

基于 CASA 模型探究泾河流域植被 NPP 时空动态及其对气候变化的响应

王丽霞¹, 丁慧兰¹, 刘招², 张双成¹, 孔金玲¹

(1.长安大学 地质工程与测绘学院, 西安 710054; 2.长安大学 水利与环境学院, 西安 710054)

摘要:植被 NPP 是判定生态系统碳源/碳汇及调节生态过程的主要因子,基于 CASA 模型估算 NPP,探究时空尺度 NPP 的变化及其对气候变化的响应状况,可了解泾河流域植被恢复状况并为流域生态环境改善提供科学参考及建议。以泾河流域为研究区域,基于 2000 年、2009 年、2018 年 MODIS NDVI 数据、气象数据与植被分布数据等,运用 CASA 模型(Carnegie-Ames-Stanford approach,CASA)对 2000 年、2009 年及 2018 年流域 NPP 进行了估算,探究流域内 NPP 时空动态及其对气候变化的响应,并分析了各植被类型下 NPP 分布规律。结果表明:(1) 时间尺度上,2000 年、2009 年及 2018 年泾河流域 NPP 均值分别为 $521.81 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $664.77 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, $719.78 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 年际变化呈增长趋势;月际变化曲线呈单峰型,4—8 月呈较强上升趋势,8 月后逐渐下降;各季节的 NPP 均值由高到低依次为夏季>秋季>春季>冬季。(2) 空间尺度上,NPP 分布存在一定的地域差异性,水平方向呈“南高北低”的特点;垂直方向上,NPP 值随海拔高度的升高呈先下降后上升的趋势。(3) 不同植被类型下 NPP 均值存在明显差异,其中常绿阔叶林年均 NPP 值最高,为 $1544.50 \text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$ 。(4) 气候变化背景下,NPP 主要受气温与降水的影响,且降水为主导因素。研究结果表明泾河流域 NPP 呈增加趋势,即植被覆盖情况在逐步改善;流域北部植被覆盖状况仍有待改善,建议加大退耕还林政策实施力度,加大果树、茶树等防护型林地的种植;且该流域 NPP 对降水的响应强于气温,故可加大植树造林恢复植被的力度,也可修建水库和水利工程,退田还湖,并加大湿地保护,从而保证空气湿度,增加降水,改善植被覆盖,实现人与自然和谐共生。

关键词:CASA 模型; NPP 模拟; 时空动态; 气候变化; 泾河流域

中图分类号:Q948; TP79

文献标识码:A

文章编号:1005-3409(2022)01-0190-07

Spatiotemporal Change of NPP Based on CASA Model and Its Response to Climate Change in Jing River Basin

WANG Lixia¹, DING Huilan¹, LIU Zhao², ZHANG Shuangcheng¹, KONG Jinling¹

(1.School of Geological Engineering and Surveying and Mapping, Chang 'an University, Xi 'an 710054,
China; 2.School of Water and Environment, Chang 'an University, Xi 'an 710054, China)

Abstract:NPP is the main factor to judge the carbon source/sink of ecosystem and regulate the ecological process. Therefore, we estimated NPP based on CASA model, and explored the change of NPP in temporal and spatial scale and its response to climate change, which can present the vegetation restoration status of Jinghe River Basin, and provide scientific reference and suggestions for the improvement of ecological environment of this basin. Based on MODIS NDVI data in 2000, 2009, 2018, meteorological data and vegetation distribution data, etc., we used Carnegie-Ames-Stanford approach (CASA) model to estimate NPP of the basin vegetation in 2000, 2009 and 2018, explored the NPP in the basin and its response to climate change, and analyzed the distribution rule of NPP under various vegetation types. The results showed that: (1) on the time scale, the mean values of NPP in the Jing River Basin in 2000, 2009 and 2018 were 521.81, 664.77 and 719.78 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, respectively, showing an increasing trend in the inter-annual variation; the

收稿日期:2020-12-18

修回日期:2021-01-15

资助项目:国家自然科学基金项目(41471452);中央高校基本科研业务资助项目(300102269201,300102299206);陕西省重点研发项目(2020ZDLSF06-07)

第一作者:王丽霞(1979—),女,山西大同人,博士,副教授,主要从事环境遥感与 GIS 研究。E-mail:zylxwang@chd.edu.cn

intermonthly change curve showed a single peak type, showing the strong upward trend from April to August, and gradually decreased after August; the mean value of NPP in each season decreased in the order: summer > autumn > spring > winter; (2) on the spatial scale, there was certain spatial differences in the distribution of NPP; the horizontal direction showed the characteristics of high in the south and low in the north; in the vertical direction, the value of NPP decreased first and then increased with the increase of altitude; (3) the mean values of NPP of different vegetation types were significantly different, among which the average annual value of NPP [$1\,544\text{ gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$] of evergreen broad-leaved forest landscape was higher than those of the others; (4) under the background of climate change, NPP was mainly affected by temperature and precipitation, and precipitation was the dominant factor. These results show that the NPP in Jinghe River Basin is increasing, that is, the vegetation coverage is gradually improving; the vegetation coverage in the north of the basin still needs to be improved. It is suggested to strengthen the implementation of the policy of returning farmland to forest and increase the planting of protective forest lands such as fruit trees and tea trees; moreover, the response of NPP in the basin to precipitation is stronger than that of temperature, therefore, increasing the intensity of afforestation and vegetation restoration, building reservoirs and water conservancy projects, returning farmland to lake, and enhancing wetland protection were suggested, so as to ensure air humidity, increase precipitation, improve vegetation coverage, and realize the harmonious coexistence between human and nature.

Keywords: CASA Model; NPP simulation; time-space dynamics; climate change; Jing River Basin

植被净初级生产力(Net Primary Productivity, NPP)是绿色植物在单位面积、单位时间内所固定的有机物含量,表现为光合作用固定的有机碳中扣除植物本身呼吸消耗的部分,这一部分用于植被生长生殖,也称为第一性生产力^[1]。NPP 作为地表碳循环的重要组成部分,在全球气候变化及碳平衡中起重要作用^[2],它不仅能直接反映植被群落在自然环境下的生产能力,而且是判定生态系统碳源/碳汇及调节生态过程的主要因子^[3]。目前,NPP 已广泛应用于区域生态规划、环境监测、水土侵蚀评估、生态效益评估等多方面^[4]。另外,植被生产力除受植被本身特性及土壤特性的限制外,气候因子对植被的生产力大小也具有不可忽视的影响作用。因此,探究 NPP 的时空格局变化及其对气候变化的响应对于揭示流域生态环境演化规律,维系区域生态安全具有重要意义^[5]。

传统的 NPP 估算方法(如实地测算法)难以实现较大时空尺度的 NPP 观测目的,故将遥感技术引入至 NPP 计算模型中以简化计算流程。在众多模型中,CASA 模型因其参数少且易实现而成为最常用且非常有效的研究手段。我国学者利用 CASA 模型分别从不同的时空区域尺度上开展了相关研究,有对中国陆地生态系统进行的大尺度模拟^[6],也有对宁夏、甘肃、陕西、内蒙古等省进行的中小尺度的 NPP 估算及分析^[7-10]。但以流域作为完整生态系统的研究稍有见闻。

泾河流域地处黄土高原,水土流失、土地沙化、河

道萎缩、水质下降等一系列生态环境问题频发,是我国典型的生态环境脆弱区。2017 年,习近平总书记在十九大报告中指出,坚持人与自然和谐共生,践行“绿水青山就是金山银山”的理念,故探究泾河流域植被变化状况对流域生态环境的改善及保护环境基本国策的贯彻落实有重要意义^[11]。

综上,目前 NPP 相关研究已取得一定成果,但就气候变化背景下的流域尺度 NPP 响应规律的研究仍有待深入。故本文基于 CASA 模型估算了 2000 年、2009 年及 2018 年泾河流域 NPP,探究 NPP 时空尺度的特征变化及其对气候变化的响应,以期为泾河流域植被恢复及流域生态环境的改善提供科学参考。

1 研究区概况及数据处理

1.1 研究区概况

泾河流域($34^{\circ}46'—37^{\circ}19' \text{ N}$, $106^{\circ}14'—108^{\circ}42' \text{ E}$)地处黄土高原中部(图 1),流域面积 $45\,421\text{ km}^2$ ^[12]。泾河全长约 455.1 km,发源于宁夏六盘山,流经陕甘宁,是渭河的第一大支流,黄河的二级支流。流域北接贺兰山,南依秦岭山脉,西临六盘山脉,东抵子午岭山系,周围一圈山脉形成泾河集水区域的天然分水岭^[13]。流域地势西北高东南低,总体呈东西北三面向东南倾斜的特点。流域属半干旱半湿润典型区,平均气温 8°C ,年降水量 $350\sim 650\text{ mm}$ 。泾河流域水土流失较为严重,尤其在黄土高原及黄土丘陵

沟壑区。流域地表植被稀疏,干草地、耕地为流域内主要地表覆盖类型,且流域北部处于严重退化状态的草地占比达 80% 以上,林地面积仅占流域面积的 8% 左右^[13]。

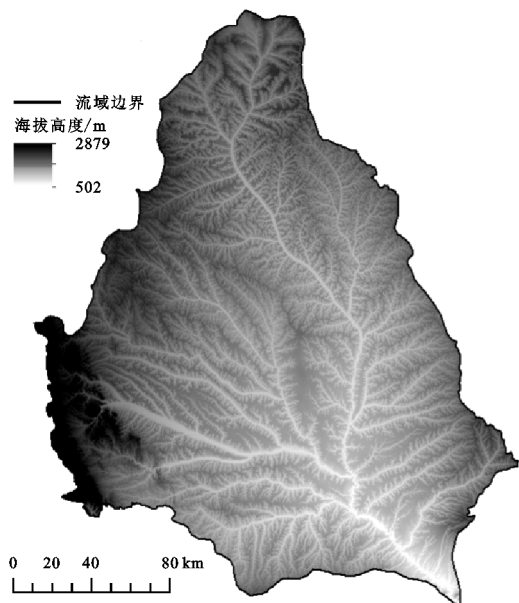


图 1 泾河流域地形图

1.2 数据来源及处理

(1) NDVI 数据。本文 NDVI 数据选用 2000 年、2009 年及 2018 年 NASA 官网(<https://landsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)的 MOD13Q1 数据产品,利用 MRT 软件对影像进行拼接、投影转化及格式转化等预处理,将其转换至 TIFF 格式,并用最大值合成法将每月的两期 NDVI 数据合成为月 NDVI 数据。

(2) 气象数据。气象数据下载自中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),渭河流域及其周边共选取气象站点 33 个。在 Excel 中对这 33 个站点的数据进行处理,获得站点的月均气温和月降水量。利用克里金法进行插值,并使其空间分辨率与 NDVI 数据一致。利用泾河流域边界对其进行裁剪,获得泾河流域气象数据。

(3) 辐射数据。由于泾河流域乃至整个渭河流域辐射站点较少,插值精度较低,故利用太阳辐射计算公式由气象站点的日照数据求得渭河流域的太阳总辐射数据^[14]。利用克里金法对辐射数据进行插值,获取与 NDVI 数据投影相同的栅格影像。并利用泾河流域边界对其进行裁剪,获得泾河流域辐射数据。

(4) DEM 数据。DEM 数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn>),其空间分辨率为 30 m。在 ArcGIS 中对所获取数据进行拼接、裁剪,获得覆盖泾河流域的 DEM 数据,将其重采样至 250 m 分辨率使其与 NDVI 数据空间分辨率一致。

以上数据均采用统一坐标系为 WGS_1984_UTM_Zone_49N,空间分辨率为 250 m。

2 研究方法

2.1 CASA 模型

在 CASA 模型中 NPP 主要由植被所吸收的光合有效辐射(APAR)和光能利用率(ϵ)两个变量来确定,模型表达如下:

$$NPP(x, t) = APAR(x, t) \times \epsilon(x, t) \quad (1)$$

式中:APAR(x, t)表示像元 x 在 t 月吸收的光合有效辐射(MJ/m^2)^[15]; $\epsilon(x, t)$ 表示像元 x 在 t 月的实际光能利用率(gC/MJ)^[16]。

(1) 光合有效辐射 APAR。APAR(Absorbed Photosynthetically Active Radiation, APAR)是指植物进行光合作用时,叶冠层可吸收利用的,对光合作用有意义的太阳辐射能,光合作用将其固定为植物有机质^[17]。植被吸收的光合有效辐射由太阳辐射及植被本身的生态特征共同决定^[18]。计算公式如下:

$$APAR(x, t) = SOL(x, t) \times FPAR(x, t) \times 0.5 \quad (2)$$

式中: $SOL(x, t)$ 为像元 x 在 t 月的太阳总辐射(MJ/m^2), SOL (Solar Radiation Energy, SOL)为太阳辐射能,是植物光合作用的能量来源^[17]; FPAR(Fraction of Absorbed Photosynthetically Active Radiation, FPAR)为植被层对入射光合有效辐射的吸收比例,该比例取决于植被类型及植被覆盖情况^[19]; 0.5 为植被所能利用的太阳有效辐射(波长为 $0.38 \sim 0.78 \mu\text{m}$)占太阳总辐射的比例^[20]。

已有研究表明 FPAR 与归一化植被指数 NDVI 及比值植被指数 SR 均有良好的线性关系^[21],故将两者结合起来,得到优化后的 FPAR 的估算公式:

$$FPAR(x, t) = \min \left[\frac{SR(x, t) - SR_{\min}}{SR_{\max} - SR_{\min}}, 0.95 \right] \quad (3)$$

式中: SR_{\min} 取值为 1.05; SR_{\max} 取值大小与植被类型有关,取值大小介于 $4.46 \sim 6.91$ 。 $SR(x, t)$ 由 NDVI(x, t)求得:

$$SR(x, t) = \frac{1 + NDVI(x, t)}{1 - NDVI(x, t)} \quad (4)$$

(2) 光能利用率 ϵ 的确定。光能利用率 ϵ (Utility rate of luminous energy, ϵ)是植被将光合作用所吸收的光合有效辐射转化为有机质的效率^[22],由植被自身的属性决定^[23, 32]。光能利用率在不同类型植被下有很大的差异。计算公式如下:

$$\epsilon(x, t) = f_1(x, t) \times f_2(x, t) \times W_{\epsilon}(x, t) \times \epsilon_{\max} \quad (5)$$

式中: f_1 和 f_2 分别表示低温和高温对光能利用率的胁迫作用(无单位)^[24]; W_e 为水分胁迫影响系数, 反映水分条件的影响^[24]; ϵ_{\max} 是理想条件下的最大光能利用率(gC/MJ)^[25]。 f_1 , f_2 以及 W_e 的值根据朱文泉等学者的研究获得; ϵ_{\max} 的取值从朱文泉等学者的中国典型植被最大光能利用率模拟结果中获得^[24]。在模型应用时, 采用朱文泉等学者改进后的 CASA 模型针对我国植被分布生产特征对植被类型相关的参数进行了适宜性调整, 从数据获取层提升了模型运用的区域适宜度。

2.2 相关性分析

相关分析是分析变量间联系程度的方法。本文基于像元尺度对 NPP 与主要气候因子(降水和气温)进行相关分析, 进而利用相关系数探究 NPP 对气候变化的响应^[26]。相关系数的计算公式为:

$$R_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2 \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (6)$$

式中: R_{xy} 为相关系数; x_i 与 y_i 分别代表变量 x 与 y 在第 i 个时期的值; \bar{x} 和 \bar{y} 代表变量 x 与 y 的平均值; n 为样本容量; 相关系数的取值范围为 $-1 \sim 1$, 正值代表变量间呈正相关, 负值代表变量间呈负相关, 相关系数的绝对值越大, 变量间相关性越强^[27]。

查找并对照相关系数表, 对所得相关系数进行 F 检验。取显著性水平为 $\alpha=0.05$ 和 $\alpha=0.01$, 得 $f_{\alpha}(n-2)=f_{0.05}(1)=0.88$, $f_{\alpha}(n-2)=f_{0.01}(1)=0.96$, 依照相关系数的显著性将相关程度分 6 个等级: 显著负相关($R < -0.96$)、中度负相关($-0.96 \leq R < -0.88$)、轻度负相关($-0.88 \leq R < 0$)、轻度正相关($0 < R \leq 0.88$)、中度正相关($0.88 < R \leq 0.96$)、显著正相关($R > 0.96$)^[27]。

2) $=f_{0.05}(1)=0.88$, $f_{\alpha}(n-2)=f_{0.01}(1)=0.96$, 依照相关系数的显著性将相关程度分 6 个等级: 显著负相关($R < -0.96$)、中度负相关($-0.96 \leq R < -0.88$)、轻度负相关($-0.88 \leq R < 0$)、轻度正相关($0 < R \leq 0.88$)、中度正相关($0.88 < R \leq 0.96$)、显著正相关($R > 0.96$)^[27]。

3 结果与分析

基于中国植被及环境特征等影响因素, 调整 CASA 模型参数, 获得更符合研究区特征的 NPP 估算结果, 基于像元尺度分析其时空分布特征, 并探究 NPP 对气候变化的响应特征, 以为未来流域植被恢复及改善流域生态环境提供参考。

3.1 泾河流域植被 NPP 年际、月际变化特征

图 2, 图 3 表明泾河流域 NPP 在年际间呈稳定增长趋势, 2000 年、2009 年及 2018 年泾河流域 NPP 均值分别为 521.81, 664.77, 719.78 $\text{gC}/(\text{m}^2 \cdot \text{a})$, 即该流域植被覆盖情况在逐渐好转。究其原因, 一方面与自然因素有关, 在 2000—2018 年泾河流域降水呈增加趋势, 降水增多在一定程度上补充了水资源供给, 促进植物生长, 使 NPP 升高; 另一方面与人类活动也有密切关系, 特别是生态保护政策的实施使得植被覆盖度增加。其中, 2009—2018 年的增速较 2000—2009 年的增速略缓。增速趋缓的主要原因可能为生态保护政策实施后期, 侧重对已有植被的维护与管理, 即在保证木材蓄积量的基础上, 对树种进行养护, 这使得增速减缓, 植被覆盖度不再明显增加。

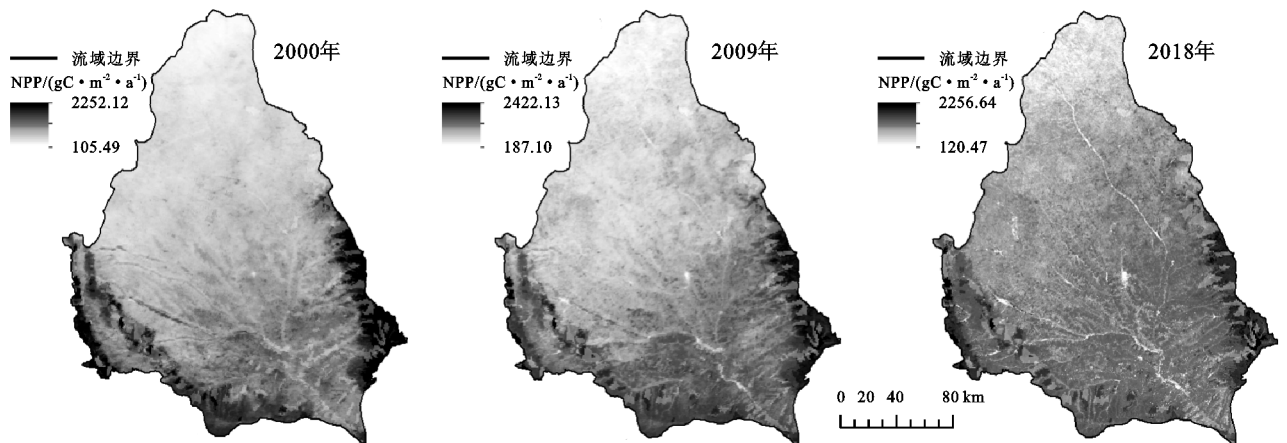


图 2 2000 年、2009 年、2018 年泾河流域 NPP 估算结果

泾河流域月均 NPP 年内变化曲线呈单峰型周期波动^[28], 见图 3。在 4—8 月间呈较强上升趋势; 8 月后呈降低趋势。该趋势与植被的一般生长规律相符: 4 月份植被开始进入生长季, NPP 开始缓慢上升^[29]; 5 月份随着降水增多及气温回暖, 植被生长速度加快, NPP 迅速上升; 8 月份植被处于生长旺盛阶段, NPP 达到最大值^[30]; 9 月份后, 气温和降水均有减少, NPP 不断下降^[31]。

统计泾河流域各季节 NPP 的年际变化情况, 见图 4。可以看出, 各季节间 NPP 差异较大, 其中夏季值最高, 其次是秋、春、冬三季。该变化规律与植被生长规律相符合。

3.2 植被 NPP 空间分布特征

3.2.1 植被 NPP 水平方向分布特征 由图 5 可以看出, 流域内 NPP 的分布表现为南高北低。主要是因

为南部多为山区,其中六盘山东坡、子午岭西坡等地的 NPP 最高。北部多为黄土丘陵以及耕地,植被稀疏,泾河上游以及北岸支流流经黄土高原,夹带大量泥沙;且人类活动造成的植被破坏、水土流失等问题严重。因此需加强植被保护,将土地整治与造林种草措施相结合,根据区域特征选择合适树种。合理搭配树种及草种,建设综合性保水保土的防护体系,从而提高泾河流域植被覆盖度。

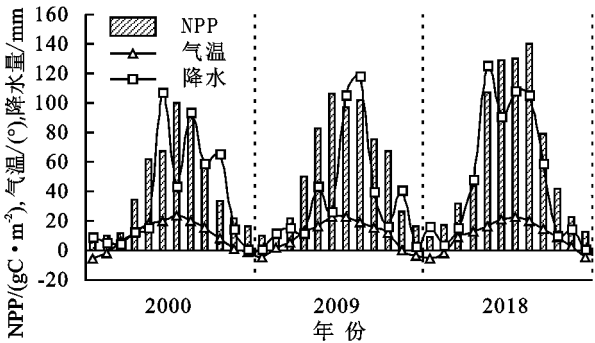


图 3 泾河流域月均 NPP、气温、降水变化趋势

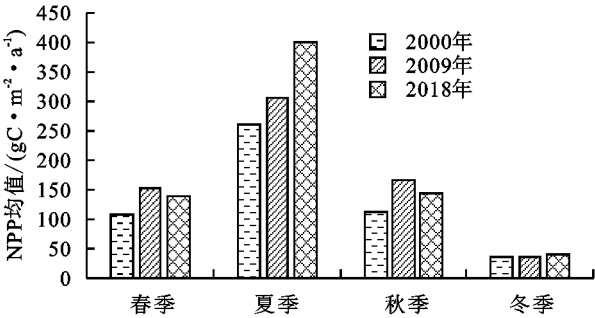


图 4 泾河流域各季节植被 NPP 年际变化趋势

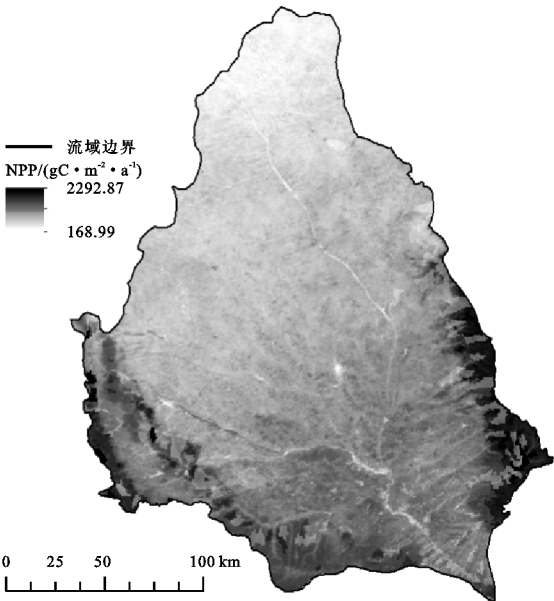


图 5 泾河流域 NPP 年均值空间分布

3.2.2 植被 NPP 垂直方向分布特征 泾河流域海拔高度介于 502~2 879 m,利用分区统计工具统计各区段 NPP 均值。由图 6 看出,海拔小于 1 000 m

的丘陵及低山地区像元占比约为 2.27%,对应的 NPP 值介于 304.44~1 164.95 gC/(m²·a)间;随着海拔升高,高度位于 1 100~1 700 m 时,NPP 值呈逐步降低趋势,该阶段主要地形为中山,像元占比为 87.14%,对应 NPP 值介于 168.99~2 292.87 gC/(m²·a)间;在海拔 1 600~1 700 m 间 NPP 均值曲线出现第一个波谷,该区段的 NPP 均值为 480.10 gC/(m²·a);随着海拔持续升高,NPP 均值恢复增加趋势;在 2 800~2 900 m 海拔 NPP 出现最高均值,为 1 272.99 gC/(m²·a)。

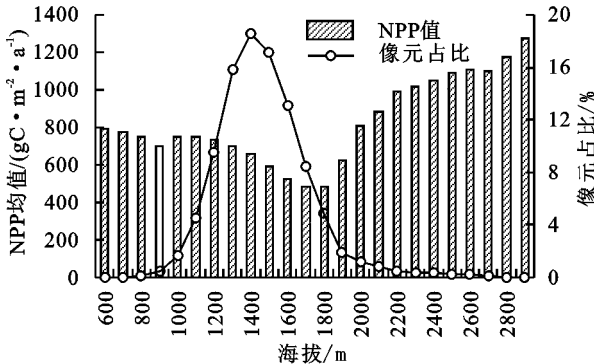


图 6 泾河流域 NPP 垂直方向变化趋势

低海拔平原区干旱少雨,降水量少量增加即可使 NPP 增加,而气温升高会加速土壤中水分的流失,使植被生长受到限制,故 NPP 降低^[35];而海拔较高的山区,受地形作用影响,降水多,气温相对较低,气温升高加剧高山冰川消融,一定程度上补充了山区的水资源供给,促进植物生长,使 NPP 增加^[36]。

3.3 植被 NPP 对气候因子的响应

气候变化背景下 NPP 主要受降水与气温影响,故本文选取了降水和气温两个重要的气候因子,通过分析相关性探究气候变化背景下 NPP 的响应特征^[33]。

由图 7 可知,NPP 与降水表现出较强的正相关,正相关的区域像元占比为 76.86%,主要分布在流域北部; NPP 与气温亦表现为正相关,正相关的区域像元占比为 65.33%,主要分布在泾河流域西南的城市聚集区域。

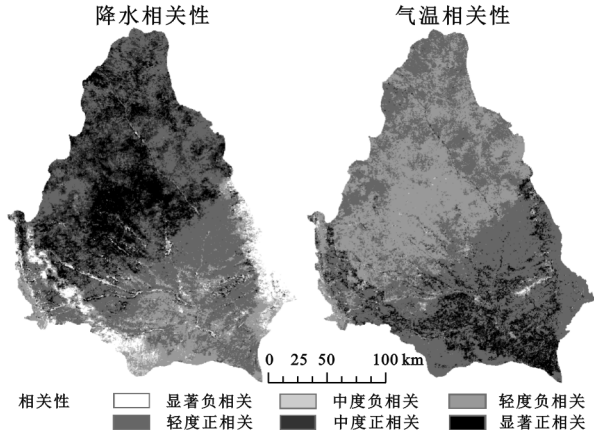


图 7 植被 NPP 与降水、气温的空间相关性

综上,NPP 对降水、气温的响应有明显空间差异^[34]。降水相关性与气温相关性在区域上互补,即降水(气温)相关性较强的区域,气温(降水)的相关性较弱。且 NPP 与降水的相关系数绝对值大于与气温相关系数绝对值的像元占比为 72.24%。故可推断出该流域 NPP 与降水的响应程度强于与气温的响应程度^[34]。

3.4 不同植被类型 NPP 的分布特征

图 8 表明泾河流域不同植被类型下 NPP 均值存在明显差异。流域内植被可分为:落叶针叶林、常绿针叶林、常绿阔叶林、落叶阔叶林、灌丛、疏林、平原草地、荒漠草地、草甸以及耕地十类^[24]。各植被类型下 NPP 均值按大小可排序为:常绿阔叶林>落叶阔叶林>疏林>落叶针叶林>草甸>灌丛>常绿针叶林>耕地>平原草地>荒漠草地。其中,常绿阔叶林对应 NPP 均值为 1 544.50 gC/(m²·a),落叶阔叶林对应 NPP 均值为 1 044.95 gC/(m²·a),疏林对应 NPP 均值为 906.96 gC/(m²·a);其他各类型植被占比均较小。该差异是由不同植被类型对水分的要求以及植被的生理生态特征不同造成的^[30]。如阔叶植被叶片气孔多分布于叶片下表皮,可减弱阳光照射所产生的蒸腾作用,防止植被水分损失过快。

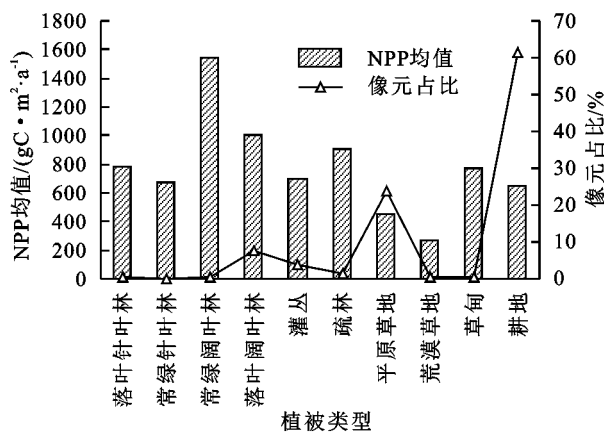


图 8 不同植被类型 NPP 分布特征

各植被类型像元占比的大小排序为:耕地>平原草地>落叶阔叶林>灌丛>疏林>草甸>落叶针叶林>常绿阔叶林>荒漠草地>常绿针叶林。即耕地、平原草地面积占比大,但对应 NPP 值却并不高;而面积占比低的阔叶林、针叶林等林地对 NPP 贡献极高。故对泾河流域而言,应加大退耕还林政策的实施力度,在面积占比最大的耕地、平原草地上选择合适的树种进行生态恢复,且泾河流域坡度主要介于 1°~35°间,鉴于该坡度分布特征,建议该流域加大果树、茶树、药材等为主的防护型林地种植。

4 结论

(1) 泾河流域 NPP 在年际变化上总体呈现增加趋势,其中,2009—2018 年的增速较 2000—2009 年的增速低;月际及各季节变化趋势与植被一般生长规律一致。

(2) 泾河流域 NPP 空间差异明显。水平方向上表现为:流域南部、西南部、东南部 NPP 较北部更高;垂直方向上,随海拔升高 NPP 呈先降后增趋势,且海拔高度介于 2 800~2 900 m 时 NPP 均值最高。

(3) 选取气温与降水两个气候因子并探究 NPP 与其响应关系。结果表明:气温及降水对 NPP 分布均有影响,但就泾河流域而言,降水为主控因素,即 NPP 对降水的响应程度强于对气温的响应程度。

(4) 此外,由于不同类型植被对水分的要求不同等因素使得泾河流域各植被类型对应 NPP 均值存在明显差异,其中常绿阔叶林及落叶阔叶林的 NPP 值较高。

参考文献:

- [1] 霍艾迪.基于 MODIS 数据的沙漠化遥感监测技术研究[D].陕西杨凌:西北农林科技大学,2008.
- [2] Cooper J P. Photosynthesis and productivity in different environments[M]. UK Cambridge:Cambridge University Press, 1975.
- [3] 彭思茂.西藏植被净初级生产力遥感估算及其对气候变化的响应[D].武汉:武汉大学,2015.
- [4] 张熙庭.中国温带地区草地植被动态时空特征及其对气候变化的响应[D].北京:中国农业大学,2018.
- [5] 刘洋洋,王倩,杨悦,等.黄土高原草地净初级生产力时空动态及其影响因素[J].应用生态学报,2019,30(7):2309-2319.
- [6] 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.
- [7] 朱玉果,杜灵通,谢应忠,等.2000—2015 年宁夏草地净初级生产力时空特征及其气候响应[J].生态学报,2019,39(2):518-529.
- [8] 张美玲.基于草原综合顺序分类系统改进 CASA 模型及其在中国草地 NPP 估算中的应用[D].兰州:甘肃农业大学,2012.
- [9] 张艳芳,朱妮.基于 CASA 模型的榆林碳源/汇平衡与生态盈余研究[J].中国农业科学,2013,46(24):5163-5172.
- [10] 包刚,辛晓平,包玉海,等.内蒙古草原植被最大光能利用率取值优化研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(10):3280-3286.
- [11] 王丽霞,余东洋,刘招,等.渭河流域 NDVI 与气候因子时空变化及相关性研究[J].水土保持研究,2019,26(2):249-254.
- [12] 齐清,王天明,寇晓军,等.泾河流域植被覆盖时空演变

- 及其与降水的关系[J].植物生态学报,2009,33(2):246-253.
- [13] 李娟,高建恩,张元星,邵辉.泾河流域梯田措施对河道径流影响的模拟研究[C]//2014年海峡两岸水土保持学术研讨会论文集.中国水土保持学会、台湾中华水土保持学会:中国水土保持学会,2014:11.
- [14] 刘玉安,黄波,易成功,等.基于地形校正的植被净初级生产力遥感模拟及分析[J].农业工程学报,2013,29(13):130-141.
- [15] 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.
- [16] 戚鹏程.基于GIS的陇西黄土高原落叶阔叶林潜在分布及潜在净初级生产力的模拟研究[D].兰州:兰州大学,2009.
- [17] 俞静芳.基于CASA模型的浙江省植被净初级生产力估算[D].杭州:浙江农林大学,2012.
- [18] 杜红.基于CASA模型的呼伦贝尔地区NPP估算研究[D].石家庄:河北师范大学,2010.
- [19] 张海龙.近五年来中国陆地植被净第一性生产力时空变化特征分析[D].南京:南京师范大学,2006.
- [20] 尹锴,田亦陈,袁超,等.基于CASA模型的北京植被NPP时空格局及其因子解释[J].国土资源遥感,2015,27(1):133-139.
- [21] Blanco L J, Paruelo J M, Oesterheld M, et al. Spatial and temporal patterns of herbaceous primary production in semi-arid shrublands: a remote sensing approach[J]. Journal of Vegetation Science, 2016,27(4):716-727.
- [22] Monteith J L. Climate and the efficiency of crop production in Britain[J]. Philosophical Transactions of the Royal Society of London. B, Biological Sciences, 1977, 281(980):277-294.
- [23] 赵永华,王晓峰.泾河源头区农林景观变化研究[J].人民黄河,2010,32(12):160-162.
- [24] 朱文泉.中国陆地生态系统植被净初级生产力遥感估算及其与气候变化关系的研究[D].北京:北京师范大学,2005.
- [25] 姜君宜.基于遥感反演CASA模型的通辽市开鲁县植被净初级生产力研究[D].呼和浩特:内蒙古农业大学,2016.
- [26] 韩王亚,张超,曾源,等.2000—2015年拉萨河流域NPP时空变化及驱动因子[J].生态学报,2018,38(24):8787-8798.
- [27] 余东洋.渭河流域植被动态变化遥感时序分析及生态安全评价[D].西安:长安大学,2019.
- [28] 李亚飞,刘高焕.澜沧江流域植被覆盖变化特征及其与气候因子的关系[J].资源科学,2012,34(7):1214-1221.
- [29] 黄登成.基于CASA模型的蒙古高原植被净初级生产力遥感估算[D].辽宁阜新:辽宁工程技术大学,2014.
- [30] 周珺.基于遥感数据的重庆市净初级生产力(NPP)时空特征研究[D].重庆:西南大学,2013.
- [31] 李惠民.中国森林生态系统碳汇潜力评估[D].北京:北京师范大学,2006.
- [32] 程志庆.基于高光谱信息的杨树人工林生产力遥感估算模型的研究[D].北京:中国林业科学研究院,2015.
- [33] 于成龙,刘丹.基于MODIS的东北地区自然植被生产力对干旱的响应[J].生态学报,2019,39(11):3978-3990.
- [34] 刘鹏.2000—2012年三江源植被生产力遥感估算及其时空格局分析[D].西宁:青海师范大学,2016.
- [35] 焦伟,陈亚宁,李稚,等.基于多种回归分析方法的西北干旱区植被NPP遥感反演研究[J].资源科学,2017,39(3):545-556.
- [36] 焦伟,陈亚宁,李稚.西北干旱区植被净初级生产力的遥感估算及时空差异原因[J].生态学报,2017,36(1):181-189.

(上接第189页)

- [25] 张雪芹,孙杨,郑度,等.中国干旱区温度带界线对气候变暖的响应[J].地理学报,2011,66(9):1166-1178.
- [26] 史本岩.辽宁省东部山区农业气候资源精细化模拟研究[D].沈阳:沈阳农业大学,2018.
- [27] Bates D, Lindstrom M, Wahba G, et al. Gcvpack-routines for generalized cross validation[J]. Communications in Statistics B-Simulation and Computation, 1987,16(1):263-297.
- [28] 刘志红, Tim R McVicar, Li Lingtao,等.基于ANUSPLIN的时间序列气象要素空间插值[J].西北农林科技大学学报:自然科学版,2008,36(10):227-234.
- [29] 刘正佳,于兴修,王丝丝,等.薄盘光滑样条插值中3种协变量方法的降水量插值精度比较[J].地理科学进展,2012,31(1):56-62.
- [30] Hutchinson M F. ANUSPLIN version 4.2 user guide [Z]. Canberra: Australian National University, 2001.
- [31] 孟清,白红英,郭少壮.基于Anusplin秦岭地区近50多年来的降水时空变化[J].水土保持研究,2020,27(2):206-212.
- [32] 熊秋芬,黄玫,熊敏谔,等.基于国家气象观测站逐日降水格点数据的交叉检验误差分析[J].高原气象,2011,30(6):1615-1625.