doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2025.01.040

库布其沙漠植被净初级生产力时空演变规律及其气象驱动因素分析

陈皓锐[1,2]　经思思[3,4]　叶苏蒙[3,4]　代天金[3,4]　吴立鹏[1,2]
苗　平[5]　马红丽[5]　吴雨箫[3,4]　陈俊英[3,4]

(1. 中国水利水电科学研究院流域水循环模拟与调控国家重点实验室, 北京 100048;
2. 中国水利水电科学研究院水利研究所, 北京 100048;
3. 西北农林科技大学水利与建筑工程学院, 陕西杨凌 712100;
4. 西北农林科技大学旱区农业水土工程教育部重点实验室, 陕西杨凌 712100;
5. 鄂尔多斯市河湖保护中心, 鄂尔多斯 017000)

摘要: 为探究库布其沙漠植被净初级生产力(Net primary production, NPP)的时空演变规律及其气象驱动因素,利用 2001—2023 年的 MOD17A3HGF NPP 数据,采用趋势分析、稳定性分析、相关分析、重要性分析等研究方法,分析库布其沙漠年均 NPP 的时空变化特征及其与潜在蒸散发、降水量、相对湿度、温度、水汽压亏缺量、风速等影响因素之间的关系。结果表明,2001—2023 年库布其沙漠年均 NPP 为 108.60 g/(m²·a),范围为 75.69 ~134.97 g/(m²·a),整体呈现波动上升趋势。空间上,植被 NPP 主要分布在呼和木独镇西北部、吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部。库布其沙漠地区植被 NPP 总体上为极显著增加趋势,稳定性波动较大,空间变异性显著。未来趋势分析表明,73.58% 植被 NPP 具有反持续性,揭示了未来库布其沙漠植被 NPP 可能出现与当前变化趋势相反的情况。植被 NPP 与温度和降水量呈正相关的像元数占总像元数的比例最高,分别为 90.56% 和 98.07%;植被 NPP 与风速和相对湿度呈负相关的比例最高,达 60.57% 和 75.57%。潜在蒸散发和降水量为影响库布其沙漠植被 NPP 变化的主导因子。库布其沙漠植被 NPP 存在较强的时空异质性。本研究为荒漠生态系统的管理和可持续发展提供了科学依据。

关键词: 库布其沙漠; 净初级生产力; 时空变化; 相关系数; 气象驱动因素

中图分类号: S288　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2025)01-0424-10　　**OSID**:

Analysis of Spatial-temporal Evolution and Meteorological Driving Factors of Vegetation Net Primary Productivity in Kubuqi Desert

CHEN Haorui[1,2]　JING Sisi[3,4]　YE Sumeng[3,4]　DAI Tianjin[3,4]　WU Lipeng[1,2]
MIAO Ping[5]　MA Hongli[5]　WU Yuxiao[3,4]　CHEN Junying[3,4]

(1. *State Key Laboratory of Simulation and Regulation of Water Cycle in River Basin, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *China*
2. *Institute of Water Resources, China Institute of Water Resources and Hydropower Research, Beijing* 100048, *China*
3. *College of Water Resources and Architectural Engineering, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling* 712100, *China*
4. *The Key Laboratory of Agricultural Soil and Water Engineering in Arid and Semiarid Areas, Ministry of Education, Northwest A&F University, Shaanxi, Yangling* 712100, *China*
5. *Ordos River and Lake Protection Center, Ordos* 017000, *China*)

Abstract: To explore the spatio-temporal evolution patterns and meteorological driving factors of net primary productivity (NPP) in the Kubuqi Desert, MOD17A3HGF NPP data from 2001 to 2023 were used. Methods, including trend analysis, stability analysis, correlation analysis, and importance analysis were applied to examine the spatial and temporal variations in annual average NPP and its relationship with influencing factors such as potential evapotranspiration, precipitation, relative humidity,

收稿日期: 2024-08-20　修回日期: 2024-10-11
基金项目: 鄂尔多斯市水利科技重点专项(ESKJ2023-001)
作者简介: 陈皓锐(1984—),男,正高级工程师,博士,主要从事灌区水循环模拟与调控研究,E-mail: chenhr@iwhr.com

temperature, vapor pressure deficit, and wind speed. The results showed that the annual average NPP of the Kubuqi Desert from 2001 to 2023 was 108.60 g/(m^2·a), ranging from 75.69 g/(m^2·a) to 134.97 g/(m^2·a), with an overall upward trend showing fluctuations. Spatially, vegetation NPP was primarily distributed in the northwestern part of Huhe Mud Town, the northern part of Jirigalangtu Town, and the northeastern and southern parts of Duguittara Town. The vegetation NPP of the Kubuqi Desert generally exhibited a highly significant increasing trend, with considerable stability fluctuations and significant spatial variability. Future trend analysis suggested that 73.58% of vegetation NPP may exhibit an anti-persistent trend, indicating potential future changes opposite to current trends. The positive correlation between vegetation NPP and temperature and precipitation accounted for 90.56% and 98.07% of total pixels, respectively. The NPP of vegetation had the highest negative correlation with wind speed and relative humidity, reaching 60.57% and 75.57%. Potential evapotranspiration and precipitation were identified as the main factors influencing changes in NPP in the Kubuqi Desert. The research result can provide a scientific basis for the management and sustainable development of desert ecosystems.

Key words: Kubuqi Desert; net primary productivity; spatial-temporal variation; correlation coefficient; meteorological driving factor

0　引言

净初级生产力是指绿色植物通过光合作用产生的有机质总量减去植物自身呼吸消耗的有机质后的净累积量[1-3]。植被净初级生产力不仅是生态系统内部能量流动和生物量累积的关键要素,同时作为陆地生态系统中大气二氧化碳累积的指标,也是碳循环、碳收支和全球变化的主要决定因素以及评价生态系统功能的重要指标[4-6]。

沙漠生态系统是陆地生态系统的重要组成部分[7],约占陆地面积的1/3,监测沙漠植被 NPP 的变化对于评估生态系统质量和功能至关重要[8]。库布其沙漠位于黄河重点生态区,因此,探究沙漠湿地生态系统植被 NPP 的时空演变规律及其驱动因素对于筑牢我国北方重要生态安全屏障,确保我国西部乃至全国生态安全具有重要意义。早期的植被 NPP 主要通过实测资料[9]来进行估算,基于实测资料估算 NPP 所获得的试验数据通常较为精确,但实地观测往往只能覆盖有限的区域和时间,难以全面反映大尺度或长时间的变化。为了准确反映时空格局,随后有研究者通过模型估算 NPP,NPP 估算模型大致可分为统计模型、参数模型和过程模型3类[10]。目前基于光利用效率的模型(如 CASA[11]、GLOPEM 和 TURK)由于参数简单易得、具有一定机理性且遥感介入优势明显等特点,被广泛应用于大尺度的植被 NPP 估算研究。通过模型估算 NPP 有效解决了实地测量的缺点并且可以根据不同的生态系统特征来调整模型参数和结构,适应性较强。随着遥感技术的发展与利用,遥感影像被广泛应用于各个研究领域,获取高时空地物信息。遥感数据具有覆盖范围广、时间序列长等特点,已经成为估算植被 NPP 时空演变特征及其驱动因素的重要手段[12-13]。MODIS 数据集因其具有高时间分辨率、大覆盖范围和免费数据获取等优点,已成为模拟和估算区域植被 NPP 的主要遥感数据源之一[14]。近年来,MOD17A3 数据产品在区域和全球碳循环研究中得到了广泛验证与应用[15],越来越多的学者基于 MODIS 数据集在全国[16]和区域[17]尺度上进行了长时间序列植被 NPP[18]的时空演变规律及驱动因素分析,研究了不同因子与植被 NPP 的相关性,验证了降水量[19]、温度[20]、土地覆被类型[21]、人类活动[22]等因素对植被 NPP 的影响。经过验证,该遥感数据产品模拟的植被 NPP 精度较好,对于分析不同地区植被 NPP 的时空演变格局和影响因素具有较高可信度。

库布其沙漠作为中国第七大沙漠[23],生态系统较为脆弱,现有沙漠湿地沙化、湖泊湿地萎缩趋势未得到缓解,仍是京津地区重要的风沙源之一[24-25]。库布其沙漠是国家“两屏三带”生态安全战略中黄河重点生态区的重要组成部分,目前对于该区域的植被 NPP 研究内容相对较少,对于其生态系统变化的机制机理也较为模糊。因此,本文基于近 20 年库布其沙漠的 NPP 数据,利用趋势分析、稳定性分析、相关分析、重要性分析等研究方法,分析库布其沙漠植被 NPP 的时空演变规律以及气象驱动因素。以期为库布其沙漠湿地提供生态安全保障,促进库布其沙漠区域生态修复和社会经济可持续发展,为沿黄流域库布其沙漠湿地生态区生态环境可持续发展提供理论基础和技术支撑。

1　材料与方法

1.1　研究区概况

研究区位于内蒙古自治区鄂尔多斯市杭锦旗库

布其沙漠北侧,黄河“几”字湾南侧[26]。研究区所处的杭锦旗属于中温带大陆性气候[27],常年干旱少雨,冬季漫长而寒冷,夏季温和而短促。春秋气温变化剧烈,春季风沙天气多,气候干燥,蒸发量大,日照充足。全旗多年平均气温为 5.5 ~ 8.0℃,自西北向东南递减;多年平均降水量为 214.4 mm,自东南向西北递减,地区分布极不均匀;年均蒸发量为 1 690 mm。

研究区地势北部较低,西南部较高,高程为 999 ~ 1 491 m(图 1a)。附近地形地貌可分为黄河冲湖积平原和风积沙地地貌,土壤质地主要为壤土,以粉砂质壤土和砂质壤土为主,其中库布其沙漠主要是风沙土,土体胶结松散,土层分化不明显,土壤贫瘠,不宜耕作。土地覆被类型主要为沙地,其次为草地(图 1b)。

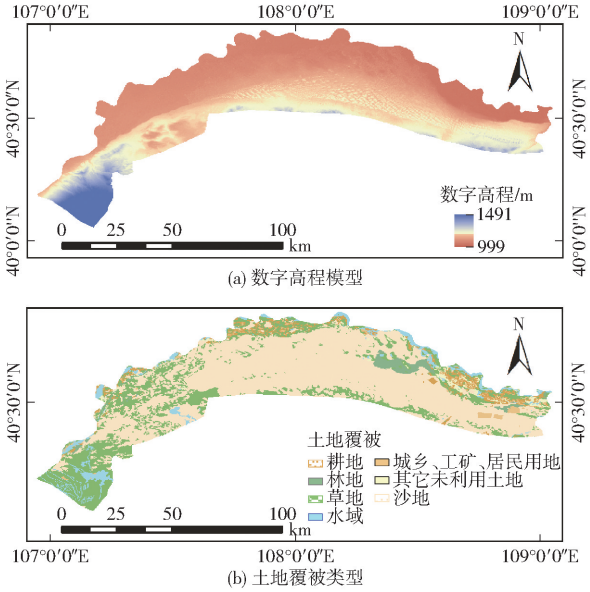

图 1 研究区概况

Fig. 1 Overview of study area

自 2014 年开始,修建引水渠将黄河凌汛和伏汛水引入库布其沙漠北缘,使其形成了 90.84 km^2 水沙植被相连的生态恢复区[28]。

1.2 数据获取与处理

1.2.1 遥感数据

年均 NPP 数据选取 2001—2023 年 MODIS 卫星的 MOD17A3 数据产品,通过 Google Earth Engine(https://code.earthengine.google.com)获取。MOD17A3 数据经过镶嵌、投影、转换等预处理。数字高程模型数据来源于地理空间数据云(http://www.gscloud.cn),土地覆被类型数据来源于中国科学院资源环境科学与数据中心(http://www.resdc.cn)。

1.2.2 气象数据

气温、降水量、风速以及大气湿度数据均来源于国家青藏高原科学数据中心[29](http://data.tpdc.ac.cn)提供的 2003—2020 年中国逐月平均气温数据集、逐月降水量数据集、全球 10 m 风速栅格数据集和高分辨率大气湿度指数数据集,空间分辨率为 0.008 333 3°(约 1 km),数据格式为 NETCDF,即.nc 格式。使用 R 语言读取.nc 格式的原始数据,并进行年均气温、年均降水量、年均风速、年均大气湿度合成。潜在蒸散发数据来源于蒙大拿大学数值地形动力学模拟小组提供的 1 km MOD16A2 PET 数据集,由 GEE 平台下载并合成为年尺度数据。

由于本研究的数据来源不一及数据格式差异较大等问题,故将所有数据统一为地理坐标系,经重采样按掩膜提取后得到时间分辨率为 1 年、空间分辨率为 500 m 的栅格数据。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析

Theil – Sen Median 分析和 Mann – Kendall(M – K)显著性检验是 2 种常用于长时间序列数据中趋势分析的统计方法[30]。本研究中将 2 种方法结合使用,来评估植被 NPP 在长时间序列中的趋势及显著性。

Theil – Sen Median 分析通过计算所有数据点之间的斜率,取斜率的中位数作为趋势的估计值,因其具有较好的鲁棒性,对于数据中的异常值不敏感,适用于各种类型的数据。当变化趋势 $\beta>0$ 时,表明沙漠年 NPP 均值随时间呈上升趋势,当变化趋势 $\beta<0$ 时,则呈下降趋势。

Mann – Kendall 显著性检验是基于数据排序,通过比较相邻像元数据来检测数据是否存在趋势的非参数统计检验方法,可以用来判断数据中的趋势是否具有统计学显著性。Z 为标准正态分布统计值,在 95% 置信水平下,$|Z|\geq 1.96$;在 99% 置信水平下,$|Z|\geq 2.58$。趋势划分为 5 类:极显著增加、显著增加、不显著变化、显著下降和极显著下降。

1.3.2 稳定性分析

变异系数是一种用来衡量数据离散程度的统计量[31]。通过 Matlab 计算出基于像元的 2001—2023 年库布其沙漠地区植被 NPP 的变异系数 C_v,来反映沙漠 NPP 在长时间序列上的稳定性。C_v 较小,说明 NPP 随时间的波动最小且稳定。相反,C_v 越大,表明数据波动程度高,稳定性低。

1.3.3 未来趋势分析

Hurst 指数 H 可以在时间序列上评价数据变化趋势的可持续性[32]。本研究采用重标极差分析法(R/S)来计算 Hurst 指数。H 取值范围为[0,1],当 $0\leq H<0.5$ 时,表明 NPP 时间序列具有反持续性,

即未来变化与过去相反；当 $H=0.5$ 时，表明 NPP 时间序列处于独立状态，即未来变化与过去无关；当 $0.5<H\leqslant 1$ 时，表明 NPP 时间序列具有持续性，即未来变化与过去一致。为了更好地分析未来变化趋势，将 Hurst 指数叠加年均 NPP 变化趋势，可以得到 5 种分类结果：上升且持续、上升且反持续、下降且持续、下降且反持续、随机变化。

1.3.4　相关性分析

相关系数 R 可以用来衡量 2 个变量之间的线性相关程度。采用皮尔逊相关系数法来分析植被 NPP 与各影响因子之间的相关性[33]。R 取值范围为[−1,1]，其绝对值越大，表明两变量之间的相关性越强；若 $R<0$，呈负相关，若 $R>0$，则呈正相关。

1.3.5　重要性分析

随机森林算法是一种集成学习方法，通过构建多个决策树来进行分类或回归。与传统的学习方法相比，随机森林算法可以减少过拟合的风险，并且对于噪声和异常值的影响相对较小，具有高鲁棒性[30]。特征重要性指数是用来衡量随机森林算法中每个特征对预测结果贡献程度的指标，随机森林算法通过计算特征在树中节点分裂时的重要性指标来评估特征的重要程度。

本研究建立了每个像元的随机森林模型，模拟各影响因子与植被 NPP 的相关性，然后通过计算特征重要性指数来表示每个影响因子对植被 NPP 的贡献百分比。利用 Matlab 将各影响因子的重要性进行主导因素识别，主导因素识别是一种针对多变量数据集的分析方法[34]，主要包括主成分分析、因子分析和独立成分分析等。通过搜索数据中的主要变化模式，并将数据投影到一个低维的子空间中，从而识别出影响数据变化的主导因素。

2　结果与分析

2.1　库布其沙漠植被 NPP 时间变化特征

通过库布其沙漠 2001—2023 年各年 NPP 均值得到研究区年际间变化趋势，如图 2 所示。从图 2 可以看出，库布其沙漠年均 NPP 在 2001—2023 年间呈波动上升趋势，增加速率为 1.46 g/(m²·a)($R^2=0.38$，$P<0.01$)，其中 2005 年相较于上一年下降最多，差值为 30.60 g/(m²·a)，2012 年相较于上一年增加最多，差值为 39.72 g/(m²·a)。2001—2023 年库布其沙漠多年年均 NPP 为 108.60 g/(m²·a)。年均 NPP 从 2001 年的 75.69 g/(m²·a)增加到 2023 年的 103.94 g/(m²·a)。年均 NPP 在 75.69 ~ 134.97 g/(m²·a)范围内变化，其中 2001 年最低，2018 年最高。2014 年，内蒙古将黄河水引入库布其沙漠北缘，由于 2019 年引水量最大达 1.703 845 × 10^8 m³，使得 2019 年植被 NPP 出现了最高值 312.90 g/(m²·a)，这说明由于水分供应的增加，土壤养分增加，扩大了植被覆盖面积，最终促进植被 NPP 增加。多年来，杭锦旗严格落实“三区”规划、禁牧休牧轮牧等措施，深入实施京津风沙源治理等重点生态工程，森林覆盖率达到 15.4%，植被覆盖度稳定在 70% 左右，使得库布其沙漠植被 NPP 总体上呈现明显的上升趋势。

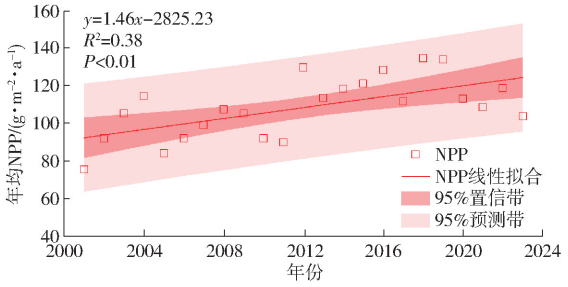

图 2　库布其沙漠 2001—2023 年年均 NPP 变化曲线

Fig. 2　Curve of annual mean NPP changed in Kubuqi Desert from 2001 to 2023

2.2　库布其沙漠植被 NPP 空间变化特征

2.2.1　植被 NPP 年均值空间分布

植被 NPP 在空间上表现出较强的空间异质性。如图 3 所示，植被 NPP 较高的地区主要分布在研究区北部，沿黄滩区呈条带状分布。在土地覆被类型为沙地的区域，基本没有植被覆盖，因此植被 NPP 较低，大部分地方出现了空值。43.96% 区域植被 NPP 为 50 ~ 100 g/(m²·a)，39.30% 区域植被 NPP 为 100 ~ 150 g/(m²·a)，15.54% 区域植被 NPP 为 150 ~ 200 g/(m²·a)，1.20% 区域植被 NPP 为 200 ~ 250 g/(m²·a)。2001—2023 年，库布其沙漠 83.26% 研究区域内植被 NPP 为 50 ~ 150 g/(m²·a)，主要分布在呼和木独镇西北部、吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部。2001—2023 年，空间上年均 NPP 大于 60 g/(m²·a)的面积由 57.21% 增长到 96.74%，但是大部分区域(除空值外)植被 NPP 在

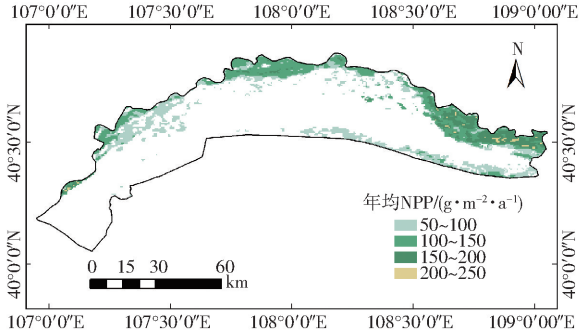

图 3　库布其沙漠 2001—2023 年年均 NPP 空间分布

Fig. 3　Annual NPP spatial distribution in Kubuqi Desert from 2001 to 2023

60 ~ 120 g/(m²·a)之间。

如图 4 所示,库布其沙漠 2001—2023 年不同土地覆被类型的年均 NPP 均呈上升趋势,并且变化趋势较为一致,其中,沙地增幅最大,增长率为 2.23 g/(m²·a),耕地增幅最小,增长率为 1.01 g/(m²·a)。不同土地覆被类型年均 NPP 由大到小依次为:城乡、工矿、居民用地(146.66 g/(m²·a)),耕地(142.08 g/(m²·a)),其它未利用土地(132.60 g/(m²·a)),水域(130.45 g/(m²·a)),林地(107.07 g/(m²·a)),草地(106.25 g/(m²·a)),沙地(87.09 g/(m²·a))。

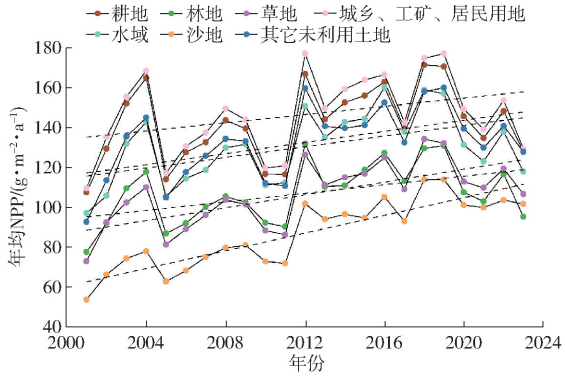

图 4 库布其沙漠 2001—2023 年不同土地覆被类型年均 NPP 变化曲线

Fig. 4 Curves of mean annual NPP changes of different land cover types in Kubuqi Desert from 2001 to 2023

2.2.2 植被 NPP 变化趋势分析及显著性检验

利用 Theil - Sen Median 分析和 Mann - Kendall 检验分析近 20 年库布其沙漠植被 NPP 的变化趋势。植被 NPP 总体呈增加趋势,变化趋势为 -7.19 ~ 13.55 g/(m²·a),平均值为 0.60 g/(m²·a),93.00% 研究区面积呈现正增长趋势(图 5a)。由 95% M - K 显著性检验结果可以得出 51.66% 研究区植被 NPP 极显著增加,主要分布在呼和木独镇西北部以及独贵塔拉镇东北部和南部,1.24% 研究区植被 NPP 极显著下降,显著增加和显著下降的像元面积分别占 12.80% 和 0.74%,33.56% 研究区植被 NPP 未发生显著性变化,均匀地分布在沿黄滩区(图 5b)。因此,库布其沙漠地区植被 NPP 总体上为极显著增加。

2.2.3 植被 NPP 稳定性分析

变异系数可表征植被 NPP 的波动程度。将多年库布其沙漠植被 NPP 变异系数波动性划分为 5 个波动水平,如表 1 所示。其中,62.69% 面积属于不稳定和极不稳定范畴,仅有 0.85% 面积属于稳定状态。从图 6 可以看出,极不稳定状态区域主要分布在独贵塔拉镇东北部和南部。不同土地覆被类型的变异系数由大到小依次为:草地(0.020 71),沙地(0.016 72),耕地(0.007 53),水域(0.005 95),其它未利用土地(0.004 05),城乡、工矿、居民用地(0.001 77),林地(0.000 71)。结合土地覆被面积,近 20 年研究区内城乡、工矿、居民用地面积持续增加,林地、草地、水域及其它未利用土地经历了先减少后增加的变化过程,耕地和沙地经历了先增加后减少的变化过程。林地、草地和沙地变化幅度最大,其中林地面积增加 107.02 km²,草地和沙地面积分别减少 88.67 km² 和 60.47 km²(表 2)。库布其沙漠

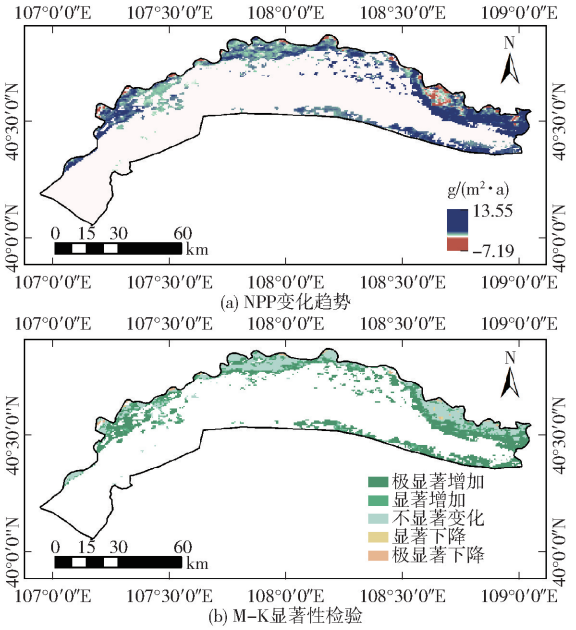

图 5 植被 NPP 变化趋势和 M - K 显著性检验结果

Fig. 5 Vegetation NPP trends and M - K significance test results

表 1 植被 NPP 变异系数及其波动水平

Tab. 1 Vegetation NPP variation coefficient and its fluctuation level

变异系数	波动水平	像元数	占比/%
0 ~ 0.05	非常稳定	0	0
0.05 ~ 0.10	稳定	55	0.85
0.10 ~ 0.15	中等稳定	2 364	36.46
0.15 ~ 0.20	不稳定	2 383	36.76
>0.20	极不稳定	1 681	25.93

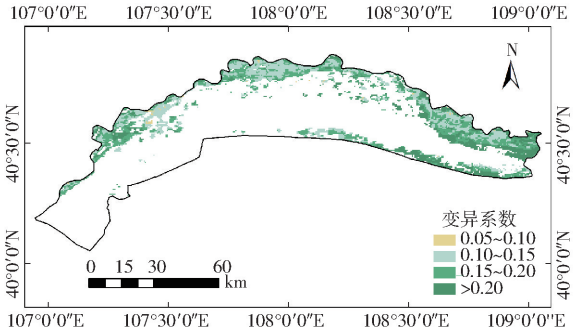

图 6 植被 NPP 变异系数

Fig. 6 NPP variation coefficient of vegetation

表 2　研究区 2000—2020 年土地覆被面积变化统计

Tab. 2　Statistics of land cover change in study area from 2000 to 2020　　km^2

地类名称	2000 年	2010 年	2020 年
耕地	220. 45	286. 00	223. 10
林地	27. 62	24. 87	134. 64
草地	1 428. 57	1 305. 15	1 339. 90
水域	256. 53	244. 09	264. 42
城乡、工矿、居民用地	59. 16	81. 67	97. 10
其它未利用土地	100. 42	88. 88	94. 06
沙地	3 269. 32	3 331. 42	3 208. 85

植被 NPP 随着时间的变化，稳定性波动较大，空间变异性显著。

2. 2. 4　植被 NPP 未来趋势分析

将植被 NPP 变化趋势与 Hurst 指数叠加可以得到未来趋势。库布其沙漠 Hurst 指数为 0. 25 ~ 0. 83（图 7a），其中，73. 58% 植被 NPP 具有反持续性，仅有 26. 42% 植被 NPP 具有持续性。未来在呼和木独镇西北部、吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部，植被 NPP 可能出现与当前变化趋势相反的情况。将 Hurst 指数结合 Sen 趋势对预测的未来植被 NPP 趋势进行显著性检验，Hurst 指数未通过显著性检验的像元数占总像元的 95. 45%。在通过显著性检验的像元内可以发现，未来库布其沙漠植被 NPP 中上升且持续占比 0. 83%，上升且反持续占比 2. 78%，下降且反持续占比 0. 23%，下降且持续占比 0. 67%，随机变化占比 0. 04%（图 7b）。

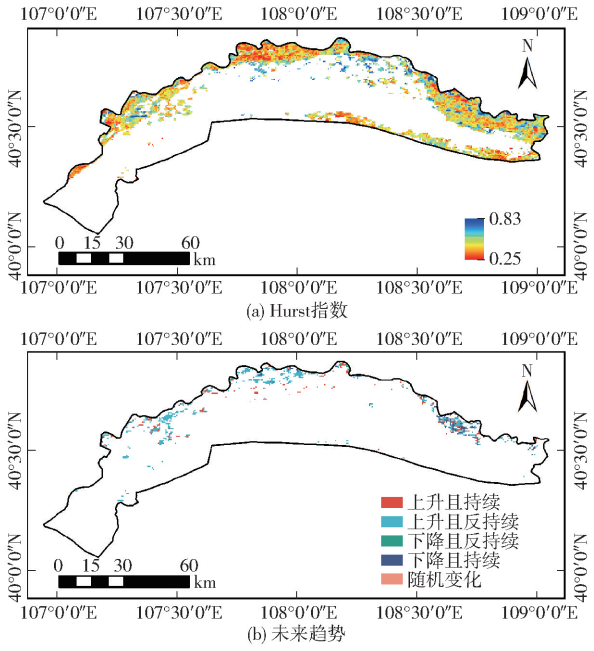

图 7　植被 NPP 变化可持续性和未来趋势预测

Fig. 7　Sustainability of NPP changes in vegetation and future trend prediction

2. 3　植被 NPP 与各影响因子间相关性

为了探讨各影响因子对库布其沙漠多年植被 NPP 变化的驱动机制，对植被 NPP 与多影响因子在像元尺度上进行相关性分析（图 8）。2003—2020 年，植被 NPP 与降水量的相关性最强，其次为温度，而与水汽压亏缺量和潜在蒸散发的相关性最弱。植被 NPP 与温度和降水量呈正相关的像元数占总像元数的比例最高，分别为 90. 56% 和 98. 07%；植被 NPP 与风速和相对湿度呈负相关的比例最高，达 60. 57% 和 75. 57%。

植被 NPP 与不同影响因子之间的相关关系存在显著性差异。植被 NPP 与风速相关系数为 -0. 82 ~ 0. 71，其中，呈弱相关面积占 73. 67%；植被 NPP 与水汽压亏缺量相关系数为 -0. 73 ~ 0. 61，呈弱相关面积占 92. 55%；植被 NPP 与温度相关系数为 -0. 68 ~ 0. 75，呈弱相关面积占 88. 74%，零星分布在沿黄滩区；植被 NPP 与相对湿度相关系数为 -0. 72 ~ 0. 66，呈弱相关面积占 86. 43%；植被 NPP 与降水量相关系数为 -0. 55 ~ 0. 81，其中，呈中等程度相关面积占 44. 29%，强相关面积占 22. 03%，主

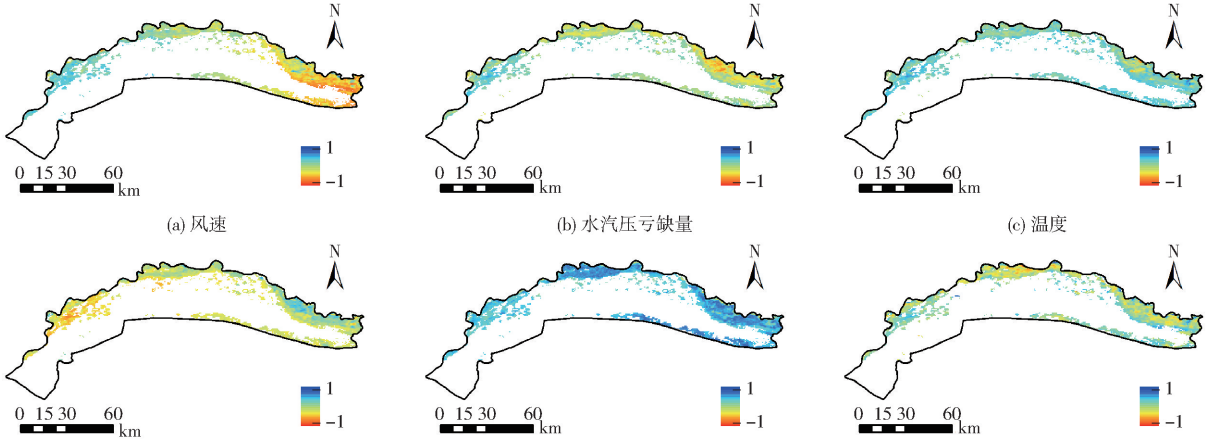

图 8　影响因子与植被 NPP 的相关系数

Fig. 8　Correlation coefficients between impact factors and vegetation NPP

要分布在吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部;植被 NPP 与潜在蒸散发相关系数为 -0.82 ~ 0.81,呈弱相关面积占 90.48%。

2.4 基于随机森林算法的植被 NPP 与各影响因子间贡献度

选取 6 个影响因子作为自变量,将数据集 2/3 划分为训练集,剩余 1/3 划分为测试集,用于随机森林模型的构建与验证。得到如图 9 所示的各影响因子与植被 NPP 的特征重要性指数。在单一影响因素条件下,降水量、潜在蒸散发和风速对植被 NPP 的贡献度较高,影响范围主要分布在沿黄滩区。

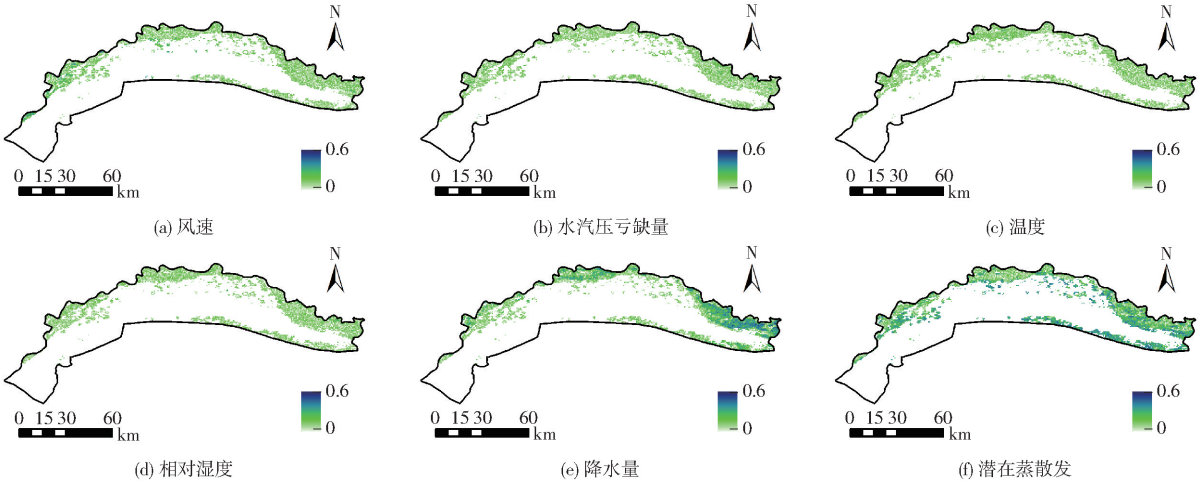

图 9 影响因子与植被 NPP 的特征重要性指数

Fig. 9 Characteristic importance index of impact factors and vegetation NPP

基于特征重要性指数,得到整个研究区域空间植被 NPP 的主导因子(图 10)。由图 10 可以看到,潜在蒸散发和降水量是影响植被 NPP 变化的主导因子,分别影响 50.19% 和 28.34% 的研究区域,主要位于呼和木独镇西北部、吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部。

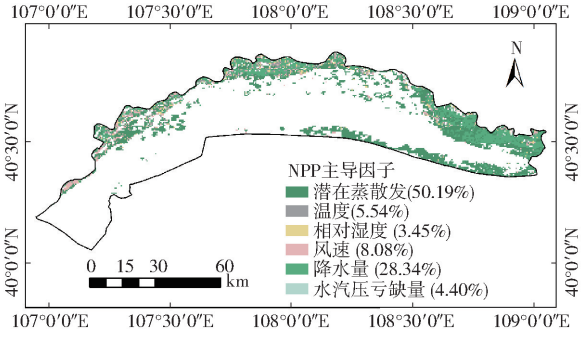

图 10 植被 NPP 主导因子

Fig. 10 NPP dominant factors of vegetation

3 讨论

库布其沙漠 2001—2023 年植被 NPP 整体呈波动上升趋势,增加速率为 1.46 g/(m²·a),这与常屹冉等[34]的研究结果基本一致。自改革开放以来,我国实施了“三北”防护林体系工程;进入 21 世纪,鄂尔多斯出台了“三区”规划、禁休轮牧、生态治理奖补机制等政策措施;党的十八大后,国家实施了退耕还林、京津风沙源治理等一系列生态治理工程,这些措施显著提高了植被覆盖度,成为植被 NPP 增长的主要推动力。研究区内多年植被 NPP 均值为 108.60 g/(m²·a),根据张子凡等[32]的研究,内蒙古地区多年 NPP 均值为 208.96 g/(m²·a),这一差异主要是由于库布其沙漠地区干旱少雨,蒸发量远高于降水量,不利于植被生长,因此植被 NPP 较低。2001—2023 年,库布其沙漠不同土地覆被类型年均 NPP 均呈上升趋势,且变化趋势较为一致,其中,沙地增幅最大,增长率为 2.23 g/(m²·a),但年均 NPP 最小。这与不同地类的生态特性和承受力有关,沙地原本植被稀少、土壤贫瘠,在人为治理和气候变化的共同作用下,沙地的生态系统恢复较为显著,因而增长率较高,然而,由于沙地的基础生产力较低,植被生长仍受到资源匮乏的限制,导致其年均 NPP 最小。通过多次实践与调整,库布其沙漠地区目前主要种植耐旱固沙的灌木,如沙柳、柠条、花棒、羊柴、甘草、紫花苜蓿等。

鄂尔多斯市杭锦旗于 2014 年推进“引凌入沙”工程,将黄河水引入库布其沙漠北缘,形成了 90.84 km² 湿地,湿地生态系统是陆地生态系统碳储库的重要组成部分之一[35],具有极强的生态系统服务功能与自身恢复能力。该项工程导致研究区内植被 NPP 空间分异特征显著,植被 NPP 主要分布在沿黄滩区。潜在蒸散发和降水量是影响植被生长的主要气象因子,这与范毅宁等[1]的研究结果基本一致。在大多数干旱地区,降水量对植被 NPP 变化的影响超过了温度的影响,成为植被 NPP 增加的主要

气象因子[36]。温度对植被 NPP 的影响是一个复杂的过程。一方面，温度在一定范围内升高可增强土壤微生物活性，加快植物光合速率，促进植物有机质累积，有利于提高植被 NPP[37]；另一方面，当温度升高超过植被生长的最佳温度时将加速地表水的蒸发，进而可能会抑制植物生长。有研究表明，气候变化会对荒漠化产生影响[38]，其中主要考虑降水量和温度的年际变化导致地表沙漠面积年际波动[39]。在全球气候变暖的大背景下，库布其沙漠地区温度将会上升，进而可能增加大气中的水汽含量，导致更多的降水量，温度和降水量的变化将对库布其沙漠的生态系统产生显著影响，可能导致土地覆被类型和植被类型的变化，未来植被 NPP 可能出现与当前变化趋势相反的情况。

本研究初步揭示了库布其沙漠植被 NPP 的时空变化规律和气象驱动因子，但仍存在一些局限性和不足之处。在时间尺度上，本研究仅在年尺度上分析了植被 NPP 的变化特征，未来可进一步分析植被 NPP 在季节尺度和月尺度上的演变规律。此外，驱动因子仅考虑了气象因子，而已有研究表明，人口密度、夜间灯光、GDP 等人为因子[40-41]也会对植被 NPP 产生影响，未来研究中可以考虑多种驱动因子，以更深入地分析库布其沙漠地区植被 NPP 的驱动机制。

4　结论

（1）2001—2023 年库布其沙漠年均 NPP 为 108.60 g/(m²·a)，年均 NPP 变化范围为 75.69 ~ 134.97 g/(m²·a)，整体上呈现波动上升趋势。空间上，植被 NPP 主要分布在呼和木独镇西北部、吉日嘎朗图镇北部以及独贵塔拉镇东北部和南部。不同土地覆被类型年均 NPP 由大到小依次为：城乡、工矿、居民用地（146.66 g/(m²·a)），耕地（142.08 g/(m²·a)），其它未利用土地（132.60 g/(m²·a)），水域（130.45 g/(m²·a)），林地（107.07 g/(m²·a)），草地（106.25 g/(m²·a)），沙地（87.09 g/(m²·a)）。

（2）库布其沙漠地区植被 NPP 总体上为极显著增加趋势，稳定性波动较大，空间变异性显著。对未来趋势进行分析，发现 73.58% 植被 NPP 具有反持续性，表明未来库布其沙漠植被 NPP 可能出现与当前变化趋势相反的情况。

（3）植被 NPP 与温度和降水量呈正相关的像元数占总像元数的比例最高，分别为 90.56% 和 98.07%；植被 NPP 与风速和相对湿度呈负相关比例最高，达 60.57% 和 75.57%。潜在蒸散发和降水量是影响库布其沙漠植被 NPP 变化的主导因子。

参　考　文　献

[1] 范毅宁，廖梓龙，龙胤慧，等. 内蒙古阴山北麓草原植被净初级生产力变化特征及其气候驱动力[J]. 水利水电技术(中英文)，2024，55(8)：38－50.
FAN Yining，LIAO Zilong，LONG Yinhui，et al. Characteristics of vegetation net primary productivity change and its climatic driving forces in the Yinshanbeilu steppe，Inner Mongolia[J]. Water Resources and Hydropower Engineering，2024，55(8)：38－50.(in Chinese)

[2] LIN Z，LIU Y，WEN Z，et al. Spatial-temporal variation characteristics and driving factors of net primary production in the Yellow River basin over multiple time scales[J]. Remote Sensing，2023，15(22)：5273.

[3] 孙金珂，牛海鹏，袁鸣. 中国陆地植被生态系统 NPP 空间格局变迁分析[J]. 农业机械学报，2020，51(6)：162－168.
SUN Jinke，NIU Haipeng，YUAN Ming. Spatial pattern change and analysis of NPP in terrestrial vegetation ecosystem in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery，2020，51(6)：162－168.(in Chinese)

[4] 范莉，叶钊，祝好，等. 三峡库区陆地生态系统净初级生产力时空演变及其影响因素[J]. 中国农业气象，2024，45(5)：493－505.
FAN Li，YE Zhao，ZHU Hao，et al. Spatio-temporal variation and its influence factor's on net primary productivity of terrestrial ecosystems in the Three Gorges reservoir area[J]. Chinese Journal of Agrometeorology，2024，45(5)：493－505.(in Chinese)

[5] 李明泽，王斌，范文义，等. 东北林区净初级生产力及大兴安岭地区林火干扰影响的模拟研究[J]. 植物生态学报，2015，39(4)：322－332.
LI Mingze，WANG Bin，FAN Wenyi，et al. Simulation of forest net primary production and the effects of fire disturbance in Northeast China[J]. Chinese Journal of Plant Ecology，2015，39(4)：322－332.(in Chinese)

[6] CHEN Y，LIN Z，CHEN X，et al. Spatial-temporal dynamics of grassland net primary productivity and its driving mechanisms in Northern Shaanxi，China[J]. Agronomy，2023，13(11)：2684.

[7] 肖生春，肖洪浪，卢琦，等. 中国沙漠(地)生态系统水文调控功能及其服务价值评估[J]. 中国沙漠，2013，33(5)：1568－1576.
XIAO Shengchun，XIAO Honglang，LU Qi，et al. Evaluation on China desert and sandy land ecosystem services based on its related water process and regulating functions[J]. Journal of Desert Research，2013，33(5)：1568－1576.(in Chinese)

[8] 闫立男，王新军，陈蓓，等. 稀疏植被净初级生产力时空变化及气象因素关系分析[J]. 测绘通报，2022(3)：1－6.
YAN Li'nan，WANG Xinjun，CHEN Bei，et al. Analysis of spatiotemporal variation of sparse vegetation net primary productivity

and meteorological factors[J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2022(3): 1 - 6. (in Chinese)
[9] HUENNEKE L F, ANDERSON J P, REMMENGA M, et al. Desertification alters patterns of aboveground net primary production in Chihuahuan ecosystems[J]. Global Change Biology, 2002, 8(3): 247 - 264.
[10] 洪长桥,金晓斌,陈昌春,等. 集成遥感数据的陆地净初级生产力估算模型研究综述[J]. 地理科学进展, 2017, 36(8): 924 - 939.
HONG Changqiao, JIN Xiaobin, CHEN Changchun, et al. Overview on estimation models of land net primary productivity integrating remote sensing data[J]. Progress in Geography, 2017, 36(8): 924 - 939. (in Chinese)
[11] XIAO F, LIU Q, XU Y. Estimation of terrestrial net primary productivity in the Yellow River basin of China using light use efficiency model[J]. Sustainability, 2022, 14(12): 7399.
[12] WANG F, WANG F, HU J, et al. Rice yield estimation based on an NPP model with a changing harvest index[J]. IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing, 2020, 13: 2953 - 2959.
[13] 尹小君,祝宏辉,GAO Jerry,等. 基于 Landsat 和 MODIS 数据融合的农牧区 NPP 模拟[J]. 农业机械学报, 2020, 51(8): 163 - 170.
YIN Xiaojun, ZHU Honghui, GAO Jerry, et al. NPP simulation of agricultural and pastoral areas based on Landsat and MODIS data fusion[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(8): 163 - 170. (in Chinese)
[14] CUO L, ZHANG Y, XU R, et al. Decadal change and inter-annual variability of net primary productivity on the Tibetan Plateau[J]. Climate Dynamics, 2021, 56(5 - 6): 1837 - 1857.
[15] PENG M, LI C, WANG P, et al. Spatio-temporal variation and future sustainability of net primary productivity from 2001 to 2021 in Hetao irrigation district, Inner Mongolia[J]. Agriculture, 2024, 14(4): 613.
[16] 涂海洋,古丽·加帕尔,于涛,等. 中国陆地生态系统净初级生产力时空变化特征及影响因素[J]. 生态学报, 2023, 43(3): 1219 - 1233.
TU Haiyang, JIAPAER·Guli, YU Tao, et al. Analysis of spatio-temporal variation characteristics and influencing factors of net primary productivity in terrestrial ecosystems of China[J]. Acta Ecologica Sinica, 2023, 43(3): 1219 - 1233. (in Chinese)
[17] 刘博,徐涛,徐强强,等. 基于叶绿素荧光遥感的江西省稻田总初级生产力估算及其气象驱动因素研究[J]. 农业机械学报, 2024, 55(8): 391 - 400.
LIU Bo, XU Tao, XU Qiangqiang, et al. Estimation of gross primary production of paddy field in Jiangxi Province based on remote sensing measured sun-induced chlorophyll fluorescence and its correlation with meteorological factors[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2024, 55(8): 391 - 400. (in Chinese)
[18] 白天豪,贡恩军,周娜芳,等. 2001—2022 年秦巴山区生态碳汇时空格局及驱动力分析[J/OL]. 环境科学: 1 - 15. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401064.
BAI Tianhao, GONG Enjun, ZHOU Nafang, et al. Spatiotemporal patterns and driving forces analysis of ecological carbon sink from 2001 to 2022 in Qinling-Daba mountains, China[J/OL]. Environmental Science: 1 - 15. DOI: 10.13227/j.hjkx.202401064. (in Chinese)
[19] 洪乐乐,沈艳,马红彬,等. 2000—2019 年宁夏植被净初级生产力时空变化及其驱动因素[J]. 应用生态学报, 2022, 33(10): 2769 - 2776.
HONG Lele, SHEN Yan, MA Hongbin, et al. Temporal and spatial variation of vegetation net primary productivity and its driving factors in Ningxia China from 2000 to 2019[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2022, 33(10): 2769 - 2776. (in Chinese)
[20] 闫丰,李晨阳,鲁志雪,等. 白洋淀流域植被净初级生产力时空变化及驱动因素[J]. 水土保持通报, 2024, 44(2): 345 - 353.
YAN Feng, LI Chenyang, LU Zhixue, et al. Spatial and temporal succession and driving factors of vegetation net primary productivity in Baiyangdian watershed[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2024, 44(2): 345 - 353. (in Chinese)
[21] 袁金国,杨紫妍,李卓琳,等. 滹沱河流域植被 NPP 时空演变及其影响因子分析[J/OL]. 长江科学院院报: 1 - 9. DOI: 10.11988/ckyyb.20231374.
YUAN Jinguo, YANG Ziyan, LI Zhuolin, et al. Analysis on temporal and spatial evolution of vegetation net primary productivity in Hutuo river basin and its influencing factors[J/OL]. Journal of Changjiang River Scientific Research Institute: 1 - 9. DOI:10.11988/ckyyb.20231374. (in Chinese)
[22] 闫丰,李晨阳,王靖,等. 京津冀生态屏障区植被 NPP 时空演变驱动力定量解析[J/OL]. 环境科学: 1 - 27. DOI: 10.13227/j.hjkx.202402008.
YAN Feng, LI Chenyang, WANG Jing, et al. Quantitative analysis of the drivers of the spatio-temporal evolution of vegetation NPP in the Beijing - Tianjin - Hebei ecological barrier area[J/OL]. Environmental Science: 1 - 27. DOI: 10.13227/j.hjkx.202402008. (in Chinese)
[23] 贺鹏飞. 库布其沙漠生态修复的“亿利模式”[J]. 中国土地, 2019(10): 42 - 45.
[24] 刘志勇,吴晓光,董林峰,等. 内蒙古库布其沙漠北缘综合治理区凌汛补水生态效益浅析[J]. 西部资源, 2022(6): 186 - 187.
[25] 绿富同兴铸就的生态奇迹——库布其治沙模式的成功经验[J]. 北方经济, 2018(8): 20 - 22.
[26] 赵洪光,赵晓萍,叶德成. 杭锦旗沿黄生态带治理存在的问题及解决对策[J]. 内蒙古水利, 2023(4): 52 - 53.
[27] 郑玉峰,奇奕轩,全宇,等. 库布齐沙漠及周边地区五十年气候变化特征[J]. 内蒙古林业科技, 2019, 45(4): 47 - 49.
ZHENG Yufeng, QI Yixuan, QUAN Yu, et al. Fifty-year climate change characteristics in Kubuqi desert and surrounding area[J]. Journal of Inner Mongolia Forestry Science & Technolog, 2019, 45(4): 47 - 49. (in Chinese)
[28] 王斌. 杭锦旗库布其沙漠水生态综合治理工程措施浅析[J]. 内蒙古水利, 2023(9): 56 - 57.
[29] PENG S, DING Y, WEN Z, et al. Spatiotemporal change and trend analysis of potential evapotranspiration over the Loess

Plateau of China during 2011—2100[J]. Agricultural and Forest Meteorology, 2017, 233: 183 – 194.
[30] 张炜,刘亦飞,沈明星,等. 长江流域植被净初级生产力时空动态特性及影响因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2022, 53(10): 165 – 176.
ZHANG Wei, LIU Yifei, SHEN Mingxing, et al. Spatiotemporal variation of net primary productivity and response to climatic factors in the Yangtze River basin[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2022, 53(10): 165 – 176. (in Chinese)
[31] 崔博超,郑江华,吐尔逊·哈斯木,等. 塔里木河流域草地净初级生产力时空分异特征研究[J]. 草业学报, 2020, 29(6): 1 – 13.
CUI Bochao, ZHENG Jianghua, TUERXUN · Hasimu, et al. Spatio-temporal characteristics of grassland net primary productivity (NPP) in the Tarim River basin[J]. Acta Prataculturae Sinica, 2020, 29(6): 1 – 13. (in Chinese)
[32] 张子凡,熊茂秋,李福杰,等. 内蒙古草原自然资源大区植被净初级生产力时空变化及其影响因子分析[J]. 草业科学, 2022, 39(12): 2492 – 2502.
ZHANG Zifan, XIONG Maoqiu, LI Fujie, et al. Analysis of the temporal and spatial variations in net primary productivity of vegetation in the grassland region of Inner Mongolia and the factors influencing those changes[J]. Pratacultural Science, 2022, 39(12): 2492 – 2502. (in Chinese)
[33] 吴丽媛,神祥金,刘奕雯,等. 青藏高原草本沼泽植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应[J]. 生态学报, 2024, 44(5): 2115 – 2126.
WU Liyuan, SHEN Xiangjin, LIU Yiwen, et al. Spatio-temporal variation in vegetation net primary productivity and its response to climate change in herbaceous marshes on the Qinghai – Tibet plateau[J]. Acta Ecologica Sinica, 2024, 44(5): 2115 – 2126. (in Chinese)
[34] 常屹冉,张弛,魏嘉诚,等. 气候变化和人类活动对内蒙古植被净初级生产力的影响[J]. 草地学报, 2023, 31(11): 3444 – 3452.
CHANG Yiran, ZHANG Chi, WEI Jiacheng, et al. Impacts of climate change and human activities on the net primary productivity of vegetation in Inner Mongolia[J]. Acta Agrestia Sinica, 2023, 31(11): 3444 – 3452. (in Chinese)
[35] JI H, HAN J, XUE J, et al. Soil organic carbon pool and chemical composition under different types of land use in wetland: implication for carbon sequestration in wetlands[J]. Science of the Total Environment, 2020, 716: 136996.
[36] CHEN L, HALIKE A, YAO K, et al. Spatiotemporal variation in vegetation net primary productivity and its relationship with meteorological factors in the Tarim river basin of China from 2001 to 2020 based on the Google Earth Engine[J]. Journal of Arid Land, 2022, 14(12): 1377 – 1394.
[37] KEYSER A R, KIMBALL J S, NEMANI R R, et al. Simulating the effects of climate change on the carbon balance of North American high-latitude forests[J]. Glob. Chang Biol., 2000, 6(Supp. 1): 185 – 195.
[38] 慈龙骏,杨晓晖. 荒漠化与气候变化间反馈机制研究进展[J]. 生态学报, 2004, 24(4): 755 – 760.
CI Longjun, YANG Xiaohui. Progress in feedback mechanism between desertification and climate change[J]. Acta Ecologica Sinica, 2004, 24(4): 755 – 760. (in Chinese)
[39] 梁妙玲,谢正辉. 我国气候对植被分布和净初级生产力影响的数值模拟[J]. 气候与环境研究, 2006(5): 582 – 592.
LIANG Miaoling, XIE Zhenghui. Simulations of climate effects on vegetation distribution and net primary production in China[J]. Climatic and Environmental Research, 2006(5): 582 – 592. (in Chinese)
[40] ZHOU W, SUN Z, LI J, et al. Desertification dynamic and the relative roles of climate change and human activities in desertification in the Heihe river basin based on NPP[J]. Journal of Arid Land, 2013, 5(4): 465 – 479.
[41] HE Y, LIN C, WU C, et al. The urban hierarchy and agglomeration effects influence the response of NPP to climate change and human activities[J]. Global Ecology and Conservation, 2024, 51: e02904.