

DOI: 10.5846/stxb202104251084

刘亮,关靖云,穆晨,韩万强,乔雪丽,郑江华.2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征.生态学报,2022,42(12):4861-4871.

Liu L, Guan J Y, Mu C, Han W Q, Qiao X L, Zheng J H. Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity in the Ili River Basin from 2008 to 2018. Acta Ecologica Sinica, 2022, 42(12):4861-4871.

2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力时空分异特征

刘 亮¹, 关靖云¹, 穆 晨³, 韩万强¹, 乔雪丽¹, 郑江华^{1,2,*}

1 新疆大学资源与环境科学学院, 乌鲁木齐 830046

2 绿洲生态教育部重点实验室, 乌鲁木齐 830046

3 新疆草原总站, 乌鲁木齐 830000

摘要: 基于 MODIS 数据和改进的光能利用率模型 (CASA 模型) 对 2008—2018 年伊犁河流域植被净初级生产力 (NPP) 进行估算, 通过一元线性回归趋势分析、变异系数、Hurst 指数等方法对其时空分异特征进行分析。结论如下: (1) 时间特征上, 伊犁河流域植被 NPP 呈现波动上升趋势, 年内植被 NPP 呈现出“单峰型”特点, 该流域四季植被 NPP 大小关系为: 夏季>春季>秋季>冬季; (2) 空间特征上, 伊犁河流域植被 NPP 呈现东北低西南高, 沿天山山脉呈环状分布, 各植被类型 NPP 的大小为: 林地 ($624.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>耕地 ($575.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>草地 ($270.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>裸地 ($114.26 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。该流域植被 NPP 在海拔、经纬度方面均呈现不同的变化特征。 (3) 空间稳定性上, 伊犁河流域植被 NPP 存在明显的空间差异性, 各变异程度面积比例从大到小为: 稳定 (44.78%)>不稳定 (25.47%)>比较稳定 (16.46%)>很不稳定 (13.3%); (4) 未来变化趋势上, 伊犁河流域大部分地区植被 NPP 未来的变化趋势将以持续增加为主, 未来变化趋势的面积比例大小为: 持续增加 (51.67%)>由增加变为减少 (31.75%)>持续减少 (9%)>由减小变为增加 (7.54%)>无法预测 (0.06%)。研究结果可为伊犁河流域的生态环境和社会、经济的可持续发展提供可靠的理论依据。

关键词: 植被净初级生产力; CASA 模型; 时空分异; 伊犁河流域

Spatio-temporal characteristics of vegetation net primary productivity in the Ili River Basin from 2008 to 2018

LIU Liang¹, GUAN Jingyun¹, MU Chen³, HAN Wanqiang¹, QIAO Xueli¹, ZHENG Jianghua^{1,2,*}

1 College of Resources & Environment Science, Xinjiang University, Urumqi 830046, China

2 Key Laboratory for Oasis Ecology, Ministry of Education, Urumqi 830046, China

3 Xinjiang Grassland Central Station, Urumqi 830000, China

Abstract: The MODIS data and the improved CASA model were used to estimate the vegetation net primary productivity (NPP) in the Ili River Basin from 2008 to 2018. The spatial and temporal differentiation characteristics of the Basin were analyzed by means of unary linear regression trend analysis, coefficient of variation, and Hurst index. The results are as follows: (1) In terms of temporal characteristics, the NPP of vegetation in the Ili River Basin fluctuated and increased. The annual NPP of vegetation in the Ili River Basin showed a single peak pattern. The relationship between the NPP of vegetation in four seasons in the Ili River Basin is as follows: summer>spring> autumn>winter. (2) In terms of spatial characteristics, the NPP of vegetation in the Ili River Basin was lower in the northeast and higher in the southwest, and was

基金项目: 国家社科重大项目 (17ZDA064); 新疆天山雪松计划项目 (2020XS04)

收稿日期: 2021-04-25; **网络出版日期:** 2022-02-14

* 通讯作者 Corresponding author. E-mail: zheng_jianghua@126.com

distributed in a circular pattern along the Tianshan Mountains. The NPP of each vegetation type was forestland ($624.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > cultivated land ($575.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > grassland ($270.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$) > bare land ($114.26 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$). The NPP of vegetation in the Basin showed different variation characteristics in altitude, longitude and latitude. (3) In terms of spatial stability, the NPP of vegetation in the Ili River Basin had obviously spatial differences. From large to small, the area proportion of variation degree was stable (44.78%) > unstable (25.47%) > relatively stable (16.46%) > very unstable (13.3%). (4) In terms of the future change trend, the NPP of vegetation in most areas of the Ili River Basin will continue to increase in the future, and the area proportion of the future change trend is continuous increase (51.67%) > from increase to decrease (31.75%) > continuous decrease (9%) > from decrease to increase (7.54%) > unpredictable (0.06%). The results can provide a reliable theoretical basis for the sustainable development of the ecological environment, society and economy in the Ili River Basin.

Key Words: net primary productivity of vegetation; CASA model; spatiotemporal differentiation; the Ili River Basin

植被净初级生产力(net primary productivity, NPP)指植物单位面积和单位时间内通过光合作用获得的有机质总量,消除自养呼吸后所剩余的干物质量^[1-2]。在当前复杂的全球气候形式下,植被 NPP 数据能用来研究土地利用变化、自然资源管理、生态系统碳循环和碳扰动,是评价地球表面生态系统健康和可持续发展的关键指标^[3]。伊犁河流域位于中亚干旱地区,受地形因素的影响,位于我国境内的伊犁河流域上游,气候温和、降水丰富、土壤肥力好,是我国天然三大草场之一,土地利用率高^[4]。而位于哈萨克斯坦境内伊犁河流域的中下游地区,降水稀少,以荒漠草地为主^[5]。伊犁河流域作为中、哈两国的国际性跨境河流,开展该研究对认识该流域植被生产力状况,两国有效保护和合理利用伊犁河流域脆弱的生态植被区,提升整体效益,促进地区生态环境改善,社会经济的可持续发展提供可靠的理论依据^[6-7]。

计算植被净初级生产力的方法有实测法、统计法和遥感技术法^[8]。实测方法精度高,但需要较多成本投入,经济效益低且不适用于复杂生态系统区域的测量。遥感技术能够弥补野外实测方法的不足,并且遥感数据有时效性高、数据易获取及存储的优点。因此利用不同模型结合遥感数据的植被 NPP 估测及分布成为主流的研究方法。目前植被 NPP 估算模型主要有 3 大类:气候相关模型、过程模型和光能利用率模型^[9]。基于遥感的 CASA(carnegie-ames-stanford approach)模型是一种属于光能利用率机制的过程模型,由于该模型参数少,与植被生理特性相关性强,因此被广泛应用于区域和全球陆地植被 NPP 的监测^[10-11]。张振东和闫俊杰等^[12-13]对伊犁地区的植被 NPP 进行了定量反演,分析了研究区植被 NPP 的时空分布特征,讨论了不同植被类型对 NPP 的贡献率及地形因子对其的影响;Jiao 等^[14]利用 2000—2014 年的 MODIS NDVI 和气象站数据,结合了基于 CASA 模型估算新疆伊犁河谷植被 NPP,分析植被 NPP 与主要气候因子之间的相关性。

前人对伊犁河流域的研究,大多数研究仅限于国家尺度上,多数是对我国境内伊犁河流域植被 NPP 的时空变化特征及其影响因素进行分析,但忽视了流域生态和水文具有整体性与连续性的特点^[15],针对伊犁河流域整体生态的研究十分有限,缺乏对整个流域长时间序列的植被 NPP 时空变化特征研究,无法满足伊犁河流域跨界河流保护以及“一带一路”生态环境建设的评估需要。本研究从整个流域角度出发,以 MOD13A1 多年的 NDVI、气象数据和植被类型等数据为基础,采用改进的 CASA 模型对伊犁河流域 2008—2018 年的植被 NPP 进行了估算,并对其时空分异特征进行了研究分析。

1 材料与方法

1.1 研究区概况

伊犁河流域位于中国新疆西部、哈萨克斯坦东南部(图 1),地理位置在 $73^{\circ}18' - 85^{\circ}N$ 、 $42^{\circ}16' - 49^{\circ}22'E$ 之间,起源于中国新疆伊宁市东南部,流经伊犁地区后转向进入哈萨克斯坦,并最终注入哈萨克斯坦境内的巴尔喀什湖,是中、哈两国的跨境内流河^[16]。该流域大部分位于哈萨克斯坦境内,小部分位于中国境内,是目前

世界上保存最好的半干旱区域生态景观之一^[17]。

1.2 数据及研究方法

1.2.1 数据来源及预处理

遥感数据:NDVI 数据来源于 NASA 官网发布的 MOD13A1 L3 级数据集(<https://ladsweb.modaps.eosdis.nasa.gov/>)。选取伊犁河流域所在的瓦片号 h22v04、h23v04 与 h24v04,对瓦片数据进行格式转换、投影转换、拼接,采用最大值合成处理(maximum value composite,MVC)进一步消除其他气象因素的干扰。并下载 MOD17A3 NPP 数据产品,用于与 CASA 模型计算的植被 NPP 值进行精度验证。

气象数据:本文所需的气温、降水与太阳辐射数据均使用 FLDAS(Famine Early Warning Systems Network (FEWS NET) Land Data Assimilation System)数据集(<https://ldas.gsfc.nasa.gov/index.php/fldas/>),该数据集协助数据稀少的发展中国家进行粮食安全评估,包括许多气候相关变量的信息^[18—19]。

植被类型图:伊犁河流域土地利用数据来源于欧洲航空局研发的 CCI—LC 全球土地覆盖产品(<https://cds.climate.copernicus.eu/>)。CCI—LC 经地面参考数据和替代传感器等独立数据验证,具有较高的数据质量^[20—21]。对地物类型进行重新分类^[22],剔除城市用地、水体与永久冰雪非植被覆盖区,最终得到伊犁河流域 4 大类植被覆盖类型,即草地、林地、耕地与裸地。

1.2.2 NPP 计算

CASA 模型是目前几个主要光能利用率模型之一,该模型中的植被净初级生产力是由植被吸收光合有效辐射(absorbed photosynthetic active radiation,APAR)和光能转化率(ϵ)两个变量决定。本研究采用的 NPP 计算模型是由国内学者朱文泉等^[23]改进的 CASA 模型。其计算公式如下:

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

式中,APAR(x,t)表示像元 x 在 t 月份接收的太阳光合有效辐射, $\epsilon(x,t)$ 表示像元 x 在 t 月份的实际光能利用率。

1.2.3 NPP 变化趋势分析

针对植被 NPP 在时间尺度上的变化趋势和强度,利用一元线性回归对 2008—2018 年伊犁河流域植被 NPP 进行分析。该方法能反映不同时期植被 NPP 变化的时空分布特征,其计算公式如下^[24]:

$$\text{slope} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (2)$$

式中, n 是研究时间序列的长度,即 11(2008—2018 年共 11 年); i 代表第 i 年, NPP_i 表示第 i 年植被 NPP 值,slope 代表趋势线斜率。

1.2.4 NPP 变异系数

伊犁河流域 2008—2018 年植被 NPP 的变异系数(CV)计算公式如下^[25]:

$$CV = \frac{\sigma}{X} \quad (3)$$

式中, CV 为变异系数, X 为平均值, σ 为标准差。将 CV 值划分为比较稳定($CV \leq 0.1$)、稳定($0.1 < CV \leq$

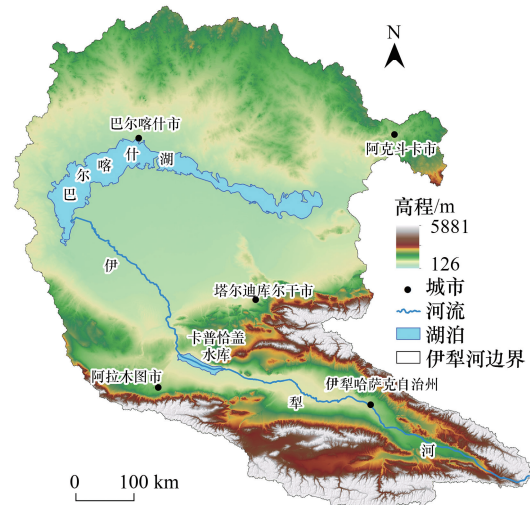


图1 研究区概况

Fig.1 An overview of the study area

0.2)、不稳定($0.2 < CV \leq 0.3$)、很不稳定($CV > 0.3$) 4 个等级。

1.2.5 Hurst 指数

采用重标极差(R/S)分析法来估算 Hurst 指数,从而分析 NPP 的持续性特征,其计算公式如下^[26]:

设有时间序列 $\{\xi(t)\}$, $t = 1, 2, 3, \dots$, 对于任意正整数 $\tau \geq 1$, 有均值序列:

$$\langle \xi \rangle = \frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} \xi(t) \quad t = 1, 2, 3, \dots \quad (4)$$

由此求得累计离差:

$$X(t, \tau) = \sum_{u=1}^t [\xi(u) - \langle \xi \rangle_{\tau}] \quad 1 \leq t \leq \tau \quad (5)$$

极差 R 定义为:

$$R(\tau) = \max_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) - \min_{1 \leq t \leq \tau} X(t, \tau) \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (6)$$

标准差 S 定义为:

$$S(\tau) = \left[\frac{1}{\tau} \sum_{t=1}^{\tau} (\xi(t) - \langle \xi \rangle_{\tau})^2 \right]^{\frac{1}{2}} \quad (\tau = 1, 2, \dots) \quad (7)$$

R 、 S 、 τ 满足关系式:

$$R(\tau)/S(\tau) = c \times \tau^H \quad (8)$$

式中, c 为常数; $R(\tau)/S(\tau)$ 为重标极差; H 为 Hurst 指数。根据方程(9)以 $\log(\tau)$ 序列为自变量, 对应的 $\log(R/S)_{\tau}$ 序列为因变量, 采用最小二乘法拟合法, 即可得到 Hurst 指数的估计值。

$$\log(R/S)_{\tau} = \log c + H \times \log \tau \quad (9)$$

1.2.6 伊犁河流域植被 NPP 变化区域分异特征分析

从海拔及经纬度方面对伊犁河流域植被 NPP 在时间和空间变化进行统计, 分析其时空分异特征^[27-28]。步骤如下: (1) 海拔的划分是基于美国地质勘查局发布的数字高程模型(DEM) (<https://www.usgs.gov/news/>), 按照 500 m 的间隔划分为 9 个高程带(小于 500 m、500—4000 m 间分 7 个带及大于 4000 m); (2) 根据伊犁河流域范围, 结合实际情况, 按照经度 2° 、纬度 1° 的标准划分成带。经度划分成 7 个带(73°E 以西、 73° — 83°E 中间共分 4 个带、 83°E 以东), 纬度划分 7 个带(43°N 以南、 43° — 48°N 中间共分 5 个带、 48°N 以北)。通过以上方法, 基于像元尺度上计算伊犁河流域海拔带、经纬度带的植被 NPP, 分析流域内时空区域特征差异。

2 结果与分析

2.1 模型精度验证

根据新疆维吾尔自治区草地总站提供的 2018 年伊犁地区地上生物量实测数据, 对 CASA 模型模拟的 NPP 与实测 NPP 进行比较, 经计算发现(图 2)植被 NPP 模拟结果与实测数据显著相关($R^2 = 0.726$, $P < 0.01$)。

野外调查获取的生物量数据验证精度较高, 但在整个流域内进行大规模, 相对统一的野外调查取样是困难的。为此, 本研究使用 CASA 模型估算结果与 2008—2018 年的 MOD17A3 数据产品进行对比(图 2)。从整体趋势上看, 估算的 NPP 与 MOD17A3 产品有较高的吻合性, 两者的变化趋势是一致的。根据以上两种验证结果可知, 本文使用 CASA 模型计算的植被 NPP 精度较高, 且适用于估算伊犁河流域的植被 NPP。

2.2 伊犁河流域植被净初级生产力时间变化特征

2.2.1 伊犁河流域年际 NPP 变化特征

2008—2018 年伊犁河流域植被 NPP 年际变化(图 3), 年际植被 NPP 总量呈现出波动上升的特征, 波动值为 245.49 — $351.42 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 相对变化较显著。多年植被 NPP 平均值为 $295.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 且在 2016 年达到近 11 年的峰值, 其值为 $351.42 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$, 比多年平均值高 19.02%。植被 NPP 最低值在 2008 年, 为

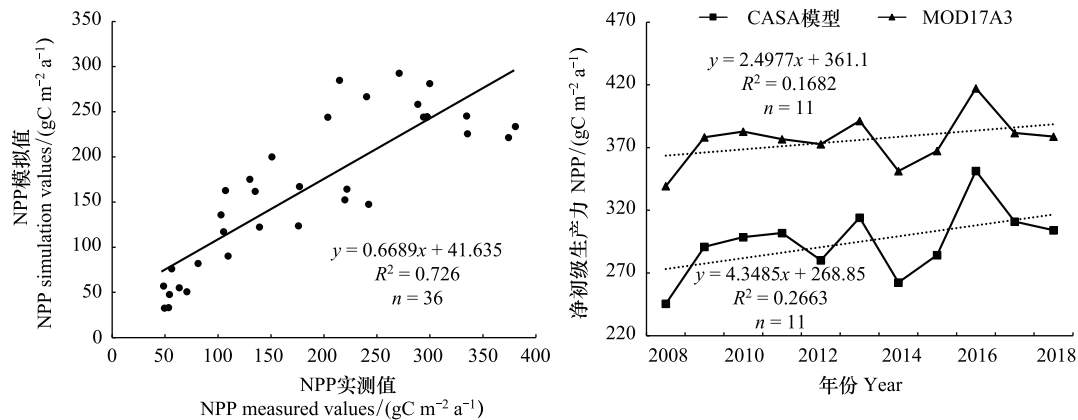


图2 净初级生产力(NPP)模型精度验证

Fig.2 Net primary productivity model accuracy verification

$245.49 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 比多年平均值低 16.85%。2015 年到 2016 年植被 NPP 总量增长幅度最大, 增加量为 $67.08 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。2013 年到 2014 年植被 NPP 总量减少幅度最快, 减少量为 $51.76 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

2.2.2 伊犁河流域年内 NPP 变化特征

从整个流域整体来看, 在中国境内部分与境外哈萨克斯坦部分年内植被 NPP 均呈现出“单峰型”特点(图4)。由于冬季气候寒冷、冰雪覆盖, 植被处于枯黄状态, 引起伊犁河流域每年的 1 月份、2 月份、12 月份的植被 NPP 月值均接近于 0。2—4 月份气温与降水逐渐增加, 植被开始生长, 植被 NPP 值呈现出缓慢上升趋势。在 4—6 月份由于气温的大幅回升, 降水增多, 太阳辐射强度增大, NPP 值呈现快速上升趋势, 气温、降水、光照为植被生长提供了良好的环境条件, NPP 积累量在 6 月份达到最大值。随着季节变化, 气温降低, 降水减少, 植被开始逐渐枯黄, NPP 值在 7—12 月份呈现出逐渐下降的趋势。多年月平均 NPP 值在整个流域与境外部分波动范围相对较小, 其波动范围分别为 $0.43\text{—}60.32 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $0.4\text{—}54.58 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$, 最大值与最小值之差分别为 $59.89 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 和 $54.18 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$; 而在中国境内部分多年月平均 NPP 值波动较大, 其范围在 $0.59\text{—}124.34 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 其最大值与最小值差距为 $123.75 \text{ g C m}^{-2} \text{a}^{-1}$ 。

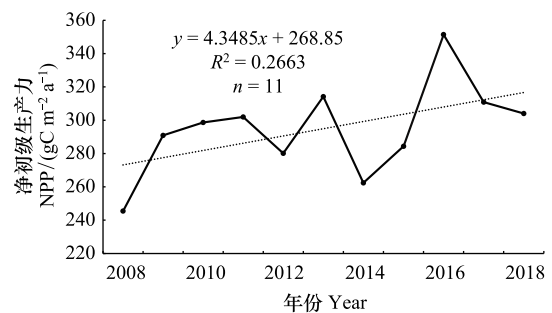


图3 伊犁河流域植被净初级生产力年际变化

Fig.3 Interannual change of vegetation net primary productivity in Ili River Basin

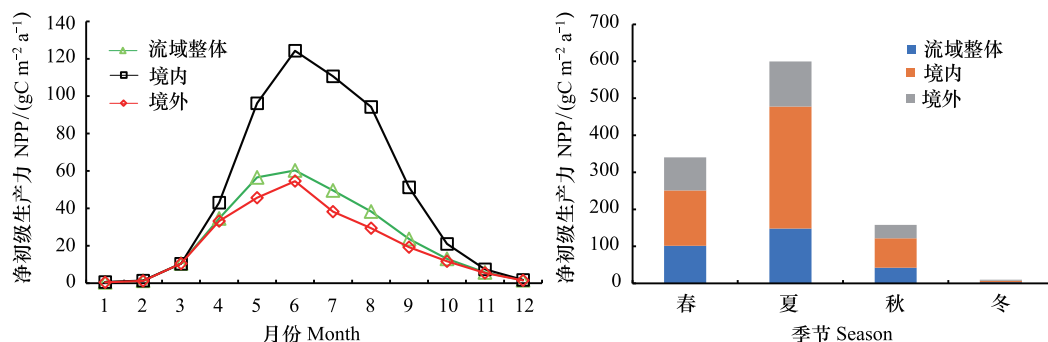


图4 伊犁河流域年内 NPP 变化特征

Fig.4 Variation characteristics of net primary productivity in Ili River Basin during the year

根据植被生长习性和该流域内物候特点将 3—5 月份、6—8 月份、9—11 月份、12 月份至次年 2 月份分别定为春季、夏季、秋季、冬季。伊犁河流域 2008—2018 年四季 NPP 值大小关系为(图 4):夏季>春季>秋季>冬季,且流域内四季植被 NPP 值差异明显。整个流域春季的植被 NPP 均值为 $101.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,随着温度上升、降水量增多,植被逐渐恢复生机,NPP 值相对于冬季显著增大。夏季是伊犁河流域的雨季,雨热同期,植被覆盖度较高,NPP 值较大,其均值为 $148.18 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。秋季气温逐渐降低,降雨量减少,植被处于停止生长或衰败的阶段,植被 NPP 值呈下降趋势,其均值为 $42.25 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。而冬季,随着气温降低,太阳辐射强度较小,气候干冷,大多数植被停止生长,流域 NPP 值波动范围趋于平稳状态,NPP 均值为 $3.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

2.3 伊犁河流域植被净初级生产力空间变化特征

2.3.1 伊犁河流域多年 NPP 均值空间变化特征

从整个伊犁河流域来看,该流域多年 NPP 均值区间为 $0—1108.64 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,空间分异明显(图 5),植被净初级生产力呈东北低西南高,沿天山山脉呈环状分布,其中高值区均在天山山麓地区,低值区位于伊犁河平原谷地地区,呈现出上游高、中下游地区低的空间分布特征。从整个流域来看,该流域的多年植被 NPP 均值在中国境内部分($572.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)显著高于在哈萨克斯坦境内部分($250.94 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。从不同植被类型的 NPP 变化特征来看,伊犁河流域不同土地利用类型的多年平均各植被类型净初级生产力的大小为:林地($624.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>耕地($575.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>草地($270.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>裸地($114.26 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

2.3.2 伊犁河流域植被净初级生产力变化趋势及其显著性检验

伊犁河流域 2008—2018 年植被 NPP 年际变化斜率空间分布(图 6),NPP 年际变化值 θ_{slope} 介于 $-69.99—89.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间,该流域多年平均值为 $4.53 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,NPP 呈增加趋势($\text{Slope}>0$)的区域占总面积的

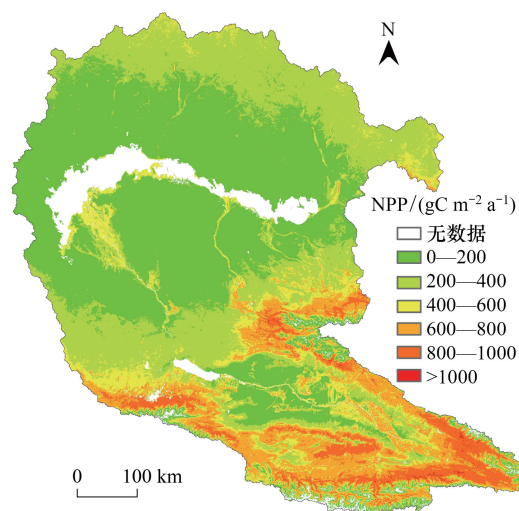


图 5 伊犁河流域 2008—2018 年植被净初级生产力空间分布
Fig.5 Spatial distribution of vegetation net primary productivity in Ili River Basin from 2008 to 2018

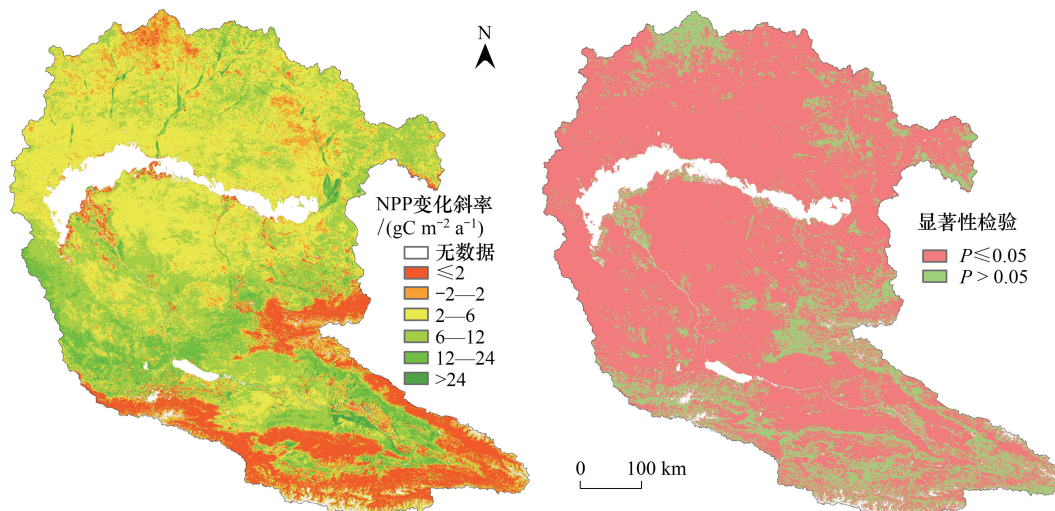


图 6 伊犁河流域植被净初级生产力年际变化斜率空间分布及显著性检验

Fig.6 Spatial distribution and significance test of interannual change slope of vegetation net primary productivity in Ili River Basin

83.47%, 主要分布于伊犁河谷及其中下游地区。NPP 呈减少趋势 (Slope<0) 的区域占总面积的 16.52%, 主要分布于河谷两侧的天山山麓, 表明伊犁河流域植被净初级生产力整体变化趋势为增加趋势。

对伊犁河流域植被 NPP 的变化趋势进行显著性检验 (图 6), 其中通过显著性检验的区域主要分布于上游的河谷地区及该流域的中下游地区。这是由于受政策影响哈萨克斯坦中游卡普恰盖水库附近农田大幅度转化为天然草地, 因而哈萨克坦内伊犁河流域植被净初级生产力呈显著增加趋势, 这与蔡明勇等^[29]得出结论一致。

2.3.3 伊犁河流域植被 NPP 垂直与水平分异特征

植被 NPP 变化随海拔升高呈现出“倒 U 型分布”的特点 (图 7)。在海拔 2500 m 以内, 植被 NPP 均值随海拔的上升有明显的增加趋势, 并在海拔 2000—2500 m 达到最大值 ($775.2 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。海拔每升高 100 m, 植被 NPP 值就增加 $25.23 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在海拔小于 2500 m 区域内植被类型复杂, 一定范围内降水量随海拔的升高而增加, 为植被生长发育提供了良好的条件。从海拔高于 2500 m 时, 植被 NPP 呈现出下降趋势, 海拔每增加 100 m, 植被 NPP 均值就减少 $32.37 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。

伊犁河流域植被 NPP 变化在纬向和经向方向上存在差异 (图 7)。从纬向上看, 总体趋势由南向北呈现出“V”字形, 低纬度地区植被 NPP 值明显高于高纬度地区。在 44°N 以南呈现出缓慢下降趋势, 44°N — 47°N 之间呈现出快速下降趋势, 47°N 以北为上升态势。从经向上看, 在 77°E 以西植被 NPP 缓慢增加, 当经度每增加 1° , 植被 NPP 值平均增加 $8.12 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。 77°E 以东 NPP 呈现快速上升趋势, 经度每增加 1° , 植被 NPP 的值平均增加 $55.17 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。在纬度 45° — 46° 与经度 77° — 79° 的植被 NPP 较为接近。

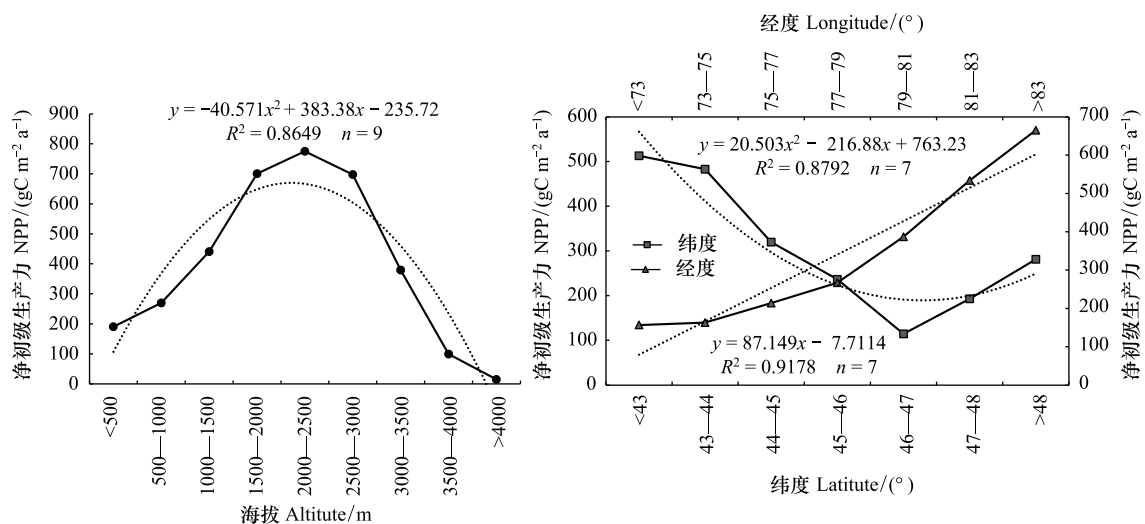


图 7 伊犁河流域植被 NPP 垂直与水平分异特征

Fig.7 Vertical and horizontal differentiation of net primary productivity in Ili River River Basin

2.4 伊犁河流域植被 NPP 时空变化的稳定性

通过空间统计分析得出, 伊犁河流域植被 NPP 变异系数范围在 0.02—3.32, 该流域变异系数平均值为 0.21, 表明该流域植被 NPP 存在明显的空间差异性 (图 8)。通过对研究区像元尺度的变异系数进行分类统计, 各变异程度面积比例从大到小为: 稳定 (44.78%) > 不稳定 (25.47%) > 比较稳定 (16.46%) > 很不稳定 (13.3%), 说明该流域的植被 NPP 整体趋于稳定, 但存在部分变异程度较大的区域, 变异程度相对较大的区域主要位于伊犁河谷、卡普恰盖水库周围和巴尔喀什湖附近。

2.5 伊犁河流域植被净初级生产力未来变化趋势

为更好地监测该流域植被 NPP 未来的健康现状和发展情况, 引入 Hurst 指数直观地量化伊犁河流域植被 NPP 未来变化趋势 (图 9)。通过空间分析, 伊犁河流域植被 NPP 的 Hurst 指数介于 0.08—0.99, 其均值为

0.54。Hurst 指数大于 0.5 的区域占该流域总面积的 60.69%,而 Hurst 指数小于 0.5 仅占 39.31%,说明伊犁河流域植被 NPP 变化趋势具有较强正向持续性,即该流域大部分地区植被未来的变化趋势将与过去一致。

将一元线性回归分析的 Slope 值与计算的 Hurst 指数进行叠加分析,把未来的植被 NPP 变化趋势分为以下 5 类(表 1):

流域内植被 NPP 未来变化趋势的面积由高至低依次为(图 9):持续增加(51.67%)>由增加变为减少(31.75%)>持续减少(9%)>由减小变为增加(7.54%)>无法预测(0.06%)。表明流域内植被 NPP 未来变化趋势以持续增加为主,主要分布于伊犁河谷及中游地区。在下游伊犁河三角洲地区未来变化趋势为由增加变为减少,未来持续减少的区域主要分布于伊犁河谷两侧的天山山麓。

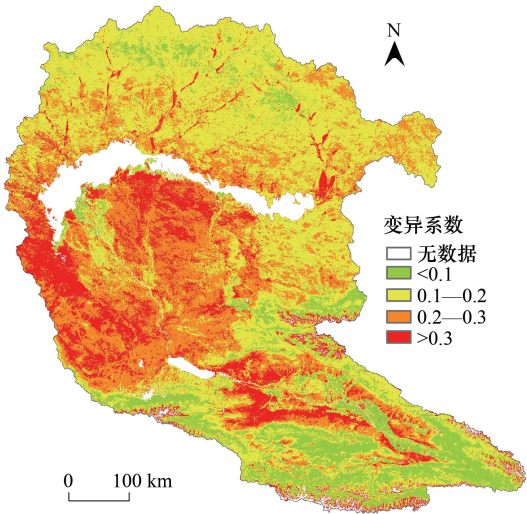


图 8 伊犁河流域植被净初级生产力变异系数
Fig.8 The coefficient of variation of vegetation net primary productivity in Ili River Basin

表 1 未来变化趋势分级

Table 1 Classification of future trends			
Slope 与 Hurst 指数取值范围 Slope and Hurst index value range	未来变化趋势 Future trends	Slope 与 Hurst 指数取值范围 Slope and Hurst index value range	未来变化趋势 Future trends
$\theta_{slope} > 0, H > 0.5$	持续增加	$\theta_{slope} < 0, H < 0.5$	由减小变为增加
$\theta_{slope} < 0, H > 0.5$	持续减小	$H = 0.5$	无法预测
$\theta_{slope} > 0, H < 0.5$	由增加变为减小		

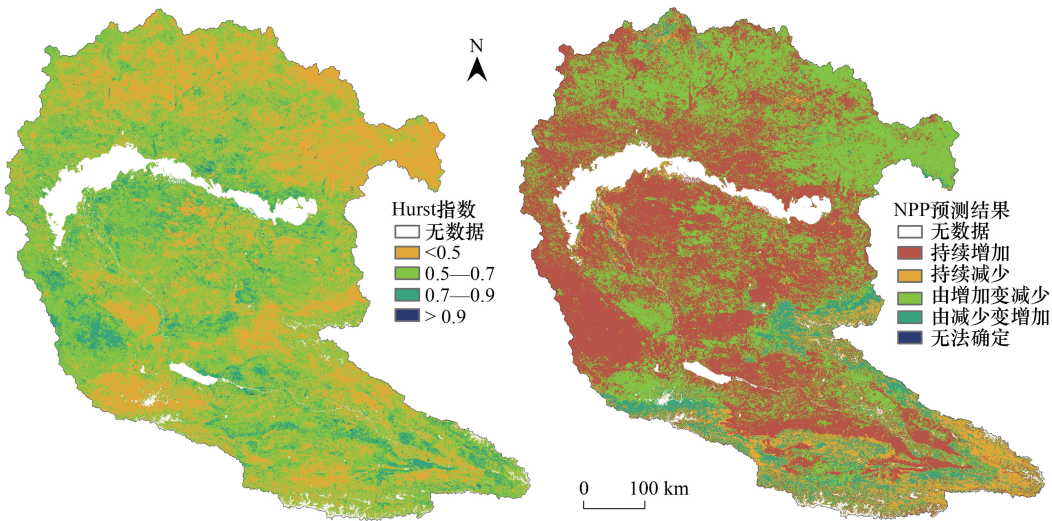


图 9 伊犁河流域植被净初级生产力 Hurst 指数及未来变化趋势
Fig.9 Hurst index of net primary productivity of vegetation and its future trend in Ili River Basin

3 讨论

在我国西北干旱半干旱区域,很多学者在植被生产力的模拟与评估方面做了大量的研究^[30]。本研究从

整个流域角度出发,基于 MOD13A1 多年 NDVI 数据,利用气象及植被类型等数据,选用朱文泉等^[23]改进后的 CASA 模型对伊犁河流域 2008—2018 年植被净初级生产力进行估算,得到该流域植被 NPP 平均值为 $295.24 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 。将以往学者在新疆以及伊犁河流域计算的植被净初级生产力结果进行对比,研究结果表明与吴晓全等^[31]和闫俊杰等^[13]的结果相近,但高于杨红飞等^[32]对新疆植被 NPP 的研究成果。这是由于伊犁河流域雨量充沛,植被发育条件良好,植被 NPP 值远高于新疆平均水平。

不同学者模拟植被 NPP 结果不一致的主要原因有以下几点:(1)研究时间序列的差异性。前人已有的研究成果在时间序列上与本文的研究时间序列不一致,不同时间序列下的气象要素、外界因素对植被的影响程度不同,导致估算的植被 NPP 值的存在差异性。(2)所用模型的差异性。由于研究采用不同的模型估算植被 NPP,模型间的原理机制、模型所需参数和计算步骤不同,其对植被 NPP 的估算结果各异。众多学者已从不同学科角度建立了一系列模型,其中具有代表性的模型有 Biome-BGC^[33],该模型使用气象数据、生理和生态参数以及站点数据作为输入参数来模拟生物地球化学循环和水文过程^[34—35]。但该模型在计算植被 NPP 时所需参数较多,而且完整参数难以获得,在区域尺度上转换困难,因此该模型较适用于空间尺度较小、均质斑块上的植被 NPP 估算^[9],对于该模型在区域尺度转换问题还有待于进一步研究。(3)数据源的时空分辨率不同。不同方法进行估测的过程中,最小估测单元空间分辨率的选取,会影响统计分析结果。CASA 模型在估算过程中仍存在一些不确定性因素可能会影响模拟精度,首先是大多数研究对于比值植被指数(SR)的最大最小值和植被最大光能利用率的取值均是采用朱文泉等^[36]论文结果,但是上述参数是根据全国范围得出的结论,不一定适用于小区域,数据存在空间差异,从而导致估算的植被 NPP 结果偏高或偏低。因此,在以后的研究中需要结合地域特征优化模拟参数取值从而减小模型模拟结果的误差。其次,研究认为植被 NPP 变化是人类活动和气候变化共同影响的结果^[37],CASA 模型计算出来的植被 NPP 结果只能表征在未受到人类活动的自然植被发育过程,如何在将人为因素整合到现有模型当中去估算植被 NPP,是未来工作的研究方向。

本研究结果表明,该流域多年植被 NPP 均值在中国境内部分($572.05 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)显著高于在哈萨克斯坦境内部分($250.94 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$),空间差异显著,呈现出这种差异的原因主要受地形地貌、海拔高度、所处区域降水量、温度、土地利用类型等影响^[38—39]。伊犁河流域植被 NPP 在海拔上呈现出明显的分异特征,其植被 NPP 大小与伊犁河流域的温度状况有关,随着海拔高度的上升,水热条件改变,这些因素影响了植被对碳的吸收和累积^[40]。在不同纬度上植被 NPP 也有较大差异,44°N 以南区域位于我国境内的伊犁河流域上游,其降水较为丰富,土地利用率高^[41],该区域土地能自然形成植被,在干旱半干旱区降水是植被 NPP 的主要气候控制因子^[42],充沛的降水为植被生长提供了优良的自然条件,所以流域上游植被 NPP 值较高。随着纬度增加,哈萨克斯坦境内伊犁河流域的中下游地区,降水量稀少,靠近巴尔喀什湖地区年降水量不到 100 mm ^[43],植被生长发育条件较差,主要为裸地、稀疏植被和草地,并且 20 世纪 70 年代哈萨克斯坦在伊犁河中游修建了卡普恰盖水库^[44],这些区域土地利用类型复杂,受人为因素影响大,土地利用类型易发生转变,致使中下游地区植被 NPP 值较低。从经向上看,总体趋势是由西往东逐渐增加,造成这种现象的原因是中西部主要为植被低覆盖区,土地类型以裸地和沙漠类型为主^[17],不利于植被的生长发育,东部边缘地带主要为高覆盖度区,土地类型以林地、草地和耕地为主。

4 结论

时间特征上,伊犁河流域植被 NPP 总体呈现波动上升趋势,波动值在 $245.49—351.42 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间;从流域整体来看,在中国境内部分与境外哈萨克斯坦部分年内植被 NPP 均呈现出“单峰型”特点,并且在 6 月份达到植被 NPP 积累量最大值;伊犁河流域植被 NPP 四季变化大小关系为:夏季>春季>秋季>冬季。

空间特征上,伊犁河流域植被 NPP 呈现东北低西南高,沿天山山脉呈环状分布,植被 NPP 均值范围在 $0—1108.64 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$ 之间;其中高值区均在天山山麓地区,低值区位于伊犁河平原谷地地区,呈现出上游

高、中游和下游低的特征;各植被类型净初级生产力的大小为:林地($624.13 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>耕地($575.04 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>草地($270.57 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)>裸地($114.26 \text{ g C m}^{-2} \text{ a}^{-1}$)。

空间稳定性上,伊犁河流域植被 NPP 变异系数范围在 0.02—3.32,其平均值为 0.21,表明该流域植被 NPP 存在明显的空间差异性,各变异程度面积比例从大到小为:稳定(44.78%)>不稳定(25.47%)>比较稳定(16.46%)>很不稳定(13.3%),说明该流域的植被 NPP 整体趋于稳定,但存在部分变异程度较大的区域。

未来变化趋势上,伊犁河流域大部分地区植被 NPP 未来的变化趋势将以持续增加为主。该流域植被 NPP 的 Hurst 指数介于 0.08—0.99,均值为 0.54;Hurst 指数大于 0.5 的区域占该流域总面积的 60.69%,而 Hurst 指数小于 0.5 的仅占 39.31%;未来变化趋势的面积比例由高至低依次为:持续增加(51.67%)>由增加变为减少(31.75%)>持续减少(9%)>由减小变为增加(7.54%)>无法预测(0.06%)。

致谢:感谢自治区级产学研联合培养研究生基地新疆草原总站提供的支持。

参考文献(References):

- [1] 潘竞虎,黄克军,李真. 2001—2010 年疏勒河流域植被净初级生产力时空变化及其与气候因子的关系. 生态学报, 2017, 37(6): 1888-1899.
- [2] Yan Y C, Liu X P, Ou J P, Li X, Wen Y Y. Assimilating multi-source remotely sensed data into a light use efficiency model for net primary productivity estimation. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2018, 72: 11-25.
- [3] 同琳静,刘洋洋,王倩,杨悦,李建龙. 西北植被净初级生产力时空变化及其驱动因素. 水土保持研究, 2019, 26(4): 367-374.
- [4] 张军民. 伊犁河流域气候资源特点及其时空分布规律研究. 干旱气象, 2006, 24(2): 1-4.
- [5] 朱磊,罗格平,陈曦,许文强,冯异星,郑青华,王继燕,周德成,尹昌应. 伊犁河中下游近 40 年土地利用与覆被变化. 地理科学进展, 2010, 29(3): 292-300.
- [6] 朱新光,张深远,武斌. 中国与中亚国家的气候环境合作. 新疆社会科学, 2010, (4): 56-61.
- [7] Akiyama T, Li J, Kubota J, Konagaya Y, Watanabe M. Perspectives on sustainability assessment; an integral approach to historical changes in social systems and water environment in the Ili River Basin of Central Eurasia, 1900-2008. World Futures, 2012, 68(8): 595-627.
- [8] Steele S J, Gower S T, Vogel J G, Norman J M. Root mass, net primary production and turnover in aspen, jack pine and black spruce forests in Saskatchewan and Manitoba, Canada. Tree Physiology, 1997, 17(8/9): 577-587.
- [9] 朱文泉,陈云浩,徐丹,李京. 陆地植被净初级生产力计算模型研究进展. 生态学杂志, 2005, 24(3): 296-300.
- [10] Hadian F, Jafari R, Bashari H, Tartesh M, Clarke K D. Estimation of spatial and temporal changes in net primary production based on Carnegie Ames Stanford Approach (CASA) model in semi-arid rangelands of Semirum County, Iran. Journal of Arid Land, 2019, 11(4): 477-494.
- [11] 贾俊鹤,刘会玉,林振山. 中国西北地区植被 NPP 多时间尺度变化及其对气候变化的响应. 生态学报, 2019, 39(14): 5058-5069.
- [12] 张振东,咎梅. 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. 华中师范大学学报:自然科学版, 2020, 54(4): 711-720.
- [13] 闫俊杰,刘海军,赵玉,崔东,刘影. 2000—2015 年新疆伊犁河谷草地 NPP 时空变化特征. 水土保持研究, 2018, 25(5): 390-396.
- [14] Jiao W, Chen Y N, Li W H, Zhu C G, Li Z. Estimation of net primary productivity and its driving factors in the Ili River Valley, China. Journal of Arid Land, 2018, 10(5): 781-793.
- [15] 王娇妍,路京选. 基于遥感的伊犁河下游生态耗水分析. 水利学报, 2009, 40(4): 457-463.
- [16] 王洪亮,冯爱萍,高彦华,王雪蕾. 伊犁河流域最大植被覆盖度的时空动态变化. 环境科学与技术, 2018, 41(6): 161-167.
- [17] 梁红闪,王丹,郑江华. 伊犁河流域地表蒸散量时空特征分析. 灌溉排水学报, 2020, 39(7): 100-110.
- [18] McNally A, Arsenault K, Kumar S, Shukla S, Peterson P, Wang S G, Funk C, Peters-Lidard C D, Verdin J P. A land data assimilation system for sub-Saharan Africa food and water security applications. Scientific Data, 2017, 4(1): 170012.
- [19] 申振宇. 基于 GEE 的 Landsat 影像长时间序列数据的湟水流域土地利用/土地覆被分类及精度评估[D]. 西宁:青海师范大学, 2020: 80-80.
- [20] Nowosad J, Stepinski T F, Netzel P. Global assessment and mapping of changes in mesoscale landscapes: 1992-2015. International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 2019, 78: 332-340.
- [21] Liu X X, Yu L, Li W, Peng D L, Zhong L H, Li L, Xin Q C, Lu H, Yu C Q, Gong P. Comparison of country-level cropland areas between ESA-CCI land cover maps and FAOSTAT data. International Journal of Remote Sensing, 2018, 39(20): 6631-6645.
- [22] 李元春,葛静,侯蒙京,高宏元,刘洁,包旭莹,殷建鹏,高金龙,冯琦胜,梁天刚. 基于 CCI-LC 数据的甘南和川西北地区土地覆盖类型

- 时空动态分布及草地面积变化驱动力研究. 草业学报, 2020, 29(3): 1-15.
- [23] 朱文泉, 潘耀忠, 龙中华, 陈云浩, 李京, 扈海波. 基于 GIS 和 RS 的区域陆地植被 NPP 估算——以中国内蒙古为例. 遥感学报, 2005, 9(3): 300-307.
- [24] 冯磊, 杨东, 黄悦悦. 2000—2017 年川渝地区植被 NDVI 特征及其对极端气候的响应. 生态学杂志, 2020, 39(7): 2316-2326.
- [25] 李传华, 赵军, 师银芳, 胡秀芳. 基于变异系数的植被 NPP 人为影响定量研究——以石羊河流域为例. 生态学报, 2016, 36(13): 4034-4044.
- [26] Jiang W G, Yuan L H, Wang W J, Cao R, Zhang Y F, Shen W M. Spatio-temporal analysis of vegetation variation in the Yellow River Basin. *Ecological Indicators*, 2015, 51: 117-126.
- [27] 杨潇, 郭兵, 韩保民, 陈舒婷, 杨飞, 范业稳, 何田莉, 刘悦. 青藏高原 NPP 时空演变格局及其驱动机制分析. 长江流域资源与环境, 2019, 28(12): 3038-3050.
- [28] 崔博超, 郑江华, 吐尔逊·哈斯木, 段素素, 杜梦洁. 塔里木河流域草地净初级生产力时空分异特征研究. 草业学报, 2020, 29(6): 1-13.
- [29] 蔡明勇, 杨胜天, 周秋文, 董国涛. 伊犁河跨界流域土地利用变化特征分析. 世界地理研究, 2013, 22(3): 151-159.
- [30] 姬盼盼. 中国西北部典型干旱区 NPP 驱动力分析[D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2019.
- [31] 吴晓全, 王让会, 李成, 蒋烨林, 彭擎, 李焱. 天山植被 NPP 时空特征及其对气候要素的响应. 生态环境学报, 2016, 25(11): 1848-1855.
- [32] 杨红飞. 新疆草地生产力及碳源汇分布特征与机制研究[D]. 南京: 南京大学, 2013.
- [33] Mao F J, Li P H, Zhou G M, Du H Q, Xu X J, Shi Y J, Mo L F, Zhou Y F, Tu G Q. Development of the BIOME-BGC model for the simulation of managed Moso bamboo forest ecosystems. *Journal of Environmental Management*, 2016, 172: 29-39.
- [34] Chiesi M, Chirici G, Marchetti M, Hasenauer H, Moreno A, Knohl A, Matteucci G, Pilegaard K, Granier A, Longdoz B, Maselli F. Testing the applicability of BIOME-BGC to simulate beech gross primary production in Europe using a new continental weather dataset. *Annals of Forest Science*, 2016, 73(3): 713-727.
- [35] Sun Q L, Li B L, Zhang T, Yuan Y C, Gao X Z, Ge J S, Li F, Zhang Z J. An improved Biome-BGC model for estimating net primary productivity of alpine meadow on the Qinghai-Tibet Plateau. *Ecological Modelling*, 2017, 350: 55-68.
- [36] 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.
- [37] 朱莹莹, 韩磊, 赵永华, 奥勇, 李军军, 许凯波, 刘冰, 葛媛媛. 中国西北地区 NPP 模拟及其时空格局. 生态学杂志, 2019, 38(6): 1861-1871.
- [38] 梁爽, 张吴平, 毕如田, 高培霞, 王国芳. 山西省植被 NPP 时空变化特征及其驱动力分析. 广西植物, 2018, 38(8): 1005-1014.
- [39] 赵俊红, 周华荣, 卢雅焱, 孙庆祥. 2000—2015 年塔里木胡杨林国家级自然保护区 NPP 时空动态特征及其影响因素. 干旱区地理, 2020, 43(1): 190-200.
- [40] 侯小丽, 张丽, 张炳华, 周宇, 梁勇. 青藏高原植被对气候变化响应的研究进展. 安徽农业科学, 2016, 44(17): 230-235, 244-244.
- [41] 叶佰生, 赖祖铭, 施雅风. 伊犁河流域降水和气温的若干特征. 干旱区地理, 1997, 20(1): 46-52.
- [42] 任璇, 郑江华, 穆晨, 闫凯, 刘永强, 温阿敏, 杨会枫. 新疆近 15 年草地 NPP 动态变化与气象因子的相关性研究. 生态科学, 2017, 36(3): 43-51.
- [43] 龙爱华, 邓铭江, 李湘权, 章毅, 雷雨. 哈萨克斯坦水资源及其开发利用. 地球科学进展, 2010, 25(12): 1357-1366.
- [44] 王玉娟, 国冬梅. 中哈界河伊犁河流域生态环境演变及其驱动力. 欧亚经济, 2016, (4): 100-107.