

DOI: 10.11931/guihaia.gxzw202008030

朱丽亚, 孙爽, 胡克. 西辽河流域植被 NPP 时空分布特征及其影响因素研究 [J]. 广西植物, 2020, 40(11): 1563–1574.

ZHU LY, SUN S, HU K. Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity (NPP) and its impact factors in the Xiliaohe Basin [J]. *Guihaia*, 2020, 40(11): 1563–1574.

西辽河流域植被 NPP 时空分布特征及其影响因素研究

朱丽亚, 孙爽*, 胡克

(中国地质大学 海洋学院, 北京 100083)

摘要: 为研究西辽河流域植被生长特征及受气候变化的影响, 该文以 2000 年—2015 年 MOD17A3 的年均植被净初级生产力(NPP)数据、植被类型数据、土壤类型数据以及气温、降水资料为基础, 利用 GIS 和 RS 技术, 分析了西辽河流域植被净初级生产力时空格局、演变特征及驱动因子。结果表明: (1) 西辽河流域近 16 年来植被 NPP 总量呈波动增加的趋势, 变化范围为 156.89~260.90 g C · m⁻² · a⁻¹, 平均值为 219.76 g C · m⁻² · a⁻¹, 空间分布呈“边缘高、中间低”的特征; 植被 NPP 变化斜率为 -16.53~16.65, 95.74% 的区域 NPP 呈增加趋势。(2) 不同植被类型的 NPP 总量大小排序为草原>栽培植被>阔叶林>灌丛>草甸>针叶林; 西辽河流域固碳的植被类型主要是草原、栽培植被以及阔叶林, 固碳能力较强的为针叶林。(3) 生长在棕壤、褐土和潮土的植被年均 NPP 较高, 生长在栗钙土和风沙土的植被年均 NPP 较低。(4) 16 年间植被 NPP 增长主要受降雨影响。气候暖-湿化及生态建设工程的实施, 促进了西辽河流域植被的生长。以上研究结果为后期流域生态环境治理提供了科学依据及数据支持。

关键词: 西辽河流域, 净初级生产力, 时空分布, 影响因素

中图分类号: Q948 文献标识码: A

文章编号: 1000-3142(2020)11-1563-12

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



Spatiotemporal distribution of vegetation net primary productivity (NPP) and its impact factors in the Xiliaohe Basin

ZHU Liya, SUN Shuang*, HU Ke

(School of Marine Sciences, China University of Geosciences (Beijing), Beijing 100083, China)

Abstract: This study aimed to study the characteristics of vegetation growth and the impact of climate change on the vegetation dynamics in the Xiliaohe Basin. The temporal and spatial variation of vegetation net primary productivity (NPP) in the Xiliaohe Basin were analyzed by GIS and RS technology by means of average annual NPP data of MOD17A3 dataset and the data of precipitation and temperature from 2000 to 2015. The results were as follows: (1)

收稿日期: 2020-08-11

基金项目: 国土资源部地质环境治理专项项目(3-4-2014-175) [Supported by the Special Program of Geological Environment Control of Ministry of Land and Resources(3-4-2014-175)].

作者简介: 朱丽亚(1996-), 女, 新疆乌苏人, 硕士研究生, 主要从事海岸带地质环境研究, (E-mail) Zhuliya0911@163.com。

*通信作者: 孙爽, 博士研究生, 主要从事海岸带地质环境研究, (E-mail) sunshuang1227@outlook.com。

Vegetation NPP in the Xiliaohe Basin showed a fluctuating upward trend, ranging from 156.89 to 260.90 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ and a mean value of 219.76 $\text{g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ from 2000 to 2015. Spatially, vegetation NPP in the middle part of the Xiliaohe Basin was lower than the edge sides. The changing slope of vegetation NPP ranged from -16.53 to 16.65 and 95.74% of the regions showed an increasing trend. (2) The total NPP among different vegetation types ranked as grassland > cultivated vegetation > broad-leaved forest > shrub > meadow > coniferous forest. The vegetation types of carbon sequestration in the Xiliaohe Basin were mainly grassland, cultivated plants and broad-leaved forest, and coniferous forest had strong carbon sequestration capacity. (3) Vegetation NPP was higher in the area covered by brown soil, cinnamon soil and moisture soil, and lower in the chestnut soil and aeolian soil. (4) Compared with temperature, precipitation was the main prominent contribution to the changing trend of NPP in the past 16 years. The warm-wet climate and the implementation of ecological construction projects promoted the growth of vegetation in the Xiliaohe Basin. These results provide a scientific basis and data support for the later basin ecological environment governance.

Key words: the Xiliaohe Basin, net primary productivity (NPP), spatiotemporal variations, impact factor

植被净初级生产力 (net primary productivity, NPP) 是单位面积上绿色植被所积累的有机干物质总量 (谢宝妮等, 2014), 是判定生态系统碳源/碳汇和调节生态过程的主要因子, 能表征植被的生长状况, 现已广泛应用于土地管理政策的效应评估 (Feng et al., 2007)。植被的生长主要受植被自身特性、气候环境、地质环境、大气环境以及土地利用等因子的影响, 土壤会直接影响植被类型的分布, 对植被的生产力造成一定影响, 进而改变陆地生态系统的碳循环。不同区域的植被 NPP 对气候变化的响应存在较大差异, 不同植被类型、土壤类型对降水、气温的敏感性也会存在差别, 因此动态监测植被 NPP 在一定程度上能指示气候变化, 国内外学者从不同的时间、空间尺度对陆地生态系统植被生长状况、NPP 分布及其影响因素做了大量研究。在区域尺度上, 国内学者主要集中在黄河三角洲 (蒋蕊竹等, 2011; 路广等, 2019)、长江流域 (苗茜等, 2010; Zhang et al., 2019)、太湖流域 (徐昔保等, 2011)、南方以及西北地区等区域 (李登科等, 2011; 姜春等, 2016; Wu et al., 2016; Jiao et al., 2018)。在全球气候变暖的背景下, 研究气候变化和人类活动对植被 NPP 的影响已成为当前研究的热点。

目前, 主要通过生产潜力模型、生态系统过程模型以及光能利用模型等来估算植被 NPP (赵俊芳等, 2007)。随着遥感和数据处理技术的发展, 利用遥感技术能大尺度、长时间地动态监测植被生长活动, 利用 MOD17A3 的 NPP 数据产品可以较为准确

地估算全球不同区域植被的生物量, 结果较为准确, 能够从不同的时间、空间尺度研究气候因子对区域植被 NPP 的影响 (李恒凯等, 2017; 相恒星等, 2017)。中国大多数地区草地 NPP 的增加主要受降水控制, 气温的升高会抑制草地 NPP 的累积 (刘洋洋等, 2020); 秦岭植被 NPP 的分布主要受气温的影响 (王娟等, 2016); 河南省植被 NPP 受植被类型与水热因子的影响呈南高北低的分布格局 (王新闯等, 2013); 温度是影响江河源区植被 NPP 空间分布的主要因素 (郭晓寅等, 2006)。综上所述, 虽然气候因子是影响植被 NPP 的主要因素, 但是在不同区域尺度上气温与降水对植被的影响仍然存在不确定性。

西辽河流域地处农牧交错地带, 是典型的干旱半干旱地区。由于植被稀疏、土壤沙化、过度放牧, 使得生态环境较为脆弱, 因此维持生态系统稳定性的恢复力较弱 (李艳清, 2008)。同时, 西辽河流域是我国生态环境治理与恢复的重点研究区域, 截至目前, 已开展了一系列的生态恢复建设工程, 改变了流域植被的生长环境以及植被 NPP 的存储。在全球气候变暖的背景下, 流域内气候已发生改变。气温和降水的变化决定了植被生长的水热条件, 尤其是在干旱半干旱地区, 气候因子会直接影响植被的生长代谢过程。近年来, 关于西辽河流域植被的研究主要集中在植被与地下水埋深 (朱永华等, 2019; 陈敏建等, 2019)、土地利用覆被变化 (张伟科等, 2010; 何俊仕等, 2016; 吴梦红等, 2016)、植被覆盖度及驱动因素 (李生勇

等, 2016) 等方面, 对于流域尺度上植被类型、土壤类型及气象因子对植被净初级生产力的研究还较少。因此, 本研究以 2000 年—2015 年 MOD17A3 的年均植被净初级生产力 (NPP) 数据、植被类型数据、土壤类型数据以及降水、气温资料为基础, 借助 GIS 和 RS 技术, 对西辽河流域植被净初级生产力时空格局、演变特征以及驱动因素进行分析, 旨在为该流域生态系统评价和科学管理提供理论依据与数据支持。

1 研究区概况与研究方法

1.1 研究区概况

西辽河流域位于我国北方农牧交错地带, 属于草原沙地农牧生态区, 生态环境脆弱。流域地处 $116^{\circ}32'—124^{\circ}29'E$ 、 $118^{\circ}52'—120^{\circ}47'N$ 之间, 为辽河流域上中游, 流域主体在内蒙古自治区, 跨河北省、辽宁省、吉林省部分市, 总面积约为 $13.71 \times 10^4 \text{ km}^2$, 地势西高东低, 自蒙古高原过渡到辽河平原。气候属于暖温带半湿润气候向中温带半干旱气候的过渡带, 大陆性特征比较明显。年平均气温, 自西北向东南逐渐升高。多年平均降雨量为 375.3 mm , 季节变化较大。流域的西部与内蒙古高原接壤, 南部为滦河和饶阳河; 西北方向的大兴安岭是西辽河水系与内蒙古高原内水系的分水岭; 东北部为嫩江水系、额尔古纳水系 (张伟科等, 2010)。地貌类型主要为沙丘、丘间低地和甸子地。土壤类型主要是栗钙土、风沙土、潮土、黑钙土和褐土, 占比分别为 26.45% 、 21.31% 、 14.22% 、 7.95% 和 7.53% 。植被类型主要为草原、草甸、灌丛以及栽培植被等类型。

1.2 数据来源及处理

1.2.1 NPP 数据 NPP 数据下载于蒙大拿大学地表数据动态模拟工作组网站 (<http://files.ntsg.umt.edu/data>), 时间跨度为 2000 年—2015 年, 时间分辨率 1 a, 空间分辨 30 秒弧 (0.0083°), 比例系数为 0.1。该数据利用参考 BIOME-BGC 模型与光能利用率模型建立的 NPP 估计模型模拟得到陆地生态系统年 NPP。与传统的 MOD17A3 NPP 数据相比, 该数据集纠正了云层覆盖以及传感器发

生故障造成的误差 (王娟等, 2016)。

1.2.2 植被类型数据与土壤类型数据 植被类型数据以及土壤类型空间分布数据下载于中国科学院资源环境科学数据中心 (<http://www.resdc.cn/Default.aspx>)。植被类型数据为 1:100 万栅格数据, 于 2001 年 5 月正式出版, 研究区植被类型主要为针叶林、阔叶林、灌丛、草原、草甸、沼泽与栽培植被 7 种类型。土壤类型数据为 1:100 万栅格数据, 于 1995 年编制出版。

1.2.3 气象数据与 DEM 数据 气象数据包括气温与降雨数据, 下载于中国科学院资源环境科学数据中心, 空间分辨率 1 km, 是基于全国 2 400 多个气象站日观测数据, 应用 ANUSPLIN 软件由平滑样条函数法分析插值生成, 去除了高程对温度和降水的影响。

30 m 的 DEM 数据下载于地理空间数据云 (<http://www.gscloud.cn/>)。

以上地理数据均经裁剪、重采样和重投影转换为 WGS_1984 坐标系。

1.3 研究方法

1.3.1 趋势分析 西辽河流域 2000 年—2015 年平均 NPP 的计算公式如下。

$$\overline{NPP} = \frac{\sum_{i=1}^n NPP_i}{n} \quad (1)$$

式中: n 为研究时间段的年数, 值为 16; \overline{NPP} 为西辽河流域 2000 年—2015 年累计 16 年的 NPP 平均值。

回归趋势线是对变量进行回归分析, 要求变量随时间变化 (宋怡和马明国, 2008)。采用趋势分析法, 分析西辽河流域 2000 年—2015 年每个像元的 NPP 变化趋势, 得出研究区 16 年的 NPP 变化趋势图, 计算过程如下 (Jiang et al., 2017)。

$$S = \frac{n \times \sum_{i=1}^n i \times NPP_i - \sum_{i=1}^n i \times \sum_{i=1}^n NPP_i}{n \times \sum_{i=1}^n i^2 - \left(\sum_{i=1}^n i\right)^2} \quad (2)$$

式中: S 为 NPP 趋势斜率, 反映某一时间段 NPP 的总体变化趋势; $S > 0$, 说明研究区植被 NPP 在增加, 反之减少; NPP_i 为第 i 年 NPP 均值, i 为年序列号; n 代表年数, 本文为 16。

1.3.2 相关性 相关性分析用于定量的衡量两个或多个连续性变量的相关程度。以栅格像元为单元,计算西辽河流域 NPP 与气温、降水量之间的相关系数,即 Pearson 相关系数,计算过程如下(蒋蕊竹等, 2011)。

$$r_{xy} = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2}} \quad (3)$$

式中: r_{xy} 为相关系数; x_i 和 y_i 为变量值; \bar{x} 和 \bar{y} 分别为2个变量的平均值。关系数根据 t 检验法进行检验, m 为控制的变量个数, n 为样本数,公式如下(骆艳和张松林, 2019)。

$$t = \frac{r_{xy}}{1 - r_{xy}^2} \times \sqrt{n - m - 3} \quad (4)$$

1.3.3 变异系数法 变异系数是标准差与平均数的比值,是用来描述每一个观测值变异程度的一个指标。变异系数越小,观测序列稳定,波动小;反之,序列较为不稳定,波动大。本文用变异系数来衡量研究期间每个像元值的变化情况,计算公式如下(贺振和贺俊平, 2017)。

$$Cv = \frac{1}{NPP} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (NPP_i - \overline{NPP})^2}{n}} \quad (5)$$

式中: NPP_i 表示第 i 年 NPP 最大值; \overline{NPP} 为研究区内每个栅格像元在 2000 年—2015 年间 NPP 的平均值, Cv 为变异系数。

1.3.4 重心模型 在重心模型中,重心是区域中的某个点,这个点在各个方向中受到的力能保持平衡。利用重心模型能直观反映出不同时期植被 NPP 的变化规律以及与降水、气温的相关性,重心坐标计算公式如下(Guo et al., 2020)。

$$\bar{x} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i X_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (6)$$

$$\bar{y} = \frac{\sum_{i=1}^n M_i Y_i}{\sum_{i=1}^n M_i} \quad (7)$$

式中: (\bar{x}, \bar{y}) 为重心坐标; (X_i, Y_i) 为区域内点坐标; M_i 为植被 NPP。

2 结果与分析

2.1 植被 NPP 年际变化

2000 年—2015 年,西辽河流域植被 NPP 年际变化呈先增加后减少再增加的趋势(图 1),波动范围为 156.89~260.90 g C · m⁻² · a⁻¹,平均值为 219.76 g C · m⁻² · a⁻¹,年均增加 6.5 g C · m⁻² · a⁻¹,比全国 2000 年—2015 年年均植被 NPP 低 19.65%(李登科和王钊, 2018),说明西辽河流域植被净初级生产力整体偏低。年均 NPP 在 2000 年—2005 年间显著增加,之后呈波动状态,但整体趋势在增加。年均 NPP 最小为 2000 年的 156.89 g C · m⁻² · a⁻¹,最大为 2015 年的 260.90 g C · m⁻² · a⁻¹。16 年间 NPP 总量均值为 47 282.5 kg C。其中:2015 年 NPP 总量值最大,为 56 136.29 kg C;其次是 2005 年,值为 55 671.7 kg C。值得注意的是,2005 年—2007 年和 2008 年—2010 年间植被年均 NPP 及总量有所降低,可能是受流域气温、降雨量的影响。

如图 2 所示,在 2000 年—2005 年间的气温、降雨量缓慢增加,水热条件较好,更适宜植被生长以及碳的存储,使得年均 NPP 及总量呈增加趋势,与降水量增加趋势相同,在 2005 年达到峰值;2005 年—2007 年间,温度增加显著,降雨量减少,气候干旱,导致土壤水分不足,植被缺水,不利于植被的光合作用及蒸腾等新陈代谢活动,造成植被 NPP 降低;2008 年—2010 年间,温度大幅度减少,降雨量变化异常,导致植被 NPP 降低;2011 年—2015 年间,整体温度、降雨量呈增加趋势,植被 NPP 也呈波动增加趋势。对比年均 NPP 及 NPP 总量与气温、降雨的变化趋势图,发现西辽河植被 NPP 变化与水热条件的变化有关,植被的生长与降水量的变化基本步调一致,流域气候整体呈暖-湿的变化趋势,温度的升高、降雨充足,改善了土壤的水分,加速了土壤有机质的分解及养分的运输。总体上,流域内植被的碳存储能力有所提高。

2.2 西辽河流域 NPP 空间分布

西辽河流域植被 2000 年—2015 年间的平均

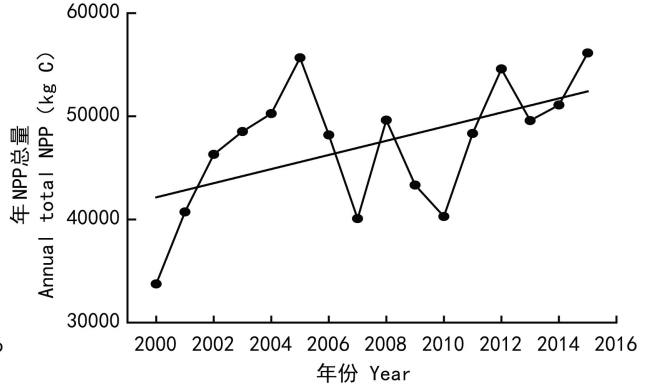
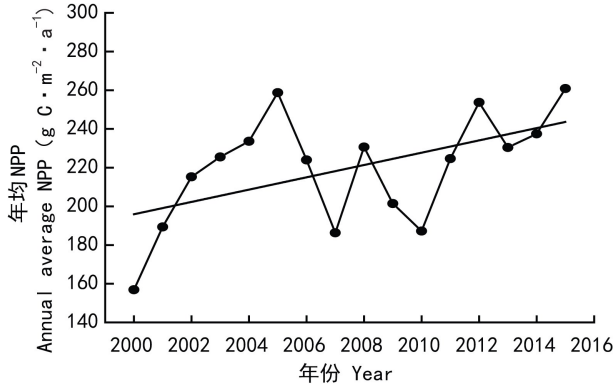


图 1 西辽河流域植被年均 NPP 及年 NPP 总量

Fig. 1 Vegetation annual average NPP and total NPP in the Xiliaohe Basin

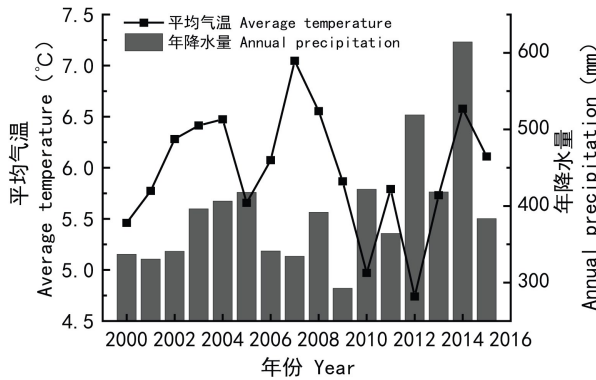


图 2 西辽河流域平均气温及年降水量变化

Fig. 2 Annual variation tendency of average temperature and annual precipitation in the Xiliaohe Basin

NPP 空间分布见图 3。从图 3 可以看出,植被平均 NPP 呈“边缘高、中间低”的特征,均值为 $219.75 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$,变化范围为 $0 \sim 415.93 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 。植被 NPP 高值区域主要分布在流域的水系周边以及西辽河下游区域,年均植被 NPP 在 $250 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以上,植被类型主要是温带落叶阔叶林和温带落叶灌丛,土壤类型主要是风沙土和潮土;低值区主要分布在乌拉吉木伦河、西拉木伦河及老哈河流域,年均植被 NPP 在 $200 \text{ g C} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{a}^{-1}$ 以下,植被类型主要是温带丛生禾草典型草原,土壤类型主要是栗钙土、栗褐土和风沙土。在行政区划上,植被 NPP 高值主要位于通辽市的科尔沁区、科尔沁左翼后旗、双辽市以及赤峰市的喀喇沁旗和宁城县;低值主要位于翁牛特旗、巴林右旗南部以及奈曼旗西部。

通过一元线性回归分析方法,计算得到西辽河流域 16 年间植被 NPP 逐个像元的变化趋势斜率,见图 3。研究区平均 NPP 变化斜率在 $-16.53 \sim 16.65$ 之间,斜率为正的区域面积占比为 95.74%,表明植被 NPP 整体呈增加的趋势,主要分布在平泉县、开鲁县、科尔沁左翼后旗、科尔沁左翼中旗。斜率为负的区域主要位于翁牛特旗、巴林右旗、克什克腾旗,占总面积的 4.26%。

利用变异系数法,计算西辽河流域 2000 年—2015 年植被 NPP 的变异系数(图 4),根据变异性分析植被 NPP 空间稳定性。研究区植被 NPP 变异系数空间分布存在明显差异,介于 $0.06 \sim 3.87$ 之间,大部分区域变异系数较低,在 0.2 以下,说明研究区植被 NPP 处于相对稳定状态,变异系数较高的区域分布与植被 NPP 较低的区域基本一致,主要位于翁牛特旗、巴林右旗南部以及奈曼旗西部,由植被年 NPP 变化趋势(图 3)可知,这部分区域植被处于逐渐退化的趋势,故变异系数较高,空间波动较大。

2.3 不同植被类型 NPP 的演变特征

研究区植被类型主要为草原、栽培植被、阔叶林、灌丛、草甸、针叶林,占研究区总面积比分别为 39.40%、27.20%、15.64%、9.68%、7.11%、0.63%。不同植被类型 NPP 均值大小排序为针叶林>灌丛≡栽培植物≡阔叶林>草甸>草原,针叶林的 NPP 均值最大,草原的最小,其余植被类型的 NPP 均值相差不大,说明固碳能力较强的植被为针叶林,主要是因为针叶林为常绿植物,在一年中生长

差异不大,光合作用较强。不同植被类型 NPP 总量及均值存在一定波动,整体变化趋势与植被 NPP 的年际变化相一致(图 5、图 6)。不同植被类型的 NPP 总量大小与其所占面积比密切相关,排序为草原>栽培植被>阔叶林>灌丛>草甸>针叶林。说明西辽河流域固碳的植被主要是草原、栽培植物以及阔叶林。研究期间,各类植被都呈现出阶梯式增长,与植被年均 NPP 变化特征基本一致,2000 年—2005 年、2010 年—2012 年以及 2013 年—2015 年为增长阶段,2005 年—2007 年以及 2008 年—2010 年为减少阶段。

2.4 不同土壤类型 NPP 的演变特征

不同土壤类型所含有机质、矿物质与水分等组分不同,土壤肥力也不同,会直接影响植被的类型和生长,从而使植被 NPP 存在一定的差异。西辽河流域的土壤类型主要是栗钙土、风沙土、潮土、黑钙土和褐土(图 7),占比分别为 26.45%、21.31%、14.22%、7.95% 和 7.53%。分区统计不同土壤类型下植被的年均 NPP,见表 1。其中,生长在棕壤、褐土和潮土的植被年均 NPP 较高,主要是因为棕壤形成需要较强烈的生物积累作用以及较明显的淋溶和粘化作用。在自然植被下,表层有机质含量较高、植被生长较好;褐土是处于草地和森林的交错地带,容易受水蚀和风蚀的影响,土壤发育较差,而森林相对其他植被类型固碳能力较强;潮土主要分布在地势平坦、土层深厚的区域,适宜大面积耕作,受人为管理,作物生长相对较好。生长在栗钙土和风沙土的植被年均 NPP 较低,主要因为栗钙土是具有栗色腐殖质层和碳酸钙淀积层的钙积土壤,植被是典型的干草原,受农牧业和气候干旱的影响,导致草原产草量较低;风沙土处于土壤发育的初始阶段,风蚀严重,植被极易受破坏,生长不稳定。

2.5 植被 NPP 与气候因子的相关性

2.5.1 植被 NPP 对年均气温的响应 气候环境变化会影响植被的生长环境,从而影响植被的生长活动。西辽河流域年平均气温西高东低,均温为 5.97℃,总体上气候相对干燥(图 8)。对西辽河流域 2000 年—2015 年植被 NPP 像元与逐年降水和年均气温进行相关性分析(图 9),结果表明,植

被 NPP 对温度的响应在空间上呈不均匀分布,正负相关并存。西辽河流域植被 NPP 与温度的相关系数介于 -0.59 ~ 0.65 之间,正相关区域占 51.93%,正相关性较强的区域主要位于巴林左旗、开鲁县和科尔沁区;负相关区域占 47.07%,负相关性较强的区域主要位于翁牛特旗、林西县、扎鲁特旗和科尔沁右翼中旗,在 NPP 与温度的相关性结果中显著正负相关的区域较少,说明流域大部分植被 NPP 与气温达不到置信水平。利用重心模型计算 2000 年—2015 年西辽河流域植被 NPP 与温度的重心迁移轨迹(图 10、表 2、表 3),对比结果表明,2004 年—2007 年植被重心迁移方向与气温重心迁移方向完全一致,2002 年—2003 年、2011 年—2013 年植被重心迁移方向与温度重心迁移方向完全相反,可能是受人为因素的影响,其余各阶段表现出相关。总体来说,植被年均 NPP 与气温的变化关系密切,与气温呈正相关的区域大于负相关区域,表明西辽河流域植被 NPP 对温度的响应主要表现为正效应。

2.5.2 植被 NPP 对年降水量的响应 对西辽河流域 2000 年—2015 年植被 NPP 像元与逐年降水像元的相关性分析(图 9),结果表明植被 NPP 与降水的相关系数介于 -0.65 ~ 0.91 之间,正相关区域占 97.10%,正相关性较强的区域主要位于科尔沁左翼中旗、科尔沁右翼中旗、开鲁县和通榆县,通过 $P < 0.05$ 显著性检验的区域占 40.43%;仅极小部分呈负相关,占研究区总面积的 2.90%,负相关性较强的区域位于克什克腾旗、林西县和巴林右旗,无显著负相关区域。近 16 年来,西辽河流域植被 NPP 对降水的响应与气温相似,整体表现为正效应,且正相关性显著。利用重心模型计算 2000 年—2015 年西辽河流域植被 NPP 与降水的重心迁移轨迹(图 10、表 2、表 3),结果表明 2000 年—2001 年、2005 年—2008 年植被 NPP 重心迁移方向与降水重心迁移方向完全一致,2002 年—2003 年、2012 年—2013 年共两个阶段植被重心迁移方向与降水重心迁移方向完全相反,其余阶段表现出相关,说明西辽河流域植被 NPP 在很大程度上受降水量变化的影响。

综合来看,近 16 年来在西辽河流域内,温度

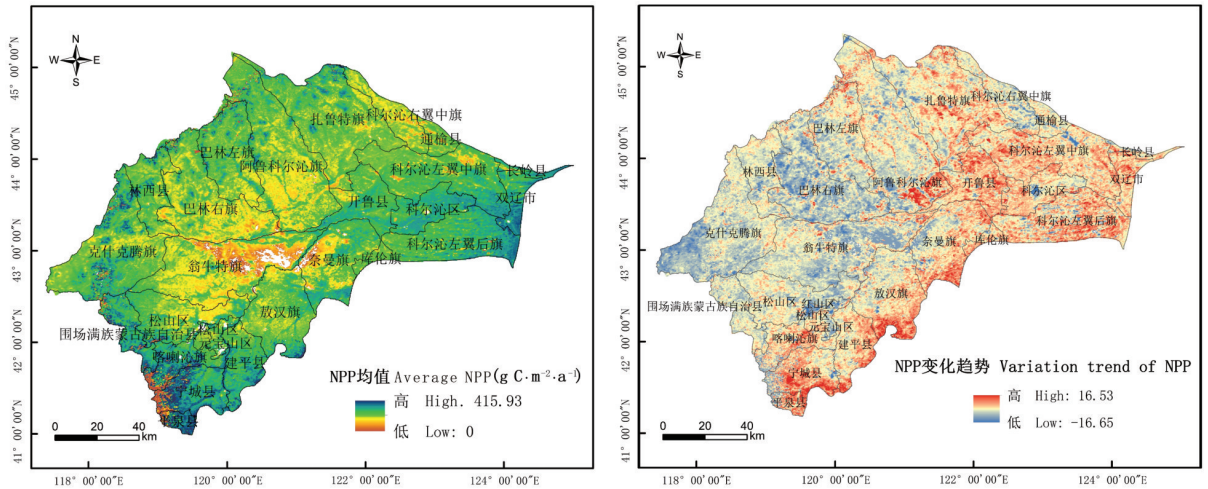


图 3 西辽河流域 2000 年—2015 年 NPP 均值和变化趋势空间分布格局

Fig. 3 Spatial distribution and variation trend of average NPP in the Xiliaohe Basin during 2000–2015

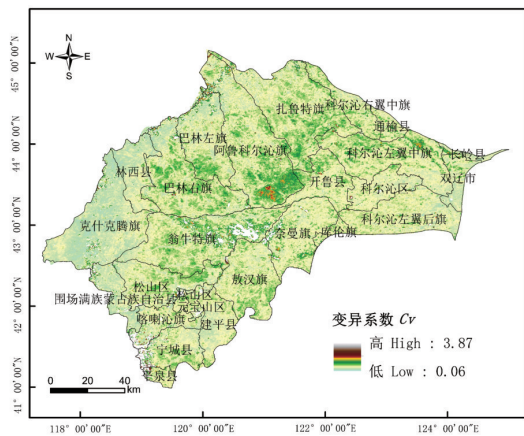


图 4 西辽河流域 2000 年—2015 年 NPP 变异系数
Fig. 4 Coefficient of variation of NPP in the Xiliaohe Basin during 2000–2015

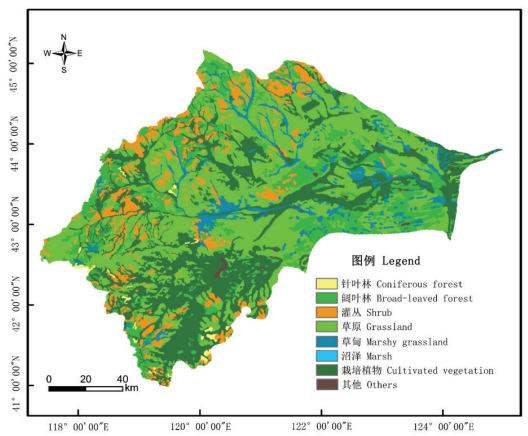


图 5 西辽河流域植被类型 (2001 年)
Fig. 5 Vegetation types in the Xiliaohe Basin (in 2001)

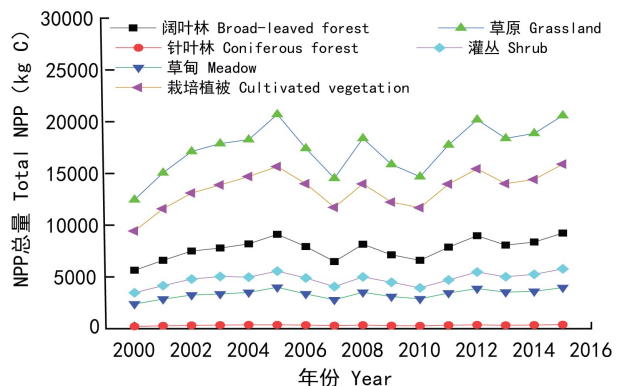
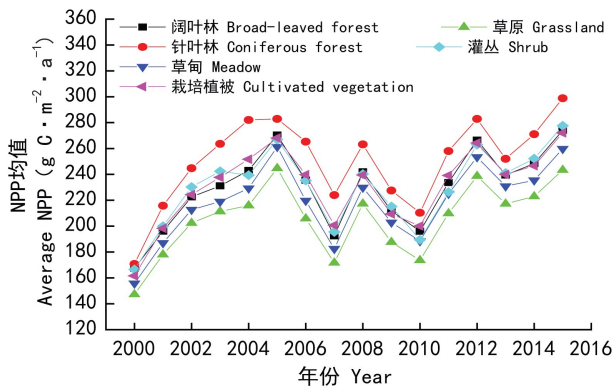


图 6 西辽河流域 2000—2015 年不同植被类型的 NPP 均值及总量

Fig. 6 Average and total NPP of different vegetation types in the Xiliaohe Basin during 2000–2015

和降水与植被 NPP 的相关系数均表现出正相关性大于负相关性,表明区域气候环境有利于植被生长,空间分布上,植被 NPP 和降水的正相关区域的面积高于 NPP 与气温的正相关区域面积,且相关性更显著,说明降水对植被 NPP 的影响范围比气温大,降水是影响植被生长与活力的主导因素,与区域 NPP 关系极为密切。相关性不明显的区域可能受地理位置、经济发展水平和人为因素的影响。西辽河流域主要植被为草地和林地,早期植被退化较为严重,随着三北防护林、退耕还林还草等生态建设工程及相关保护政策实施(吕家欣等, 2020),对流域植被的恢复改善起到了重要作用。

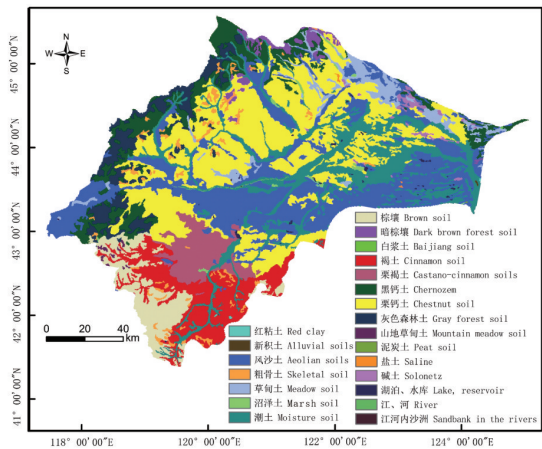


图 7 西辽河流域土壤类型 (1995 年)

Fig. 7 Soil types in the Xiliaohe Basin (in 1995)

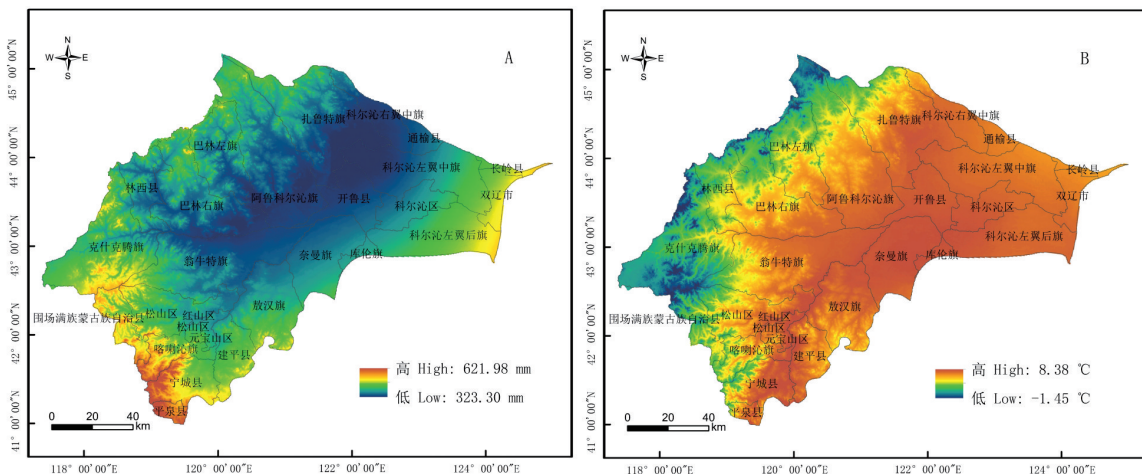


图 8 西辽河流域年均降水量(A)和年均气温(B)空间分布

Fig. 8 Spatial distribution of annual average precipitation (A) and temperature (B) in the Xiliaohe Basin

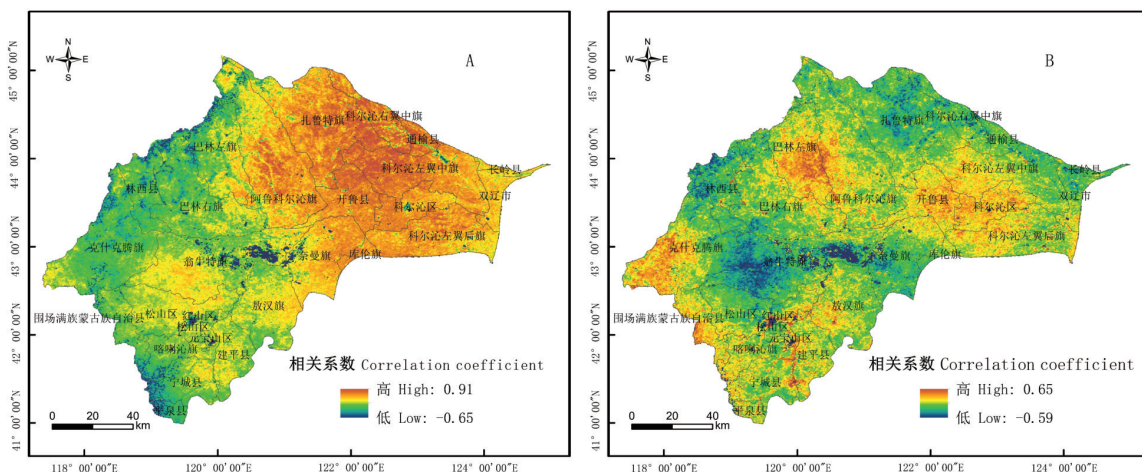


图 9 西辽河流域植被 NPP 与年均降水量(A)、年均气温(B)相关性的空间分布

Fig. 9 Distribution of correlation among vegetation NPP and annual average precipitation (A), temperature (B) in the Xiliaohe Basin

表 1 西辽河流域各土壤类型的植被 NPP

Table 1 Vegetation NPPs in different soil types in the Xiliaohe Basin

项目 Item	土壤类型 Soil types									
	栗钙土 Chestnut soil	风沙土 Aeolian soil	潮土 Moisture soil	黑钙土 Chernozem	褐土 Cinnamon soil	棕壤 Brown soil	灰色森林土 Gray forest soil	栗褐土 Castano-cinnamon soils	草甸土 Meadow soil	
面积比 Area proportion (%)	26.45	21.31	14.22	7.95	7.53	5.14	4.95	4.19	3.52	
NPP 均值 Average NPP ($g C \cdot m^{-2} \cdot a^{-1}$)	202.21	203.62	242.58	231.98	249.63	256.03	239.37	193.20	195.91	
NPP 总量 Total NPP ($kg C \cdot a^{-1}$)	11 716.55	9 124.58	7 479.26	4 030.17	3 961.15	2 774.82	2 573.26	1 692.06	1 517.30	

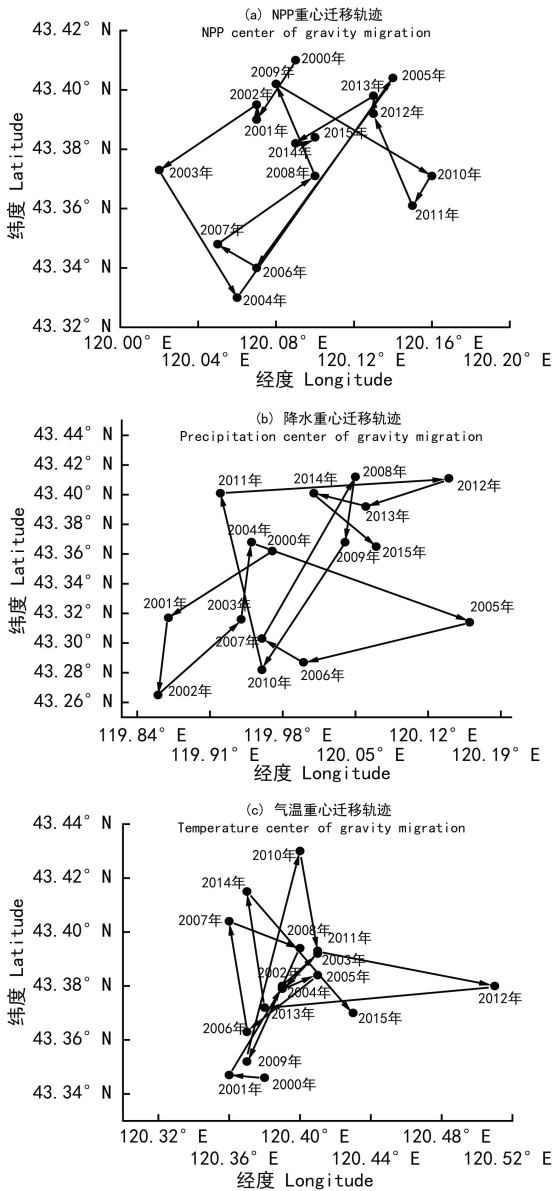


图 10 西辽河流域植被 NPP 与降水和气温的重心迁移轨迹对比

Fig. 10 Comparison of vegetation NPP and precipitation, temperature center of gravity migration in the Xiliaohe Basin

3 讨论与结论

近年来,在全球气候变暖的背景下,中高纬度地区气候变化显著,我国北方农牧交错地带植被 NPP 总体呈增加趋势(Jiang et al., 2020)。西辽河流域植被 NPP 年际变化呈先增加后减少再增加的趋势,空间分布具有异质性,呈“边缘高、中间低”特征,比全国 2000 年—2015 年年均植被 NPP 低 19.65%(李登科和王钊, 2018),说明西辽河流域植被净初级生产力整体偏低,但整体上植被固碳能力有所提高,这与郗延彪等(2018)研究的辽河流域植被净初级生产力的空间变化特征基本一致。西辽河流域是我国生态环境治理与恢复的重点研究区域,1978 年,国家开始实施“三北”防护林,其中西辽河流域内的科尔沁沙地、草原是重点防治区域。2000 年,内蒙古地区实施退耕还林还草工程,2014 年,通辽市进行“双千万亩”综合治理。随着生态建设工程的相继实施以及气候暖-湿化,促进了流域内生态环境的改善。较高的温度,会增强植被的光合作用,充足的水分加快了土壤水分、养分的运输,从而促进植被根系的吸收,增加植被 NPP 的累积。近 16 年来,95.74% 的区域植被生长较好,大部分区域植被 NPP 变异系数较低,研究区植被 NPP 处于相对稳定的状态,这与吕家欣等(2020)对科尔沁沙地植被时空变化的研究结论相符。

降水、气温等水热因子的变化直接决定了植被生长、组织结构以及分布等动态变化(焦珂伟等, 2018)。西辽河流域植被 NPP 年际变化的波

表 2 2000 年—2015 年 NPP 与降水、
气温的重心迁移轨迹对比

Table 2 Comparison of NPP and precipitation, temperature
center of gravity migration from 2000 to 2015

年份 Year	重心迁移方向 Gravity migration		
	植被 NPP Vegetation NPP	降水 Precipitation	温度 Temperature
2000—2001	西南 Southwest	西南 Southwest	西北 Northwest
2001—2002	西北 Northwest	西南 Southwest	东北 Northeast
2002—2003	西南 Southwest	东北 Northeast	东北 Northeast
2003—2004	东南 Southeast	东北 Northeast	西南 Southwest
2004—2005	东北 Northeast	东南 Southeast	东北 Northeast
2005—2006	西南 Southwest	西南 Southwest	西南 Southwest
2006—2007	西北 Northwest	西北 Northwest	西北 Northwest
2007—2008	东北 Northeast	东北 Northeast	东南 Southeast
2008—2009	西北 Northwest	西南 Southwest	西南 Southwest
2009—2010	东南 Southeast	西南 Southwest	东北 Northeast
2010—2011	西南 Southwest	西北 Northwest	东南 Southeast
2011—2012	西北 Northwest	东北 Northeast	东南 Southeast
2012—2013	东北 Northeast	西南 Southwest	西南 Southwest
2013—2014	西南 Southwest	西北 Northwest	西北 Northwest
2014—2015	东北 Northeast	东南 Southeast	东南 Southeast

表 3 2000 年—2015 年 NPP 与降水、气温的
重心迁移相关性对比

Table 3 Correlation between NPP, precipitation, and
temperature center of gravity migration

年份 Year	重心迁移方向 Gravity migration	
	降水 Precipitation	温度 Temperature
2000—2001	完全一致 Fully consistent	相关 Relevant
2001—2002	相关 Relevant	相关 Relevant
2002—2003	完全相反 Fully inconsistent	完全相反 Fully inconsistent
2003—2004	相关 Relevant	相关 Relevant
2004—2005	相关 Relevant	完全一致 Fully consistent
2005—2006	完全一致 Fully consistent	完全一致 Fully consistent
2006—2007	完全一致 Fully consistent	完全一致 Fully consistent
2007—2008	完全一致 Fully consistent	相关 Relevant
2008—2009	相关 Related	相关 Relevant
2009—2010	相关 Relevant	相关 Relevant
2010—2011	相关 Relevant	相关 Relevant
2011—2012	相关 Relevant	完全相反 Fully inconsistent
2012—2013	完全相反 Fully inconsistent	完全相反 Fully inconsistent
2013—2014	相关 Relevant	相关 Relevant
2014—2015	相关 Relevant	相关 Relevant

动趋势与同期气候因子的变化相一致,与降水的关系更为密切,这表明流域生态系统的稳定性易受到气候变化的影响。因植被类型、土壤类型、地形地貌、人类活动等因素的影响,植被 NPP 分布有所差异,不同植被类型 NPP 总量及均值在波动中逐渐增加,整体变化趋势与植被 NPP 年际变化相一致。植被 NPP 均值针叶林的最大,草原的最小。西辽河流域植被类型主要是草原、栽培植物和阔叶林,占研究区总面积比重较大,是研究区内主要的固碳植被类型。生长在棕壤、褐土和潮土的植被年均 NPP 较高,主要是土壤有机质含量高、土壤有肥力,有利于植被根系生长发育,植被 NPP 较高。

在干旱半干旱区,降水是影响植被生长的主要因子,对植被 NPP 的时空分布起重要作用。西辽河流域地处农牧交错地带,植被稀疏、生态环境脆弱,植被生长对气候变化的响应极其敏感。中国北方的温度上升促进了大气环流,导致降水量增加(Jiang et al., 2020),这与本文西辽河的气候变化相吻合,温度升高,年降雨量增加。驱动力分析表明,植被 NPP 与降水、气温的相关系数及重心迁移轨迹存在差异,均表现出正相关性大于负相关性,且相关性更显著,表明区域的气候环境有利于植被生长,相较于气温,降水是影响植被生长与活力的最主要因素,对该区域植被 NPP 变化的影响范围较大,与区域植被 NPP 关系极为密切。中

国北方植被的动态变化主要受降水控制,而南方植被对温度的变化较为敏感(Lin et al., 2016)。

参考文献:

- CHEN MJ, ZHANG QX, WANG Y, et al., 2019. Critical depth of recharge of the vegetation by groundwater in the West Liaohe Plain [J]. *Adv Water Sci*, 30(1): 24–33. [陈敏建, 张秋霞, 汪勇, 等, 2019. 西辽河平原地下水补给植被的临界埋深 [J]. *水科学进展*, 30(1): 24–33.]
- FENG X, LIU G, CHEN JM, et al., 2007. Net primary productivity of China's terrestrial ecosystems from a process model driven by remote sensing [J]. *J Environ Manag*, 85(3): 563–573.
- GUO XY, HE Y, SHEN YP, et al., 2006. Analysis of the terrestrial NPP based on the MODIS in the source regions of Yangtze and Yellow Rivers from 2000 to 2004 [J]. *J Glaciol Geocryol*, 28(4): 512–518. [郭晓寅, 何勇, 沈永平, 等, 2006. 基于 MODIS 资料的 2000—2004 年江河源区陆地植被净初级生产力分析 [J]. *冰川冻土*, 28(4): 512–518.]
- GUO B, ZANG WQ, YANG F, et al., 2019. Spatial and temporal change patterns of net primary productivity and its response to climate change in the Qinghai-Tibet Plateau of China from 2000 to 2015 [J]. *J Arid Land*, 12(1): 1–17.
- HE Z, HE JP, 2017. Remote sensing on spatio-temporal evolution of vegetation cover in the Yellow River Basin during 1982–2013 [J]. *Trans Chin Soc Agric Mach*, 48(2): 179–185. [贺振, 贺俊平, 2017. 近 32 年黄河流域植被覆盖时空演化遥感监测 [J]. *农业机械学报*, 48(2): 179–185.]
- HE JZ, WANG ZX, FU YJ, et al., 2016. Analysis on characteristic of the land use and cover change in the West Liao River Plain [J]. *Chin Rural Water Hydr*, 11: 66–69. [何俊仕, 王志新, 付玉娟, 等, 2016. 西辽河平原土地利用/覆被变化特征分析 [J]. *中国农村水利水电*, 11: 66–69.]
- JIANG RZ, LI XQ, ZHU YA, et al., 2011. Spatial-temporal variation of NPP and NDVI correlation in wetland of Yellow River Delta based on MODIS data [J]. *Acta Ecol Sin*, 31(22): 6708–6716. [蒋蕊竹, 李秀启, 朱永安, 等, 2011. 基于 MODIS 黄河三角洲湿地 NPP 与 NDVI 相关性的时空变化特征 [J]. *生态学报*, 31(22): 6708–6716.]
- JIANG C, WU ZF, CHENG J, et al., 2016. Analyzing the effects of land cover change on vegetation net primary productivity in Guangdong Province [J]. *J Nat Resour*, 31(6): 961–972. [姜春, 吴志峰, 程炯, 等, 2016. 广东省土地覆盖变化对植被净初级生产力的影响分析 [J]. *自然资源学报*, 31(6): 961–972.]
- JIAO KW, GAO JB, WU SH, et al., 2018. Research progress on the response processes of vegetation activity to climate change [J]. *Acta Ecol Sin*, 38(6): 2229–2238. [焦珂伟, 高江波, 吴绍洪, 等, 2018. 植被活动对气候变化的响应过程研究进展 [J]. *生态学报*, 38(6): 2229–2238.]
- JIAO W, CHEN Y, LI WH, et al., 2018. Estimation of net primary productivity and its driving factors in the Ili River Valley, China [J]. *J Arid Land*, 10(5): 781–793.
- JIANG LL, JIAPAER GL, BAO AM, et al., 2017. Vegetation dynamics and responses to climate change and human activities in Central Asia [J]. *Sci Total Environ*, 599–600: 967–980.
- JIANG HG, XU X, GUAN MX, et al., 2020. Determining the contributions of climate change and human activities to vegetation dynamics in agro-pastoral transitional zone of northern China from 2000 to 2015 [J]. *Sci Total Environ*, 718: 134871.
- LI DK, FAN JZ, WANG J, 2011. Variation characteristics of vegetation net primary Productivity in Shaanxi province based on MOD17A3 [J]. *Chin Ecol*, 30(12): 2776–2782. [李登科, 范建忠, 王娟, 2011. 基于 MOD17A3 的陕西省植被 NPP 变化特征 [J]. *生态学杂志*, 30(12): 2776–2782.]
- LI DK, WANG Z, 2018. The characteristics of NPP of terrestrial vegetation in China based on MOD17A3 data [J]. *Ecol Environ Sci*, 27(3): 397–405. [李登科, 王钊, 2018. 基于 MOD17A3 的中国陆地植被 NPP 变化特征分析 [J]. *生态环境学报*, 27(3): 397–405.]
- LI HK, OU B, LIU YT, 2017. Temporal and spatial variation of vegetation NPP in Nanling base on MOD17A3 [J]. *J NF For Univ*, 32(6): 197–202. [李恒凯, 欧彬, 刘雨婷, 2017. 基于 MOD17A3 的南岭山地森林区植被 NPP 时空分异分析 [J]. *西北林学院学报*, 32(6): 197–202.]
- LI SY, WANG XQ, LI B, 2016. Spatio-temporal analysis of vegetation cover change based on MODIS data in Horqin Distinct [J]. *J Yangtze River Sci Res Inst*, 33(2): 118–122. [李生勇, 王晓卿, 李彪, 2016. 基于 MODIS 数据的科尔沁区植被覆盖时空变化分析 [J]. *长江科学院院报*, 33(2): 118–122.]
- LI YQ, 2008. Spatial-temporal change of vegetation in the western Liao River Basin, Northeast China [D]. Changchun: Northeast Normal University. [李艳清, 2008. 西辽河流域植被覆盖的时空变化研究 [D]. 长春: 东北师范大学.]
- LIU YY, ZHANG ZY, TONG LJ, et al., 2020. Spatiotemporal dynamics of China's grassland NPP and its driving factors [J]. *Chin Ecol*, 39(2): 349–363. [刘洋洋, 章钊颖, 同琳静, 等, 2020. 中国草地净初级生产力时空格局及其影响因素 [J]. *生态学杂志*, 39(2): 349–363.]
- LIU YH, ZHANG J, ZHANG CH, et al., 2019. Spatial and temporal variations of vegetation net primary productivity and its responses to climate change in Shandong Province from 2000 to 2015 [J]. *Chin Ecol*, 38(5): 1464–1471. [刘玉红, 张筠, 张春华, 等, 2019. 2000—2015 年山东省植被净初级生产力时空变化及其对气候变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 38(5): 1464–1471.]

- LU G, HAN M, XU ZH, et al., 2019. Spatiotemporal variations of net primary productivity in new wetlands of the Yellow River Delta [J]. *Chin Ecol*, 38(4): 1113–1122. [路广, 韩美, 徐泽华, 等, 2019. 黄河三角洲新生湿地净初级生产力时空变化 [J]. *生态学杂志*, 38(4): 1113–1122.]
- LU JX, LI XF, ZHENG X, et al., 2020. Temporal and spatial changes and their driving forces of vegetation cover in Horqin Sandy Land in recent 40 years [J]. *Chin Ecol*, 39(5): 1399–1408. [吕家欣, 李秀芬, 郑晓, 等, 2020. 近 40 年科尔沁沙地植被时空变化及其驱动力 [J]. *生态学杂志*, 39(5): 1399–1408.]
- LUO Y, ZHANG SL, 2019. Temporal-spatial variation characteristics and driving factors of vegetation NPP in Shandong Province [J]. *Guihaia*, 39(5): 690–700. [骆艳, 张松林, 2019. 山东省植被 NPP 时空分布特征及驱动因素分析 [J]. *广西植物*, 39(5): 690–700.]
- LIN XS, TANG J, LI ZY, et al., 2016. Vegetation greenness modelling in response to interannual precipitation and temperature changes between 2001 and 2012 in Liao River Basin in Jilin Province, China [J]. *Springerplus*, 5(1): 1173.
- MIAO Q, HUANG M, LI RQ, 2010. The impacts of climate change on vegetation net primary productivity of the Yangtze River Basin [J]. *J Nat Resour*, 25(8): 1296–1305. [苗茜, 黄玫, 李仁强, 2010. 长江流域植被净初级生产力对未来气候变化的响应 [J]. *自然资源学报*, 25(8): 1296–1305.]
- SONG Y, MA MG, 2008. Variation of AVHRR NDVI and its relationship with climate in Chinese arid and cold regions [J]. *J Remote Sens*, 12(3): 499–505. [宋怡, 马明国, 2008. 基于 GIMMS AVHRR NDVI 数据的中国寒旱区植被动态及其与气候因子的关系 [J]. *遥感学报*, 12(3): 499–505.]
- WANG J, ZHUO J, HE HJ, et al., 2016. Changes of vegetation net primary productivity and its driving factors from 2000 to 2013 in Qinling mountainous area [J]. *J NF For Univ*, 31(5): 238–245. [王娟, 卓静, 何慧娟, 等, 2016. 2000—2013 年秦岭林区植被净初级生产力时空分布特征及其驱动因素 [J]. *西北林学院学报*, 31(5): 238–245.]
- WANG XC, WANG SD, ZHANG HB, 2013. Spatiotemporal pattern of vegetation net primary in Henan Province of China based on MOD17A3 [J]. *Chin Ecol*, 32(10): 2797–2805. [王新闯, 王世东, 张合兵, 2013. 基于 MOD17A3 的河南省 NPP 时空格局 [J]. *生态学杂志*, 32(10): 2797–2805.]
- WU MH, YANG CB, LIN N, et al., 2016. Characteristics of wetland dynamic variations in western Liaohe River Basin and their influenced factors [J]. *Global Geol*, 35(3): 902–908. [吴梦红, 杨长保, 林楠, 等, 2016. 西辽河流域湿地动态变化特征及影响因素分析 [J]. *世界地质*, 35(3): 902–908.]
- WU YY, LI SY, YU SX, 2016. Monitoring urban expansion and its effects on land use and land cover changes in Guangzhou City, China [J]. *Environ Monit Assess*, 188: 54.
- XIANG HX, WANG X, ZHANG J, et al., 2017. Temporal and spatial patterns of vegetation NPP in the Tumen River Basin from 2000 to 2015 based on MODIS [J]. *Henan Sci*, 35(7): 1125–1131. [相恒星, 王兴, 张晶, 等, 2017. 基于 MOD17A3 的图们江流域植被 NPP 时空变化特征 [J]. *河南科学*, 35(7): 1125–1131.]
- XIE BN, QIN ZF, WANG Y, et al., 2014. Spatial and temporal variation in terrestrial net primary productivity on Chinese Loess Plateau and its influential factors [J]. *Trans Chin Soc Agric Eng*, 30(11): 252–261. [谢宝妮, 秦占飞, 王洋, 等, 2014. 黄土高原植被净初级生产力时空变化及其影响因素 [J]. *农业工程学报*, 30(11): 252–261.]
- XU XB, YANG GS, LI HP, 2011. Impacts of land use change on net primary productivity in the Taihu Basin, China [J]. *Resour Sci*, 33(10): 122–129. [徐昔保, 杨桂山, 李恒鹏, 2011. 太湖流域土地利用变化对净初级生产力的影响 [J]. *资源科学*, 33(10): 122–129.]
- ZHU YH, ZHANG S, SUN B, et al., 2019. Relationship between groundwater depth and characteristics of vegetation and soil in Tongliao plain [J]. *Bull Soil Water Conserv*, 39(1): 29–36. [朱永华, 张生, 孙标, 等, 2019. 西辽河流域通辽平原区地下水埋深与植被及土壤特征的关系 [J]. *水土保持通报*, 39(1): 29–36.]
- ZHANG WK, FENG ZM, YANG YZ, et al., 2010. Land use and cover change over the farming-pastoral zone of northern China [J]. *Resour Sci*, 32(3): 573–579. [张伟科, 封志明, 杨艳昭, 等, 2010. 北方农牧交错带土地利用/覆被变化分析—以西辽河流域为例 [J]. *资源科学*, 32(3): 573–579.]
- ZHANG XL, WANG YC, XIAO WH, et al., 2018. Responses of net primary productivity of natural vegetation to climate change in the Shiyang River basin [J]. *Chin Ecol*, 37(10): 3110–3118. [张雪蕾, 王义成, 肖伟华, 等, 2018. 石羊河流域 NPP 对气候变化的响应 [J]. *生态学杂志*, 37(10): 3110–3118.]
- ZHAO JF, YAN XD, ZHU YJ, 2011. Advance in research on net primary productivity of terrestrial vegetation [J]. *J Desert Res*, 27(5): 780–786. [赵俊芳, 延晓冬, 朱玉洁, 2007. 陆地植被净初级生产力研究进展 [J]. *中国沙漠*, 27(5): 780–786.]
- ZHANG FY, ZHANG ZG, KONG R, et al., 2019. Changes in forest net primary productivity in the Yangtze River Basin and its relationship with climate change and human activities [J]. *Remote Sens*, 11(12): 1451–1469.