

DOI: 10.5846/stxb202201190178

何颖, 马松梅, 张林, 张云玲, 贺凌云. 玛纳斯河流域 NPP 时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价. 生态学报, 2023, 43(11): 4664-4673.

He Y, Ma S M, Zhang L, Zhang Y L, He L Y. Spatio-temporal change of net primary productivity and the evaluation of the importance of biodiversity maintenance functions in Manas River Basin. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(11): 4664-4673.

玛纳斯河流域 NPP 时空变化及其生物多样性维护功能重要性评价

何 颖¹, 马松梅^{1,*}, 张 林¹, 张云玲², 贺凌云¹

1 石河子大学理学院, 兵团绿洲城镇与山盆生态系统重点实验室, 干旱区景观生态重点实验室, 石河子 832000

2 新疆维吾尔自治区草原总站, 乌鲁木齐 830049

摘要: 基于植被净初级生产力(NPP)法开展干旱区流域生物多样性维护功能重要性评价可为区域生态安全建设提供科学依据。基于玛纳斯河流域 MODIS13Q1 数据和环境数据, 利用卡内基-艾姆斯-斯坦福方法模型(CASA)估算 2001—2020 年流域植被 NPP, 结合地形因子构建流域生物多样性维护功能重要性评价模型, 利用地理探测器分析气候、地形、土壤类型等因子对流域 NPP 的空间异质性影响。研究表明: (1) 近 20 年, 流域植被 NPP 均值呈上升趋势, 高值集中于山地区低山丘陵带和绿洲区中部, 低值区分布于荒漠生态区; (2) 从流域不同土地利用类型的 NPP 均值看, 耕地>林地>草地>建设用地>未利用地>水域; (3) 流域生物多样性维护功能的一般重要区、中等重要区、重要区和极重要区的数值范围为: 0—0.12、0.12—0.22、0.22—0.47 和 0.47—0.84, 分别占流域总面积的 20.17%、20.14%、19.91% 和 19.85%, 山地区低山丘陵带和绿洲区中部是流域生物多样性维护功能的极重要区; (4) 年平均降水、土壤类型是流域 NPP 空间分异解释力最强的因子; 各因子的影响呈非线性增强及双因子增强作用, 年平均降水与海拔的交互作用最强($q=0.44$), 与年平均太阳总辐射($q=0.42$)的交互作用次之。

关键词: 卡内基-艾姆斯-斯坦福方法模型(CASA); 植被净初级生产力(NPP)时空变化; 地理探测器; 环境驱动机制; 生物多样性维护功能; 玛纳斯河流域

Spatio-temporal change of net primary productivity and the evaluation of the importance of biodiversity maintenance functions in Manas River Basin

HE Ying¹, MA Songmei^{1,*}, ZHANG Lin¹, ZHANG Yunling², HE Lingyun¹

1 Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Key Laboratory of Arid Land Landscape Ecology, Xinjiang Production and Construction Corps Key Laboratory of Oasis Town and Mountain-basin System Ecology, College of Science, Shihezi University, Shihezi 832000, China

2 General Grassland Station of Xinjiang, Urumqi 830049, China

Abstract: Based on net primary productivity (NPP), the evaluation of the importance of biodiversity maintenance functions in arid watershed can provide a scientific basis for ecological security construction. Based on the MODIS13Q1 data and environmental data of the Manas River Basin, this study used the CASA model to estimate the vegetation NPP in the Basin from 2001 to 2020, and combined terrain factors to construct an evaluation model for the importance of biodiversity maintenance functions in the Basin. Effects of factors such as soil type on the spatial heterogeneity of the NPP in the watershed were analyzed by GeoDetector. The results show that: (1) in the past 20 years, the average NPP of vegetation in the basin has shown an upward trend, with the high values were concentrated in the low hilly belt of mountainous area and the central of oasis area, and the low-value areas were distributed in the desert ecological area; (2) From the average NPP

基金项目: 国家自然科学基金项目(41561007, 41261011); 草原生态修复治理补助项目(XJCYZZ202007)

收稿日期: 2022-01-19; **网络出版日期:** 2023-02-13

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

value of different land use types in the Basin, the order was the cultivated land>forest land>grass land>construction land>unused land>water area; (3) The numerical ranges of the general important area, medium important area, important area and extremely important area of the biodiversity maintenance function of the basin are: 0—0.12, 0.12—0.22, 0.22—0.47 and 0.47—0.84, accounting for 20.17%, 20.14%, 19.91% and 19.85% of the total area of the Basin. The central part of the oasis area and the low mountain and hilly belt of the mountain area are extremely important areas for the maintenance of biodiversity in the Basin; (4) The annual average precipitation and soil type are the factors with the strongest explanatory power of spatial differentiation of NPP in the Basin. The effects of natural factors on NPP in the Basin showed nonlinear enhancement and two-factor enhancement, with the interaction between annual average precipitation and altitude being the strongest ($q=0.44$), followed by the interaction with the annual average total solar radiation ($q=0.42$).

Key Words: Carnegie-Ames-Stanford Approach (CASA); NPP temporal-spatial change; geographic detector; environment driven mechanism; biodiversity maintenance function; Manas River Basin

近年来,受气候变化和人类活动的双重影响,生物多样性遭受空前威胁,严重影响到生态系统多种服务功能的发挥近年来。因此,现阶段国内外生物多样性评价研究发展迅速,评价对象包括基因、物种和生态系统等多个层次,评价的尺度包括市级、省级和国家级甚至全球尺度。生物多样性的维护功能重要性评价,是指各类生物与生存环境所构成的复杂系统的多样性在基因维持、物种维护及生态系统保护等方面所发挥的积极作用^[1]。区域尺度生物多样性维护功能评估,有助于了解生物多样性现状和提高生物多样性维护的有效性,进而为区域自然保护区建设和生态安全格局构建提供科学依据^[2-3]。科学地评价区域生物多样性维护功能的重要性也是生态保护红线划定过程中的重要环节,是区域生态安全的重要保障^[4]。生态系统服务与人类福祉息息相关,并且很大程度上受生物多样性变化的影响^[5]。例如,草地生态系统为人类提供植被净初级生产力和水土保持等服务功能,成为人类直接或间接获得生态服务价值的物质基础。但是,受人类活动与自然因素的干扰,植物群落多样性发生改变,导致草地生态系统结构和功能发生变化,进而造成维持生态过程所必需的生态功能下降甚至丧失。因此,开展生物多样性维护功能重要性评价研究,可为生物多样性保护提供科学依据,也助于深入理解区域生态系统的多功能性和服务能力。

植被净初级生产力(NPP),是指植物在单位时间和单位面积上所产生的有机干物质总量,是生物地球化学碳循环的关键环节,植被 NPP 的时空分布对生物多样性的维护有着重要的意义^[6]。根据《生态保护红线划定指南》,生物多样性维护功能的重要性评估主要有净初级生产力法(NPP)和物种分布模型法,其中 NPP 法可以动态监测区域植物的生长状况,对碳循环和全球气候变化研究也起着重要的辅助作用^[7]。但是,目前,基于植被 NPP 的生物多样性维护功能重要性评价研究较少,呈一定地域特征,例如,基于植被 NPP、气候和地形等因子构建的广西喀斯特区生物多样性维护功能定量评价模型,分析了生物多样性维护功能空间分布特征^[8];基于 NPP 的河南省黄河流域生物多样性维护功能重要性评价,表明研究区森林生态系统对生物多样性维护起重要作用^[2]。基于 NPP、生境质量指数等因子从县域尺度构建了南漳县生物多样性遥感评估体系^[9]。上述研究基于 NPP 法定量评价了区域生物多样性的维护功能重要性,为区域生态环境安全建设和生态保护红线划定提供理论与决策依据。干旱区流域生态系统脆弱而敏感,土地结构变化周期短,生物多样性更宜受人类活动和自然条件变化的影响。然而,针对干旱区的植被 NPP 动态演变及生物多样性维护功能重要性评价相关的研究还较缺乏,这限制了对干旱区生态系统服务功能动态变化的系统认知。

玛纳斯河流域地貌类型自南向北依次为山地、山前倾斜平原和沙漠,属于典型的山地-绿洲-荒漠复合生态系统。流域具有显著的生态垂直分异特征,根据流域大地貌类型,自南向北可将流域划分为天山区、绿洲区和荒漠生态区 3 个分区^[10]。近些年,流域人工绿洲不断扩张、大量耕地和草地被侵占,不合理的土地利用导致耕地盐渍化、草地退化和景观破碎化等一系列生态环境问题,造成流域生态服务功能下降,可持续发展受到了严重威胁^[11-12]。开展玛纳斯河流域生物多样性维护功能重要性评价对流域生态环境的保护和生态可持续

建设具有重要的意义。目前,玛纳斯河流域 NPP 的相关研究仅有 2013 年流域 NPP 及其年内变化的估算分析,研究表明流域 NPP 随海拔上升而呈下降趋势^[13]。对天山北坡 NPP 的相关研究也仅体现在植被 NPP 时空变化、NPP 与气候的响应方面^[14-15]。这些研究结果科学评价了植被 NPP 的生态演变过程,对理解区域 NPP 的动态演变具有重要的现实意义。然而,近 20 年,玛纳斯河流域 NPP 的时空动态变化如何? 流域 NPP 时空分异的关键环境因子有哪些? 流域生物多样性维护功能重要性及其空间分布特征如何? 这一系列科学问题尚不可知,限制了对流域生态系统服务功能的系统认知,也影响了流域生态安全建设与可持续发展。

本研究以环境保护部国家发展改革委的《生态保护红线划定指南》^[7]为依据,利用遥感、全球定位系统和地理信息系统(3S)技术,基于卡内基-艾姆斯-斯坦福方法模型(CASA)和地理探测器等手段分析玛纳斯河流域 2001—2020 年 NPP 时空变化特征及其环境驱动因素,并基于植被 NPP 量化评估流域生物多样性维护功能的重要性。旨在解决以下科学目标:(1)揭示近 20 年流域植被 NPP 的时空分布及其动态变化特征;(2)利用地理探测器定量分析影响流域 NPP 的环境驱动因子;(3)量化评价流域生物多样性维护功能的重要性。

1 数据与方法

1.1 研究区概况

玛纳斯河流域(43°27'—45°21'N, 85°01'—86°32'E)是新疆最大的绿洲农耕区,也是我国第四大灌溉农业区及全国作物高产区^[16]。年平均气温 4.7—5.8℃,日照时数 2310—2735h,无霜期 147—191d,年降水量 110—200mm。行政区域包括石河子市、玛纳斯县和沙湾县,以及分布在两县境内的新疆生产建设兵团农八师和农六师的农牧兵团。地貌类型自南向北依次为山地、山前倾斜平原和荒漠,属于典型的山地-绿洲-荒漠生态系统,具有显著的生态垂直分异特征(图 1)。

1.2 数据来源与处理

(1)遥感数据:2001—2020 年,MODIS13Q1(V006) 16d 合成,空间分辨率 250m 的植被指数产品数据,来自美国国家航空航天局(NASA)地球观测系统 h23v04 与 h24v04 两个轨道号,共 920 景影像。首先,利用 Modis 重投影工具(MRT)对影像进行拼接、重投影和格式转换等预处理;利用 ENVI 5.3 最大值合成法(MVC)排除云和大气干扰,得到研究区逐月归一化植被指数(NDVI)产品数据。

(2)气象数据:中国气象数据网(<http://data.cma.cn>),选取流域 13 个气象站点 2001—2020 年的月平均气温、月平均降水和月平均太阳辐射数据,利用基于样条函数插值理论的专业气象插值软件 ANUSPLIN^[17],将气象因子数据插值为空间分辨率 250m 的栅格数据。

(3)其他数据:数字高程模型(DEM)数据来源于地理空间数据云(<http://www.gscloud.cn/>)的航天飞机雷达地形测绘使命(SRTM)产品数据,分辨率为 90m,利用 ArcGIS 10.5 提取流域的坡度和坡向数据。本研究所用的第五期全国 1:100 万土地利用数据来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),2000 年、2005 年、2010 年、2015 年和 2020 年,分辨率为 1km,结合流域土地利用现状重分类为林地、草地、耕地、水域、建设用地和未利用地 6 类;1995 年 1:100 万中华人民共和国土壤数据,来自中国科学院资源环境科学数据中心(<http://www.resdc.cn/>),分辨率为 1km。将所有数据统一投影坐标系为 WGS-1984-Albers,空间分辨

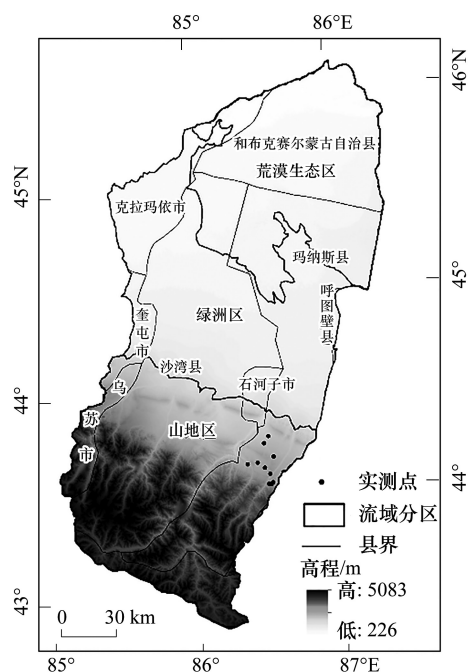


图 1 玛纳斯河流域示意图及植被地上生物量实测点
Fig.1 Sketch map of Manas River Basin and the measured points of vegetation aboveground biomass

率 250m。

1.3 研究方法

1.3.1 植被 NPP 估算

CASA 是基于过程的遥感模型,耦合了生态系统生产力、土壤碳和氮通量,由网格化的气候、辐射、土壤和遥感植被指数数据集驱动^[18],以植被吸收的光合有效辐射 APAR (MJ/m²)和光能转化率 ε (gC/MJ)两个变量估算 NPP,NPP 估算公式为:

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

式中, x 为像元的空间位置, t 为时间(月)。本研究中,APAR(x,t)为像元 x 在 t 月的植被吸收的光合有效辐射, $\varepsilon(x,t)$ 为像元 x 在 t 月的实际光能利用率。APAR 计算公式:

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

式中,SOL(x,t)为太阳总辐射(MJ/m²),FPAR(x,t)表示 x 在 t 月的植被冠层对入射光合有效辐射的吸收比例,常数 0.5 是植被所吸收的太阳有效辐射量占 SOL 的比例系数。

理想状态下的植被最大光能利用率 $\varepsilon_{\max}$,计算公式如下:

$$\varepsilon(x,t) = T_{e1}(x,t) \times T_{e2}(x,t) \times W_e(x,t) \times \varepsilon_{\max} \quad (3)$$

式中, $T_{e1}(x,t)$ 、 $T_{e2}(x,t)$ 为温度因子, $W_e(x,t)$ 为水胁迫因子。

除最大光能利用率外,估算植被 NPP 还需要不同植被类型的 NDVI 和比值植被指数(SR)的最大值与最小值,本研究借鉴朱文泉等对中国不同植被类型实测数据计算的参数进行 NPP 估算^[19]。

1.3.2 NPP 精度检验方法

均方根误差(RMSE)能够很好的反映出实测值与模拟值之间的偏差。利用均方根误差作为流域生物量模型精度的评价指标。其中,RMSE 计算公式为:

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2} \quad (4)$$

式中, y_i 代表实测的生物量, $\hat{y}_i$ 代表估算的生物量, n 为实测生物量个数。

1.3.3 NPP 动态变化趋势分析

本研究采用一元线性回归逐像元的分析流域 2001—2020 年 NPP 的动态变化趋势,公式为:

$$\theta_{\text{Slope}} = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n NPP_i \sum_{i=1}^n i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - (\sum_{i=1}^n i)^2} \quad (5)$$

式中, θ_{Slope} 代表 NPP 变化趋势值, n 为研究年数($n=20$), i 代表年序号, NPP_i 表示第 i 年的 NPP 值。当 Slope > 0 ,表示 NPP 为增长趋势,且数值越大 NPP 增加越明显;反之,表示 NPP 呈减少趋势。

为了进一步分析各像元点模拟趋势的显著性,利用 Mann-Kendall 检验的 Z 值进行流域 NPP 变化趋势的显著性检验。给定显著性水平 α ,当 $|Z| \geq Z_{1-\alpha/2}$,就认为时间序列数据存在显著性变化趋势;当 $Z > 0$ 时,该序列呈上升趋势,当 $Z < 0$ 时,表明为下降趋势。本文取 $\alpha = 0.05$,临界值 $Z_{1-\alpha/2} = \pm 1.96$,当 Z 的绝对值大于 1.65、1.96 和 2.58 时,分别表示通过置信度为 90%、95%、99% 显著性检验。

1.3.4 NPP 变异系数分析

变异系数(CV),是通过计算时间尺度上变量间的波动情况,反映区域 NPP 变异幅度的大小。本研究基于变异系数进一步分析流域 2001—2020 年植被 NPP 的波动情况。公式为:

$$CV = \frac{S}{\bar{x}} \quad (6)$$

式中, CV 为变异系数, S 为流域需要分析的时间序列(2001—2020)的标准差; $\bar{x}$ 为 NPP 平均值。

1.3.5 地理探测器

(1) 指标构建与信息提取

探测自然因子对流域 NPP 的影响,植被 NPP 作为因变量,分别选取 2001—2020 年的年平均气温(X1)、年平均降水(X2)、年平均太阳总辐射(X3)和年平均湿度(X4)的平均值,海拔(X5)、坡度(X6)、坡向(X7)和 1995 年土壤类型数据(X8)共 8 个涵盖气候、地形和土壤的自然因子作为自变量。

本研究将坡向数据划分为 9 类:平坡、北坡、东北坡、东坡、东南坡、南坡、西南坡、西坡和西北坡。根据区域特征及水土保持坡度分级标准(GB_T15772—1995),将坡度划为 6 类:微坡、较缓坡、缓坡、较陡坡、陡坡和急陡坡。将土壤类型数据按土纲分为:淋溶土、半淋溶土和钙层土等 13 类。

(2) 因子探测和交互作用探测

地理探测器是探测地理事物的空间分异性,并揭示其背后驱动力或影响因素的一组统计学方法,本研究利用因子探测和交互作用探测分析流域 NPP 与各自然因子的作用。

因子探测分析明确每个影响因子对 NPP 空间分异的解释程度, q 值越高的影响因子,对 NPP 变化的影响越大。

交互探测识别不同影响因子对 NPP 空间分异的交互作用,分析因子 X1 和 X2 对 NPP 是单独起作用还是交互影响,评估两因子共同作用时对 NPP 空间分异的解释力,将作用类型划分为 5 类:非线性减弱、单因子非线性减弱、双因子增强、独立、非线性增强^[20]。

1.3.6 流域生物多样性维护功能定量评价模型构建

本研究基于 NPP 法评价流域生物多样性维护功能的重要性,NPP 法是基于生物多样性维护服务能力指数评估指标划定生物多样性的维护功能^[21]。生物多样性维护服务能力指数计算公式为:

$$S_{\text{bio}} = \text{NPP}_{\text{mean}} \times F_{\text{pre}} \times F_{\text{tem}} \times (1 - F_{\text{alt}}) \quad (7)$$

式中, S_{bio} 为生物多样性维护功能指数; NPP_{mean} 为多年植被净初级生产力平均值; F_{pre} 为年平均降水; F_{tem} 为年平均气温; F_{alt} 为海拔。

首先,将上述因子进行归一化处理,采用分位数法对流域生物多样性维护功能等级进行划分^[8],将维护功能划分为:极重要、重要、中等重要和一般重要 4 个等级。分位数算法为:当随机变量 X 的概率密度函数为 $P(X)$,设概率 α ($0 \leq \alpha \leq 1$),当变量 x_{α} 满足 $P(X \geq x_{\alpha}) = \alpha$,则 x_{α} 为 X 分布上的分位数。

1.3.7 野外生物量实测

根据本研究,2016 年 7—8 月在流域玛纳斯县清水河乡、塔西河乡和早卡子滩乡共设置了 19 个实测样地(图 1),考虑不同样地的植被类型、地形、高程和土壤特征,在每个样地各设置了 3 个 1m×1m 的样方。野外称取样地样方内的样本鲜重,室内烘干处理得到样本干重数据。研究将 3 个样方的平均值作为每个样地的实测生物量,然后根据样方内实测生物量与 NPP 之间的转换系数 0.475 得到实测 NPP 数据,最后对实测 NPP 数据与本研究模型估算的 NPP 数值进行分析。

2 研究结果

2.1 玛纳斯河流域 NPP 的时空分布分析

本研究基于野外实测验证对 CASA 模型的估算精度进行准确性评价(图 2)。首先,将本文 CASA 模型模拟的 NPP 与玛纳斯县设置的 19 个实测样地(图 1)的植被地上生物量实地调查数据进行对比分析。研究表明,模型的模拟值与 NPP 实测值基本吻合(斜率 0.745),相关性较高($R^2 = 0.79$, $P < 0.01$),且流域 NPP 实测值与模拟值均方根误(RMSE)为 107.84,表明 CASA 模型模拟结果较为可靠,能够反映流域植被 NPP 的变化。

2001—2020 年,流域 NPP 均值为 $121.31 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,范围为 $95.58—155.82 \text{ gC m}^{-2} \text{ a}^{-1}$,年际变化总体呈上升趋势,其中,最大值和最小值分别出现在 2016 年、2001 年(图 3)。

近 20 年,流域不同土地利用类型 NPP 均值的变化趋势不同(图 4),其中,林地、耕地和草地呈缓慢增长趋势,建设用地和水域呈减少趋势。流域不同土地利用类型的 NPP 年均值大小顺序总体为:耕地>林地>草地>建设用地>未利用地>水域。流域耕地集中分布于绿洲区,NPP 均值高达 355.55—438.72gC m⁻² a⁻¹;林地主要分布于山地区低山丘陵带,NPP 均值为 307.23—496.28gC m⁻² a⁻¹;草地主要分布于和布克赛尔蒙古自治县南部、克拉玛依市中南部及山地区低山丘陵带北侧,NPP 均值 212.08—274.40gC m⁻² a⁻¹(图 4)。

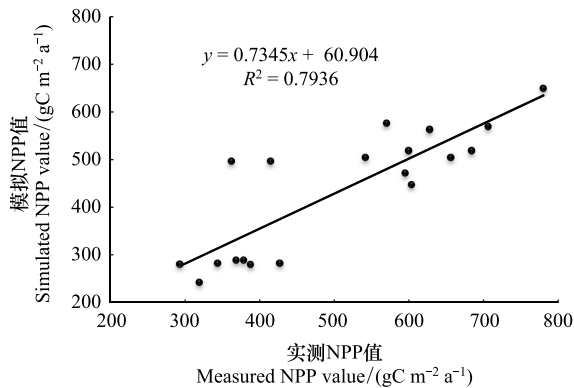


图 2 玛纳斯河流域植被 NPP 的遥感模拟值和实测值的相关性分析

Fig.2 Correlation analysis between simulated and observed vegetation NPP in Manas River Basin

NPP: 植被净初级生产力 Based on net primary productivity

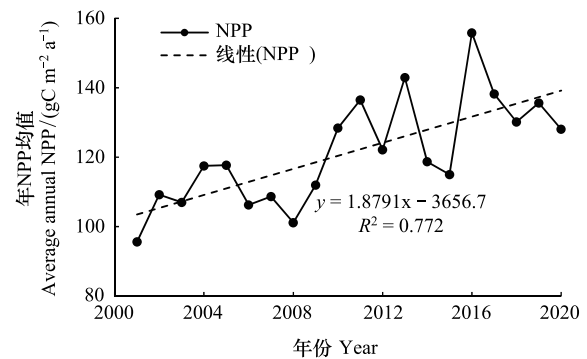


图 3 2001—2020 年玛纳斯河流域植被年均 NPP 变化趋势

Fig.3 Trends of annual average NPP of Manas River Basin during 2001—2020

基于 Mann-Kendall 趋势检验,得到 2001—2020 年流域 NPP 年均值变化趋势 Z 值为 3.14,说明均通过了 99%的显著性检验,表明近 20 年流域 NPP 年均值呈极显著上升趋势。其中,绿洲区植被 NPP 呈显著增加趋势,尤其是绿洲区西部和东部极显著增加趋势最明显;山地区植被 NPP 呈轻微增加趋势,且主要分布于高海拔冰川融水区域;荒漠生态区植被 NPP 呈减少趋势,尤其是玛纳斯尾间湖区域极显著减少特征最明显。

近 20 年,NPP 均值的空间分布特征为:绿洲区是 NPP 高值的集中分布区,且高值分布范围较广;山地区,仅低山丘陵带 NPP 出现最高值,山地区其它区域和荒漠生态区 NPP 最低(图 5)。流域 NPP 空间变化总体处于稳定状态,变异系数变化范围为 0—3.68,NPP 非常稳定的区域占流域总面积的 27.82%,分布于山地区低山丘陵带、石河子市、玛纳斯县和沙湾县周围;NPP 稳定和较稳定区域面积占比 55.97%,主要分布于山地区山前平原和绿洲区西北部;NPP 较不稳定和很不稳定的区域面积占比 16.21%,在和布克赛尔蒙古自治县、玛纳斯尾间湖周围及流域南部高海拔区域呈高度破碎化分布特点(图 5)。

2.2 NPP 与自然因子的地理探测结果分析

因子探测器结果表明,各因子均通过了置信度(P 值 <0.05)检验,各因子对流域 NPP 均值的空间分布存在显著差异。从各因子的解释力分析,年平均降水、土壤类型的解释力均在 0.29 以上,年平均降水对 NPP 的

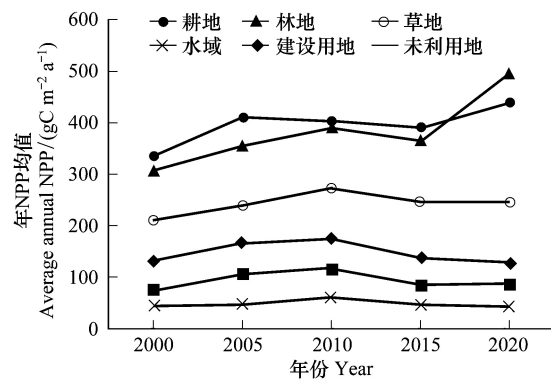


图 4 2001—2020 年玛纳斯河流域不同土地利用类型的 NPP 均值

Fig.4 Mean NPP of different land use types in the Manas River Basin during 2001—2020

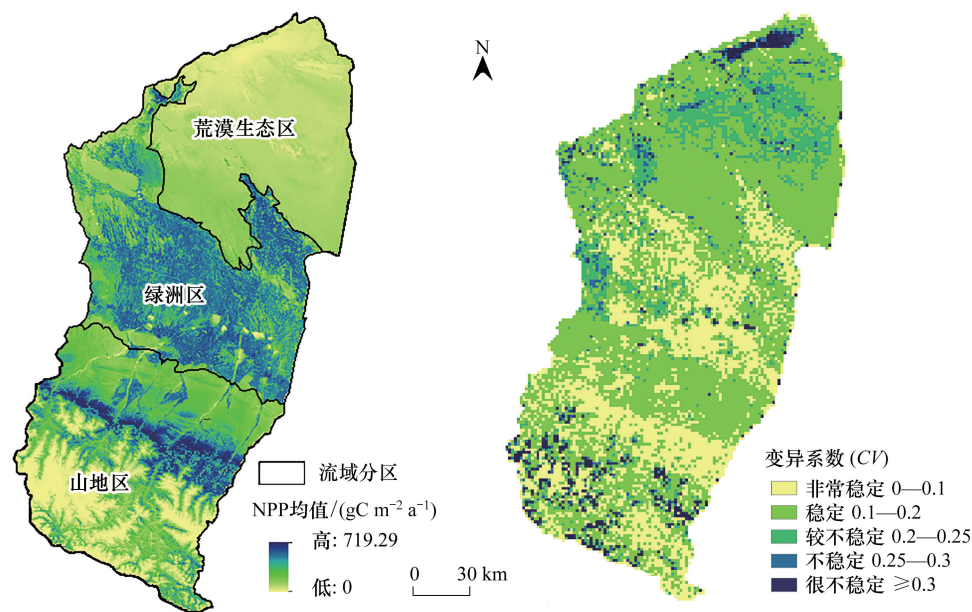


图 5 2001—2020 年玛纳斯河流域植被 NPP 均值及其变异系数的空间分布

Fig.5 Spatial distribution of mean and coefficient of variation of NPP in Manas River Basin during 2001—2020

贡献最大($q=0.35$),与 NPP 的关联性比其它因子均强。年平均湿度、年平均太阳总辐射、海拔和坡向的解释力为 0.10—0.17,是影响 NPP 空间分布的次要因素。年平均气温和坡度的影响相对较小。

因子交互作用探测结果表明,各因子的交互作用对流域 NPP 均值的影响呈非线性增强及双因子增强关系(表 1)。其中,年平均降水与海拔的交互作用最强($q=0.44$),与年平均太阳总辐射($q=0.42$)的交互作用次之。

表 1 交互探测器结果

Table 1 Results of interaction detector

影响因子 Impact factors	X1	X2	X3	X4	X5	X6	X7	X8
X1	0.09							
X2	0.52	0.35						
X3	0.27	0.42 *	0.16					
X4	0.43	0.54	0.45	0.17				
X5	0.17 *	0.44 *	0.25 *	0.43	0.12			
X6	0.21	0.40 *	0.25 *	0.24 *	0.23	0.10		
X7	0.14 *	0.36 *	0.19 *	0.29	0.12 *	0.16	0.05	
X8	0.37 *	0.53	0.41 *	0.57	0.32 *	0.38 *	0.30 *	0.00

* 代表非线性增强关系;无 * 代表双因子增强关系;X1: 年平均气温 Annual average temperature;X2: 年平均降水 Annual average precipitation;X3: 年平均太阳总辐射 Annual average total solar radiation;X4: 年平均湿度 Annual average humidity;X5: 海拔 Altitude;X6: 坡度 Slope;X7: 坡向 Aspect;X8: 土壤类型 Soil type

2.3 玛纳斯河流域生物多样性的维护功能评价分析

流域生物多样性维护功能一般重要区、中等重要区、重要区和极重要区的数值范围为: 0—0.12、0.12—0.22、0.22—0.47 和 0.47—0.84(图 6)。其中,极重要区综合指数 0.47—0.84,主要分布于山地区低山丘陵带和绿洲区中部,面积占流域总面积的 19.85%,分别占山地区和绿洲区面积的 6.5%和 51.28%,土地利用类型以林地、草地和耕地为主,生物多样性维护功能重要性较高。重要区综合指数 0.22—0.47,主要分布于山地区低山丘陵带北侧、绿洲区西南部和西北部,面积占流域总面积的 19.91%,占山地区和绿洲区面积的 25.91%和

13.29%,土地利用类型以草地和耕地为主,生物多样性维护功能重要性次之。中等重要区 0.12—0.22,主要分布于荒漠生态区南部和山地区西北部,占流域总面积的 20.14%,占山地区和荒漠生态区面积的 24.25%和 21.93%,土地利用类型以草地为主,生物多样性维护功能较好。一般重要区综合指数 0—0.12,集中分布于荒漠生态区中部与东部,占流域总面积的 20.17%,占荒漠生态区面积的 53.07%,土地利用类型以草地为主。因此,绿洲区和山地区低山丘陵带以北是流域生物多样性维护功能较重要的区域。

3 讨论

3.1 玛纳斯河流域 NPP 的时空变化特征

近 20 年,玛纳斯河流域植被 NPP 均值呈波动上升趋势,空间上呈南高北低的分布格局(图 5),流域生态系统南北垂直分异显著,造成流域 3 个分区植被 NPP 均值的空间异质性较强。流域不同土地利用类型植被 NPP 差异显著,相关研究也表明不同植被类型在同一气候条件下持有的生产能力存在较大差异^[22]。山地区 NPP 均值较高,这可能是由于天山冰川面积不断缩小^[23],冰川融水补给促使流域山区水源充足,植被生长潜力大。但在 2016—2020 年流域 NPP 呈明显下降趋势,可能与 21 世纪初西北干旱区尤其新疆气候从暖湿化转为暖干化的特征更加明显有关^[24]。相关研究也表明,1961—2015 年天山山脉、阿勒泰山脉和塔城山区夏季植被 NPP 达到最大值^[25]。

3.2 玛纳斯河流域 NPP 的环境驱动因素分析

干旱区流域植被对水分变化敏感,由于气温升高以及蒸发量增加,土壤水分常处于亏缺状态,这使得水分条件成为植被生长的关键限制因素^[26]。年平均降水和土壤类型是影响流域植被 NPP 时空分异的关键因子,尤其降水是流域 NPP 空间异质性的决定性气候因素。

研究表明,新疆地区在未来近 100 年中,将呈现气温升高、降水增加和干燥度升高的特征^[27]。土壤理化性质深刻影响着植被对养分的有效吸收,限制植被生长及其地理分布,流域不同土壤类型的 NPP 均值存在较大差异,其中,山地区林地 NPP 相对较高,主要是因为该区为半淋溶土,而半淋溶土具有较强的土壤保肥能力,能够为林地发育提供较好的条件;流域荒漠生态区土壤类型为西北盐壳,土壤肥力较低导致 NPP 较低。

各自然因子对流域植被 NPP 的影响呈非线性增强及双因子增强作用,与单一自然因子相比,因子两两之间的协同作用均增强了其对流域植被 NPP 空间分异的解释能力。年平均降水与海拔具有最强的交互作用($q=0.44$),说明海拔变化显著增加了年平均降水对流域 NPP 空间分异的解释力,比如,荒漠生态区与山地区植被 NPP 均值差异显著。另外,年平均降水与年平均太阳总辐射对植被 NPP 的异质性也具有较高的交互作用,海拔高度不同的区域降水、气温和太阳辐射等存在显著差异,进而对植被类型以及植被分布格局产生重要影响。

3.3 玛纳斯河流域生物多样性维护功能重要性评价

玛纳斯河流域生物多样性维护功能重要性空间上呈随着不同分区植被类型地域性变化而变化的分布特征(图 6),流域属于山地-绿洲-荒漠生态系统,在很大程度上导致生物多样性维护功能重要性存在显著的空间差异。

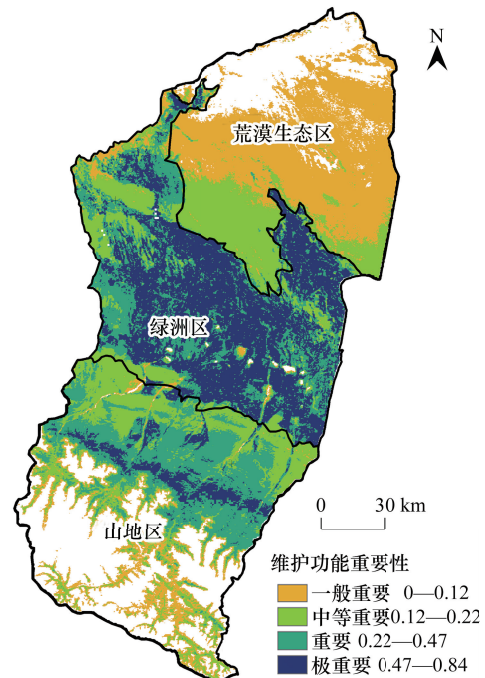


图 6 2001—2020 年玛纳斯河流域生物多样性维护功能重要性评价

Fig.6 Assessment of the importance of biodiversity conservation in the Manas River Basin during 2001—2020

绿洲区中部和山地区低山丘陵带是流域生物多样性维护功能的极重要区,绿洲区西南部和山地区山前平原是生物多样性维护功能的重要区(图6)。流域绿洲区是我国第四大灌溉农业区,耕地 NPP 值最高,山地区林地和草地也是流域生物多样性维护的关键土地利用类型图表,相关研究也表明耕地对区域可持续发展提供重要的生态服务功能,可缓解气候变化带来的风险^[28]。而且,绿洲区具有蘑菇湖水库、大泉沟水库、夹河子水库和跃进水库等,为生物多样性维持提供了重要的生态保障。山地区低山丘陵带生物多样性维护功能指数高达 0.47—0.84(图6),尤其是北纬 44°左右沿纬线延伸的林地与草地 NPP 均值较高,该区主要优势种为天山雪岭云杉,郁闭灌木林主要为梭梭、白梭梭、胡杨和西伯利亚泡泡刺等^[29],对生物多样性的维持具有极其重要的作用。草地是山地区关键植被类型之一,NPP 值仅次于林地,草地在调节气候、涵养水源及生物多样性保育等方面均发挥着极其重要的生态服务功能^[30—31]。流域北部为古尔班通古特沙漠,荒漠生态区生物多样性维护功能指数主要在 0—0.22(图6),该区植被 NPP 贡献较高的可能主要是短命植被和旱生植被,对区域防风、沙面稳定和生物多样性保育发挥着不可替代的生态作用^[31]。近些年,新疆气候“湿干转折”对生物多样性的维护可能是不利信号,将会增加生物多样性维护功能的不稳定性,维护功能的重要区可能发生缩减或植被演替。

4 结论

(1)2001—2020 年,玛纳斯河流域植被 NPP 年际变化总体呈上升趋势,高值区集中于山地区低山丘陵带和绿洲区中部,低值区分布于北部荒漠生态区。流域不同土地利用类型的 NPP 年均值:耕地>林地>草地>建设用地>未利用地>水域。年平均降水与土壤类型是影响流域植被 NPP 时空分异的主导因子。

(2)流域生物多样性维护功能重要性空间上存在显著性差异,一般重要区、中等重要区、重要区和极重要区的数值范围为:0—0.12、0.12—0.22、0.22—0.47 和 0.47—0.84。绿洲区中部和山地区低山丘陵带是流域生物多样性维护功能的极重要区,绿洲区西南部和山地区山前平原是生物多样性维护功能的重要区。

参考文献(References):

- [1] 马克平. 生物多样性保护主流化的新机遇. 生物多样性, 2015, 23(5): 557-558.
- [2] 刘天可, 肖军仓. 基于净初级生产力的河南省黄河流域生物多样性维护功能重要性评价. 河南科技, 2020, (16): 143-145.
- [3] 徐琬莹, 田建茹, 邵蕊, 李伟娜, 左华. 生物多样性保护优先区域划定方法研究——以青岛为例. 生态经济, 2019, 35(6): 224-229.
- [4] 杨邦杰, 高吉喜, 邹长新. 划定生态保护红线的战略意义. 中国发展, 2014, 14(1): 1-4.
- [5] 杨渺, 肖赓, 欧阳志云, 江腊海, 侯鹏. 四川省生物多样性与生态系统多功能性分析. 生态学报, 2021, 41(24): 9738-9748.
- [6] 左婵, 王军邦, 张秀娟, 芦光新, 叶辉, 王春雨, 张志军, 李英年. 三江源国家公园植被净初级生产力变化趋势及影响因素研究. 生态学报, 2022, (14): 1-15.
- [7] 环境保护部, 国家发展改革委. 生态保护红线划定指南. 北京: 环境保护部, 国家发展改革委, 2017.
- [8] 莫建飞, 莫伟华, 陈燕丽. 基于净初级生产力的广西喀斯特区生物多样性维护功能评价. 科学技术与工程, 2019, 19(29): 371-377.
- [9] 杨海军, 李营, 洪运富, 朱海涛. 县域尺度多样遥感监测与评价研究. 遥感技术与应用, 2015, 30(6): 1138-1145.
- [10] 樊自立, 叶茂, 徐海量, 乔木, 张青青, 张鹏. 新疆玛纳斯河流域生态经济功能区划研究. 干旱区地理, 2010, 33(4): 493-501.
- [11] 夏鑫鑫, 朱磊, 杨爱民, 靳含, 张青青. 基于山地-绿洲-荒漠系统的生态系统服务正负价值测算——以新疆玛纳斯河流域为例. 生态学报, 2020, 40(12): 3921-3934.
- [12] 张添佑, 王玲, 王辉, 彭丽, 罗冲. 玛纳斯河流域盐渍化灌区生态环境遥感监测研究. 生态学报, 2017, 37(9): 3009-3018.
- [13] 高军. 天山北坡植被净初级生产力时空分布特征及影响因素分析[D]. 石河子: 石河子大学, 2019.
- [14] 普宗朝, 张山清. 气候变化对新疆天山山区自然植被净第一性生产力的影响. 草业科学, 2009, 26(2): 11-18.
- [15] 周德成, 罗格平, 韩其飞, 尹昌应, 李龙辉, 胡玉昆. 天山北坡不同海拔梯度山地草原生态系统地上净初级生产力对气候变化及放牧的响应. 生态学报, 2012, 32(1): 81-92.
- [16] 范文波, 吴普特, 马枫梅. 膜下滴灌技术生态-经济与可持续性分析——以新疆玛纳斯河流域棉花为例. 生态学报, 2012, 32(23):

7559-7567.

- [17] Wen H Y, Chen F J, Li J, Qiu K J, Wang G. A study on spatial interpolation of temperature in Anhui province based on ANUSPLIN. *Meteorological and Environmental Research*, 2019, 10(2): 51-55, 60-60.
- [18] 田义超, 黄远林, 张强, 陶进, 张亚丽, 黄鸽, 周国清. 北部湾南流江流域植被净初级生产力时空分布及其驱动因素. *生态学报*, 2019, 39(21): 8156-8171.
- [19] 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.
- [20] 王劲峰, 徐成东. 地理探测器: 原理与展望. *地理学报*, 2017, 72(1): 116-134.
- [21] 马孟泉, 张慧, 高吉喜, 鞠昌华, 王延松, 刘德天. 生物多样性维护生态保护红线划定方法对比. *生态学报*, 2019, 39(19): 6959-6965.
- [22] 陈雅敏, 张伟倩, 杨天翔, 赵钢, 王寿兵. 中国不同植被类型净初级生产力变化特征. *复旦学报: 自然科学版*, 2012, 51(3): 377-381.
- [23] 冉思红, 王晓蕾, 罗毅. 多模式预测气候变化及其对雪冰流域径流的影响. *干旱区地理*, 2021, 44(3): 807-818.
- [24] 姚俊强, 毛炜峰, 陈静, 迪丽努尔·托列吾别克. 新疆气候“湿干转折”的信号和影响探讨. *地理学报*, 2021, 76(1): 57-72.
- [25] 黄秉光, 杨静, 黄玫. 近 55 a 新疆植被净初级生产力的时空变化. *沙漠与绿洲气象*, 2018, 12(4): 90-94.
- [26] 张仁平, 郭靖, 张云玲. 新疆草地净初级生产力(NPP)空间分布格局及其对气候变化的响应. *生态学报*, 2020, 40(15): 5318-5326.
- [27] 《气候变化国家评估报告》编写委员会. 气候变化国家评估报告. 北京: 科学出版社, 2007.
- [28] 张建宁, 陈璠亭, 王勇, 张珺, 张鹏, 胡守庚. 北方农牧交错带耕地利用变化对生态系统服务价值影响——以宁夏回族自治区吴忠市为例. *水土保持研究*, 2021, 28(6): 283-291.
- [29] 魏海燕. 浅谈建立玛纳斯河流域中上游湿地自然保护区的重要性. *新疆农垦科技*, 2019, 42(6): 51-52.
- [30] White R P, Murray S, Rohweder M, Prince S D, Thompson K M. *Grassland Ecosystems*. Washington, DC, USA: World Resources Institute, 2000.
- [31] 王雪芹, 蒋进, 雷加强, 张伟民, 钱亦兵. 古尔班通古特沙漠短命植物分布及其沙面稳定意义. *地理学报*, 2003, 58(4): 598-605.