数据进行反演, 覆盖范围广, 参数少, 数据获取相对简单, 可操作性强^[4,20-21], 计算公式如式(1)、(2)所示。

$$NPP = L_{SO(x,t)} \times R_{FPA(x,t)} \times \epsilon_{(x,t)} \times 0.5 \quad (1)$$

$$\epsilon_{(x,t)} = T_{\epsilon 1} \times T_{\epsilon 2} \times W_{\epsilon} \times \epsilon_{max} \quad (2)$$

式(1)中, x 表示逐个像元; t 表示月份; NPP 表示植被净初级生产力, $g_c/(m^2 \cdot month)$; $L_{SO(x,t)}$ 表示像元 x 在 t 月份的太阳总辐射能, MJ/m^2 ; $R_{FPA(x,t)}$ 表示植被层对光合有效辐射的吸收比例; 0.5 为常数, 表示太阳有效辐射中植被可以利用的部分(波长 $0.4 \sim 0.7 \mu m$); $\epsilon_{(x,t)}$ 表示逐个像元 t 月份的光能利用率, g_c/MJ 。具体计算公式如(3)、(4)、(5)所示。

$$L_{SO(x,t)} = (a + b \times \frac{n}{N}) \times a_R \quad (3)$$

$$R_{S(x,t)} = \frac{1 + I_{NDV(x,t)}}{1 - I_{NDV(x,t)}} \quad (4)$$

$$R_{FPA(NDVI \text{ 和 } SR)} = \begin{cases} \frac{I_{NDV(x,t)} - I_{NDV(i,min)}}{I_{NDV(i,max)} - I_{NDV(i,min)}} \times \\ (R_{FPAmax} - R_{FPamin}) + R_{FPamin} \\ \frac{R_{S(x,t)} - R_{S(i,min)}}{R_{S(i,max)} - R_{S(i,min)}} \times \\ (R_{FPAmax} - R_{FPamin}) + R_{FPamin} \end{cases} \quad (5)$$

式(3)中, a, b 为计算 L_{SO} 的常数, 分别取值为 0.353、0.543^[4], n/N 为日照百分率, a_R 为天文辐射,

具体计算公式详见参考文献[22]。

研究表明, NDVI 和 R_S 与 R_{FPA} 均存在较好的线性关系^[23-24]。 R_S 为比值植被指数, 由式(4)计算可得。式(5)中, $I_{NDV(x,t)}$ 和 $R_{S(x,t)}$ 分别表示像元 x 在 t 月份的 NDVI 和 R_S 值; $I_{NDV(i,max)}$ 、 $R_{S(i,max)}$ 、 $I_{NDV(i,min)}$ 和 $R_{S(i,min)}$ 表示某种植被类型将月 NDVI 和 SR 值累积排序后在 95% 和 5% 处的取值计算所得; R_{FPAmax} 和 R_{FPamin} 表示 FPAR 的最大值和最小值, 与植被类型无关, 一般为常数, 即 $R_{FPAmax} = 0.950$, $R_{FPamin} = 0.001$ ^[17,19]。为提高计算精度, 选择 2 种植被指数计算 R_{FPA} 的均值作为最终 R_{FPA} 的估算值。

ϵ 为植被通过光合作用将太阳辐射能转换为自身有机碳的效率^[25]。式(2)中, $T_{\epsilon 1}, T_{\epsilon 2}$ 反映温度对光能利用率的影响, 计算方法已经相对完善, 详见参考文献[24], W_{ϵ} 反映植被所含水分对光能利用率的影响, 以往大部分研究通过区域实际蒸散量和区域潜在蒸散量来计算, 模型复杂, 经验系数较多, 计算精度难以保证^[5,26]。LSWI 可以反映植被冠层水分状况, 对植被自身水分含量较敏感^[27-28]。因此, 为提高 W_{ϵ} 的计算精度, 本研究利用 I_{LSW} 来计算 W_{ϵ} , 计算公式如式(6)、(7)所示。

$$I_{LSW} = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{SWIR}}{\rho_{NIR} + \rho_{SWIR}} \quad (6)$$

$$W_{\epsilon 1} = \frac{1 + I_{LSW}}{1 + I_{LSWmax}} \quad (7)$$

$$W_{\epsilon} = (1 - W_{\epsilon 1}) + 0.5 \quad (8)$$

式(6)中, I_{LSW} 由 MOD09A1 数据的近红外波段 (ρ_{NIR}) 和短波红外波段 (ρ_{SWIR}) 计算可得。式(7)中 I_{LSWmax} 指植被生长期单个像元的最大值。

通过查阅文献,发现通过式(7)计算所得 $W_{\epsilon 1}$ 的范围为0(极端湿润)~1(极端干旱),与CASA模型中 W_{ϵ} 取值相反^[19]。为与CASA模型相适应,参考Bao等^[29]研究成果对公式进行了完善,如式(8)所示。完善后 W_{ϵ} 的取值范围为 $0.5 < W_{\epsilon} < 1$, W_{ϵ} 越大,表明植被所在环境越湿润。

ϵ_{max} 表示植被最大光能利用率,不同植被的最大光能利用率不同,本研究参考朱文泉等^[30]模拟的不同植被类型的 ϵ_{max} 作为黄河流域不同植被类型的 ϵ_{max} ,详见表1。

表1 研究区各植被类型最大光能利用率

Table 1 Maximum light energy utilization rate of various vegetation types in the study area

序号 Serial number	植被类型 Vegetation types	g_c/MJ
1	阔叶林 Broadleaf forest	0.768
2	针叶林 Coniferous forest	0.485
3	稀疏植被 Sparse vegetation	0.542
4	农作物 Crop	0.542
5	灌木 Bush forest	0.429
6	混交 Mixed forest	0.475
7	草地 Grassland	0.542

2)生态经济协调耦合度模型的构建。植被光合作用是陆地碳循环的重要动力,伴随植被光合作用发生的能量固定、制氧和固碳3个过程不仅是承载陆地生态系统的能量流动和物质循环的主要动力,更是生态系统自然资本价值的主要组成部分^[31]。因此,本研究将生态价值分为有机物价值、释氧价值和固碳价值3部分,生态价值计算公式如式(9)所示。

$$E_i^{tj} = \frac{P_{NP_i}^m}{0.45} \times c + P_{NP_i}^m \times 1.63 \times 702.95 + P_{NP_i}^m \times 1.2 \times 400 \quad (9)$$

式(9)中, E_i^{tj} 为生态价值总量,元; $P_{NP_i}^m$ 为研究区*i*年份年均NPP质量, t_c/a ;0.45为NPP中的含碳率; c 为2018年动力煤中长期合同平均价格,取558.5元/t。根据植被光合作用公式 $6CO_2 + 6H_2O \xrightarrow{\text{光合作用}} C_6H_{12}O_6 + 6O_2$ 可知,制造有机物、释氧和固碳的质量之比为1:1.63:1.20,因此,分别基于制氧成本法和碳税法计算释放 O_2 和固定 CO_2 的价值,制氧成本法取400元/t,碳税法取702.95元/t^[10]。

生态和经济作为黄河流域最为重要的两个子部分,两者之间有着复杂的相互作用和耦合应力机制^[11]。本研究借鉴物理学中容量耦合系统概念,构造生态经济协调耦合度模型。计算公式如(10)、

(11)、(12)所示。

$$C = 2 \times \left\{ \frac{E_i \times P_i}{[E_i + P_i]^2} \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (10)$$

$$T = \alpha \times E_i + \beta \times P_i \quad (11)$$

$$D = \sqrt{C \times T} \quad (12)$$

式(10)中,C为生态经济耦合度,表征生态和经济相互作用的强弱,取值范围为0(低耦合)~1(协调耦合); E_i 为研究区生态发展状况(用单位面积的 E_i^{tj} 量化,单位:元/km), P_i 为研究区经济发展状况(用人均GDP量化,单位:元/人)。

耦合度虽然可以反映生态与经济之间的相互作用,但不能反映两者协调状况的好坏,因此,本研究利用式(11)和(12)进一步构建协调耦合度模型。式中T为生态与经济的综合发展指数, α 和 β 分别为生态和经济在发展中所占权重,本研究默认生态保护与经济发展同等重要,因此, α 和 β 均取0.5,T值越大表示研究区生态与经济的整体发展水平越高^[9];D表示研究区生态经济协调耦合度,取值范围为0(严重失调)~1(高度协调)。本研究参考已有研究成果并结合研究区生态与经济实际,将研究区耦合度划分为4种类型,协调耦合度划分为5种类型,详见表2^[3,10,32-33]。

2 结果与分析

2.1 黄河流域植被NPP时空分异特征

1)黄河流域2001—2018年均NPP变化特征及空间分布。模拟结果(图2)显示,2001—2018年研究区年均NPP最小值为243.71 g_c/(m²·a),最大值为375.51 g_c/(m²·a),多年均值为288.33 g_c/(m²·a);2010年之前研究区年均NPP变化不大,处于动态平衡状态,2010年后则增长迅速,呈现出波动增加的趋势。各范围年均NPP的流域面积占比显示,研究区极低值(<150 g_c/(m²·a))和低值(150~250 g_c/(m²·a))面积占比不断减小,所占流域面积百分比之和由58%减少至29%;中值(250~350 g_c/(m²·a))及中值以上面积占比不断扩大,所占流域面积百分比之和由42%增加至71%,年均NPP>250 g_c/(m²·a)的区域显著增加。

由图3可以看出,研究区2001—2018多年平均NPP呈现出南高北低,平原、盆地高,高原、山地低的空间分布特征。极高值区(350~450 g_c/(m²·a))、高值区(>450 g_c/(m²·a))主要分布在黄河流域上游青藏高原和黄土高原过渡地带、中游的宁夏平原

表2 黄河流域生态经济耦合度及协调耦合度类型划分

Table 2 Division of ecological and economic coupling degree and coordination coupling degree in the Yellow River Basin

耦合度 Coupling Degree	耦合类型 Coupling type	特征 Characteristic	协调耦合度 Coordination degree	协调耦合类型 Coupling type	特征 Characteristic
$C \in [0, 0.3)$	低耦合阶段 Low coupling stage	生态和经济出现博弈, 处于较低水平耦合阶段 There is a game between ecology and economy, and it is in a low-level coupling stage	$D \in [0, 0.2)$	严重失调 Serious disorder	经济作为发展重点, 生态破坏严重, 生态问题较多 The economy is the focus of development, and the ecological damage is severe, causing more ecological problems
$C \in [0.3, 0.5)$	拮抗阶段 Antagonistic stage	生态和经济的相互影响加强 The mutual influence of ecology and economy is strengthened	$D \in [0.2, 0.4)$	中度失调 Moderate disorder	经济发展占据优势地位, 经济发展与生态保护的矛盾较为突出, 但生态价值逐渐增加 Economic development occupies an advantageous position. The contradiction between economic development and ecological protection is more prominent, but the ecological value is gradually increasing
$C \in [0.5, 0.8)$	调和耦合阶段 Primary coupling stage	生态和经济开始相互配合, 呈现良性耦合的特点 Ecology and economy began to cooperate with each other, showing the characteristics of begin coupling	$D \in [0.4, 0.5)$	基本协调 Basic coordination	经济发展方式发生改变, 开始注重生态经济的协调发展 The mode of economic development has changed, and attention has been paid to the coordinated development of ecological economy
$C \in [0.8, 1.0)$	协调耦合阶段 Coordination and coupling phase	生态和经济逐渐向有序方向发展, 处于高度协调耦合阶段 Ecology and economy are gradually developing in an orderly direction, in a stage of highly coordinated coupling	$D \in [0.5, 0.8)$	中度协调 Moderate coordination	生态得到快速发展, 经济和生态的整体协调程度有了较大改善 The ecology has developed rapidly, and the overall coordination between economy and ecology has been greatly improved
			$D \in [0.8, 1.0)$	高度协调 Highly coordinated	生态和经济可以相互促进, 实现有序发展 Ecology and economy can promote each other to achieve orderly development

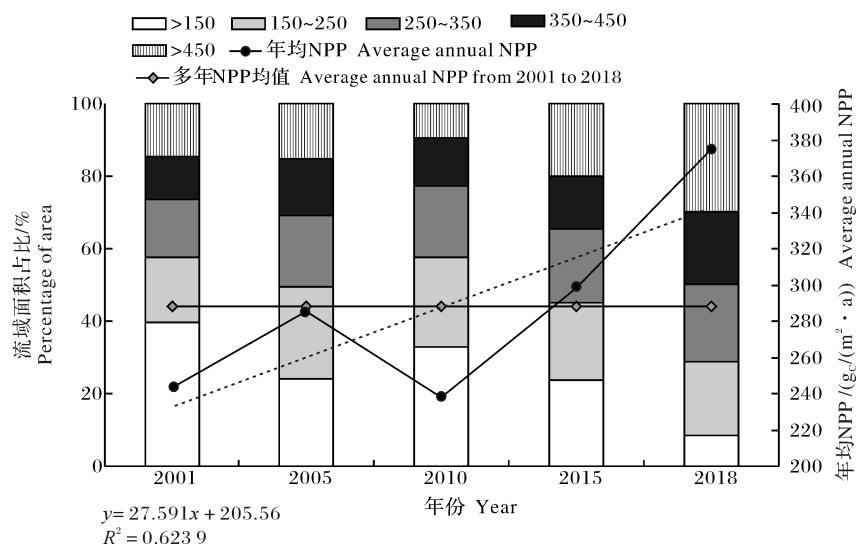


图2 2001—2018年黄河流域年均NPP年际变化及流域面积占比

Fig.2 Annual interannual change of NPP and percentage of area in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

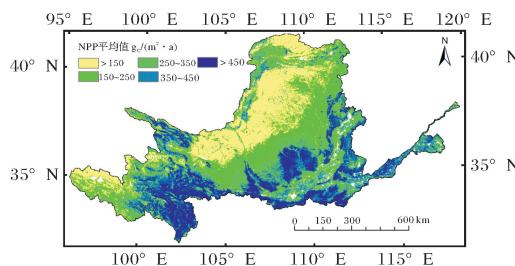


图3 2001—2018年黄河流域多年平均NPP空间分布

Fig.3 Spatial distribution of the average annual NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

和河套平原、下游的关中平原和流域干流及各支流流经的河谷地带,这些地区地形较为平坦,黄河干流及多条支流经过,水热条件充足。中值区($250\sim350\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)主要集中在上述地貌单元的外缘,极低值区($150\sim250\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)和低值区($<150\text{ g}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$)则主要集中在黄河流域中部降水较少、植被覆盖率较低的黄土高原以及西北部海拔较高的山区。

2)黄河流域2001—2018年不同植被类型NPP月平均变化特征。对研究区不同植被类型月平均NPP变化趋势(图4)分析发现,不同植被类型月平均NPP变化呈现出单峰型周期性变化特征,且随时间变化的趋势和周期相同。生长季均集中在2—11月;月平均NPP均在7月份达到最高,2月达到最低;2—7月为增长期,7—11月为减少期,其中2—3月为缓慢增长阶段,3—7月为快速增长阶段,7—10月为快速减少阶段,10—11月为缓慢减少阶段,11月到来年2月则为动态停滞阶段。但是,不同植被类型月平均NPP变化幅度和变化速率具有明显的区分度,通过观察不同植被类型变化曲线可以发现,阔叶林月平均NPP变化幅度和变化速率最大,其次是混交林,农作物、稀疏植被和针叶林的变化幅度和变化速率基本相同,处于中等水平且大于草地,灌木变化幅度和变化速率最小。另外,通过对研究区多年逐月平均NPP进行反演发现2—7月逐月平均NPP为增长阶段,其中5月份增长最快,7月份达到最大值;7—12月为减少阶段,9月份减少最快,12月份达到最小值,以上分布特征也与不同植被类型月平均NPP变化的趋势和周期相适应。

2.2 黄河流域生态与经济发展状况评价

基于2018年动力煤中长期合同平均价格计算多年有机物价值,并与制氧和固碳价值累加得到研究区年总生态价值(亿元/a),同时以2018年为基准

年通过国内生产总值指数进行可比价换算得到研究区年总经济价值(图5)。2001—2018年黄河流域年总生态价值拟合后呈现出“U”型曲线的特征($R^2=0.37$),2010年下降至最低值,为4 338.13亿元,2010年以后持续上升,2018年研究区生态价值为8 053.77亿元,是2001年生态价值的1.51倍。而研究区年总经济价值拟合后则呈现出线性特征($R^2=0.98$),并以6 025.6亿元/a的速率持续增长,2018年研究区经济价值为129 771.3亿元,是2001年经济价值的4.5倍,增长速率远超生态价值总量的增长速率。

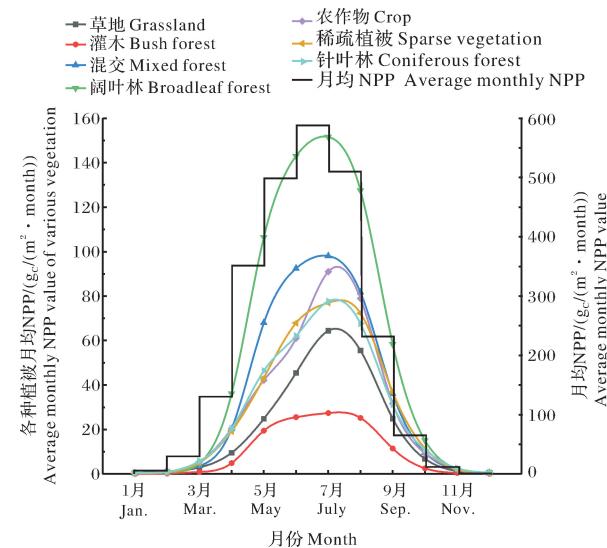


图4 2001—2018年黄河流域逐月平均NPP变化趋势

Fig.4 The average monthly NPP change trend of the Yellow River Basin from 2001 to 2018

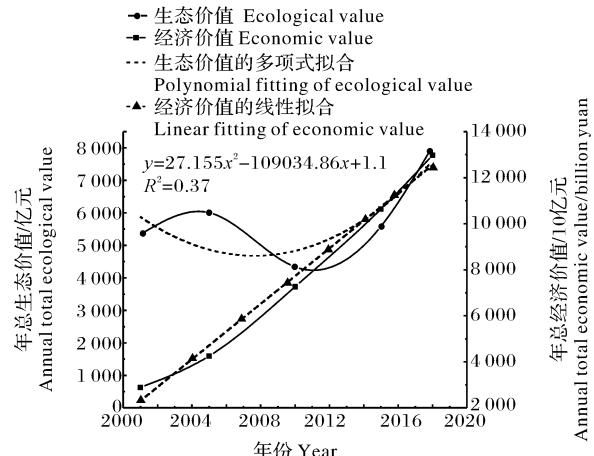


图5 2001—2018年黄河流域生态与经济价值变化趋势

Fig.5 Changes in the ecological and economic values of the Yellow River Basin from 2001 to 2018

单位生态价值可以较为准确地反映地区整体发展情况及对生态保护的投入水平。2001—2018 年研究区单位生态价值及冷热区空间分布(图 6)表明,高值区($120 \sim 160$ 万元/ km^2)和极高值区域(>160 万元/ km^2)主要集中在研究区西南部青藏高原与黄土高原边缘过渡地带、东南部的关中平原及下游各支流冲击平原区,与流域内年均 NPP 的空间分布状况具有较高的一致性;低值区($40 \sim 80$ 万元/ km^2)和极低值区($0 \sim 40$ 万元/ km^2)则主要位于内蒙古高原中部、黄土高原西北部。此外,通过计算可以发现单位生态价值较低的区域(极低值区、低值区)所占流域面积由 62.83% 减小至 34.62%,较

高的区域(高值区和极高值区)所占面积由 17.91% 增加至 35.36%;单位生态价值所占比重最大的值域由 2001 年的低值区(25.56%)变为 2018 年的中值区(29.86%)。总体上研究区单位生态价值不断增加。

另外,利用流域内地级市人均 GDP 基于冷热点分析法分析流域经济的空间集聚特征,结果显示:极冷点区和冷点区主要集中在天水、甘南、定西、固原、平凉、黄南、海东、白银等山地与高原边缘过度地区;热点区和极热点区主要集中在鄂尔多斯、巴彦淖尔、呼和浩特、银川、包头等经济集聚作用强的地级市。

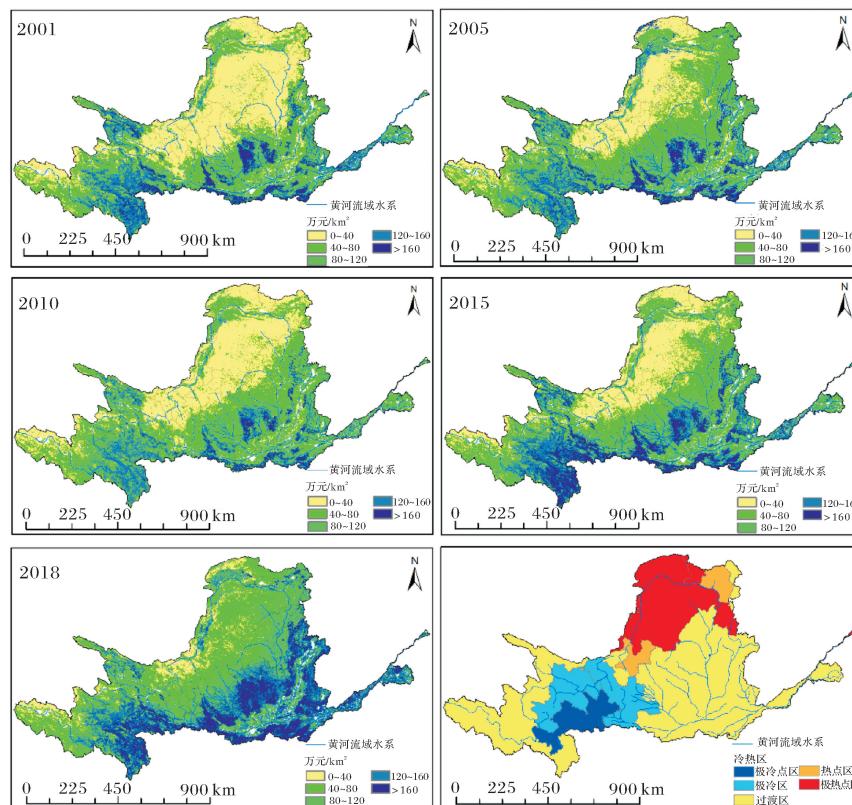


图 6 2001—2018 年黄河流域单位生态价值空间分布及人均经济价值冷热点分析图

Fig.6 Spatial distribution of ecological value per capita and cold hotspot analysis of economic value per capita in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

2.3 黄河流域生态经济协调性分析

揭示黄河流域生态保护与经济发展之间的关系对分析研究区生态经济协调性具有重要意义。本研究拟合了生态经济协调耦合度(D)、生态经济耦合度(C)、生态经济综合评价指数(T)的年际变化曲线(图 7),结果显示:研究区 2001—2018 年生态经济耦合度均在调和耦合及以上阶段($0.5 < C < 1$),呈现出倒“S”型曲线的特征,说明研究区生态和经济的相互影响程度一直在较强水平波动,且存在较

强的“极化效应”和“扩散效应”。2018 年研究区生态经济耦合度为 0.84,上升为协调耦合阶段。研究区生态经济整体发展水平和协调耦合度则均以“W”型曲线持续波动上升,通过对比 C 曲线的变化趋势发现,2012 年以前, C 和 T 、 D 的变化趋势相反,2012 年以后转为相同,三者协调上升,2018 年三者均达到最大值。

为进一步从整体上评价研究区生态经济协调耦合度,揭示 2001—2018 年研究区生态经济协调耦合

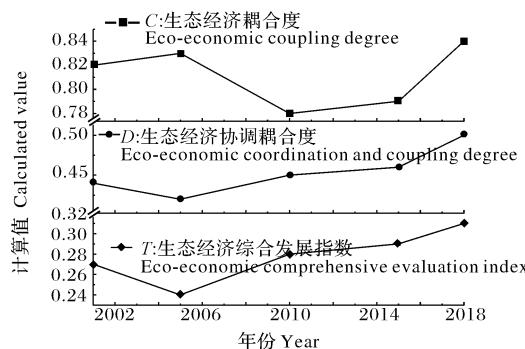
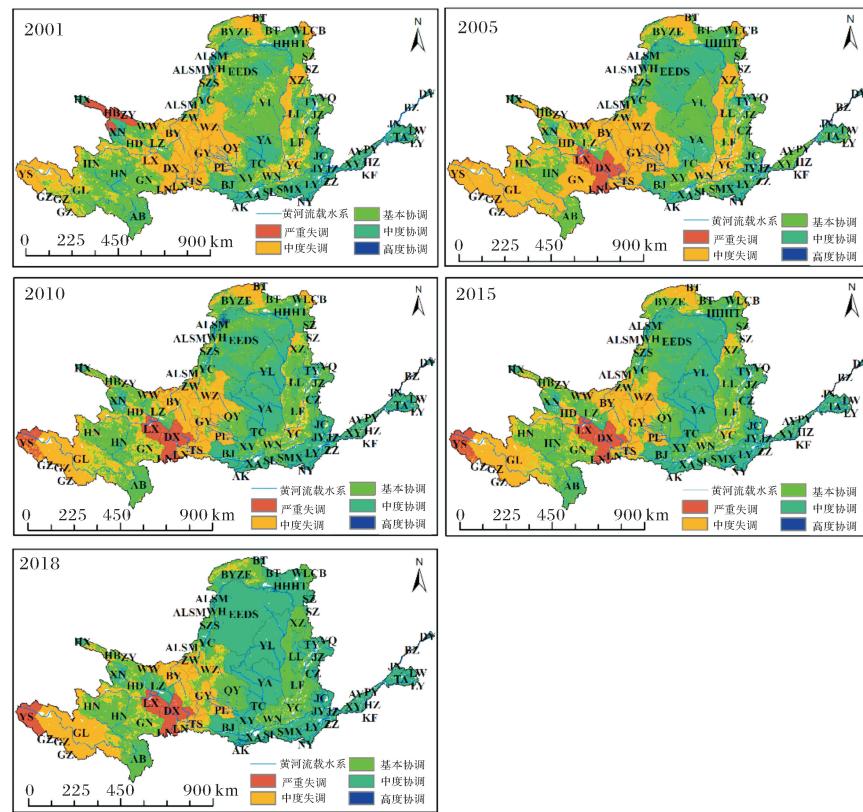
图 7 2001—2018 年黄河流域年际 D , C , T 变化趋势Fig.7 Interannual D , C , T trends in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

图 8 2001—2018 年黄河流域生态经济协调耦合度空间分布图

Fig.8 Spatial distribution of eco-economic coordination coupling degree in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

从空间分布来看,研究区生态经济协调耦合度呈现出“大分散,小聚集”的条带状分布特征,2001年研究区22个地级市处于失调区(严重失调、中度失调),研究区人均GDP最低的20个城市中失调区占16个,2018年研究区位于失调区的地级市减少为11个,研究区人均GDP最低的20个城市中失调区占9个,研究区生态经济协调耦合度与经济发展水平呈现出高度一致性,说明经济发展水平是影响流域生态

度动态变化特征,得到2001—2018年研究区逐像元生态经济协调耦合度空间分布现状并将其分为5类(图8)。总体上2001—2018年研究区生态经济协调耦合度不断上升,协调区(基本协调、中度协调、高度协调)所占流域面积比由65.09%上升至75.59%。具体来说,中度协调区($0.5 < D < 0.8$)上升最快,所占流域面积百分比由28.57%上升至48.20%,中度失调区($0.2 < D < 0.4$)和基本协调区($0.4 < D < 0.5$)呈下降趋势,分别由32.46%、37.15%下降至19.35%、26.88%,而严重失调区($0 < D < 0.2$)和高度协调区($0.8 < D < 1$)则变化不大,呈现出动态波动的特征。

经济协调耦合度的主要因素。另外,近1/3地级市协调耦合状态发生变化,其中,忻州、吕梁、运城、渭南等11个地级市由不协调进入协调状态,而玉树、甘孜、果洛等5个自治州由协调进入不协调状态。其中,鄂尔多斯、榆林、延安、咸阳等地级市由基本协调进入中度协调状态;西安、汉中、安康等地级市由中度协调就进入高度协调;而位于青海省的海南、黄南、海东等自治州则由中度协调进入基本协调状态。

3 讨 论

传统 CASA 模型在计算水分胁迫系数时多采用基于实际观测数据的区域蒸散量模型,参数多且不确定性强,获取难度大。本研究综合运用 CASA 和 VPM 模型,在像元尺度上对研究区 2001—2018 年植被 NPP 进行了估算,实现了对研究区长时间序列、高空间分辨率的动态观测,提高了计算的准确度;得到 2001—2018 年研究区年均 NPP 最小值为 $243.71 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,最大值为 $375.51 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$,多年均值为 $288.33 \text{ g}_c/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。2001—2008 年研究区年均 NPP 总体上则呈现出波动增加的趋势。空间上呈现出南高北低;平原、盆地高,高原、山地低的分布特征;不同植被类型月平均 NPP 呈现出单峰型周期性变化特征且随时间变化的趋势和周期相同,但变化幅度和变化速率具有明显的区分度。通常来说,林地在水热条件相同的情况下积累 NPP 的能力远大于草地和农作物^[4],所以导致阔叶林和混交林月平均 NPP 值及变化幅度和变化速率远大于其他植被类型,而由于黄河流域是我国重要的农牧业生产基地,受人为灌溉、保育及物候等因素影响较大,农作物和草地面积广布,一定程度上提高了农作物和草地月平均 NPP 及变化幅度和变化速率,灌木林分布面积较小,仅在贺兰山区有零星分布,受当地水热条件限制,月平均 NPP 及变化幅度和变化速率均为各植被类型最小。但是,利用 CASA 和 VPM 模型在像元尺度估算植被 NPP 仍然不是具有完全物理意义的解决方案,需要进行后续研究。

本研究对黄河流域生态与经济发展状况进行了评价,2001—2018 年研究区年总生态价值和年总经济价值拟合后分别呈现出“U”型曲线和线性的特征,后者增长速率远超前者;空间上单位生态价值的高值区和极高值区主要集中在研究区西南部青藏高原与黄土高原边缘过渡地带、东南部的关中平原及下游各支流冲击平原区,这些地区多位于河谷、盆地和平原,水热条件充足,土层厚,土壤肥力水平高,多为优良的草地和农作物种植区,而低值区和极低值区则主要位于内蒙古高原中部、黄土高原的西北部,受地形和气候因素影响较大,深居内陆,海拔较高,海洋湿润气流难以到达,气候干燥且土层稀薄,植被覆盖率低。而经济集聚的极冷点区和冷点区主要集中在天水、甘南、定西、固原、平凉、黄南、海东、白银等山地与高原边缘过渡地区,这些地级市经济模式

单一,工业基础薄弱,人才流失严重,导致经济发展水平偏低且集聚作用弱,一定程度上阻碍了流域内经济的均衡发展,热点区和极热点区主要集中在鄂尔多斯、巴彦淖尔、呼和浩特、银川等经济集聚作用强的地级市,这些地级市位于黄河流域的“金三角”地带,大多矿产资源丰富,基础工业体系较为完备,促进了流域内经济的发展,集聚作用较强。

通过计算发现 2001—2018 年研究区生态经济耦合度(C)呈现出倒“S”型曲线的特征,生态经济整体发展水平(T)和协调耦合程度(D)则以“W”型曲线持续波动上升,2012 年前后 C 和 T、D 的变化趋势发生了反转,造成这种变化的主要原因是 2012 年之前经济发展方式粗放,大多数地区经济发展势头迅猛,但环保意识薄弱,对生态和经济关系的定位仍处于初始探索阶段^[13],2012 年以后,随着生态文明战略的实施,各地区由单纯追求经济指标的发展转变为生态经济协调发展,逐渐意识到生态保护对经济发展的保障作用,人民环保意识不断加强,进而 C、D、T 三者协调上升。空间上研究区生态经济协调耦合度呈现出“大分散,小聚集”的条带状分布特征;经济发展水平是流域生态经济协调耦合度的主要影响因素,呈现出高度的正向一致性。结合图 3 可以发现,协调区主要位于研究区中东部和四川盆地边缘,这些地区多位于平原、河谷和盆地,水热条件充足,农作物和草地广布,植被覆盖率高,生态价值较高且区位优势明显,交通便利,文化、卫生等基础设施完善,技术密集型产业和服务业作为经济发展的主要驱动力,经济发展对生态保护产生的压力相对较小。失调区则主要位于研究区西部黄土高原和青藏高原边缘,这些地区一方面虽自然资源相对丰富,但经济发展方式粗放,经济发展对生态环境产生的压力较大,另一方面,这些区域多位于生态保护区,生态环境脆弱,导致生态保护与经济发展相互抑制。而结合图 8 可以看出,研究区生态经济协调耦合度的提高主要来源于基本协调区和中度失调区生态经济协调耦合度的持续改善,说明近年来我国不断加强生态保护力度,使生态得到快速发展,生态经济的整体协调程度有了较大改善,但是长期来看,生态保护和经济发展的矛盾依然存在,注重严重失调区生态经济协调耦合发展和巩固高度协调区生态经济协调耦合发展成果是今后应该关注的重点。

总之,生态保护和经济发展之间相互作用相当复杂,两者既可能相互促进又可能相互抑制。因此,

下一步对生态保护和经济发展之间的关系及对两者之间的驱动机制进行研究可能会成为下一步深化研究的重点。

通过研究发现,研究区生态经济协调耦合失调区中超过80%属于经济滞后区域,经济发展水平是流域生态经济协调耦合度的主要影响因素。另外,目前研究区生态经济协调耦合度的提高主要来源于中度失调区和基本协调区生态经济协调耦合度的持续改善,而严重失调区生态经济协调耦合度的提高是今后应该关注的焦点。因此,结合黄河流域生态经济发展现实,为推进黄河流域生态保护和高质量发展,提出如下建议:(1)经济发展滞后区应构建基于生态环境的流域多元经济发展机制及居民生态补偿机制。一方面,因地制宜,加快推进地区新旧动能转换,优化工业产业结构,制定灵活、差异的经济发展政策,改变粗放的、单一的经济发展方式;建立健全人才培养及吸引机制,加大高端人才、前沿技术的引进能力,不断提升流域经济滞后区的自我发展能力。另一方面,建立健全基于居民生计、发展机会和政策等一系列生态补偿机制,鼓励居民主动从各个方面促进本地区生态经济协调耦合发展。(2)针对严重失调区,充分利用当地自然资源优势,提高自然资源的循环利用率,不断探索建立与当地资源环境相适应的以保护地为主体的绿色产业、绿色能源、绿色消费的发展方式,降低经济发展对生态环境的压力。(3)推动构建黄河流域生态经济协调耦合发展一体化治理监管制度体系,加快实现生态经济协调耦合发展的统一谋划,系统治理。提高研究区生态经济协同耦合发展的整体性、系统性,形成政府、社会、市场相互监督相互促进共同治理的现代化治理监管格局。

参考文献 References

- [1] 金晓斌,易理强,王慎敏,等.基于协调发展视角的区域发展差异研究——以江苏省为例[J].长江流域资源与环境,2008,17(4):511-516.JIN X B,YI L Q,WANG S M,et al.Research on regional development differences based on the perspective of coordinated development:taking Jiangsu Province as an example[J].Resources and environment in the Yangtze River Basin,2008,17(4):511-516(in Chinese with English abstract).
- [2] 于忠华,李文青,刘海滨,等.快速发展地区经济增长与资源环境协调性分析——以南京为例[J].长江流域资源与环境,2015,24(10):1698-1704.YU Z H,LI W Q,LIU H B,et al.Coordination analysis of economic growth and resources and environment in fast-developing regions:taking Nanjing as an example[J].Resources and environment in the Yangtze River Basin,2015,24(10):1698-1704(in Chinese with English abstract).
- [3] 崔林丽,杜华强,史军,等.中国东南部植被NPP的时空格局变化及其与气候的关系研究[J].地理科学,2016,36(5):787-793.CUI L L,DU H Q,SHI J,et al.The temporal and spatial pattern changes of vegetation NPP in Southeast China and its relationship with climate[J].Geographical sciences,2016,36(5):787-793(in Chinese with English abstract).
- [4] 张振东,昝梅,伊犁地区植被生产力的时空分异及其与地形因子关系研究[J].华中师范大学学报(自然科学版),2020,54(4):711-720.ZHANG Z D,ZAN M.The temporal and spatial differentiation of vegetation productivity in Yili area and its relationship with topographic factors[J].Journal of Central China Normal University (natural science edition),2020,54(4):711-720(in Chinese with English abstract).
- [5] 侯丽丽,银山,都瓦拉,等.基于CASA模型的浑善达克沙地植被NPP模拟及时空分析[J].水土保持研究,2020,27(2):165-171.HOU L L,YIN S,DU W,et al.NPP simulation and time-space analysis of Hunshandake sandy vegetation based on CASA model[J].Research on soil and water conservation,2020,27(2):165-171(in Chinese with English abstract).
- [6] 彭飞,孙才志,刘天宝,等.中国沿海地区海洋生态经济系统脆弱性与协调性时空演变[J].经济地理,2018,38(3):165-174.PENG F,SUN C Z,LIU T B,et al.Spatiotemporal evolution of vulnerability and coordination of marine ecological economic systems in coastal areas of China[J].Economic geography,2018,38(3):165-174(in Chinese with English abstract).
- [7] 王娜.我国城市化与生态环境协调性发展综合评价研究[D].长沙:湖南大学,2015.WANG N.Research on the development of comprehensive evaluation of the coordinated of Chinese urbanization and ecological environment [D].Changsha:Hunan University,2015(in Chinese with English abstract).
- [8] CHEN G,LI Q,PENG F,et al.Henan ecological security evaluation using improved 3D ecological footprint model based on energy and net primary productivity[J/OL].Sustainability,2019,11(5):1353[2020-09-19].<https://doi.org/10.3390/su11051353>.
- [9] 陈端昌,彭保发,熊建新.环洞庭湖区生态经济系统的耦合特征研究[J].地理科学,2013,33(11):1338-1346.CHEN D L,PENG B F,XIONG J X.Research on the coupling characteristics of the eco-economic system in the Dongting Lake area[J].Geographical science,2013,33(11):1338-1346(in Chinese with English abstract).
- [10] 乔旭宁,王林峰,牛海鹏,等.基于NPP数据的河南省淮河流域生态经济协调性分析[J].经济地理,2016,36(7):173-181,189.QIAO X N,WANG L F,NIU H P,et al.Eco-economic coordination analysis of the Huaihe River Basin in Henan Province based on NPP data[J].Economic geography,2016,36(7):173-181,189(in Chinese with English abstract).
- [11] 任志远,刘焱序.西北地区植被净初级生产力估算模型对比与其生态价值评价[J].中国生态农业学报,2013,21(4):494-502.

- REN Z Y, LIU Y X. Comparison of estimation models of vegetation net primary productivity in Northwest China and its ecological value evaluation[J]. Chinese journal of eco-agriculture, 2013, 21(4): 494-502(in Chinese with English abstract).
- [12] 李晶,任志远.基于 GIS 的陕北黄土高原土地生态系统固碳释氧价值评价[J].中国农业科学,2011,44(14):2943-2950.LI J, REN Z Y. Evaluation of the value of carbon fixation and oxygen release in the land ecosystem of the Loess Plateau in northern Shaanxi based on GIS[J]. Chinese agricultural sciences, 2011, 44(14): 2943-2950(in Chinese with English abstract).
- [13] 沈明,沈镭,张超,等.陕西省能源供给与经济及生态环境协调性分析[J].地域研究与开发,2015,34(1):123-126,143.SHEN M, SHEN L, ZHANG C, et al. Analysis on the coordination of energy supply, economy and ecological environment in Shaanxi Province[J]. Regional research and development, 2015, 34(1): 123-126, 143(in Chinese with English abstract)
- [14] ARIKEN M, ZHANG F, LIU K, et al. Coupling coordination analysis of urbanization and eco-environment in Yanqi Basin based on multi-source remote sensing data[J/OL]. Ecological Indicators, 2020, 114: 106331 [2020-09-19]. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.106331>.
- [15] 高静,于建平,武彤,等.我国农业生态经济系统耦合协调发展研究[J].中国农业资源与区划,2020,41(1):1-7.GAO J, YU J P, WU T, et al. Study on the coupling and coordination development of my country's agricultural eco-economic system[J]. China agricultural resources and regional planning, 2020, 41 (1): 1-7(in Chinese with English abstract).
- [16] 韩瑞玲,佟连军,朱绍华,等.基于 ARMA 模型的沈阳经济区经济与环境协调发展研究[J].地理科学,2014,34(1):32-39.HAN R L, TONG L J, ZHU S H, et al. Study on the coordinated development of economy and environment in Shenyang Economic Zone based on ARMA model[J]. Geographical sciences, 2014, 34(1): 32-39(in Chinese with English abstract).
- [17] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(6):1100-1114.WANG C, TANG N. The spatio-temporal characteristics and pattern evolution of the coupling and coordination of spatial functions of the rural three-generation system in Chongqing[J]. Geographical research, 2018, 37(6): 1100-1114(in Chinese with English abstract).
- [18] 张丹丹.基于多源数据的黄河流域植被 NPP 时空变化及其影响因子分析[D].郑州:郑州大学,2019.ZHANG D D. Analysis of spatiotemporal changes of vegetation NPP in the Yellow River Basin and its influencing factors based on multi-source data [D]. Zhengzhou: Zhengzhou University, 2019(in Chinese with English abstract).
- [19] 李传华,曹红娟,范也平,等.基于校正的 CASA 模型 NPP 遥感估算及分析——以河西走廊为例[J].生态学报,2019,39(5): 1616-1626.LI C H, CAO H J, FAN Y P, et al. NPP remote sensing estimation and analysis based on the corrected CASA model:taking the Hexi Corridor as an example[J]. Acta ecologica sinica, 2019, 39(5): 1616-1626(in Chinese with English abstract)
- [20] 沈贝贝.基于 CASA 模型的呼伦贝尔草原 NPP 模拟与分析[D].北京:中国农业科学院,2019.SHEN B B. Simulation and analysis of Hulunbuir grassland NPP based on CASA model [D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2019 (in Chinese with English abstract).
- [21] 郎宇.基于 CASA 模型的江西省赣江流域植被 NPP 估算研究[D].西安:长安大学,2013.LANG Y. Estimation of NPP of Ganjiang River Basin vegetation based on CASA model[D]. Xi'an: Chang'an University, 2013 (in Chinese with English abstract).
- [22] 刘剑锋,陈琳,孟琪,等.基于 CASA-VPM 模型的植被最大光能利用率研究[J].河南农业科学,2019,48(12):157-163.LIU J F, CHEN L, MENG Q, et al. Study on the maximum light energy utilization rate of vegetation based on CASA-VPM model [J]. Henan agricultural science, 2019, 48(12): 157-163(in Chinese with English abstract).
- [23] 赵芬.基于 CASA 模型的锡林郭勒盟草地净初级生产力遥感估算与验证[D].北京:中国农业科学院,2015.ZHAO F. Remote sensing estimation and verification of grassland net primary productivity in Xilin Gol League based on CASA model[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Sciences, 2015 (in Chinese with English abstract).
- [24] 刘洁,孟宝平,葛静,等.基于 CASA 模型和 MODIS 数据的甘南草地 NPP 时空动态变化研究[J].草业学报,2019,28(6):19-32.LIU J, MENG B P, GE J, et al. Research on the temporal and spatial dynamics of Gannan grassland NPP based on CASA model and MODIS data[J]. Acta prataculturae sinica, 2019, 28 (6): 19-32(in Chinese with English abstract).
- [25] 陈福军,沈彦俊,李倩,等.中国陆地生态系统近 30 年 NPP 时空变化研究[J].地理科学,2011,31(11):1409-1414.CHEN F J, SHEN Y J, LI Q, et al. Research on the spatiotemporal changes of NPP in China's terrestrial ecosystems in the past 30 years [J]. Geographical sciences, 2011, 31(11): 1409-1414(in Chinese with English abstract).
- [26] 陆逸.基于 MODIS 数据的三峡库区净初级生产力遥感估算研究[D].武汉:华中农业大学,2011.LU Y. Research on remote sensing estimation of net primary productivity in the Three Gorges Reservoir Area based on MODIS data[D]. Wuhan: Huazhong Agricultural University, 2011(in Chinese with English abstract).
- [27] XIAO X M, ZHANG Q Y, SCOTT S, et al. Satellite-based modeling of gross primary production in a seasonally moist tropical evergreen forest[J]. Remote sensing of environment, 2005, 94 (1): 105-222.
- [28] XIAO X, BOLES S, FROLKING S, et al. Observation of flooding and rice transplanting of paddy rice fields at the site to landscape scales in China using VEGETATION sensor data [J]. International journal of remote sensing, 2002, 23 (15): 3009-3022.

- [29] BAO G, BAO Y H, QIN Z H, et al. Modeling net primary productivity of terrestrial ecosystems in the semi-arid climate of the Mongolian Plateau using LSWI-based CASA ecosystem model[J]. International journal of applied earth observation and geoinformation, 2016, 46: 84-93.
- [30] 朱文泉,潘耀忠,何浩,等.中国典型植被最大光利用率模拟[J].科学通报,2006(6):700-706.ZHU W Q, PAN Y Z, HE H, et al. Simulation of maximum light utilization efficiency of typical Chinese vegetation[J]. Science bulletin, 2006 (6): 700-706 (in Chinese).
- [31] 高原.基于遥感的新疆NPP时空变化特征及其影响因素分析[D].兰州:西北师范大学,2015.GAO Y. Analysis of the spatio-temporal characteristics and influencing factors of Xinjiang NPP based on remote sensing[D]. Lanzhou: Northwest Normal University, 2015(in Chinese with English abstract).
- [32] 王成,唐宁.重庆市乡村三生空间功能耦合协调的时空特征与格局演化[J].地理研究,2018,37(6):1100-1114.WANG C, TANG N. The spatiotemporal characteristics and pattern evolution of the coupling and coordination of spatial functions of rural three-generations in Chongqing [J]. Geographical research, 2018, 37 (6): 1100-1114 (in Chinese with English abstract).
- [33] 宋冬梅,冯文强,刘春晓,等.城市生态经济协调性评价的权重研究——以山东半岛蓝色经济区示范区城市为例[J].贵州师范大学学报(自然科学版),2015,33(4):1-8.SONG D M, FENG W Q, LIU C X, et al. Research on the weights of urban eco-economic coordination evaluation: taking Shandong Peninsula Blue Economic Zone as an example[J]. Journal of Guizhou Normal University (natural science edition), 2015, 33(4): 1-8 (in Chinese with English abstract).

Spatial-temporal differentiation and eco-economic coordination of vegetation NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2018

ZHANG Zhendong, CHANG Jun

College of Geography and Environment, Shandong Normal University, Ji'nan 250358, China

Abstract The spatial-temporal differentiation of the vegetation NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2018 was analyzed with CASA-VPM model and ecological economic coordination coupling degree model based on NDVI, LSWI, land use data, meteorological data and statistical data. The current ecological and economic development status is discussed. The degree of ecological-economic coordination and coupling is evaluated. The results showed that the annual average vegetation NPP in the Yellow River Basin from 2001 to 2018 was 288.33 g_c/(m² · a). The fluctuations are continued to increase. The spatial distribution characteristics of the NPP are high in the south and low in the north, high in the plains and basins, and low in the plateaus and mountains. The monthly average NPP change of different vegetation types has the characteristics of periodic single-peak changes. The trends and cycles of different vegetation types over time are the same, but the amplitude and rate of change has obvious distinction. The total annual ecological value of the area studied after the economic value is fitted with “U”-shaped and linear change characteristics, with the growth rate of latter much higher than that of the former. The cold spots are mainly distributed in the transitional area between the northwestern mountain and the plateau edge. The hot spots are mainly located in the Yellow River, the “Golden Triangle” area of the river basin. The ecological and economic coordination coupling degree of the area studied presents a strip-like spatial distribution characteristic of “large dispersion, small aggregation” and rising with a “W” curve. The level of economic development is the dominant factor for the ecological and economic coordination coupling degree of the river basin.

Keywords Yellow River Basin; ecological-economic; ecoenvironment; coordinated development; green industry; green energy; green consumption; coordination coupling degree model; net primary productivity (NPP)

(责任编辑:张志钰)